



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**PRILOG ISTRAŽIVANJU UTICAJA RAZNOSMERNOG
TEČENJA METALA NA PARAMETRE PROCESA
HLADNOG ISTISKIVANJA DELOVA SLOŽENIH
GEOMETRIJSKIH OBLIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor

Prof. dr Miroslav Plančak

Kandidat

Mr Plavka Skakun

Novi Sad, 2015.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorski rad
Ime i prezime autora: AU	mr Plavka Skakun, dipl. maš. inž.
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	dr Miroslav Plančak, redovni profesor u penziji
Naslov rada: NR	Prilog istraživanju uticaja raznosmernog tečenja metala na parametre procesa hladnog istiskivanja delova složenih geometrijskih oblika
Jezik publikacije: JP	srpski
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Srbija
Uže geografsko područje: UGP	Vojvodina
Godina: GO	2015.
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Fizički opis rada: FO	8/159/145/-/101/- (broj poglavlja / stranica / slika / grafikona / referenci / priloga)
Naučna oblast: NO	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Tehnologija plastičnog deformisanja
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Hladno istiskivanje, ozubljeni elementi, podeljeno tečenje materijala
UDK	

Čuva se: ČU	U biblioteci Fakulteta tehničkih nauka
Važna napomena: VN	
Izvod: IZ	U disertaciji je elaborirana mogućnost primene relaksirajućih otvora kod istiskivanja delova sa ozubljenjem u cilju smanjenja vrednosti parametara procesa. Primenjena su dva modela deformisanja, kada je otvor u pripreмку i kada je otvor u žigu. Metodom gornje granice izvršena je teorijska analiza procesa i kreirano rešenje na osnovu koga su određeni deformaciona sila, pritisak na žig i promena geometrije dela. Pomoću eksperimenta istiskivanja i numeričke simulacije procesa izvršena je verifikacija teorijskog rešenja. Teorijski, eksperimentalni i rezultati simulacije procesa su pokazali da primena relaksirajućih otvora na analizirane tipove ozubljenja dovodi do smanjenja deformacione sile i pritiska u procesu.
Datum prihvatanja teme od strane Senata:	
Datum odbrane: DO	
Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO	<i>predsednik:</i> dr Milentije Stefanović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac <i>član:</i> dr Endre Romhanji, redovni profesor, Tehnološko-Metalurški fakultet Beograd <i>član:</i> dr Atanas Kočov, redovni profesor, Mašinski fakultet, Skoplje <i>član:</i> dr Dragiša Vilotić, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad <i>mentor:</i> dr Miroslav Plančak, redovni profesor u penziji, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

University of Novi Sad
Faculty of Technical Sciences
Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD thesis
Author: AU	MSc Plavka Skakun, mech.eng.
Mentor: MN	PhD Miroslav Plančak, full professor
Title: TI	A contribution to the investigation of divided material flow influence to the process parameters of complex shapes cold extrusion
Language of text: LT	serbian
Language of abstract: LA	eng. / srb.
Country of publication: CP	Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2015.
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description: PD	8/159/145/-/101/- (chapters/pages/pictures/graphs/references /appendixes)
Scientific field SF	Mechanical engineering
Scientific discipline SD	Metal forming
Subject, Key words SKW	Cold extrusion, gear-like elements, divided material flow
UC	

Holding data: HD	The library of Faculty of technical sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Note: N	
Abstract: AB	Possibility of flow relief openings applying in cold extrusion of gear-like elements in order to reduce the values of the process parameters is elaborated in this thesis. Two different deformation models are analysed: when the opening is in the billet and when the opening is in the punch. Upper bound method was applied for the process analysis and determination of deformation force, punch pressure and change of part geometry. Extrusion experiment and numerical simulation of process are used for verification of theoretical solution. Theoretical, experimental and numerical results confirmed that application of flow relief openings enables reduction of deformation force and punch pressure in the process of gear-like elements extrusion.
Accepted on Senate on: AS	
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p><i>president:</i> PhD Milentije Stefanović, full professor, Faculty of engineering, Kragujevac, Serbia</p> <p><i>member:</i> Ph D Endre Romhanji, full professor, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia</p> <p><i>member:</i> PhD Atanas Kočov, full professor, Faculty of Mechanical engineering, Skopje, Macedonia</p> <p><i>member:</i> PhD Dragiša Vilotić, full professor, Faculty of technical sciences, Novi Sad, Serbia</p> <p><i>mentor:</i> PhD Miroslav Plančak, full professor, Faculty of technical sciences, Novi Sad, Serbia</p>

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA	3
2. PRIMENA ISTISKIVANJA U IZRADI OZUBLJENIH ELEMENATA – PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA	5
2.1 PRIMENA METODE GORNJE GRANICE U ANALIZI ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA	11
2.2 PRIMENA RELAKSIRAJUĆIH OTVORA KOD ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA	17
2.3 HIPOTEZA, KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	22
3. ANALIZA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA PRIMENOM METODE GORNJE GRANICE	23
3.1 METODA GORNJE GRANICE	29
3.2 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA METODOM GORNJE GRANICE KADA SE OTVOR NALAZI U PRIPREMKU - MODEL OP	32
3.2.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA - TIP OZUBLJENJA A, MODEL OP	32
3.2.1.1 Određivanje parametara procesa - opšti slučaj	32
3.2.1.1.1 Snaga potreba za unutrašnje deformisanje	36
3.2.1.1.2 Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine	38
3.2.1.1.3 Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama	42
3.2.1.1.4 Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak	45
3.2.1.2 Određivanje parametara procesa - granični slučajevi	45

3.2.1.2.1	Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_i$	45
3.2.1.2.2	Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$	48
3.2.1.2.3	Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces	51
3.2.1.3	Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja A, model OP	54
3.2.2	ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA - TIP OZUBLJENJA B, MODEL OP	59
3.2.2.1	Određivanje parametara procesa- opšti slučaj	59
3.2.2.1.1	Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje	60
3.2.2.1.2	Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine	62
3.2.2.1.3	Snaga potrebna za savladavanje otpora trenjaj	63
3.2.2.1.4	Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak	65
3.2.2.2	Određivanje parametara procesa - granični slučajevi	65
3.2.2.2.1	Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n=r_i$	66
3.2.2.2.2	Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n= r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$	67
3.2.2.2.3	Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces	67
3.2.2.3	Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja B, model OP	68
3.2.3	ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA - TIP OZUBLJENJA C, MODEL OP	70
3.2.3.1	Određivanje parametara procesa- opšti slučaj	70
3.2.3.1.1	Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje	71
3.2.3.1.2	Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine	72
3.2.3.1.3	Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja	73
3.2.3.1.4	Ukupna snaga. deformaciona sila i pritisak	76
3.2.3.2	Određivanje parametara procesa- granični slučajevi	76
3.2.3.2.1	Određivanje parametara procesa- granični slučaj $r_n=r_i$	76
3.2.3.2.2	Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n= r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$	77
3.2.3.2.3	Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces	77

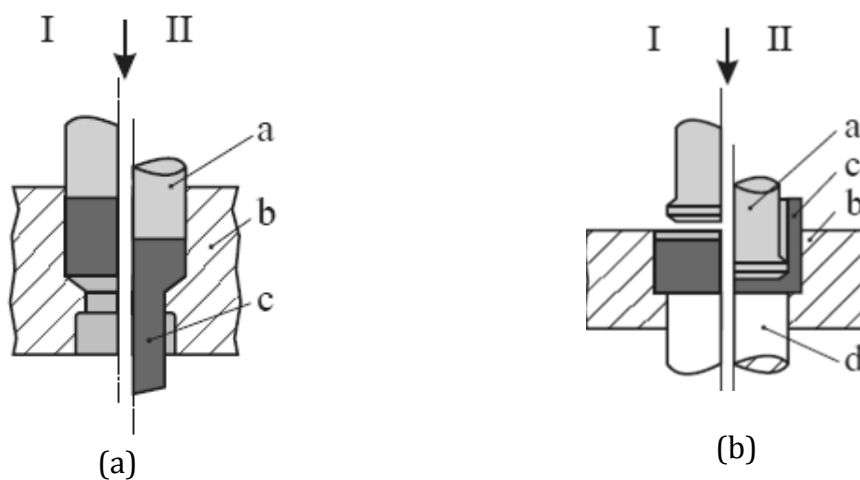
3.2.3.3 Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja C, model OP	78
3.3 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA METODOM GORNJE GRANICE KADA SE OTVOR NALAZI U ŽIGU - MODEL OA	80
3.3.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA - TIP OZUBLJENJA A, MODEL OA	80
3.3.1.1 Određivanje parametara procesa- opšti slučaj	80
3.3.1.2 Određivanje parametara procesa-granični slučajevi	83
3.3.1.2.1 <i>Određivanje parametara procesa- granični slučaj</i> $r_n = r_i$	84
3.3.1.2.2 <i>Određivanje parametara procesa- granični slučaj,</i> $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$	87
3.3.1.2.3 <i>Određivanje parametara procesa- granični slučaj</i> t $= t_{max}$	89
3.3.1.3 Analizatečenja materijala - tip ozubljenja A, model OA	89
3.3.2 ODREĐIVANJE DEFORMACIONE SILE - TIP OZUBLJENJA B I C, MODEL OA	90
3.4 PRIMENA TEORIJSKIH REŠENJA	91
3.4.1 PARAMETRI PROCESA ODREĐENI METODOM GORNJE GRANICE - MODEL OP	91
3.4.1.1 Parametri procesa - tip ozubljenja A, model OP	92
3.4.1.2 Parametri procesa - tip ozubljenja B, model OP	95
3.4.1.3 Parametri procesa - tip ozubljenja C, model OP	98
3.4.2 PARAMETRI PROCESA ODREĐENI METODOM GORNJE GRANICE - MODEL OA	102
3.4.2.1 Parametri procesa - tip ozubljenja A, model OA	102
3.4.2.2 Parametri procesa - tip ozubljenja B, model OA	104
3.4.2.3 Parametri procesa tip ozubljenja C, model OA	107
4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA	110
4.1 MAŠINA, ALAT I PRIPREMCI	111
4.2 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - KONVENCIONALNA METODA	115
4.3 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - MODEL OP	116
4.4 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - MODEL OA	119
5. NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA	124

5.1 SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA - MODEL OP	125
5.1.1 Tip ozubljenja A, model OP	125
5.1.2 Tip ozubljenja B, model OP	126
5.1.3 Tip ozubljenja C, model OP	127
5.2 SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA - MODEL OA	129
5.2.1 Tip ozubljenja A, model OA	129
5.2.2 Tip ozubljenja B, model OA	130
5.2.3 Tip ozubljenja C, model OA	131
5.3 TEČENJE MATERIJALA U PROCESU - REZULTATI SIMULACIJE	132
6. ANALIZA REZULTATA	135
6.1 ANALIZA TEORIJSKIH REZULTATA	135
6.1.1 Analiza teorijskih rezultata - model OP	135
6.1.2 Analiza teorijskih rezultata - model OA	137
6.1.3 Uporedna analiza teorijskih modela deformisanja OP i OA	137
6.2 ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA	139
6.3 ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA	140
6.4 UPOREDNA ANALIZA TEORIJSKIH, EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA ZA TIP OZUBLJENJA A	141
6.4.1 Uporedna analiza rezultata - tip ozubljenja A, model OP	141
6.4.2 Uporedna analiza rezultata - tip ozubljenja A, model OA	145
7. ZAKLJUČAK	148
8. LITERATURA	152

1. UVOD

Metode Tehnologije plastičnog deformisanja široko su zastupljene u proizvodnji metalnih delova zbog niza prednosti koje njihova primena donosi. Na prvom mestu su ušteda u materijalu, vremenu izrade, energiji, a kod metoda koje se izvode u hladnom stanju i visok kvalitet i tačnost obrađenih delova, kao i poboljšane mehaničke karakteristike materijala. Ovoj grupi metoda pripada i hladno istiskivanje.

Hladno istiskivanje je proces u kome se pod dejstvom opterećenja materijal dovodi u plastično stanje i primorava da ističe kroz predviđene otvore u alatu [82]. Jedna od podela hladnog istiskivanja je na istosmerno, suprotnosmerno, radijalno, kombinovano. Kriterijum za ovu podelu je smer tečenja materijala u procesu u odnosu na smer kretanja elemenata alata. Na slici 1.1 prikazani su procesi istosmernog (1.1a) i suprotnosmernog istiskivanja (1.1b). Kao što se vidi na slici osnovni elementi alata su žig, matrica i izbacivač.



Slika 1.1 - Istosmerno (a) i suprotnosmerno (b) istiskivanje [82]
a - žig, b - matrica, c - obradak, d - izbacivač

Metoda hladnog istiskivanja prvi put se spominje u XVIII veku kada je ovaj postupak patentiran za izradu cevi od olova [100]. Do XX veka ova metoda je primenjivana na obojene metale i njihove legure da bi se dvadesetih godina prošlog veka pojavili prvi patenti za hladno istiskivanje čelika. Glavna prepreka primene ove metode na čelične materijale bila je visoka vrednost pritiska na kontaktnoj površini između obratka i alata koja je onemogućavala da se održi neprekidan sloj sredstva za podmazivanje. Taj problem rešen je tridesetih godina XX veka u Nemačkoj, kada je Fritz Singer razvio i patentirao sistem za podmazivanje [44], [96] koji je omogućio zadržavanje sredstva za podmazivanje na površini dela koji se obrađuje čak i pod visokim pritiscima koji se javljaju u ovom procesu. Razvijanjem i primenom novog načina podmazivanja - fosfatiranja - omogućena je primena ove metode i na čelične materijale. Međutim, trebalo je da prođe određeno vreme da ovaj način podmazivanja nađe primenu u industriji, tako da tek 50-tih godina prošlog veka počinje uzlazna putanja primene istiskivanja. Značajniji porast primene istiskivanja dolazi sa ekspanzijom automobilske industrije [14], [96].

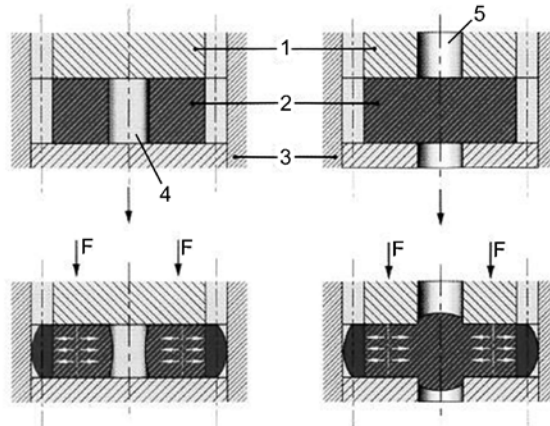
Kao što je na početku ova metoda primenjivana na mekše materijale koji su u procesu deformisanja iziskivali niže vrednosti deformacione sile, da bi kasnije bila osvojena i tehnologija istiskivanja čeličnih materijala, slična situacija je bila i sa oblikom delova koji se proizvode. Prvobitna proizvodnja obuhvatala je delove jednostavnog rotaciono simetričnog oblika, da bi sa primenom novih mogućnosti za podmazivanje i poboljšanjem alata bila omogućena proizvodnja i kompleksnijih oblika. Jedan od prvih radova u kojima se opisuje proces hladnog oblikovanja ozubljenih elemenata objavljen je 1975. godine [16] i od tog doba se nastavlja istraživanje primene istiskivanja na delove složene konfiguracije.

Poslednjih decenija dvadesetog veka ova metoda se primenjuje za izradu zupčanika i ozubljenih elemenata koji su spremni za ugradnju ili zahtevaju relativno malu obradu jednostavnih površina. To je tzv. „Net Shape” i „Near Net Shape” proizvodnja delova. Da bi se dobio „Net Shape” deo potrebno je uzeti u obzir veliki broj faktora koji utiču na proces kao što su materijal obratka, alat, mašina, sredstvo za podmazivanje, pa i sama metoda [13,36,54].

Jedan od problema koji se javlja kod istiskivanja delova složenog oblika je mogućnost da materijal ne ispuni u potpunosti matricu i da obradak nakon istiskivanja ne bude veran negativ alata. Ovaj problem se javlja na samom kraju procesa, kada u matrici preostanu relativno male zapremine koje nisu popunjene, te njihovo popunjavanje iziskuje veliku deformacionu silu. Taj fenomen se karakteriše naglim porastom sile na kraju procesa u trenutku kada počne završno popunjavanje matrice i u literaturi se naziva „corner fillilng”. Zbog pojave visokih vrednosti deformacione sile na kraju procesa, osim što može da se dobije neupotrebljiv deo jer materijal nije popunio matricu, povećava se i habanje alata, što dovodi do potrebe za njegovim češćim održavanjem i povećanjem cene procesa. Jedan od načina da se ovaj negativan uticaj eliminiše ili barem smanji je primena postupaka koji omogućavaju tzv. podeljeno tečenje materijala (engl. „divided flow”) [63].

1.1 PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

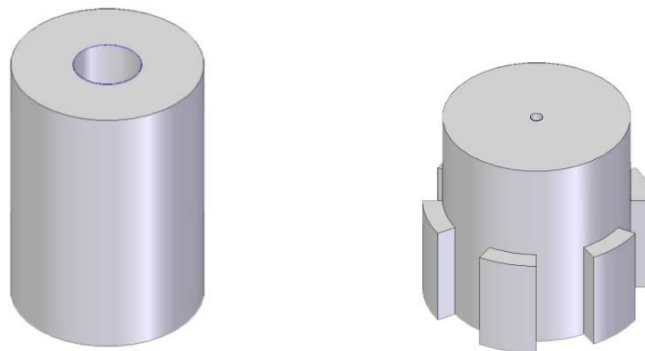
Kada u procesu istiskivanja ozubljenja u obratku ili alatu postoji relaksirajući otvor (engl. „relief hole”), materijal ima mogućnost da, osim što popunjava šupljine u matrici u kojima se formira ozubljenje, popunjava i otvor u obratku, odnosno alatu (slika 1.2). Zbog toga dolazi do pojave koja se naziva podeljeno tečenje materijala. Podeljeno tečenje podrazumeva da u obratku postoji neutralna površina u odnosu na koju materijal menja smer kretanja i na kojoj je radijalna komponenta brzine jednaka nuli. Ukoliko se takav način tečenja materijala ostvari, potrebna deformaciona sila za istiskivanje dela je manja.



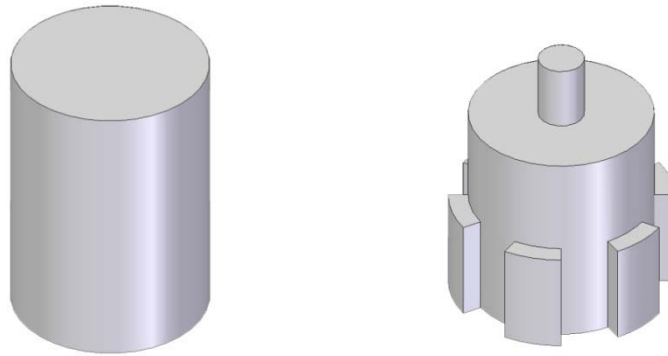
1- Žig 2 - Matrica 4 - Otvor u obratku 5 - Otvor u alatu

Slika 1.2 - Podeljeno tečenje materijala kod istiskivanja ozubljenja [49]

U ovom radu analiziran je uticaj otvora u pripremkama i žigu na parametre procesa (deformacionu silu i pritisak na žigu) i tečenje materijala kod istiskivanja delova sa ozubljenjem koji su usvojeni kao reprezentanti delova složenog geometrijskog oblika. Model deformisanja kada je otvor u pripremkama označen je sa OP (slika 1.3), dok je model deformisanja kada je otvor u alatu, odnosno žigu označen sa OA (slika 1.4). Kod prvog modela deformisanja postoji otvor u centru pripremkama, dok kod drugog modela deformisanja otvor postoji u žigu, a pripremkama je pun deo. Kao što je na slici 1.3 prikazano kod modela deformisanja OP pretpostavljeno je da će se ozubljenje formirati pre nego što se otvor u sredini dela popuni.



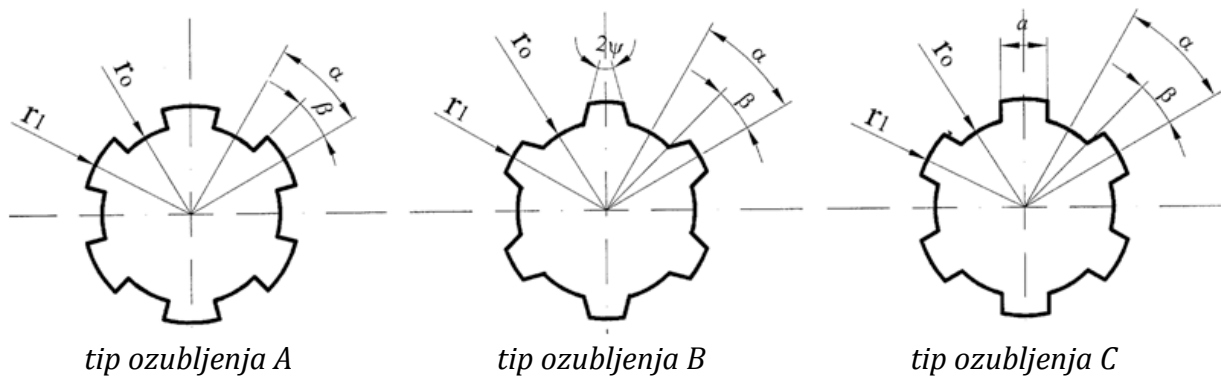
Slika 1.3 - Pripremkama i gotov deo kod modela deformisanja OP (otvor u pripremkama)



Slika 1.4 - Pripremak i gotov deo kod modela deformisanja OA (otvor u žigu)

Svaki od ovih modela deformisanja primenjen je na tri tipa ozubljenih elemenata (slika 1.5):

- tip A - ozubljenje sa ravnim bokovima u radijalnom pravcu,
- tip B - ozubljenje sa ravnim kosim bokovima i
- tip C - ozubljenje sa ravnim paralelnim bokovima



Slika 1.5 - Analizirani tipovi ozubljenja

Cilj ovog rada je kreiranje teorijskog rešenja koje će opisati svaki od navedenih modela deformisanja za prikazane tipove ozubljenja i omogućiti određivanje potrebne deformacione sile i pritiska na žig, kako bi se pokazalo da omogućavanje podeljenog tečenja materijala primenom ovih modela deformisanja utiče na smanjenje potrebne deformacione sile i pritiska na alat.

2. PRIMENA ISTISKIVANJA U IZRADI OZUBLJENIH ELEMENATA - PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

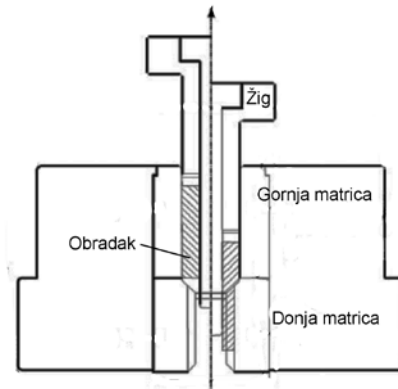
Sredinom sedamdesetih godina prošlog veka objavljeni su neki od prvih radova vezanih za tematiku hladnog oblikovanja zupčanika [16], [92]. U svom radu [92] Skrocki je prikazao tehnologiju razvijenu za oblikovanje konusnih zupčanika sa kosim zubima. Delovi proizvedeni na ovaj način imali su znatno poboljšane mehaničke karakteristike u odnosu na konvencionalno proizvedene zupčanike, ali je još uvek bila potrebna naknadna obrada skidanjem strugotine. Bez obzira na tu činjenicu, u tom trenutku takav način proizvodnje konusnih zupčanika predstavljao je bitan pomak u odnosu na dotadašnju praksu proizvodnje kada se celokupan zupčanik proizvodio skidanjem strugotine.

Prema Kudo-u [53] početkom 80-tih godina u Japanu već je bila razvijena proizvodnja tzv. „Near-net-shape” delova, odnosno delova kod kojih je nakon istiskivanja bila potrebna samo obrada skidanjem strugotine ravnih, cilindričnih ili konusnih površina. 90-tih godina termini „Net shape forming” i „Near net shape forming” su uveliko zaživeli, ali prema Geigeru [37] bilo je potrebno dalje razvijanje tehnologije da bi se postigla proizvodnja većeg broja različitih delova spremnih za ugradnju.

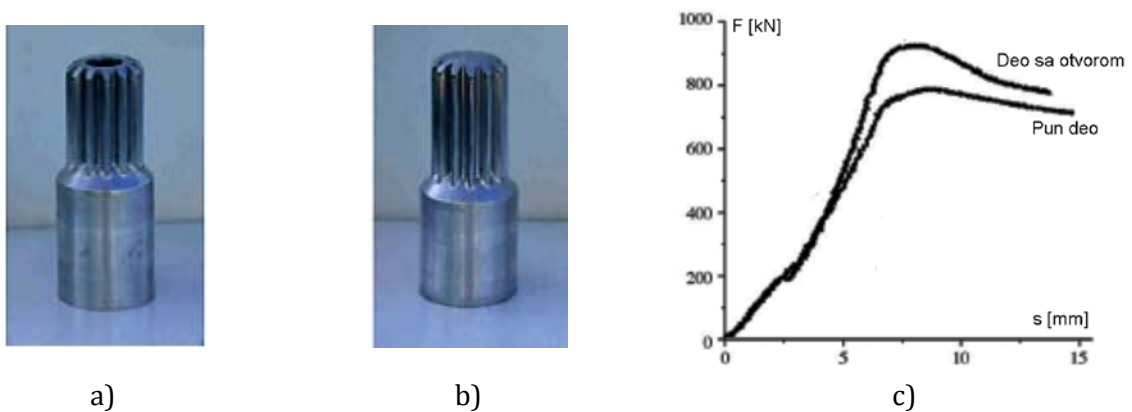
Istiskivanjem se proizvode razni oblici ozubljenih elemenata (cilindrični zupčanici, konusni zupčanici, vratila sa spoljašnjim i unutrašnjim ozubljenjem), a metode koje se najčešće koriste su istosmerno istiskivanje, radijalno istiskivanje, kao i kombinacija ove dve vrste istiskivanja. U nastavku će biti prikazana primena istiskivanja u izradi ozubljenih elemenata, kao i neke modifikovane varijante ove metode.

Proces istosmernog istiskivanja zupčanika prikazan je u radovima [93], [94]. Autori Song i Im razvili su sistem na bazi metode konačnih elemenata koji omogućava

definisane potrebne tehnologije i alata kod istiskivanja cilindričnih zupčanika sa i bez otvora. Primenom ovog sistema definisani su elementi alata (slika 2.1) i izveden eksperiment istiskivanja ozubljenih delova. Na slici 2.2 prikazani su delovi dobijeni u eksperimentu istiskivanja (deo sa otvorom prikazan je pod a), deo bez otvora pod b)), kao i promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za ova dva procesa (slika 2.2 pod c)).



Slika 2.1 - Elementi alata korištenog u eksperimentu istosmernog istiskivanja cilindričnog zupčanika sa otvorom [94]

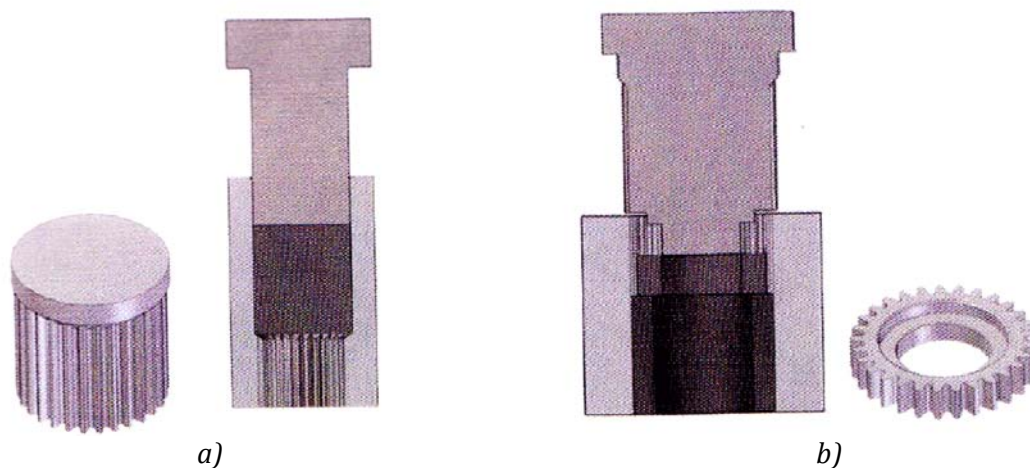


Slika 2.2 - Izgled uzoraka nakon eksperimenta istiskivanja i promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata registrovana u eksperimentu [94]

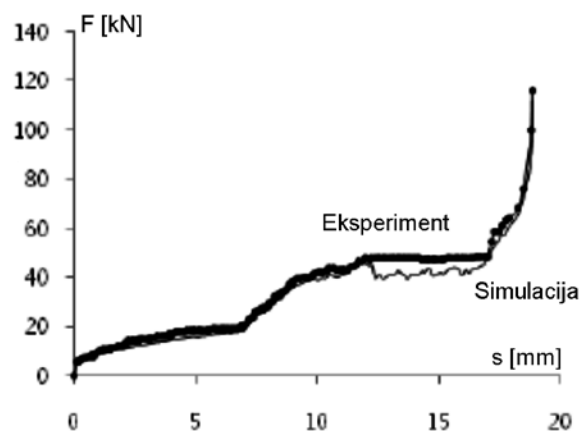
Eksperiment istiskivanja potvrdio je da alat definisan na osnovu razvijenog sistema omogućava dobijanje delova bez grešaka, odnosno da je ozubljenje istisnuto u eksperimentu u potpunosti formirano. U procesu istiskivanja šupljeg dela potrebna je veća deformaciona sila zbog savladavanja dodatnog otpora trenja između trna koji je potreban da se očuva centralni otvor u obratku i materijala obratka (slika 2.2 c). Sličan sistem autori su razvili i za istiskivanje konusnih zupčanika [95]. Razvijanjem modela za predviđanje maksimalne sile i efektivnog napona u procesu istiskivanja konusnih zupčanika bavili su se i autori u radu [101], dok su Alves i saradnici razvili program baziran na metodi konačnih elemenata koji se primenjuje u procesima istiskivanja [5,6].

U radu [86] prikazana je primena dva načina istiskivanja za izradu ozubljenih delova. Autori su primenom numeričke simulacije analizirali tečenje materijala i

popunjavanje matrice materijalom kod istosmernog istiskivanja cilindričnih punih zupčanika i radijalnog istiskivanja cilindričnih zupčanika sa centralnim otvorom (slika 2.3) pri čemu su u analizi korištena dva različita materijala. Kao jedna od ocena numeričkih rezultata upoređeni su profili zuba dobijeni u simulaciji sa delovima istisnutim u eksperimentu. Ovi rezultati pokazali su dobro slaganje. Promena deformacione sile određena na osnovu numeričke simulacije pokazala je da je karakter krivih koje pokazuju promenu sile u zavisnosti od hoda za ova dva procesa različit. Kod istosmernog istiskivanja sila raste do trenutka kada materijal ispuni početni deo alata u kome se formiraju zubi, nakon čega je porast sile veoma mali, kriva je skoro horizontalna (slično kao karakter F-s krive za istiskivanje punog dela na slici 2.2 c). Kod radijalnog istiskivanja ozubljenja na dijagramu mogu da se uoče tri faze procesa. S obzirom da se ovde radio o istiskivanju sa ožlebljenim žigom, na početku procesa materijal postepeno dolazi u kontakt sa njim, što utiče na to da je porast sile u prvoj fazi istiskivanja mali. U drugoj fazi ozubljenje se skoro u potpunosti popunjava tako da je u toj fazi i porast sile značajniji, da bi u poslednjoj, trećoj fazi koju karakteriše tzv. „corner filling” bio nagli porast sile. Takav karakter krive u eksperimentu i numeričkoj simulaciji radijalnog istiskivanja dela sa dva zuba ostvaren je i u radu [43], slika 2.4.



Slika 2.3 - Istiskivanje zupčanika a) istosmerno b) radijalno [86]



Slika 2.4 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda žiga kod radijalnog istiskivanja ozubljenog elementa [43]

Nova metodologija istiskivanja cilindričnih zupčanika sa kosim zubima predložena je u radu [45]. Analizirajući rad autora koji su se prethodno bavili ovom tematikom, Jung i saradnici došli su do zaključka da je jedan od glavnih nedostataka kod istiskivanja cilindričnog zupčanika sa kosim zubima u jednoj fazi veliko opterećenje alata koje izaziva intenzivno habanje, pa i oštećenje alata. Zbog toga su proces podelili na dve faze. U prvoj se formira cilindričan zupčanik sa ravnim zubima, koji se koristi kao pripremak u drugoj fazi u kojoj se istiskivanjem koje uključuje i torziju dela, dobija cilindrični zupčanik sa kosim zubima (slika 2.5).



Slika 2.5 - Istiskivanje cilindričnih zupčanika sa kosim zubima a) izgled dela nakon prve faze b) izgled dela nakon druge faze [45]

Ovakva tehnologija zahteva i dodatnu termičku obradu i podmazivanje između prve i druge faze. U radu je prikazano određivanje deformacione sile metodom gornje granice za drugu fazu procesa, rezultati numeričke simulacije ove faze, kao i eksperimentalna provera ovih rezultata. Uporedni rezultati su pokazali dobro slaganje. Primena ove metode je zbog smanjenja potrebne deformacione sile uticala na produženje radnog veka alata, ali je osnovni nedostatak u tome što primena dva alata poskupljuje proizvodnju. Autori smatraju da u masovnoj proizvodnji zupčanika to ne bi trebalo da utiče na cenu dela.

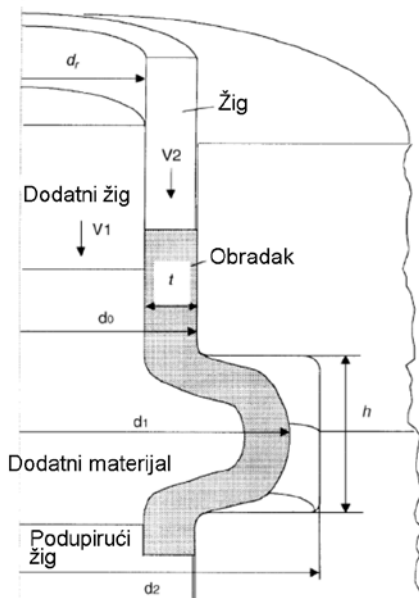
Još jedan način za smanjenje potrebne deformacione sile u procesu istiskivanja zupčanika iznet je u radu [41]. Autori su predložili primenu različitih oblika čela žiga u procesu istiskivanja cilindričnih zupčanika sa pravim zubima. Osim istiskivanja sa ravnim čelom žiga, numerička simulacija procesa i eksperiment su izvedeni i za proces istiskivanja kada na čelu žiga postoji konusno udubljenje i kada je profil površine čela žiga u obliku slova w. Rezultati su pokazali da deo kod koga je žig imao konusno udubljenje ima najbolje popunjavanje matrice i kao nastavak istraživanja predloženo je izvođenje eksperimenta u kome su i žig i matricaprofilisani. Na slici 2.6 je prikazan izgled uzorka koji je formiran žigom sa konusnim udubljenjem.



Slika 2.6 - Cilindrični zupčanik dobijen istiskivanjem žigom sa konusnim udubljenjem [41]

U radu [51] iznet je niz primera primene hladnog istiskivanja u izradi delova za automobilsku industriju uz konstataciju da, ukoliko je potrebno više operacija za izradu jednog dela, pronalaženje optimalnog redosleda operacija može znatno da utiče na kvalitet dobijenog dela, kao i primena kombinacije različitih vrsta istiskivanja.

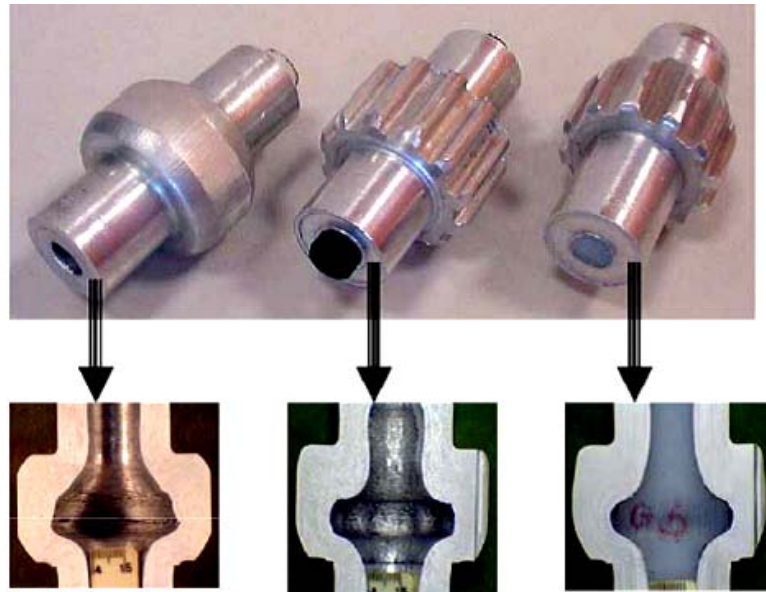
U radu [58] prikazano je radijalno istiskivanje šupljeg vratila sa ozubljenjem uz delovanje dodatnog pritiska. Kod ove metode kao pripremak se koristi cilindričan deo sa centralnim otvorom. Autori su u prethodnim istraživanjima [8,85] ovu metodu koristili za istiskivanje rotaciono simetričnih šupljih debelozidnih delova. Rezultati tih istraživanja omogućili su primenu radijalnog istiskivanja uz delovanje dodatnog pritiska i na istiskivanje ozubljenih delova. Na slici 2.7 prikazan je princip izvođenja ove metode, a na slici 2.8 izgled pripremkama i gotovog dela. Kao što se na slici 2.7 vidi, osim žiga koji deluje na zid šupljeg pripremkama, u ovoj metodi postoji i dodatni, deformabilan materijal (plastika ili guma) koji ispunjava unutrašnjost pripremkama i zbog koga u procesu postoji dodatni žig. Bez primene dodatnog materijala tokom procesa istiskivanja ne bi ostao očuvan unutrašnji prečnik i radijalni otvori u matrici bili bi u potpunosti ispunjeni materijalom. Primenom ove metode dodatni materijal radijalno ističe kao i osnovni metalni materijal i na taj način omogućava da proizvedeni deo u delu gde postoji radijalno isticanje materijala ima manju debljinu zida nego u slučaju konvencionalnog radijalnog istiskivanja. Na slici 2.9 prikazani su poprečni preseki dobijenih ozubljenja, pri čemu su prvi i treći deo kao centralni materijal imali plastiku (polietilen), a drugi deo je kao centralni materijal imao gumu. Na osnovu izgleda poprečnog preseka vidi se da se za ovu vrstu istiskivanja guma pokazala kao pogodniji materijal. Ovu metodu moguće je primeniti i na istiskivanje ozubljenja sa evolventnim zubima.



Slika 2.7- Radijalno istiskivanje uz delovanje dodatnog pritiska [58]

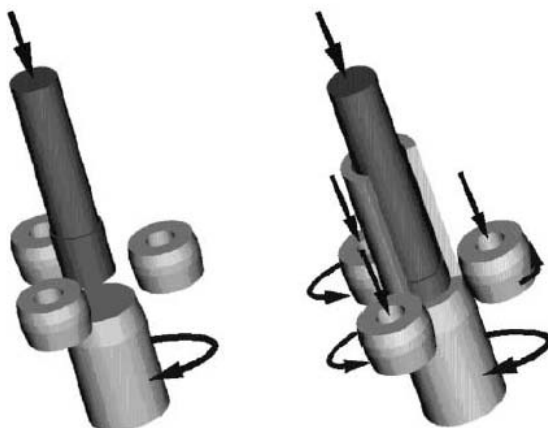


Slika 2.8 - Pripremak i gotov deo dobijen metodom radijalnog istiskivanja uz delovanje dodatnog pritiska [58]



Slika 2.9 - Primena radijanog istiskivanja uz delovanje dodatnog pritiska sa različitim dodatnim materijalima [58]

Specijalna vrsta istiskivanja pomoću valjaka, tzv. „spin” istiskivanje prikazano je u radu [62], slika 2.10, dok su delovi dobijeni ovom metodom prikazani na slici 2.11. Ova metoda se koristi za izradu unutrašnjih ozubljenja i izvodi se i u toplom i u hladnom stanju. U ovoj obradi formira se šuplji deo sa unutrašnjim profilom pod dejstvom parcijalnog pritiska koji proizvode valjci na spoljašnjoj površini neobrađenog priprema, dok se unutrašnjost formira pod dejstvom trna koji se istovremeno i sinhronizovano sa valjcima pomera u aksijalnom pravcu. Metoda se može primeniti i na teže obradivim materijalima zbog parcijalnog delovanja alata, a oblik unutrašnjeg profila zavisi od oblika trna, tako da se unutrašnji profil može varirati.



Slika 2.10 - „Spin” istiskivanje [62]



Slika 2.11 - Delovi dobijeni „spin” istiskivanjem [62]

2.1 PRIMENA METODE GORNJE GRANICE U ANALIZI ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA

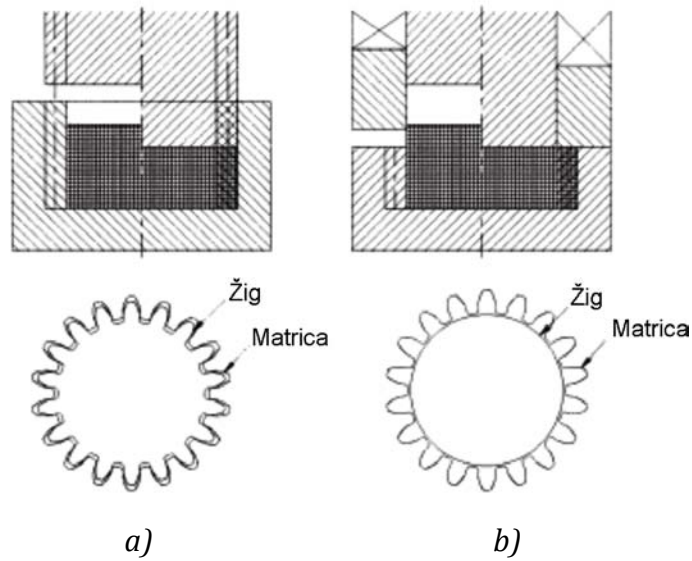
Metodu gornje granice primenjivali su brojni autori kod definisanja potrebne deformacione sile i pritiska u analizi procesa istiskivanja ozubljenih elemenata. Kod metode gornje granice veoma je važna podela obratka na zone deformisanja i pretpostavljanje funkcija komponenti brzine po tim zonama. Od pretpostavljenih komponenti brzine zavisice i tačnost ukupnog rešenja na osnovu koga se određuje deformaciona sila u procesu.

Među prvim radovima u kojima je metoda gornje granice primenjena na izradu delova složene konfiguracije su rad Sagara i Juneje [88] koji se odnosi na istiskivanje osmougaoih oblika i rad Grovera i Juneje [38] koji se odnosi na istiskivanje dela koji ima zube sa ravnim kosim bokovima. U radu [38] autori su za pretpostavljeno polje brzine odredili promenu pritiska na žigu za slučaj da se povećava broj zuba, ali nije postojala eksperimentalna provera teorijskih rezultata.

Na njihov rad nadovezali su se Chitkara, Bhutta i Kim koji su primenili metodu gornje granice za određivanje deformacione sile u procesu istiskivanja dela sa spoljašnjim ozubljenjem sa zubima sa ravnim bokovima [28, 29, 30], u procesu istiskivanja cilindričnih zupčanika sa pravim zubima [31,32,33], kao i u procesu kovanja delova sa trougaonim, kvadratnim, šetougaoim i osmougaoim „glavama” [27]. Za svaki analizirani deo predložili su nekoliko različitih polja brzine, pri čemu je evolventni oblik zuba pretpostavljen kao pravolinijski. Teorijsko rešenje je pokazalo dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, osim u poslednjoj fazi procesa, što je ukazalo na potrebu za uvođenjem dodatnih zona u rešenju metodom gornje granice koje bi omogućile da se i ta faza procesa adekvatno opiše teorijskim rešenjem.

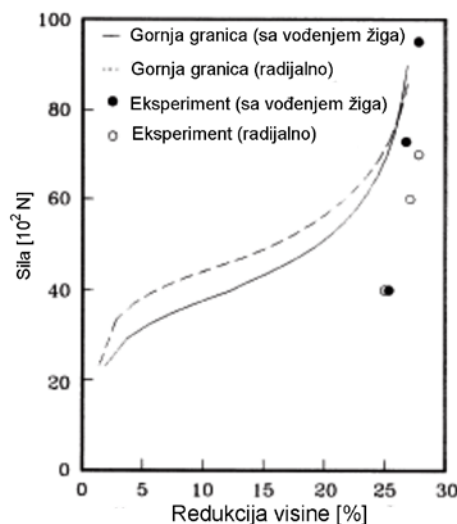
Rezultate primene gornje granice kod istiskivanja cilindričnih zupčanika, kao i eksperimentalnu proveru teorijskih rezultata prikazali su J.C. Choi i Y. Choi sa saradnicima u brojnim radovima [19, 20, 21, 22, 23,24]. U radu [20] predloženo je rešenje metodom gornje granice za proces istiskivanja cilindričnih zupčanika, pri čemu je pretpostavljeno polje brzine sa osam zona deformisanja i izvršena eksperimentalna provera parametara procesa određenih na osnovu teorijskog rešenja. Ono što je važno ovde napomenuti je da su autori uzeli u obzir evolventni oblik zuba zbog čega su eksperimentalni i teorijski rezultati pokazali dobro slaganje. U nastavku istraživanja [19] predloženo polje brzine je pojednostavljeno smanjivanjem broja zona, ali to nije uticalo na tačnost rezultata koji su eksperimentalno provereni. Uporedni prikaz dva načina istiskivanja cilindričnih zupčanika (slika 2.12) prikazan je u radu [22]. Kod prvog načina istiskivanja (slika 2.12 a) i žig i matrica imaju ozubljeni deo, dok je prečnik pripremka jednak unutrašnjem prečniku ozubljenog dela. U ovom slučaju i žig i matrica formiraju zube koji se tokom istiskivanja formiraju po čitavoj visini dela. Kod drugog načina istiskivanja žig je cilindričan i prečnik mu je jednak unutrašnjem prečniku ozubljenja. Materijal se radijalno istiskuje i zubi se formiraju samo u matrici. Za oba načina istiskivanja određeno je rešenje metodom gornje granice, pri čemu je pretpostavljeno rešenje za deo sa centralnim otvorom. U skladu sa time napravljen je i

alat sa centralnim trnom koji je onemogućavao da se centralni otvor popuni materijalom.



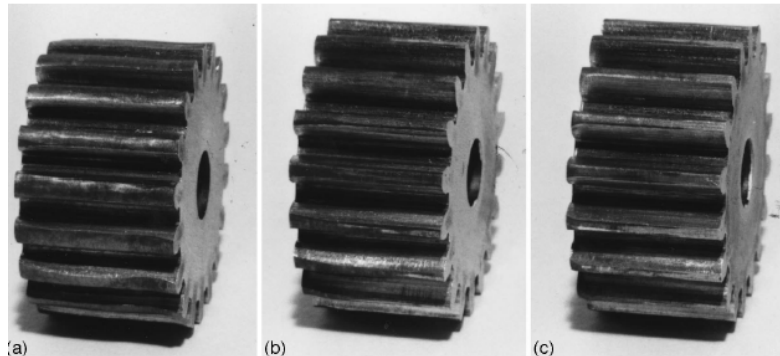
Slika 2.12 - Dva načina istiskivanja cilindričnih zupčanika [22]

Na slici 2.13 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za oba modela deformisanja na kome su vrednosti sile koje su autori odredili u eksperimentu i na osnovu metode gornje granice. Eksperimentalne vrednosti sile prikazane su za završnu fazu procesa. Kao što je i očekivano teorijske sile predviđaju veću potrebu silu, ali ono što je važno kod teorijskog rešenja je to da dobro opisuje proces na kraju istiskivanja, kada dolazi do porasta deformacione sile. Takođe, kod istiskivanja zupčanika na način prikazan na slici 2.12 pod a) potrebna je manja deformaciona sila.

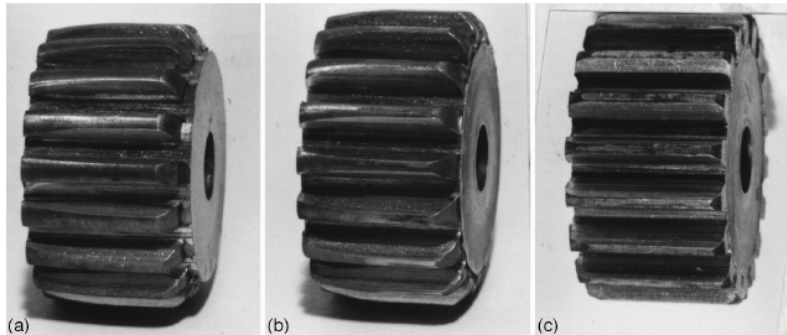


Slika 2.13 - Dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda žiga za dva načina istiskivanja cilindričnih zupčanika - eksperimentalne i teorijske vrednosti sile [22]

Na slici 2.14 prikazani su uzorci dobijeni na osnovu oba modela deformisanja za različite vrednosti ostvarenog hoda. Na slikama se može uočiti kako raste popunjenost ozubljenja sa povećanjem hoda alata.



a) Smanjenje visine 24,52% b) Smanjenje visine 27,70% c) Smanjenje visine 28,30%

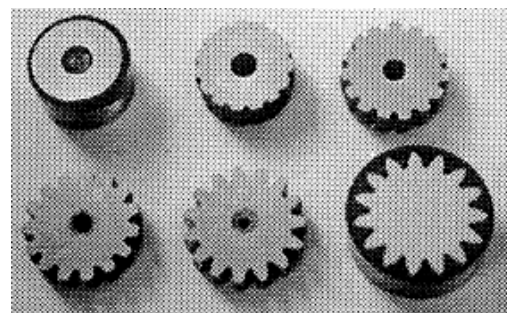
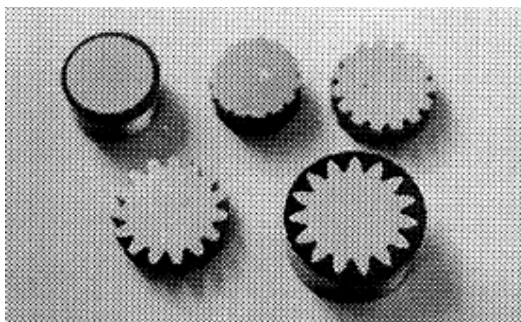


a) Smanjenje visine 22,87% b) Smanjenje visine 25,70% c) Smanjenje visine 26,65%

Slika 2.14 - Cilindrični zupčanici sa otvorom sa različitim stepenom popunjenosti ozubljenja [22]

U radu [21] ista metodologija primenjena je na istiskivanje cilindričnih zupčanika sa kosim zubima.

Rešenja ovih autora bazirana na metodi gornje granice dalje su razvili J. Choi i H.Y. Cho i saradnici. Rešenja su primenjena na istiskivanje cilindričnih zupčanika sa i bez otvora [24,26] (slika 2.15) i cilindričnih zupčanika sa otvorom sa unutrašnjim ozubljenjem [25] (slika 2.16). Nova rešenja koja su ovi autori razvili zasnovana su na kompleksnijim funkcijama koje opisuju komponente brzine, tako da su prethodna rešenja još više poboljšana.



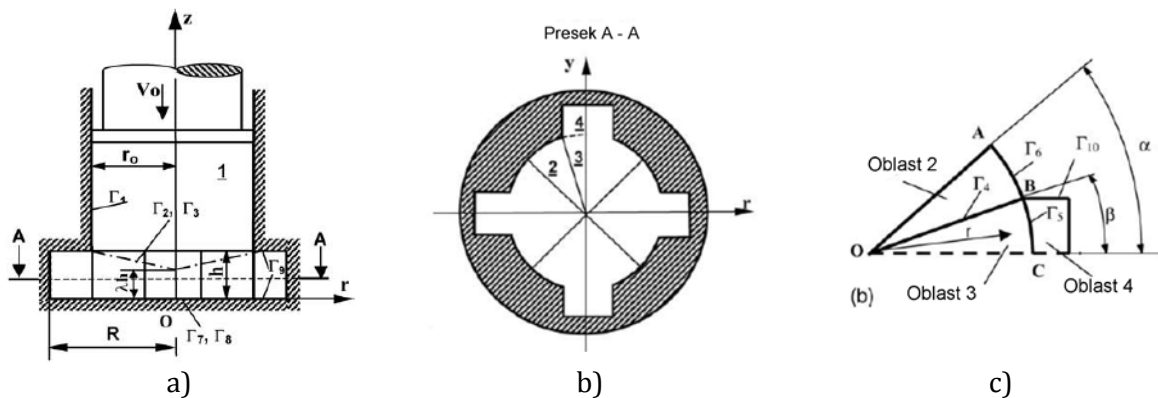
Slika 2.15 - Istiskivanja cilindričnih zupčanika prema [24, 26]



Slika 2.16 - Istiskivanje cilindričnih zupčanika sa unutrašnjim ozubljenjem prema [25]

Altinbalik, Can i saradnici u svojim radovima bavili su se istraživanjem istiskivanja ozubljenih elemenata [2,3,17,18], kao i delova složene konfiguracije [4].

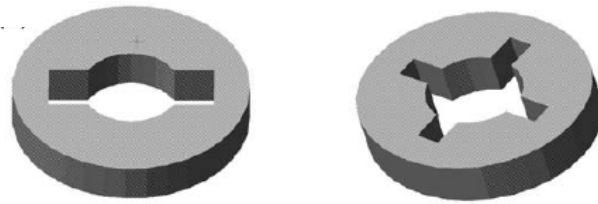
U radu [17] prikazali su teorijsko rešenje razvijeno primenom metode gornje granice za određivanje deformacione sile i relativnog pritiska na žig potrebnih za radialno istiskivanje ozubljenja sa ravnim paralelnim bokovima prikazano na slici 2.17 a) i b).



Slika 2.17 - a) šematski prikaz procesa radialnog istiskivanja b) poprečni presek alata u oblasti formiranja zuba c) zone deformisanja [17]

Na slici 2.17 a) i c) prikazane su zone na koje je podeljen obradak i za koje je pretpostavljeno kinematski dozvoljeno polje brzine. Autori su pretpostavili dve različite granice između cilindričnog dela obratka, odnosno zone 1 i zona 2 i 3. U prvoj varijanti granica se nalazi na visini zuba i paralelna je sa dnom ozubljenog dela, dok je u drugoj varijanti ta površina konusna i u funkciji promenljivog parametra λ , što znači da različite vrednosti parametra definišu različite položaje granice. Na osnovu pretpostavljenog polja brzine određen je izraz za određivanje ukupne snage potrebne za deformisanje, a vrednost parametra λ je određena kao ona vrednost za koju izraz za ukupnu snagu ima minimum. Teorijska vrednost potrebne deformacione sile upoređena je sa eksperimentalnim rezultatima drugih autora [74] i pokazala je dobro slaganje. U nastavku istraživanja izveden je eksperiment istiskivanja [2] za ozubljenje sa ravnim paralelnim bokovima sa dva i četiri zuba. Osim provere teorijskog rešenja, autori su se bavili i analizom tečenja materijala, odnosno načinom na koji materijal ispunjava deo matrice u kome se formiraju zubi. Uočeno je da materijal prvo dolazi u kontakt sa

matricom na sredini visine zuba, da bi zatim materijal ispunjavao gornju i donju polovinu zuba, odnosno da dolazi do naburičavanja materijala, ali ne na isti način kao kod slobodnog sabijanja.



Slika 2.18 - Izgled matrice kod istiskivanja delova sa ravnim paralelnim zubima [2]

Autori su predložili oblik funkcije koja predviđa promenu slobodne površine zuba i istu metodologiju su primenili kod istiskivanja delova sa ravnim kosim bokovima [3]. Dalje istraživanje ovog tipa ozubljenja obuhvatilo je i definisanje teorijskog rešenja metodom gornje granice, kao i eksperimentalnu proveru teorijskih vrednosti za ovaj tip ozubljenja [18]. Na slici 2.19 prikazani su delovi po fazama procesa istiskivanja kod kojih se može videti naburičavanje na slobodnoj površini zuba. Poređenjem eksperimentalnih i teorijskih vrednosti deformacione sile ustanovljeno je da teorijska sila ne opisuje realno kraj procesa, zbog čega su autori predložili korekciju teorijskog rešenja uvođenjem dodatnih zona koje će uzeti u obzir i tzv. „corner filling” efekat.

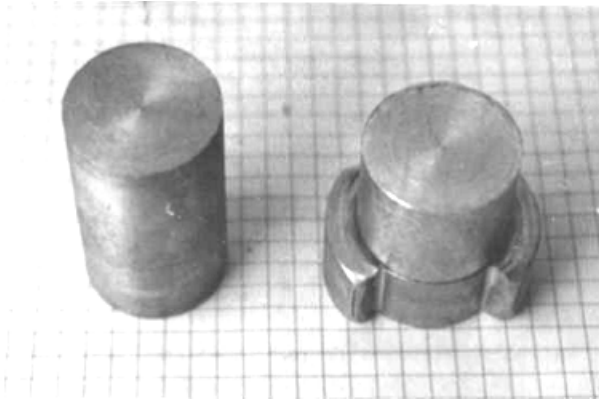


Slika 2.19 - Faze istiskivanja [18]

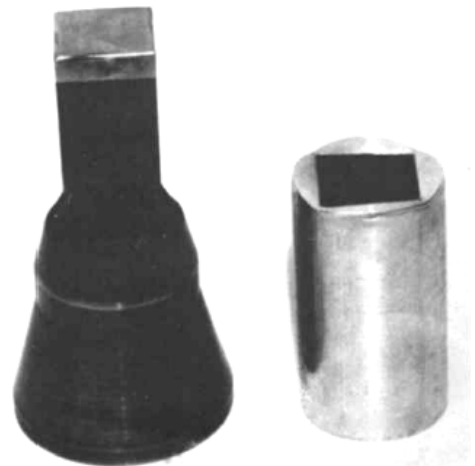
Za razliku od većine radova u kojima se, kada se primenjuje metoda gornje granice na procese istiskivanja cilindričnih zupčanika, zavisnost komponente brzine u aksijalnom pravcu pretpostavlja kao linearna funkcija, u radu [40] autor je pretpostavio da će se promena aksijalne komponente brzine menjati po nelinearnom zakonu. Ovakva pretpostavka utiče i na određivanje ostalih komponenata brzine. Deformaciona sila određena na osnovu ovog teorijskog rešenja pokazala je dobro slaganje sa eksperimentalnim vrednostima sile prikazanim u radu [31].

Metoda gornje granice u analizi istiskivanja vratila sa spoljašnjim ozubljenjem primenjena je u radovima [57] i [71]. U radu [57] autori su definisali polje brzine u zavisnosti od geometrijskih parametara alata, tako da je na osnovu minimuma funkcije ukupne snage potrebne za deformisanje određena optimalna geometrija alata čijom primenom se dobija najmanja potrebna sila za istiskivanje dela, dok su u radu [71] autori pokušali da različitim kretanjima žiga i matrice utiču na smanjenje potrebne deformacione sile redukcijom trenja na kontaktu obratka i matrice.

U Laboratoriji za tehnologiju plastičnog deformisanja Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu istiskivanje delova složene konfiguracije proučava se dugi niz godina. Početna istraživanja odnosila su se na analizu metodom gornje granice i eksperimentalnu proveru parametara procesa istiskivanja dela sa dva zuba sa ravnim bokovima u radijalnom pravcu [73, 75] (slika 2.20), kao i na eksperimentalno istraživanje procesa suprotnosmernog istiskivanja žigom sa kvadratnim poprečnim presekom [74, 75] (slika 2.21).

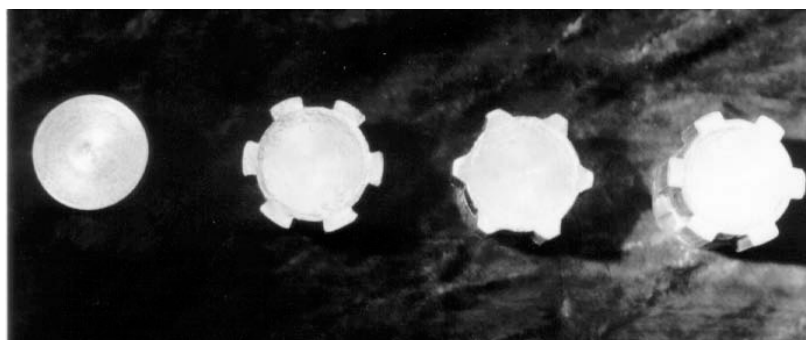


Slika 2.20 - Istiskivanje dela sa zubima sa ravnim bokovima u radijalnom pravcu [73, 75]



Slika 2.21 - Suprotnosmerno istiskivanje dela sa kvadratnim poprečnim presekom [74, 75]

U nastavku istraživanja primenom metode gornje granice analiziran je proces istiskivanja ozubljenja sa ravnim bokovima u radijalnom pravcu i eksperimentalno je potvrđeno teorijsko rešenje [76,77,78]. Dalje razvijanje ovog rešenja uključilo je definisanje polja brzine za još dva tipa zuba (sa ravnim kosim bokovima i sa ravnim paralelnim bokovima, slika 2.22) i eksperimentalnu proveru teorijskih vrednosti deformacione sile [79,89]. S obzirom da metoda gornje granice ne pruža informaciju o naponskom stanju u deformisanom delu, posebnim eksperimentalnim postupkom [89,91], kao i numeričkom simulacijom [80, 81, 90,97,99] određeno je naponsko stanje u obratku. Istiskivanje dela sa unutrašnjim ozubljenjem prikazano je u radu [83], pri čemu su eksperimentalno određena deformaciona sila i naponsko stanje u obratku upoređeni sa rezultatima numeričke simulacije. Rezultati su pokazali dobro slaganje.



Slika 2.22 - Pripremak i tri tipa elemenata sa ozubljenjem [79,89]

Iako se ozubljeni delovi prikazani u ovom poglavlju razlikuju od delova koji su analizirani u ovom radu (slika 1.3 i 1.4) svaki rad koji se odnosi na primenu metode gornje granice kod istiskivanja ozubljenih elemenata je veoma koristan jer pokazuje način na koji su autori pretpostavili tečenje materijala i polje brzine, naročito u zoni formiranja ozubljenja.

2.2 PRIMENA RELAKSIRAJUĆIH OTVORA KOD ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA

Primena relaksirajućih otvora u alatu ili obratku u toku procesa deformisanja (OP i OA model deformisanja) dovodi do pojave podeljenog tečenja materijala i pojave tzv. neutralne površine na kojoj je radijalna komponenta brzine jednaka nuli, odnosno na kojoj tečenje materijala menja smer. Pojam neutralne površine spominje se i kod teorijske analize sabijanja šupljeg valjka (prstena), ali u tom procesu neutralna površina je važna za određivanje koeficijenta trenja. U literaturi, Ogha i Kondo se najčešće spominju kao prvi autori koji su primenili otvore u alatu i pripremu kako bi doveli do smanjenja potrebne deformacione sile kod hladnog oblikovanja delova. Međutim prema [99] ovu ideju su pre njih izneli Kunogi [56] i Sawabe [87].

Ogha [63-70] i Kondo [47-50] su u nizu radova prikazali rezultate istraživanja vezanih za problematiku popunjavanja alata, odnosno matrice u kojoj se formira deo u procesu hladnog kovanja. Jedan od problema koji se javlja u ovom procesu je visoka vrednost deformacione sile na kraju procesa. Njihova osnovna ideja bila je da pronađu način koji bi doveo do smanjenja deformacione sile potrebne da se matrica u potpunosti ispuni materijalom. Na taj način bi se povećala tačnost delova i produžio radni vek alata. Koncept koji su autori predložili zasniiva se na primeni otvora koji može da se nalazi ili u obratku ili u alatu i koji omogućava tzv. podeljeno tečenje materijala u toku procesa deformisanja, što dovodi do smanjenja ukupne deformacione sile potrebne za odvijanje procesa.

U radu [63] autori su izvršili teorijsku analizu metodom gornje granice u slučaju oblikovanja cilindričnog dela u matrici. Istraživan je uticaj primene otvora u alatu („flow relief opening”, u nastavku FRO) i otvora u pripremu („flow relief axis”, u nastavku FRA) na popunjavanje alata u završnoj fazi procesa kada se materijalom popunjavaju najteže dostupna mesta u gravuri alata, odnosno kada nastaje tzv. „corner filling” (modeli tečenja prikazani na slici 1.2). Da bi se analiziralo samo završno popunjavanje alata, prečnik dela jednak je prečniku matrice, pri čemu su mu ivice oborene kako bi materijal, kada se deformiše, imao mogućnost da ističe samo u centralni otvor u pripremu ili alatu ili da popunjavanja kalup na mestima gde su oborene ivice priprema. Kako bi bio analiziran sam kraj procesa oblik priprema je pretpostavljen tako da tečenje materijala na određeni način "simulira" završno popunjavanje gravure alata. U definisanju teorijskog rešenja korištena je pretpostavka da nagib pod kojim je oborena ivica priprema ostaje konstantan tokom procesa deformisanja.

Na osnovu teorijskog rešenja određena je vrednost potrebne deformacione sile u zavisnosti od neutralnog radijusa za različite vrednosti otvora u alatu i obratku.

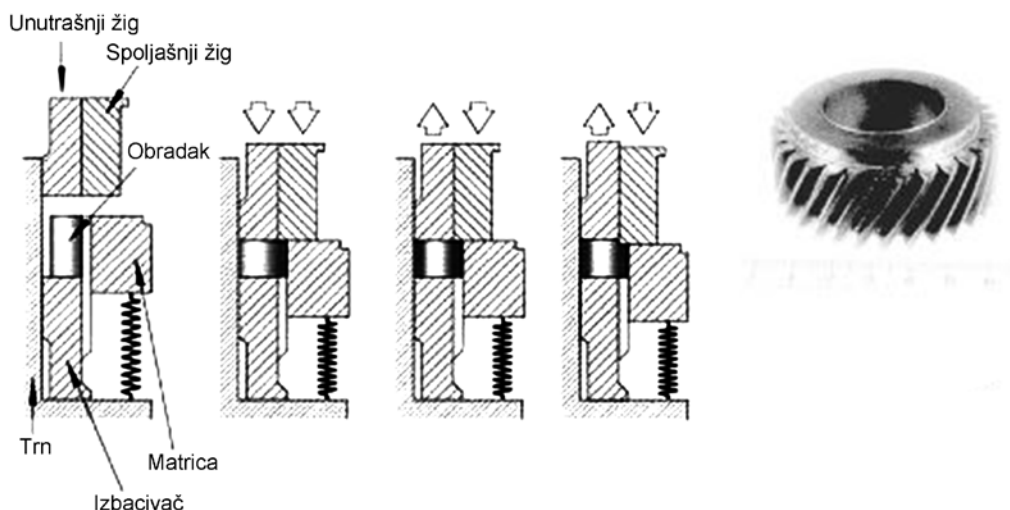
Zaključak do koga su došli na osnovu teorijskog rešenja je da kod primene FRA i FRO procesa, treba da se ostvari podeljeno tečenje materijala kako bi se smanjila ukupna sila i pritisak u procesu. Teorijsko rešenje je takođe pokazalo, da se kod FRO procesa takvi uslovi lakše ostvaruju.

U radu [64] autori su izvršili eksperimentalnu proveru rešenja koje su dobili metodom gornje granice. Deo koji je korišten kao pripremak kod određivanja teorijskog rešenja predstavlja pojednostavljeni oblik cilindra nakon slobodnog sabijanja. Kod FRA procesa, kao i u teorijskom rešenju, na početku procesa, dok je pritisak mali, odvija se samo centrifugalno tečenje, dok sa porastom pritiska dolazi do podeljenog tečenja. Kod FRO procesa od početka procesa se odvija podeljeno tečenje. Kod oba procesa potrebna deformaciona sila je manja u poređenju sa silom potrebnom za oblikovanje u zatvorenom kalupu. Kako prečnik otvora, bilo u pripreмку bilo u alatu raste, tako opada vrednost potrebne deformacione sile za kompletno popunjavanje kalupa. Srednji pritisak na žig kod FRO procesa menja se isto kao i deformaciona sila, dok je kod FRA procesa zanimljivo to da postoji optimalna vrednost otvora na žigu. Kako prečnik otvora raste do te optimalne vrednosti, srednji pritisak na žigu opada, međutim, sa daljim porastom prečnika otvora srednji pritisak počinje da raste. S obzirom da je teorijsko rešenje određeno metodom gornje granice koja po definiciji daje više vrednosti od realnih, to je i ovde bio slučaj.

Nastavak istraživanja [65] odnosio se na definisanje celokupnog procesa istiskivanja. Umesto jedne operacije, primenjene su dve. Prva operacija bila je postupak kojim je u prethodnim istraživanjima formiran pripremak, dok je u drugoj operaciji deo doveden na konačne mere. S obzirom da su u drugoj operaciji visoke vrednosti sila zbog popunjavanja kalupa, u toj operaciji je primenjen koncept FRO ili FRA. Deformaciona sila potrebna za proces oblikovanja u zatvorenom kalupu upoređena je sa silom potrebnom za izradu dela u dve operacije. I eksperimentalni rezultati i teorijsko rešenje su pokazali da se potrebna deformaciona sila može smanjiti ako se umesto konvencionalnog oblikovanja u zatvorenom kalupu primeni kombinacija ove dve operacije.

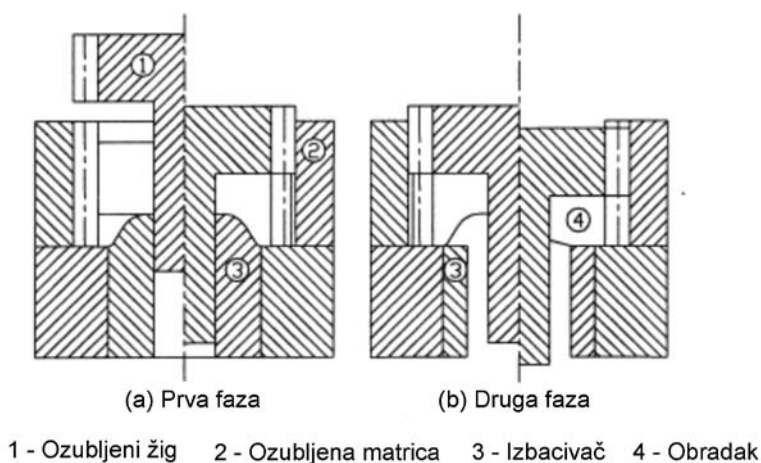
Primena FRO i FRA koncepta na istiskivanje ozubljenih vratila i zupčanika prikazana u radovima [47-50] i [67-70] pokazala je opravdanost primene ovog koncepta sa ciljem smanjenja ukupne potrebne deformacione sile i pritiska u procesu.

Na slici 2.23 prikazana je jedna od mogućnosti primene ovog koncepta kod istiskivanja cilindričnih zupčanika sa kosim zubima [49]. Istiskivanje se izvodi u jednoj operaciji. Žig se sastoji iz dva koncentrično postavljena dela, dok je matrica postavljena na opruge koje u jednom delu procesa obezbeđuju dodatni pritisak. U prvom delu procesa žig se kreće kao celina, dok se deo ne deformiše u tolikoj meri da je potrebna deformaciona sila veća od sile potrebne za sabijanje opruge. Od tog trenutka spoljašnji deo žiga nastavlja da se spušta i da spušta matricu, dok materijal počinje da teče na gore, ostvarujući podeljeno tečenje materijala u fazi procesa u kojoj se formiraju zubi.

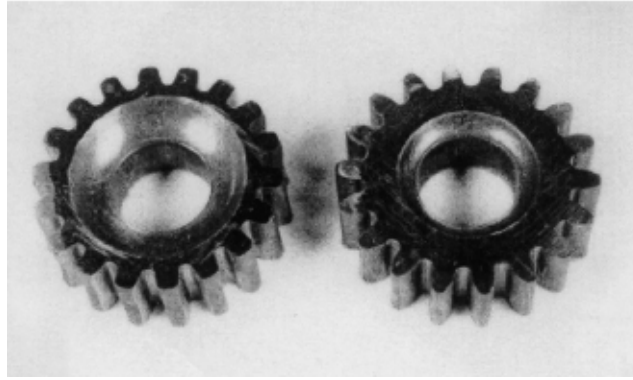


Slika 2.23 - Istiskivanje cilindričnih zupčanika sa kosim zubima [49]

Princip deformisanja u dve faze koji je prikazan u radu [65] Choi J.C. i Y. Choi primenili su kod preciznog istiskivanja cilindričnih zupčanika sa pravim zubima [23]. Osnovna ideja je bila da se podeljeno tečenje materijala ostvari udubljenjem, a ne otvorom u obratku. U prvoj fazi ovog procesa na mestu izbacivača nalazi se posebno konstruisan trn koji formira udubljenje u obratku, dok istovremeno materijal ispunjava matricu i formira ozubljenje (slika 2.24 a). U drugoj fazi, kada dolazi do potpunog formiranja ozubljenja koje iziskuje porast sile, ovaj trn se zamenjuje izbacivačem koji je takvog oblika da omogućava tečenje materijala i popunjavanje udubljenja formiranog u prvoj fazi (slika 2.24 b). Ovakva konstrukcija alata omogućava da u drugoj fazi dođe do podeljenog tečenja materijala koje utiče na smanjenje potrebne deformacione sile i pritiska u alatu. Na slici 2.25 prikazan je izgled delova posle prve i druge faze, na kojima se vidi kako je u drugoj fazi smanjena veličina udubljenja, pri čemu su zubi u potpunosti formirani. Osim eksperimentalne provere parametara procesa urađena je i numerička simulacija procesa, pri čemu su oba rezultata pokazala da primena ovakvog koncepta istiskivanja dovodi do smanjenja potrebne deformacione sile i pritiska u procesu.



Slika 2.24 - Istiskivanje cilindričnih zupčanika u dve faze [23]



Slika 2.25 - Izgled delova posle prve i druge faze istiskivanja [23]

Brayden i Monagan [15] analizirali su proces koji predstavlja kombinaciju istiskivanja i sabijanja (slika 2.26). Kod ovakvog modela deformisanja u materijalu postoji površina sa neutralnim radijusom u odnosu na koju postoji podeljeno tečenje materijala. Deo prikazan na slici 2.26 ne predstavlja konkretan deo, već je to model na kome može da se analizira tečenje materijala koje postoji kod kovanja različitih delova. Autori su za nekoliko različitih pretpostavljenih polja brzine odredili vrednost deformacione sile metodom gornje granice i uporedili sa vrednostima dobijenim u eksperimentu. Osim deformacione sile, određena je i vrednost neutralnog radijusa prema proceduri koju su primenili Ohga i Kondo [63].



Slika 2.26 - Deo dobijen kombinacijom sabijanja i istiskivanja [15]

Berens i saradnici objavili su niz radova vezanih za tematiku preciznog kovanja zupčanika. Analizirali su brojne faktore koji utiču na tačnost dobijenog dela. U radu [9] prikazana je mogućnost kalibracije zupčanika, u radu [13] uticaj mašina na tačnost delova, a u radovima [10, 11] uticaj tehnologije i konstrukcije alata na tačnost delova. Otvor u alatu [12,14] koristili su kako bi pritisak u procesu bio smanjen što bi uticalo da elastična deformacija alata bude manja, a samim tim i povećana tačnosti obratka. S druge strane, materijal koji ističe u otvor u alatu, dozvoljava određeno malo odstupanje u tačnosti priprema, što dodatno utiče na povećanje tačnosti gotovog dela (slika 2.27).



Slika 2.27 - Primena otvora u alatu kod toplog kovanja cilindričnih zupčanika sa kosim zubima [12,14]

2.3 HIPOTEZA, KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U pregledu stanja u oblasti istraživanja prikazano je nekoliko različitih mogućnosti izrade ozubljenih elemenata istiskivanjem, problemi koji se javljaju kod ovakvog načina izrade i neke od mogućnosti da se ti problemi eliminišu ili smanje. Jedan od načina da se smanji potrebna deformaciona sila i pritisak u procesu je primena otvora u alatu ili obratku, tzv. relaksirajućih otvora. U ovom radu analiziran je uticaj relaksirajućih otvora na veličinu parametara procesa kod istiskivanja ozubljenih elemenata prikazanih na slikama 1.3 i 1.4.

Osnovna hipoteza na kojoj se zasniva istraživanje prikazano u ovoj disertaciji je da naponsko-deformaciono stanje, tečenje metala i parametri procesa zavise od položaja i veličine relaksirajućeg otvora u pripremu ili alatu.

Postojanje relaksirajućeg otvora dovodi do podeljenog tečenja materijala u toku procesa istiskivanja usled čega se javlja neutralna površina poluprečnika r_n na kojoj je radijalna komponenta brzine kretanja materijala jednaka nuli. Veličina r_n naziva se neutralni radijus.

Koncepcija istraživanja uticaja relaksirajućih otvora na proces istiskivanja ozubljenih elemenata sastoji se u kreiranju teorijskog rešenja za određivanje deformacione sile, pritiska i tekuće geometrije dela, kao i numeričkoj i eksperimentalnoj proveriti tog rešenja. Kreiranje teorijskog rešenja za dva modela deformisanja (OP kada je otvor u pripremu i OA kada je otvor u žigu) i tri tipa ozubljenih elemenata (slika 1.5) omogućuje određivanje uticaja otvora u pripremu ili žigu na veličinu deformacione sile i pritiska u procesu istiskivanja. Definisane deformacione sile, pritiska na žig i tekuće geometrije u funkciji neutralnog radijusa r_n omogućuje analizu uticaja neutralne površine na proces istiskivanja, kao i drugih parametara koji figurišu u tom izrazu (koeficijent trenja, dimenzije priprema, dimenzije otvora u pripremu ili alatu, oblik zuba). Kako bi se kreiralo teorijsko rešenje za svaki model deformisanja analizirano je tečenje materijala u tzv. opštem slučaju deformisanja kada se neutralna površina nalazi u materijalu obratka. Osim ovog slučaja analizirani su i granični slučajevi koji se javljaju kada se neutralna površina nađe na graničnim površinama, odnosno kada se poluprečnik neutralne površine izjednači sa poluprečnikom otvora ili sa poluprečnikom priprema. Takođe je analizirano tečenje materijala kada je priprema pun deo (deo bez otvora) kako bi se uporedile vrednosti deformacionih sila u konvencionalnom postupku sa vrednostima iz procesa u kojima postoji podeljeno tečenje materijala.

Metoda na kojoj je bazirano teorijsko rešenje je metoda gornje granice, pri čemu je izveden i eksperiment istiskivanja, kao i numerička simulacija procesa u cilju verifikacije teorijskog rešenja.

3. ANALIZA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA PRIMENOM METODE GORNJE GRANICE

Metoda gornje granice primenjena je za analizu i definisanje parametara procesa istiskivanja za tri prikazana tipa ozubljenja A, B i C (slika 1.5) i dva modela deformisanja, kada je otvor u pripremu - model OP (slika 1.3) i kada je otvor u žigu- model OA (slika 1.4). Kao što je već napomenuto, za razliku od slučaja kada je pripremak pun komad i kada materijal tokom procesa deformisanja popunjava samo šupljine u matrici u kojima se formira ozubljenje (konvencionalna metoda), u slučaju kada postoji otvor u pripremu ili u alatu, materijal ima mogućnost da teče na nekoliko različitih načina, u zavisnosti od uslova deformisanja.

Teorijska analiza metodom gornje granice omogućila je izračunavanje deformacione sile potrebne za istiskivanje ozubljenja za oba modela deformisanja (OP i OA) i za konvencionalnu metodu tj. istiskivanje bez otvora u pripremu ili alatu. Određivanje sile potrebne za istiskivanje dela u konvencionalnom postupku potrebno je kako bi vrednosti deformacione sile mogle da se uporede i da se pokaže u kolikoj meri primena otvora u žigu ili pripremu utiče na veličinu potrebne deformacione sile u procesu istiskivanja ozubljenog elementa. Osim deformacione sile, na osnovu teorijskog rešenja određen je i srednji pritisak na žig, kao i promena dimenzija obratka tokom procesa istiskivanja.

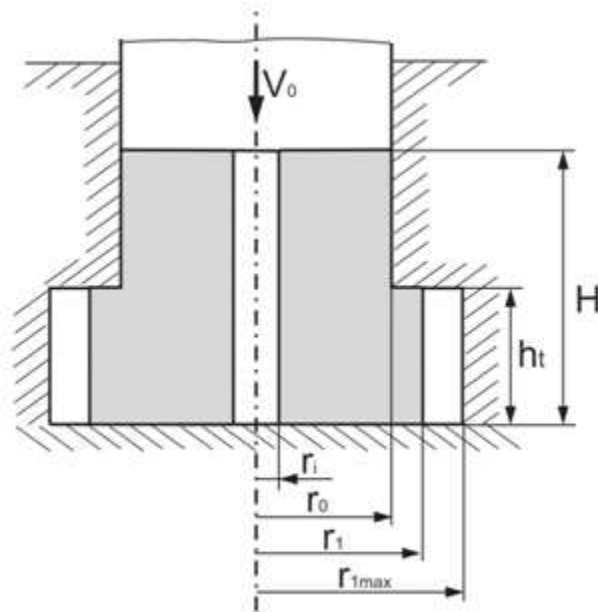
Na slikama 3.1 i 3.2 prikazani su analizirani modeli deformisanja.

Na slikama su korištene sledeće oznake za dimenzije obratka, koje su primenjene i u daljem proračunu:

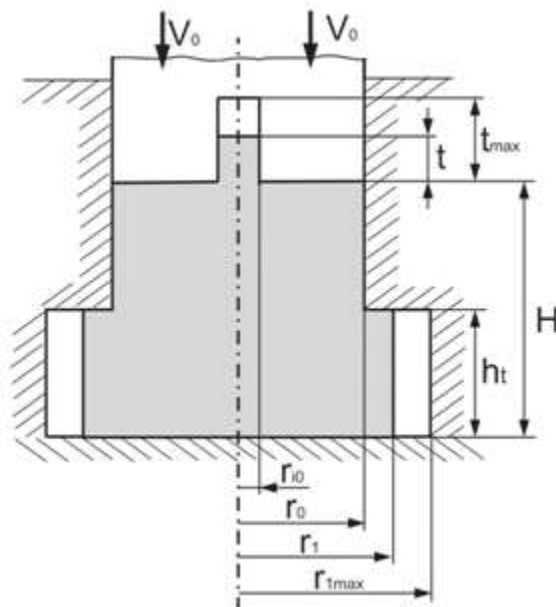
r_0 - poluprečnik priprema, odnosno poluprečnik cilindričnog dela matrice,

r_1 - tekući poluprečnik zuba

r_{1max} - maksimalni poluprečnik zuba,
 r_i - poluprečnik otvora u obratku (kod modela deformisanja OP),
 r_{i0} - poluprečnik otvora u žigu (kod modela OA) i početna vrednost poluprečnika
 otvora u obratku (kod modela OP),
 t - visina dela koji ističe u otvor u žigu (kod modela deformisanja OA),
 t_{max} - maksimalna visina otvora u žigu (kod modela deformisanja OA),
 H - tekuća visina dela,
 h_t - visina zuba.



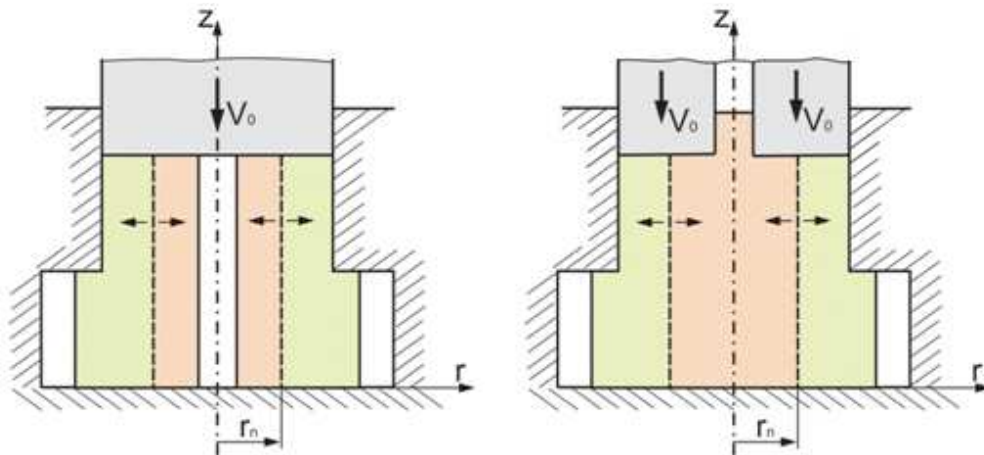
Slika 3.1 - Model deformisanja OP



Slika 3.2 - Model deformisanja OA

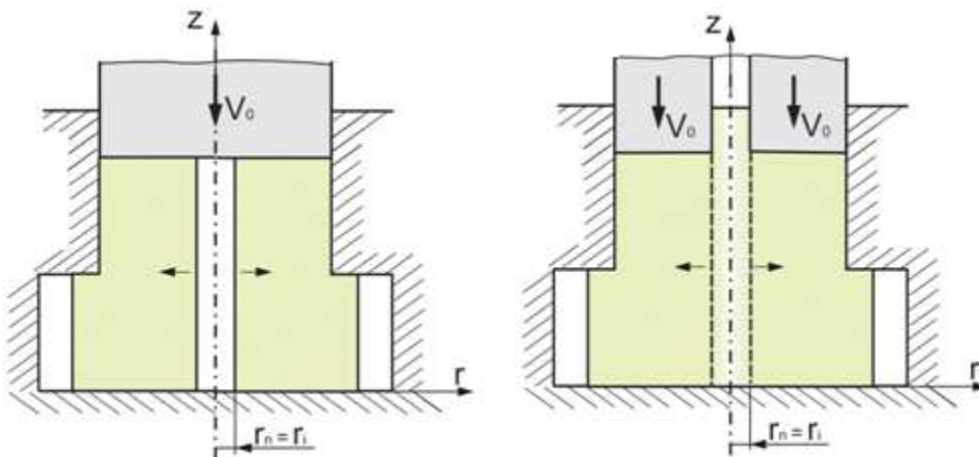
Sa slike 3.2 se vidi da se u teorijskom rešenju koristi pretpostavka da je visina otvora u žigu ograničena i da je maksimalna visina do koje materijal može da ističe u tom pravcu t_{max} . Takođe je pretpostavljeno da se tekući poluprečnik zuba ravnomerno povećava po celoj visini zuba.

U opštem slučaju tokom procesa istiskivanja za oba modela deformisanja u materijalu postoji tzv. neutralna površina poluprečnika r_n u odnosu na koju materijal menja smer tečenja, odnosno površina na kojoj je radijalna komponenta brzine jednaka nuli. To znači da će u opštem slučaju tokom tečenja deo materijala popunjavati otvor u sredini obratka (ili u žigu), odnosno materijal će teći ka centru obratka (centripetalno tečenje), dok će drugi deo materijala teći ka spoljašnjosti dela (centrifugalno tečenje), formirajući ozubljenje (slika 3.3). Ovakvo tečenje materijala naziva se i podeljeno.



Slika 3.3 - Opšti slučaj tečenja materijala za oba modela deformisanja

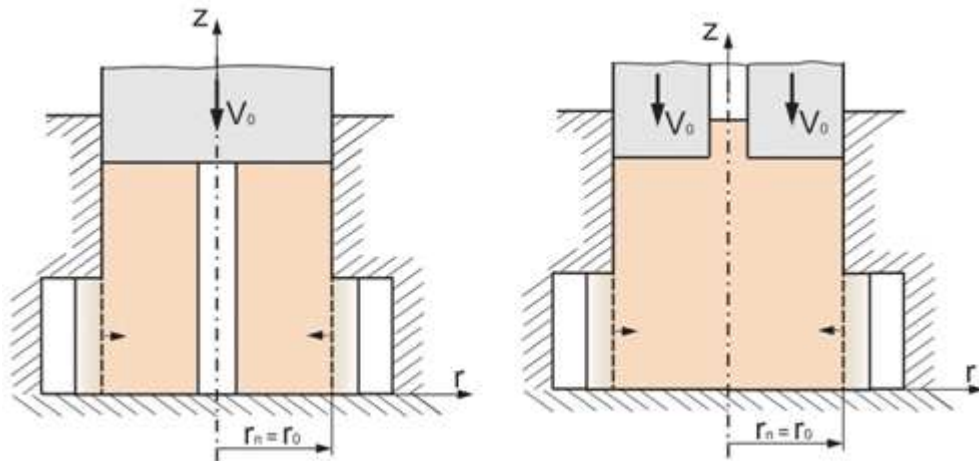
Osim opšteg postoji i nekoliko graničnih slučajeva tečenja materijala. Prvi granični slučaj nastaje kada se vrednost poluprečnika neutralne površine (neutralni poluprečnik) izjednači sa vrednošću poluprečnika otvora u obratku ili žigu $r_n = r_i$. U toj situaciji dolazi samo do centrifugalnog tečenja, otvor u obratku ili alatu se ne popunjava materijalom (otvor u obratku neće menjati veličinu prečnika), materijal ispunjava samo delove matrice u kojima se formira ozubljenje (slika 3.4).



Slika 3.4- Prvi granični slučaj kada je $r_n = r_i$ za oba modela deformisanja

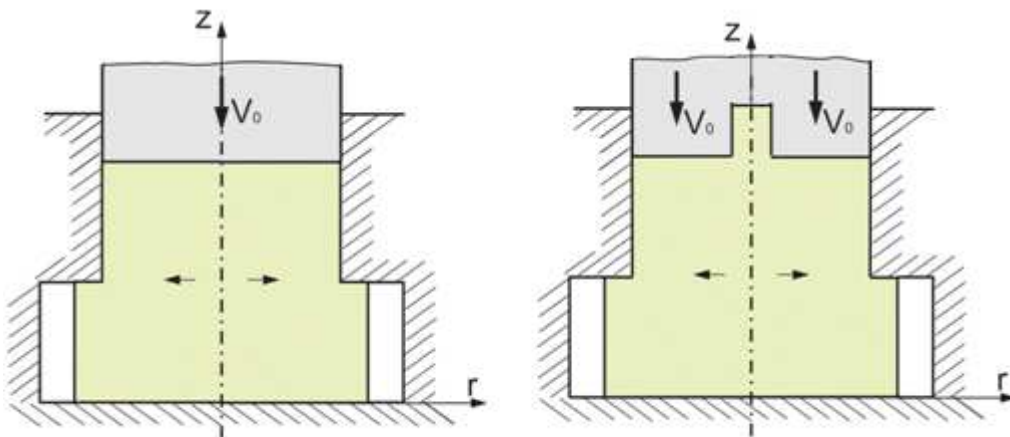
Kod modela deformisanja OA cilindrični deo obratka poluprečnika r_i ponaša se kao kruto telo koje se ne deformiše, dok ostatak materijala teče ka spoljašnosti obratka od poluprečnika otvora r_i , odnosno neutralnog poluprečnika r_n .

U drugom graničnom slučaju neutralni poluprečnik ima vrednost poluprečnika cilindričnog otvora matrice, $r_n = r_0$ (slika 3.5). U ovom slučaju materijal teče tako da popunjava samo otvor u obratku ili alatu (centripetalno tečenje). Ovaj model tečenja postoji i u situaciji kada je ozubljenje formirano ($r_1 = r_{1max}$), a otvor još uvek postoji ($r_i > 0$) kod modela OP ili otvor u žigu nije popunjen kod modela OA.



Slika 3.5 - Drugi granični slučaj kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ za oba modela deformisanja

Treći granični slučaj nastaje kada se otvor u obratku ili u žigu popuni, a ozubljenje još nije formirano. U tom slučaju proces se dalje odvija kao konvencionalan proces istiskivanja, kada nema otvora ni u obratku, ni u žigu (slika 3.6).



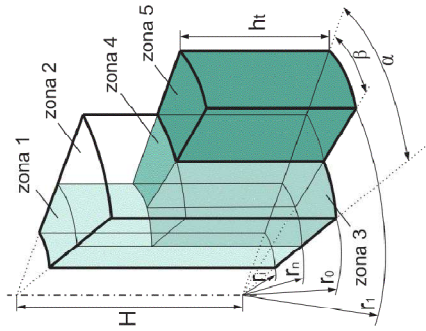
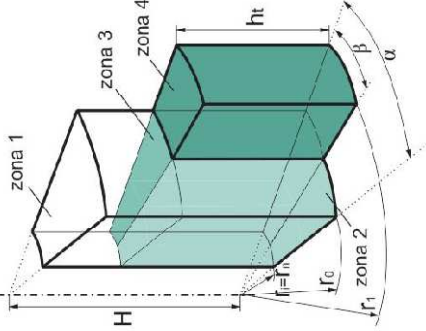
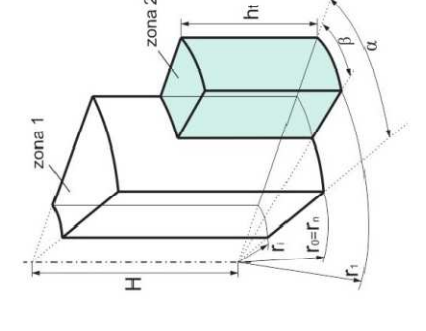
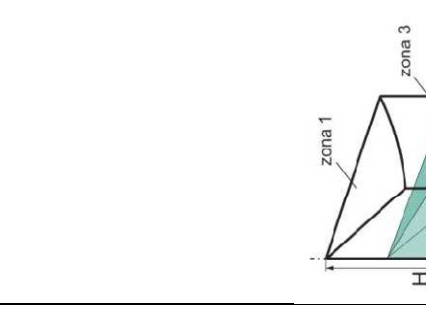
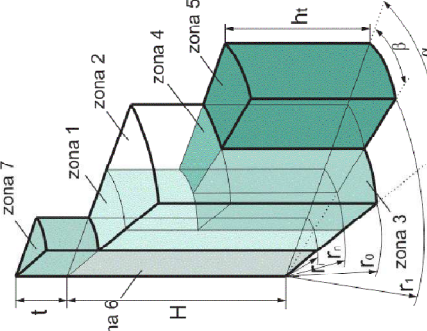
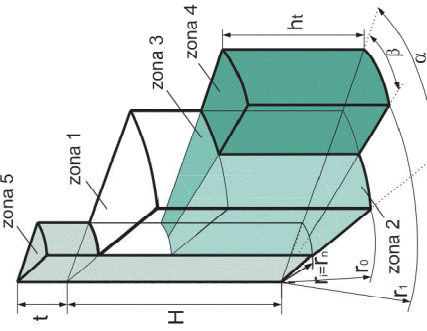
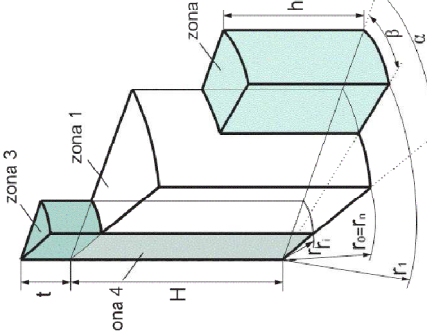
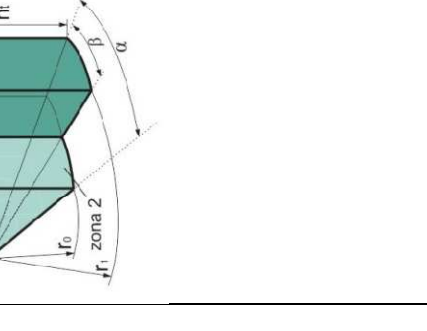
Slika 3.6 - Treći granični slučaj kada je $r_i \approx 0$ kod modela OP ili $t = t_{max}$ kod modela OA

Kao što se vidi iz analiziranih slučajeva tečenja vrednost poluprečnika neutralne površine u toku procesa istiskivanja nije konstantna i svi granični slučajevi tečenja definisani su upravo za moguće granične položaje neutralne površine.

U tabeli 3.1 prikazani su svi analizirani slučajevi tečenja materijala (opšti slučaj i granični slučajevi), za model deformisanja OP i OA.

U nastavku će biti prikazani osnovni postulati metode gornje granice, a zatim i primena ove metode na prikazane modele deformisanja.

Tabela 3.1 - Analizirani slučajevi tečenja materijala na primeru ozubjenja tipa A

	$r_i < r_n < r_0$	$r_n = r_i$	$r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$	$r_i \approx 0$ ili $t \approx t_{max}$
OP				
OA				

3.1 METODA GORNJE GRANICE

U nastavku je dat kratak prikaz i osnove metode gornje granice. Detaljnija elaboracija ove metode može se naći u [1], [7], [34], [39], [52], [53], [60], [72], dok su konkretni primeri primene mnogobrojni i neki su navedeni u poglavlju 2.

Prema Avitzur-u [7] teoremu gornje granice definisali su Prager i Hodge [84] na sledeći način:

Među svim kinematski dozvoljenim poljima brzine deformacije, stvarno je ono polje koje sledeći izraz čini minimalnim.

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \int_{S_r} \tau |\Delta v| ds - \int_{S_t} T_i v_i ds \quad (3.1)$$

U ovom izrazu su:

σ_0 – efektivni napon tečenja

$\dot{\epsilon}_{ij}$ - komponente brzine deformacije

τ – tangencijalni napon

Δv – diskontinuitet brzine

$\int_{S_t} T_i v_i ds$ - snaga koja se javlja zbog dejstva dodatnih sila

Prema ovoj teoremi stvarna snaga potrebna za proces deformisanja nikada neće imati veću vrednost od snage izračunate na osnovu izraza (3.1).

Prva komponenta u izrazu (3.1) predstavlja snagu potrebnu za deformisanje po zapremini tela (tzv. unutrašnje deformisanje), druga komponenta predstavlja snagu potrebnu za savladavanje otpora smicanja na površinama diskontinuiteta brzine uključujući i granične površine alat - obradak, dok treća komponenta predstavlja snagu koja potiče od dodatnih spoljnih sila (ovaj izraz se retko primenjuje i odnosi se na procese gde se primenjuju dodatne sile).

Kako bi se metoda gornje granice primenila, potrebno je definisati kinematski dozvoljeno polje brzine po celoj zapremini obratka, odnosno polje brzine koje zadovoljava uslov konstantnosti zapremine i granične uslove brzine.

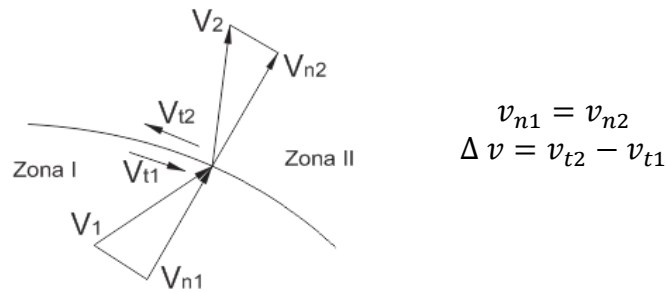
Na osnovu uslova konstantnosti zapremine važi:

$$\dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33} = 0 \quad (3.2)$$

Ovaj izraz moraju da zadovoljavaju komponente brzine u jednoj zoni.

Prvi korak u primeni metode gornje granice je da se za proces koji se analizira, obradak odnosno telo koje se deformiše podeli na nekoliko oblasti u kojima se razlikuju komponente polja brzine. Za svaku od tih oblasti pretpostavljaju se te komponente. Da bi se to uradilo, potrebno je analizirati tok materijala u procesu deformisanja. Zbog uslova konstantnosti zapremine komponente normalne na granicu između dve oblast

moraju biti jednake. Razlika između komponenti brzine u pravcu granice naziva se diskontinuitet brzine (slika 3.7).



Slika 3.7- Diskontinuitet brzine na graničnoj površini

Zbog diskontinuiteta brzine na graničnoj površini javlja se smicanje koje utiče na povećanje tangencijalnog napona. Dodatna snaga koja je potrebna za savladavanje otpora smicanja izračunava se prema drugoj komponenti u izrazu (3.1)

$$\dot{W}_S = \int_S \tau |\Delta v| dS \quad (3.3)$$

Gde je

\dot{W}_S - gubitak snage na površini diskontinuiteta

τ - tangencijalni napon

Δv - diskontinuitet brzine

S - površina na kojoj se javlja diskontinuitet brzine

Granična površina može biti površina između dve oblasti u obratku, kao i kontaktna površina između alata i materijala.

Na osnovu definisanih funkcija za komponente brzine za svaku oblast u obratku izračunava se vrednost izraza (3.1). Ukoliko funkcije komponenta brzine zavise od sve tri prostorne koordinate, dobija se tačnije rešenje, ali je izračunavanje jednačine (3.1) složenije. Zato se uvode pojednostavljenja koja umanjuju tačnost rezultata.

Ukoliko je tačnije opisano polje polje brzine, utoliko je manja razlika između proračunate i stvarne sile.

S obzirom da se poslednji član izraza (3.1) veoma retko koristi, izraz koji se najčešće koristi za određivanje ukupne snage potrebne za deformisanje kod primene metode gornje granice ima sledeći oblik:

$$\dot{W}_t = \dot{W}_d + \dot{W}_s + \dot{W}_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \int_{A_s} \tau_s |\Delta v| dA_s + \int_{A_f} \tau_f |\Delta v| dA_f \quad (3.4)$$

gde je:

\dot{W}_t - ukupna snaga potrebna za deformisanje (engl. total power)

\dot{W}_d - snaga unutrašnjeg deformisanja (engl. power for internal deformation)

\dot{W}_s - snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine na granicama između oblasti u obratku (engl. shear loss)

\dot{W}_f - snaga potrebna za savladavanje otpora spoljašnjeg trenja (engl friction loss)

Snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se na osnovu sledećeg izraza (prva komponenta u izrazu 3.4)

$$\begin{aligned}\dot{W}_d &= \frac{2\sigma_e}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \\ &= \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\dot{\epsilon}_{11}^2 + \dot{\epsilon}_{22}^2 + \dot{\epsilon}_{33}^2 + 2(\dot{\epsilon}_{12}^2 + \dot{\epsilon}_{23}^2 + \dot{\epsilon}_{31}^2)} dV\end{aligned}\quad (3.5)$$

pri čemu su $\dot{\epsilon}_{ij}$ komponente brzine deformacije koje se određuju na sledeći način:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) \\ \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)\end{aligned}\quad (3.6)$$

Primenom metode gornje granice određene su deformacione sile i pritisak na žigu za tri tipa ozubljenja (A, B i C) i za dva modela deformisanja, kada se otvor nalazi u centru priprema (model deformisanja OP) i kada se otvor nalazi u centru alata, odnosno žiga (model deformisanja OA). Takođe je analizirano i tečenje materijala u zavisnosti od položaja neutralne površine.

3.2 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA METODOM GORNJE GRANICE KADA SE OTVOR NALAZI U PRIPREMKU - MODEL OP

U ovom poglavlju prikazana je primena metode gornje granice na analizu procesa istiskivanja ozubljenih delova kada se otvor nalazi u pripremk (model deformisanja OP) za tri tipa ozubljenih delova, A, B i C (slika 1.4). Metodom gornje granice određena je veličina potrebne deformacione sile i srednjeg pritiska na žig. Takođe je analizirano tečenje materijala u zavisnosti od položaja neutralne površine u obratku i na osnovu toga su određeni tekući geometrijski parametri obratka. Kod modela deformisanja OP to su unutrašnji poluprečnik r_i i poluprečnik zuba r_1 .

3.2.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA- TIP OZUBLJENJA A, MODEL OP

Kao što je prikazano na početku ovog poglavlja na slikama 3.1 - 3.4 i u tabeli 3.1 postoji nekoliko načina na koji materijal može da teče kada se otvor nalazi u pripremk:

- u opštem slučaju vrednost neutralnog poluprečnika r_n se nalazi između poluprečnika otvora r_i i poluprečnika cilindričnog dela matrice r_0 , $r_i < r_n < r_0$
- prvi granični slučaj je kada je neutralni poluprečnik r_n jednak unutrašnjem poluprečniku r_i , $r_n = r_i$,
- drugi granični slučaj je kada je neutralni poluprečnik r_n jednak poluprečniku cilindričnog dela matrice r_0 , $r_n = r_0$ ili kada je $r_1 = r_{1max}$ (ozubljenje je formirano, a otvor u delu još uvek postoji),
- treći granični slučaj je kada se otvor u obratku popuni tako da se deo dalje deformiše kao da je pripremk bio bez otvora, odnosno ovaj proces odgovara konvencionalnom istiskivanju.

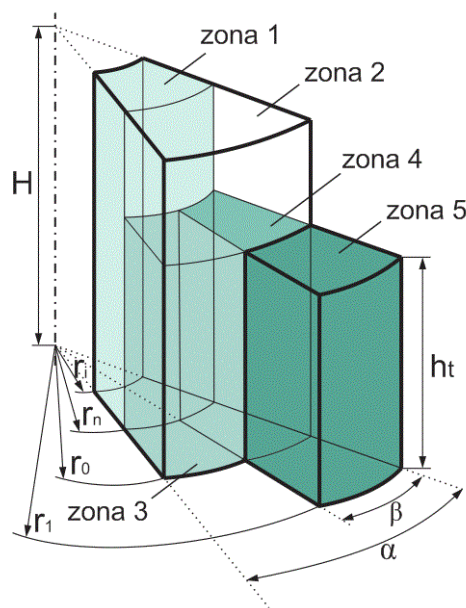
Kada je definisano rešenje za opšti slučaj istiskivanja za model deformisanja OP na osnovu njega mogu se izvesti rešenja i za granične slučajeve.

3.2.1.1 Određivanje parametara procesa - opšti slučaj

Opšti slučaj tečenja materijala se javlja kada postoji i centrifugalno i centripetalno tečenje materijala, odnosno kada u toku procesa deformisanja materijal popunjava i šupljine u alatu u kojima se formira ozubljenje i otvor u obratku. Ovakav način tečenja materijala podrazumeva postojanje neutralne površine u materijalu, odnosno dolazi do podeljenog tečenja. Na neutralnoj površini radijalna komponenta brzine ima vrednost nula, jer na toj površini ova komponenta menja smer.

Na osnovu analize toka materijala za model deformisanja kada se otvor nalazi u pripremk za opšti slučaj deformisanja usvojena je podela zapremine na pet zona (slika 3.8). Na ovaj način kreiran je opšti model deformisanja, a ova podela na zone je primenjena i kod analize tipa ozubljenja B i C. Kao što je napomenuto, iz ovog opšteg modela moguće je odrediti i rešenja za granične slučajeve.

Zone 1 i 2 imaju oblik cilindra sa unutrašnjim otvorom (na slici 3.8 prikazan je deo zona 1 i 2). Spoljašnji prečnik zone 1 je prečnik neutralne površine ($d_n = 2r_n$), dok je unutrašnji prečnik zone 1 prečnik otvora ($d_i = 2r_i$). Visina zone 1 je tekuća visina dela H . Zona 2 se nastavlja na zonu 1, tako da je spoljašnji prečnik zone 1 unutrašnji prečnik zone 2 (d_n), dok je spoljašnji prečnik jednak prečniku priprema, odnosno prečniku cilindričnog otvora u matrici ($d_0 = 2r_0$). Visina zone 2 je razlika ukupne visine dela H i visine zuba h_t . Zona 3 predstavlja zapreminu polovine međuzublja, dok je zona 5 zapremina polovine zuba. Zona 4 je okružena zonama 1,2,3 i 5. Visina zona 3, 4 i 5 je ista i jednaka je visini zuba h_t . Zbog različitog oblika zuba u zoni 5 će se razlikovati komponente polja brzine za sva tri tipa ozubljenja, dok će u ostalim zonama te komponente biti iste.



Slika 3.8 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model deformisanja OP, opšti slučaj

U nastavku je prikazano kako su pretpostavljene komponente kinematski dozvoljenog polja brzine po zonama za ovaj tip ozubljenja i model deformisanja, a na slici 3.9 dat je njihov raspored po zonama.

Osim oznaka definisanih na slikama 3.1 i 3.2, a koje su prikazane i na slici 3.9, u izrazima za komponente polja brzine u pojedinim zonama i u daljem proračunu koriste se i sledeće oznake:

r_{i0} - početna vrednost poluprečnika otvora

r_i - tekući poluprečnik otvora

r - tekući poluprečnik

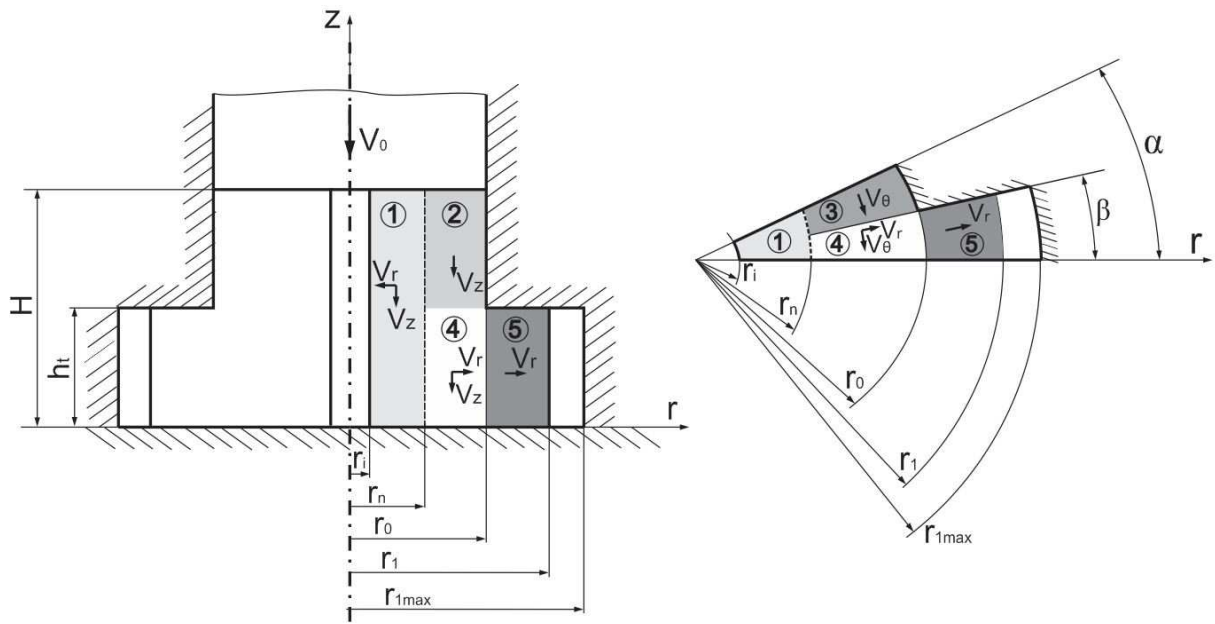
r_n - poluprečnik neutralne površine

r_0 - poluprečnik priprema, unutrašnji poluprečnik cilindričnog dela matrice

r_1 - tekući poluprečnik zuba, spoljašnji poluprečnik

r_{1max} - maksimalni poluprečnik zuba

- H_0 - visina pripremljke
- H - tekuća visina dela
- h_t - visina zuba
- α - ugao koji definiše polovinu zuba i međuzublja
- β - ugao koji definiše polovinu zuba
- σ_e - efektivni napon
- v_0 - brzina kretanja žiga
- z - broj zuba
- μ - koeficijent trenja



Slika 3.9 - Komponente brzine po zonama- tip A, model OP, opšti slučaj

Zona 1

U ovoj zoni ne postoji tečenje materijala u tangencijalnom pravcu. U aksijalnom pravcu pretpostavljena je linearna promena brzine (pozitivan smer „z” ose je suprotan smeru kretanja žiga, granični uslov je da je na kontaktu žiga i obratka brzina materijala jednaka brzini žiga). Radijalna komponenta određena je iz uslova kontinuiteta. Granični uslov je da je radijalna komponenta brzine u ovoj zoni na neutralnoj površini jednaka nuli, odnosno

$$v_{r1} = 0 \text{ za } r = r_n$$

Na osnovu ovih pretpostavki određene su aksijalna i radijalna komponenta brzine u zoni 1, dok je tangencijalna komponenta nula.

$$v_z = -\frac{v_0}{H}z \quad v_\theta = 0 \quad v_r = -\frac{v_0}{2H} \frac{r^2 - r_n^2}{r} \quad (3.7)$$

Zona 2

U ovoj zoni ne postoji tečenje materijala u radijalnom i tangencijalnom pravcu, zona se kreće kao kruto telo, konstantnom brzinom v_0 (u smeru suprotnom od smera kretanja žiga).

$$v_z = -v_0 \quad v_\theta = 0 \quad v_r = 0 \quad (3.8)$$

Zona 3

U zoni 3 radijalna komponenta jednaka je nuli, dok je za aksijalnu i tangencijalnu komponentu pretpostavljena linearna promena. Granični uslov koji se koristi za definisanje tangencijalne komponente je da je $v_\theta = 0$ kada je $\theta = \alpha$, odnosno da na polovini međuzublja nema kretanja materijala u tangencijalnom pravcu. Komponente brzine u ovoj zoni su:

$$v_z = -\frac{v_0}{h_t} z \quad v_\theta = -\frac{v_0}{h_t} r(\alpha - \theta) \quad v_r = 0 \quad (3.9)$$

Zona 4

U zoni 4 sve tri komponente brzine su različite od nule. Pretpostavlja se linearna promena aksijalne i tangencijalne komponente koje zadovoljavaju granične uslove, dok se radijalna komponenta određuje iz uslova kontinuiteta. Granični uslovi za ovu zonu su:

$$v_{\theta 3} = v_{\theta 4} \\ v_{r 4} = 0 \quad \text{za} \quad r_n = 0$$

Komponente brzine u ovoj zoni su:

$$v_z = -\frac{v_0}{h_t} z \quad v_\theta = -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r\theta \quad v_r = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r^2 - r_n^2}{r} \quad (3.10)$$

Zona 5

Aksijalna i tangencijalna komponenta u ovoj zoni jednake su nuli, ne postoji tečenje materijala u aksijalnom i tangencijalnom pravcu. Radijalna komponenta zadovoljava uslov kontinuiteta i granični uslov da su radijalne komponente na graničnoj površini između zona 4 i 5 jednake.

$$v_z = 0 \quad v_\theta = 0 \quad v_r = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} \quad (3.11)$$

S obzirom da se zone 3, 4 i 5 odnose samo na deo zapremine, komponente snage koje se određuju na osnovu njihovih vrednosti treba da se pomnože sa 2, da bi se dobila vrednost za ceo zub odnosno međuzublje, i sa brojem zuba z , da bi se dobila ukupna vrednost potrebne snage za te zone.

3.2.1.1.1 Snaga potreba za unutrašnje deformisanje

Na osnovu izraza (3.6) određene su komponente brzine deformacije za svaku zonu koje su neophodne za izračunavanje snage unutrašnjeg deformisanja prema izrazu (3.5)

Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 1

Komponente brzine deformacije u zoni 1 imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{v_0}{2H} \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2}\right) & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r}\right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = \frac{v_0}{2H} \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2}\right) & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta}\right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{v_0}{H} & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right) = 0
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 1.

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{d1} &= \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0r_i0}^{Hr_n2\pi} \sqrt{\left(\frac{v_0}{2H}\right)^2 \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2H}\right)^2 \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2}\right)^2 + \frac{v_0^2}{H^2}} dz dr r d\theta \\
 \dot{W}_{d1} &= \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \pi \left[r_n^2 (2 - \ln 6) - \sqrt{r_n^4 + 3r_i^4} + r_n^2 \ln \frac{2(r_n^2 + \sqrt{r_n^4 + 3r_i^4})}{r_i^2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 2

U ovoj zoni dve komponente polja brzine imaju vrednost nula, a treća je konstanta. Zbog toga su komponente brzine deformacije, a samim tim i snaga unutrašnjeg deformisanja jednaki nuli. Zona se kreće kao kruto telo.

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0 & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r}\right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = 0 & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta}\right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right) = 0
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\dot{W}_{d2} = 0 \tag{3.15}$$

Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 3

Komponente brzine deformacije u zoni 3 imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0 & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = \frac{v_0}{h_t} & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{v_0}{h_t} & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 3

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{d3} &= \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0r_n\beta}^{h_t r_0 \alpha} \sqrt{\left(\frac{v_0}{h_t}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{h_t}\right)^2} dz dr r d\theta \\
 \dot{W}_{d3} &= \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 (\alpha - \beta) (r_0^2 - r_n^2)
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 4

Komponente brzine deformacije u zoni 4 imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2} \right) & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = \frac{v_0}{h_t} \left(\frac{2\beta - \alpha}{2\beta} - \frac{\alpha r_n^2}{2\beta r^2} \right) & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{v_0}{h_t} & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Izrazi za $\dot{\epsilon}_{11}$ i $\dot{\epsilon}_{22}$ imaju jednostavniji oblik u slučaju kada je $\alpha = 2\beta$. Uvrštavanjem vrednosti za komponente brzine u zoni 4 u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 4.

$$\dot{W}_{d4} = \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0r_n0}^{h_t r_0 \beta} \sqrt{\left(\frac{v_0}{h_t}\right)^2 \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{h_t}\right)^2 \left(\frac{r_n}{r}\right)^4 + \left(\frac{v_0}{h_t}\right)^2} dz dr r d\theta$$

Kako bi se pojednostavilo rešavanje integrala podintegralna funkcija se aproksimira linearnom funkcijom, tako da se snaga unutrašnjeg deformisanja može izračunati prema sledećem izrazu

$$\dot{W}_{d4} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \beta (r_0 - r_n) \frac{y(r_0) - y(r_n)}{2} \quad (3.19)$$

gde je funkcija $y(r)$ definisana na sledeći način

$$y(r) = \frac{\sqrt{r^4 + r^2 r_n^2 + r_n^4}}{r} \quad (3.20)$$

Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 5

Komponente brzine deformacije u zoni 5 imaju sledeće vrednosti

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r^2} & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \\ & & &= 0 \\ \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = \frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r^2} & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\ \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 5.

$$\dot{W}_{d5} = \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0r_0}^{h_t r_1 \beta} \sqrt{\left(\frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \right)^2 \left(\frac{r_0^2 - r_n^2}{r^2} \right)^2 + \left(\frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \right)^2 \left(\frac{r_0^2 - r_n^2}{r^2} \right)^4} dz dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{d5} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \alpha (r_0^2 - r_n^2) \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (3.22)$$

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_d = \dot{W}_{d1} + 2z(\dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4} + \dot{W}_{d5}) \quad (3.23)$$

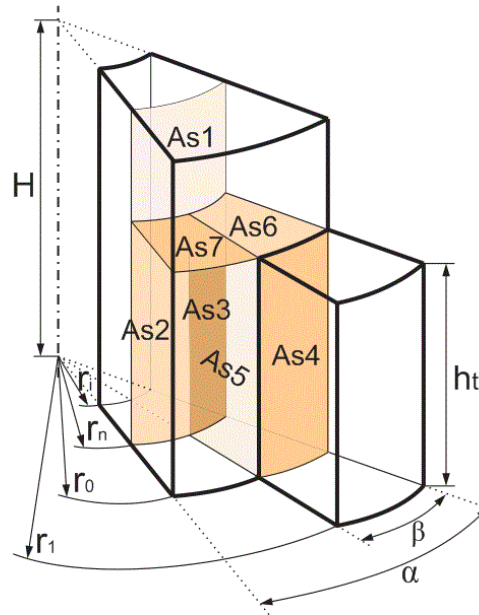
Zone 3, 4 i 5 su definisane u odnosu na polovinu zapremine zuba, odnosno međuzublja, pa je zbog toga potrebno da se izrazi za \dot{W}_{d3} , \dot{W}_{d4} i \dot{W}_{d5} pomnože sa $2z$ (z je broj zuba).

3.2.1.1.2 Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine dobija se na osnovu izraza (3.3), pri čemu se pretpostavlja da tangencijalni napon na površini diskontinuiteta ima maksimalnu vrednost $\tau_s = \tau_{max} = \sigma_e / \sqrt{3}$.

$$\dot{W}_s = \int_{A_s} \tau_s |\Delta v| dA_s = \int_{A_s} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} |\Delta v| dA_s \quad (3.24)$$

Da bi se odredile komponente snage koja se gubi na površinama diskontinuiteta brzine, potrebno je odrediti na kojim površinama između susednih zona dolazi do diskontinuiteta brzine i kod kojih komponenti brzine se on javlja. Za tip ozubljenja A i model deformisanja OP površine na kojima postoji diskontinuitet brzine prikazane su na slici 3.10.



Slika 3.10 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tip A, model OP, opšti slučaj

Diskontinuiteti brzina i komponente snage na odgovarajućim površinama imaju sledeće vrednosti:

Površina A_{s1} - površina između zona 1 i 2, diskontinuitet brzine v_z , $r = r_n$, $h_z \leq z \leq H$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$

$$|\Delta v_z| = |v_{z1} - v_{z2}| = \left| -\frac{v_0}{H} z - (-v_0) \right| = v_0 \left(1 - \frac{z}{H} \right) \quad (3.25)$$

$$\dot{W}_{s1} = \int_{h_t}^H \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \left(1 - \frac{z}{H} \right) dz r_n d\theta = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 r_n \pi \left(H - 2h_t + \frac{h_t^2}{H} \right) \quad (3.26)$$

Površina A_{s2} - površina između zona 1 i 3, diskontinuitet brzine v_z i diskontinuitet brzine v_θ , $r = r_n$, $0 \leq z \leq h_z$, $\beta \leq \theta \leq \alpha$

$$|\Delta v_z| = |v_{z3} - v_{z1}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} z - \left(-\frac{v_0}{H} z \right) \right| = v_0 \left(\frac{1}{h_t} - \frac{1}{H} \right) z \quad (3.27)$$

$$\dot{W}_{s21} = \iint_{0\beta}^{h_t\alpha} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \left(\frac{1}{h_t} - \frac{1}{H} \right) z dz r_n d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_n (\alpha - \beta) \left(h_t - \frac{h_t^2}{H} \right) \quad (3.28)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta3} - v_{\theta1}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} r_n (\alpha - \theta) - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} r_n (\alpha - \theta) \quad (3.29)$$

$$\dot{W}_{s22} = \iint_{0\beta}^{h_t\alpha} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{h_t} r_n (\alpha - \theta) dz r_n d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_n^2 (\alpha - \beta)^2 \quad (3.30)$$

Površina A_{s3} - površina između zona 1 i 4, diskontinuitet brzine v_z i diskontinuitet brzine v_θ , $r = r_n$, $0 \leq z \leq h_t$, $0 \leq \theta \leq \beta$

$$|\Delta v_z| = |v_{z4} - v_{z1}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} z - \left(-\frac{v_0}{H} z \right) \right| = v_0 \left(\frac{1}{h_t} - \frac{1}{H} \right) z \quad (3.31)$$

$$\dot{W}_{s31} = \iint_{00}^{h_t\beta} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 \left(\frac{1}{h_t} - \frac{1}{H} \right) z dz r_n d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_n \beta \left(h_t - \frac{h_t^2}{H} \right) \quad (3.32)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta4} - v_{\theta1}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_n \theta - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_n \theta \quad (3.33)$$

$$\dot{W}_{s32} = \iint_{00}^{h_t\beta} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_n \theta dz r_n d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_n^2 (\alpha - \beta) \beta \quad (3.34)$$

Površina A_{s4} - površina između zona 4 i 5, diskontinuitet brzine v_z i diskontinuitet brzine v_θ , $r = r_0$, $0 \leq z \leq h_t$, $0 \leq \theta \leq \beta$

$$|\Delta v_z| = |v_{z5} - v_{z4}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} z \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} z \quad (3.35)$$

$$\dot{W}_{s41} = \iint_{00}^{h_t\beta} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{h_t} z dz r_0 d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_0 \beta h_t \quad (3.36)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta5} - v_{\theta4}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_0 \theta \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_0 \theta \quad (3.37)$$

$$\dot{W}_{s42} = \int_0^{h_t} \int_0^\beta \frac{\sigma_e v_0 \alpha - \beta}{\sqrt{3} h_t} r_0 \theta dz r_0 d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_0^2 (\alpha - \beta) \beta \quad (3.38)$$

Površina A_{s5} površina između zona 3 i 4, diskontinuitet brzine v_r , $\theta = \beta$, $r_n \leq r \leq r_0$, $0 \leq z \leq h_t$

$$|\Delta v_r| = |v_{r4} - v_{r3}| = \left| \frac{v_0 \alpha}{h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} - 0 \right| = \frac{v_0 \alpha}{h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} \quad (3.39)$$

$$\dot{W}_{s5} = \int_0^{h_t} \int_{r_n}^{r_0} \frac{\sigma_e v_0 \alpha}{\sqrt{3} h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} dz dr = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{r_0^2 - r_n^2}{2} + r_n^2 \ln \frac{r_0}{r_n} \right) \quad (3.40)$$

Površina A_{s6} površina između zona 2 i 4, diskontinuitet brzine v_r i diskontinuitet brzine v_θ , $z = h_t$, $r_n \leq r \leq r_0$, $0 \leq \theta \leq \beta$

$$|\Delta v_r| = |v_{r4} - v_{r2}| = \left| \frac{v_0 \alpha}{h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} - 0 \right| = \frac{v_0 \alpha}{h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{s61} &= \int_{r_n}^{r_0} \int_0^\beta \frac{\sigma_e v_0 \alpha}{\sqrt{3} h_t} \frac{r^2 - r_n^2}{2\beta r} dr r d\theta \\ &= \frac{\sigma_e v_0}{6\sqrt{3} h_t} \alpha (r_0^3 - r_n^3 - 3r_n^2(r_0 - r_n)) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta4} - v_{\theta2}| = \left| -\frac{v_0 \alpha - \beta}{h_t} r\theta - 0 \right| = \frac{v_0 \alpha - \beta}{h_t} r\theta \quad (3.43)$$

$$\dot{W}_{s62} = \int_{r_n}^{r_0} \int_0^\beta \frac{\sigma_e v_0 \alpha - \beta}{\sqrt{3} h_t} r\theta dr r d\theta = \frac{\sigma_e v_0}{6\sqrt{3} h_t} (\alpha - \beta) \beta (r_0^3 - r_n^3) \quad (3.44)$$

Površina A_{s7} površina između zona 2 i 3, diskontinuitet brzine v_θ , $z = h_t$, $r_n \leq r \leq r_0$, $\beta \leq \theta \leq \alpha$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta3} - v_{\theta2}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} r(\alpha - \theta) - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} r(\alpha - \theta) \quad (3.45)$$

$$\dot{W}_{s7} = \int_{r_n}^{r_0} \int_\beta^\alpha \frac{\sigma_e v_0}{\sqrt{3} h_t} r(\alpha - \theta) dr r d\theta = \frac{\sigma_e v_0}{6\sqrt{3} h_t} (\alpha - \beta)^2 (r_0^3 - r_n^3) \quad (3.46)$$

Ukupna snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Ova snaga računa se prema sledećem izrazu:

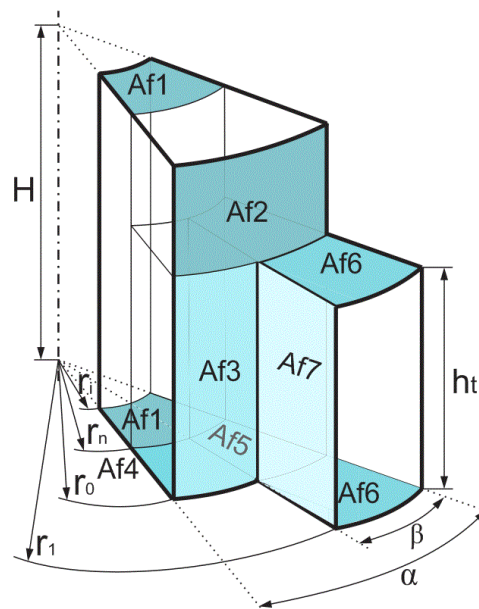
$$\dot{W}_s = \dot{W}_{s1} + 2z(\dot{W}_{s21} + \dot{W}_{s22} + \dot{W}_{s31} + \dot{W}_{s32} + \dot{W}_{s41} + \dot{W}_{s42} + \dot{W}_{s5} + \dot{W}_{s61} + \dot{W}_{s62} + \dot{W}_{s7}) \quad (3.47)$$

3.2.1.1.3 Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama

Snaga koja je potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama (površine kontakta materijala alata i materijala obratka na kojima se javlja trenje) dobija se na osnovu izraza (3.2) pri čemu se tangencijalni napon u ovom slučaju određuje kao napon trenja .

$$\dot{W}_f = \int_{A_f} \tau_f |\Delta v| dA_f = \int_{A_f} \mu \sigma_e |\Delta v| dA_f \quad (3.48)$$

Da bi se odredile komponente snage koja se troši na savladavanje otpora spoljašnjeg trenja, potrebno je odrediti na kojim površinama postoji trenje između materijala alata i materijala obratka. Za tip ozubljenja A i model deformisanja OP površine na kojima postoji spoljašnje trenje, a samim tim i diskontinuitet brzine prikazane su na slici 3.11.



Slika 3.11 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip A, model OP, opšti slučaj

Diskontinuiteti brzina i komponente snage na odgovarajućim površinama imaju sledeće vrednosti:

Površina A_{f1} - gornja i donja prstenasta površina na zoni 1, diskontinuitet brzine v_r , $z = H, r_i \leq r \leq r_n, 0 \leq \theta \leq 2\pi$

$$|\Delta v_r| = |v_{r1} - 0| = \left| -\frac{v_0}{2H} \frac{r^2 - r_n^2}{r} - 0 \right| = \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r^2}{r} \quad (3.49)$$

$$\dot{W}_{f1} = \int_{r_i}^{r_n} \int_0^{2\pi} \mu \sigma_e \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r^2}{r} dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e v_0}{3} \pi (2r_n^3 - 3r_n^2 r_i + r_i^3) \quad (3.50)$$

Površina A_{f2} - kontakt između cilindričnog dela obratka i matrice, diskontinuitet brzine v_z , $r = r_0, h_t \leq z \leq H, 0 \leq \theta \leq 2\pi$

$$|\Delta v_z| = |v_{z2} - 0| = |-v_0 - 0| = v_0 \quad (3.51)$$

$$\dot{W}_{f2} = \int_{h_t}^H \int_0^{2\pi} \mu \sigma_e v_0 dz r_0 d\theta = 2\mu \sigma_e v_0 r_0 \pi (H - h_t) \quad (3.52)$$

Površina A_{f3} - kontakt cilindrične površine međuzublja sa matricom, diskontinuitet brzine v_z i diskontinuitet brzine v_θ , $r = r_0, 0 \leq z \leq h_t, \beta \leq \theta \leq \alpha$

$$|\Delta v_z| = |v_{z3} - 0| = \left| -\frac{v_0}{h_t} z - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} z \quad (3.53)$$

$$\dot{W}_{f31} = \int_{\beta}^{\alpha} \int_0^{h_t} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} z dz r_0 d\theta = \frac{\mu \sigma_e}{2} v_0 r_0 h_t (\alpha - \beta) \quad (3.54)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta3} - 0| = \left| -\frac{v_0}{h_t} r_0 (\alpha - \theta) - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} r_0 (\alpha - \theta) \quad (3.55)$$

$$\dot{W}_{f32} = \int_{\beta}^{\alpha} \int_0^{h_t} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} r_0 (\alpha - \theta) dz r_0 d\theta = \frac{\mu \sigma_e}{2} v_0 r_0^2 (\alpha - \beta)^2 \quad (3.56)$$

Površina A_{f4} - kontakt zone 3 sa dnom matrice, diskontinuitet brzine v_θ , $z = 0, r_n \leq r \leq r_0, \beta \leq \theta \leq \alpha$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta3} - 0| = \left| -\frac{v_0}{h_t} r_0 (\alpha - \theta) - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} r_0 (\alpha - \theta) \quad (3.57)$$

$$\dot{W}_{f4} = \int_{r_n\beta}^{r_0\alpha} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} r(\alpha - \theta) dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e v_0}{6 h_t} (r_0^3 - r_n^3)(\alpha - \beta)^2 \quad (3.58)$$

Površina A_{f5} - kontakt zone 4 sa dnom matrice, diskontinuitet brzine v_r i diskontinuitet brzine v_θ , $z = 0$, $r_n \leq r \leq r_0$, $0 \leq \theta \leq \beta$

$$|\Delta v_r| = |v_{r4} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r^2 - r_n^2}{r} - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r^2 - r_n^2}{r} \quad (3.59)$$

$$\dot{W}_{f51} = \int_{r_n0}^{r_0\beta} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r^2 - r_n^2}{r} dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e v_0}{6 h_t} \alpha (r_0^3 - r_n^3 - 3r_n^2(r_0 - r_n)) \quad (3.60)$$

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta4} - 0| = \left| -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r\theta - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r\theta \quad (3.61)$$

$$\dot{W}_{f52} = \int_{r_n0}^{r_0\beta} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r\theta dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e v_0}{6 h_t} (\alpha - \beta)\beta (r_0^3 - r_n^3) \quad (3.62)$$

Površina A_{f6} - kontakt gornje i donje površine zuba sa matricom, $z = 0$, $z = h_b$, $r_0 \leq r \leq r_1$, $0 \leq \theta \leq \beta$

$$|\Delta v_r| = |v_{r5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} \quad (3.63)$$

$$\dot{W}_{f6} = \int_{r_00}^{r_1\beta} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e v_0}{2 h_t} \alpha (r_0^2 - r_n^2)(r_1 - r_0) \quad (3.64)$$

Površina A_{f7} - kontakt bočne površine zuba sa matricom, $\theta = \beta$, $0 < z < h_b$, $r_0 \leq r \leq r_1$

$$|\Delta v_r| = |v_{r5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} \quad (3.65)$$

$$\dot{W}_{f7} = \int_{0 r_0}^{h_t r_1} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} dz dr = \frac{\mu \sigma_e \alpha}{2 \beta} v_0 (r_0^2 - r_n^2) \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (3.66)$$

Ukupna snaga koja se troši na savladavanje otpora trenja na graničnim površinama

Ova snaga računa se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_f = 2\dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} + 2z(\dot{W}_{f31} + \dot{W}_{f32} + \dot{W}_{f4} + \dot{W}_{f51} + \dot{W}_{f52} + 2\dot{W}_{f6} + \dot{W}_{f7}) \quad (3.67)$$

3.2.1.1.4 Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja A, model deformisanja OP, dobija se sabiranjem izraza (3.23), (3.47) i (3.67).

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{W}_d + \dot{W}_s + \dot{W}_f = \\ &= \dot{W}_{d1} + 2z(\dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4} + \dot{W}_{d5}) + \dot{W}_{s1} \\ &+ 2z(\dot{W}_{s21} + \dot{W}_{s22} + \dot{W}_{s31} + \dot{W}_{s32} + \dot{W}_{s41} + \dot{W}_{s42} + \dot{W}_{s5} + \dot{W}_{s61} \\ &+ \dot{W}_{s62} + \dot{W}_{s7}) + 2\dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} + 2z(\dot{W}_{f31} + \dot{W}_{f32} + \dot{W}_{f4} + \dot{W}_{f51} \\ &+ \dot{W}_{f52} + 2\dot{W}_{f6} + \dot{W}_{f7}) \end{aligned} \quad (3.68)$$

Na osnovu izraza (3.68) mogu se odrediti potrebna deformaciona sila F i srednji pritisak na žig p.

$$F = \frac{\dot{W}}{v_0} \quad (3.69)$$

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{(r_0^2 - r_i^2)\pi} \quad (3.70)$$

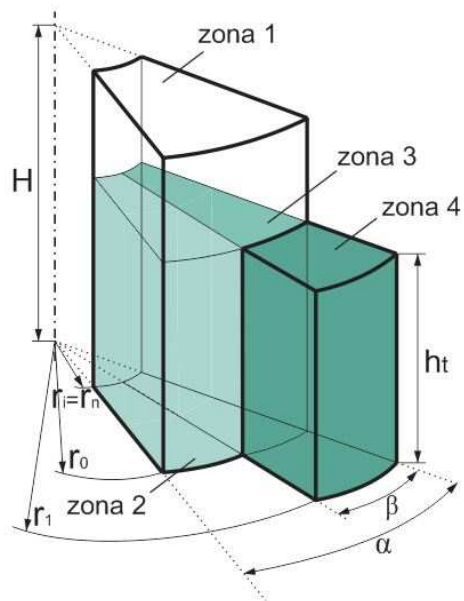
Površina na koju žig deluje nije konstantna veličina, zato što se veličina otvora u obratku menja.

3.2.1.2 Određivanje parametara procesa - granični slučajevi

Analiza graničnih slučajeva oslanja se na analizu procesa za opšti slučaj deformisanja, odnosno može se koristiti veliki deo izraza prikazanih u prethodnom poglavlju. Za nekoliko komponenti snage koje se razlikuju kod graničnih slučajeva, proračun je prikazan u nastavku.

3.2.1.2.1 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_i$

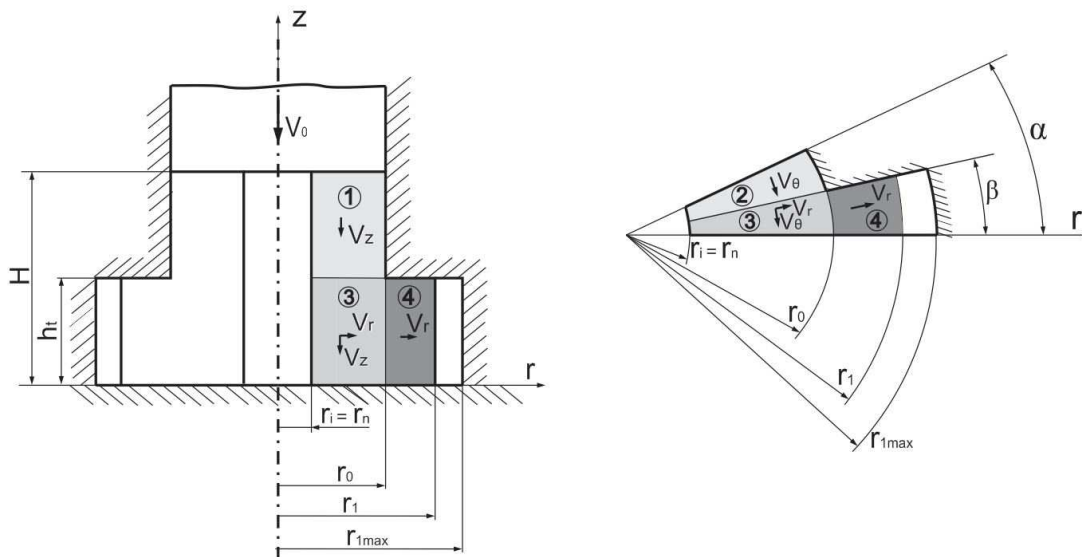
U slučaju kada se neutralni poluprečnik r_n izjednači sa poluprečnikom otvora r_i materijal teče ka periferiji obratka u zoni zuba, a veličina poluprečnika otvora se ne menja. Podela zapremine obratka na zone kada je $r_n = r_i$ prikazana je na slici 3.12.



Slika 3.12 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model OP, $r_n = r_i$

U poređenju sa opštim slučajem deformisanja ne postoji unutrašnja cilindrična zona. Ostale zone su iste kao i kod opšteg modela tako da će i odgovarajuće komponente polja brzine biti iste. Zbog toga će zona 1 u ovom slučaju odgovarati zoni 2 kod opšteg modela, zona 2 zoni 3 kod opšteg modela itd.

Na slici 3.13 prikazane su komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja.



Slika 3.13 - Komponente brzine po zonama - tip A, model OP, $r_n = r_i$

Komponente polja brzine u zoni 1 opisane su jednačinama (3.8), u zoni 2 jednačinama (3.9), u zoni 3 jednačinama (3.10) i u zoni 4 jednačinama (3.11).

Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje

Za određivanje snage potrebne za unutrašnje deformisanje u ovom graničnom slučaju mogu se koristiti komponente snage koje su već određene kod opšteg modela deformisanja, a koje su iste u oba slučaja. U zoni 1 snaga unutrašnjeg deformisanja je jednaka nuli, u zoni 2 se određuje prema izrazu (3.17), u zoni 3 prema izrazu (3.19) i u zoni 4 prema izrazu (3.22).

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema

$$\dot{W}_d = 2z (\dot{W}_{d2} + \dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4}) \quad (3.71)$$

Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Na slici 3.14 prikazane su površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine kada je $r_n = r_i$. Kako je ovo samo specijalan slučaj opšteg modela deformisanja, površine A_{S1} , A_{S2} , A_{S3} i A_{S4} u ovom slučaju odgovaraju površinama A_{S7} , A_{S6} , A_{S5} i A_{S4} u opštem slučaju.

Zato se snaga koja se troši na površini diskontinuiteta A_{S1} može odrediti prema izrazu (3.46), na površini A_{S2} prema izrazima (3.42) i (3.44), na površini A_{S3} prema izrazu (3.40) i na površini A_{S4} prema izrazima (3.36) i (3.38).

Ukupna snaga koja se troši na površinama diskontinuiteta brzine određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_s = 2z(\dot{W}_{s1} + \dot{W}_{s21} + \dot{W}_{s22} + \dot{W}_{s3} + \dot{W}_{s41} + \dot{W}_{s42}) \quad (3.72)$$

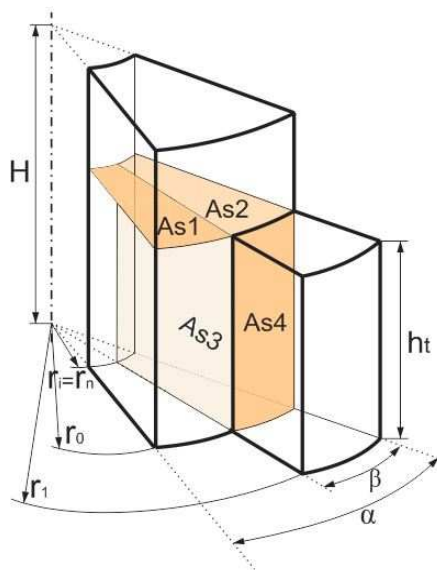
Snaga koja se troši na savladavanje otpora trenja na graničnim površinama

Na slici 3.15 prikazane su površine na kojima postoji spoljašnje trenje kada je $r_n = r_i$. Kako je ovo samo specijalan slučaj opšteg modela deformisanja, površine A_{f1} , A_{f2} , A_{f3} , A_{f4} , A_{f5} i A_{f6} u ovom slučaju odgovaraju površinama A_{f2} , A_{f3} , A_{f4} , A_{f5} , A_{f6} i A_{f7} u opštem slučaju.

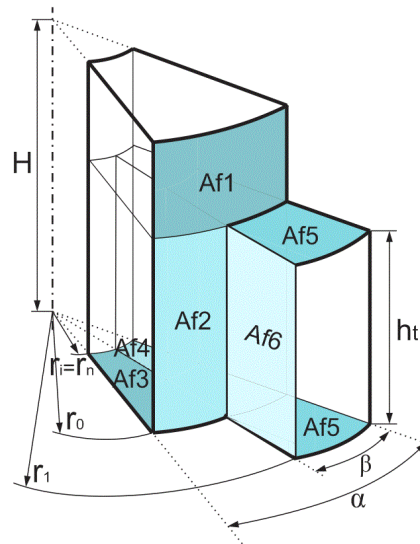
Snaga potrebna za savladavanje otpore trenja na pojedinim površinama može se izračunati prema sledećim izrazima: za površinu A_{f1} prema izrazu (3.52), za površinu A_{f2} prema izrazima (3.54) i (3.56), za površinu A_{f3} prema izrazu (3.58), za površinu A_{f4} prema izrazima (3.60) i (3.62), za površinu A_{f5} prema izrazu (3.64) i A_{f6} prema izrazu (3.66).

U ovom slučaju ukupna snaga koja se troši na savladavanje otpora trenja na graničnim površinama računa se prema sledećem izrazu

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2z (\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f5} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.73)$$



Slika 3.14 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine, tip A, model OP, $r_n = r_i$



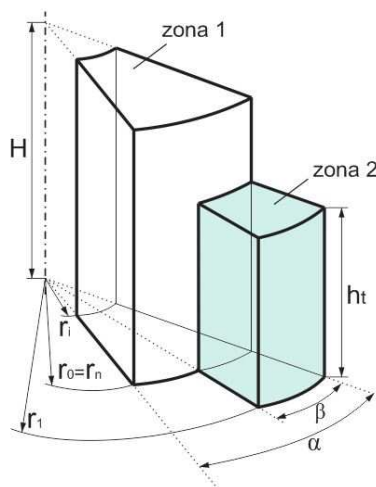
Slika 3.15 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka, tip A, model OP, $r_n = r_i$

Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tip ozubljenja A, model deformisanja OP kada je $r_n = r_i$ dobija se sabiranjem izraza (3.71), (3.72) i (3.73). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

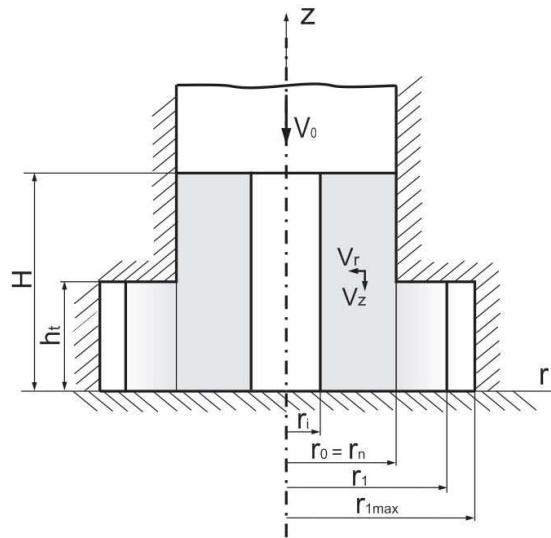
3.2.1.2.2 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

U slučaju kada se neutralni poluprečnik r_n izjednači sa poluprečnikom pripremljena, odnosno poluprečnikom cilindričnog dela matrice r_0 materijal teče ka unutrašnjosti obratka, popunjavajući otvor. Ova situacija se dešava i kada je ozubljenje formirano pre nego što je otvor popunjen. Na slici 3.16 prikazana je podela obratka na zone, pri čemu treba naglasiti da se materijal kreće samo u zoni 1, dok u zoni 2 materijal miruje.



Slika 3.16 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model OP, $r_n = r_0$

Na slici 3.17 prikazano je kako su pretpostavljene komponente brzine u zoni 1 u kojoj, u ovom slučaju deformisanja, jedino dolazi do kretanja materijala.



Slika 3.17 - Komponente brzine po zonama - tip A, model OP, $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Komponente brzine u zoni 1 iste su kao komponente brzine u zoni 1 u opštem slučaju deformisanja. Postoje samo radijalna i aksijalna komponenta koje se određuju prema izrazu (3.7) za komponente brzine u opštem slučaju, samo što u ovoj situaciji važi uslov da je $r_n = r_0$.

Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje

U ovom slučaju postoji samo jedna zona u kojoj se materijal deformiše, a to je zona 1. Ova zona je identična sa zonom 1 u opštem slučaju, tako da se snaga unutrašnjeg deformisanja može odrediti prema izrazu (3.13) kada se u njega uvrsti da je $r_n = r_0$.

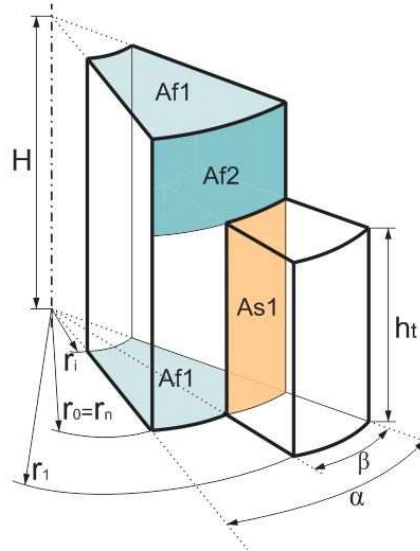
Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Diskontinuitet postoji samo na jednoj površini, A_{s1} (slika 3.18). To je granična površina između zona 1 i 2 i diskontinuitet brzine je u pravcu ose z.

$$|\Delta v_z| = |v_{z2} - v_{z1}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{H} z \right) \right| = \frac{v_0}{H} z \quad (3.74)$$

Snaga koja se troši na savladavanje ovog diskontinuiteta brzine iznosi

$$\dot{W}_{s1} = \iint_0^{h_t \beta} \frac{\sigma_e v_0}{\sqrt{3} H} z dz r_0 d\theta = \frac{\sigma_e v_0}{2\sqrt{3} H} r_0 \beta h_t^2 \quad (3.75)$$



Slika 3.18 - Površine na kojima postoji diskontinuitet brzine i površine na kojima postoji trenje između alata i obratka- tip A, model OP, $r_0 = r_n$ ili $r_1 = r_{1max}$

Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama

Trenje između materijala alata i obratka postoji na površinama A_{f1} i A_{f2} (slika 3.16). Te površine odgovaraju površinama A_{f1} i A_{f2} kod opšteg modela. U slučaju površine A_{f1} diskontinuitet brzine i snaga koja se troši na toj površini mogu se odrediti na osnovu izraza (3.49) i (3.50), kada se uvrsti da je $r_n = r_0$.

U slučaju površine A_{f2} diskontinuitet brzine se razlikuje u odnosu na opšti slučaj, zato što se aksijalne komponente brzine u ova dva slučaja razlikuju. Diskontinuitet brzine na površini A_{f2} i odgovarajuća snaga iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z2} - v_{z1}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{H} z \right) \right| = \frac{v_0}{H} z \quad (3.76)$$

$$\dot{W}_{f2} = \int_{h_t}^H \int_0^{2\pi} \mu \sigma_e \frac{v_0}{H} z dz r_0 d\theta = \mu \sigma_e \frac{v_0}{H} r_0 \pi (H^2 - h_t^2) \quad (3.77)$$

Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak - tip A, model OP, $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tip ozubljenja A, model deformisanja OP kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ dobija se na osnovu izraza (3.13), (3.75), (3.50) i (3.77).

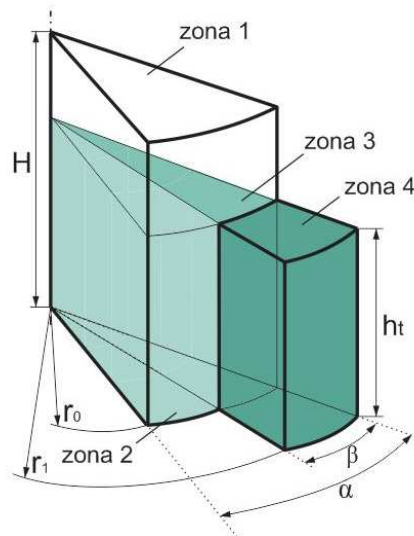
$$\dot{W} = \dot{W}_{d1} + 2 z \dot{W}_{s1} + 2\dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} \quad (3.78)$$

Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

3.2.1.2.3 Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces

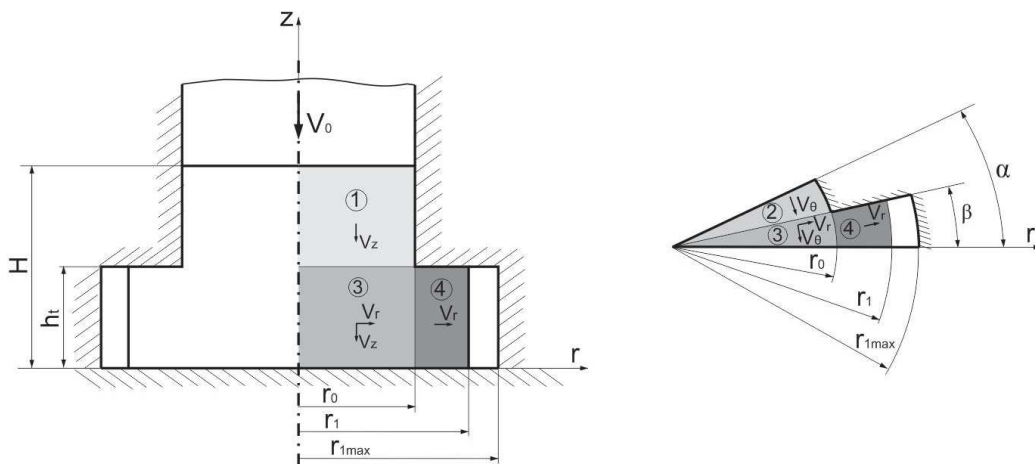
U slučaju kada se prvo otvor popuni materijalom, a ozubljenje još nije formirano, proces se dalje odvija kao da je pripremak pun deo, odnosno kao kod konvencionalnog procesa istiskivanja. Rešenje metodom gornje granice za konvencionalan proces istiskivanja potrebno je i kako bi mogao da se oceni efekat primene otvora u alatu i obratku na veličinu potrebne deformacione sile, odnosno da se odredi kolika je razlika u odnosu na konvencionalan proces.

Kada je pripremak pun deo i kada nema otvora u obratku i alatu, na osnovu analize toka materijala, zapremina obratka je podeljena na četiri zone deformisanja (slika 3.19).



Slika 3.19 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, konvencionalan proces

Raspored brzina po zonama prikazan je na slici 3.20.



Slika 3.20 - Komponente brzine po zonama, tip A, konvencionalan proces

Zona 1 ista je kao zona 2 kod opšteg slučaja, zona 2 odgovara zoni 3 kod opšteg slučaja, dok se komponente brzine za zone 3 i 4 dobijaju na osnovu izraza (3.10) i (3.11) kada se u njih uvrsti da je vrednost neutralnog poluprečnika nula, $r_n = 0$.

Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje

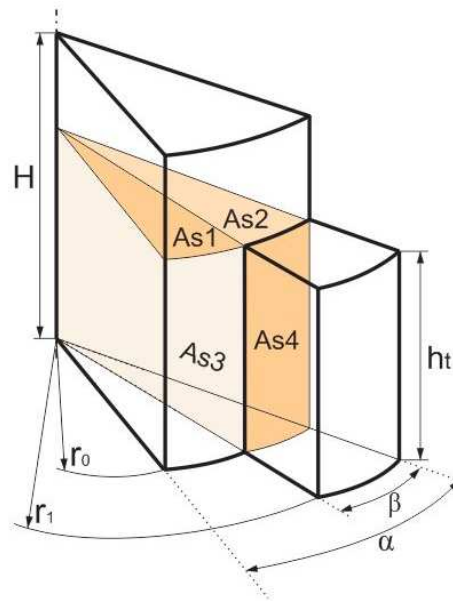
Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje u prvoj zoni je nula (nema deformisanja materijala), dok se za zone 2, 3 i 4 mogu odrediti prema izrazima (3.17), (3.19) i (3.22), kada se u njih uvrsti da je $r_n = 0$.

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_d = 2z (\dot{W}_{d2} + \dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4}) \quad (3.79)$$

Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine prikazane su na slici 3.21.



Slika 3.21 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tipA, konvencionalan process

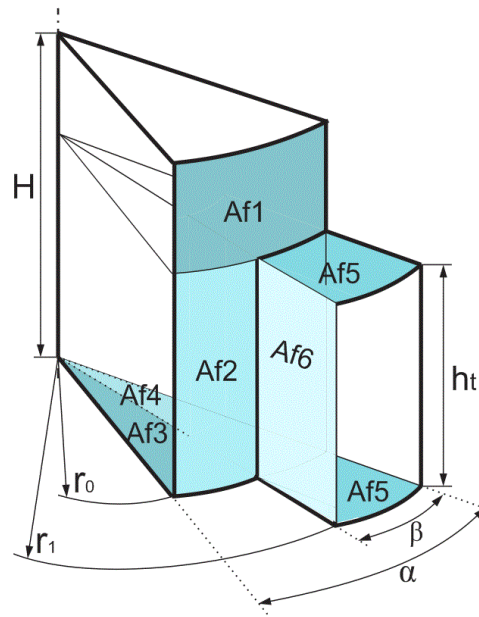
Komponente snage koje su potrebne za savladavanje diskontinuiteta brzine na pojedinim površinama mogu se odrediti na osnovu izraza za odgovarajuće površine za opšti slučaj deformisanja kada se uvrsti da je $r_n = 0$. Tako se snaga koja se troši na površini A_{S1} može odrediti na osnovu izraza (3.46), na površini A_{S2} na osnovu izraza (3.42) i (3.44) i na površini A_{S3} na osnovu izraza (3.40). Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine na površini A_{S4} jednaka je snazi koje je potrebna na površini A_{S4} kod opšteg slučaja deformisanja kod modela OP. Ova snaga može da se odredi prema izrazima (3.36) i (3.38)

Ukupna snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_s = 2z(\dot{W}_{s1} + \dot{W}_{s21} + \dot{W}_{s22} + \dot{W}_{s3} + \dot{W}_{s41} + \dot{W}_{s42}) \quad (3.80)$$

Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama

Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka u slučaju istiskivanja punog ozubljenja tipa A prikazane su na sici 3.22.



Slika 3.22 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip A, konvencionalan proces

Komponente snage potrebne za savladavanje otpora trenja na površinama A_{f1} i A_{f2} , mogu da se odrede na osnovu izraza za odgovarajuće površine za opšti slučaj deformisanja kod modela deformisanja OP. Za površinu A_{f1} to je izraz (3.52), a za površinu A_{f2} to su izrazi (3.54) i (3.56). I za ostale površine mogu da se koriste izrazi za opšti slučaj deformisanja, samo je potrebno uvrstiti da je neutralni poluprečnik jednak nuli. Za površinu A_{f3} koristi se izraz (3.58), za površinu A_{f4} izrazi (3.60) i (3.62), za površinu A_{f5} izraz (3.64) i za površinu A_{f6} izraz (3.66)

Ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora trenja određuje se prema sledećem izrazu

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2z(\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f5} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.81)$$

Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja A kada nema otvora u pripreмку i alatu dobija se sabiranjem izraza (3.79), (3.80) i (3.81). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) može se odrediti deformaciona sila, dok se srednji pritisak na žig određuje na osnovu sledećeg izraza

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{r_0^2 \pi} \quad (3.82)$$

U ovom slučaju površina obratka na koju deluje žig je površina kruga, zato što ne postoji otvor u obratku.

3.2.1.3 Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja A, model OP

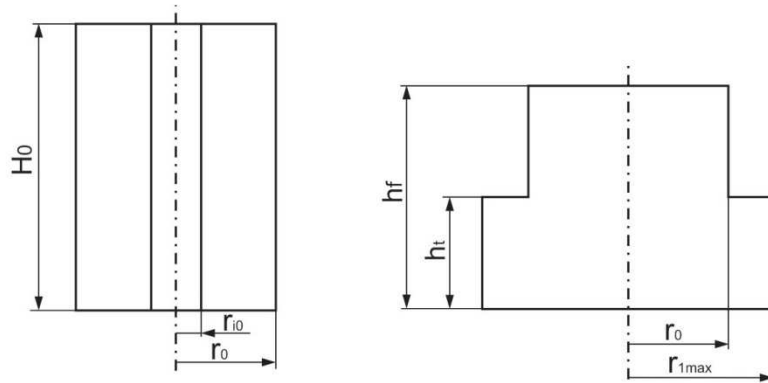
Kako bi na osnovu izraza (3.69) mogla da se izračuna vrednost potrebne deformacione sile u ovom procesu, sve veličine koje figurišu u pojedinačnim komponentama moraju biti definisane.

Veličine kao što su poluprečnik priprema r_0 , poluprečnik početnog otvora u pripremu r_{i0} , krajnji poluprečnik zuba r_{1max} , ugao α koji definiše polovinu zuba i međuzublja, ugao β koji definiše polovinu zuba, visina zuba h_t , koeficijent trenja μ i broj zuba z su zadate veličine i one se tokom procesa deformisanja ne menjaju. Veličine koje se menjaju sa promenom hoda alata su logaritamska deformacija ϕ , napon tečenja K , poluprečnik zuba r_1 , poluprečnik otvora u obratku r_i i poluprečnik neutralne površine r_n . U tabeli 3.2 prikazane su konstantne i promenljive veličine u procesu.

Tabela 3.2 - Konstantne i promenljive veličine u procesu

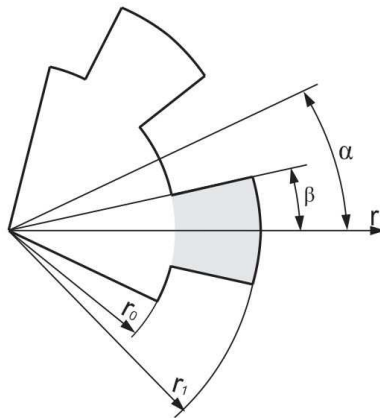
Konstantne veličine	Promenljive veličine
r_0 poluprečnik priprema	ϕ logaritamska deofrmacija
r_{i0} početni poluprečnik otvora	K napon tečenja
r_{1max} krajnji poluprečnik zuba	r_1 poluprečnik zuba
α ugao polovine zuba i međuzublja	r_i poluprečnik otvora
β ugao polovine zuba	r_n poluprečnik neutralne površine
h_t visina zuba	
μ koeficijent trenja	
z broj zuba	

Na osnovu zadatah, konstatnih veličina može se odrediti koliki je ukupan (teoretski) hod u procesu potreban da bi se popunio otvor i formiralo ozubljenje. Ukupan potreban hod h_f određuje se iz uslova jednakosti zapremine priprema i gotovog dela. Kao što se vidi sa slike 3.23 ukupan hod se određuje za situaciju kada je otvor u obratku u potpunosti popunjen, mada će hod potreban da se zubi formiraju biti manji, što će kasnije i biti pokazano.



Slika 3.23 - Pripremak i gotov deo kod istiskivanja ozubljenja tip A - model OP

Da bi mogao da se izračuna ukupan potreban hod u procesu potrebno je prvo odrediti površinu zuba. Na slici 3.24 prikazana je geometrija zuba kod tipa ozubljenja A.



Slika 3.24 - Oblik zuba kod tipa ozubljenja A

Površina zuba (osenčeni deo na slici 3.24) za tekući poluprečnik r_1 će biti

$$P_{ZA} = \beta(r_1^2 - r_0^2) \quad (3.83)$$

Iz uslova jednakosti zapremine pripremka V_0 i gotovog dela V_1 (deo kod koga su formirani zubi i popunjen otvor u sredini) može se odrediti visina na kraju procesa istiskivanja h_f i ukupan hod alata s_t , pri čemu je za ukupan hod potrebno u izraz (3.83) uvrstiti $r_1 = r_{1max}$.

$$V_0 = V_1$$

$$(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 = r_0^2 \pi h_f + z h_t P_{ZA}$$

$$h_f = \frac{(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 - z h_t \beta (r_{1max}^2 - r_0^2)}{r_0^2 \pi} \quad (3.84)$$

$$s_f = H_0 - h_f \quad (3.85)$$

U nastavku će biti prikazano kako se određuju veličine koje se menjaju sa promenom hoda alata (logaritamska deformacija φ , napon tečenja K , spoljašnji poluprečnik zuba r_1 , poluprečnik otvora u obratku r_i i poluprečnik neutralne površine r_n).

Usvojeno je da se veličina logaritamske deformacije određuje preko promene visine dela.

$$\varphi = \ln \frac{H_0}{H} \quad (3.86)$$

Na osnovu analitičkog oblika krive tečenja i veličine deformacije određene prema (3.86) izračunava se vrednost odgovarajućeg napona tečenja K , koji je jednak efektivnom naponu σ_e .

$$K = C\varphi^n \quad (3.87)$$

Koeficijenti C i n određuju se eksperimentalno za konkretan materijal.

Poluprečnik neutralne površine je veličina za koju funkcija (3.68) ima minimum na intervalu $r_i < r_n < r_0$. Ovaj uslov znači da će poluprečnik neutralne površine r_n imati onu vrednost za koju ukupna potrebna snaga deformisanja ima minimum, odnosno neutralna površina u toku procesa deformisanja zauzima onaj položaj koji omogućava deformisanje se najmanjom potrebnom energijom.

Kada se odredi vrednost poluprečnika neutralne površine r_n , potrebno je odrediti tekući spoljašnji poluprečnik r_1 i poluprečnik otvora r_i , da bi bili poznati svi parametri potrebni za izračunavanje deformacione sile. Ove dve veličine određuju se na osnovu uslova konstantnosti zapremine dela na početku i na kraju istiskivanja za pripraštaj ΔH . Ovaj uslov primenjuje na taj način što se zapremina koja se istisne u hodu ΔH podeli na dva dela neutralnom površinom (slika 3.25). Jedan deo istinute zapremine popunjava unutrašnji otvor i utiče na smanjenje unutrašnjeg poluprečnika r_i , dok drugi deo istisnute zapremine formira ozubljenje i utiče na povećanje spoljašnjeg poluprečnika zuba r_1 .

Na slici 3.25 prikazano je kako se materijal raspodeljuje tokom procesa istiskivanja kada se neutralna površina nalazi u materijalu, odnosno kada poluprečnik neutralne površine ima vrednost između poluprečnika otvora r_i i poluprečnika cilindričnog dela matrice r_0 . Na slici 3.25 su sve veličine na početku pripraštaja (pre istiskivanja) označene velikim slovima (H, R_i, R_1), a nove vrednosti, nakon istiskivanja malim slovima (h, r_i, r_1) i te oznake su korištene i u odgovarajućim izrazima za izračunavanje unutrašnjeg prečnika r_i i spoljašnjeg prečnika r_1 .

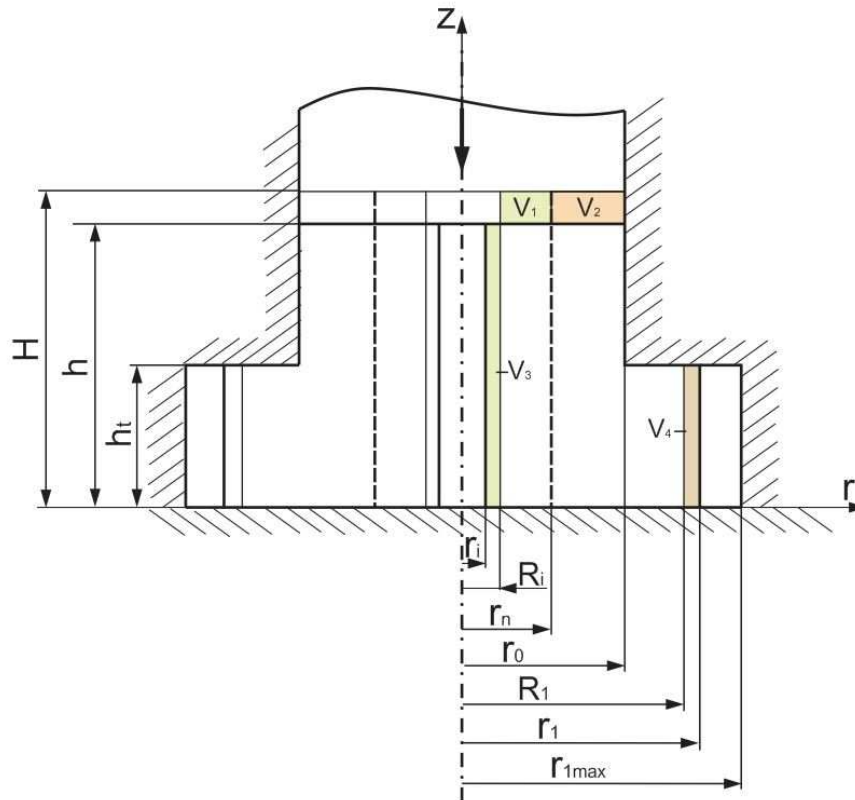
Prema slici 3.25 sledi

$$V_1 = V_3$$

$$(R_i^2 - r_i^2)\pi h = (r_n^2 - R_i^2)\pi (H - h)$$

Iz ovog uslova jednakosti zapremina može se odrediti poluprečnik otvora u obratku r_i .

$$r_i = \sqrt{r_n^2 - (r_n^2 - R_i^2) \frac{H}{h}} \quad (3.88)$$



Slika 3.25 - Promena geometrije dela kada se neutralna površina nalazi u materijalu, model deformisanja OP

Prema slici 3.25 takođe sledi

$$V_2 = V_4$$

$$(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h) = (r_1^2 - R_1^2) \beta z h_t$$

Na osnovu ovog uslova jednakosti zapremine određuje se promena poluprečnika r_1

$$r_1 = \sqrt{R_1^2 + \frac{(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h)}{\beta z h_t}} \quad (3.89)$$

Poluprečnik r_1 može da se odredi i na osnovu uslova jednakosti ukupne zapremine pripremljena i dela nakon istiskivanja za hod $s = H_0 - h$ prema slici 3.25.

$$V_0 = V$$

$$(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 = (r_0^2 - r_i^2)\pi h + z\beta h_t(r_1^2 - r_0^2)$$

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 + \frac{(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 - (r_0^2 - r_i^2)\pi h}{z\beta h_t}} \quad (3.90)$$

Izrazi (3.88) i (3.89) mogu se koristiti i kod određivanja veličina r_i i r_1 kada su u pitanju granični slučajevi tečenja materijala.

Kada je $r_n = r_i$ zapremina V_1 i V_3 prema slici 3.25 ne postoje, a za određivanje spoljašnjeg prečnika r_1 koristi se jednakost zapremina $V_2 = V_4$, odnosno izraz (3.89) kao kod opšteg slučaja.

U slučaju kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1\max}$ ne postoji promena spoljašnjeg poluprečnika ozubljenja r_1 . Prema slici 3.25 zone V_2 i V_4 ne postoje, a unutrašnji poluprečnik r_i određuje se iz uslova konstantnosti zapremina V_1 i V_3 , prema jednačini (3.88).

Kada je u pitanju konvencionalna metoda tekući poluprečnik ozubljenja r_1 se određuje kada se u izraz (3.90) uvrsti da su vrednosti unutrašnjeg poluprečnika na početku i na kraju posmatranog priraštaja hoda jednake nuli s obzirom da u ovom slučaju ne postoji otvor u obratku ($r_{i0} = 0, r_i = 0$).

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 + \frac{r_0^2\pi(H_0 - h)}{z\beta h_t}} \quad (3.91)$$

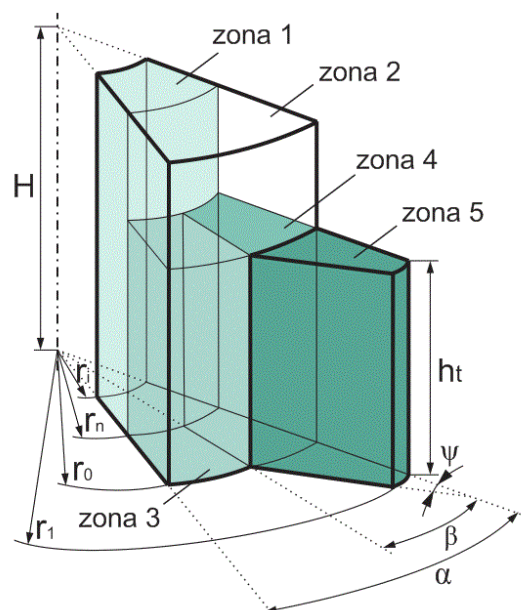
3.2.2 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA - TIP OZUBLJENJA B, MODEL OP

Kao i u slučaju ozubljenog dela tipa A i u slučaju ozubljenog dela tipa B analiziran je opšti slučaj tečenja materijala i granični slučajevi.

3.2.2.1 Određivanje parametara procesa - opšti slučaj

U teorijskoj analizi metodom gornje granice tip ozubljenja tipa B, model deformisanja OP, prvo je urađena analiza za opšti slučaj deformisanja, kada se poluprečnik neutralne površine nalazi u materijalu. Kao i kod tipa ozubljenja A, i u ovom slučaju usvojena je podela zapremine na pet zona deformisanja (slika 3.26). Zone 1, 2, 3 i 4 su identične kao kod tipa ozubljenja A, tako da su i svi izrazi koji se odnose na definisanje komponenti brzine, potrebne snage unutrašnjeg deformisanja, snage potrebne za savladavanje diskontinuiteta brzine i spoljašnjeg trenja jednaki kao i kod tipa A.

Razlike između tipa A i tipa B u komponentama snage postoje u zoni 5, jer se zbog različitog oblika zuba definišu drugačije komponente polja brzine, a i granice zone su različite.

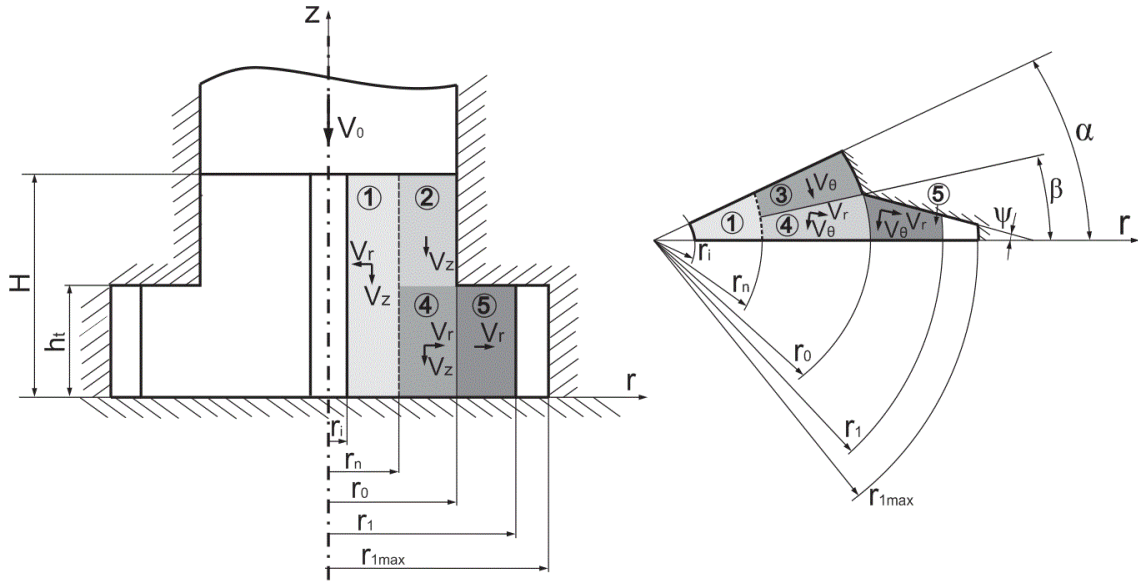


Slika 3.26 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja B, model OP, opšti slučaj

Na slici 3.27 prikazane su komponente brzine po zonama za tip ozubljenja B, model deformisanja OP, opšti slučaj deformisanja. Za razliku od tipa ozubljenja A, u zoni 5 pored radijalne postoji i tangencijalna komponenta brzine, dok je aksijalna komponenta nula, jer nema kretanja materijala u pravcu z ose.

Prilikom određivanja komponenti brzine u zoni 5 pretpostavljeno je da će radijalna komponenta brzine u celoj zoni imati vrednost koja je jednaka radijalnoj brzini na granici zona 4 i 5, dok je tangencijalna komponenta određena na osnovu uslova (3.2). Prema tome u zoni 5 komponente brzine će biti

$$v_z = 0 \quad v_\theta = -\frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \quad v_r = \frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \quad (3.92)$$



Slika 3.27 - Komponente brzine po zonama, tip ozubljenja B, model deformisanja OP, opšti slučaj

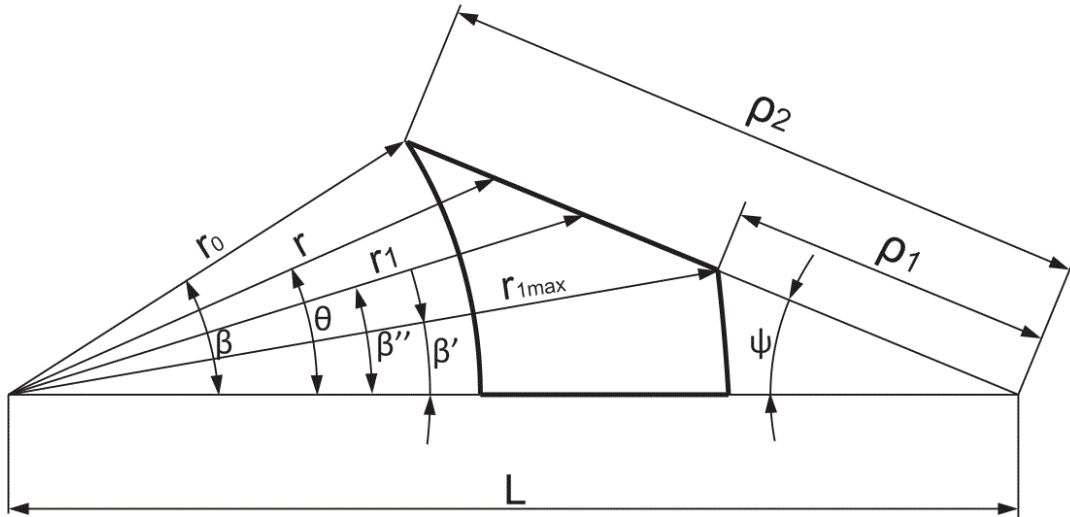
3.2.2.1.1 Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje

Komponente snage potrebne za unutrašnje deformisanje za zone 1, 2 3 i 4 mogu se odrediti na osnovu izraza (3.13), (3.15), (3.17) i (3.19), zato što su te zone iste kao i kod tipa ozubljenja A.

U zoni pet komponente brzine deformacije imaju sledeće vrednosti

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = -\frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} + \frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{1}{2} \frac{v_0 \alpha}{h_t 2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} \theta \\ \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\ \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.93)$$

Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 5. Da bi mogao da se reši integral potrebno je prvo definisati granice zone 5, odnosno konture zuba. Na slici 3.28 prikazan je način na koji je definisana geometrija ovog oblika zuba.



Slika 3.28 - Tip ozubljenja B - geometrija zuba

U zoni 5 vrednosti promenljivih z i θ su u sledećim granicama (slika 3.26)

$$0 \leq z \leq h_t$$

$$0 \leq \theta \leq \beta$$

dok se granice poluprečnika r određuju na sledeći način (slika 3.28)

$$r_0 \leq r \leq r_1 \text{ kada ugao ima vrednosti } 0 \leq \theta \leq \beta''$$

$$r_0 \leq r \leq r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} (\beta - \theta) \text{ kada ugao ima vrednosti } \beta'' \leq \theta \leq \beta$$

Uvrštavanjem ovih granica u izraz (3.5) dobija se sledeći integral

$$\begin{aligned} \dot{W}_{d5} = & \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0 r_0 0}^{h_t r_1 \beta''} \sqrt{2 \left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{4\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} \theta \right)^2} dz dr r d\theta \\ & + \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0 \beta'' r_0}^{h_t \beta r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} (\beta - \theta)} \sqrt{2 \left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{4\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} \theta \right)^2} dz dr r d\theta \end{aligned}$$

Rešenje ovog integral ima sledeći oblik

$$\dot{W}_{d5} = \frac{\sigma_e}{4\sqrt{3}} v_0 \frac{\alpha}{\beta} \frac{(r_0^2 - r_n^2)}{r_0} (r_1 - r_0) \left(\beta''^2 + \frac{\beta^3 - 3\beta\beta''^2 + 2\beta''^3}{\beta - \beta'} \right) \quad (3.94)$$

Ukupna snaga potrebna za unutrašnje deformisanje dobija se na osnovu izraza (3.23).

3.2.2.1.2 Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine može se odrediti na isti način kao kod tipa ozubljenja A, model OP. Na slici 3.29 vidi se da su sve površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine iste kao i kod tipa ozubljenja A. Razlika se javlja u komponenti snage na površini As_4 na koju utiče diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine. Ova razlika postoji zato što se komponente brzine u zoni 5 razlikuju u odnosu na tip ozubljenja A.

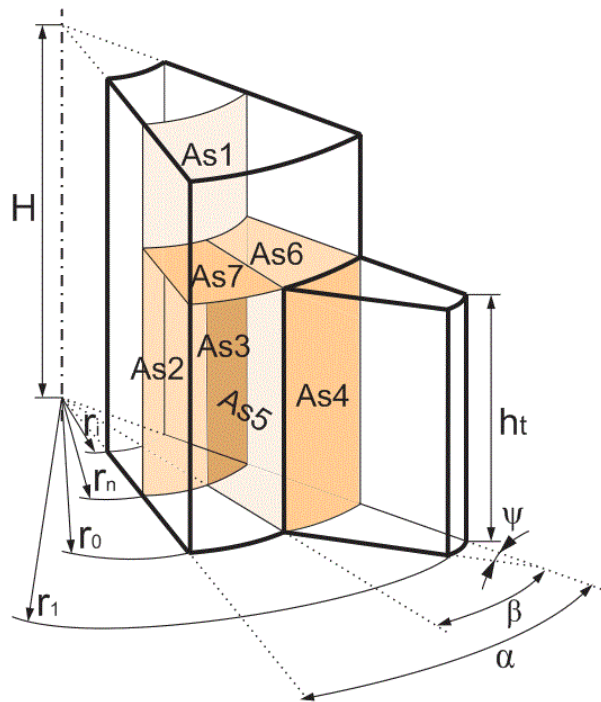
Diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine na površini As_4 i odgovarajuća komponenta snage iznose:

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta 5} - v_{\theta 4}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta - \left(-\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_0 \theta \right) \right| \quad (3.95)$$

$$= \frac{v_0}{2h_t \beta r_0} [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2] \theta$$

$$\dot{W}_{s42} = \int_0^{h_t \beta} \int_0^{\theta} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{2h_t \beta r_0} [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2] \theta dz r_0 d\theta \quad (3.96)$$

$$= \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2]$$

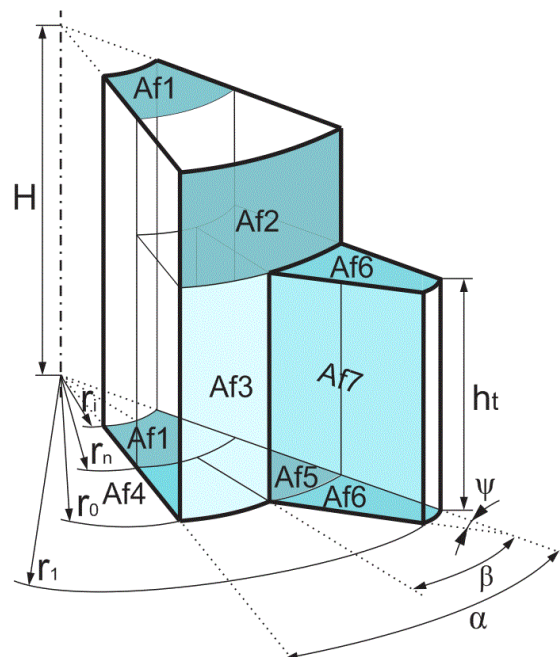


Slika 3.29 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tip B, model OP, opšti slučaj

Ukupna snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzina može se odrediti prema izrazu (3.47), kada se u njega umesto izraza (3.38) uvrsti (3.96).

3.2.2.1.3 Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja

Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja može se odrediti na isti način kao i kod tipa ozubljenja A, model OP. Na slici 3.30 vidi se da su sve površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine i spoljašnje trenje iste kao i kod tipa ozubljenja A. Razlika se javlja u različitim vrednostima komponenti snage na površinama Af6 i Af7. Ove razlike postoje zato što se u zoni 5 u odnosu na tip ozubljenja A razlikuju komponente brzine, kao i granice zone.



Slika 3.30 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip B, model OP, opšti slučaj

Na površini Af6 postoji diskontinuitet i radijalne i tangencijalne komponente brzine. Diskontinuitet radijalne komponente brzine na površini Af6, kao i odgovarajuća komponenta snage iznose:

$$|\Delta v_r| = |v_{r5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \quad (3.97)$$

$$\dot{W}_{f61} = \iint_{0r_0}^{\beta''r_1} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} dr r d\theta + \int_{\beta''}^{\beta} \int_{r_0}^{r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta''}(\beta - \theta)} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{f61} = \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{4\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \left[\beta''(r_1^2 - r_0^2) + r_0(r_1 - r_0) \frac{(\beta - \beta'')^2}{\beta - \beta'} + \frac{(r_1 - r_0)^2 (\beta - \beta'')^3}{3(\beta - \beta')^2} \right] \quad (3.98)$$

Diskontinuitet tangencijalne komponente na površini A_{f6} , kao i odgovarajuća komponenta snage iznose:

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \quad (3.99)$$

$$\dot{W}_{f62} = \iint_{0r_0}^{\beta''r_1} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta dr r d\theta + \int_{\beta''}^{\beta} \int_{r_0}^{r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'}(\beta - \theta)} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{f62} = \frac{\mu\sigma_e v_0 \alpha (r_0^2 - r_n^2)}{4 h_t \beta r_0} \left[(r_1^2 - r_0^2) \frac{\beta''^2}{2} + K\beta(2r_0 + K\beta) \frac{\beta^2 - \beta''^2}{2} - 2K(r_0 + K\beta) \frac{\beta^3 - \beta''^3}{3} + K^2 \frac{\beta^4 - \beta''^4}{4} \right] \quad (3.100)$$

Veličina K iz izraza (3.100) ima sledeću vrednost

$$K = \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'}$$

Na površini A_{f7} posmatra se diskontinuitet za rezultantu radijalne i tangencijalne komponente brzine u zoni 5.

$$|\Delta v| = \left| \sqrt{v_{r5}^2 + v_{\theta5}^2} - 0 \right| = \left| \sqrt{\left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \right)^2} - 0 \right| \quad (3.101)$$

$$= \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2}$$

Na površini A_{f7} visina menja vrednost od nule do h_t ($0 \leq z \leq h_t$), a poluprečnik od r_0 do r_1 ($r_0 \leq r \leq r_1$). Međutim, kako u izrazu za diskontinuitet brzine figuriše i promenljiva θ , kod određivanja komponente snage \dot{W}_{f7} poluprečnik je izražen preko funkcije u kojoj takođe figuriše θ .

$$\dot{W}_{f7} = \iint_{0r_0}^{h_t r_1} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2} dz dr$$

$$r = r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'}(\beta - \theta) \quad \text{kada je } \beta'' \leq \theta \leq \beta$$

$$dr = -\frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} d\theta$$

$$\dot{W}_{f7} = \int_0^{\beta} \int_{\beta}^{h_t \beta''} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2} dz \left(-\frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} d\theta \right)$$

$$\dot{W}_{f7} = \frac{\mu \sigma_e \alpha}{4} \frac{v_0}{\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} \left(\beta \sqrt{1 + \beta^2} - \beta'' \sqrt{1 + \beta''^2} + \ln \frac{\beta + \sqrt{1 + \beta^2}}{\beta'' + \sqrt{1 + \beta''^2}} \right) \quad (3.102)$$

Ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_f = 2\dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} + 2z (\dot{W}_{f31} + \dot{W}_{f32} + \dot{W}_{f4} + \dot{W}_{f51} + \dot{W}_{f52} + 2\dot{W}_{f61} + 2\dot{W}_{f62} + \dot{W}_{f7}) \quad (3.103)$$

3.2.2.1.4 Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja B, model deformisanja OP, dobija se sabiranjem ukupne snage potrebne za unutrašnje deformisanje određene na način opisan u poglavlju 3.2.2.1.1, ukupne snage potrebne za savladavanje diskontinuiteta brzine određene na način opisan u poglavlju 3.2.2.1.2 i ukupne snage potrebne za savladavanje otpora trenja određene na način opisan u poglavlju 3.2.2.1.3. Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

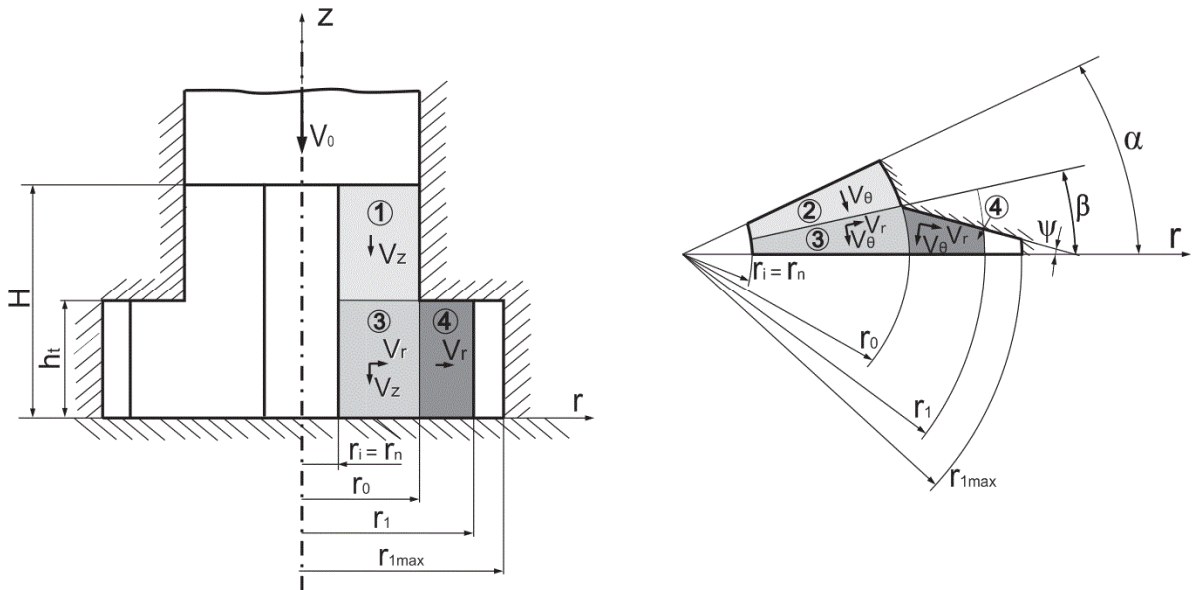
3.2.2.2 Određivanje parametara procesa - granični slučajevi

Kao i u slučaju tipa ozubljenja A i kod tipa ozubljenja B postoje tri granična slučaja:

- kada je neutralni poluprečnik r_n jednak unutrašnjem poluprečniku r_i , $r_n = r_i$,
- kada je neutralni poluprečnik r_n jednak poluprečniku cilindričnog dela matrice r_0 , $r_n = r_0$ ili kada je $r_1 = r_{1\max}$ (zubi formirani, a otvor u obratku još uvek postoji),
- kada se otvor u obratku popuni (deo se onda deformiše kao da je pripremak bio bez otvora, pun deo).

3.2.2.2.1 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_i$

Podela obratka na zone deformisanja prikazana na slici 3.13 za tip ozubljenja A biće primenjena i u ovom slučaju, pri čemu se oblik zone 4 razlikuje. Na slici 3.31 prikazane su komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja. Analogno određivanju snage unutrašnjeg deformisanja za tip ozubljenja A, i u ovom slučaju snaga unutrašnjeg deformisanja za zone 1, 2, i 3 određuje se prema izrazima (3.15), (3.17) i (3.19), dok će se za zonu 4 odrediti na osnovu izraza (3.94). Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema (3.71).



Slika 3.31 - Komponente brzine po zonama - tip B, model OP, $r_n = r_i$

Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzina u slučaju istiskivanja ozubljenja tipa A prikazane su na slici 3.14, dok su površine na kojima postoji trenje između alata i obratka prikazane na slici 3.15. Površine su iste i u slučaju istiskivanja tipa ozubljenja B, samo se oblik i veličina površina A_{f5} i A_{f6} sa slike 3.15 razlikuju (broj površina ostaje isti). Prema tome, ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora na površinama diskontinuiteta brzina određuje se prema (3.72), dok se ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora spoljašnjeg trenja računa prema

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2z (\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f51} + 2\dot{W}_{f52} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.104)$$

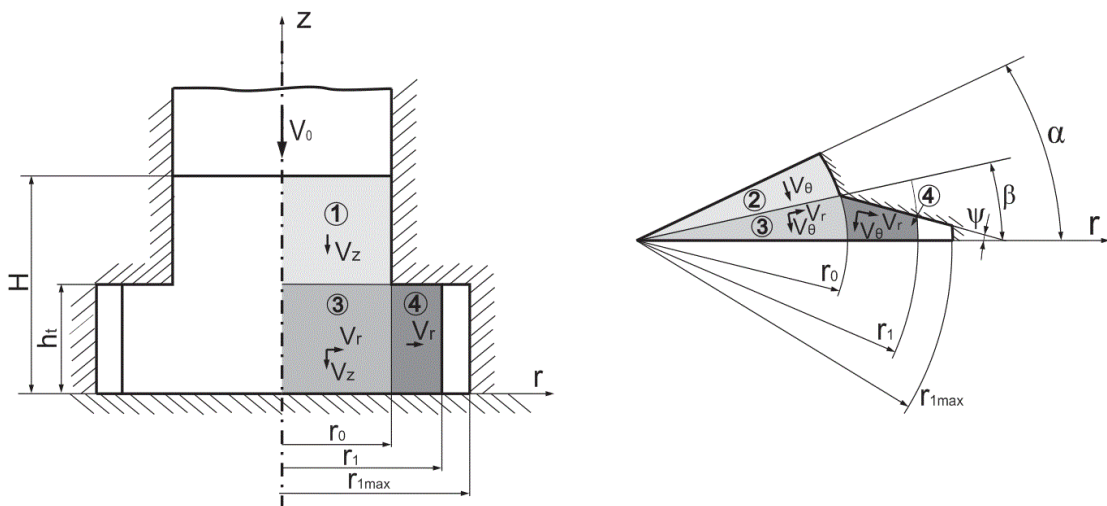
Ukupna snaga potrebna za deformisanje ozubljenja tipa B, model deformisanja OP kada je $r_n = r_i$ dobija se sabiranjem izraza (3.71), (3.72) i (3.104). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

3.2.2.2.2 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Kod ovog slučaja deformisanja, kao što je već napomenuto, materijal teče ka unutrašnjosti obratka popunjavajući otvor, dok materijal u zoni zuba miruje (slike 3.16 i 3.17). Oblik zuba nema nikakvog uticaja, tako da će rešenje biti isto za sva tri tipa ozubljenja. Ukupna snaga potrebna za deformisanje ozubljenja tipa B kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ određuje se na osnovu izraza (3.78). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

3.2.2.2.3 Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces

Zone deformisanja 1, 2 i 3 i površine na kojima postoje diskontinuiteti brzina su isti kao kod tipa ozubljenja A. Na slici 3.32 prikazane su komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja.



Slika 3.32 - Komponente brzine po zonama - tip B, konvencionalan proces

Kao i kod opšteg slučaja razlika se javlja u zoni zuba, u ovom slučaju to je zona deformisanja 4. Razlika postoji i u komponenti snage na površini A_{S4} na koju utiče diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine i u različitim vrednostima komponenti snage na površinama A_{F5} i A_{F6} . Ove razlike postoje zato što se komponente brzine u zoni 4 razlikuju u odnosu na tip ozubljenja A. Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema izrazu (3.79), pri čemu se W_{d4} određuje prema (3.94). Ukupna snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine računa se prema (3.80), a ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora trenja prema

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2z (\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f51} + 2\dot{W}_{f52} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.105)$$

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja A kada nema otvora u pripremu i alatu dobija se sabiranjem izraza (3.79), (3.94) i (3.105). Kada je poznata

ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) može se odrediti deformaciona sila, dok se srednji pritisak na žig određuje na osnovu izraza (3.82).

3.2.2.3 Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja B, model OP

Način na koji je kod tipa ozubljenja A određena promena geometrije dela tokom procesa deformisanja i ukupan hod isti je i u slučaju tipa ozubljenja B. Razlika se javlja u veličini zapremine zuba (oblik je različit). Poznati parametri su uglovi β i ψ , kao i poluprečnici r_0 i r_{1max} .

Veličine koje se menjaju sa promenom hoda alata (logaritamska deformacija ϕ , napon tečenja K , poluprečnik neutralne površine r_n i poluprečnik otvora u obratku r_i) određuju se na isti način kao i kod tipa ozubljenja A, model deformisanja OP. Razlika postoji u određivanju spoljašnjeg poluprečnika r_1 .

Između veličina prikazanih na slici 3.28 mogu se uspostaviti sledeći odnosi:

$$L = r_0 \cos \beta + \rho_0 \cos \psi \quad (3.106)$$

Kada se primeni sinusna teorema na trougao čije su stranice r_0 , ρ_0 i L , veličina ρ_0 može da se izrazi na sledeći način

$$\rho_0 = r_0 \frac{\sin \beta}{\sin \psi} \quad (3.107)$$

Uvrštavanjem izraza (3.106) u izraz (3.107) dobija se veličina L u funkciji poznatih parametara

$$L = r_0 \cos \beta + r_0 \frac{\sin \beta}{\sin \psi} \cos \psi \quad (3.108)$$

Preko sinusne teoreme mogu da se povežu i veličine L , r_{1max} , β' i ψ i da se izračuna ugao β' koji odgovara maksimalnom poluprečniku ozubljenja r_{1max} .

$$\beta' = \arcsin \left(\frac{L}{r_{1max}} \sin \psi \right) - \psi \quad (3.109)$$

Tekući poluprečnik zuba r_1 određuje se takođe primenom sinusne teoreme:

$$r_1 = \frac{L \sin \psi}{\sin(\beta'' + \psi)} \quad (3.110)$$

Kao što se iz izraza (3.110) vidi da bi poluprečnik r_1 bio određen potrebno je odrediti ugao β'' (ψ je zadata veličina, a L se može izračunati preko izraza (3.108)). Ovaj ugao se može odrediti iz uslova jednakosti zapremina V_2 i V_4 sa slike 3.25.

$$(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h) = z h_t P_{ZB} \quad (3.111)$$

Površina zuba za trenutak kada zatom hodu odgovara tekući poluprečnik r_1 može se odrediti na sledeći način

$$\frac{P_{ZB}}{2} = \iint_{0r_0}^{\beta'' r_1} r d\theta dr + \int_{\beta''}^{\beta} \int_{r_0}^{\frac{L \sin \psi}{\sin(\theta + \psi)}} r d\theta dr$$

$$P_{ZB} = \beta''(r_1^2 - r_0^2) + (L \sin \psi)^2 [ctg(\beta'' + \psi) - ctg(\beta + \psi)] - r_0^2(\beta - \beta'') \quad (3.112)$$

Ako se iz izraza (3.111) izrazi površina zuba P_{ZB} i izjednači sa (3.112) dobija se sledeća jednačina

$$\frac{(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h)}{z h_t} = \beta'' \left(\left(\frac{L \sin \psi}{\sin(\beta'' + \psi)} \right)^2 - r_0^2 \right) + (L \sin \psi)^2 [ctg(\beta'' + \psi) - ctg(\beta + \psi)] - r_0^2(\beta - \beta'') \quad (3.113)$$

Rešavanjem jednačine (3.113) dobija se vrednost ugla β'' na osnovu koga može da se odredi tekući poluprečnik r_1 prema jednačini (3.110).

Iz uslova jednakosti zapremine priprema V_0 i dela na kraju procesa deformisanja V_1 , kada je zub u potpunosti formiran ($r_1 = r_{1max}$) i otvor ispunjen ($r_i = 0$), može se odrediti visina na kraju procesa istiskivanja h_f , a ukupan potreban hod žiga s_f određuje se prema izrazu (3.85)

$$(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 = r_0^2\pi h_f + z h_t P_{ZB}$$

$$h_f = \frac{(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 - z h_t P_{ZB}}{r_0^2\pi} \quad (3.114)$$

Kada je u pitanju granični slučaj $r_n = r_i$ zapremine V_1 i V_3 prema slici 3.25 ne postoje, a za određivanje spoljašnjeg prečnika r_1 koriste se izrazi (3.110), (3.111) i (3.112) kao kod opšteg slučaja.

U slučaju kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ ne postoji promena spoljašnjeg poluprečnika ozubljenja r_1 . Prema slici 3.25 zone V_2 i V_4 ne postoje, a unutrašnji poluprečnik r_i određuje se iz uslova konstantnosti zapremine V_1 i V_3 , prema jednačini (3.88).

Kada je u pitanju konvencionalan proces tekući poluprečnik ozubljenja r_1 se određuje iz uslova jednakosti zapremine punog priprema i dela tekuće visine H .

$$r_0^2\pi H_0 = r_0^2\pi H + z h_t P_{ZB} \quad (3.115)$$

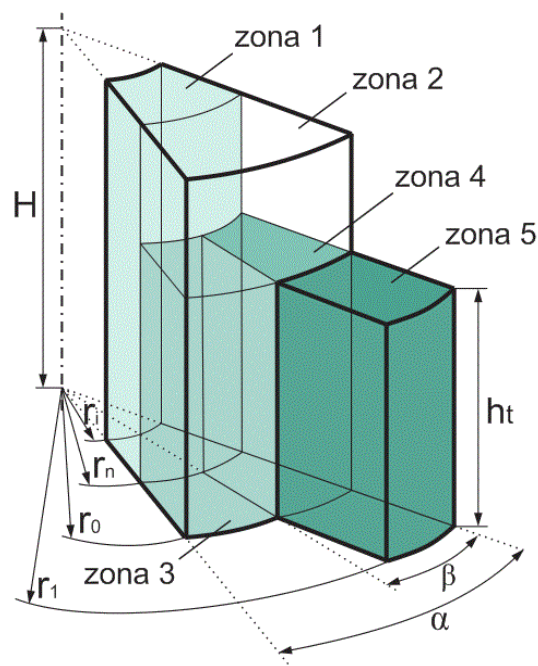
U izraz (3.115) je potrebno uvrstiti izraz za površinu zuba (3.112). Na osnovu te jednakosti odredi se ugao β'' , a na osnovu izraza (3.110) tekući poluprečnik zuba r_1 .

3.2.3 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA- TIP OZUBLJENJA C, MODEL OP

Kao i u slučaju ozubljenog dela tipa A i tipa B, i u slučaju ozubljenog dela tipa C analiziran je opšti slučaj tečenja materijala i granični slučajevi.

3.2.3.1 Određivanje parametara procesa- opšti slučaj

Kao i kod prethodna dva tipa ozubljenja, kod analize deformisanja dela u opštem slučaju kada se poluprečnik neutralne površine nalazi u materijalu zapremina je podeljena na pet zona deformisanja, slika 3.33.

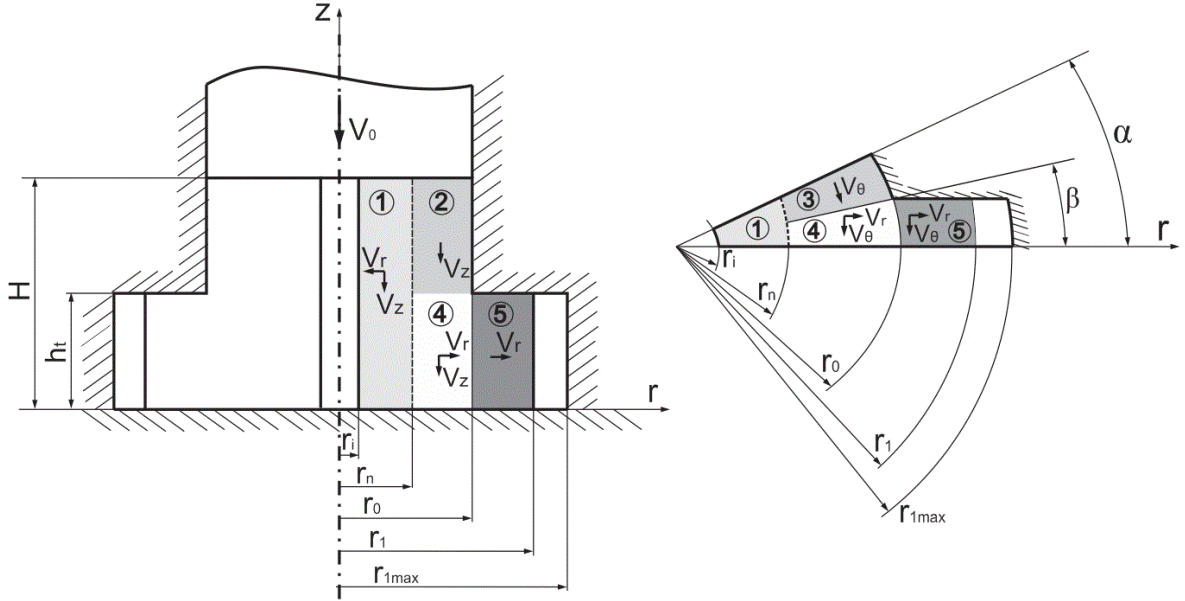


Slika 3.33 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja C, model deformisanja OP, opšti slučaj

Na slici 3.34 prikazane su komponente brzine po zonama za tip ozubljenja C, model deformisanja OP, opšti slučaj deformisanja. Zone 1, 2, 3 i 4 su identične kao kod tipa ozubljenja A. Za razliku od tipa ozubljenja A, u zoni 5 pored radijalne postoji i tangencijalna komponenta brzine, dok je aksijalna komponenta nula, jer nema kretanja materijala u pravcu z ose.

Prilikom određivanja komponenti brzine u zoni 5 pretpostavljeno je da će radijalna komponenta brzine u celoj zoni imati vrednost koja je jednaka radijalnoj brzini na granici zona 4 i 5, dok je tangencijalna komponenta određena na osnovu uslova (3.2).

$$v_z = 0 \quad v_\theta = -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \quad v_r = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \quad (3.116)$$



Slika 3.34 - Komponente brzine po zonama, tip ozubljenja C, model deformisanja OP, opšti slučaj

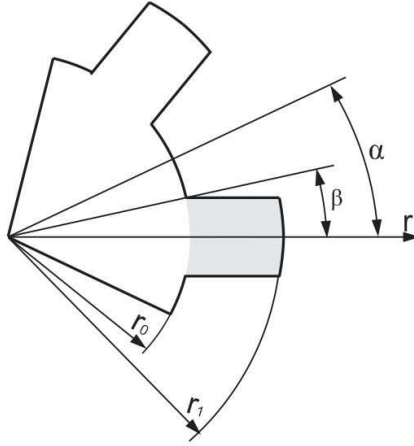
3.2.3.1.1 Snaga potrebna za unutrašnje deformisanje

Komponente snage potrebne za unutrašnje deformisanje za zone 1, 2, 3 i 4 mogu se odrediti na osnovu izraza (3.13), (3.15), (3.17) i (3.19), zato što su te zone iste kao i kod tipa ozubljenja A.

U zoni pet komponente brzine deformacije imaju sledeće vrednosti

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} + \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{1}{2} \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} \theta \\
 \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\
 \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{3.117}$$

Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz (3.5) i rešavanjem integrala dobija se snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 5. Na slici 3.35 prikazan je oblik zuba kod tipa ozubljenja C i parametri koji ga definišu, a koji su potrebni da bi se odredile granice integrala.



Slika 3.35 - Oblik zuba kod tipa ozubljenja C

$$\dot{W}_{d5} = \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{0r_0}^{h_t r_1 \beta} \sqrt{2 \left(\frac{1}{2} \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0 r} \theta \right)^2} dz dr r_0 d\theta$$

$$\dot{W}_{d5} = \frac{\sigma_e}{4\sqrt{3}} v_0 \alpha \beta (r_0^2 - r_n^2) \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (3.118)$$

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja

Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_d = \dot{W}_{d1} + 2z(\dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4} + \dot{W}_{d5}) \quad (3.119)$$

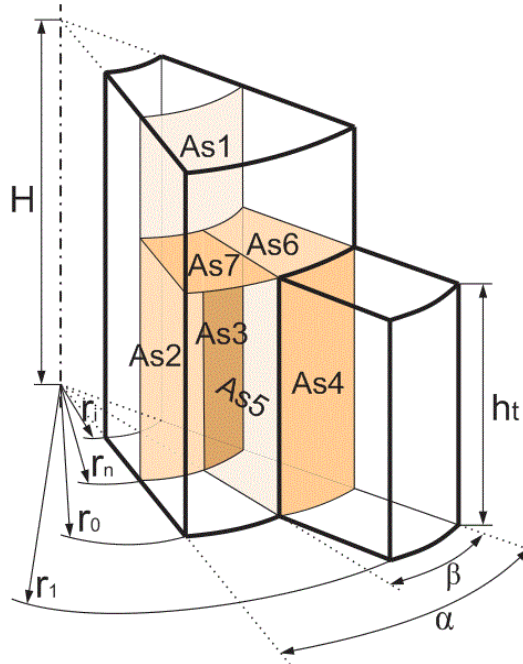
3.2.3.1.2 Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine

Snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzine određuje se na isti način kao i kod tipa ozubljenja A, model OP. Na slici 3.36 se vidi da su sve površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine iste kao i kod tipa ozubljenja A. Razlika se javlja u komponenti snage na površini As_4 na koju utiče diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine.

Diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine na površini As_4 i odgovarajuća komponenta snage iznose:

$$\begin{aligned} |\Delta v_\theta| &= |v_{\theta 5} - v_{\theta 4}| = \left| -\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta - \left(-\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_0 \theta \right) \right| \\ &= \frac{v_0}{2h_t \beta r_0} [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2] \theta \end{aligned} \quad (3.120)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{s42} &= \int_0^{h_t\beta} \int_0^{\frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{2h_t\beta r_0}} [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2] \theta \, dz \, r_0 \, d\theta \\ &= \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 [\alpha(r_0^2 + r_n^2) - 2\beta r_0^2] \end{aligned} \quad (3.121)$$



Slika 3.36 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tip C model OP, opšti slučaj

Ukupna snaga potrebna za savladavanje diskontinuiteta brzina može se odrediti prema izrazu (3.47), kada se u njega umesto izraza (3.38) uvrsti (3.121).

3.2.3.1.3 Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja

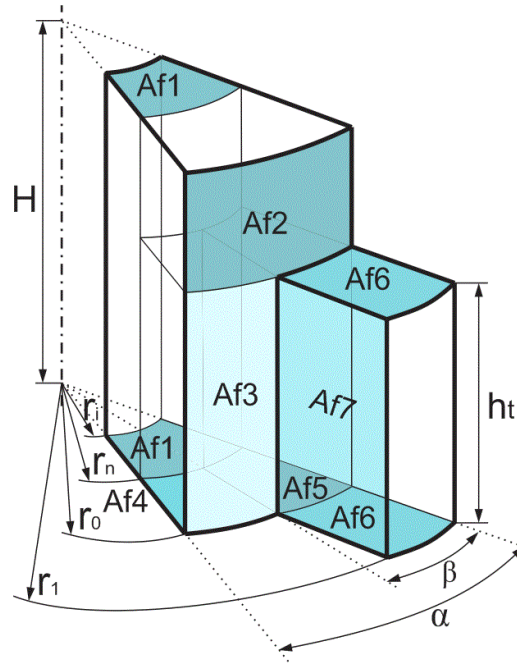
Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja može se odrediti na isti način kao i kod tipa ozubljenja A, model OP. Na slici 3.37 vidi se da su sve površine na kojima se javlja spoljašnje trenje iste kao i kod tipa ozubljenja A. Razlika se javlja u vrednostima komponenti snage na površinama Af6 i Af7. Ove razlike postoje zato što se u zoni 5 komponente brzine i granice zone razlikuju u odnosu na tip ozubljenja A.

Na površini Af6 postoji diskontinuitet i radijalne i tangencijalne komponente brzine. Diskontinuitet radijalne komponente brzine na površini Af6, kao i odgovarajuća komponente snage iznose:

$$|\Delta v_r| = |v_{r5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \quad (3.122)$$

$$\dot{W}_{f_{61}} = \iint_{0r_0}^{\beta''r_1} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} dr r d\theta + \int_{\beta''}^{\beta} \int_{r_0}^{r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'}(\beta - \theta)} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{f_{61}} = \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{4\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \left[\beta''(r_1^2 - r_0^2) + r_0(r_1 - r_0) \frac{(\beta - \beta'')^2}{\beta - \beta'} + \frac{(r_1 - r_0)^2 (\beta - \beta'')^3}{3(\beta - \beta')^2} \right] \quad (3.123)$$



Slika 3.37 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip C, model OP, opšti slučaj

Diskontinuitet tangencijalne komponente na površini Af₆, kao i odgovarajuća komponenta snage iznose:

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta 5} - 0| = \left| \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta - 0 \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \quad (3.124)$$

$$\dot{W}_{f_{62}} = \iint_{0r_0}^{\beta''r_1} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta dr r d\theta + \int_{\beta''}^{\beta} \int_{r_0}^{r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'}(\beta - \theta)} \mu\sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r} dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{f_{62}} = \frac{\mu \sigma_e v_0 \alpha (r_0^2 - r_n^2)}{4 h_t \beta r_0} \left[(r_1^2 - r_0^2) \frac{\beta''^2}{2} + K\beta(2r_0 + K\beta) \frac{\beta^2 - \beta''^2}{2} - 2K(r_0 + K\beta) \frac{\beta^3 - \beta''^3}{3} + K^2 \frac{\beta^4 - \beta''^4}{4} \right] \quad (3.125)$$

Na površini A_{f7} posmatra se diskontinuitet za rezultantu radijalne i tangencijalne komponente brzine u zoni 5.

$$|\Delta v| = \left| \sqrt{v_{r5}^2 + v_{\theta5}^2} - 0 \right| = \left| \sqrt{\left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \theta \right)^2} - 0 \right| \quad (3.126)$$

$$= \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2}$$

Na površini A_{f7} visina menja vrednost od nule do h_t ($0 \leq z \leq h_t$), a poluprečnik od r_0 do r_1 ($r_0 \leq r \leq r_1$). Međutim, kako u izrazu za diskontinuitet brzine figuriše i promenljiva θ , kod određivanja komponente snage \dot{W}_{f7} poluprečnik je izražen preko funkcije u kojoj takođe figuriše θ .

$$\dot{W}_{f7} = \int_0^{h_t} \int_{r_0}^{r_1} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2} dz dr$$

$$r = r_0 + \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} (\beta - \theta) \quad \text{kada je } \beta'' \leq \theta \leq \beta$$

$$dr = -\frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} d\theta$$

$$\dot{W}_{f7} = \int_0^{h_t} \int_{\beta}^{\beta''} \mu \sigma_e \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha}{2\beta} \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \sqrt{1 + \theta^2} dz \left(-\frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} d\theta \right)$$

$$\dot{W}_{f7} = \frac{\mu \sigma_e \alpha}{4 \beta} v_0 \frac{r_0^2 - r_n^2}{r_0} \frac{r_1 - r_0}{\beta - \beta'} \left(\beta \sqrt{1 + \beta^2} - \beta'' \sqrt{1 + \beta''^2} + \ln \frac{\beta + \sqrt{1 + \beta^2}}{\beta'' + \sqrt{1 + \beta''^2}} \right) \quad (3.127)$$

Ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama računa se prema sledećem izrazu:

$$\dot{W}_f = 2\dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} + 2z (\dot{W}_{f31} + \dot{W}_{f32} + \dot{W}_{f4} + \dot{W}_{f51} + \dot{W}_{f52} + 2\dot{W}_{f61} + 2\dot{W}_{f62} + \dot{W}_{f7}) \quad (3.128)$$

3.2.3.1.4 Ukupna snaga, deformaciona sila i pritisak

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja C, model deformisanja OP, dobija se sabiranjem ukupne snage potrebne za unutrašnje deformisanje određene na način opisan u poglavlju 3.2.3.1.1 (izraz 3.119), ukupne snage potrebne za savladavanje diskontinuiteta brzine određene na način opisan u poglavlju 3.2.3.1.2 (izraz 3.47) i ukupne snage potrebne za savladavanje otpora trenja određene na način opisan u poglavlju 3.2.3.1.3 (izraz 3.128).

Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

3.2.3.2 Određivanje parametara procesa - granični slučajevi

Kao i kod tipa ozubljenja A i B i kod tipa ozubljenja C postoje tri granična slučaja:

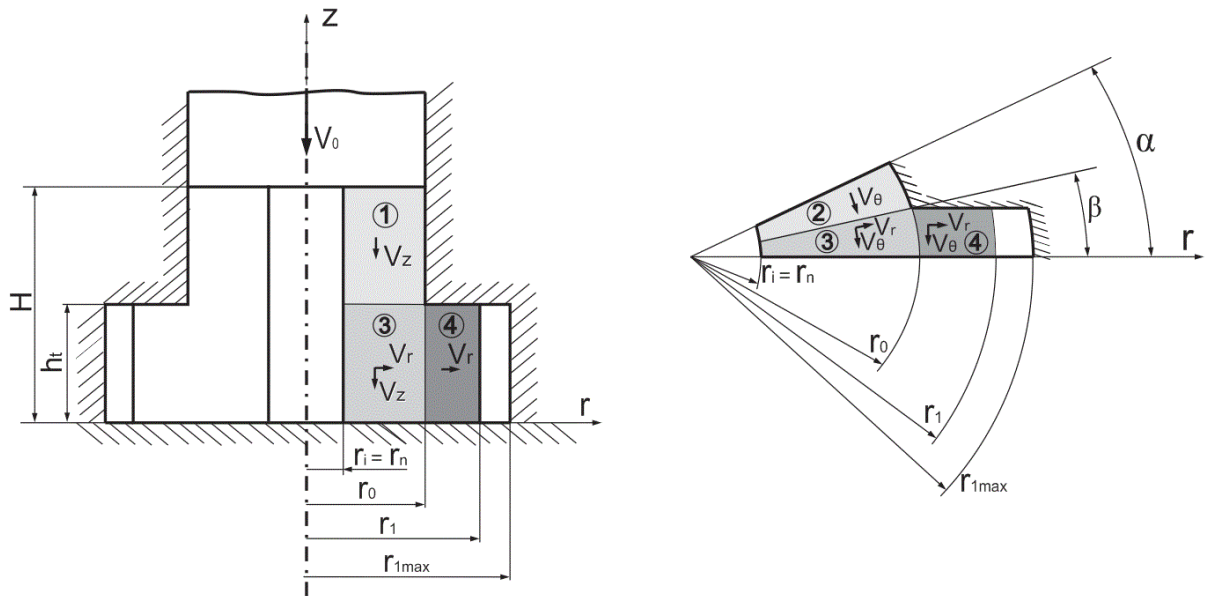
- neutralni poluprečnik r_n jednak je unutrašnjem poluprečniku r_i , $r_n = r_i$,
- neutralni poluprečnik r_n jednak je poluprečniku cilindričnog dela matrice r_0 , $r_n = r_0$ ili je $r_1 = r_{1max}$ (ozubljenje je formirano, a otvor u delu još uvek postoji),
- otvor u obratku je popunjen i obradak se dalje deformiše kao da je pripremak bio bez otvora, pun deo.

3.2.3.2.1 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n=r_i$

Podela obratka na zone deformisanja prikazana na slici 3.15 za tip ozubljenja A biće primenjena i u ovom slučaju, pri čemu se oblik zone 4 razlikuje. Na slici 3.38 prikazane su komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja. Analogno određivanju snage unutrašnjeg deformisanja za tip ozubljenja A, i u ovom slučaju snaga unutrašnjeg deformisanja za zone 1,2 i 3 određuje se prema izrazima (3.15),(3.17) i (3.19). Snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 4 u ovom slučaju određuje se prema izrazu (3.118). Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema izrazu (3.79).

Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzina i površine na kojima postoji trenje između alata i obratka u slučaju istiskivanja ozubljenja tipa A (slika 3.14 i slika 3.15) su iste i u slučaju istiskivanja tipa ozubljenja C. Razlikuju se samo oblik i veličina površina A_{f5} i A_{f6} sa slike 3.15, ali broj površina ostaje isti. Prema tome, ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora na površinama diskontinuiteta brzina određuje se prema (3.72), dok se ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora spoljašnjeg trenja računa prema

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2 z (\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f51} + 2\dot{W}_{f52} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.129)$$



Slika 3.38 - Komponente brzine po zonama - tip C, model OP, $r_n = r_i$

Ukupna snaga potrebna za deformisanje ozubljenja tipa C, model deformisanja OP kada je $r_n = r_i$ dobija se sabiranjem izraza (3.79), (3.72) i (3.129). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

3.2.3.2.2 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Kod ovog slučaja deformisanja, kao što je već napomenuto, materijal teče ka unutrašnjosti obratka popunjavajući otvor, dok materijal u zoni zuba miruje (slike 3.16 i 3.17). Oblik zuba nema nikakvog uticaja na rešenje, tako da će ono biti isto za sva tri tipa ozubljenja. Ukupna snaga potrebna za deformisanje ozubljenja tipa C kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ određuje se na osnovu izraza (3.78). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) i (3.70) mogu se odrediti deformaciona sila i srednji pritisak na žig.

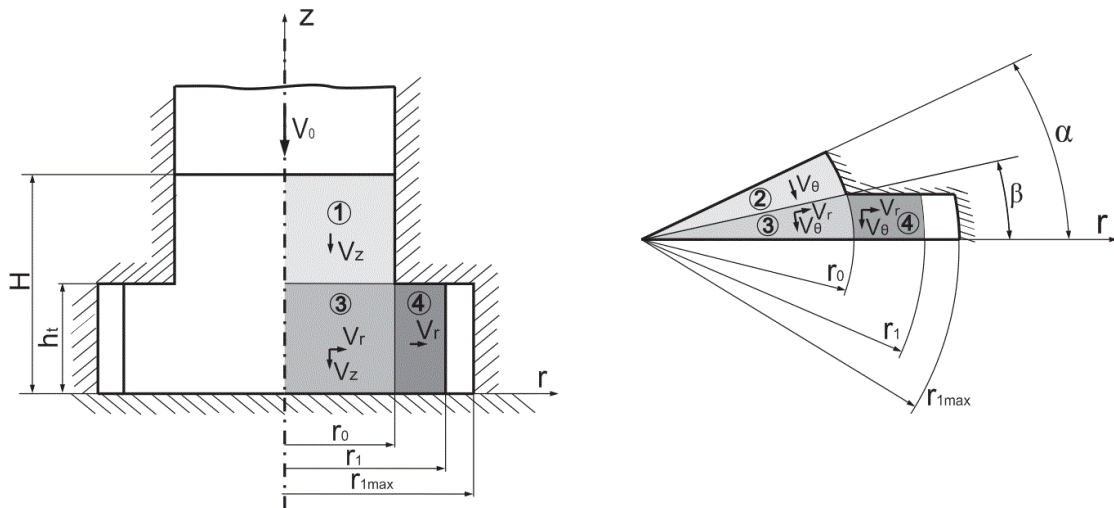
3.2.3.2.3 Određivanje parametara procesa - konvencionalan proces

Zone deformisanja 1, 2 i 3 i površine na kojima postoje diskontinuiteti brzina iste su kao kod tipa ozubljenja A. Na slici 3.39 prikazane su komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja.

Kao i kod opšteg slučaja razlika se javlja u zoni zuba, zoni deformisanja 4. Razlika postoji i u komponenti snage na površini A_{S4} na koju utiče diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine i u različitim vrednostima komponenti snage na površinama A_{F5} i A_{F6} . Ove razlike postoje zato što se komponente brzine u zoni 4 razlikuju u odnosu na tip ozubljenja A. Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se prema izrazu (3.79), pri čemu se W_{d4} određuje prema (3.118). Ukupna snaga potrebna za savladavanje

diskontinuiteta brzine računa se prema (3.80), a ukupna snaga potrebna za svaladavanje otpora trenja prema

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f1} + 2z (\dot{W}_{f21} + \dot{W}_{f22} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_{f41} + \dot{W}_{f42} + 2\dot{W}_{f51} + 2\dot{W}_{f52} + \dot{W}_{f6}) \quad (3.130)$$



Slika 3.39- Komponente brzine po zonama - tip C, pun deo

Ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja C kada nema otvora u pripremkama i alatu dobija se sabiranjem izraza (3.79), (3.80) i (3.130). Kada je poznata ukupna potrebna snaga, na osnovu izraza (3.69) može se odrediti deformaciona sila, dok se srednji pritisak na žig određuje na osnovu izraza (3.82).

3.2.3.3 Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja C, model OP

Način na koji je kod tipa ozubljenja A određena promena geometrije dela tokom procesa deformisanja i ukupan hod isti je i u slučaju tipa ozubljenja C. Veličine koje se menjaju sa promenom hoda alata (logaritamska deformacija ϕ , napon tečenja K , poluprečnik neutralne površine r_n i poluprečnik otvora u obratku r_i) određuju se na isti način kao i kod tipa ozubljenja A. Razlika postoji u određivanju spoljašnjeg radijusa r_1 zato što postoji razlika u zapremini zuba.

Prema slici 3.23 visina na kraju procesa istiskivanja h_f i ukupan hod žiga s_f , potreban da bi se formirali zubi i popunio otvor u obratku, mogu se odrediti iz uslova konstantnosti zapremine pripremkama i gotovog dela.

$$V_0 = V_1$$

$$(r_0^2 - r_{i0}^2)\pi H_0 = r_0^2 \pi h_f + zh_t P_{ZC} \quad (3.131)$$

Površina zuba za tekući poluprečnik r_1 će biti

$$P_{ZC} = 2r_0\beta(r_1 - r_0) \quad (3.132)$$

Visina na kraju porcesa istiskivanja h_f može se izraziti iz (3.131), pri čemu je na kraju hoda $r_1 = r_{1max}$.

$$h_f = \frac{(r_0^2 - r_{i0}^2)H_0}{r_0^2} - \frac{2z h_t\beta(r_{1max} - r_0)}{r_0\pi} \quad (3.133)$$

Ukupan hod žiga izračunava se prema izrazu (3.85).

Poluprečnik ozubljenja r_1 određuje se iz uslova jednakosti zapremina V_2 i V_4 prema slici 3.25.

$$V_2 = V_4$$

$$(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h) = 2z h_t\beta r_0(r_1 - r_0)$$

$$r_1 = r_0 + \frac{(r_0^2 - r_n^2)\pi(H - h)}{2z h_t\beta r_0} \quad (3.134)$$

Kada je $r_n = r_i$ zapremina V_1 i V_3 prema slici 3.23 ne postoje, a za određivanje spoljašnjeg prečnika r_1 koristi se jednakost zapremina $V_2 = V_4$, odnosno izraz (3.89) kao kod opšteg slučaja.

U slučaju kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$ ne postoji promena spoljašnjeg poluprečnika ozubljenja r_1 . Prema slici 3.25 zone V_2 i V_4 ne postoje, a unutrašnji poluprečnik r_i određuje se iz uslova konstantnosti zapremina V_1 i V_3 , prema jednačini (3.88). Kada je u pitanju konvencionalan proces tekući poluprečnik ozubljenja r_1 se određuje iz uslova jednakosti zapremina punog priprema i dela nakon istiskivanja čija je visina h .

$$V_0 = V$$

$$r_0^2\pi H_0 = r_0^2\pi h + 2zh_t r_0\beta(r_1 - r_0)$$

$$r_1 = r_0 + \frac{r_0^2\pi(H_0 - h)}{2zh_t r_0\beta} \quad (3.135)$$

3.3 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA METODOM GORNJE GRANICE KADA SE OTVOR NALAZI U ŽIGU - MODEL OA

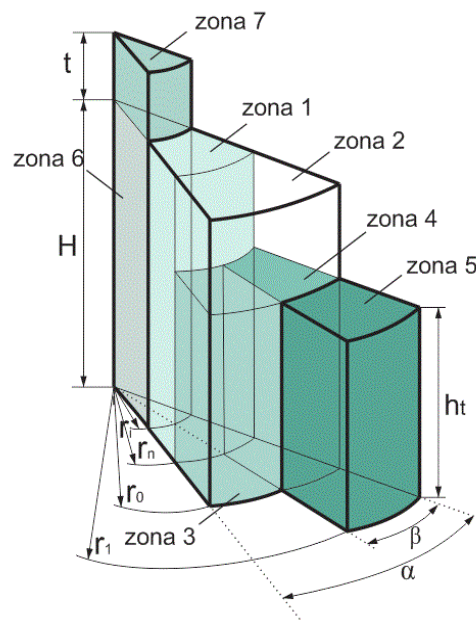
Drugi model deformisanja koji je primenjen kod sva tri tipa ozubljenja je model kod koga se otvor nalazi u alatu, konkretno u ovom slučaju otvor je u žigu. Teorijski model je napravljen za slučaj kada je otvor, koji se nalazi u žigu, ograničene dužine, što znači da je tečenje materijala u tom pravcu ograničeno. Kao i kod modela deformisanja OP, proces je prvo analiziran za opšti slučaj tečenja materijala, kada se poluprečnik neutralne površine nalazi u materijalu, da bi zatim bili analizirani i granični slučajevi.

3.3.1 ODREĐIVANJE PARAMETARA PROCESA- TIP OZUBLJENJA A, MODEL OA

Kao i kod modela deformisanja OP i u ovom slučaju je analizirano tečenje materijala za opšti slučaj tečenja i tri granična slučaja.

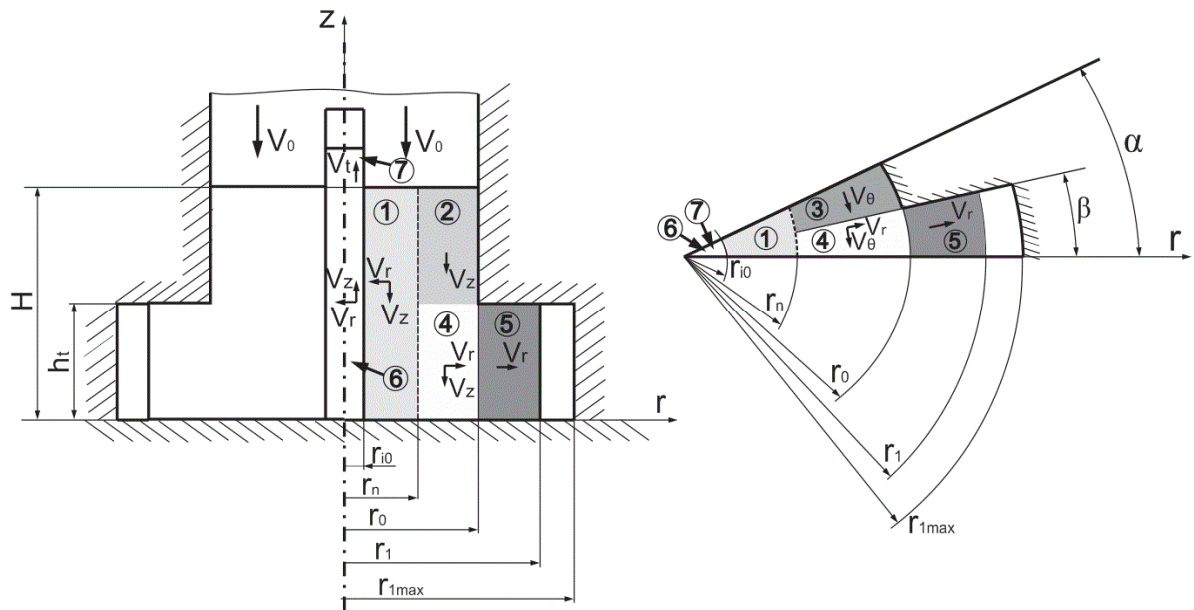
3.3.1.1 Određivanje parametara procesa - opšti slučaj

U odnosu na model deformisanja OP gde je obradak podeljen na pet zona deformisanja, kod modela deformisanja OA postoje još dve dodatne zone. Zona 6 je zapremina središta obratka visine H i poluprečnika r_{i0} . Zona 7 se formira kada materijal počne da ističe u otvor u žigu i kao što se vidi sa slike 3.40 tekuća visina ove zone označena je sa t . S obzirom da je pripremak cilindričnog oblika na samom početku procesa zona 7 ne postoji, ali da bi se dobilo opšte rešenje potrebno je da se i ona uzme u obzir.



Slika 3.40 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model deformisanja OA, opšti slučaj

Na slici 3.41 prikazane su komponente brzine po zonama. Komponente u zonama 1 - 5 su iste kao kod modela deformisanja OP. Komponente brzine u zonama 6 i 7 određene su tako da zadovoljavaju uslov kontinuiteta i granične uslove.



Slika 3.41 - Komponente brzine po zonama- tip A, model OA, opšti slučaj

U zoni 6 komponente brzine su

$$v_z = \frac{v_0}{H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} z \quad v_r = -\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r \quad v_\theta = 0 \quad (3.136)$$

U zoni 7 komponente brzine su

$$v_z = v_t \quad v_r = 0 \quad v_\theta = 0 \quad (3.137)$$

Na osnovu komponenti brzine vidi se da u ovoj zoni nema deformisanja materijala, odnosno materijal se kreće kao kruto telo. Brzina v_t određuje se preko komponenti brzine u zoni 6 i iznosi

$$v_t = v_0 \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} \quad (3.138)$$

Na postojeći izraz za snagu unutrašnjeg deformisanja za tip ozubljenja A, model deformisanja OP u opštem slučaju tečenja materijala (3.23) potrebno je dodati komponentu snage unutrašnjeg deformisanja za zonu 6 da bi se dobio izraz za model deformisanja OA. Komponente brzine deformacije u zoni 6 imaju sledeće vrednosti:

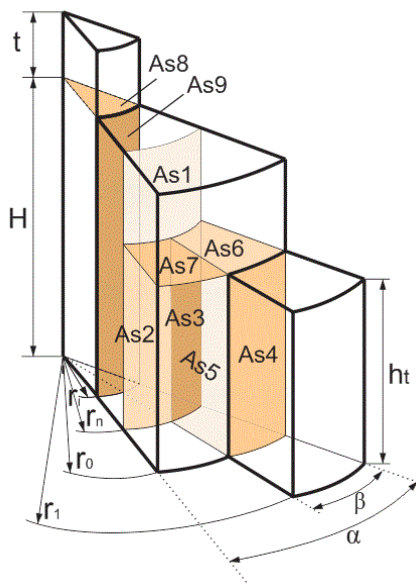
$$\begin{aligned}
\dot{\epsilon}_{11} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} & \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) = 0 \\
\dot{\epsilon}_{22} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = -\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = 0 \\
\dot{\epsilon}_{33} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{v_0}{H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} & \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.139}$$

Uvrštavanjem komponenti brzine deformacije (3.139) u izraz (3.5) može se izračunati snaga unutrašnjeg deformisanja za zonu 6.

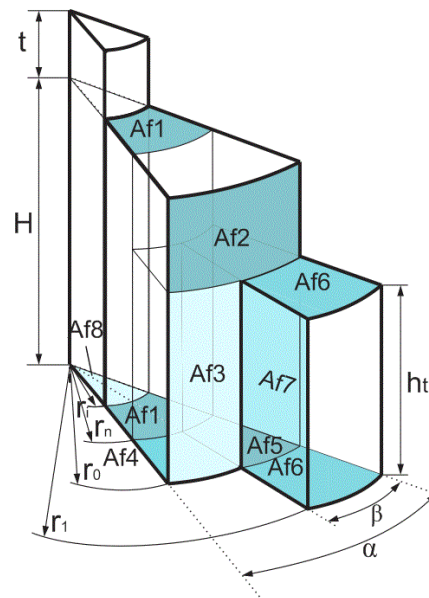
$$\dot{W}_{d6} = \frac{\sqrt{2}\sigma_e}{\sqrt{3}} \iiint_{000}^{Hr_{i0}2\pi} \sqrt{\left(\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2}\right)^2} dz dr r d\theta$$

$$\dot{W}_{d6} = \sigma_e v_0 \pi (r_n^2 - r_{i0}^2) \tag{3.140}$$

Na slici 3.42 prikazane su površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine, dok su na slici 3.43 prikazane površine na kojima postoji trenje između alata i obratka. Poređenjem slike 3.42 sa slikom 3.10 koja prikazuje površine za model OP, vidi se da kod ovog modela deformisanja postoje dve dodatne površine na kojima se javlja diskontinuitet brzine, to su površine A_{s8} i A_{s9} . U slučaju spoljašnjeg trenja, poređenjem slika 3.11 i 3.43 vidi se da kod modela deformisanja OA postoji samo još jedna dodatna površina A_{f8} .



Slika 3.42 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tip A, model deformisanja OA, opšti slučaj



Slika 3.43 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip A, model deformisanja OA, opšti slučaj

Diskontinuitet radijalnih komponenti brzine na površini A_{s8} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_r| = |v_{r7} - v_{r6}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r \right) \right| = \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r \quad (3.141)$$

$$\dot{W}_{s8} = \int_0^{r_{i0}} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r dr r d\theta = \frac{\sigma_e}{3\sqrt{3}} \frac{v_0}{H} \pi (r_n^2 - r_{i0}^2) r_{i0} \quad (3.142)$$

Diskontinuitet aksijalnih komponenti brzine na površini A_{s9} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z6} - v_{z1}| = \left| \frac{v_0}{H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} z - \left(-\frac{v_0}{H} z \right) \right| = \frac{v_0}{H} \frac{r_n^2}{r_{i0}^2} z \quad (3.143)$$

$$\dot{W}_{s9} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{H} \frac{r_n^2}{r_{i0}^2} z dz r_{i0} d\theta = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 H \pi \frac{r_n^2}{r_{i0}} \quad (3.144)$$

Diskontinuitet radijalne komponente brzine na površini A_{f8} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_r| = |v_{r6} - 0| = \left| \left(-\frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r \right) - 0 \right| = \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r \quad (3.145)$$

$$\dot{W}_{f8} = \int_0^{r_{i0}} \int_0^{2\pi} \mu \sigma_e \frac{v_0}{2H} \frac{r_n^2 - r_{i0}^2}{r_{i0}^2} r dr r d\theta = \frac{\mu \sigma_e}{3} \frac{v_0}{H} \pi (r_n^2 - r_{i0}^2) r_{i0} \quad (3.146)$$

Ukupna snaga potrebna za deformisanje za tip ozubljenja A, model OA može se odrediti kada se na postojeći izraz za model OP (3.68) dodaju četiri komponente snage, (3.140), (3.142), (3.144) i (3.146) koje se razlikuju kod modela OA.

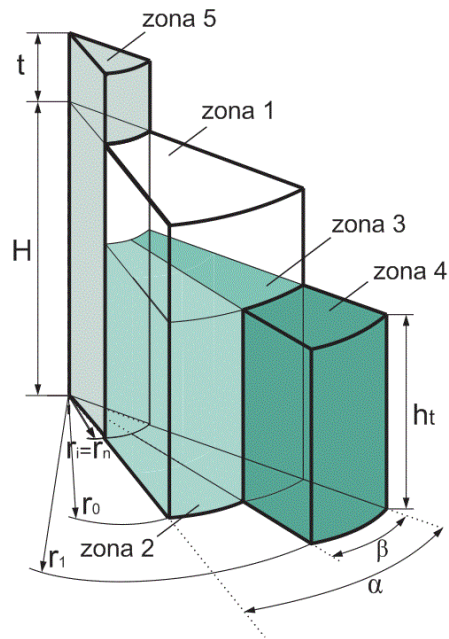
3.3.1.2 Određivanje parametara procesa - granični slučajevi

I kod modela deformisanja OA postoje tri granična slučaja

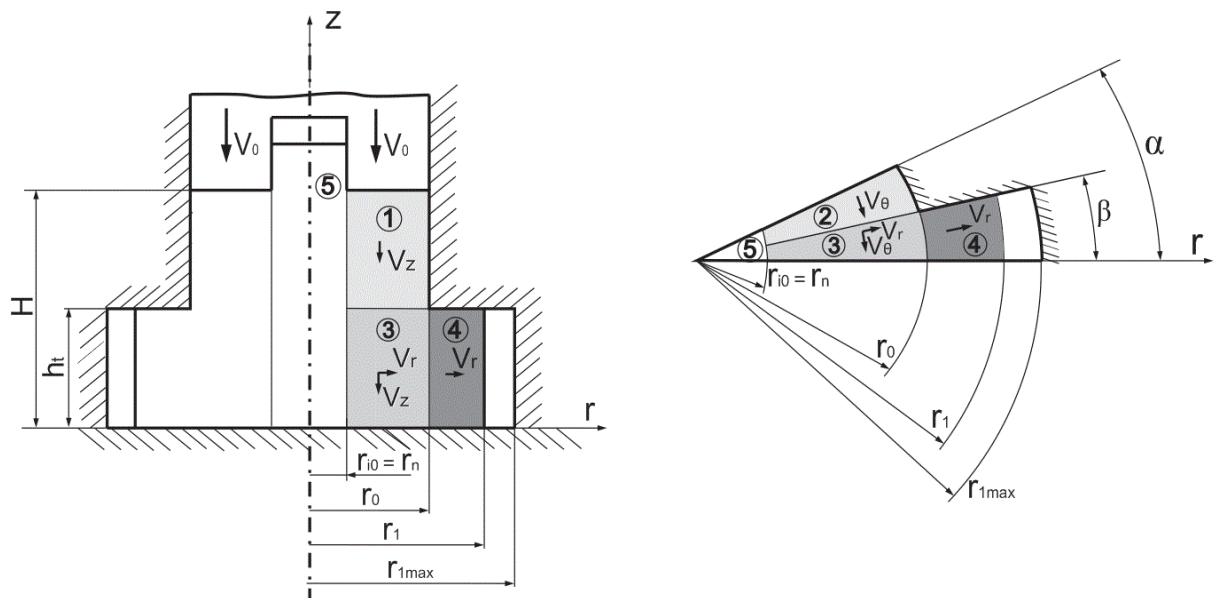
- kada je neutralni poluprečnik r_n jednak unutrašnjem poluprečniku r_{i0} , $r_n = r_{i0}$,
- kada je neutralni poluprečnik r_n jednak poluprečniku cilindričnog dela matrice r_0 , $r_n = r_0$ ili kada je $r_1 = r_{1\max}$ (ozubljenje je formirano, a otvor u alatu još uvek nije popunjen) i
- kada se otvor u žigu popuni (deo se deformiše kao da u alatu nema otvora, konvencionalno istiskivanje).

3.3.1.2.1 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $r_n = r_i$

Kada se neutralni poluprečnik r_n izjednači sa poluprečnikom otvora u alatu r_{i0} u centru obratka više ne postoje dve zone, već samo jedna, zona 5, i u njoj nema kretanja materijala. Od neutralne površine materijal teče ka periferiji obratka i formira zube. Podela zapremine obratka na zone prikazana je na slici 3.44, a komponente polja brzine po zonama za ovaj slučaj deformisanja na slici 3.45.



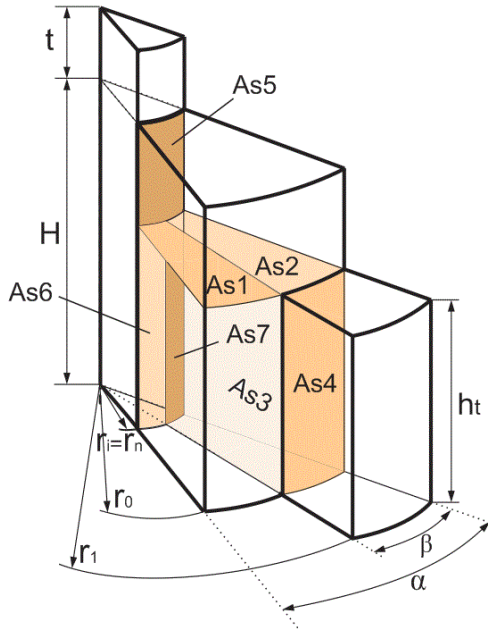
Slika 3.44 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model OA, granični slučaj $r_n = r_{i0}$



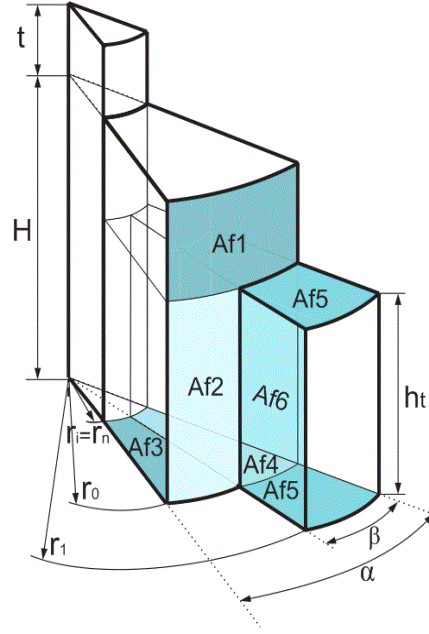
Slika 3.45 - Komponente brzine po zonama- tip A, model OA, granični slučaj $r_n = r_{i0}$

Poređenjem slike 3.44 i slike 3.12 koja prikazuje zone deformisanja kod modela deformisanja OP vidi se da su zone u kojima se materijal deformiše iste, tako da se snaga unutrašnjeg deformisanja može se izračunati na osnovu izraza (3.71).

Na slici 3.46 prikazane su površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine, dok su na slici 3.47 prikazane površine na kojima postoji trenje između alata i obratka. Poređenjem slike 3.46 sa slikom 3.14 koja prikazuje površine za model OP, vidi se da kod ovog modela deformisanja postoje tri dodatne površine A_{s5} , A_{s6} i A_{s7} .



Slika 3.46 - Površine između zona na kojima postoji diskontinuitet brzine - tip A, model deformisanja OA, granični slučaj $r_n = r_{i0}$



Slika 3.47 - Površine na kojima postoji trenje između alata i obratka - tip A, model deformisanja OA, granični slučaj $r_n = r_{i0}$

Diskontinuitet aksijalnih komponenti brzine na površini A_{s5} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z5} - v_{z1}| = |0 - (-v_0)| = v_0 \quad (3.147)$$

$$\dot{W}_{s5} = \iint_{h_t 0}^{H 2\pi} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 dz r_{i0} d\theta = \frac{2\sigma_e}{\sqrt{3}} v_0 r_{i0} \pi (H - h_t) \quad (3.148)$$

Diskontinuitet aksijalnih komponenti brzine na površini A_{s6} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z5} - v_{z2}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} z \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} z \quad (3.149)$$

$$\dot{W}_{s61} = \iint_{0 \beta}^{h_t \alpha} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{h_t} z dz r_{i0} d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 h_t r_{i0} (\alpha - \beta) \quad (3.150)$$

Diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine na površini A_{s6} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta5} - v_{\theta2}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} r_{i0} (\alpha - \theta) \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} r_{i0} (\alpha - \theta) \quad (3.151)$$

$$\dot{W}_{s62} = \int_0^{h_t \alpha} \int_\beta \frac{\sigma_e v_0}{\sqrt{3} h_t} r_{i0} (\alpha - \theta) dz r_{i0} d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 r_{i0}^2 (\alpha - \beta)^2 \quad (3.152)$$

Diskontinuitet aksijalnih komponenti brzine na površini A_{s7} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z5} - v_{z3}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} z \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} z \quad (3.153)$$

$$\dot{W}_{s71} = \int_0^{h_t \beta} \int_0 \frac{\sigma_e v_0}{\sqrt{3} h_t} z dz r_{i0} d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 h_t r_{i0} \beta \quad (3.154)$$

Diskontinuitet tangencijalnih komponenti brzine na površini A_{s7} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_\theta| = |v_{\theta5} - v_{\theta3}| = \left| 0 - \left(-\frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_{i0} \theta \right) \right| = \frac{v_0}{h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_{i0} \theta \quad (3.155)$$

$$\dot{W}_{s72} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_e v_0}{\sqrt{3} h_t} \frac{\alpha - \beta}{\beta} r_{i0} \theta dz r_{i0} d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 (\alpha - \beta) \beta r_{i0}^2 \quad (3.156)$$

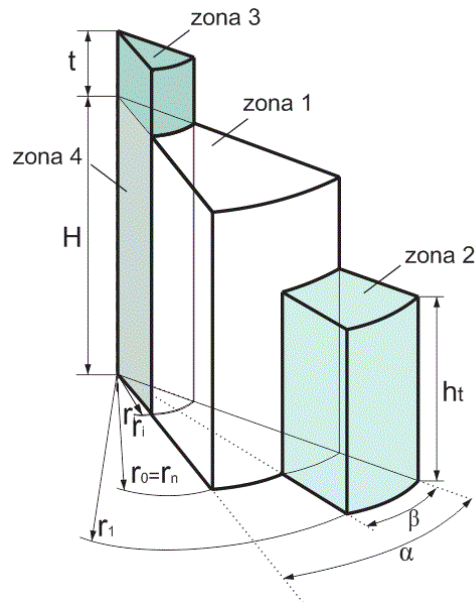
Ukupna snaga koja se troši na površinama diskontinuiteta brzine može se odrediti kada se izrazu za model deformisanja OP, (3.72), doda komponenta (3.148) i komponente (3.150), (3.152), (3.154), (3.156) pomnožene sa $2z$, zato što se odnose sa polovinu zapremine zuba, odnosno međuzublja.

$$\dot{W}_s = \dot{W}_{s5} + 2z(\dot{W}_{s1} + \dot{W}_{s21} + \dot{W}_{s22} + \dot{W}_{s3} + \dot{W}_{s41} + \dot{W}_{s42} + \dot{W}_{s61} + \dot{W}_{s62} + \dot{W}_{s71} + \dot{W}_{s72}) \quad (3.157)$$

U slučaju spoljašnjeg trenja, poređenjem slika 3.15 i 3.47 vidi se da nema razlike između modela deformisanja OA i modela deformisanja OP, tako da se ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na graničnim površinama može odrediti na osnovu izraza (3.73).

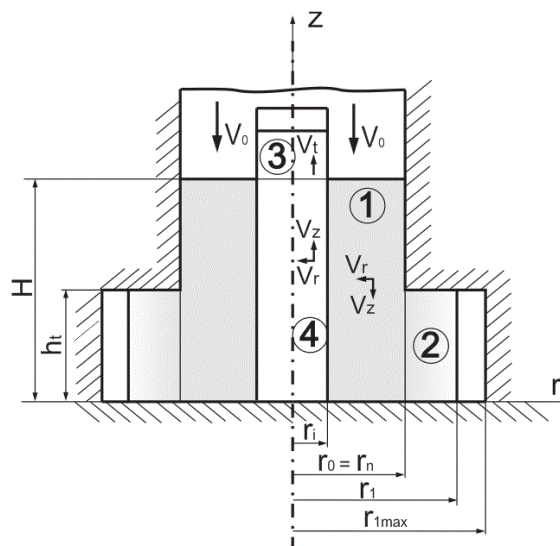
3.3.1.2.2 Određivanje parametara procesa - granični slučaj, $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

U slučaju kada se neutralni poluprečnik r_n izjednači sa poluprečnikom cilindričnog dela matrice r_0 materijal teče ka unutrašnjosti obratka popunjavajući otvor u žigu. Materijal teče na ovaj način i kada su zubi formirani pre nego što je otvor u žigu popunjen. Na slici 3.48 prikazana je podela obratka na zone za ovaj slučaj deformisanja. Materijal u zoni 2 miruje, dok se u zonama 1,3 i 4 kreće.



Slika 3.48 - Podela zapremine obratka na zone, tip ozubljenja A, model OA, granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Na slici 3.49 prikazano je kako su pretpostavljene komponente brzine po zonama. Ove komponente iste su kao komponente brzine u zonama 1,6 i 7 kod opšteg slučaja deformisanja za model OA, tako da će i sve odgovarajuće komponente potrebne snage biti iste. Ukupna snaga unutrašnjeg deformisanja određuje se sabiranjem izraza (3.13) i (3.140).



Slika 3.49 - Komponente brzine po zonama, tip ozubljenja A, model OA, granični slučaj $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$

Na slici 3.50 prikazane su površine na kojima postoji diskontinuitet brzine i na kojima postoji spoljašnje trenje.

Kod ukupne snage koja se troši na na površinama diskontinuiteta (slika 3.50) osim komponenti koje se računaju na osnovu izraza (3.144) za površinu A_{s2} i izraza (3.142) za površinu A_{s3} potrebno je još dodati i komponentu na površini A_{s1} .

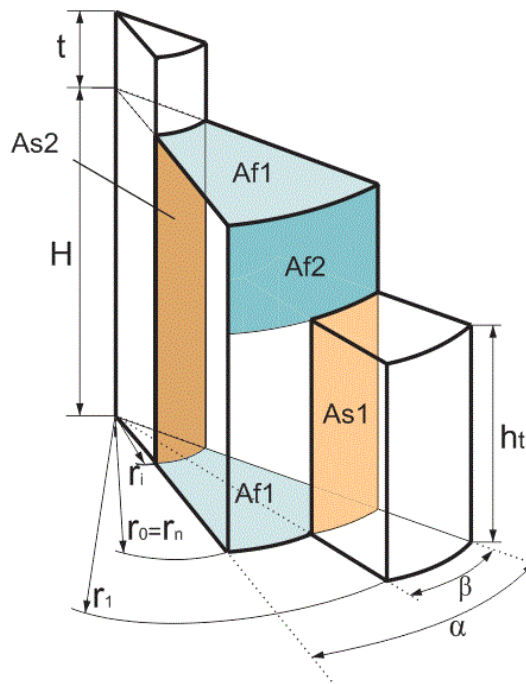
Diskontinuitet aksijalnih komponenti brzine na površini A_{s1} i odgovarajuća komponenta snage iznose

$$|\Delta v_z| = |v_{z1} - v_{z2}| = \left| -\frac{v_0}{H}z - 0 \right| = \frac{v_0}{H}z \quad (3.158)$$

$$\dot{W}_{s1} = \int_0^{h_t} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{H} z dz r_0 d\theta = \frac{\sigma_e}{2\sqrt{3}} v_0 \frac{h_t^2}{H} r_0 \beta \quad (3.159)$$

Slična situacija je i sa određivanjem snage koja se troši na savladavanje otpora trenja na površinama alat-obradak. Snaga potrebna za savladavanje otpora trenja na površini A_{f1} može da se odredi na osnovu izraza (3.50), na površini A_{f2} na osnovu izraza (3.77), a na površini A_{f3} na osnovu izraza (3.146).

Sabiranjem odgovarajućih komponenti snage unutrašnjeg deformisanja, ukupne snage koja se troši na površinama diskontinuiteta brzine i ukupne snage koja se troši za savladavanje spoljašnjeg trenja dobija se ukupna snaga potrebna za deformisanje tipa ozubljenja A, model deformisanja OA kada je $r_n = r_0$ ili $r_1 = r_{1max}$.



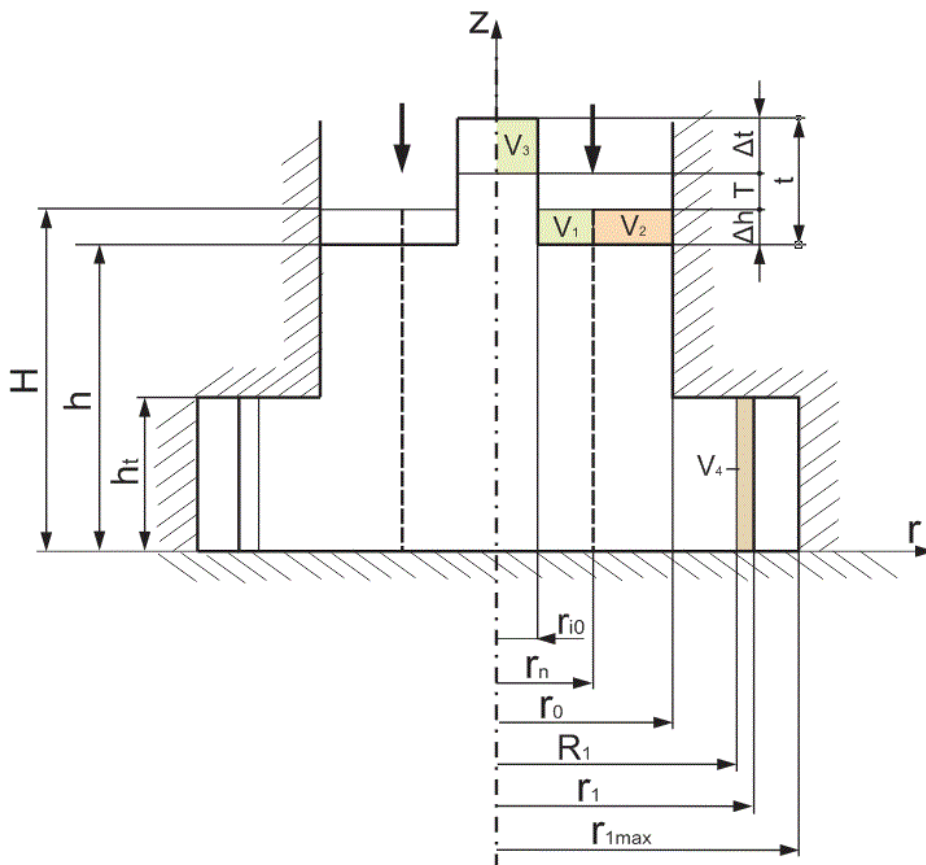
Slika 3.50 - Površine na kojima postoji diskontinuitet brzine i površine na kojima postoji trenje između alata i obratka- tip A, model OA, $r_0 = r_n$ ili $r_1 = r_{1max}$

3.3.1.2.3 Određivanje parametara procesa - granični slučaj $t = t_{\max}$

U slučaju da se otvor u alatu u potpunosti popuni materijalom pre nego što su zubi formirani, istiskivanje se dalje odvija kao kod konvencionalnog procesa opisanog u poglavlju 3.2.1.2.3.

3.3.1.3 Analiza tečenja materijala - tip ozubljenja A, model OA

Na slici 3.51 prikazano je kako se materijal raspodeljuje tokom procesa istiskivanja kada se neutralna površina nalazi u materijalu, odnosno kada poluprečnik neutralne površine ima vrednost između poluprečnika otvora u žigu r_{i0} i poluprečnika cilindričnog dela matrice r_0 (opšti slučaj tečenja materijala). Kao i u slučaju modela OP i na slici 3.51 sve veličine su na početku priraštaja (pre istiskivanja) označene velikim slovima (H , T , R_1), a nove vrednosti, nakon istiskivanja malim slovima (h , t , r_1) i te oznake su korištene i u odgovarajućim izrazima za izračunavanje visine istisnutog dela u žigu t i spoljašnjeg poluprečnika r_1 .



Slika 3.51 - Promena geometrije dela kada se neutralna površina nalazi u materijalu, model OA

Sa slike 3.51 se vidi da se nova visina dela istisnutog u otvor u žigu može izračunati kao

$$t = \Delta h + T + \Delta t \quad (3.160)$$

pri čemu se priraštaj tog dela Δt određuje iz uslova jednakosti zapremine V_1 i V_3

$$V_1 = V_3$$

$$(r_n^2 - r_{i0}^2) \pi \Delta h = r_{i0}^2 \pi \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{(r_n^2 - r_{i0}^2)}{r_{i0}^2} \Delta h \quad (3.161)$$

Iz uslova jednakosti zapremine V_2 i V_4 može se odrediti promena poluprečnika r_1 koja je ista kao i kod modela deformisanja OP, tako da se može koristiti izraz (3.89).

Visina dela na kraju procesa istikivanja h_f dobija se na osnovu uslova jednakosti zapremine priprema i gotovog dela.

$$V_0 = V_1$$

$$r_0^2 \pi H_0 = r_0^2 \pi h_f + r_{i0}^2 \pi t_{max} + z h_t P_z$$

$$h_f = H_0 - t_{max} \frac{r_{i0}^2}{r_0^2} - \frac{z h_t P_z}{r_0^2 \pi} \quad (3.162)$$

Uvrštavanjem odgovarajućeg izraza za površinu zuba P_z u izraz (3.162), dobija se vrednost visine dela h_f na kraju procesa istiskivanja. Treba napomenuti da se ovde radi o visini cilindričnog dela poluprečnika r_0 , bez dela visine t_{max} koji se istiskuje u žig.

3.3.2 ODREĐIVANJE DEFORMACIONE SILE- TIP OZUBLJENJA B I C, MODEL OA

Kao što je prikazano na modelu deformisanja OP, kompletna analiza procesa metodom gornje granice je identična za sva tri tipa ozubljenja, osim u delu zapremine gde se formiraju zubi. Tako se i kod modela deformisanja kada je otvor u alatu za ozubljenja B i C mogu koristiti svi izrazi izvedeni za tip ozubljenja A ((3.68), (3.140) (3.142) (3.144), (3.146)), samo je potrebno u delu poraćuna koji se odnosi na zonu zuba primeniti odgovarajuće izraze za snagu koji su izvedeni za model ozubljenja B ((3.94), (3.96),(3.102)), odnosno C ((3.118), (3.121), (3.128)). Ovo se odnosi i na granične slučajeve, kao i na definisanje geometrije delova.

3.4 PRIMENA TEORIJSKIH REŠENJA

Na osnovu izraza određenih primenom metode gornje granice prikazanih u prethodnom poglavlju izračunate su vrednosti parametara procesa za tri tipa ozubljenih elemenata (A, B, C) i dva modela deformisanja (OP, OA). Za svaki od tih slučajeva parametri su određeni za dve vrednosti otvora u obratku, odnosno žigu: $\phi 5$ mm i $\phi 8$ mm, kao i za slučaj konvencionalnog istiskivanja (kada nema otvora ni u alatu, ni u obratku) za priraštaj hoda od po 0,5 mm.

Određeni parametri procesa su:

- deformaciona sila,
- srednji pritisak na žig,
- poluprečnik neutralne površine r_n ,
- poluprečnik ozubljenja r_1
- poluprečnika otvora r_i kod modela deformisanja OP, odnosno visina dela u žigu t kod modela deformisanja OA.

Parametri procesa određeni su za sledeće veličine koje figurišu u izrazima:

- visina priprema $H_0 = 40$ mm,
- visina ozubljenja $h_t = 15,8$ mm,
- poluprečnik priprema $r_0 = 14$ mm,
- maksimalan poluprečnik ozubljenja $r_{1max} = 17$ mm,
- $\alpha = \pi/6$, (prema slici 3.6),
- $\beta = \pi/12$ (prema slici 3.6),
- efektivni napon σ_e (određuje se prema izrazu (3.75) za primenjeni materijal),
- koeficijent trenja $\mu = 0,1$,
- broj zuba $z = 6$,
- brzina kretanja alata $v_0 = 1$ mm/s.

Rezultati su prikazani tabelarno i kod svake tabele navedena je ukupna teorijska vrednost hoda s_f potrebna da bi se u potpunosti popunio otvor u pripremu, odnosno alatu. Ova vrednost hoda alata određena je na osnovu odgovarajućih izraza iz prethodnih poglavlja. Pretpostavka je da je materijal krut (nije uzeta u obzir elastična deformacija materijala) i da deformaciono ojačava [100]. Maksimalna sila prikazana u tabelama odnosi se na vrednost hoda alata za koju je otvor u obratku kod modela OP, odnosno otvor u žigu kod modela OA, popunjen.

3.4.1 PARAMETRI PROCESA ODREĐENI METODOM GORNJE GRANICE - MODEL OP

U nastavku su prikazane računске vrednosti parametara procesa za tipove ozubljenja A, B i C za oba modela deformisanja, kao i parametri procesa za konvencionalan proces.

3.4.1.1 Parametri procesa -tip ozubljenja A, model OP

Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model deformisanja OP kada je poluprečnik otvora u pripremlu 2,5 mm prikazane su u tabeli 3.3, a kada je poluprečnik otvora u pripremlu 4 mm prikazane su u tabeli 3.4.

Tabela 3.3 - Vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model OP, $r_{i0} = 2,5 \text{ mm}$,
 $s_f = 5,023 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	2,5	14	0	0
0,5	5,376	2,442	14,373	109,369	183,184
1	5,471	2,378	14,734	119,805	200,306
1,5	5,547	2,309	15,085	127,529	212,897
2	5,604	2,233	15,426	133,968	223,247
2,5	5,642	2,151	15,759	139,637	232,258
3	5,659	2,063	16,085	144,795	240,218
3,5	5,655	1,969	16,404	149,595	247,850
4	5,629	1,869	16,716	154,138	254,868
4,46	5,592	1,77	17	158,155	262,543
5,022	-	0,0166	17	426,434	692,543

Tabela 3.4 - Vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model OP, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$,
 $s_f = 7,01 \text{ mm}$

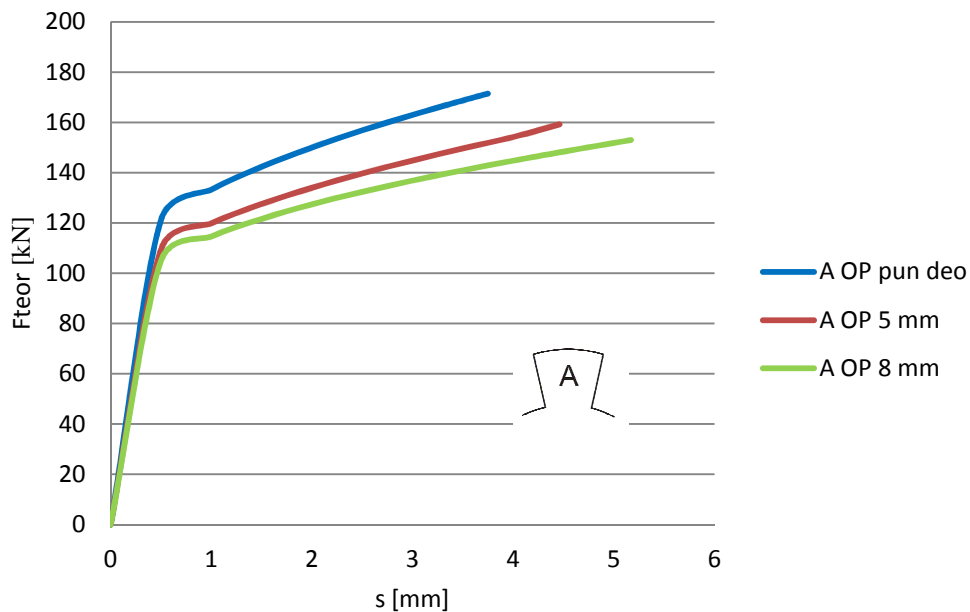
ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	4	14	0	0
0,5	6,905	3,949	14,331	104,978	185,233
1	7,032	3,894	14,651	114,640	201,755
1,5	7,145	3,834	14,961	121,660	213,563
2	7,245	3,768	15,262	127,415	223,104
2,5	7,332	3,698	15,554	132,403	231,174
3	7,407	3,622	15,838	136,873	238,212
3,5	7,470	3,540	16,116	140,969	244,575
4	7,521	3,453	16,387	144,787	250,341
4,5	7,558	3,359	16,654	148,396	255,729
5,17	7,567	3,225	17	152,992	262,342
7,01	-	0,0168	17	453,398	736,332

Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A za konvencionalan postupak, kada nema otvora ni u obratku ni u alatu prikazane su u tabeli 3.5.

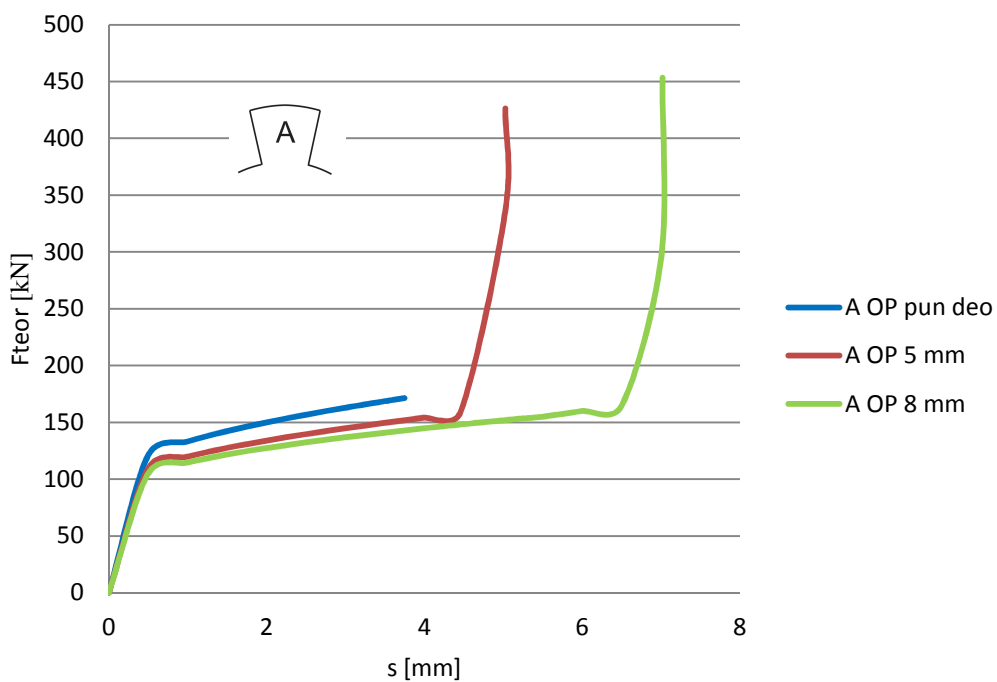
Tabela 3.5 - Vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, konvencionalan postupak, $s_f = 3,75 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	14	0	0
0,5	14,436	121,152	196,754
1	14,860	133,247	216,398
1,5	15,271	142,360	231,197
2	15,672	150,037	243,665
2,5	16,063	156,833	254,702
3	16,445	163,018	264,747
3,5	16,818	168,747	274,050
3,75	17	171,446	278,433

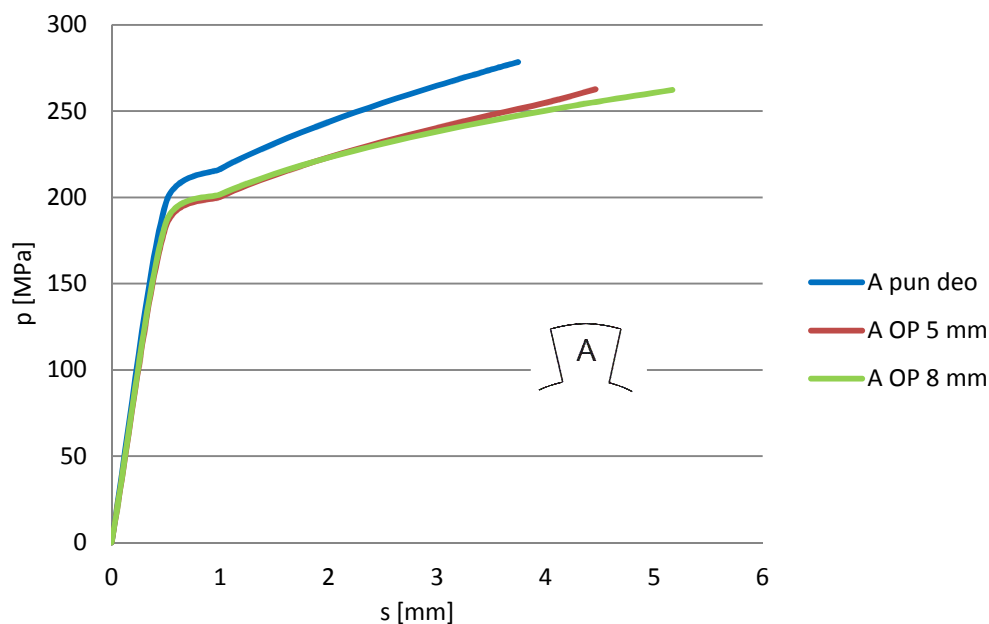
Na osnovu vrednosti sila i pritisaka prikazanih u tabelama 3.3, 3.4 i 3.5, određeni su dijagrami na slikama 3.52, 3.53 i 3.54. Za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja A: kada je prečnik otvora u pripremlju 5 mm, kada je prečnik otvora u pripremlju 8 mm i za konvencionalan proces određene su promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata. Na slici 3.52 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je potreban da bi se formiralo kompletno ozubljenje. Na slici 3.53 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese, pri čemu je u ovom slučaju ostvaren hod alata koji je potreban da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u obratku. Na slici 3.54 prikazana je promena pritiska na žig za ova tri procesa za vrednosti sile sa dijagrama na slici 3.52.



Slika 3.52 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.53 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u obratku



Slika 3.54 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja A, model OP

3.4.1.2 Parametri procesa - tip ozubljenja B, model OP

U tabeli 3.6 prikazane su vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja B, model OP kada je poluprečnik otvora u pripremlu 2,5 mm, a u tabeli 3.7 kada je poluprečnik otvora u pripremlu 4 mm.

Tabela 3.6 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja B, model OP, $r_{i0} = 2,5 \text{ mm}$, $s_f = 4,239 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	2,5	14	0	0
0,5	5,050	2,451	14,392	106,255	178,014
1	5,108	2,398	14,796	115,644	193,482
1,5	5,154	2,341	15,215	122,352	204,420
2	5,1885	2,279	15,649	127,782	213,170
2,5	5,211	2,214	16,101	132,439	220,602
3	5,222	2,145	16,574	136,573	227,131
3,426	5,056	2,087	17	139,809	232,214
4,239	-	0,0163	17	414,590	673,307

Tabela 3.7 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja B, model OP, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$, $s_f = 6,229 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	4	14	0	0
0,5	6,547	3,957	14,351	102,270	180,511
1	6,627	3,911	14,711	111,098	195,699
1,5	6,700	3,862	15,081	117,323	206,238
2	6,765	3,809	15,461	122,302	214,499
2,5	6,822	3,752	15,853	126,523	221,377
3	6,872	3,692	16,259	130,227	227,301
3,5	6,914	3,628	16,679	133,555	232,512
3,862	6,790	3,582	17	135,800	235,993
6,229	-	0,015	17	448,900	729,027

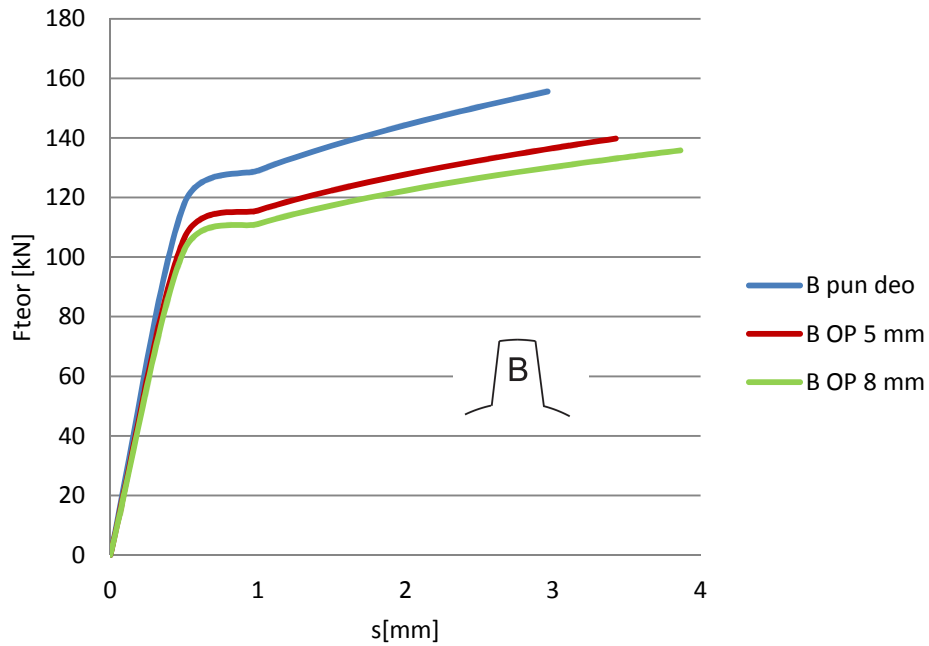
Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja B za konvencionalni postupak, kada nema otvora ni u obratku ni u alatu prikazane su u tabeli 3.8.

Tabela 3.8 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja B, konvencionalan postupak, $s_f = 2,963 \text{ mm}$

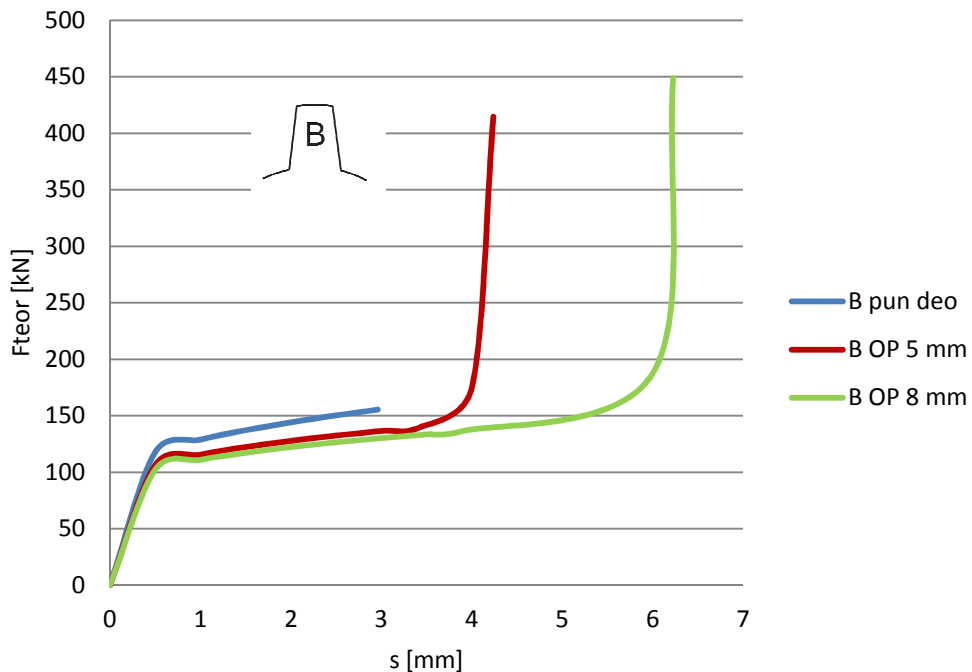
ΔH [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	14	0	0
0,5	14,452	117,802	191,314
1	14,922	129,006	209,510
1,5	15,413	137,322	223,015
2	15,928	144,272	234,302
2,5	16,470	150,400	244,254
2,963	17	155,572	252,654

Dijagrami na slikama 3.55, 3.56 i 3.57 određeni su na osnovu vrednosti sile i pritiska prikazanih u tabelama 3.6, 3.7 i 3.8. Određene su promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja B: kada je otvor u pripremlu 5 mm, kada je otvor u pripremlu 8 mm i za konvencionalan process. Na slici 3.55 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je potreban da bi se ispunio profil zuba. Na slici 3.56 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese, pri čemu je u ovom slučaju ostvaren hoda alata koji je potreban da se ispuni profil zuba i da se popuni otvor

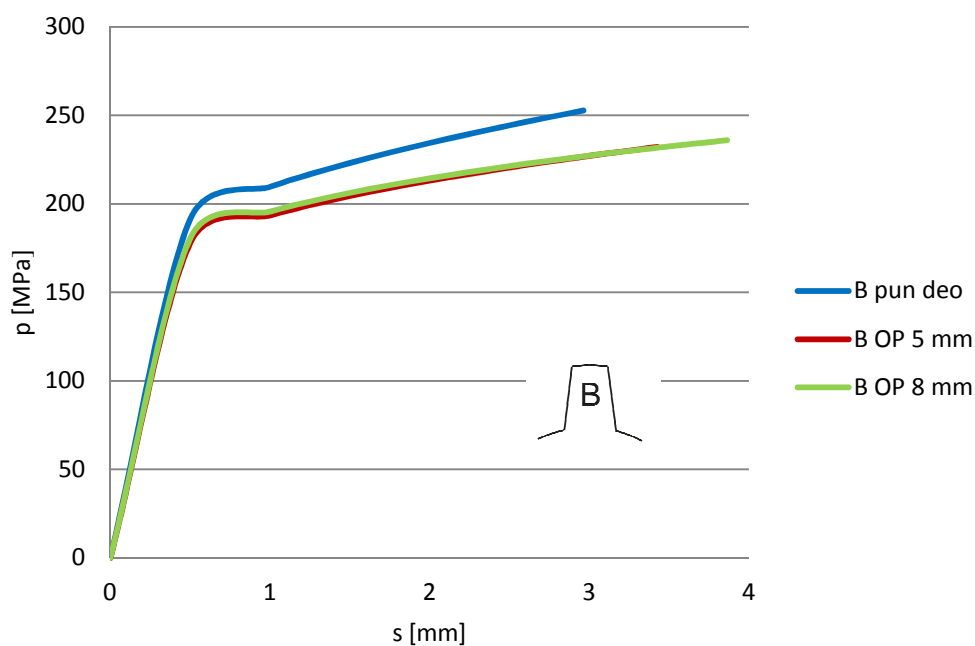
u obratku. Za vrednosti sila prikazanih na dijagramu na slici 3.55 određene su promene pritisaka na žig za ova tri procesa (slika 3.57).



Slika 3.55 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja B, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.56 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja B, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u obratku



Slika 3.57 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja B, model OP

3.4.1.3 Parametri procesa - tip ozubljenja C, model OP

U tabeli 3.9 nalaze se vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja C, model deformisanja OP kada je poluprečnik otvora u pripremlu 2,5 mm, dok se u tabeli 3.10 nalaze vrednosti deformacione sile kada je poluprečnik otvora u pripremlu 4 mm.

Tabela 3.9 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja C, model OP, $r_{i0} = 2,5$ mm, $s_f = 4,66$ mm

ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	2,5	14	0	0
0,5	5,042	2,451	14,385	106,208	177,939
1	5,101	2,398	14,770	115,568	193,358
1,5	5,150	2,341	15,153	122,272	204,286
2	5,189	2,280	15,535	127,727	213,084
2,5	5,217	2,215	15,917	132,439	220,608
3	5,234	2,145	16,298	136,660	227,275
3,5	5,240	2,071	16,677	140,534	233,333
3,92	5,249	2,004	16,998	143,591	238,074
4,66	-	0,016	17	422,154	685,591

Tabela 3.10 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja C, model OP, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$, $s_f = 6,651 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_n [mm]	r_i [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	4	14	0	0
0,5	6,539	3,957	14,346	102,231	180,441
1	6,620	3,911	14,690	111,033	195,584
1,5	6,694	3,862	15,032	117,250	206,101
2	6,763	3,809	15,372	122,239	214,390
2,5	6,824	3,753	15,709	126,492	221,333
3	6,880	3,692	16,046	130,251	227,342
3,5	6,929	3,628	16,380	133,653	232,683
4	6,971	3,560	16,713	136,790	237,499
4,43	7,009	3,497	17	139,323	241,322
6,651	-	0,0158	17	452,323	734,588

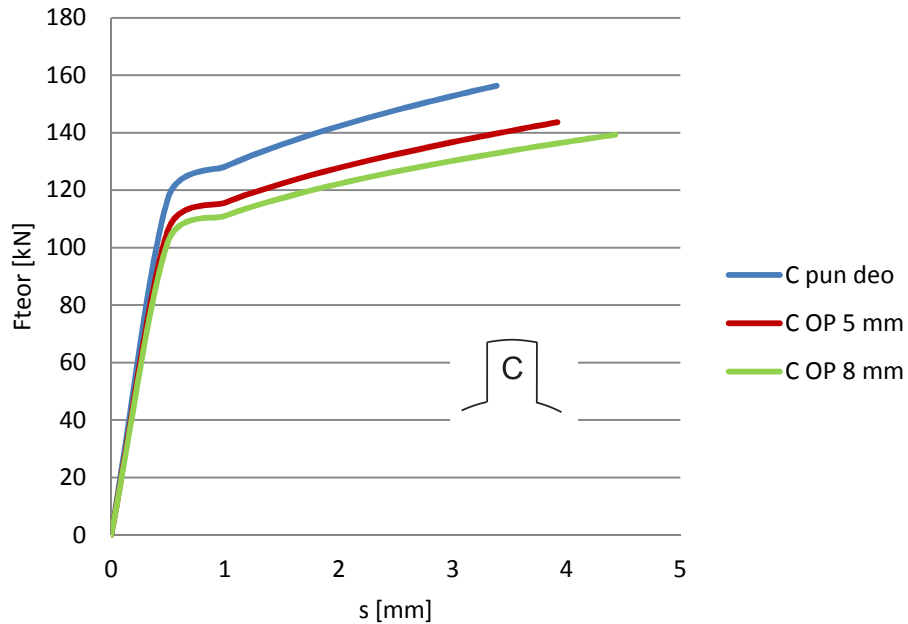
Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja C za konvencionalan postupak nalaze se u tabeli 3.11.

Tabela 3.11 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja C, konvencionalan postupak, $s_t = 3,385 \text{ mm}$

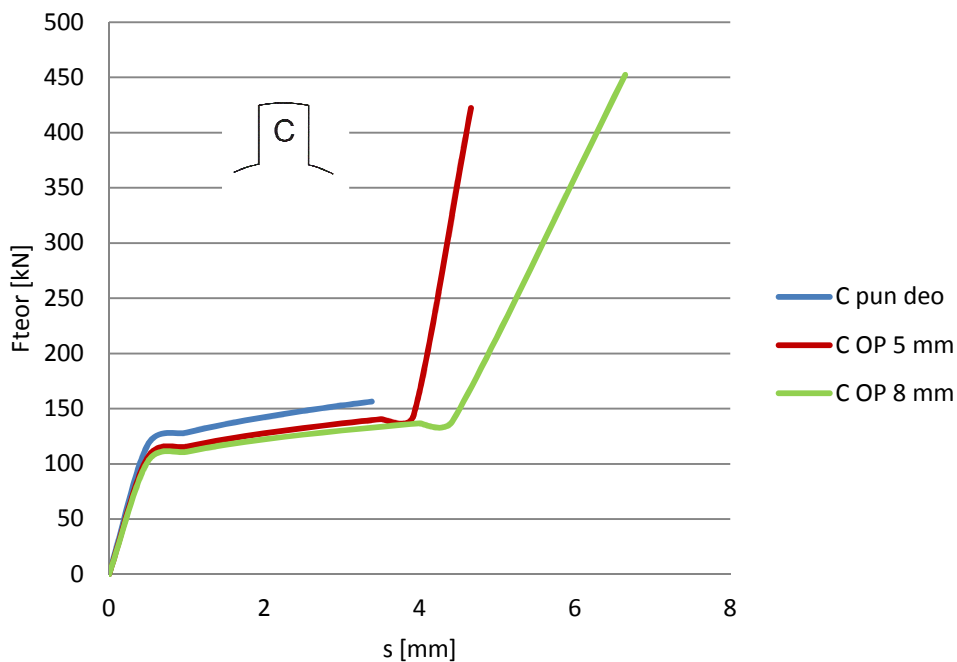
ΔH [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0,5	14,443	117,477	0
1	14,886	128,120	190,483
1,5	15,329	135,853	208,071
2	15,772	142,210	220,629
2,5	16,215	147,744	230,954
3	16,658	152,724	239,941
3,385	17	156,286	253,814

Promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata određene su za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja C (kada je otvor u pripremu 5 mm, kada je otvor u pripremu 8 mm i za konvencionalan proces). Na osnovu vrednosti sila i pritisaka prikazanih u tabelama 3.9, 3.10 i 3.11 određeni su dijagrami na slikama 3.58, 3.59 i 3.60. Na slici 3.58 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je

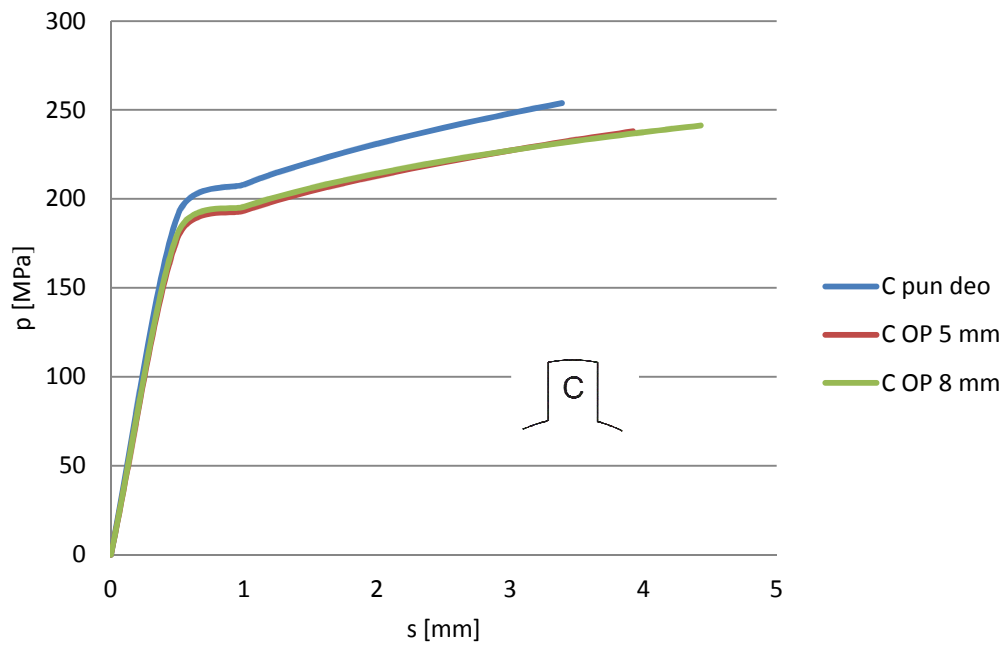
potreban da bi se formiralo ozubljenje, dok je na slici 3.59 prikazan dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese, pri čemu je u ovom slučaju ostvaren hod alata koji je potreban da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u obratku. Promena pritiska na žig za ova tri procesa za vrednosti sile sa dijagrama na slici 3.58 prikazana je na slici 3.60.



Slika 3.58 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja C, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.59 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja C, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u obratku



Slika 3.60 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja C, model OP

3.4.2 PARAMETRI PROCESA ODREĐENI METODOM GORNJE GRANICE -MODEL OA

3.4.2.1 Parametri procesa - tip ozubljenja A, model OA

Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model deformisanja OA kada je poluprečnik otvora u žigu 2,5 mm prikazane su u tabeli 3.12, a kada je poluprečnik otvora u žigu 4 mm prikazane su u tabeli 3.13.

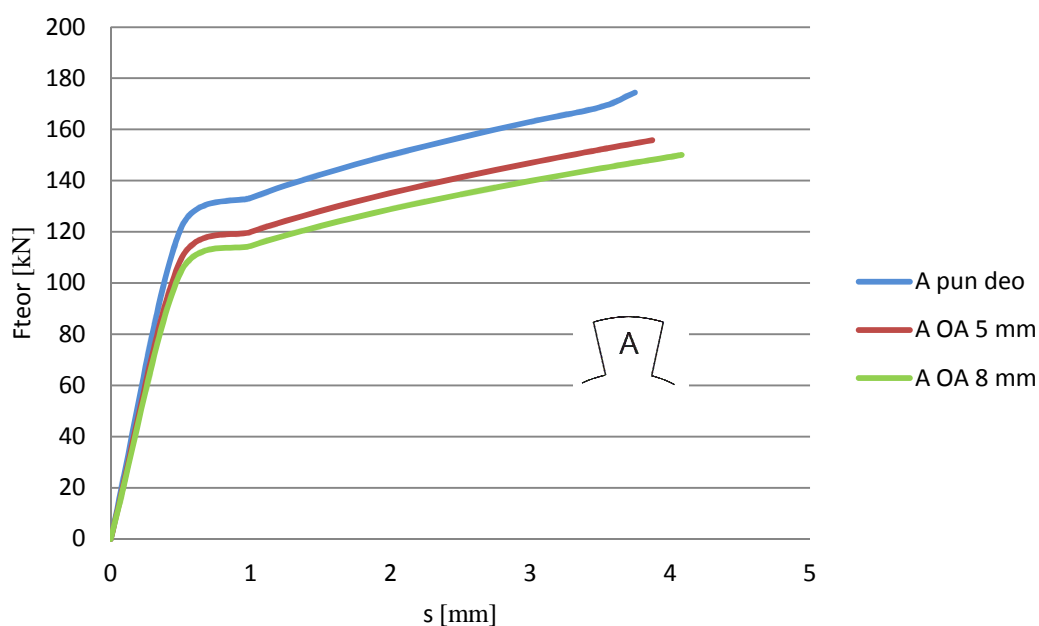
Promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata određene su za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja A: kada je otvor u žigu 5 mm, kada je otvor u žigu 8 mm i za konvencionalan proces. Na osnovu vrednosti sila i pritiska prikazanih u tabelama 3.12, 3.13 i 3.5 određeni su dijagrami na slikama 3.61, 3.62 i 3.63. Na slici 3.61 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je potreban da bi se formirali zubi, dok je na slici 3.62 prikazan dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese za ostvaren hoda alata koji je potreban da se formiraju zubi i da se popuni otvor u alatu. Na slici 3.63 prikazana je promena pritiska na žig za ova tri procesa za vrednosti sile sa dijagrama na slici 3.61.

Tabela 3.12 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja A, model OA, $r_{i0} = 2,5$ mm, $s_f = 4,226$ mm

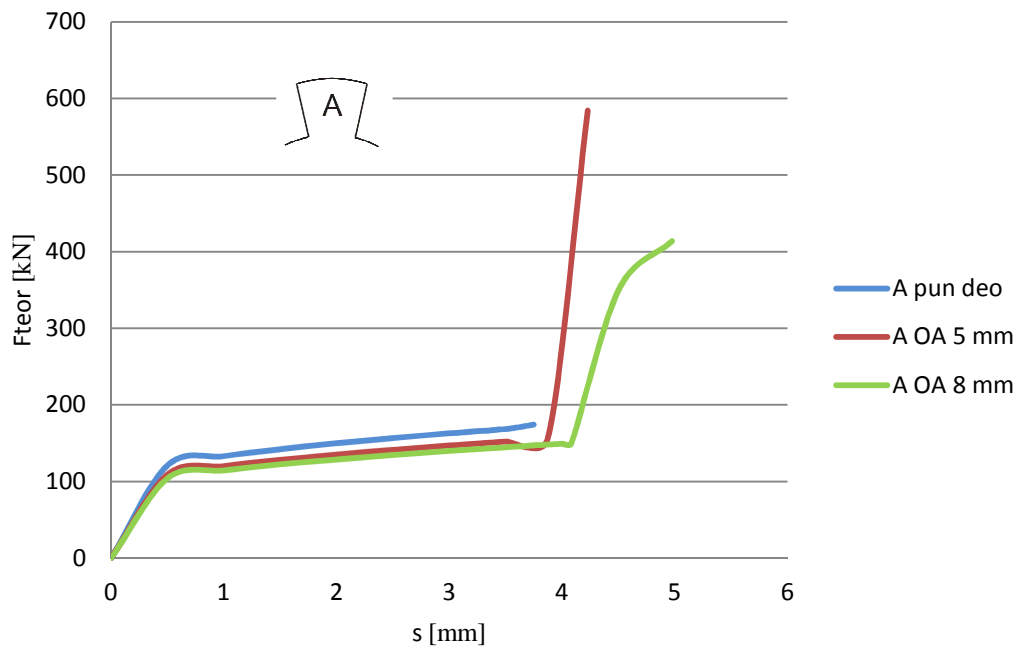
ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	0	14	0	0
0,5	2,5	0,5	14,422	109,044	182,924
1	2,5	1	14,833	119,980	201,270
1,5	2,5	1,5	15,232	128,235	215,118
2	2,5	2	15,621	135,200	226,802
2,5	2,5	2,5	16,001	141,374	237,158
3	2,5	3	16,372	146,998	246,592
3,5	2,5	3,5	16,735	152,211	255,337
3,871	2,5	3,871	16,999	155,867	261,470
4,226	-	15	17	584,183	979,980

Tabela 3.13 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja A, model OA, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$, $s_f = 4,973 \text{ mm}$

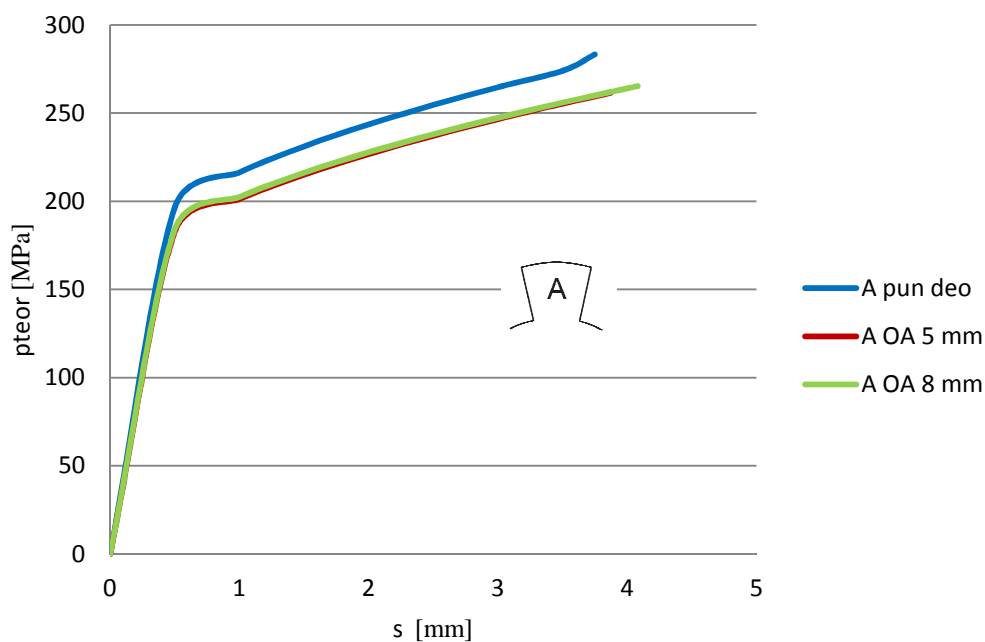
ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	0	14	0	0
0,5	4	0,5	14,401	104,142	184,165
1	4	1	14,791	114,481	202,446
1,5	4	1,5	15,171	122,255	216,194
2	4	2	15,542	128,798	227,765
2,5	4	2,5	15,905	134,586	238,001
3	4	3	16,259	139,852	247,313
3,5	4	3,5	16,606	144,728	255,935
4	4	4	16,945	149,298	264,016
4,082	4	4,082	16,999	150,018	265,289
4,5	4	9,208	17	409,603	724,338
4,973	-	15	17	413,600	731,407



Slika 3.61 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, model OA, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.62 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, model OA, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u alatu



Slika 3.63 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja A, model OA

3.4.2.2 Parametri procesa određeni metodom gornje granice za tip ozubljenja B, model OA

U tabeli 3.14 prikazane su vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja B, model OA za poluprečnik otvora u žigu 2,5 mm, a za poluprečnik otvora u žigu 4 mm vrednosti su prikazane u tabeli 3.15.

Tabela 3.14 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja B, model OA, $r_{i0} = 2,5 \text{ mm}$, $s_f = 3,442 \text{ mm}$

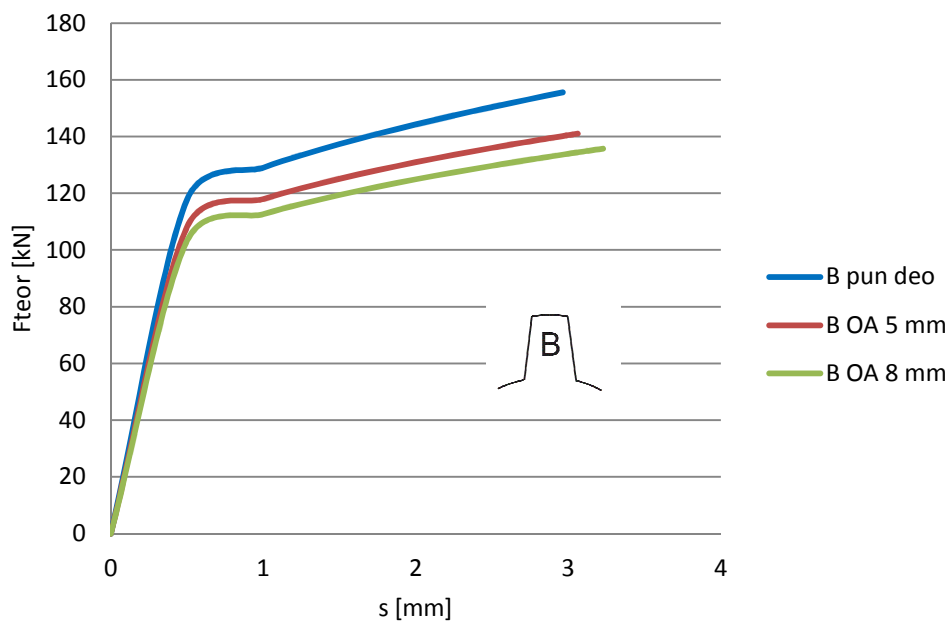
ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	-	14	0	0
0,5	2,5	0,5	14,437	108,069	181,288
1	2,5	1	14,891	117,924	197,820
1,5	2,5	1,5	15,365	125,066	209,802
2	2,5	2	15,861	130,907	219,599
2,5	2,5	2,5	16,382	135,949	228,059
3	2,5	3	16,931	140,441	235,593
3,061	2,5	3,061	17	140,959	236,463
3,442	-	14,999	17	572,495	960,373

Tabela 3.15 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja B, model OA, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$, $s_f = 4,188 \text{ mm}$

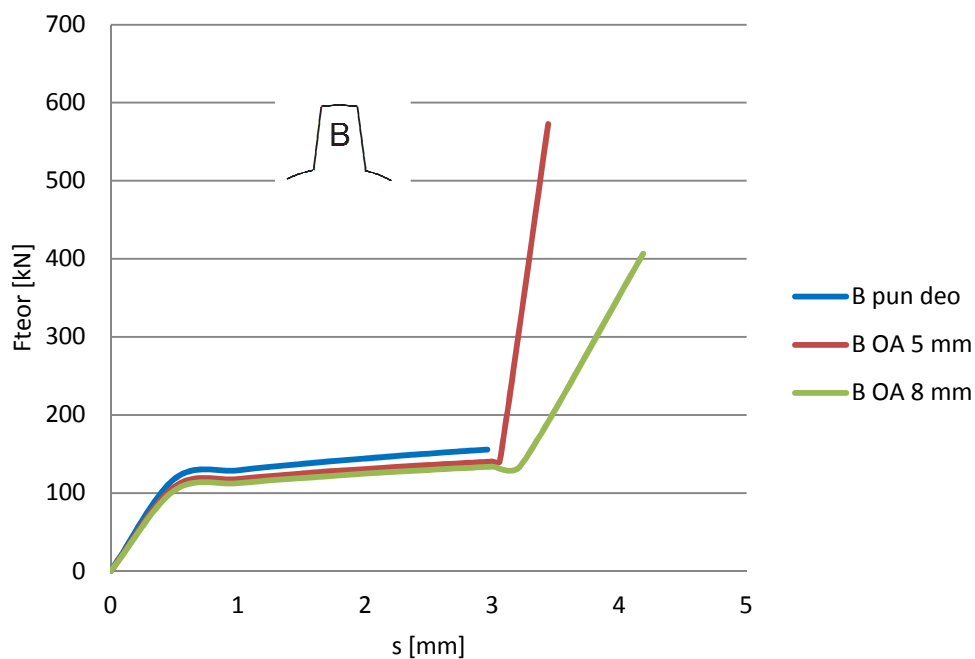
ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	-	14	0	0
0,5	4	0,5	14,414	103,263	182,610
1	4	1	14,844	112,625	199,164
1,5	4	1,5	15,291	119,392	211,131
2	4	2	15,757	124,915	220,897
2,5	4	2,5	16,245	129,676	229,318
3	4	3	16,758	133,913	236,81
3,227	4	3,227	17	135,701	239,971
4,188	-	14,999	17	406,643	719,103

Na slikama 3.64, 3.65 i 3.66 prikazani su dijagrami određeni su na osnovu vrednosti sila i pritiska prikazanih u tabelama 3.14, 3.15 i 3.8. Za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja B: kada je otvor u žigu 5 mm, kada je otvor u žigu 8 mm i za konvencionalan proces određene su promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata. Na slici 3.64 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je potreban da bi se formirali zubi. Na slici 3.65 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese za ostvaren hod alata

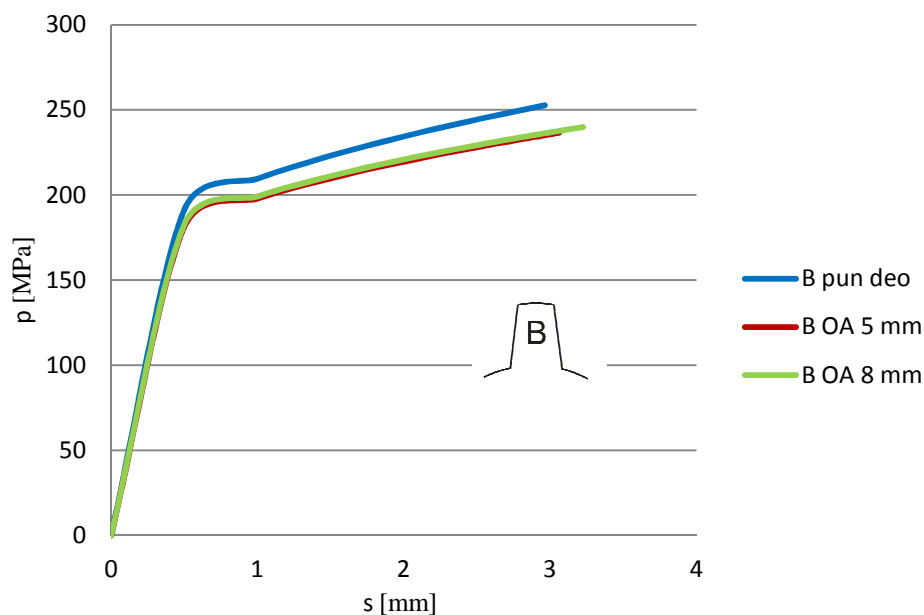
koji je potreban da se formiraju zubi i da se popuni otvor u alatu. Na slici 3.66 prikazana je promena pritiska na žig za ova tri procesa za vrednosti sile sa dijagrama na slici 3.64.



Slika 3.64 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata- tip ozubljenja B, model OA, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.65 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja B, model OA, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u alatu



Slika 3.66 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja B, model OA

3.4.2.3 Parametri procesa - tip ozubljenja C, model OA

Vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja C, model deformisanja OA kada je poluprečnik otvora u žigu 2,5 mm prikazane su u tabeli 3.16, a kada je poluprečnik otvora u žigu 4 mm prikazane su u tabeli 3.17.

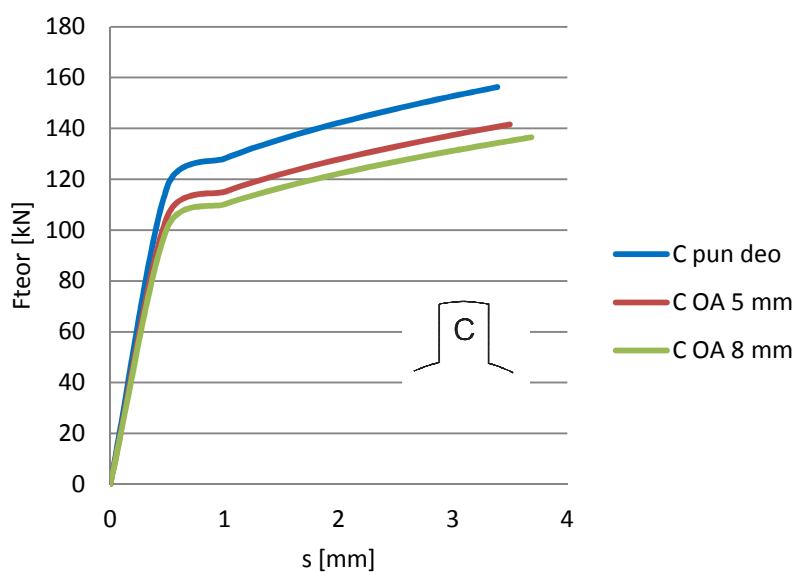
Tabela 3.16 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja C, model OA, $r_{i0} = 2,5$ mm, $s_f = 3,864$

ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	0	14	0	0
0,5	2,5	0,5	14,429	105,469	176,927
1	2,5	1	14,858	115,075	193,041
1,5	2,5	1,5	15,288	122,069	204,774
2	2,5	2	15,715	127,832	214,441
2,5	2,5	2,5	16,144	132,859	222,873
3	2,5	3	16,573	137,390	230,475
3,497	2,5	3,497	16,999	141,532	237,423
3,864	-	15	17	579,171	971,573

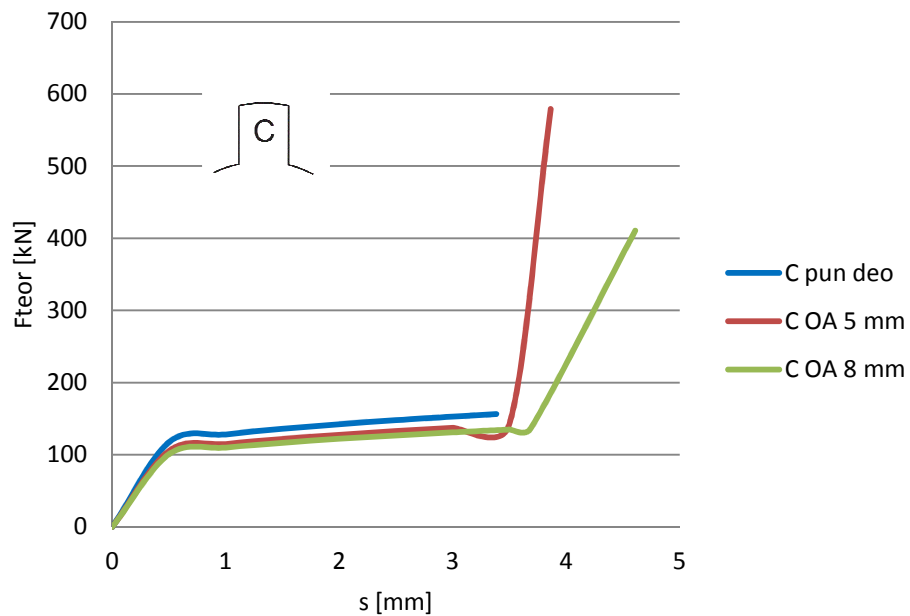
Tabela 3.17 - Vrednosti deformacione sile određene metodom gornje granice - tip ozubljenja C, model OA, $r_{i0} = 4 \text{ mm}$, $s_f = 4,610 \text{ mm}$

ΔH [mm]	r_n [mm]	t [mm]	r_1 [mm]	F [kN]	p [MPa]
0	-	0	14	0	0
0,5	4	0,5	14,407	100,939	169,328
1	4	1	14,814	110,075	184,653
1,5	4	1,5	15,221	116,705	195,775
2	4	2	15,627	122,152	204,913
2,5	4	2,5	16,034	126,891	212,863
3	4	3	16,441	131,154	220,014
3,5	4	3,5	16,848	135,072	226,587
3,686	4	3,686	16,999	136,459	228,314
4,610	-	15	17	410,575	688,749

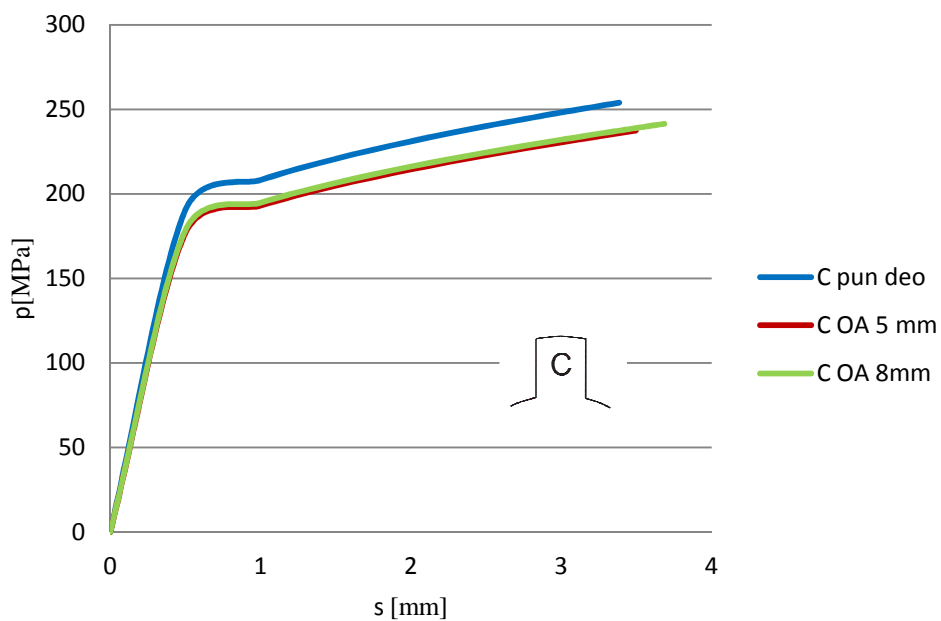
Za tri procesa istikivanja tipa ozubljenja C: kada je otvor u žigu 5 mm, kada je otvor u žigu 8 mm i za konvencionalan proces određene su promene deformacione sile i srednjeg pritiska na žig u zavisnosti od hoda alata. Na osnovu vrednosti sila i pritisaka prikazanih u tabelama 3.16, 3.17 i 3.11, određeni su dijagrami na slikama 3.67, 3.68 i 3.69. Na slici 3.67 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri navedena procesa kada je ostvaren hod alata koji je potreban da bi se formirali zubi. Na slici 3.68 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za navedene procese za ostvaren hoda alata koji je potreban da se formiraju zubi i da se popuni otvor u alatu. Na slici 3.69 prikazana je promena pritiska na žig za ova tri procesa za vrednosti sile sa dijagrama na slici 3.67.



Slika 3.67 -Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja C, model OA, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 3.68 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja C, model OP, sila potrebna da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u alatu



Slika 3.69 - Vrednost pritiska na žig - tip ozubljenja C, model OA

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA

Cilj eksperimentalnih istraživanja procesa hladnog istiskivanja prikazanih u ovom radu je verifikacija vrednosti deformacione sile određene na osnovu teorijskog rešenja. Na taj način može se ustanoviti u kojoj meri predloženo teorijsko rešenje realno opisuje zadati proces.

Eksperiment je izveden u Laboratoriji za tehnologiju plastičnog deformisanja na Departmanu za proizvodno mašinstvo, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Eksperimentalnim putem određena je deformaciona sila za tip ozubljenja A, za oba modela deformisanja. Osim eksperimentalnog određivanja deformacione sile, eksperimentalnim putem određene su i kriva tečenja za korišteni materijal kao i koeficijent trenja. Ove veličine bile su potrebne za određivanje parametara procesa teorijskim putem, kao i kod numeričke simulacije procesa.

Materijal korišten u eksperimentu je Al 99,5 čiji hemijski sastav je prikazan u tabeli 4.1.

Tabela 4.1 - Hemijski sastav Al 99,5

	Sastav u %						
Al 99,5	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cu+Zn
	0.111	0.279	0.0033	0.0055	0.0044	0.0463	0.0469

Kriva tečenja određena je eksperimentalno prema metodi Rastegajeva [42]. Na osnovu eksperimentalnih rezultata određena je kriva tečenja u analitičkom obliku.

$$K = 119,39 \cdot \varphi^{0,2048} [MPa] \quad (4.1)$$

Koeficijent trenja određen je metodom sabijanja prstena. Korištene su etalon krive određene prema Avitzurovom rešenju [7], [46]. Koeficijent trenja između materijala alata (alatni čelik) i materijala obratka (Al99,5) kada se kao sredstvo za podmazivanje koristi ulje iznosi $\mu = 0,1$.

4.1 MAŠINA, ALAT I PRIPREMCI

Mašina korištena u eksperimentu je hidraulična presa trostrukog dejstva Sack & Kiesselbach, nominalne sile 6,3 MN (slika 4.1). Na slici 4.2 prikazan je izgled alata montiranog u presi. Alat se sastoji od žiga i matrice koja u delu gde se formira ozubljenje ima prostor za izmenjivi uložak.

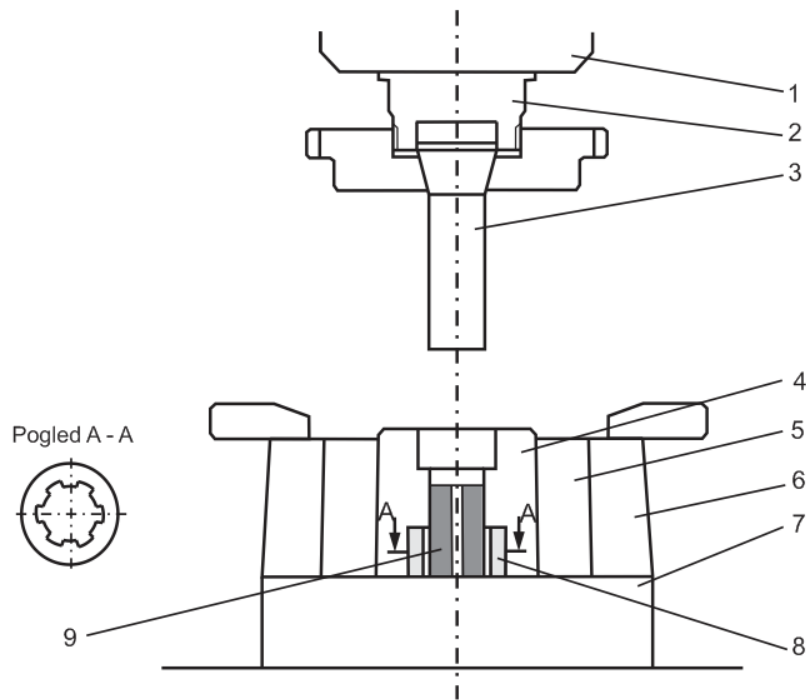


Slika 4.1 - Hidraulična presa Sack & Kiesselbach, nominalne sile 6,3 MN



Slika 4.2 - Alat montiran u presi

Izgled alata koji se koristi u slučaju istiskivanja delova sa otvorom u pripreмку (model deformisanja OP) i kada je u pitanju konvencionalno istiskivanje prikazan je na slici 4.3. Postoje tri izmenjiva uložka za matricu, za svaki tip ozubljenja, ali je u ovom eksperimentu korišten samo uložak za tip ozubljenja A.



1 - Gornji deo nosača žiga
 2 - Donji deo nosača žiga
 3 - Žig
 4 - Matrica

5 - Ojačavajući prsten
 6 - Ojačavajući prsten
 7 - Ploča (zatvara matricu sa donje strane)
 8 - Izmenjivi deo matrice
 9 - Pripremak sa centralnim otvorom

Slika 4.3 - Delovi alata korištenog u eksperimentu - model deformisanja OP i konvencionalno istiskivanje

Izgled matrice korištene u eksperimentu prikazan je na slici 4.4, dok je na slici 4.5 prikazan izmenjivi uložak za tip ozubljenja A.

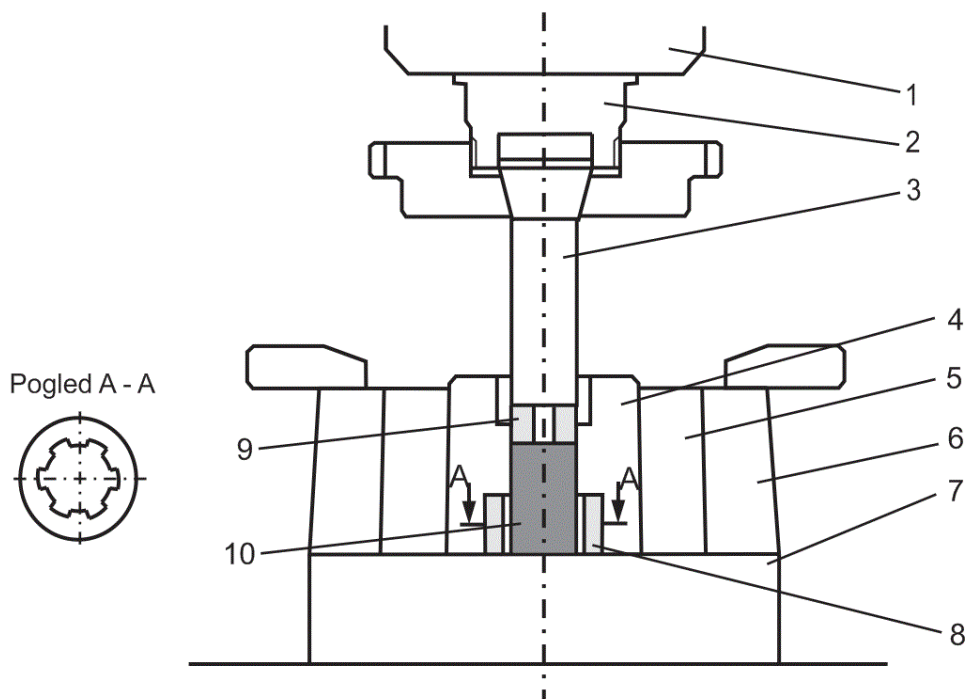


Slika 4.4 - Matrica



Slika 4.5 - Uložak za tip ozubljenja A

U slučaju istiskivanja delova za model deformisanja OA nije korišten žig sa otvorom u sredini, nego su napravljeni dodaci, koji se postavljaju između žiga i pripremk (slika 4.6).



- 1 - Gornji deo nosača žiga
- 2 - Donji deo nosača žiga
- 3 - Žig
- 4 - Matrica
- 5 - Ojačavajući prsten

- 6 - Ojačavajući prsten
- 7 - Ploča (zatvara matricu sa donje strane)
- 8 - Izmenjivi deo matrice
- 9 - Dodatak za žig
- 10 - Pripremak

Slika 4.6 - Delovi alata korištenog u eksperimentu - model deformisanja OA

Na ovaj način izbegnuto je da se prave tri posebna žiga, bez otvora, sa otvorom $\phi 5$ mm i otvorom $\phi 8$ mm. Umesto da se prave žigovi sa različitim prečnikom centralnog otvora, napravljen je jedan žig bez otvora i dodaci za žig sa centralnim otvorom koji imaju isti spoljašnji prečnik kao i žig i koji se postavljaju između punog pripremk i žiga u slučaju kada treba da se izvede model deformisanja OA (kada postoji otvor u žigu), kao

što je prikazano na slici 4.6. Na slici 4.7 prikazan je žig prečnika 28 mm koji je korišten u eksperimentu, kao i dva dodatka, sa otvorima prečnika 5 mm i 8 mm. I ako je na ovaj način napravljena ušteda u izradi alata, korištenje dodatka uslovalo je da je tečenje materijala u pravcu otvora u žigu bilo ograničeno visinom dodatka.



Slika 4.7 - Izgled žiga i dodatka za žig

U eksperimentu za model deformisanja OP korišteni su pripremci sa prečnikom otvora 5mm i 8 mm. Kao što je već napomenuto, za drugi model deformisanja, OA, pripremci su bili delovi bez otvora („puni delovi”). Na slici 4.8 prikazan je izgled priprema korištenih u eksperimentu.



Slika 4.8 - Izgled priprema korištenih u eksperimentu

Eksperiment je izveden sa tri ponavljanja za tip ozubljenja A za sledeće modele deformisanja:

- pun deo (konvencionalno istiskivanje)
- otvor u pripremlju prečnika 5 mm
- otvor u pripremlju prečnika 8 mm
- otvor u žigu prečnika 5 mm
- otvor u žigu prečnika 8 mm.

4.2 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - KONVENCIONALNA METODA

Eksperiment istiskivanja kada su i obradak i žig bez otvora, odnosno kada je konvencionalna metoda u pitanju bio je neophodan kako bi se dobila ocena postupaka kada postoji otvor u pripremlju ili žigu.

Tokom eksperimenta hod alata praćen je na komparatoru prese i za svakih 0,5 mm hoda registrovana je vrednost sile na mernoj skali prese.

Na slici 4.9 prikazan je pripremlju i gotov deo tipa A dobijen konvencionalnom metodom istiskivanja. Eksperiment je izveden sa tri ponavljanja, a delovi su prikazani na slici 4.10.



Slika 4.9 - Pripremlju i gotov deo -tip ozubljenja A, pun deo



Slika 4.10 - Ozubljenje tipa A

U tabeli 4.2 nalaze se eksperimentalne vrednosti deformacione sile za ovaj proces.

Tabela 4.2 - Eksperimentalne vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, pun deo

Deo 1, A pun deo		Deo 2, A pun deo		Deo 3, A pun deo	
s[mm]	F[kN]	s[mm]	F[kN]	s[mm]	F[kN]
0	0	0	0	0	0
0,5	107,91	0,5	137,34	0,5	137,34
1	127,53	1	142,24	1	147,15
1,5	137,34	1,5	147,15	1,5	147,15
2	137,34	2	152,05	2	147,15
2,5	142,24	2,5	156,96	2,5	156,96
3	147,15	3	166,77	3	156,96
3,5	156,96	3,5	196,20	3,5	176,58
3,75	196,2	3,8	235,44	3,75	196,20
3,9	225,63	4	250,15	4	245,25
4,6	294,30	4,5	333,54	4,5	294,30
5	392,40	4,7	353,16	4,7	343,35

4.3 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - MODEL OP

U eksperimentu istiskivanja ozubljenja za model deformisanja OP, kao što je već napomenuto, korišteni su pripreмки sa dve različite veličine centralnog otvora (5mm, 8mm).

Na slici 4.11 prikazan je pripremak i gotov deo dobijen u eksperimentu istiskivanja tipa ozubljenja A kada je inicijalni centralni otvor u pripreмку prečnika 5mm, dok je na slici 4.12 prikazan pripremak i gotov deo dobijen u eksperimentu istiskivanja tipa ozubljenja A kada je centralni otvor u pripreмку prečnika 8 mm.



Slika 4.11 - Tip ozubljenja A model deformisanja OP otvor $\phi 5\text{mm}$



Slika 4.12 - Tip ozubljenja A model deformisanja OP otvor $\phi 8$ mm

U tabelama 4.3 i 4.4 prikazane su vrednosti deformacione sile izmerene u eksperimentu istiskivanja ozubljenja A za dve različite veličine centralnog otvora u pripremu. Kao što je već napomenuto eksperiment je urađen sa tri ponavljanja. Na slici 4.13 prikazani su svi uzorci za tip ozubljenja A, model deformisanja OP.



Slika 4.13 - Uzorci iz eksperimenta istiskivanja tipa ozubljenja A, model deformisanja OP

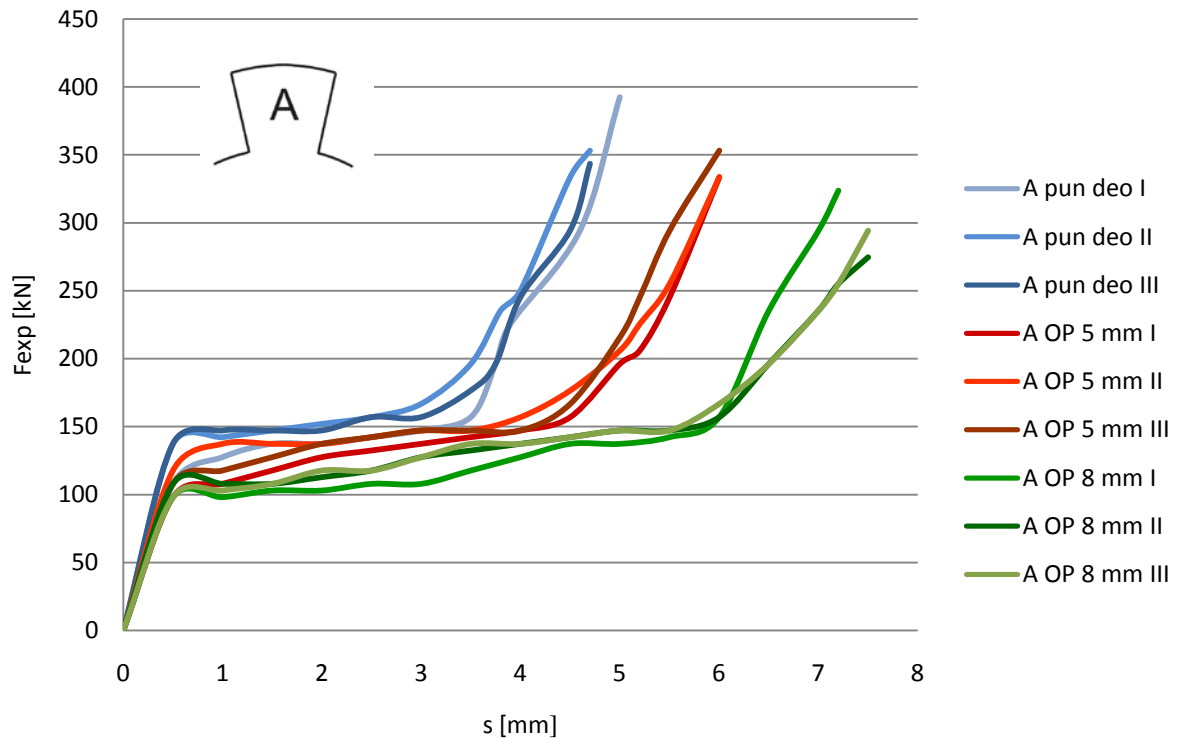
Tabela 4.3 - Eksperimentalne vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model OP,
 $d_{i0} = 5\text{mm}$

Deo 1, A OP 5 mm		Deo 2, A OP 5 mm		Deo 3, A OP 5 mm	
0	0	0	0	0	0
0,5	98,1	0,5	117,72	0,5	107,91
1	107,91	1	137,34	1	117,72
1,5	117,72	1,5	137,34	1,5	127,53
2	127,53	2	137,34	2	137,34
2,5	132,43	2,5	142,24	2,5	142,245
3	137,34	3	147,15	3	147,15
3,5	142,24	3,5	147,15	3,5	147,15
4	147,15	4	156,96	4	147,15
4,5	156,96	4,5	176,58	4,5	166,77
5	196,20	5	206,01	5	215,82
5,2	206,01	5,2	225,63	5,2	245,25
5,5	245,25	5,5	255,06	5,5	294,3
6	333,54	6	333,54	6	353,16

Tabela 4.4 - Eksperimentalne vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model OP,
 $d_{i0} = 8\text{mm}$

Deo 1, A OP 8 mm		Deo 2, A OP 8 mm		Deo 3, A OP 8 mm	
0	0	0	0	0	0
0,5	98,10	0,5	107,91	0,5	98,1
1	98,10	1	107,91	1	103,00
1,5	103,00	1,5	107,91	1,5	107,91
2	130,00	2	112,81	2	117,72
2,5	107,91	2,5	117,72	2,5	117,72
3	107,91	3	127,53	3	127,53
3,5	117,72	3,5	132,43	3,5	137,34
4	127,53	4	137,34	4	137,34
4,5	137,34	4,5	142,24	4,5	142,24
5	137,34	5	147,15	5	147,15
5,5	142,24	5,5	147,15	5,5	147,15
6	156,96	6	156,96	6	166,77
6,5	235,44	6,5	196,2	6,5	196,20
7	294,30	7	235,44	7	235,44
7,2	323,73	7,5	274,68	7,5	294,30

Na slici 4.14 prikazan je uporedni dijagram deformacionih sila u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A za pun komad i za dve različite veličine centralnog otvora u pripreмку, $\phi 5\text{mm}$ i $\phi 8\text{mm}$. Za svaki deo su urađena tri ponavljanja eksperimenta.



Slika 4.14 - Uporedni dijagram eksperimentalnih vrednosti deformacionih sila u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A, pun deo i model OP, otvori $\phi 5\text{mm}$ i $\phi 8\text{mm}$

4.4 EKSPERIMENT ISTISKIVANJA OZUBLJENJA - MODEL OA

Na slici 4.15 prikazan je pripremak i gotov deo dobijen u eksperimentu istiskivanja tipa ozubljenja A kada je centralni otvor u žigu prečnika 5mm, a na slici 4.16 prikazan pripremak i gotov kada je centralni otvor u žigu prečnika 8 mm.



Slika 4.15 - Tip ozubljenja A, model deformisanja OA otvor $\phi 5\text{mm}$



Slika 4.16 - Tip ozubljenja A model deformisanja OA otvor $\phi 8$ mm

Vrednosti deformacione sile izmerene u eksperimentu istiskivanja ozubljenja tipa A za dve različite veličine centralnog otvora u žigu nalaze se u tabelama 4.11 i 4.12. Eksperiment je urađen sa tri ponavljanja kada je veličina otvora u žigu bila 5 mm i 8 mm.

Tabela 4.11 - Eksperimentalne vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model OA, $d_{i0} = 5$ mm

Deo 1, A OA 5 mm		Deo 2, A OA 5 mm		Deo 3, A OA 5 mm	
0	0	0	0	0	0
0,5	117,72	0,5	137,34	0,5	78,48
1	127,53	1	137,34	1	127,53
1,5	137,34	1,5	147,15	1,5	137,34
2	156,96	2	147,15	2	142,24
2,5	176,58	2,5	156,96	2,5	147,15
3	186,39	3	166,77	3	147,15
3,5	196,20	3,5	196,20	3,5	152,05
4	206,01	4	255,06	4	196,20
4,5	255,06	4,5	313,92	4,5	245,25
5	284,49	5	392,40	5	333,54
5,3	313,92	5,5	451,26		
5,5	343,35				
6	372,78				
6,2	382,59				

Tabela 4.12 - Eksperimentalne vrednosti deformacione sile - tip ozubljenja A, model deformisanja OA, $d_{i0} = 8 \text{ mm}$

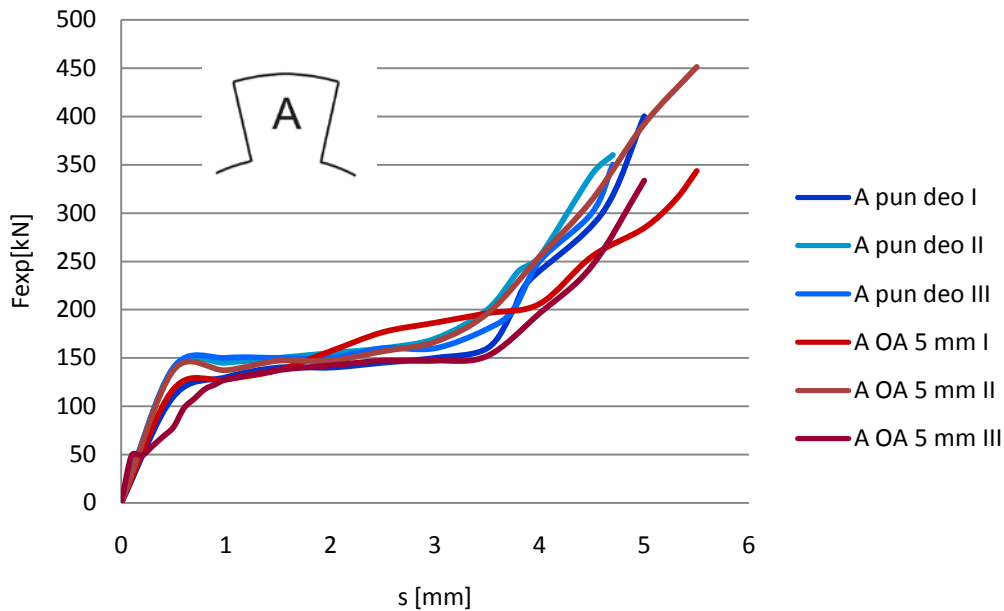
Deo 1, A OA 8 mm		Deo 2, A OA 8 mm		Deo 3, A OA 8 mm	
0	0	0	0	0	0
0,5	107,91	0,5	137,34	0,5	137,34
1	107,91	1	147,15	1	137,34
1,5	127,53	1,5	147,15	1,5	142,24
2	137,34	2	147,15	2	147,15
2,5	142,24	2,5	147,15	2,5	147,15
3	147,15	3	147,15	3	147,15
3,5	147,15	3,5	152,05	3,5	196,20
4	196,2	4	196,20	4	235,44
4,5	235,44	4,5	245,25	4,5	274,68
5	264,87	5	274,68	5	313,92
5,5	294,3	5,5	294,3	5,5	333,54
6	323,73	6	313,92	6	
6,5	392,4			6,5	

Na slici 4.17 prikazani su uzorci za tip ozubljenja A, model deformisanja OA.

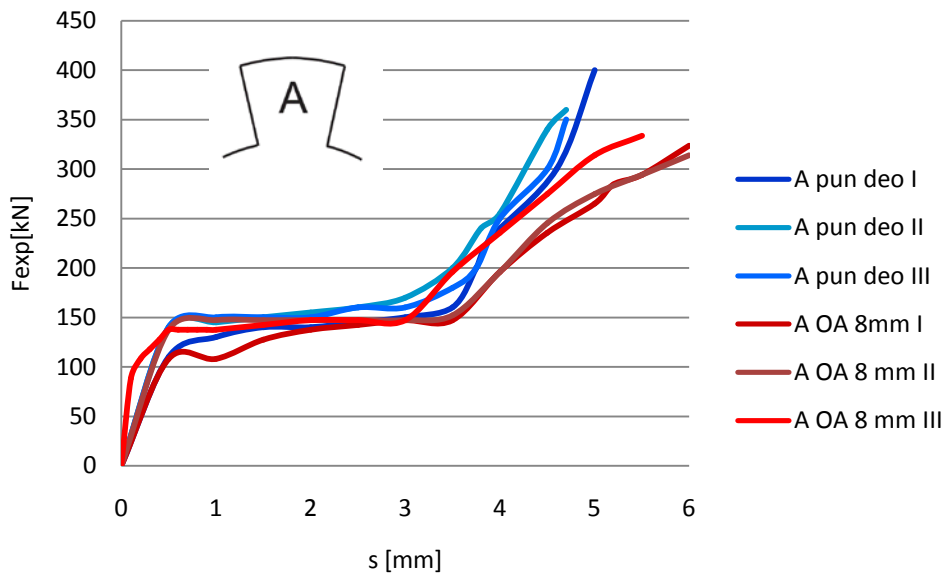


Slika 4.17 - Uzorci iz eksperimenta istiskivanja tipa ozubljenja A, model deformisanja OA

Na slikama 4.18 i 4.19 prikazani su uporedni dijagrami promene deformacionih sila u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A za pun komad i za dve različite veličine centralnog otvora u žigu, $\phi 5\text{mm}$ i $\phi 8\text{mm}$. Za razliku od modela deformisanja OP gde su sve krive prikazane na jednom dijagramu, ovde su dijagrami razdvojeni zbog veće preglednosti, jer su vrednosti sile za sva tri procesa veoma slične.



Slika 4.18 - Uporedni dijagram eksperimentalnih vrednosti deformacionih sila u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A, pun deo i model OA, otvor u žigu $\phi 5\text{mm}$



Slika 4.19 - Uporedni dijagram eksperimentalnih vrednosti deformacionih sila u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A, pun deo i model OA, otvor u žigu $\phi 8\text{mm}$

Glavni problem kod izvođenja eksperimenta istiskivanja bilo je neželjeno isticanje materijala kroz zazole koji postoje između matrice i izmenjivog uloška i izmenjivog uloška i donje ploče za oba modela deformisanja. Kod modela deformisanja OA postojalo je i dodatno isticanje materijala između dodatka za žig i matrice. Ovo isticanje materijala uticalo je na povećanje veličine hoda koji je bilo potrebno ostvariti za kompletno formiranje zuba i, što je takođe predstavljalo problem, nije se mogao tačno definisati trenutak kada su formirani zubi ili kada je otvor u potpunosti ispunjen. Dodatnog isticanje materijala uticalo je i na povećanje deformacione sile.

Osim isticanja materijala kroz zazole, na povećanje ukupnog hoda uticale su i elastične deformacije elemenata obradnog sistema (mašina, alat, obradak).

5. NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA

U savremenim uslovima proizvodnje numeričke simulacije su neophodan i neizbežan deo projektovanja tehnologije izrade nekog dela, bez obzira da li se on proizvodio plastičnim deformisanjem materijala ili nekom drugom tehnologijom. Pomoću simulacija na lakši i jeftiniji način dolazi se do informacija koje su neophodne za projektovanje tehnologije.

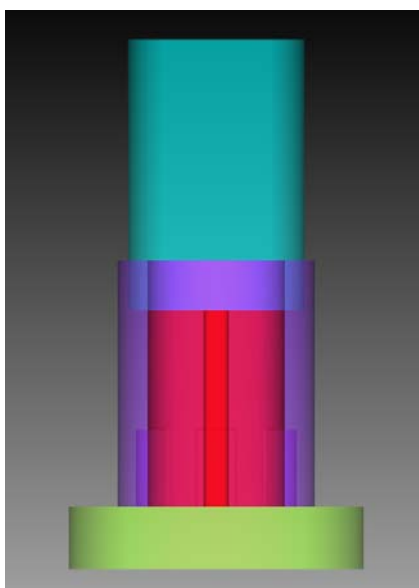
Informacije koje se dobijaju na osnovu simulacije procesa su od velike koristi i često, kada ove informacije nisu dostupne, do njih se dolazi primenom drugih metoda, što predstavlja dodatni trošak i odlaganje procesa proizvodnje.

Pomoću simulacija može se dobiti veliki broj podataka o procesu. U ovom slučaju simulacija procesa istiskivanja ozubljenih elementa upotrebljena je da se dobije detaljniji uvid u način na koji materijal teče tokom procesa istiskivanja, kao i da se na još jedan način proveri teorijsko rešenje, odnosno da se odredi veličina deformacione sile potrebna za proces istiskivanja. Simulacije su urađene u programu Simufact.Forming 11.

Da bi mogli da se zadaju svi parametri neophodni za pokretanje simulacije, kreirani su 3D modeli alata (matrice, žiga i donje ploče) i priprema. 3D modeli su kreirani u programu Solid Edge V18. Ostali podaci koji su neophodni da bi se pokrenula simulacija su već definisani u prethodnim poglavljima, kao što su koeficijent trenja ($\mu = 0,1$), kriva tečenja (jednačina 4.1) i mašina na kojoj je izveden eksperiment (hidraulična presa, usvojena je brzina kretanja žiga $v_0 = 1$ mm/s). Odabrana veličina elemenata mreže je 0,5 mm, tip elementa hexahedral.

5.1 SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA - MODEL OP

Na slici 5.1 prikazan je izgled modela alata u simulaciji procesa istiskivanja za model deformisanja OP. 3D modeli elemenata alata (žig, matrica i donja ploča) određeni su na osnovu alata korištenog u eksperimentu.

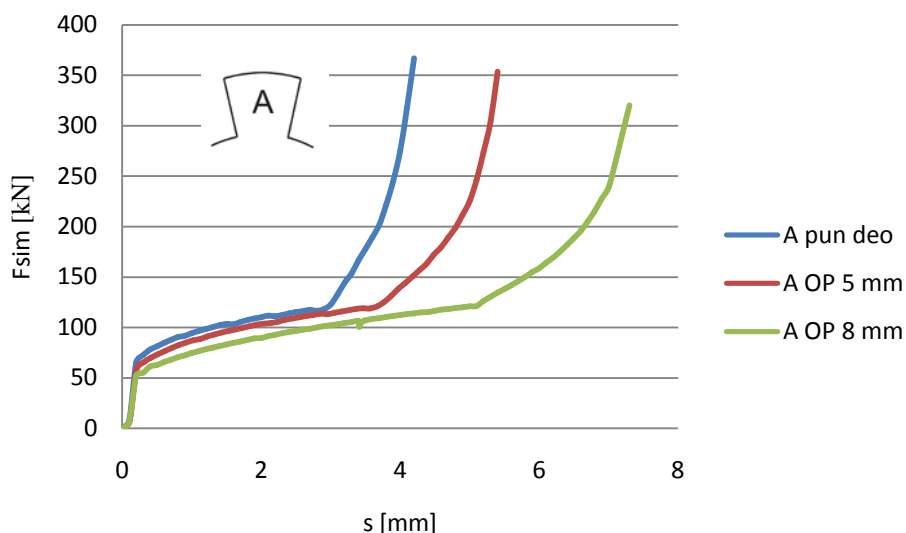


Slika 5.1 - Model u simulaciji kada je otvor u pripremku - model deformisanja OP

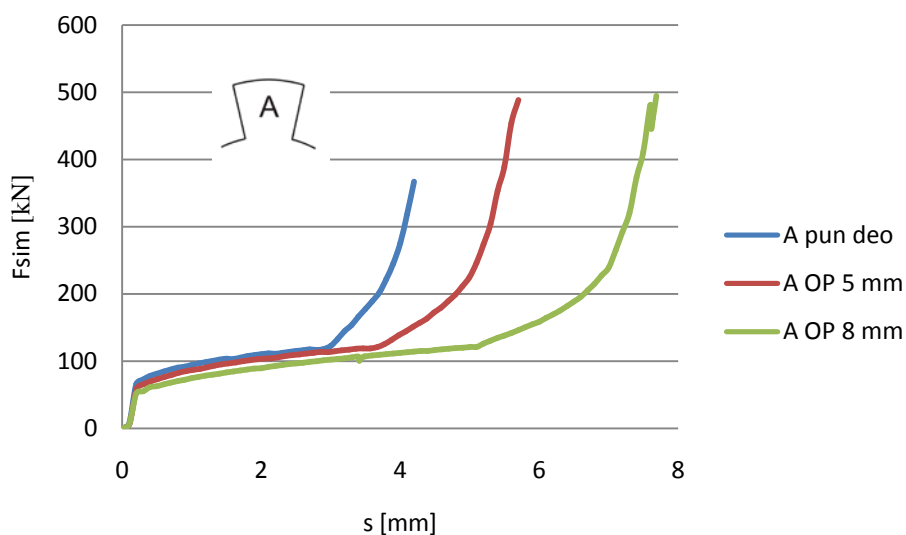
U nastavku će biti prikazani dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za model deformisanja OP za sva tri tipa ozubljenja dobijeni na osnovu numeričke simulacije procesa istiskivanja.

5.1.1 Tip ozubljenja A, model OP

Na slikama 5.2 i 5.3 prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata kod istiskivanja ozubljenja tipa A za tri slučaja: za konvencionalno istiskivanje i za istiskivanje kada je prečnik otvora u pripremku 5 mm i 8 mm. Na slici 5.2 je prikazan dijagram deformacione sile koja je potrebna da se formira ozubljenje, dok je na slici 5.3 prikazan dijagram promene deformacione sile za ukupan proces, odnosno za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje i da se otvor popuni.



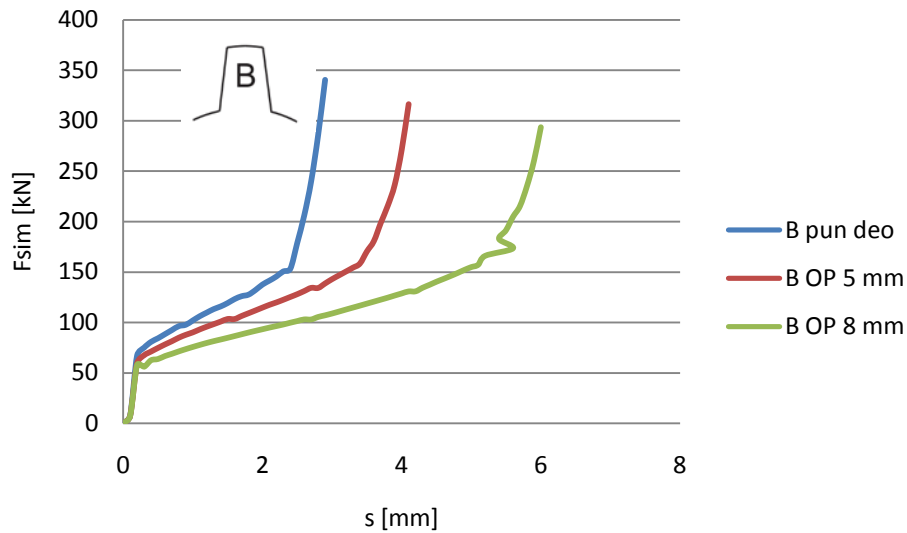
Slika 5.2 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja A, model OP



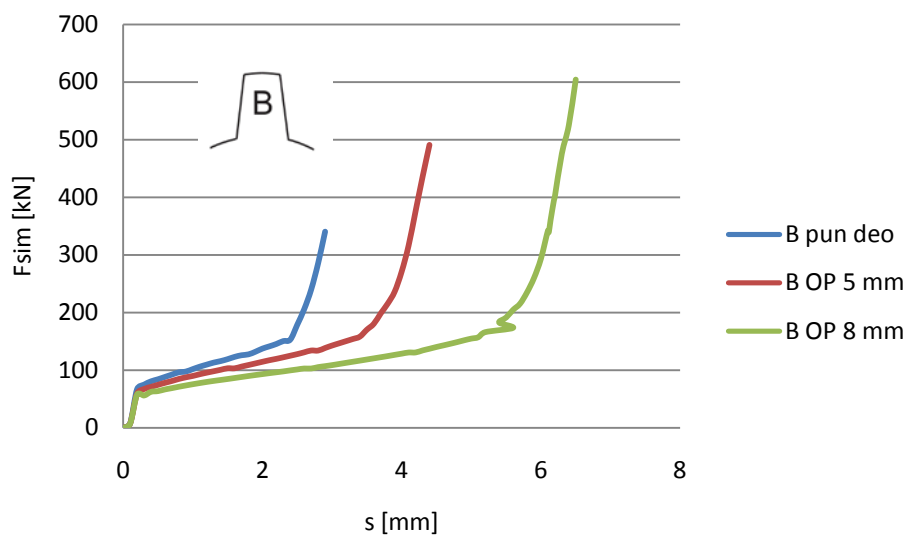
Slika 5.3 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata - ukupan proces - tip ozubljenja A, model OP

5.1.2 Tip ozubljenja B, model OP

Dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata kod istiskivanja ozubljenja tipa B za tri slučaja: konvencionalno istiskivanje i istiskivanje kada je prečnik otvora u pripremlu 5 mm i 8 mm prikazani su na slikama 5.4 i 5.5. Na slici 5.4 prikazana je promena deformacione sile za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje, dok je na slici 5.5 prikazan dijagram promene sile za ukupan proces, odnosno za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje i da se otvor popuni.



Slika 5.4 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja B, model OP

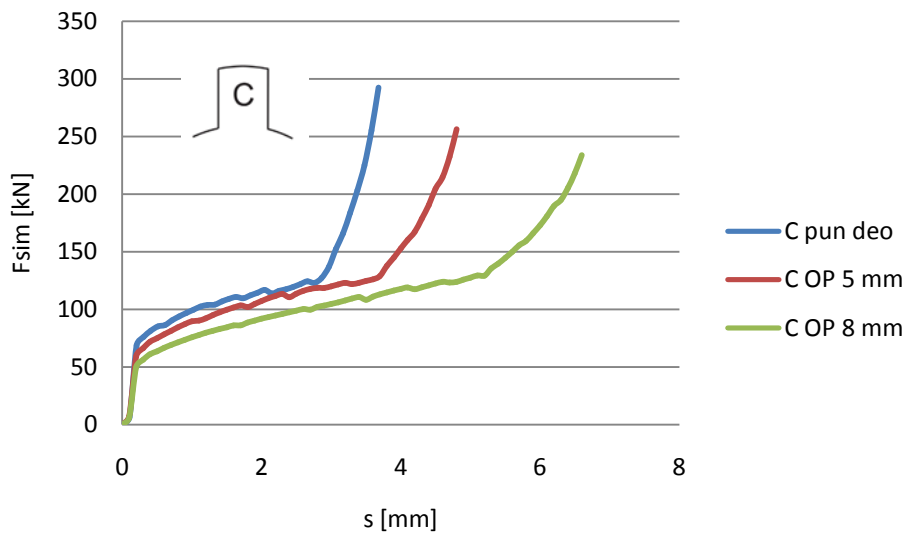


Slika 5.5 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata - ukupan proces - tip ozubljenja B, model OP

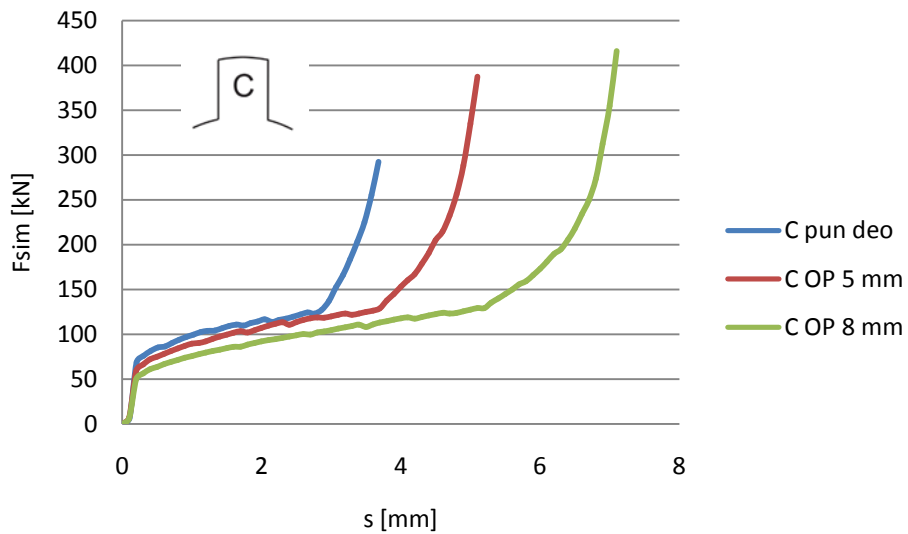
5.1.3 Tip ozubljenja C, model OP

Kao i kod ozubljenja tipa A i B, i kod ozubljenja tip C prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tri slučaja: za konvencionalno istiskivanje i za istiskivanje dela sa centralnim otvorom, kada je prečnik centralnog otvora u pripremu 5mm i 8mm. Na slici 5.6 je prikazana promena deformacione sile za sva tri slučaja za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje, dok je na slici 5.7

prikazan dijagram promene sile za ukupan proces, odnosno za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje i da se otvor popuni.



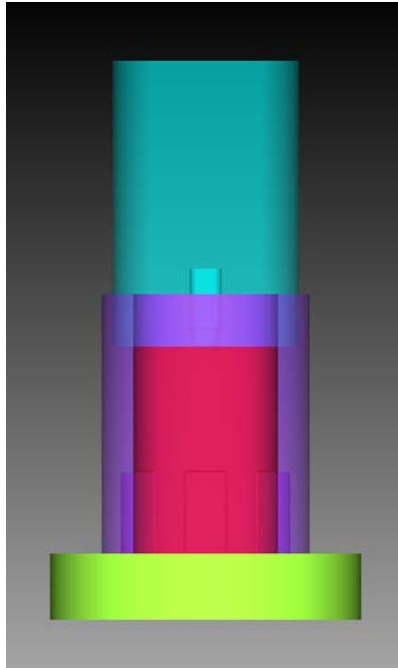
Slika 5.6 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja C, model OP



Slika 5.7 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata-ukupan proces - tip ozubljenja C, model OP

5.2 SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA OZUBLJENIH ELEMENATA - MODEL OA

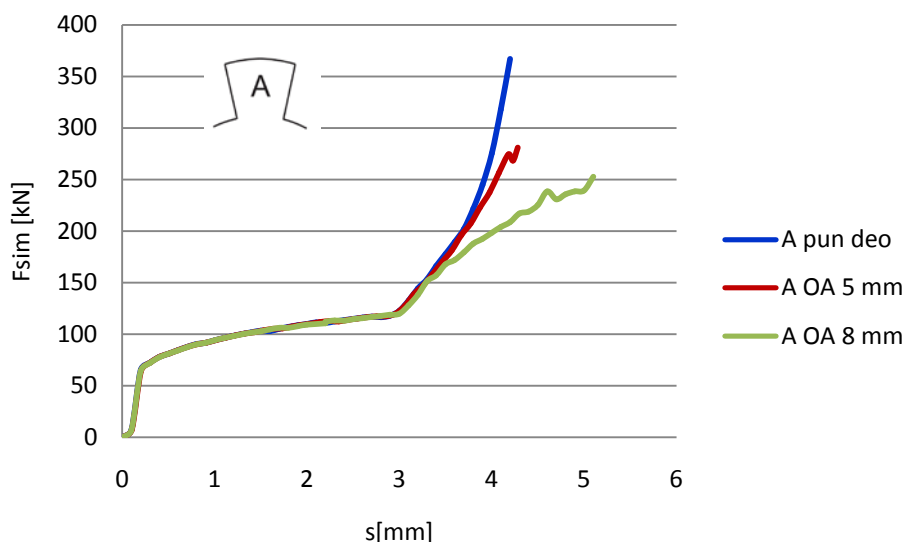
Na slici 5.8 prikazan je izgled modela u simulaciji procesa kada je otvor u alatu, odnosno u žigu.



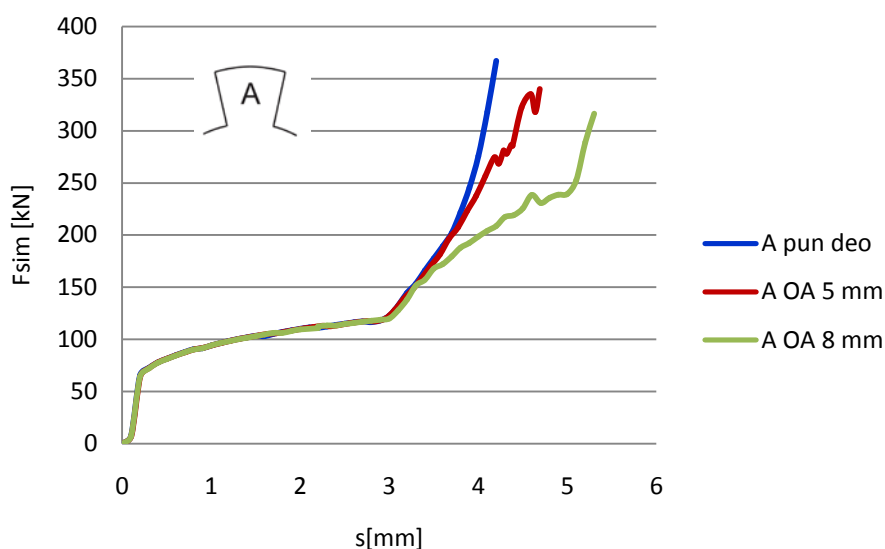
Slika 5.8- Model u simulaciji kada je otvor u žigu - model deformisanja OA

5.2.1 Tip ozubljenja A, model OA

Na slikama 5.9 i 5.10 prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata kod istiskivanja ozubljenja tipa A za tri slučaja: za konvencionalno istiskivanje i za model deformisanja OA kada je prečnik otvora u žigu 5 mm i 8 mm. Na slici 5.9 je prikazana promena deformacione sile za veličinu hoda potrebnu da se ispuni profil ozubljenja, dok je na slici 5.10 prikazan F-s dijagram za ukupan proces, odnosno za veličinu hoda potrebnu da se ispuni profil ozubljenja i da se otvor u alatu popuni, odnosno da visina dela u žigu dostigne maksimalnu visinu t_{max} (slika 3.2).



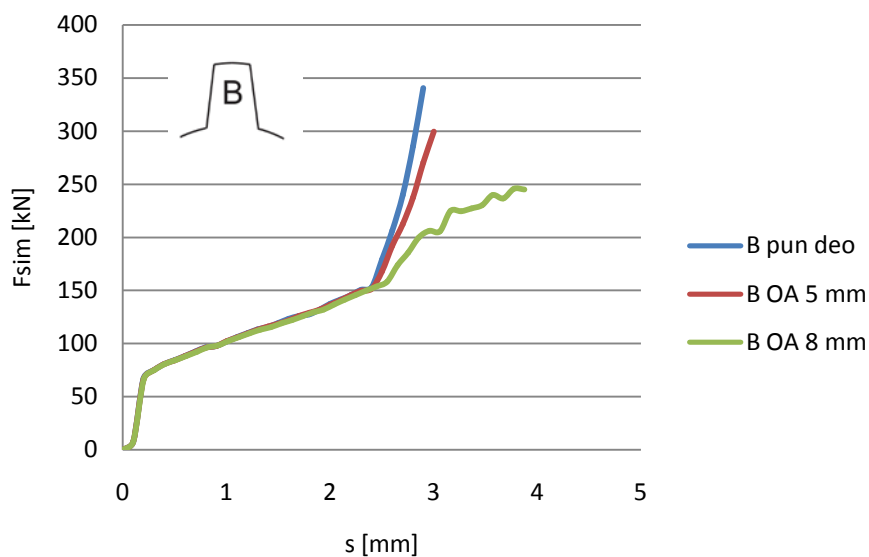
Slika 5.9 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja A, model OA



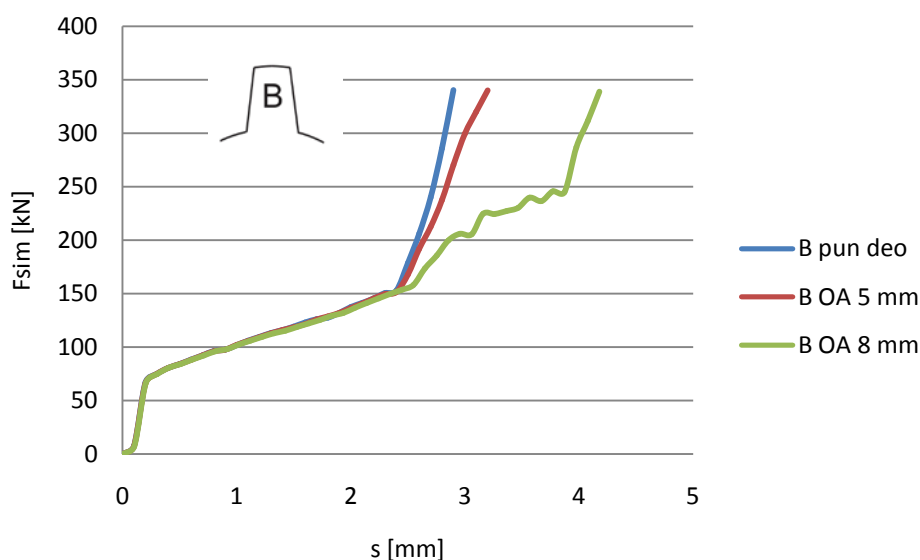
Slika 5.10 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata - ukupan proces - tip ozubljenja A, model OA

5.2.2 Tip ozubljenja B, model OA

Dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata kod istiskivanja ozubljenja tipa B za tri slučaja: za konvencionalno istiskivanje i za model deformisanja OA kada je prečnik otvora u žigu 5 mm i 8 mm prikazani su na slikama 5.11 i 5.12. Na slici 5.11 je prikazana promena deformacione sile za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje, dok je na slici 5.12 prikazan dijagram promene deformacione sile za veličinu hoda potrebnu da se formira ozubljenje i da se otvor u alatu popuni, odnosno da visina dela u žigu dostigne maksimalnu visinu t_{max} .



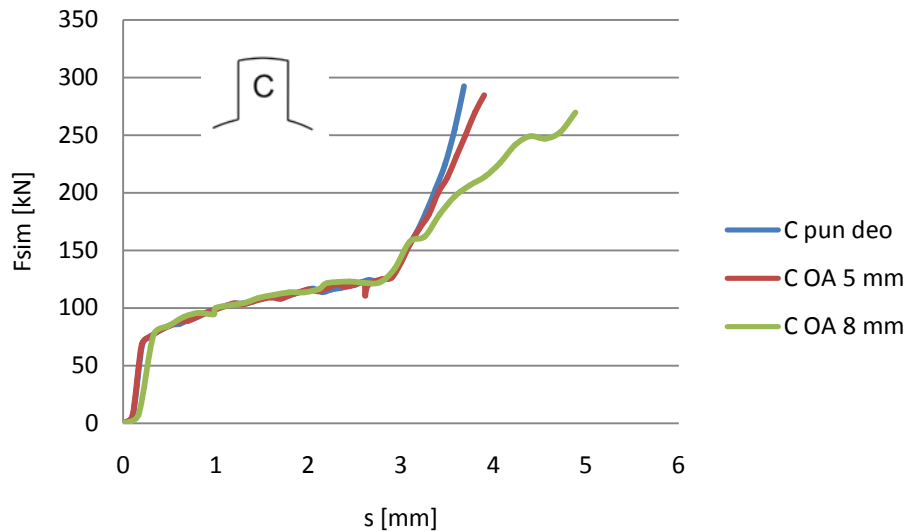
Slika 5.11 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja B, model OA



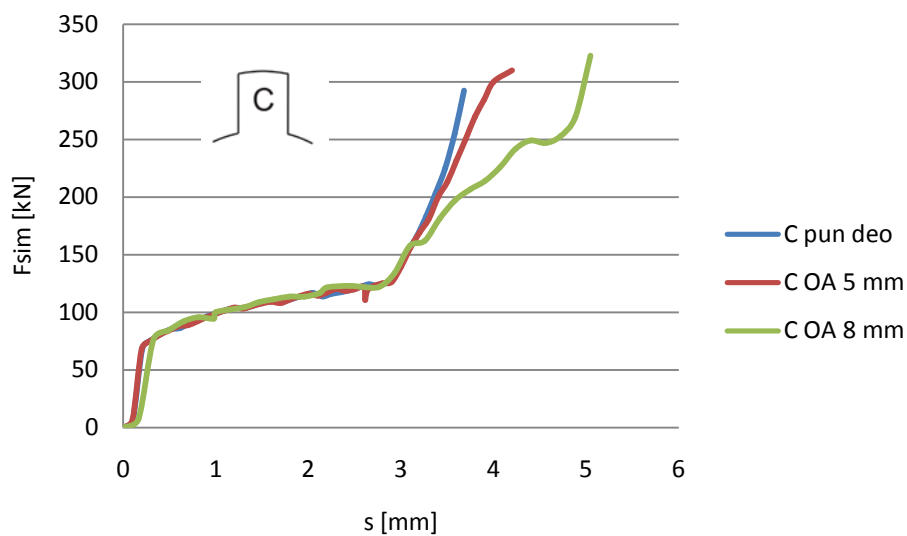
Slika 5.12 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata - ukupan proces - tip ozubljenja B, model OA

5.2.3 Tip ozubljenja C, model OA

Na slikama 5.13 i 5.14 prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata kod istiskivanja ozubljenja tipa C za tri slučaja: za konvencionalno istiskivanje i za istiskivanje dela kada je prečnik otvora u žigu 5 mm i 8 mm. Na slici 5.13 je prikazana promena deformacione sile za veličinu hoda potrebnu da se ispuni profil ozubljenja, dok je na slici 5.14 prikazan dijagram promene deformacione sile za ukupan proces, odnosno za veličinu hoda potrebnu da se ispuni profil ozubljenja i da se otvor u alatu popuni.



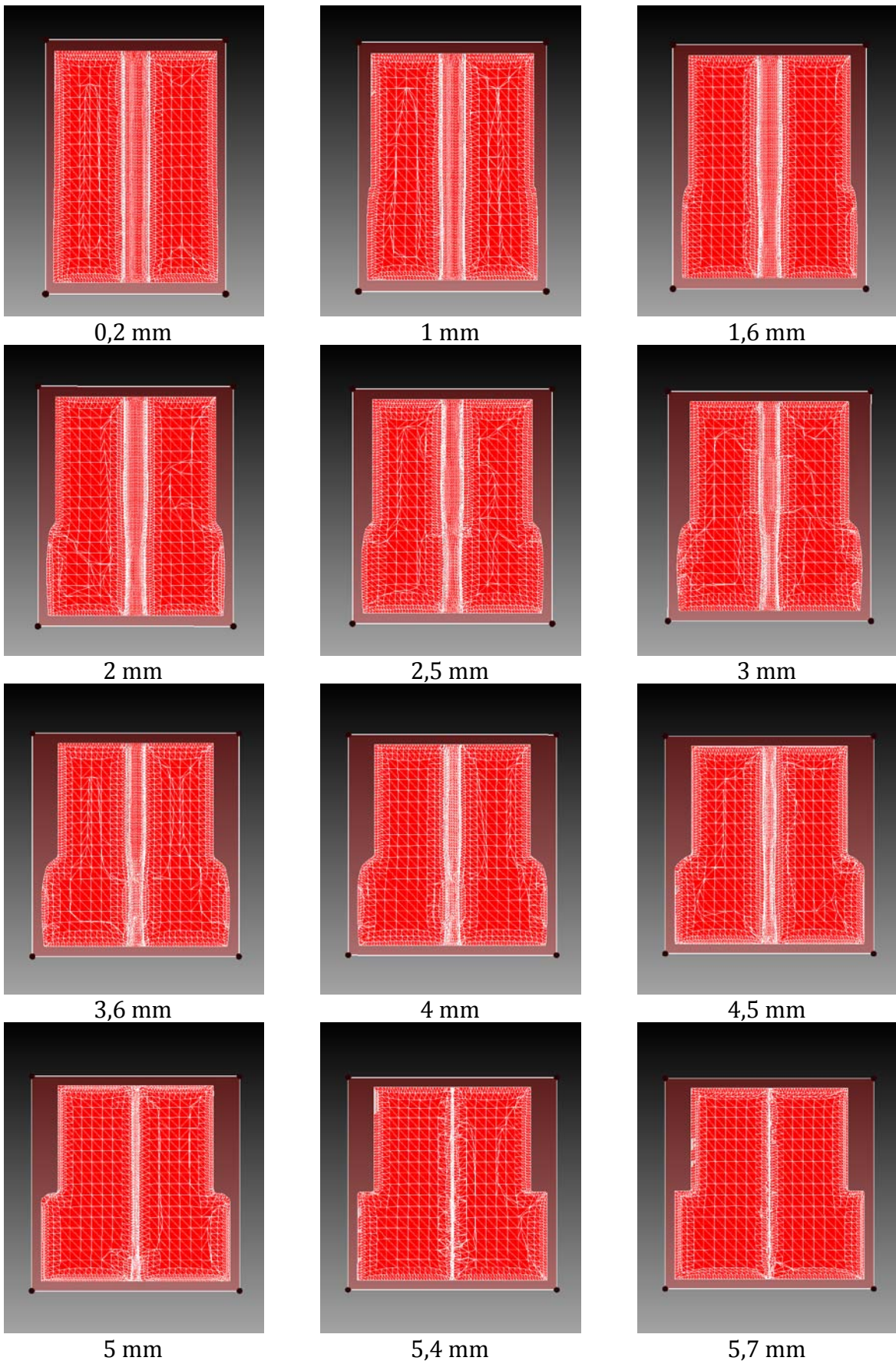
Slika 5.13 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata potrebnog da se formira ozubljenje - tip ozubljenja C, model OA



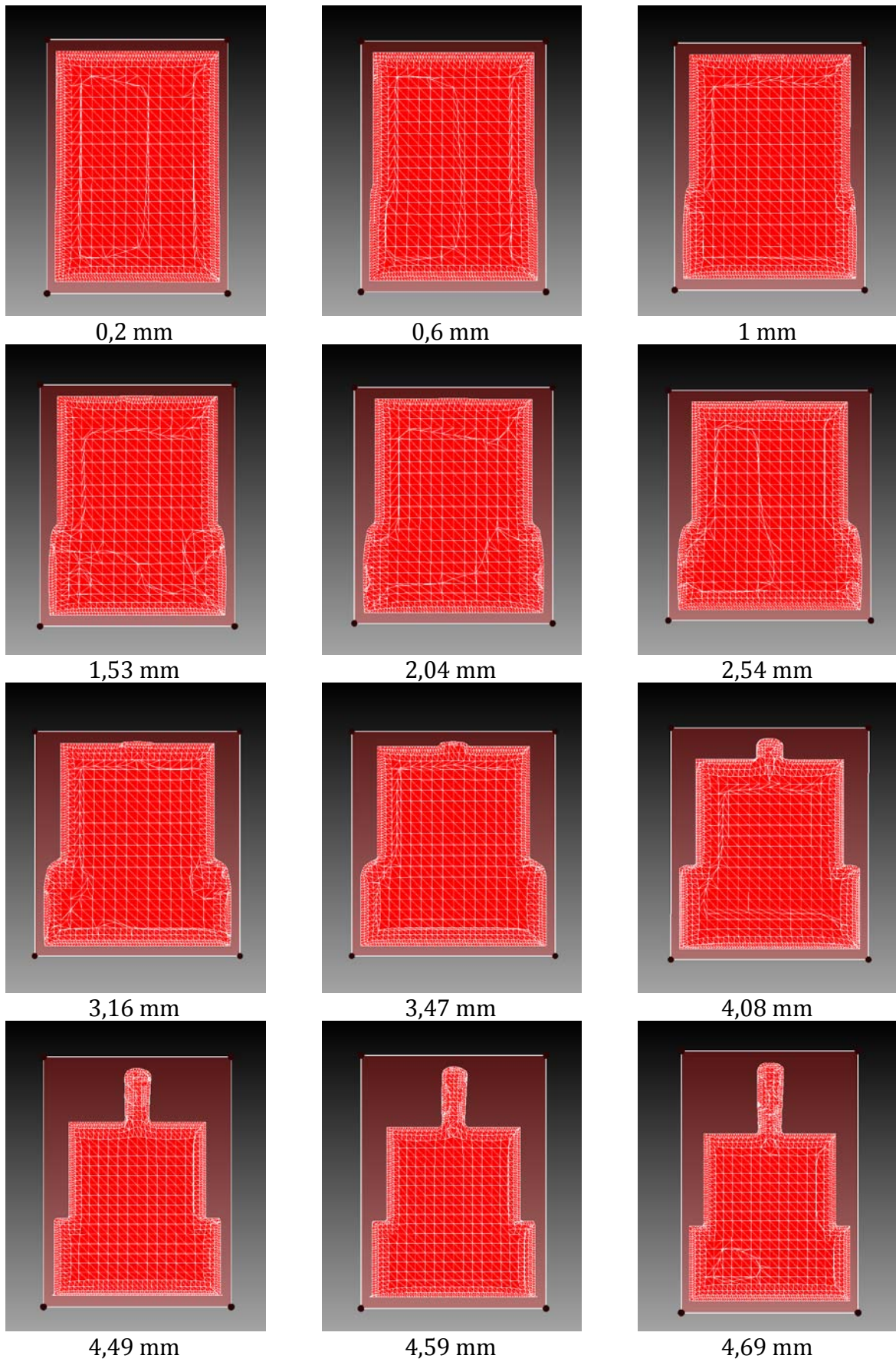
Slika 5.14 - Promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata - ukupan proces - tip ozubljenja C, model OA

5.3 TEČENJE MATERIJALA U PROCESU - REZULTATI SIMULACIJE

Osim određivanja deformacione sile numeričkom simulacijom koje je važno zbog ocene predloženog teorijskog rešenja, veoma je važna i analiza tečenja materijala koja osim ocene omogućava i dalje poboljšanje teorijskog rešenja. Na slikama 5.15 i 5.16 prikazane su promene uzdužnog preseka tipa ozubljenja A za model deformisanja OP i OA na kojima se uočavaju koji način materijal teče u toku procesa deformisanja.



*Slika 5.15 - Tečenje materijala tokom istiskivanja ozubljenja tipa A, model OP 5 mm-
rezultati simulacije*



*Slika 5.16 - Tečenje materijala tokom istiskivanja ozubljenja tipa A, model OA 5 mm-
rezultati simulacije*

6. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju prikazana je analiza rezultata dobijenih na osnovu teorijskog rešenja, eksperimenta istiskivanja i numeričke simulacije procesa istiskivanja ozubljenih elemenata koji su prikazani u prethodnim poglavljima. Na kraju poglavlja je prikazana uporedna analiza teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata za tip ozubljenja A za oba modela deformisanja.

6.1 ANALIZA TEORIJSKIH REZULTATA

U poglavlju 3 određeni su opšti izrazi za izračunavanje potrebne deformacione sile i pritiska na žig metodom gornje granice za tri tipa ozubljenja (A, B, C) i dva modela deformisanja (OP i OA). Na osnovu ovih izraza određene su konkretne vrednosti deformacionih sila i pritisaka na žig, pri čemu veličine koje figurišu u izrazima (napon tečenja, dimenzije pripremljena, dimenzije gotovog dela, koeficijent trenja, brzina kretanja alata) odgovaraju onima iz eksperimenta istiskivanja.

Računske vrednosti deformacionih sila i pritisaka prvo su upoređene sa računskom vrednosti deformacione sile i pritiska za konvencionalan proces kako bi mogao da se oceni uticaj otvora u pripremljenju ili žigu na veličinu sile određene na osnovu teorije. Kasnije su računске sile upoređene sa eksperimentalnim i silama dobijenim na osnovu simulacije procesa.

6.1.1 ANALIZA TEORIJSKIH REZULTATA - MODEL OP

Za zadate veličine za koje su određene računске vrednosti sile kod modela deformisanja OP tečenje materijala na početku procesa odvija se kao kod opšteg slučaja deformisanja (slika 3.3 za model OP) opisanog u poglavlju 3.2.1 za tip ozubljenja A, u poglavlju 3.2.2 za tip ozubljenja B i u poglavlju 3.2.3 za tip ozubljenja C. U opštem slučaju

deformisanja poluprečnik neutralne površine r_n se nalazi između poluprečnika unutrašnjeg otvora r_i i poluprečnika pripremla r_0 . Kada se deformisanje odvija na ovaj način materijal istovremeno formira zube i popunjava centralni otvor u obratku, odnosno postoji podeljeno tečenje materijala. U jednom trenutku procesa zubi su potpuno formirani, a centralni otvor još nije popunjen materijalom, pa se proračun potrebne deformacione sile nastavlja na način opisan u poglavlju 3.2.1.2.2 za graničan slučaj kada je $r_1 = r_{1max}$.

Sa slika 3.53, 3.56 i 3.59 na kojima je prikazana promena deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za model deformisanja OP za tipove ozubljenja A, B i C može se zaključiti da ukupan proces istiskivanja ima tri faze. U početnoj fazi, za relativno malu vrednost hoda dolazi do porasta sile. U drugoj fazi, u zoni formiranja ozubljenja materijal još nije postigao bočni kontakt sa alatom zbog čega je porast sile mali. Druga faza se završava kada je ozubljenje formirano, a centralni otvor još nije popunjen, tako da u trećoj fazi materijal samo popunjava centralni otvor u obratku, što rezultira velikim porastom sile.

Kako bi se ocenio uticaj otvora u pripremlu na proces istiskivanja, analizirane su vrednosti sile u prve dve faze procesa, odnosno za deo procesa u kome dolazi do formiranja zuba, što je prikazano na dijagramima na slikama 3.52, 3.55 i 3.58. Bez obzira na oblik zuba, sa porastom prečnika otvora u pripremlu deformaciona sila potrebna da se formira ozubljenje (sila u prvoj i drugoj fazi procesa) opada kako se povećava početni prečnik otvora, što opravdava primenu otvora u pripremlu u cilju smanjenja potrebne deformacione sile. Razlika u hodu postoji kod pripremla sa različitom veličinom početnog otvora, jer sa povećanjem veličine otvora u pripremlu, raste i hod potreban da bi se formirali zubi.

Za razliku od prve dve faze procesa kada deformaciona sila opada sa povećanjem otvora u pripremlu, u trećoj fazi veći preostali otvor u centru obratka iziskivaće i veću deformacionu silu potrebnu za njegovo ispunjavanje (slike 3.53, 3.56, 3.59).

Na dijagramima je radi komparacije prikazana i promena sile kod konvencionalnog istiskivanja i u odnosu na vrednost ove sile, sila u procesu u kome pripremla ima otvor uvek je manja.

Kada je u pitanju pritisak na žig, primena otvora u pripremlu dovodi do njegovog smanjenja u poređenju sa konvencionalnim procesom. Može se uočiti da se vrednost pritiska ne menja kada se povećava vrednost otvora u pripremlu (dijagrami prikazani na slikama 3.54, 3.57, 3.60). Objašenje ovog rezultata leži u činjenici da se kod određivanja pritiska radi o odnosu sile i površine na koju žig deluje. Kada postoji otvor u pripremlu potrebna deformaciona sila za istiskivanje je manja, ali i površina na koju žig deluje se smanjuje zbog postojanja otvora tako da odnos sile i površine ostaje približno isti. Razlika postoji samo u veličini potrebnog hoda žiga, koji se povećava sa povećanjem otvora u pripremlu.

6.1.2 ANALIZA TEORIJSKIH REZULTATA - MODEL OA

Za zadate veličine za koje su određene računске vrednosti sile kod modela deformisanja OA tečenje materijala na početku procesa odvija se kao kod graničnog slučaja deformisanja kada je $r_n = r_i$ (slika 3.4 za model OA) opisanog u poglavlju 3.3.1.2.1 za tip ozubljenja A, dok se za tipove ozubljenja B i C primenjuje ista analiza, osim u delu zapremine koji ispunjava profil zuba, a koja je opisana za model deformisanja OP. U ovom slučaju deformisanja postoji samo tzv. centrifugalno tečenje materijala, odnosno materijal teče samo u smeru od površine definisane neutralnim radijusom r_n prema ozubljenju. Prema teorijskom rešenju centralni deo obratka poluprečnika r_i se ne deformiše, ali zbog spuštanja alata, ipak se formira deo u žigu visine t . Kada se prema proračunu odredi da je $r_1 = r_{1max}$, odnosno da su zubi potpuno formirani, a otvor u žigu još nije popunjen materijalom, proračun potrebne deformacione sile nastavlja se na način opisan u poglavlju 3.3.1.2.2 za graničan slučaj kada je $r_1 = r_{1max}$ za model deformisanja OA.

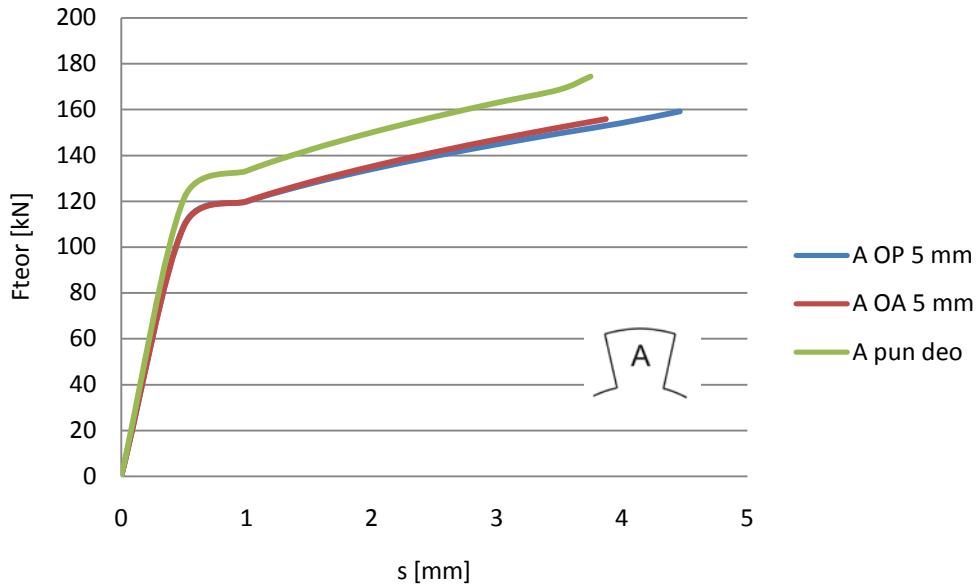
Kod modela deformisanja OA, iako materijal u toku procesa teče na drugačiji način nego kod modela deformisanja OP, dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata (slika 3.62 za tip ozubljenja A, slika 3.65 za tip ozubljenja B i slika 3.68 za tip ozubljenja C) ima sličan karakter, odnosno javljaju se iste karakteristične faze deformisanja. Određena razlika postoji u poslednjoj fazi procesa zbog različite geometrije delova i različitog modela deformisanja. Kao i kod modela deformisanja OP i kod modela deformisanja OA u prvoj i drugoj fazi procesa primena otvora dovodi do smanjenja potrebne deformacione sile za formiranje ozubljenja. Kada se formira ozubljenje, a otvor u žigu još nije popunjen (treća faza procesa), sila potrebna da se otvor popuni biće sve manja sa porastom veličine otvora.

Kada je u pitanju promena pritiska (dijagrami na slikama 3.63, 3.66 i 3.69) rezultati su isti kao kada je u pitanju model deformisanja OP. Kada postoji otvor u žigu pritisak u procesu je manji u odnosu na konvencionalan proces, ali dalje povećanje otvora u žigu ne utiče na smanjenje pritiska, zato što odnos sile i površine ostaje konstantan.

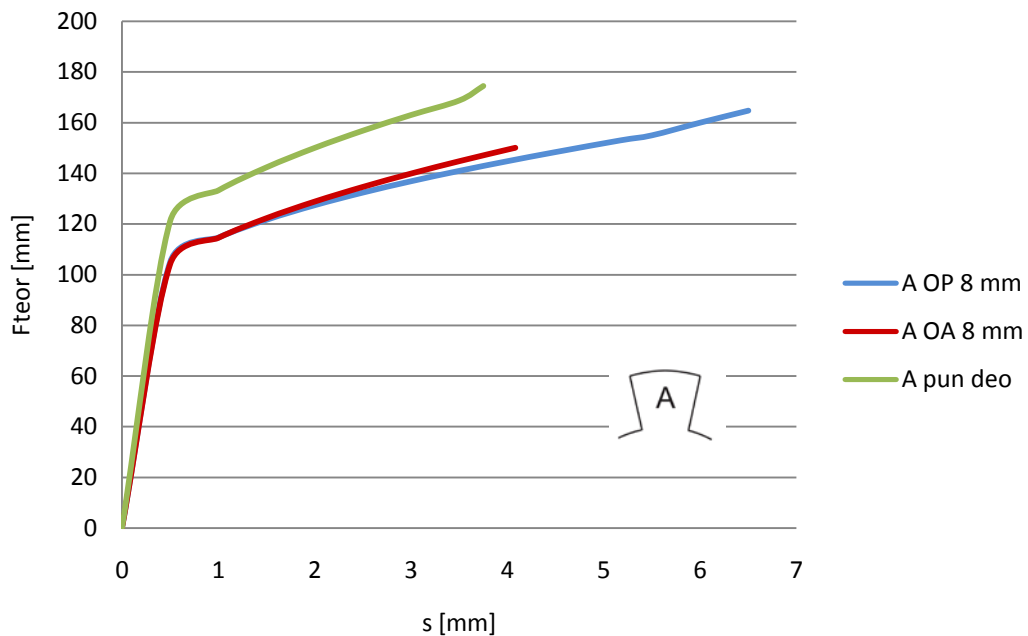
6.1.3. UPOREDNA ANALIZA TEORIJSKIH MODELA DEFORMISANJA OP I OA

Na svim dijagramima sila-hod prikazanim u poglavlju 3 za oba modela deformisanja za prve dve faze procesa postoji isti trend promene deformacione sile - sa porastom veličine otvora u obratku ili žigu smanjuje se potrebna deformaciona sila za formiranje ozubljenja. Zbog povećanja veličine otvora u pripremkama ili u žigu potreban je veći hod alata kako bi se formiralo ozubljenje, ali je potrebna deformaciona sila manja. U nastavku je prikazana uporedna analiza modela deformisanja OP i OA samo za tip ozubljenja A, jer kao što se može videti sa dijagrama sila-hod prikazanih u poglavlju 3, karakter promene sile je isti za sva tri tipa ozubljenja. Neznatna razlika se javlja u ostvarenom hodu i veličini sile što je posledica različitog oblika i zapremine zuba.

Na slici 6.1 prikazan je uporedni dijagram za tip ozubljenja A za veličinu otvora u pripreмку/žigu 5mm, a na slici 6.2 prikazan je uporedni dijagram za tip ozubljenja A za veličinu otvora u pripreмку/žigu 8mm. Dijagrami na slikama 6.1 i 6.2 odnose se na prve dve faze procesa, odnosno na deo procesa u kome se, prema teorijskom rešenju, formira ozubljenje.



Slika 6.1 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, modeli OP i OA, otvor 5mm, sila potrebna da se formira ozubljenje



Slika 6.2 - Dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, tip ozubljenja A, modeli OP i OA, otvor 8 mm, sila potrebna da se formira ozubljenje

Na dijagramima se može uočiti da je prema teorijskom rešenju vrednost deformacione sile za prvu i drugu fazu procesa nešto viša za model deformisanja OP. Razlika postoji i u veličini hoda koji je veći kod modela deformisanja OP, što je posledica različite veličine otvora koji se popunjava materijalom tokom procesa istiskivanja.

U tabeli 6.1 prikazano je za koliki procenat je umanjena sila potrebna da se formira ozubljenje na osnovu teorijskog rešenja za oba modela deformisanja u odnosu na silu potrebnu za istiskivanje dela u konvencionalnom postupku za tipove ozubljenja A, B i C, odnosno upoređene su sile na kraju druge faze procesa deformisanja.

Tabela 6.1- Procenat umanjnja potrebne deformacione sile u odnosu na konvencionalno istiskivanje za tip ozubljenja A

model deformisanja veličina otvora	OP	OA
5 mm	7,75 %	9,09 %
8 mm	10,77 %	12,50 %

Kao što se može videti na osnovu vrednosti u tabelama, prema teorijskom rešenju dolazi do većeg smanjenja sile kada je u pitanju primena modela deformisanja OA.

6.2 ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

U poglavlju 4 prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A za oba modela deformisanja dobijeni na osnovu merenja sile i hoda u eksperimentu istiskivanja. Kako bi uticaj primene otvora u obratku i žigu mogao da se oceni izveden je i eksperiment konvencionalnog istiskivanja.

Kao što je u poglavlju 4 napomenuto osnovni problem u toku eksperimenta je predstavljalo dodatno isticanje materijala kroz zazore koji postoje između matrice i izmenjivog uloška i izmenjivog uloška i donje ploče za oba modela deformisanja, kao i isticanje materijala između dodatka za žig i matrice kod modela deformisanja OA. Ovo isticanje materijala uticalo je da veličina realno ostvarenog hoda alata i deformacione sile budu veći nego što su teorijski određen hod i sila.

Na slici 4.14 prikazan je dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za tip ozubljenja A, model deformisanja OP za veličinu otvora u pripremu 5mm i 8 mm, kao i za konvencionalan proces istiskivanja. Kao što se vidi sa dijagrama eksperimentalne vrednosti sile potvrdile su da primena otvora u pripremu utiče na smanjenje potrebne deformacione sile. Zbog dodatnog isticanja materijala, nije mogao da se odredi trenutak kada su zubi formirani i da se za taj trenutak registruju i dimenzije dela (u prvom redu veličina centralnog otvora).

Kod modela deformisanja OA rezultati su nešto drugačiji. Sa dijagrama na slikama 4.18 i 4.19 vidi se da je u procesu kada je postojao otvor u žigu, deformaciona sila za prve dve faze procesa približno jednaka sili potrebnoj u konvencionalnom istiskivanju,

da bi u trećoj fazi procesa počela da opada i na kraju procesa bila manja od sile potrebne kod konvencionalnog istiskivanja.

Iako su potrebne izvesne korekcije i poboljšanja eksperimenta u cilju dobijanja još tačnijih podataka vezano za veličinu deformacione sile i tečenja materijala, eksperimentalni rezultati su potvrdili da primena otvora u pripremu (model deformisanja OP) dovodi do smanjenja potrebne deformacione sile tokom celog procesa istiskivanja tipa ozubljenja A, dok kod modela deformisanja OA sila opada samo u poslednjoj fazi istiskivanja.

6.3 ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA

Dijagrami promene deformacione sile određeni na osnovu numeričke simulacije (slike 5.3, 5.5 i 5.7 za model deformisanja OP i slike 5.10, 5.12 i 5.14 za model deformisanja OA) takođe pokazuju postojanje tri faze procesa, kao što je slučaj sa F-s dijagramima određenim na osnovu teorijskog rešenja i eksperimenta istiskivanja. Međutim, tečenje materijala u simulaciji procesa odvija se na drugačiji način, tako da će se i vrednosti sile koje odgovaraju pojedinim fazama procesa razlikovati u odnosu na teorijsko rešenje što je objašnjeno u narednom poglavlju, u uporednoj analizi teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata (poglavlje 6.4).

Na slikama 5.2, 5.4 i 5.6 prikazani su dijagrami promene deformacione sile za veličinu hoda alata potrebnu da se formiraju zubi, dok su na slikama 5.3, 5.5 i 5.7 dijagrami koji pokazuju promenu deformacione sile potrebne da se formiraju zubi i da se popuni otvor u obratku za model deformisanja OP. Kod simulacije procesa istiskivanja skoro do samog kraja istovremeno se popunjava otvor u sredini obratka i matrica u delovima u kojima se formiraju zubi (slika 5.15). U trenutku kada su zubi formirani prečnik preostalog centralnog otvora je relativno mali (ispod 1 mm) u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima. Međutim i ako je prema numeričkoj simulaciji za model deformisanja OP tečenje materijala na kraju procesa određeno na drugačiji način i ovi rezultati pokazuju, kada se posmatra vrednost sile u trenutku kada su formirani zubi, da je potrebna deformaciona sila za istiskivanje dela manja kada je otvor u pripremu na početku procesa veći (dijagrami na slikama 5.2, 5.4 i 5.6).

Na slici 5.15 prikazano je na koji način teče materijal i popunjava matricu za model deformisanja OP kada je otvor u pripremu 5 mm. Ono što je ovde važno napomenuti je da materijal kada ispunjava matricu u delu gde se formiraju zubi prvo dođe u kontakt sa matricom na sredini zuba (slika koja odgovara hodu 3,6 mm). Što se tiče dijagrama promene sile to je trenutak kada se druga faza na dijagramu završava i kada počinje znatno veći porast sile. Razlog porasta sile je dalje popunjavanje materijalom relativno malih preostalih zapremina u matrici. Ozubljenje se prvo intenzivnije formira u donjoj polovini (u ovom slučaju za vrednost hoda 4,5 mm formirana je donja polovina ozubljenja). Kada je formirana donja polovina zuba počinje završno popunjavanje i gornje polovine.

Kod modela deformisanja OA na slikama 5.9, 5.11 i 5.13 prikazani su F-s dijagrami za veličinu hoda potrebnog da se formira ozubljenje, dok su na slikama 5.10,

5.12 i 5.14 dijagrami promene sile potrebne da se formira ozubljenje i da se popuni otvor u žigu visine t_{max} . Prema rezultatima simulacije kod ovog modela deformisanja ne postoji značajna razlika u veličini deformacione sile za prve dve faze procesa bez obzira na veličinu otvora u žigu. Ova pojava se može objasniti analizom tečenja materijala za ovaj model deformisanja prikazanom na slici 5.16. Kao što se vidi sa slike, tečenje materijala u otvor u žigu počinje tek kada je ostvaren hod žiga od 3,16 mm. To je trenutak kada materijal u zoni formiranja ozubljenja ostvari bočni kontakt sa matricom i kada se, isto kao kod modela deformisanja OP, formira donja polovina ozubljenja. Takođe to je završetak druge faze na dijagramu i početak intenzivnijeg rasta sile. Kada je formirana donja polovina zuba, materijal formira i gornju polovinu, pri čemu ističe i u otvor u žigu.

6.4 UPOREDNA ANALIZA TEORIJSKIH, EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA ZA TIP OZUBLJENJA A

Kao što se vidi iz prethodne analize teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata, krive promene deformacione sile kod oba modela deformisanja imaju isti karakter. Red veličine potrebne sile za pojednačne procese je isti, međutim odstupanje postoji u vrednosti hoda alata koji je potreban da bi se formiralo ozubljenje.

Kako je eksperimentalno istiskivanje izvedeno samo za tip ozubljenja A, za ovaj tip ozubljenja je urađena i uporedna analiza teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

6.4.1 UPOREDNA ANALIZA REZULTATA - TIP OZUBLJENJA A, MODEL OP

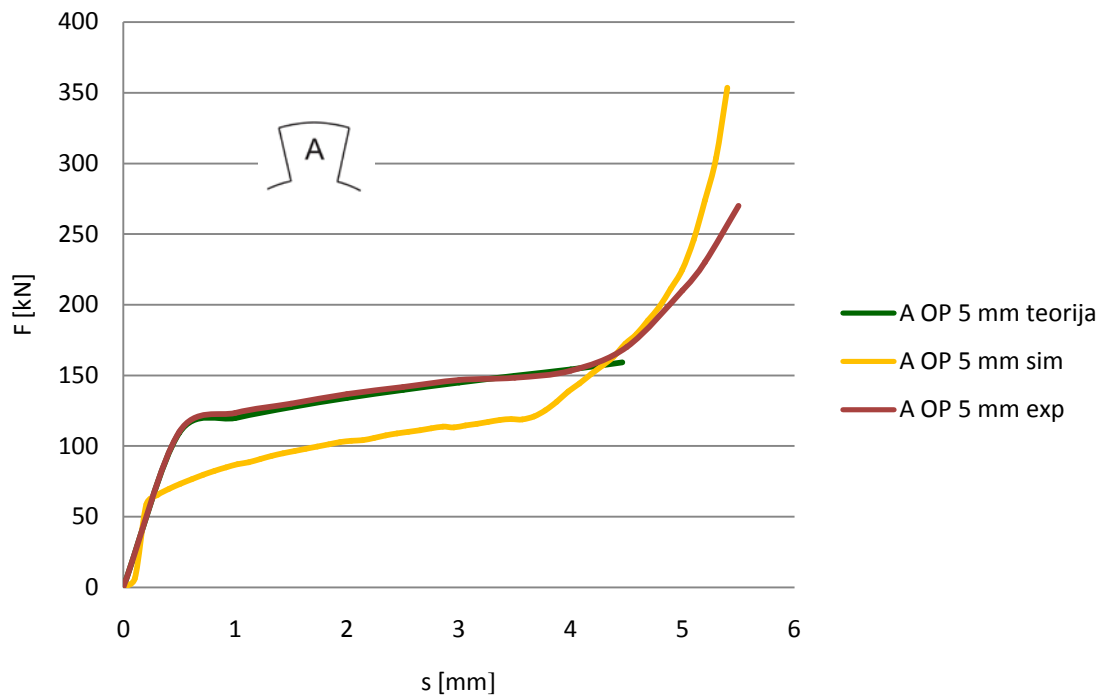
S obzirom da rezultati eksperimenta najbolje opisuju realan proces oni su osnova za ocenu teorijskog rešenja i rezultata simulacije. Zbog nemogućnosti određivanja tačnih hodova u eksperimentu, tri faze koje postoje u procesu predstavljaju orijentacione granice za poređenje rezultata.

Na dijagramima prikazanim na slikama 6.3 i 6.4 prikazane su krive promene deformacione sile (teorijske, eksperimentalne i numeričke) za tip ozubljenja A, model deformisanja OP, kada je otvor u pripremku 5 mm. Na slici 6.3 prikazane su krive za veličinu hoda potrebnog da se formira ozubljenje, dok su na slici 6.4 krive za ukupnu vrednost hoda potrebnog da se formira ozubljenje i popuni otvor u centru priprema.

Na slici 6.3 se uočava da su ukupan hod potreban da se formira ozubljenje prema teorijskom rešenju kao i deformaciona sila na kraju ove faze procesa, manji nego kod eksperimenta i simulacije. Objašnjenje za takve vrednosti sile i hoda leži u tome da je kod teorijskog rešenja pretpostavljeno da se ozubljenje formira ravnomerno po celoj visini, što ne odgovara realnom procesu u kome materijal u zoni ozubljenja prvo dolazi u bočni kontak sa matricom na polovini visine zuba. Nakon toga se formira donja polovina ozubljenja i na kraju gornja polovina. Formiranje ozubljenja na osnovu rezultata simulacije prikazano na slici 5.15 objašnjava promenu sile dobijene na osnovu simulacije procesa. Kao što je već napomenuto u analizi numeričkih rezultata, kraj druge faze na F-s

dijagramu vezan je za trenutak kada je formirana donja polovina zuba, što je različito u odnosu na teorijsko rešenje, gde je kraj druge faze na dijagramu vezan za kompletno formiranje zuba. Zbog toga kriva na slici 6.3 koja odgovara simulaciji ima deo i treće faze, kada dolazi do porasta sile.

Kod teorijskog rešenja jasno su razgraničene druga i treća faza procesa (slika 6.4). U drugoj fazi se formiraju zubi, dok se u trećoj fazi popunjava centralni otvor, što se može uočiti i na F-s dijagramu. Kod simulacije proces se odvija na drugi način, kraj druge faze na dijagramu ne odgovara potpunom formiranju zuba, nego se formiranje zuba nastavlja i u trećoj fazi na dijagramu.

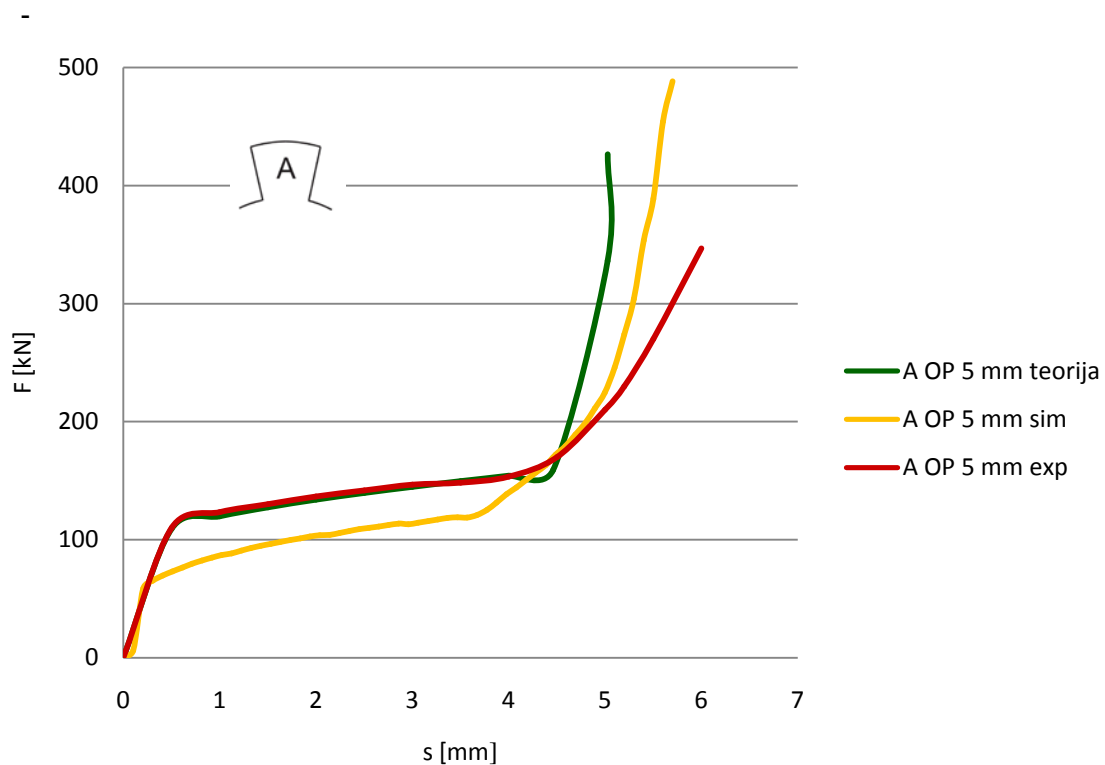


Slika 6.3 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile potrebne da se formira ozubljenje za tip ozubljenja A, model OP 5mm

Kada se posmatra dijagram na slici 6.4 koji odgovara ukupnom procesu istiskivanja može se zaključiti sledeće:

- F-s krive dobijene na osnovu teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata imaju sličan trend, odnosno na svim krivim se mogu uočiti tri faze procesa.
- U prve dve faze procesa eksperimentalni i teorijski rezultati pokazuju bolje slaganje, dok u završnoj fazi bolje slaganje imaju eksperimentalni i rezultati simulacije.
- Ukupan potreban hod kod teorijskog rešenja je najmanji jer se kod teorijskog rešenja ne uzimaju u obzir elastične deformacije, dok je eksperimentalnih od alata dodatno povećan usled zazora između elemenata alata i obratka.
- Zbog same prirode teorijskog rešenja bilo je očekivano da vrednosti sile dobijene na osnovu teorijskog rešenja imaju najveću vrednost. Razlog zašto odnos između sila nije takav leži u tome što su eksperimentalne sile u određenoj meri povećane

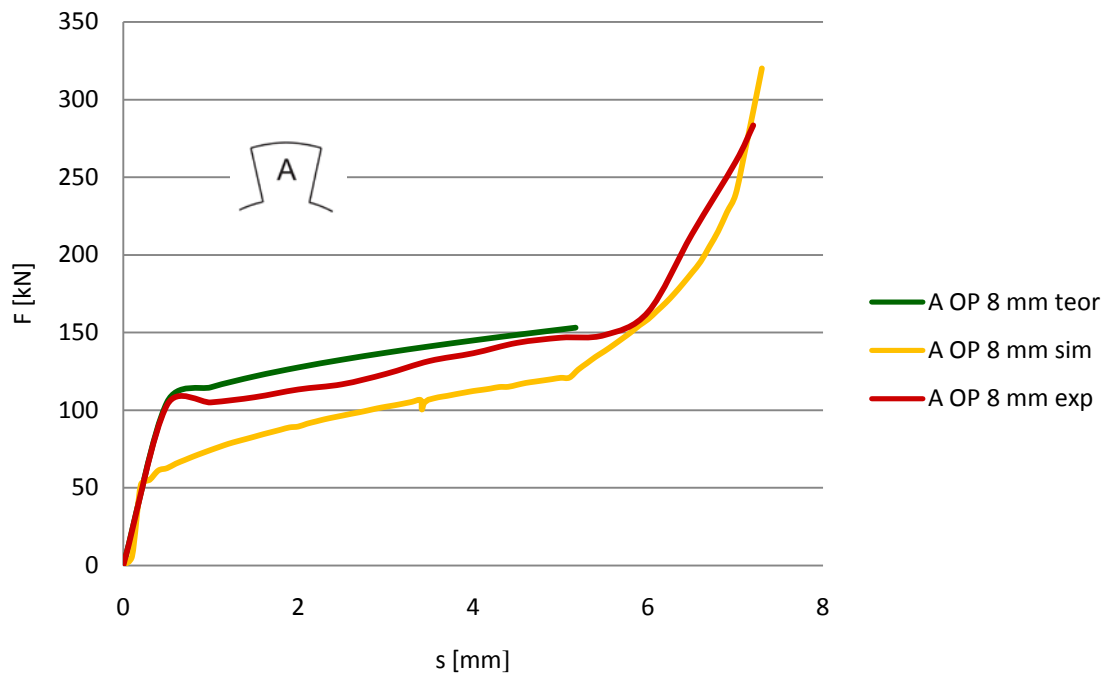
zbog dodatnog isticanja materijala, odnosno zbog savladavanja dodatnih otpora koji nisu predviđeni u zadanom procesu, tako da teorijska sila u prve dve faze procesa ima približnu vrednost kao i eksperimentalna sila.



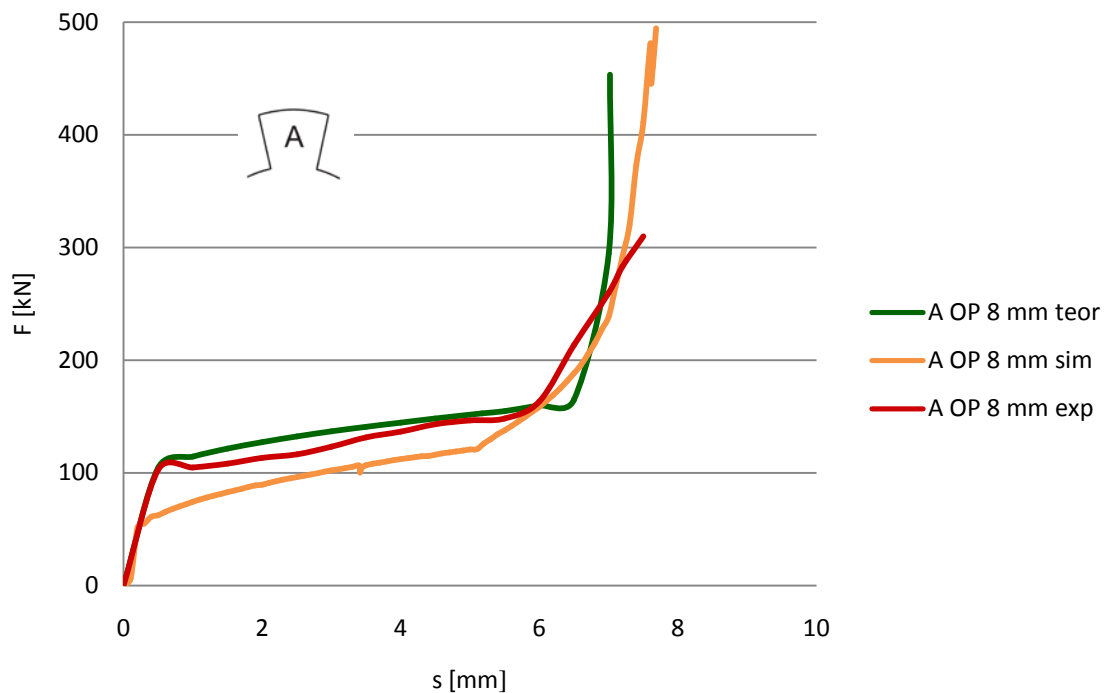
Slika 6.4 -Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model OP 5mm - ukupan proces

Na slici 4.13 na kojoj su prikazani uzorci iz eksperimenta istiskivanja tipa ozubljenja A, model deformisanja OP, može se uočiti da u centru obratka postoji otvor kada su formirani zubi. Takav način tečenja materijala predviđen je i teorijskim rešenjem. Određeno odstupanje javlja se kod rezultata numeričke simulacije, gde se istovremeno popunjavaju zubi i centralni otvor skoro do samog kraja procesa, a u trenutku kada su zubi u potpunosti formirani ostaje relativno mali centralni otvor (ispod 1 mm).

Na slikama 6.5 i 6.6 prikazani su dijagrami promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za model OP kada je otvor u pripremlu 8 mm. Krive pokazuju sličnu tendenciju kao i krive kada je otvor u pripremlu 5mm.



Slika 6.5 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile potrebne da se formira ozubljenje za tip ozubljenja A, model OP 8 mm

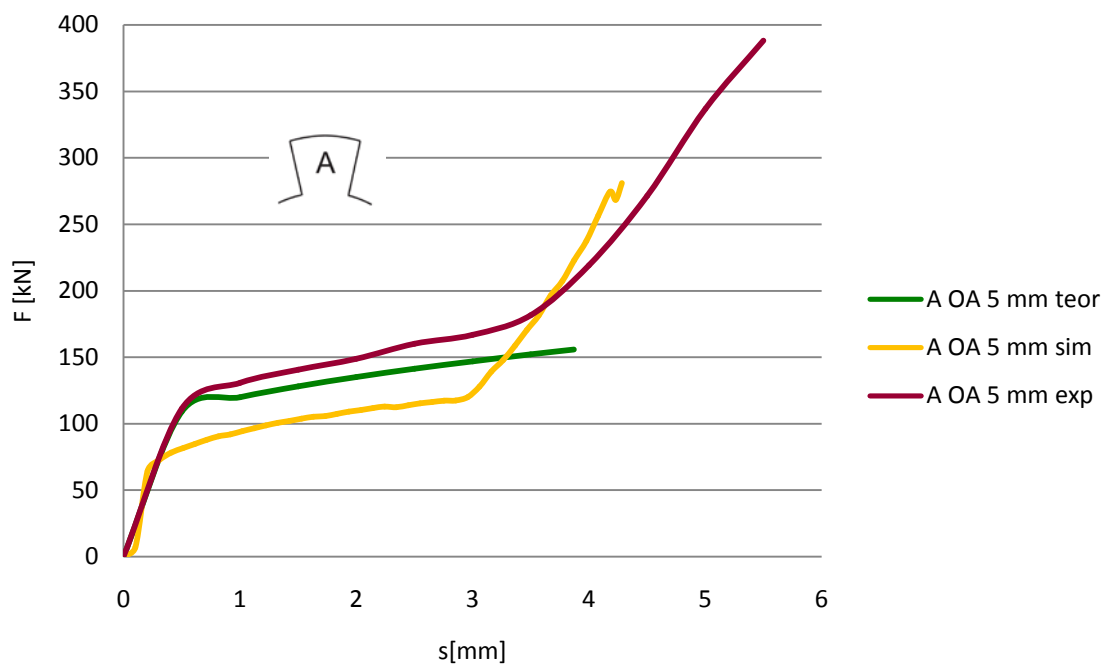


Slika 6.6 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model OP 8 mm - ukupan proces

6.4.2 UPOREDNA ANALIZA REZULTATA - TIP OZUBLJENJA A, MODEL OA

Kada postoji otvor u žigu krive promene deformacione sile u zavisnosti od hoda imaju isti karakter kao i kada je otvor u pripremlju. Na dijagramima prikazanim na slikama 6.7 i 6.8 prikazane su krive promene deformacione sile (teorijske, eksperimentalne i numeričke) za tip ozubljenja A, model deformisanja OA, kada je otvor u žigu 5 mm, pri čemu su na slici 6.7 prikazane krive za veličinu hoda potrebnog da se formira ozubljenje, dok su na slici 6.8 krive za ukupnu vrednost hoda potrebnog da se formiraju zubi i popuni otvor u žigu. Na slikama 6.9 i 6.10 su dijagrami za model deformisanja OA kada je otvor u žigu 8 mm.

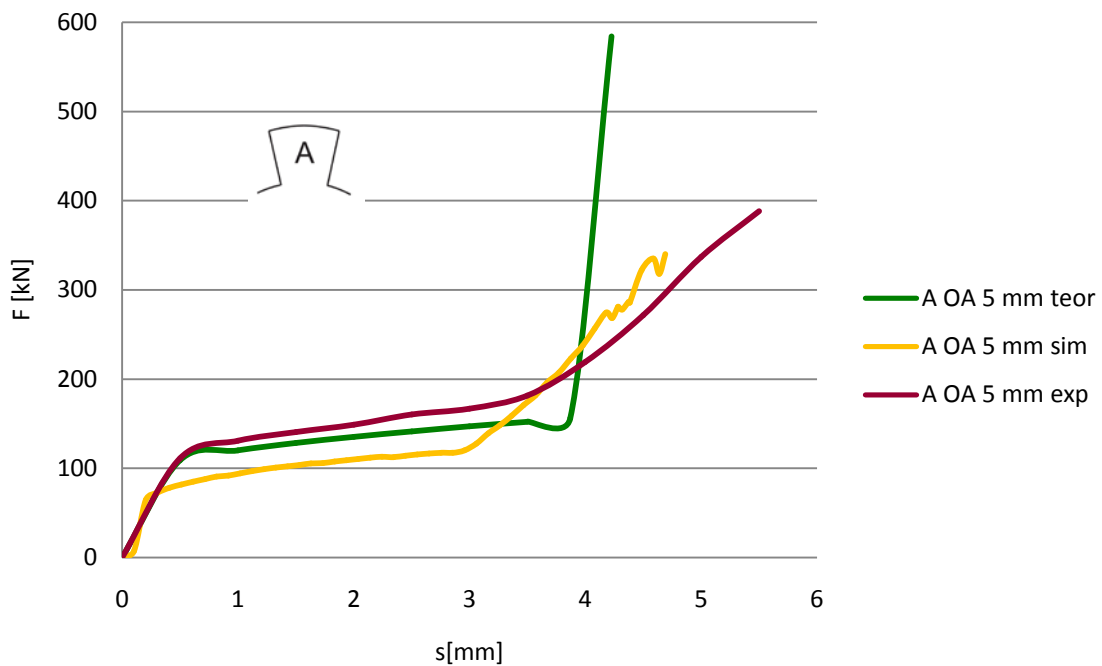
Karakter krivih za prve dve faze procesa (slika 6.7 za OA 5mm i 6.9 za OA 8 mm), dok se ne formira ozubljenje, je isti kao kod modela deformisanja OP. Sve što je navedeno vezano za analizu dijagrama kod modela deformisanja OP važi i za dijagrame kod modela deformisanja OA. Razlika između ova dva modela deformisanja postoji u veličini teorijske sile u trećoj fazi, zbog različitog načina opisivanja tečenja materijala u teorijskom rešenju (u toj fazi materijal ističe u otvor u žigu).



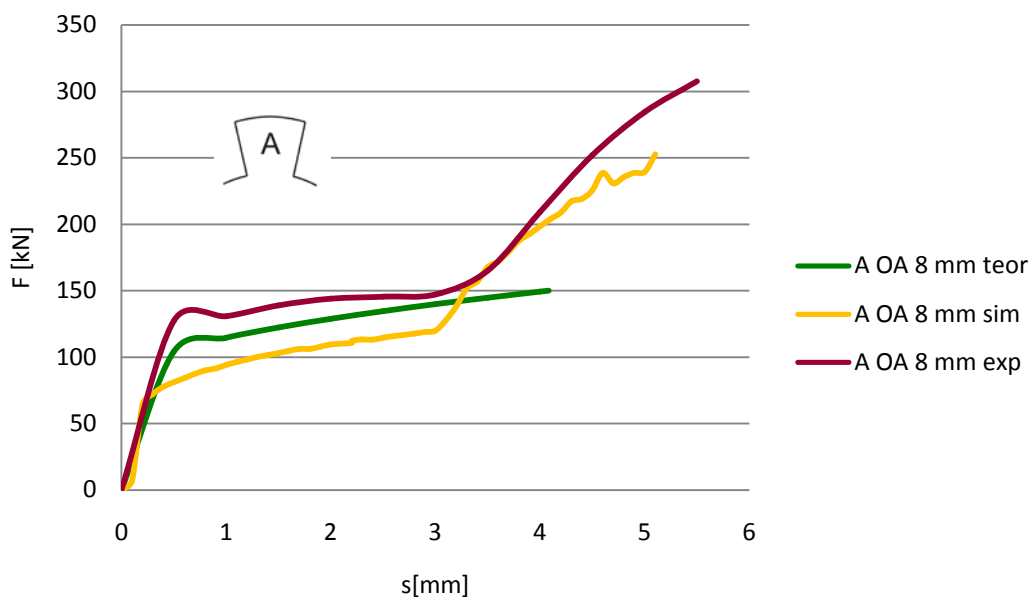
Slika 6.7 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke deformacione sile potrebne da se formira ozubljenje za tip ozubljenja A, model OA 5 mm

Na slici 5.16 prikazan je način tečenja materijala kod istiskivanja dela kada je otvor u žigu (modela OA, otvor u žigu 5mm). Ono što se može videti na slici 5.16 je da isticanje materijala u otvor u žigu počinje pri kraju procesa istiskivanja, kada je ozubljenje skoro u potpunosti formirano, tako da primena otvora u žigu ne utiče na veličinu sile do pred sam kraj procesa. To je potvrđeno eksperimentalnim i rezultatima određenim na osnovu simulacije procesa, dok, zbog nešto drugačijeg opisivanja tečenja materijala, teorijsko rešenje pokazuje postojanje smanjenja sile. Iako ovaj model

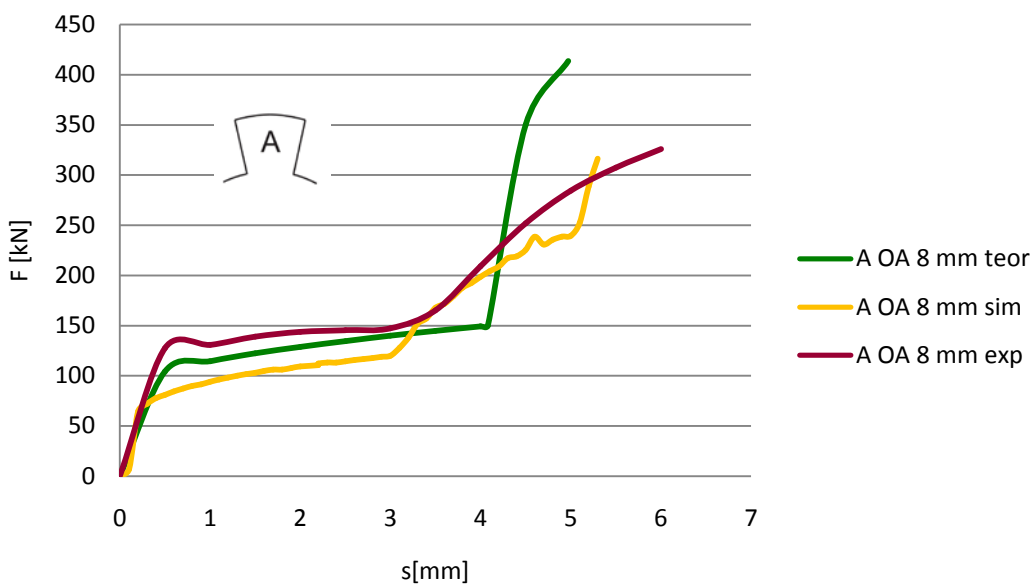
deformisanja ne dovodi do smanjenja deformacione sile u ukupnom procesu, utiče na smanjenje sile u trenutku kada bi sila u konvencionalnom procesu počela naglo da raste. Teorijsko rešenje u ovom slučaju na drugačiji način opisuje tečenje materijala što utiče na to da je računaska sila za model deformisanja OA manja od eksperimentalne. Manja vrednost računaska sile objašnjava se činjenicom da je za ovaj slučaj tečenja pretpostavljeno da se centralni deo obratka poluprečnika r_{i0} ne deformiše. Prema rezultatima eksperimenta (slika 4.18 i 4.19) i simulacije (slike 5.9 i 5.11) u prvom delu procesa obradak se deformiše kao da je konvencionalna metoda u pitanju, što znači da se i centralni deo zapremine deformiše. Ovaj rezultat ukazuje na potrebu korekcije teorijskog rešenja za ovaj slučaj tečenja materijala kod modela deformisanja OA.



Slika 6.8 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model OA 5 mm - ukupan proces



Slika 6.9 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile potrebne da se formira ozubljenje za tip ozubljenja A, model OA 8 mm



Slika 6.10 - Uporedni dijagram teorijske, eksperimentalne i numeričke vrednosti deformacione sile za tip ozubljenja A, model OA 8mm - ukupan proces

Na osnovu uporedne analize rezultata za modele deformisanja OP i OA - tip ozubljenja A, može se zaključiti da su vrednosti deformacione sile određene na tri različita načina usaglašene u određenim delovima procesa, ali da je potrebno dalje poboljšanje sva tri analizirana segmenta - i teorijskog rešenja, i eksperimentalnih istraživanja i numeričke simulacije, kako bi se sam proces teorijski i numerički još tačnije opisao, a eksperimentalno odredila adekvatna vrednost deformacione sile za kraj druge faze procesa i za ukupan procesi istiskivanja. Ono što je takođe važno je da upravo ovi nedostaci koji su se javili utiču na bolje razumevanje procesa i stvaraju dobru osnovu za dalje poboljšanje kako teorijskog rešenja, tako i eksperimenta i numeričke simulacije.

7. ZAKLJUČAK

Hladno istiskivanje je metoda tehnologije plastičnog deformisanja koja je veoma zastupljena u proizvodnji metalnih delova zbog niza prednosti koje ima u odnosu na druge metode (ušteta u materijalu, vremenu proizvodnje, mogućnost dobijanja visokog kvaliteta i tačnosti proizvedenih delova). Jedan od nedostataka ove metode je visoka vrednost potrebne deformacione sile, naročito u slučaju istiskivanja delova složene konfiguracije, koja ima za posledicu i visoke vrednosti pritisaka koji se javljaju u alatu i ograničavaju veličinu dela koji može na ovaj način da se proizvede. Jedan od načina da se smanji vrednost potrebne deformacione sile je da se tokom istiskivanja u delu ostvari podeljeno tečenje materijala. To se može ostvariti ukoliko se u pripremu ili alatu predvidi otvor.

Istraživanje predstavljeno u ovom radu ima dva osnovna pravca. Prvi, kreiranje teorijskog rešenja metodom gornje granice za istiskivanje obradaka složene konfiguracije i drugi, da se istraži da li primena otvora u obratku ili elementima alata (tzv. „relaksirajućih” otvora) utiče na smanjenje potrebne deformacione sile u procesu istiskivanja prikazanih tipova ozubljenja.

Istraživanja su sprovedena na modelima radijalnog istiskivanja ozubljenih elemenata. Razmatrane su tri različite geometrije ozubljenja, kao i dva slučaja inicijalnih „relaksirajućih” otvora i to u žigu (model deformisanja OA) i u pripremu (model deformisanja OP). Materijal priprema bio je Al 99,5. U toku eksperimenta podmazivanje je vršeno mineralnim uljem.

Metodom gornje granice određeni su teorijski izrazi za određivanje deformacione sile i pritiska na žig potrebni za istiskivanje u svim navedenim slučajevima. Primenom teorijskog rešenja na svaki tip ozubljenja izračunate su vrednosti deformacionih sila za pet različitih slučajeva: kada je pripremak pun deo i ne postoji otvor u alatu (konvencionalno istiskivanje), za dve vrednosti otvora u pripremu (ϕ 5 mm i ϕ 8 mm) i za dve vrednosti otvorau žigu (ϕ 5 mm i ϕ 8 mm).

Analizom dijagrama promene sile u zavisnosti od hoda alata dobijenih teorijskim putem za oba modela deformisanja uočene su tri faze procesa. U početnoj fazi, za relativno malu vrednost hoda, dolazi do znatnog porasta sile. U drugoj fazi materijal u zoni ozubljenja slobodno teče u radijalnom pravcu i nema bočni kontakt sa matricom zbog čega je porast sile manjeg intenziteta. Druga faza se završava kada se formira ozubljenje, a centralni otvor u obratku ili otvor u žigu još nisu popunjeni, tako da u trećoj fazi materijal samo popunjava preostali otvor u obratku ili žigu, što rezultira naglim porastom sile.

Kako bi se ocenio uticaj otvora u pripremu ili žigu na proces istiskivanja na osnovu teorijskog rešenja, analizirane su vrednosti sile u prve dve faze procesa, odnosno za deo procesa u kome dolazi do formiranja ozubljenja i upoređene sa vrednostima sile u konvencionalnom procesu. Bez obzira na oblik ozubljenja, sa porastom prečnika otvora u pripremu ili žigu prema teorijskom rešenju deformaciona sila potrebna da se formira ozubljenje (sila u prvoj i drugoj fazi procesa) opada sa povećanjem početnog prečnika otvora. Razlika u hodu postoji kod priprema sa različitom veličinom početnog otvora, jer sa povećanjem veličine otvora u pripremu, raste i hod potreban da bi se formiralo ozubljenje.

Za razliku od prve dve faze procesa kada deformaciona sila opada sa povećanjem otvora u pripremu, u trećoj fazi popunjavanje preostalog otvora iziskuje i veću deformacionu silu.

Kada je u pitanju pritisak na žig, primena otvora u pripremu dovodi do njegovog smanjenja u poređenju sa konvencionalnim procesom, ali se vrednost pritiska ne menja kada se povećava vrednost otvora u pripremu, pošto se i sila i površina na koju ona deluje proporcionalno smanjuju i njihov odnos, odnosno pritisak ostaje isti. Razlika jedino postoji u veličini potrebnog hoda žiga, koji se povećava sa povećanjem otvora u pripremu.

Poređenjem vrednosti teorijskih sila za model deformisanja OP i OA za iste vrednosti otvora u obratku i žigu, vrednost sile za proces OA je neznatno manja (tabela 6.1). Naknadna eksperimentalna ispitivanja procesa i numeričke simulacije, pokazale su da kod ovog slučaja materijal teče na nešto drugačiji način, nego što je teorijskim rešenjem određeno, odnosno vrednosti sile u procesu za model deformisanja OA u eksperimentu i simulaciji bile su približnije konvencionalnom procesu i imale su veću vrednost nego kod modela deformisanja OP. Objašnjenje za računске vrednosti sile kada je u pitanju model deformisanja OA leži u tome što je pretpostavljeno da se centralni deo ne deformiše (deformisanje tog dela zapremine nije uzeto u obzir) što je uticalo na smanjenje potrebne deformacione sile. Ovaj rezultat ukazuje na potrebu korekcije teorijskog rešenja za ovaj vid tečenja materijala.

Eksperiment istiskivanja izveden je za tip ozubljenja A, za oba modela deformisanja, i to za veličine otvora 5 mm i 8 mm, kao i za konvencionalni proces istiskivanja. Eksperimentalni rezultati potvrdili su da primena otvora u pripremu (model deformisanja OP) dovodi do smanjenja potrebne deformacione sile u procesu istiskivanja. Kod modela deformisanja OA eksperimentalni rezultati su pokazali da se proces u prve dve faze odvija kao konvencionalno istiskivanje, da bi u trećoj fazi sila

počela da opada. Vrednosti sile i hoda dobijenih u eksperimentu istiskivanja veći su od očekivanih, zbog nepredviđenog isticanja materijala kroz zazor koji su se pojavili između pojedinih elemenata alata.

Na osnovu *numeričke simulacije* procesa određena je veličina deformacione sile i analizirano tečenje materijala u procesu istiskivanja za oba modela deformisanja. Numerička simulacija procesa pokazala je na koji način materijal teče i kako se formira ozubljenje. Kod oba modela deformisanja materijal prvo dolazi u bočni kontakt sa matricom na polovini visine ozubljenja, da bi se zatim formirala donja polovina ozubljenja i tek u poslednjoj fazi gornja polovina. Formiranje gornje polovine ozubljenja povezano je se naglim porastom sile na kraju procesa. U simulaciji procesa za model deformisanja OP skoro do samog kraja procesa istiskivanja, materijal popunjava i centralni otvor i preostalu nepopunjenu zapreminu u gornjoj polovini ozubljenja, da bi na kraju procesa preostali centralni otvor bio veoma mali (ispod 1 mm), što se razlikuje od eksperimentalnih rezultata i teorijskog proračuna.

Na osnovu uporedne analize teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih vrednosti deformacione sile može se zaključiti da su vrednosti sile određene na tri različita načina usaglašene u određenim delovima procesa - na početku procesa veće slaganje postoji između teorijskih i eksperimentalnih rezultata, dok u završnoj fazi bolje slaganje pokazuju eksperiment i simulacija procesa. Eksperimentalne vrednosti, i ako donekle uvećane, poslužile su kao osnova za ocenu teorijskog rešenja i simulacije procesa. Analiza teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata pokazala je da model deformisanja OP dovodi do smanjenja potrebne deformacione sile u procesu, dok se kod modela deformisanja OA smanjenje javlja samo u poslednjoj fazi procesa.

Dva osnovna razloga za odstupanje teorijskog rešenja od eksperimentalnih rezultata su pojednostavljeno opisivanje tečenja materijala u zoni zuba (što ukazuje na potrebu dodanog poboljšanja teorijskog rešenja), kao i ne uzimanje u obzir elastičnih deformacija kod teorijskog rešenja.

Teorijsko rešenje prikazano u ovom radu otvara mnogobrojne mogućnosti za dalju analizu ovog procesa. Pomoću teorijskog rešenja može se analizirati uticaj svih parametara procesa (koeficijenta trenja, veličina otvora u pripremu ili alatu, visine zuba, broja zuba, unutrašnjeg prečnika ozubljenja, spoljašnjeg prečnika ozubljenja, ugla zuba, ugla ψ kod tipa ozubljenja B) na veličinu potrebne deformacione sile, odnosno njihov uticaj na podeljeno tečenje materijala u toku procesa istiskivanja. Na prvom mestu zanimljiva je analiza uticaja koeficijenta trenja, jer variranjem trenja na kontaktnim površinama može se kontrolisati tečenje materijala i na taj način uticati na sam tok procesa. Takođe može se analizirati i promena poluprečnika neutralne površine u toku procesa deformisanja, kao najvažnijeg pokazatelja podeljenog tečenja, koje i omogućava smanjenje ukupno potrebne deformacione sile.

U cilju dobijanja tačnijih rezultata eksperimenta neophodno je promeniti koncepciju alata, odnosno koristiti žig i matricu bez dodatka kako bi se sprečilo dodatno isticanje materijala. Žig sa otvorom je bolje rešenje i zbog toga što isticanje materijala u pravcu žiga ne bi bilo ograničeno. Na taj način ne samo da bi se dobile tačnije vrednosti deformacione sile, već bi se dobili i dodatni podaci o načinu tečenja

materijala i popunjavanju matrice materijalom. Ovi podaci bi mogli da se dobiju kada bi se eksperiment izveo po fazama, odnosno kada bi za različite vrednosti hoda alata bila određena sila i geometrija dela koja odgovara tom hodu. Ovi podaci bi mogli da se iskoriste i za poboljšanje teorijskog rešenja. Takođe treba omogućiti dobijanje numeričkih rezultata koji su približniji eksperimentalnim vrednostima. Jedna od mogućnosti da se to postigne je korišćenje pogodnijeg software-a.

Istraživanje prikazano u ovom radu omogućuje detaljnu analizu načina na koji se proces istiskivanja ovih tipova ozubljenja odvija i stvara dobru osnovu za dodatno razvijanje i usavršavanje kako teorijskog rešenja, tako i eksperimenta i numeričke simulacije.

I pored određenih ograničenja i razlike u vrednostima deformacione sile dobijene na tri prikazana načina, u radu je nedvosmisleno pokazano da se primenom inicijalnih „relaksirajućih” otvora u pripremu ili alatu postiže smanjenje deformacione sile i pritiska na alat, čime je potvrđena hipoteza. Ipak, u svakom konkretnom slučaju istiskivanja potrebno je detaljnom analizom ustanoviti da li je primena takvog rešenja svrsishodna i sa tehno-ekonomskog aspekta.

Postoji više pravaca daljeg razvoja na planu primene „relaksirajućih” otvora u procesima hladnog istiskivanja, a neki od njih su:

- Dalje razvijanje teorijskog rešenja uključivanjem novih zona deformisanja, koje bio mogle detaljnije opisivanje procesa i tečenja materijala i samim tim uticale na povećanje tačnosti rešenja, kao i tačnije određivanja granice između druge i treće faze procesa, odnosno tačnije vrednosti deformacione sile za trenutak kada je ozubljenje formirano.
- Ispitivanje uticaja parametara kao što su koeficijent trenja, odnos dimenzija dela i otvora i veličina otvora u obratku ili alatu na podeljeno tečenje materijala pomoću teorijskog rešenja. Detaljnija analiza uticaja veličine otvora u obratku ili alatu može da dovede do informacije o optimalnoj veličini otvora.
- Primena i ispitivanje novih modela deformisanja OA kada se otvor nalazi sa obe strane priprema (otvor se osim u žigu nalazi i u donjoj ploči) ili proces kod koga se otvor u alatu nalazi sa strane ozubljenja (u donjoj ploči), a žig je bez otvora.
- Proširivanje primene razvijene metode i na druge geometrijske oblike radnih komada.

8. LITERATURA

1. Adie J.F., Alexander J.M., A graphical method of obtaining hodographs for upper-bound solutions to axi-symmetric problems, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 9, 1967., pp 349-357
2. Altinbalik T., Can Y., An experimental study of lateral extrusion of splines, *Materials & Design*, Vol. 27, 2006., pp 727-734
3. Altinbalik T., A study of barreling profile and effect of aspect ratio on material flow in lateral extrusion of gear-like forms, *Indian Journal of engineering and materials science*, Vol. 14, 2007., pp 184-192
4. Altinbalik T, Onder A., Effect of die inlet geometry on extrusion of clover sections through curved dies: Upper bound analysis and experimental verification, *Transactions of nonferrous metals society of China*, Vol. 23, 2013., pp 1098-1107
5. Alves M. L., Rodrigues J. M. C., Martins P. A. F., Cold forging of gears, experimental and theoretical investigation, *Finite elements in analysis and design*, Vol. 37, 2001.,pp 549-558
6. Alves M. L., Rodrigues J. M. C., Martins P. A. F., Finite element modelling of forging processes using flow formulation, *ICIT 2005, Proceedings of 5th international conference on industrial tools*, Slovenia, 2005., pp 337-340
7. Avitzur B., *Metal forming: processes and analysis*, McGraw Hill, SAD, 1968.
8. Balendra R., Qin Y., Injection forging: engineering and research, *Journal of materials processing technology*, Vol 145, 2004., pp 189-206
9. Behrens B. A., Cold Sizing of Cold- and Hot-Formed Gears, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol 53, 1, 2004., pp 239-242.

10. Behrens B. A., Dähndel H., Schmit I., Präzisionsschmieden- aktueller Stand und Perspektiven, 9. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Februar 2006., TU Darmstadt, pp 67-78
11. Behrens B. A., Odening D., Process and tool desing for precision forging of geared components, Proceedings of 12th. ESAFORM conference, Twente, Netherlands, 2009.
12. BehrensB. A et al., Anforderungen an Umformwerkzeuge für das gratlose Präzisionsschmieden, 2. AutoMetForm/17. Sächsische Fachtagung Umformtechnik Tagungsband Freiberg November 2010., pp 299-311
13. Behrens B.-A., Odening D., Machinery influence on the productionaccuracy of precisionforgedparts, Metallurgicaland Mining Industry, Vol. 3, No 7, 2011, pp 48-52
14. B-A Behrensi et al., Comprehensive materials Processing, Volume 3, Chapter Near-Net and Net Shape Forging, Elsevier 2014., pp 427-446
15. Brayden L., Monaghan J., Ananalysis of closed -die extrusion/forging, Journal of materials processing technology, Vol. 26, 1991., pp 141-157
16. Burgdorf M., Cold forging of gear shaped components, 5th International Cold Forging Congress, 1975., pp 275-289
17. Can Y., Altinbalik T., Erol Akata H., A study of lateral extrusion of gear like elements and splines, Journal for materials processing technology Vol. 166, 2005., pp 128-134
18. Can Y., Misirli C., Analysis of spur gear forms with tapered tooth profile, Materials & Design Vol 28, 2008., pp 829-838
19. Cho H., Choi J., Min G., Choi Y., Choi J., An upper-bound analysis of the closed-die forging of spur gears, Journal of Materials Processing Technology Vol. 67, 1997., pp 83-88
20. Choi J.C., Choi Y., Hur K.D., Kim C.H., A study on the forging of spur gears, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, No 12, 1996., pp 1333-1347
21. Choi J.C., Choi Y., Tak S.J., The forging of helical gears (I): Experiments and upper bound analysis, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 40, No 4, 1998., pp 325-337
22. Choi J.C., Choi Y., A study on the forging of external spur gears: upper bound analyses and experiments, Machine tools and manufacture, Vol. 38, 1998., pp 1193-1208
23. Choi J.C., Choi Y., Precision forging of spur gears with inside relief, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, 1999., pp 1575-1588
24. Choi J., Cho H.Y., Choi J.C., Upper bound analysis for forging of trochoidal gears, Journal of materials processing technology, Vol. 103, 2000., pp 347-352

25. Choi J., Cho H.Y., Jo C.Y., Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies, *Journal of materials processing technology*, Vol. 104, 2000., pp 1-7
26. Choi J., Cho H.Y., Jo C.Y., An upper bound analysis for the forging of spur gears, *Journal of materials processing technology*, Vol. 104, 2000, pp 67-73
27. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Computer simulation to predict stresses and die loads during metal flow in incremental heading of shaped heads from cylindrical rods and some experiments, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 37, No 12, 1995., pp 1223-1245
28. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Near net shape spline forging: an experimental investigation and a simple upper bound analysis, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 37, No 12, 1995., pp 1247-1268
29. Chitkara N.R., Kim Y., An analysis of external spline gear forming by an upper bound energy method, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 38, No 7, 1996., pp 777-789
30. Chitkara N.R., Kim Y., Upper bound analysis of near-net shaped forging of gear coupling form, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 38, No 7, 1996., pp 791-803
31. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Computer simulation to predict stresses, working pressures and deformation modes in incremental forging of spur gear forms, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 38, No 8-9, 1996., pp 871-889
32. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Near net shape forging of spur gear forms: an analysis and some experiment, *International journal of mechanical sciences*, Vol 38, No 8-9, 1996., pp 891-916
33. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Shape heading of splines and solid spure gear forms: an analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No 4, 2001, pp 1073-1106
34. Cramphorn A.S., Bramley A.N., McDermott R.P., UBET related development in forging analysis, *Proceedings of 4th North American Conference NAMRC*, Columbus, USA, 1976., pp 80-86
35. Dean T.A. A profile of the market for cold forgings, *The 9th International Cold Forging Congress*, Solihull, UK, 1995, pp 17-27
36. Dean T.A., The net-shape forming of gears, *Materials and design*, Vol. 21, 2000, pp 271-278
37. Geiger R., Hansel M., From Near-net-shape to Net-shape-cold forging, state of the art, *Proceedings of the 9th International Cold Forging Group*, Solihull, UK, 1995., pp 59-75

38. Grover O. P., Juneja B. L., Analysis of closed die forging of gear like elements, Proceedings of the 1st International conference on technology of plasticity, Tokyo, Japan, pp 888-893
39. Hill R., The mathematical theory of plasticity, Oxford at the Clarendon press, 1950.
40. Hsu H. H., A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method, International journal of mechanical sciences, Vol 44, 2012., pp 1543-1558
41. Hu C., Wang K., Liu Q., Study on a new technological scheme for cold forging of spur gears, Journal of materials processing technology, Vol 187-188, 2007., pp 600-603
42. ICFG International Cold Forging Group 40 Years History Document, Document No 18/07, Erlangen, Germany, 2007.
43. Jafarzadeh H., Faraji G., Dizaji A. F., Analysis of lateral extrusion of gear-like form parts, Journal of mechanical science and technology, Vol 26, 2012., pp 3243-3252
44. James D., Phosphate coating and lubricating steel for cold extrusion, Conference Cold extrusion of steel, Sheffield, November, 1960.
45. Jung S.Y. et al., A study on the extrusion by a two-step process for manufacturing helical gears, International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 41, No 7-8, 2009., pp 684-693
46. Kačmarčík I., Movrin D., Lužanin O., Skakun P., Plančak M., Vilotić D., Determination of friction in bulk metal forming processes, SERBIATRIB '11, 12th International conference on tribology, Kragujevac, Serbia, 2011., pp 111-116
47. Konda K., Jitsunari T., Ohga K., Investigation on cold die forging of gear utilizing divided flow (1st report, examination of applicable condition for a spur gear), Bulletin of the JSME, Vol. 28, No. 244, October 1985, pp 2442-2450
48. Kondo K., Ohga K., Development of precision cold die forging process utilizing divided flow, Journal of JSTP, Vol.27, No. 300, 1986., pp 121-131
49. Kondo K., Improvement of product accuracy in cold die forging, Advanced technology of plasticity, Proceedings of 6th ICTP, Erlangen Germany, 1999., pp 19-24
50. Kondo K. et al., Net shape forging of an external helical gear with boss and internal spline, Proceedings of the 7th international conference on technology of plasticity ICTP, 2002., pp 49-54
51. Krušič V., Prinčič B., Brezigar B., Cold forging of complex parts in automotive electrical industry, International conference on industrial tools, ICIT 97, Maribor, Slovenia, 1997., str. 149-152.

52. Kudo H., An upper bound approach to plane strain forging and extrusion, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 1, pp 57-83
53. Kudo H., Some analytical and experimental studies of axisymmetrical cold forging and extrusion, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 2, 1960, pp 102-127
54. Kudo H., Academic-industrial cooperation to improve and expand cold-forging technology in Japan, *Journal of materials processing technology*, Vol. 35, 1992, pp 259-274
55. Kudo H., Towards net-shape forming, *Journal of material processing technology* 22, 1990., pp 307-342
56. Lili J., Jinzhang G., An upper bound analysis for extrusion of splines, *Proceedings of the 4th International conference on technology of plasticity*, Beijing, China, 1993., pp 582-586
57. Kunogi M., Spread extrusion method, *Report of science research institute*, Vol. 50, 1956., pp 215
58. Ma Y., Qin Y., Balendra R., Upper bound analysis of the pressure-assisted injection forging of thick-walled tubular components with hollow flanges, *International journal of mechanical sciences*, Vol 48, 2006., pp 1172-1185
59. Ma Y., Qin Y., Balendra R, Forming of hollow gear shafts with pressure assisted injection forging (PAIF), *Journal of materials processing technology*, Vol 167, 2005., pp 294-301
60. Musafija B., *Primenjena teorija plastičnosti, II deo*, Univerzitet u Sarajevu, 1974.
61. Nakamura T., Osakada K., Research and development of precision forging in Japan, 38th ICFG Plenary Meeting, September 2005, The Racecourse Chester UK, pp 1-12
62. Neugebauer R., Kolbe M., Glass R., New warm forming processes to produce hollow shafts, *Journal of materials processing technology*, Vol 119, 2001., pp 277-282
63. Ohga K., Kondo K., Research on precision die forging utilizing divided flow (1st report, theoretical analysis of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole), *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 209, November 1982, pp 1828-1835
64. Ohga K., Kondo K., Jitsunari T., Research on precision die forging utilizing divided flow (2nd report, experimental study of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole), *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 209, November 1982, pp 1836-1842
65. Ohga K., Kondo K., Jitsunari T., Research on precision die forging utilizing divided flow (3rd report, study on an optimum combination "by two step method" proposed anew), *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 209, November 1982, pp 1843-1850

66. Ohga K., Kondo K., Jitsunari T., Research on precision die forging utilizing divided flow (4th report, Influence of restricting a centripetal flow), Buletin of the JSME, Vol. 26, No. 218, August 1983, pp 1434-1441
67. Ohga K., Kondo K., Jitsunari T., Research on precision die forging utilizing divided flow (5th report, application on actual machine parts), Buletin of the JSME, Vol. 28, No. 244, October 1985, pp 2451-2459
68. Ohga K., Kondo K., Research on application range of the precision cold die forging utilizing divided flow to thick products, Proceedings of the 4th International Conference on Technology of Plasticity ICTP, 1993., Beijing, China, pp 1239-1245
69. Ohga K., Murakoshi F., Ando H., Kondo K., Precision cold die forging of actual steel gear toothed products utilizing divided flows, Proceedings of the 5th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP, 1996., Ohio, USA, pp 331-336
70. Ohga K., Murakoshi F., Ando H., Miyoshi K., Kondo K., Net-shape forging of gear toothed parts utilizing divided flow method, Proceedings of 6th International conference on technology of plasticity ICTP, Nuremberg, Germany, 1999., pp 793-798
71. Osakada K., Wang X., Hanami S., Precision forging of spline by flashless die forging with axially driven die, Annals of CIRP, Vol 46, Issue 1, 1997., pp 209-212
72. Plančak M., Različite varijante primene metode gornje granice, Obrada deformisanjem u mašinstvu, br.7, Novi Sad, 1981., str.101-119
73. Plančak M., Cser L., Istraživanje parametara procesa radijalnog istiskivanja, Obrada deformisanjem u mašinstvu, No 1-2, 1989., pp31-45
74. Plančak M., Vujović V., Vilotić D., Cold extrusion with non-circular punch crosssection, Proceedings of the XI International conference on production research, Hefei, China, 1991., pp 18-23
75. Plančak M., Bramley A., Osman F., Non-conventional cold extrusion, Journal of materials processing technology, Vol 34, No 1-4, 1992., pp 465-472
76. Plančak M., Vilotić D., Vujović V., One contribution to the investigation of gear extrusion, Proceedings of the 5th ICTP, Ohio, USA, 1996., pp 197-201
77. Plančak M., Bramley A., Osman F., Cold extrusion of components with complex shapes, Metallurgy and new materials, Vol IV, No 2, 1996., pp 1-9
78. Plančak M., Vilotić D., Vujović V., Skakun P., Theoretical and experimental investigation of cold extrusion of gear-like elements, Journal for technology of plasticity, Vol 21, No 1-2, 1996., pp 31-43
79. Plančak M., Vilotić D., Skakun P., A study of radial gear extrusion, International journal of forming processes, Vol 6, No 1, 2003., pp 71-86

80. Plančak M., Škunca M., Math M., Numerical simulation of radial gear extrusion in cold state, 9th International scientific conference on production engineering, CIM 2003, Lumbarda Croatia, 2003.
81. Plančak M., Škunca M., Math M., Analysis FEM simulation Porto Alegre 2003
82. Plančak M., Vilotić D., Tehnologija plastičnog deformisanja, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2007.
83. Plančak M., Kuzman K., Vilotić D., Movrin D., FE analysis and experimental investigation of cold extrusion by shaped punch, International journal of material forming, Vol 2, Issue 1 Supplement, 2009., pp 117-120.
84. Prager W., Hodge P.G., Theory of perfectly plastic solids, Chapman and Hall, Ltd., London, 1951.
85. Qin Y., Ma Y., Balendra R., Pressuring materials and process design considerations of the pressure-assisted injection forging of thick-walled tubular components, Journal of materials processing technology, Vol 150, 2004., pp 30-39
86. Reiß A., Neher R., Production of gears by cold forging, VDI Wissenforum, International conference on gears, 2013., pp 1005-1016
87. Sawabe H., Relief axis method, Basic and application on cold forging, Sanpo, 1968.
88. Sagar R., Juneja B. L., An upper bound solution for closed die forging of hexagonal shapes, International journal of machine tool design and research, Vol. 20, 1980., pp 67-72
89. Skakun P., Prilog istraživanju procesa hladnog istiskivanja delova složenih geometrijskih oblika, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2001.
90. Skakun P., Škunca M., Plančak M., Radial gear extrusion modelling: analytical, numerical and experimental approach, 8th ESAFORM conference on material forming, Bucharest, Romania, April 2005, pp 581-584
91. Skakun P., Milutinović M., Plančak M., Šiđanin L., Determination of strain distribution in cold extruded workpiece – an experimental approach, 3rd international conference Deformation processing and structure of materials, Belgrade, september 2007, pp 23-28
92. Skrocki R., Precision forging of spiral bevel gears, Metal engineering quarterly, february, 1976, pp 58-64
93. Song J.H., Im Y.-T., Development of a computer aided design system of cold forward extrusion of a spur gear, Journal of materials processing technology, Vol. 153-154, 2004., pp 821-828
94. Song J.H., Im Y.-T., The applicability of process design system for forward extrusion of spur gears, Journal of Materials Processing Technology, Vol 184, 1-3, 2007, pp 411-419

95. Song J.H., Im Y.-T., Process design for closed-die forging of bevel gear by finite element analysis, *Journal of materials processing technology*, Vol. 192-193, 2007., pp 1-7
96. Standring P., *ColdForging: Where we are now and where we might be going. A personal view*, 38th ICFG Plenary Meeting, Septembar 2005, The Racecourse Chester UK, pp 1-11
97. Škunca M., Skakun P., Math M., Radial gear extrusion analysis, FE modeling and experimental verification, 5th International conference on industrial tools, Conference proceedings, Velenje, Celje, Slovenia, 2005., pp 357-360
98. Škunca M., Skakun P., Keran Z., Šidanin L., Math M. D., Relations between numerical simulation and experiment in closed die forging of gear, *Journal of materials processing technology*, 2006., Vol 177, pp 256-260
99. .Tong S., Muramatsu T., Mun C.C., Precision Cold Forging - Innovative Methods for Working Pressure reduction, SIMTech Technical Report (PT/01/042PMF), Precision Metal Forming Group, ProcessTechnology Division, Singapore Institute of Manufacturing Technology, 2011.
100. Vujović V., *Tehnologija plastičnosti u mašinstvu*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1990.
101. Yang T. S., Hwang N. C., Chang S. Y., The prediction of maximum forging load and effective stress for different material of bevel gear forging, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 21, 2007., pp 1566-1572