

Unaprjeđenje procesa inkrementalnog preoblikovanja u jednoj točki

Kršulja, Marko

Doctoral thesis / Disertacija

2013

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:528992>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

**UNAPRJEĐENJE PROCESA INKREMENTALNOG
PREOBLIKOVANJA U JEDNOJ TOČKI**

Doktorska disertacija

Marko Kršulja

Rijeka, 2013.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

**UNAPRJEĐENJE PROCESA INKREMENTALNOG
PREOBLIKOVANJA U JEDNOJ TOČKI**

Doktorska disertacija

Marko Kršulja

Mentor: Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing.

Komentor: Doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing.

Rijeka, 2013.

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
-Fakultetsko vijeće-
Klasa: 602-04/08-02/20
Ur. br.: 2170-57-43-08-38
Rijeka, 29. rujna 2008.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 20. sjednici u akad. god. 2007./08./09./10., održanoj 26. rujna 2008., donijelo je sljedeću

ODLUKU

Sukladno izvješću Stručnog povjerenstva, u sastavu: doc. dr. sc. Branimir Barišić, doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak (Fakulteta za strojništvo Univerza v Ljubljani) i izv. prof. dr. sc. Zlatan Car te pozitivne ocjene prijave i obrane teme doktorskog rada, utvrđuje se da pristupnik *Marko Kršulja, dipl. ing.* ispunjava Zakonom propisane uvjete za prijavu i izradu teme doktorske disertacije naslovljene:

„Unaprijeđenje procesa inkrementalnog preoblikovanja u jednoj točki“

Mentorom se imenuje doc. dr. sc. Branimira Barišića a komentorom izv. prof. dr. sc. Zlatana Cara.



D e k a n

Prof. dr. sc. Tonči Mikac, mag. ing. mech.

Dostaviti:

1. Marko Kršulja, dipl. ing.
2. Mentor, doc. dr. sc. Branimir Barišić
3. Komentor, izv. prof. dr. sc. Zlatan Car
4. Služba studentske evidencije, ovdje
5. Pismohrana FV

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
Fakultetsko vijeće

KLASA: 030-09/12-01/11
URBROJ: 2170-57-01-12-16
Rijeka, 26. listopada 2012.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 1. sjednici u ak. god. 2012./13., održanoj 26. listopada 2012., donijelo je sljedeću

ODLUKU

Prihvaća se zamolba voditelja znanstvenoistraživačkog projekta br. 069-1201787-1754 pod nazivom *Numeričko modeliranje, simulacija i optimizacija u oblikovanju lima*, prof. dr. sc. Zlatana Cara, te se imenuje **doc. dr. sc. Tomaža Pepelnjaka** (Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani) **sumentorom** znanstvenom novaku **Marku Kršulji, dipl. ing.**, uz prof. dr. sc. Zlatana Cara, umjesto umirovljenog prof. dr. sc. Karla Kuzmana (Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani).


Dekan
Prof. dr. sc. Goran Turkalj

Dostaviti:

- 1.) Prof. dr. sc. Zlatan Car
- 2.) Doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak (Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani)
- 3.) Prof. dr. sc. Karl Kuzman (Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani)
- 4.) Znanstveni novak Marko Kršulja, dipl. ing.
- 5.) Opća i kadrovska služba
- 6.) Pismohrana Fv

Sažetak

U ovome je radu proveden niz istraživanja kako bi se utvrdio stabilni tehnološki proces izrade tankostjenih proizvoda tehnologijom inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF - single point incremental forming). Pretpostavljeno je da je moguće primijeniti tehnologiju inkrementalnog oblikovanja na tankostjeni lim. Istraživanja su provedena na čeličnome limu TS230 (broj čelika prema EN 10027-2 je W. nr. 1.0371) debljine 0,155 mm i na limu TH415 (broj čelika prema EN 10027-2 je W. nr. 1.0377) debljine 0,24 mm s ciljem utvrđivanja optimalnih parametara u njihovoj obradi SPIF tehnologijom. Provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava s ciljem utvrđivanja pouzdanosti ulaznih parametara kako bi se jasno definirala točnost izrade tražene geometrije krnjeg stošca pomoću SPIF procesa. Proveden je vlačni test kako bi se definirao konvencionalni dijagram naprezanje - deformacija, te Marciniak test kako bi se formirao dijagram deformabilnosti SPIF tehnologijom. Postavljeni su analitički modeli koji opisuju stanjivanje lima, kritične sile te pojavu trenja za ispitivane limove u SPIF procesu. Prema rezultatima analitičkog modela za izračun sile u SPIF procesu za tankostjene limove provedeno je ispitivanje trenja za odabrane materijale TS230 i TH415. Uzimajući u obzir rezultate vlačnoga testa i ispitivanja trenja postavljeni su uvjeti za modeliranje, analizu i simulaciju SPIF procesa u softveru ABAQUS. Za izradu modela odabran je oblik krnjeg stošca, simulacije su provedene kako bi se utvrdili uvjeti izrade uspješnog SPIF procesa za materijal TS230 i TH415. Na temelju prikupljenih podataka postavljen je plan eksperimenata za istraživanje u realnim proizvodnim uvjetima te je pristupljeno eksperimentalnoj verifikaciji modela. Odabran je CNC stroj, CNC-glodalica WEMAS VZ 750, te je projektirana specijalna radna naprava te su odabrani alati za inkrementalno oblikovanje. Postavljeni su modeli za izvedbu SPIF procesa na odabranom stroju pomoću softvera Solidcam i VeriCUT. Prema dobivenim spoznajama izveden je eksperimentalni plan izrade krnjeg stošca kako bi se utvrdilo funkcioniranje modela. Nakon uspješno izvedenog SPIF procesa i utvrđivanja optimalnih parametara obrade, postavljen je eksperimentalni plan mjerenja stanjivanja lima, ponovljivosti oblika te sposobnosti izvedenog inkrementalnog oblikovanja. Sposobnost inkrementalnog oblikovanja tankostjenog lima mjerena je metodom 3D fotogrametrije (digitalizacijski sustav ARGUS), a dobiveni su rezultati uspoređeni sa dobivenim rezultatima Marciniak ispitivanja. Sustavom 3D fotogrametrije kontrolirana je ponovljivost oblika i stanjivanje tankostjenog lima. Ustanovljena je maksimalna sposobnost inkrementalnog oblikovanja za ispitivane materijale s oblikom krnjeg stošca. Objasnjeni su parametri koji uvjetuju uspješnu obradu SPIF procesom tankostjenog materijala. Izvršena su dodatna mjerenja tvrdoće, hrapavosti i topline.

Ključne riječi: inkrementalno oblikovanje metala, deformiranje, CNC stroj, kontrola procesa, mjerenje, 3D fotogrametrija.

Summary

In this work series of investigations were conducted in order to establish a stable technological process of manufacturing tinplate products with single point incremental forming technology (SPIF). In beginning of investigation it was assumed that SPIF technology is applicable on thin sheet metal. Investigations were conducted on two materials steel tinplate TS230 (W. nr. 1.0371 according to EN 10027-2) thickness of 0.155 mm and steel tinplate TH415 (W. nr. 1.0377 according to EN 10027-2) thickness of 0.24 mm with the goal of establishing optimal parameters in their manufacture with SPIF technology. Investigation of mechanical properties will be conducted with the goal to establish reliable input parameters in order to clearly define the accuracy of investigated truncated cone dimensions with SPIF process. A tensile test was conducted in order to define material stress - strain curve and Marciniak investigation in order to create forming limit diagram (FLD) for SPIF technology. Analytical models were defined in order to describe effect of sheet metal thinning, defining critical force and friction for investigated sheet metal in SPIF process. Friction investigation was conducted for materials TS230 and TH415 according to results obtained from analytical model for defining critical forces in SPIF process for thin sheet metals. Considering obtained results of tensile and friction investigation conditions for modelling, analysis and simulation of SPIF process in ABAQUS software are obtained. A truncated cone was selected for model development, a series of simulations were conducted in order to establish conditions for successful SPIF process of selected materials TS230 and TH415. On the basis of collected data a plan of experiments for real production conditions was proposed and verification of proposed was conducted. The CNC machine, CNC milling machine WEMAS VZ 750 was selected, the special work holder and tooling necessary for SPIF process proposed and created. Models for execution of SPIF process on milling machine were selected with softer Solidcam and VeriCUT. According to acquired know-how an experimental plan for creation of truncated cone was executed in order to confirm functionality of developed model. After successful execution of SPIF process and confirmation of optimal working parameters an experimental plan was prepared in order to measure with 3D fotogrametry. Thinning of sheet metal, geometry shape repeatability and FLD were measured with 3D fotogrametry system ARGUS. FLD diagrams for material TS230 and TH415 for selected geometry shape of truncated cone was defined. Obtained FLD diagrams of SPIF process were compared with obtained FLD diagrams of Marciniak investigation. Explanation of influential parameters that influence successful SPIF process of thin sheet metal is given. Additional measurements of hardness, roughness and heat were conducted.

Keywords: Incremental metal forming, deformation, CNC machine, process control, measurement, 3D fotogrametry.

Predgovor

Doktorska disertacija pod naslovom *Unaprjeđenje procesa inkrementalnog preoblikovanja u jednoj točki* izrađena je u okviru znanstvenog projekta *Numeričko modeliranje, simulacija i optimizacija u oblikovanju lima* (Br. 069-1201787-1754) financiranog od strane Ministarstva znanosti Republike Hrvatske na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Zahvaljujem se svim suradnicima projekta na financijskoj podršci te na korisnim savjetima.

Ovaj se rad može smatrati uvodom u istraživanje tehnologije inkrementalnog oblikovanja metala te novih spoznaja na polju tehnologije obrade deformiranjem, obradnih strojeva, računalnih simulacija te digitalizacijskog mjerenja.

Autor se zahvaljuje na podršci Nacionalnom CEEPUS uredu Hrvatske koji je pomogao u izvedbi istraživanja putem mobilnosti u okviru CEEPUS II HR 0108 projekta.

Zahvala

Zahvaljujem se svojim roditeljima, bratu te bližoj rodbini koja mi je pružila podršku i snagu da završim ovu disertaciju.

Posebnu zahvalnost dugujem pokojnom prof. dr. sc. Branimiru Barišiću s kojim sam započeo svoj znanstveni rad te koji mi je bio mentor u nastavi, radu na projektima te znanstvenim istraživanjima. Bila mi je čast biti njegov asistent te mu se zahvaljujem na svim vrijednim savjetima i prilikama koje mi je omogućio, a posebno na nesebično prenesenom znanju koje me je oplemenilo novim i korisnim spoznajama bitnim u tehnologiji oblikovanja metala ali i tehnologiji mjerenja.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zlatanu Caru, koji mi je bio prvi mentor pri izradi diplomskog rada a sada i doktorske disertacije, njegovo iskustvo s robotima i CNC obradnim strojevima bilo je od velike koristi pri razumijevanju tehnologije inkrementalnog oblikovanja. Također mu se zahvaljujem na omogućenim kontaktima u industriji koji su omogućili da se ideja ovoga doktorskog rada sprovede u stvarnost.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Karlu Kuzmanu, za pruženu podršku i savjete te za stvaranje pozitivne radne atmosfere u kojoj mi je bilo zadovoljstvo raditi.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Tomažu Pepelnjaku na korisnim savjetima u području tehnologije oblikovanja lima. Zahvaljujem mu se na savjetima i pomoći u svezi Marciniak i vlačnog testa za sposobnost oblikovanja materijala. Također mu se zahvaljujem na omogućenim boravcima na *Univerzi v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo* putem CEEPUS HR 108 programa (<http://www.ceepus.info/>).

Zahvaljujem se osoblju *Laboratorija za preoblikovanje, Univerzi v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo* koji su mi omogućili upotrebu ABAQUS softvera korištenog u simulacijama.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Miroslav Plančaku na savjetima oko tehnologije dubokog vučenja i ispitivanja trenja u tehnologiji deformiranja.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Miljenku Math-u na pruženoj podršci, korisnim savjetima u tehnologiji oblikovanja te omogućenim kontaktima koji su mi pomogli u izradi disertacije.

Zahvaljujem se profesorima sa CVUT iz Praga, Janu Kudláček, Ing., Ph. D., Petru Rožkaninu, Ing., te František Tatičeku, Ing. na pomoći i savjetima oko testova trenja, vlačnom testu i savjetima oko tehnologije prevlake materijala.

Zahvaljujem se i svim suradnicima projekta "Numeričko modeliranje, simulacija i optimizacija u oblikovanju lima" (069-1201787-1754), u sklopu kojega je doktorat izveden hvala na financijskoj podršci te na korisnim savjetima.

Zahvala tvrtki *Topomatika* (<http://www.topomatika.hr/>) koja mi je pomogla sa uslugama mjerenja posebno gospodinu dr. sc. Nenadu Drvaru dipl. ing..

Zahvala tvrtci *MGK-pack*, posebno se zahvaljujem gospodinu Kristijanu Krpanu dipl. ing. predsjedniku Uprave *MGK-pack* te gospodinu Branku Balabanu dipl. ing. rukovoditelju Proizvodnog sektora u *MGK-packu*, koji su bili jako strpljivi te su pomogli s materijalima i savjetima.

Zahvaljujem se i g. Robert Besermenjiju kontroloru u pogonu metalne ambalaže *MGK-packa* na pomoći pri mjerenju tvrdoće, hrapavosti te mnogim korisnim savjetima.

Zahvaljujem se i gospodinu Mladen Butorcu iz tvrtke *MGK-pack* koji je litografirao uzorke korištene za potrebe mjerenja sa sustavom ARGUS.

Zahvala tvrtci *Elcon-Geretebau d.o.o.* (<http://www.elcon-geretebau.eu/>) gospodi Aldinu Žlibanoviću, Goranu Skomerdži, Mirku Čutiću na pomoći oko izrade naprave za stezanje te na omogućavanju pristupa CNC stroju.

Zahvaljujem se tvrtci za proizvodnju šavnih cijevi *Histria Tube d.o.o.*, gospodinu Marjanu Benčiću na savjetima te na doniranim materijalima.

Zahvaljujem se i kolegama sa Zavoda za mehaniku koji su mi pomogli oko testiranja vlačnih svojstava materijala.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Loreti Pomenić na savjetima oko materijalnih svojstava ispitivanih limova.

Zahvaljujem se kolegi Hrvoju Radelji dipl. ing. i kolegi Leonu Šikulecu dipl. ing. na korisnim savjetima i pruženoj potpori pri izradu ovoga rada.

SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
1.1.	Predstavljanje problema.....	1
1.2.	Hipoteza	3
1.3.	Ciljevi doktorske disertacije.....	5
2.	Dosadašnje spoznaje iz tehnologije inkrementalnog oblikovanja	7
2.1.	Kratak opis tehnologije inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF).....	7
2.2.	Razvoj SPIF tehnologije	10
2.2.1.	Kovanje na batu (Hammering).....	10
2.2.2.	Rotacijsko oblikovanje deformiranjem (Spinning).....	10
2.2.3.	Oblikovanje mlazom čeličnih kuglica (Shot peening)	12
2.2.4.	Inkrementalno oblikovanje vodenim mlazom.....	13
2.3.	Pregled dosadašnjih istraživanja SPIF tehnologije	14
2.3.1.	Oblik gotovih proizvoda tehnologijom SPIF	14
2.3.2.	Spособnost oblikovanja deformiranjem u SPIF procesu	15
2.3.3.	Materijal.....	19
2.3.4.	Površinska hrapavost.....	20
2.3.5.	Sila	21
2.3.6.	Točnost proizvoda.....	22
2.3.7.	Elastični povrat	23
3.	Odabir materijala	25
4.	Oblikovljivost materijala, nepravilnosti u kristalnim strukturama	34
4.1.	Temeljni zakoni tehnologije oblikovanja metala.....	34
4.1.1.	Zakon o nepromjenjivosti volumena.....	34
4.1.2.	Zakon najmanjeg otpora promatra tečenje materijala.....	34
4.1.3.	Zakon neravnomjernosti deformacije, dopunska i zaostala naprezanja	35
4.1.4.	Zakon sličnosti	35
4.2.	Nesavršenosti u kristalnim strukturama.....	37
4.2.1.	Točkaste nesavršenosti (nuldimenzijske).....	37
4.2.2.	Linijske nesavršenosti (jednodimenzijske, dislokacije).....	38
4.2.3.	Površinske nesavršenosti (dvodimenzijske, plošne)	39
4.2.4.	Volumenske nesavršenosti (trodimenzijske).....	40
4.3.	Lüdersove trake (Lüders' bands).....	40

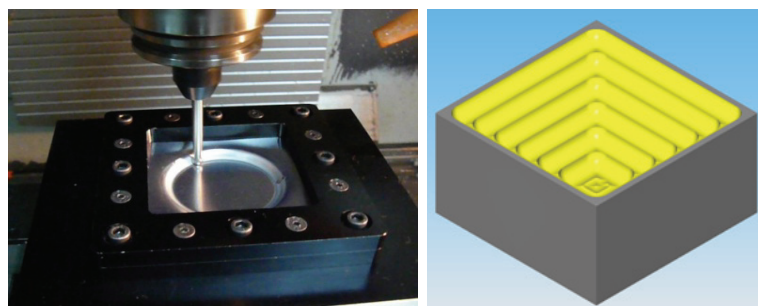
4.4.	Utjecaj vrste naprezanja na oblikovljivost	41
5.	Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, vlačni i Marciniak test	44
5.1.	Vlačni test	44
5.2.	Marciniak ispitivanje.....	53
6.	Analitičko modeliranje SPIF procesa	61
6.1.	Stanjivanje lima	65
6.2.	Kontaktna površina inkrementalnog oblikovanja	66
6.3.	Sila oblikovanja u inkrementalnom oblikovanju u jednoj točki	68
6.4.	Trenje u procesu inkrementalnog oblikovanja.....	69
7.	Numerički pristup rješavanju problema.....	72
7.1.	Metoda konačnih elemenata (MKE).....	72
7.2.	Simulacija softverskim rješenjem ABAQUS.....	73
8.	Eksperimentalni plan istraživanja SPIF procesa.....	78
8.1.	Stroj.....	78
8.2.	Odabir radne naprave za držanje lima.....	78
8.3.	Alati.....	81
8.4.	Eksperimentalni plan istraživanja	82
8.5.	Uzorci za provjeru rezultata sustavom ARGUS	89
9.	Mjerenje digitalizacijskim sustavima	91
9.1.	Mjerenje sustavom ARGUS.....	91
9.2.	Rezultati mjerenja lima TS230	95
9.3.	Rezultati mjerenja lima TH415.....	101
9.4.	Analiza izrade lakiranog krnjeg stošca	103
9.5.	Utjecaj laka na krivulju sposobnosti oblikovanja	108
10.	Dodatna ispitivanja tvrdoće, trenja, nepravilnosti u postupku obrade, hrapavost	111
10.1.	Ispitivanje tvrdoće.....	111
10.2.	Ispitivanje trenja.....	114
10.3.	Nepravilnosti u postupku obrade	120
10.4.	Hrapavost	122
10.5.	Ispitivanje sile	124
11.	Zaključak.....	128
11.1.	Pregled rezultata.....	128
11.2.	Buduća istraživanja.....	131
	Popis literature	134

Popis oznaka i simbola.....	141
Popis slika	144
Popis tablica	149
Životopis	150

1. Uvod

1.1. Predstavljanje problema

Jedna od karakteristika efektivne proizvodnje je maksimalno iskorištenje strojeva koji su na raspolaganju, te je zato potrebno poznavanje svih njihovih značajki u smislu tehnoloških rješenja i inovacija. U tehnologiji oblikovanja deformiranjem dijelovi koji se izrađuju konvencionalnim tehnologijama oblikovanja metala zahtijevaju specijalne alate, sastavljene od matrice, tlačnog prstena, ukovnja idr.. Takvi alati su visoko specijalizirani, skupi i potrebno je više vremena za njihovu izradu u usporedbi sa alatima koji se susreću kod inkrementalnog oblikovanja lima. Specijalni alati jednom konstruirani omogućavaju vrlo brzu izradu gotovih proizvoda te su isplativi u velikoserijskoj proizvodnji. U ovom radu opisuje se tehnologija oblikovanja metala deformiranjem koja se može koristiti upotrebom alatnih strojeva, CNC obradnih strojeva i robota [1]. Tehnologija inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF) može se primijeniti u serijskoj, maloserijskoj ili pojedinačnoj proizvodnji. U ovome istraživanju upotrijebiti će se CNC obradni stroj. CNC obradni strojevi koriste se kod manjih i srednjih serija proizvoda a karakterizira ih mogućnost promjene alata. Osim toga CNC strojevi imaju veću kontrolu putanje alata od strojeva za deformiranje te mogućnost pomaka naprave tijekom proizvodnje za razliku od klasičnih tehnologija oblikovanja deformiranjem gdje to nije moguće. Sukladno tome, potencijal iskorištavanja CNC strojeva za potrebe tehnologije oblikovanja jedno je od kontinuiranih područja istraživanja. Inkrementalno oblikovanje je jedan takav postupak koji nudi fleksibilnost u oblikovanju proizvoda i smanjuje troškove izrade alata [2]. Oblikovljivost se definira kao sposobnost materijala da se deformira određenim postupkom oblikovanja iz svog početnog oblika u zahtijevani oblik bez pojave greške. Sam naziv inkrementalno oblikovanje koristi se za različite tehnološke procese oblikovanja metala deformiranjem. Inkrementalno oblikovanje u jednoj točki karakterizira da se deformacija koncentrira u jednoj točki koja se kreće odabranom putanjom a posljedica takve usmjerene deformacije određeni je geometrijski oblik, slika 1.1.



Slika 1.1 Alat stegnut na glodalici lijevo, CAD model obrađenih slojeva iz softvera SolidCAM - desno [3]

Inkrementalno oblikovanje u jednoj točki temelji se na univerzalnom sferičnom alatu, koji se pomiče duž CNC kontroliranog puta alata tako da alat vrši pritisak na lim. Ploča lima se pomoću

stezne naprave drži tijekom cijelog vremena obrade. Nakon obrade, lim se oslobađa iz stezne naprave a viškovi potrebni za stezanje se kasnije odrezuju.

Vrlo je važno dobro odabrati parametre kako bi se uspio napraviti gotov proizvod traženih dimenzijskih točnosti i svojstava. Inkrementalno oblikovanje u jednoj točki, tehnološki je proces kojeg osim CNC strojevi mogu koristiti i multi-osni roboti ili namjenski strojevi bez potrebe specifičnih i skupih alata, kao što su žigovi i matrice. Kako bi se povećala kvaliteta konačne geometrije uvijek postoji mogućnost korištenja matrica koje mogu biti proizvedene od jeftinijeg materijala. Sile primijenjene u tehnologiji inkrementalnog oblikovanja ovise o materijalu koji se obrađuje, pa treba voditi računa da su one male kako se vreteno korištenog stroja ne bi oštetilo. Najčešće se obrađuje aluminij te čelični limovi pogodni za tehnologiju dubokog vučenja. Sam SPIF proces omogućuje povećano deformiranje lima u odnosu na klasično duboko vučenje. Vrijeme trajanja SPIF procesa ovisi o odabranim parametrima oblikovanja i geometriji konačnog proizvoda. Zbog većeg utroška vremena u usporedbi sa drugim tehnologijama, oblikovanje SPIF procesom način je obrade koji je prilagođen maloserijskoj ili pojedinačnoj proizvodnji [4, 5]. Može se reći, da na tržištu postoji potreba izrade malih serija različitih proizvoda ali i da postoji trend upotrebe sve tanjeg lima, kako bi se smanjilo ukupnu potrošnju lima. Prilikom odabira načina obrade proizvoda moguće je proračunati tehnološko ekonomsku analizu izrade u usporedbi sa konvencionalnim postupcima oblikovanja [4, 5]. Danas je tendencija da se koriste tanji limovi uz zadržavanje čvrstoće materijala posebno u automobilskoj industriji. Manja masa automobila omogućava manju potrošnju energije za pokretanje automobila. Zbog velikog interesa u industriji prema inovacijama i smanjenju troškova, primjenjivosti ove tehnike na specifičnim limovima ili aluminijskim trakama debljine od 0,5 mm do 6 mm, česti su predmet istraživanja u tehnologiji oblikovanja [6]. Istraživanja primjene SPIF procesa se provode za potrebe primarnog deformiranja, za reparature ili sekundarno deformiranje već deformiranih oblika [7]. Problem netočnosti oblika koji je redovito važan, ograničavajući faktor za tehnologiju inkrementalnog oblikovanja deformiranjem, česta je istraživačka tema te ga je potrebno adekvatno istražiti [8 - 11]. Putanja alata uzrokuje niz lokalnih deformacija koje zajednički djeluju na konačan oblik. Pucanje lima u pojedinim segmentima ovisi o odabranim parametrima u procesu koji negativno utječu na mikrostrukturu. Pri tome je potrebno poznavati mehanizme nastanka dislokacija, ponašanje anizotropije te općenito ponašanje kristalnih zrna prije, tijekom i nakon procesa [12 - 14]. Tijekom radnog procesa položaj alata definiran je procesnom kinematikom stroja i njegovim mogućnostima. Deformiranje proizvoda ovisi o odabranim parametrima obrade koji uvjetuju postizanje tražene geometrije proizvoda. Pri obradi je cilj kontrolirati ponašanje deformacije kako bi se uspješno po definiranoj putanji osiguralo što veća kvaliteta konačnog proizvoda [13, 15, 16]. Nakon što se utvrdi sila potrebna za deformiranje lima prema krivulji naprezanje - deformacija ($\sigma - \epsilon$) i odabranom alatu, može se kontrolirati deformiranje lima u SPIF procesu [13]. Tijekom SPIF procesa moguće je uspostaviti

kontrolirano stanjivanje lima. Proces se obrade može kombinirati u sukladnosti sa silom stezanja na radnoj napravi na način da se izvrše lokalna stezanja u svrhu izrade tražene geometrije proizvoda. Moguće je koristiti i različite potporne alate, ukovnje ili matrice kako bi se ili ubrzao proces ili postigli specijalni oblici. Tijekom obrade alat se pomiče i obrađuje sloj po sloj lima te je važno ispitati mikrostrukturu i deformabilna stanja koja uvjetuju lom u tim slojevima i utvrditi njihovu međusobnu povezanost. Prekomjerno stanjivanje lima jedan je od uzroka nastanka neupotrebljivog proizvoda. Stanjivanje lima mijenja se ovisno o parametrima obrade određenog geometrijskog oblika. Pri tome oblikovanje različitih kutova odabranog geometrijskog oblika najviše utječe na stanjivanje lima. Iz tog se razloga sposobnost izrade najvećeg kuta odabrane geometrije proizvoda upotrebljava kao jedna od metoda ispitivanja sposobnosti oblikovanja SPIF procesa [2, 6]. Postoji nekoliko testova ispitivanja sposobnosti SPIF oblikovanja, ispitivanje krnjim stošcem, piramidom, sferom, hiperbolom itd.. Rezultate ispitivanja, tj. izrađene dijagrame sposobnosti oblikovanja za pojedine oblike moguće je međusobno spajati u jedan zajednički dijagram sposobnosti oblikovanja [6]. U ovome je radu prikazana metoda ispitivanja sposobnosti deformiranja SPIF procesom kod koje se ispituje najveći mogući kut izrade krnjeg stošca. Najveći kut izrade koji je moguće izraditi prije loma, definira graničnu vrijednost sposobnosti oblikovanja odabranih parametara SPIF procesa za odabranu oblik. Dodatan problem pri inkrementalnoj obradi predstavlja konačna hrapavost proizvoda koja se formira sukladno interakciji alata i izratka, faktorima trenja i samoj odabranoj putanji u procesu. Pri tome se odabire tehnologija oblikovanja potrebna da odabrani proizvod zadovolji sve propisane uvjete kako bi postigao zadovoljavajuću kvalitetu. SPIF proces može biti optimiziran nizom eksperimentalnih pokušaja i pogrešaka ili upotrebom numeričkih analiza [10, 11]. Numeričkom metodom moguće je postaviti model koji predviđa tijek deformacija kojima se postiže konačni oblik sukladno odabranom putu alata. Na taj način moguće je modelirati, analizirati i simulirati SPIF proces.

U ovome će se radu ispitati proces inkrementalnog oblikovanja bijelog lima. Bijeli lim se definira kao hladno valjani niskougljični čelik debljine 0,125 - 0,49 mm, presvučen kositrom koji mu daje bijelu boju. Utvrdit će se utjecajni parametri u procesu inkrementalnog oblikovanja bijeloga lima. Koristeći SPIF proces moguće je proizvoditi dijelove od standardnih veličina bijelih limova u tvornicama sa odgovarajućim CNC strojevima ili robotima. To je značajno za maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju, gdje troškovi poslovanja zahtijevaju male zalihe u skladištu.

1.2. Hipoteza

U ovome radu će biti proveden niz istraživanja kako bi se utvrdio stabilni tehnološki proces izrade proizvoda tehnologijom inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF). Pretpostavljeno je da je moguće primijeniti tehnologiju inkrementalnog oblikovanja na

tankostjeni lim. Istraživanja će se provesti na čeličnome limu TS230 debljine 0,155 mm i na limu TH415 debljine 0,24 mm s ciljem utvrđivanja optimalnih parametara u njihovoj obradi SPIF tehnologijom. Takva tehnologija omogućava fleksibilnost obrade tankostjenog lima, mogućnost dodatnog deformiranja već deformiranih predmeta te uštede pogotovo u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji. Kod tankih su limova sile potrebne za deformaciju male te nema pretjeranog trošenja stroja, čime se povećava funkcionalnost i mogućnost obrade tankostjenog lima pomoću konvencionalnih strojeva, CNC strojeva i upotrebe robota. Kako se radi o limovima (bijeli lim TS230, TH415) izuzetno malih debljina (0,24 - 0,14 mm), i najmanja promjena sile deformiranja ili greška u strukturi materijala može uvjetovati promjenu nepravilnosti na konačnom proizvodu. Kako se kod tankostjenih proizvoda puno pažnje pridaje modernom dizajnu i izgledu proizvoda, na pojavu raznih nepravilnosti obraća se posebna pozornost. U inženjerskom dizajnu, dijelovi izrađeni iz tankostjenog lima se široko upotrebljavaju te je to jedan od najpoznatijih i najraširenijih metaloprerađivačkih postupaka [17 - 20]. Osnovni je trend u metaloprerađivačkoj industriji povećanje količine prerađenoga lima uz smanjenje njegove debljine, [4, 5].

Ispitat će se sposobnost postizanja traženih mjera i ponovljivost dobivenih rezultata pri istim proizvodnim uvjetima. Budući da je lim stegnut u okviru stezne naprave, te se deformira tijekom cijelog procesa, pri otpuštanju iz naprave dolazi do poteškoće u postizanju traženih dimenzija zbog efekta elastičnog povrata. Razmotriti će se i utjecaj elastičnog povrata nakon odrezivanja.

U procesu obrade dolazi do kontinuirane promjene stanja naprezanja koja ovisi o putanji i mehanizmu spuštanja alata. Važno je postići kontinuirano i slojevito deformiranje lima sloj po sloj kako bi se ostvario stabilan proces deformiranja i izbjegao lom.

Kretanje alata po limu uzrokuje i pojavu zagrijavanja koje ovisi o trenju, te je bitno odrediti utjecaj temperature na sam proces.

Ispitat će se svojstva materijala vlačnim testom i snimanje krivulje $\sigma - \varepsilon$, posebno faktor materijala C [18], i eksponent očvršćenja n kako bi se postavilo simulaciju SPIF procesa metodom konačnih elemenata [2, 12, 13, 21].

Usporedbom s ostalim postupcima tehnologije oblikovanja, jasno je, da je vrijeme izrade dijelova inkrementalnim oblikovanjem vrlo sporo te se na tome planu rade istraživanja optimizacijom putanje sa ciljem ubrzavanja procesa, a održavanja kvalitete. Pretpostavka je da će se postići brz i kvalitetan proizvodni proces za pojedinačne i maloserijske proizvodne procese. Dobiveni rezultati uspoređivali bi se sa poznatim teorijskim i eksperimentalnim rezultatima ostalih autora.

1.3. Ciljevi doktorske disertacije

Cilj ovog rada je:

- Ispitati primjenu tehnologije inkrementalnog oblikovanja na tankostjeni lim TS230 debljine 0,155 mm te lim TH415 debljine 0,24 mm. U literaturi su korišteni mnogi limovi međutim tankostjeni lim, te općenito čelik tanji od 0,5 mm nije obrađivan [1 - 21].
- Istražiti svojstva materijala, te implementirati modificirani analitički model izračuna kritičnih parametara SPIF procesa s kojim se može utjecati na mehanizme deformiranja tankostjenih limova.
- Odrediti veličinu kritične sile oblikovanja dobivenu pri najvećem mogućem kutu za materijale TH415 i TS230. Kritična sila je važna jer utječe na uspostavu stabilnog procesa obrade.
- Ispitati kritične sile oblikovanja na ostalim komercijalnim tankostjenim limovima.
- Posebno će se pristupiti problemu stanjivanja lima budući da u pregledanoj literaturi ta pojava nije dovoljno istražena. Većina autora u svojim ispitivanjima koristi lim od 1 mm debljine [1 - 21].
- Ispitat će se utjecaj temperature na sam proces obrade. Prema pregledanoj literaturi utjecaj temperature na proces obrade nije u potpunosti istražen. Veća temperatura u obradi povećava oblikovljivost materijala. Stoga je potrebno ustanoviti optimalne odnose temperature u SPIF procesu deformiranja limova TH415 i TS230.
- U cilju smanjenja nepravilnosti pri obradi tankostjenog lima i postavljanje robusnog proizvodnog procesa provest će se ispitivanje utjecajnih parametara u obradi i njihovih međusobnih odnosa. Istražit će se utjecaj deformacijskog stanja i stanja naprezanja na proces inkrementalnog preoblikovanja u jednoj točki.
- Za ispitivanje sposobnosti oblikovanja tankostjenih limova u SPIF procesu odabrana je metoda krnjeg stošca. Očekuje se postavljanje temelja za pouzdanu izvedbu inkrementalnog procesa obrade tankostjenih limova. Cilj je ostvariti kraće trajanje vremena preoblikovanja preko ulaznih parametara procesa oblikovanja i karakteristika sustava za oblikovanje [22]. Iz dosadašnjih je istraživanja ustanovljeno da materijal, kut pod kojim se izvodi oblikovanje, veličina vertikalnog pomaka, promjer alata za oblikovanje, sila oblikovanja, površinska hrapavost i točnost oblikovanja imaju najveći utjecaj na rezultate procesa inkrementalnog oblikovanja [6].
- Upotreba naprednih mjernih metoda i uređaja kojima će se pratiti rezultati. Planiranje mjernih metoda koji potvrđuju kvalitetu dobivenih rezultata. Cilj je pratiti „deformaciju“ lima te definirati potrebne sile koje utječu na naprezanja u procesu a zatim i na ostvarivanje konačnog oblika.

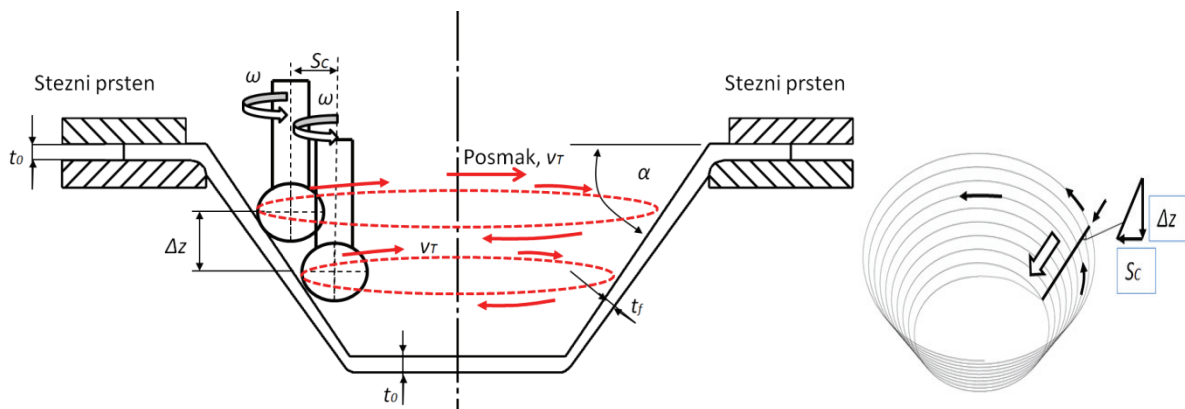
- Ispitati koeficijente trenja kako bi se postavila pouzdana simulacija. Za ispitivanje trenja odabran je uređaj za ispitivanje trenja Tribometar koji je moguće maksimalno opteretiti do 50 N.

Primjena rezultata ovog istraživanja očekuje se u području metaloprerađivačke industrije koja se bavi obradom tankostjenoga lima. SPIF proces omogućava industriji koja se bavi obradom tankostjenog lima da poveća asortiman proizvoda, poveća iskoristivost CNC strojeva i robota, te u konačnici smanji troškove poslovanja.

2. Dosadašnje spoznaje iz tehnologije inkrementalnog oblikovanja

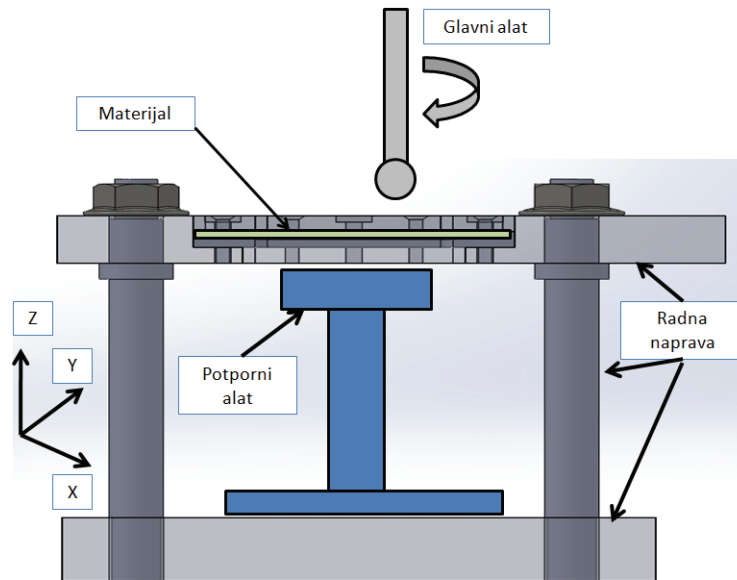
2.1. Kratak opis tehnologije inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF)

Inkrementalno oblikovanje javlja se početkom 1990-ih godina sa ciljem razvijanja alternativne fleksibilne tehnologije koja bi se koristila za proizvodnju obradaka kompliciranog oblika eliminirajući potrebu specijalnih matrica ili proizvodnje u više faza konvencionalnim dubokim vučenjem. Razvila se je iz mogućnosti iskorištenja CNC strojeva za dodatne obrade između proizvodnje malih serija i izrade prototipa. Mogućnost popravljivanja procesa s unosom računalnih naredbi bez potrebe popravka alata i naprava kako bi se postigao gotov proizvod, jedna je od bitnijih značajki ovoga procesa. Upotrebom SPIF tehnologije omogućena je znatna ušteda pri izradi novih alata. Razlikujemo dva glavna procesa inkrementalnog oblikovanja: oblikovanje u jednoj točki i u dvije točke. Inkrementalno oblikovanje u jednoj točki, ne koristi potporne kalupe, matrice ili sekundarni alat, slika 2.1.

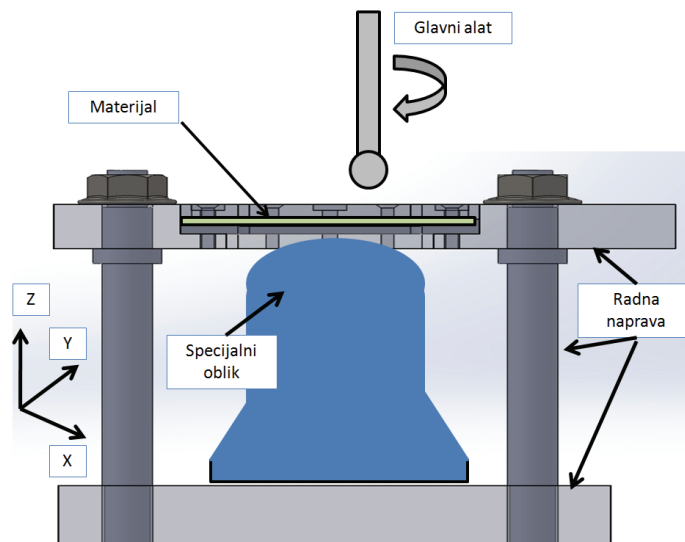


Slika 2.1 Shema inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca u jednoj točki, poprečni presjek - lijevo, spiralna putanja vertikalnog pomaka Δz i S_C - desno [23]

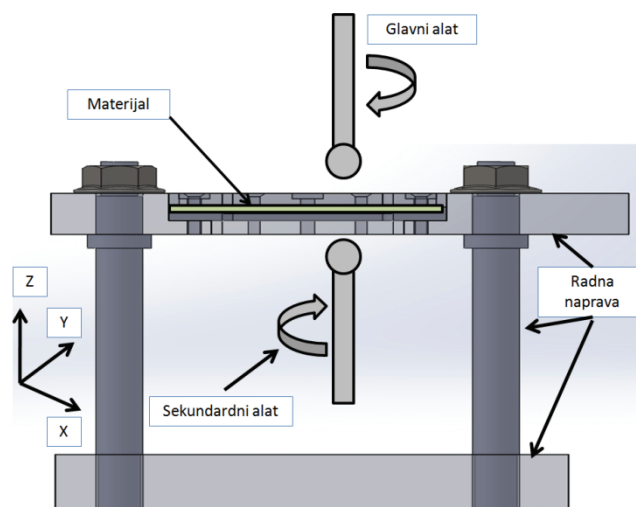
Prema slici 2.1: t_0 - početna debljina lima, t_f - nova stanjena debljina lima, Δz - vertikalni pomak alata u z - osi, ω - kutna brzina, α - kut spuštanja alata, S_C - odabrani razmak između horizontalnih prolaza alata, v_T - posmak. Inkrementalno oblikovanje u dvije točke (TPIF) [22], sadrži djelomični ili potpuni kalup koji podržava metalni lim tijekom obrade, lim se istovremeno deformira u dvije točke [22, 23, 24]. Osim toga, moguće su i druge izvedbe inkrementalnog oblikovanja. Na slici 2.2 prikazano je „Inkrementalno oblikovanje s neodređenim potpornim alatom“. Na slici 2.3. „Inkrementalno oblikovanje sa specijalnim oblikom (matricom) potpornog alata“. Na slici 2.4 inkrementalno oblikovanje se izvodi dva ista alata u međusobnom djelovanju, takvo oblikovanje naziva se „Inkrementalno oblikovanje s dva identična alata u međusobnom djelovanju“.



Slika 2.2 Inkrementalno oblikovanje s neodređenim potpornim alatom [22]

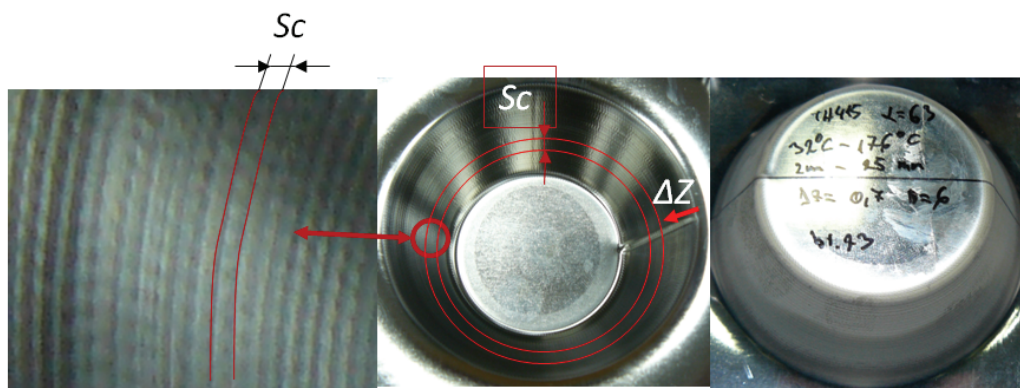


Slika 2.3 Inkrementalno oblikovanje sa specijalnim oblikom potpornog alata [22]



Slika 2.4 Inkrementalno oblikovanje u dvije točke s dva identična alata u međusobnom djelovanju [22]

Inkrementalno preoblikovanje u jednoj točki temelji se na univerzalnom sferičnom alatu, koji se pomiče CNC kontroliranim pomacima alata [25]. Proizvod se izrađuje deformiranjem ploče lima sloj po sloj, a tijekom oblikovanja nema potpornog alata na stražnjoj površini metalnog lima. Sferični alat koji opisuje konture na horizontalnoj ravnini, tada čini vertikalne pomake Δz i time opisuje sljedeću konturu i tako sve dok se ne završi operacija. Kvaliteta površine ovisi o odabranom razmaku S_C između kontura i vertikalnog pomaka alata Δz , slika 2.5. U tijeku obrade dolazi do smanjenja debljine lima koje ovisi o odabranom alatu i vertikalnog pomaka alata Δz . Konačan oblik proizvoda definiran je pomacima alata, radna naprava za vrijeme obrade miruje. Stroj može biti programiran da tijekom obrade poveća ili smanji udaljenost između horizontalnih prolaza alata S_C ili pomaka alata Δz , stvarajući pri tome površinu proizvoda sa većom ili manjom hrapavošću.



Slika 2.5 Shema opisivanja konture uzorak broj 23, $\Delta z = 0,7$, $S_C = 0,25$ mm

Strojevi koji se upotrebljavaju u obradi tehnologijom inkrementalnog oblikovanja mogu biti robotske ruke, CNC obradni centri, na slici 2.6, ili specijalni strojevi prema unaprijed definiranim specifikacijama (veličina izratka, debljina obrade čelika ili aluminija). Postoje tvrtke koje se bave izradom specijalnih strojeva za proces inkrementalnog oblikovanja. Specijalni strojevi se proizvode ovisno o veličini ulaznog lima s maksimalnom veličinom ploče lima 2500 x 1750 mm i mogućnost vertikalnog pomaka alata Δz od 600 mm, za debljinu čelika od 0,6 do 3,2 mm, aluminija od 0,5 do 5 mm [25].



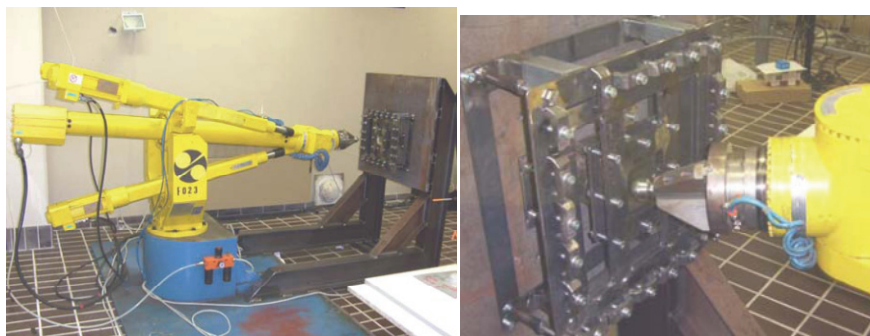
Slika 2.6 Radna naprava postavljena na glodalicu Bridgeport VMC 800, jedan od strojeva korišten u istraživanju

2.2. Razvoj SPIF tehnologije

Tehnologija inkrementalnog oblikovanja razvila se iz tehnologije kovanja na batu i rotacijskog oblikovanja. Danas se u svrhu inkrementalnog oblikovanja upotrebljava i tehnologija oblikovanja mlazom čeličnih kuglica a postoji i tehnologija inkrementalnog oblikovanja vodenim mlazom.

2.2.1. Kovanje na batu (Hammering)

Kovanje na batu jedan je od najstarijih postupaka oblikovanja. Tradicionalno se obrada kovanjem na batu vrši drvenom matricom i čekićem. Upotreba robota u SPIF procesu temelji se na tehnologiji kovanja na batu, slika 2.7 [27 - 30]. Alat udara po ploči koja je spojena u okvir te se giba po kružnoj putanji. Alat se prilikom kontakta ne pomiče po x ili y - osi već samo po z - osi. Na taj način nema razvlačenja i zakretanja materijala već postoji samo udaranje alatom.

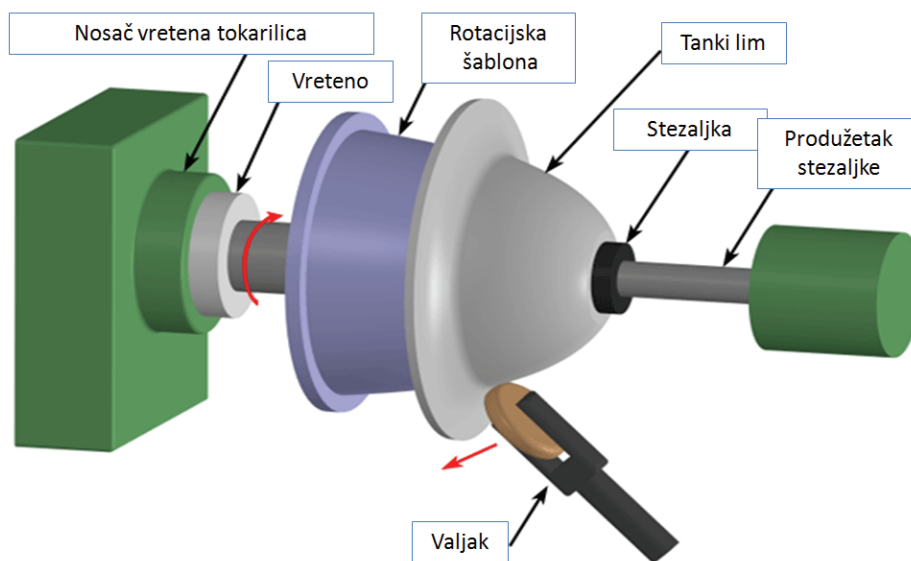


slika 2.7 Upotreba robota u SPIF procesu [28]

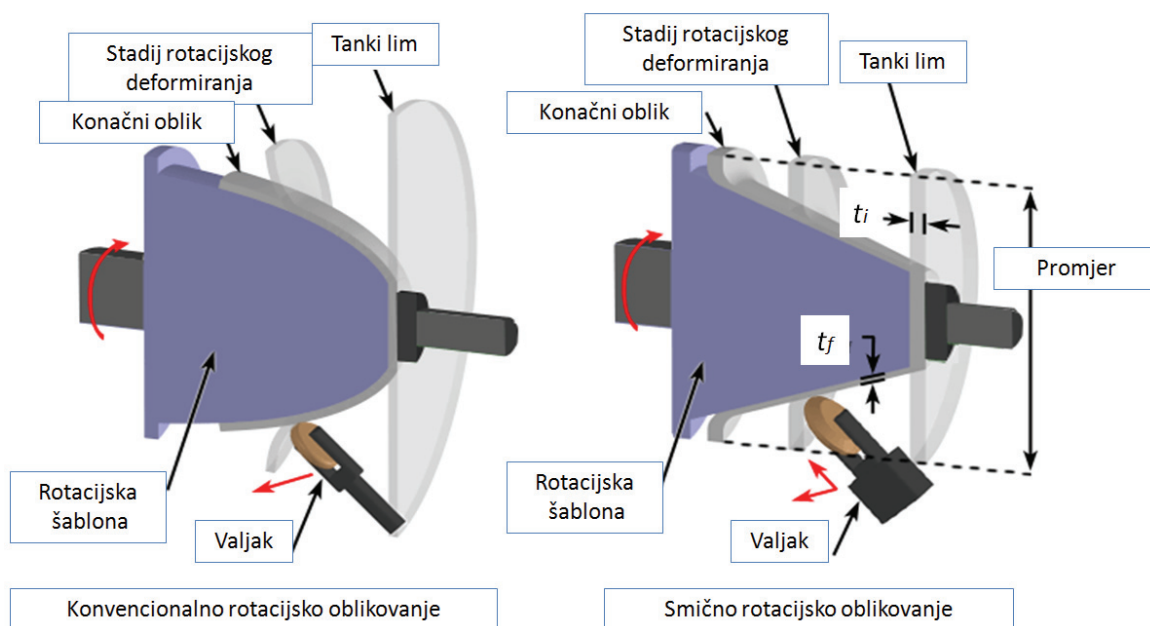
2.2.2. Rotacijsko oblikovanje deformiranjem (Spinning)

Rotacijsko oblikovanje deformiranjem je vrlo važna tehnologija koja se bazira na inkrementalnom oblikovanju te se na temelju te tehnologije i razvilo inkrementalno oblikovanje u jednoj točki. Često se provode usporedbe tehnologije rotacijskog oblikovanja deformiranjem i SPIF procesa prilikom izrade proizvoda [1, 2, 31]. Rotacijsko oblikovanje deformiranjem je proces izrade proizvoda kod kojih se ploča lima određenog promjera postavi na šablonu. Tako postavljena ploča lima zarotira se oko svoje osi zajedno sa šablonom. Pri tome se vrši pritisak na ploču lima posebnim valjcima dok izradak ne poprimi oblik temeljen na upotrijebljenoj šablوني (traženu geometriju), slika 2.8. Najčešće se pritisak vrši inkrementalno, postepeno se vrši pomak specijalnim alatom (valjak) koji konstantno deformira lim. Kao u procesu inkrementalnog oblikovanja dolazi do postepenog deformiranja koje može biti kontrolirano. Na taj način se proizvode rotacijski simetrični obratci kao što su lonci, satelitski tanjuri, prednji zašiljeni dijelovi raketa, muzički instrumenti (trube) i slično. Postoje specijalni CNC strojevi za rotacijsko

oblikovanje, a moguće je za tu tehnologiju deformiranja koristiti i univerzalnu ili CNC tokarilicu. Može se odmah reći da je rotacijsko oblikovanje jedan od inkrementalnih procesa oblikovanja materijala koji kombinira vlačno - tlačna opterećenja kako bi se postigao konačan oblik. Ulazni materijal ima oblik diska koji ne utječe na potrošnju šablone pa se za male serije kao obradna šablona mogu koristiti i mekši materijali poput drva ili plastike. Za velike proizvodne serije koriste se šablone od čelika, manje je trošenje šablone. Postoje dvije različite metode rotacijskog oblikovanja deformiranjem koje se spominju kao konvencionalno rotiranje i smično rotacijsko oblikovanje deformiranjem, slika 2.8 i 2.9.



Slika 2.8 Prikaz rotacijskog oblikovanja [27]



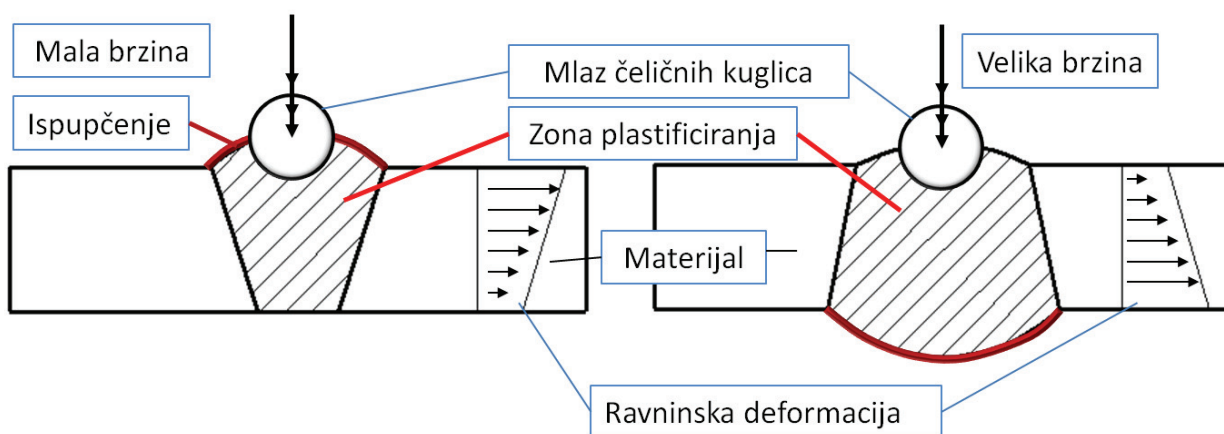
Slika 2.9 Prikaz usporedbe konvencionalnog i smičnog rotacijskog oblikovanja [27]

Kod konvencionalnog rotacijskog oblikovanja valjak gura tanki lim sve dok on ne poprimi oblik rotacijske šablone. Rezultat je proizvod sa promjerom ulazne ploče lima koji je manji od

konačnog promjera ploče lima, ali debljina lima je konstantna što nije slučaj kod smičnog rotacijskog oblikovanja. Kod smičnog rotacijskog oblikovanja dolazi i do pritiska valjkom u materijal što rezultira većim rastezanjem materijala preko rotacijske šablone. Na taj način promjer može biti isti kao kod ulaznog materijala ali debljina oblikovanog lima je manja. Smično rotacijsko rastezanje razvijeno je kako bi se lakše deformiralo deblje limove. Tangencijalna naprezanja su zanemariva u rubnim područjima budući da je deformacija smična. U ovom idealnom smičnom oblikovanju nema radijalnih pomaka materijala [31]. Ovim procesima moguće je vršiti oblikovanje lima debljine od 0,4 do 25 mm, a veličine promjera ulaznog lima kreću se od 3 mm do 10 m [32].

2.2.3. Oblikovanje mlazom čeličnih kuglica (Shot peening)

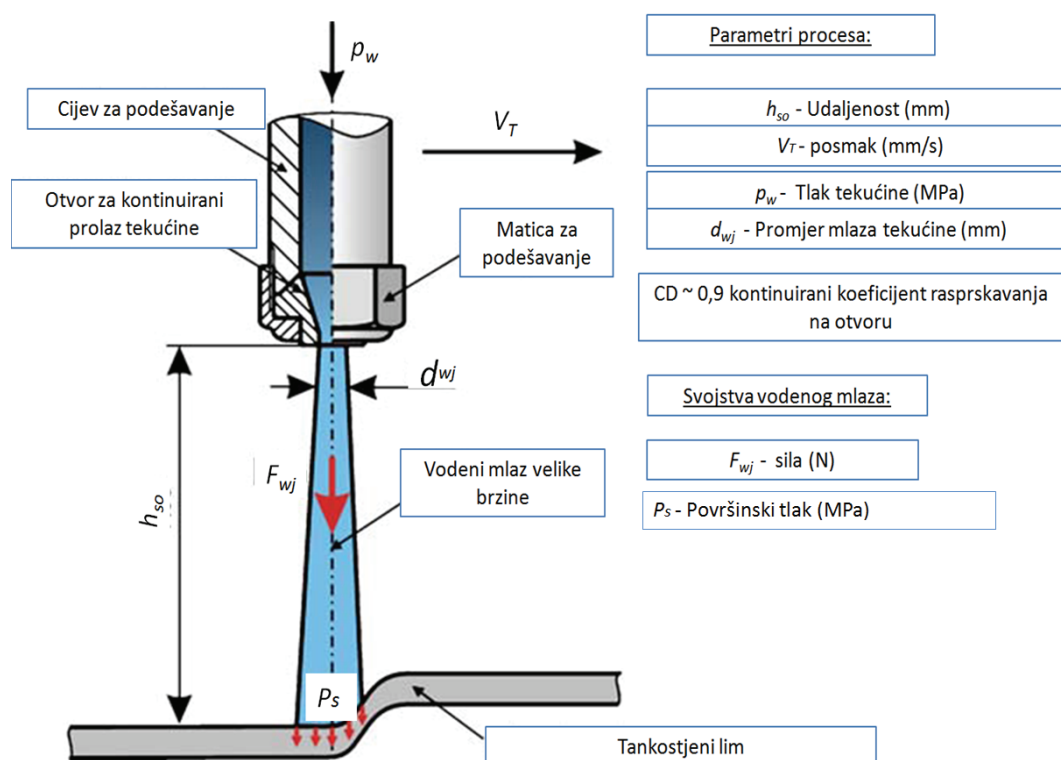
Oblikovanje mlazom čeličnih kuglica, prikazano na slici 2.10, jest tehnologija koja se koristi za inkrementalno oblikovanje [33, 34]. Oblikovanje mlazom čeličnih kuglica je proces obrade u kojemu metalne kuglice velikom brzinom udaraju na određenu površinu. Materijal se pri tome deformira te se pojavljuje udubljenje. Postoje dva načina oblikovanja: konvencionalno i oblikovanje u kombinaciji sa oblikovanjem rastezanjem. Velika brzina mlaza čeličnih kuglica oblikuje konkavne površine, a mala brzina mlaza oblikuje konveksne površine. Provede se istraživanja u kojima je dokazano da je moguće stvarati konkavne i konveksne površine koristeći dvostrano oblikovanje mlazom čeličnih kuglica [33]. Dobrim balansom upotrijebljenih kinetičkih energija moguće je ostvariti specijalna zaobljenja na izratku.



Slika 2.10 Tehnologija oblikovanja mlazom čeličnih kuglica [34, 35]

2.2.4. Inkrementalno oblikovanje vodenim mlazom

Oblikovanje limova vodenim mlazom relativno je nova tehnologija koja je svoju mogućnost primjene našla i u inkrementalnom procesu oblikovanja lima, slika 2.13 [35 - 39]. Vodeni mlaz se obično koristi u svrhu hladnog odrezivanja još od 1980-ih godina. Provedena istraživanja iz inkrementalnog oblikovanja vodenim mlazom¹ pokazala su da se sila jednoliko raspoređuje između alata i lima koji se oblikuje, [35 - 39]. Sila kojom se oblikuje automatski u realnom vremenu tijekom obrade mijenja tlak tekućine kako bi se uspješno oblikovao proizvod. Vodeni mlaz ima karakteristiku da se prilagođava površini koju obrađuje i uvijek djeluje okomito na samu površinu.



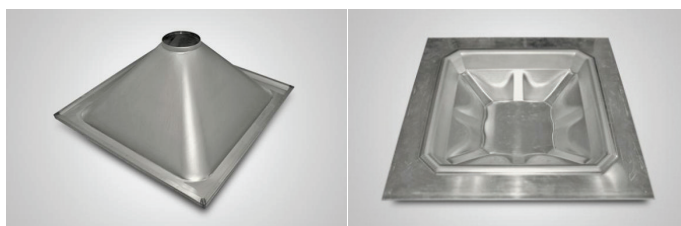
Slika 2.11 Inkrementalno oblikovanje vodenim mlazom [36]

¹ Inkrementalno oblikovanje vodenim mlazom - water jet incremental sheet metal forming -WJISMF

2.3. Pregled dosadašnjih istraživanja SPIF tehnologije

2.3.1. Oblik gotovih proizvoda tehnologijom SPIF

U kontekstu izrade proizvoda konstantno se javlja potreba za održivom proizvodnjom koja će imati ekološki prihvatljive materijale, gdje će utrošak materijala biti mali, energetski efikasan, sa isplaniranim ciklusom života tog proizvoda. Iz tog razloga pojavila se je potreba za tehnologijom koja oblikuje lim bez upotrebe kompliciranih alata. Za prvo provedeno istraživanje inkrementalne tehnologije oblikovanja u jednoj točki citira se Mason (1978. godina) [2, 13]. Mason je prvi definirao SPIF tehnologiju u kojoj spomenuo da je minimalni broj koordinata potreban za opis oblika površine jednak broju tri (x, y i z - osi). Zatim da je oblik određene površine moguće je proizvesti sa sferičnim alatom kojemu se mogu kontrolirati x, y i z - osi. Pri tome alat će se kretati po određenoj površini na način da je deformira do traženog oblika [2]. Inkrementalno oblikovanje ima mogućnost revolucionarnog utjecaja na obradu deformiranjem, moguće je tu tehnologiju primijeniti na različitim uređajima koji već postoje u tvornicama, CNC obradni centri i roboti. Ulazni materijal može biti unaprijed deformiran što značajno proširuje mogućnosti oblikovanja, budući da se u drugim tehnologijama deformiranja zahtjeva nedeformirani ulazni oblik materijala. Kod već deformiranih ulaznih materijala valja pratiti promjene deformacija kako bi se ispitala sposobnost dodatnog oblikovanja takvog lima. Deformacije se najčešće mjere i prate tehnologijom postavljanja mreže kružnica na ispitivani lim i mjerenjem promjene kružnica nakon deformiranja, rezultati se ispisuju na dijagram sposobnosti oblikovanja [40]. Na slici 2.12 prikazani su tipični proizvodi dobiveni SPIF tehnologijom, konus za odvod plinova, sudoper [41]. Na slici 2.13 prikazana je upotreba u medicini, a na slici 2.14 u automobilskoj industriji [41, 42].



Slika 2.12 Proizvodi za provođenje plinova, sudoperi, [41]



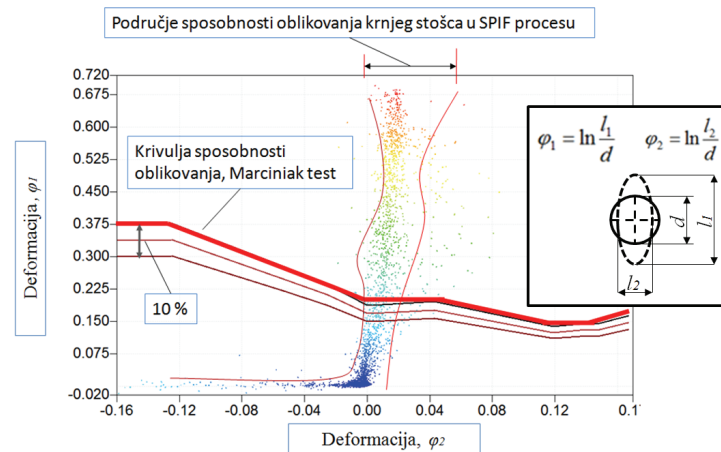
Slika 2.13 Primjena u medicini, metalne ploče za oštećene kosti lubanje [42]



Slika 2.14 Primjena u automobilskoj industriji, deformiran prednji poklopac motora automobila [25]

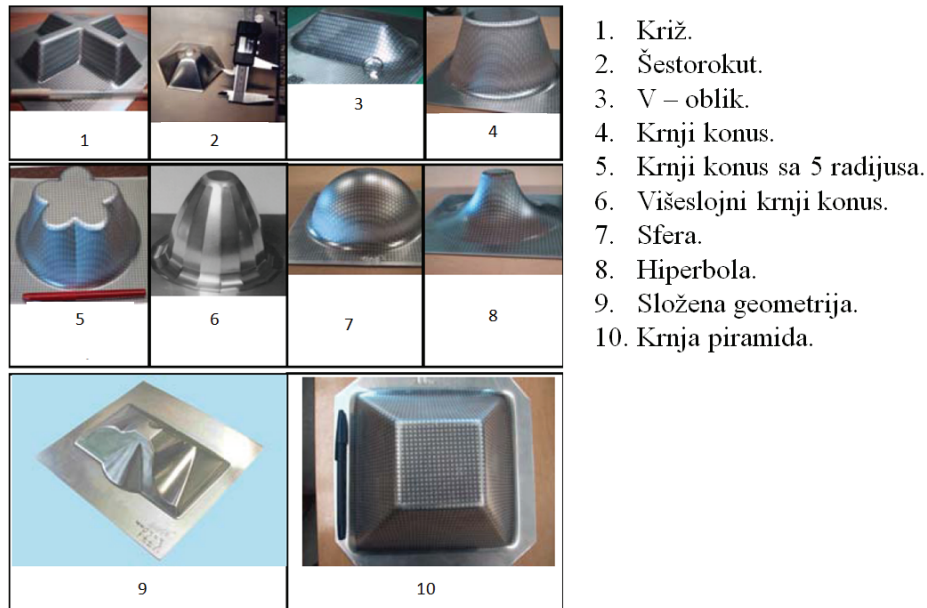
2.3.2. Sposobnost oblikovanja deformiranjem u SPIF procesu

Istraživanja potvrđuju veću deformabilnost pri oblikovanju materijala deformiranjem SPIF - procesom u odnosu na proces dubokog vučenja, [40 - 46]. Na slici 2.15 prikazana je usporedba sposobnosti inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca u jednoj točki i ispitivanje sposobnosti oblikovanja prema Marciniak testu.

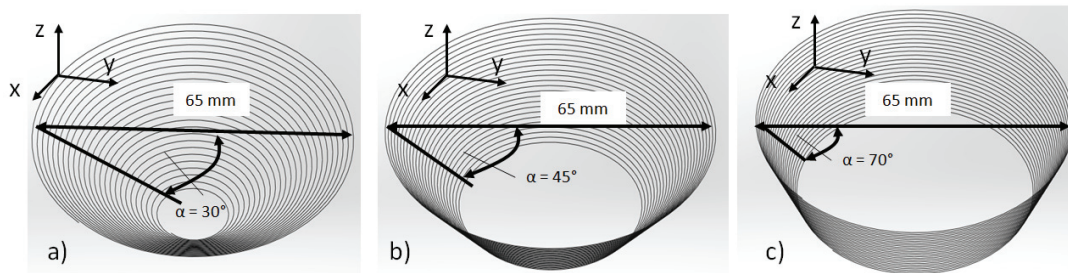


Slika 2.15 Dijagram sposobnosti oblikovanja Marciniak test i krnji stožac SPIF proces, φ_1 i φ_2 logaritamske deformacije [6]

Inkrementalno oblikovanje pogodno je za deformiranje već ranije deformiranih oblika što kod drugih metoda nije uvijek moguće. Pri određivanju sposobnosti oblikovanja u inkrementalnom procesu koristi se nekoliko ispitnih uzoraka, slika 2.16. Jedan od parametara koji se koristi za određivanje sposobnosti oblikovanja je i točka nastanka pukotine pri izradi najvećeg kuta krnjeg stošca. Krnjem stošcu se mijenja kut dok se ne pojavi kut pri kojemu dolazi do pojave pukotine. Takvi eksperimentalni testovi započinju s kutom od $\alpha = 10^\circ$ te se povećavaju do točke pucanja npr. $\alpha = 70^\circ$. Na slici 2.17 prikazana je putanja izrade kuta od $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ i $\alpha = 70^\circ$, ovisno o odabranim parametrima obrade i vrsti lima doći će do pucanja pri jednom od kutova.

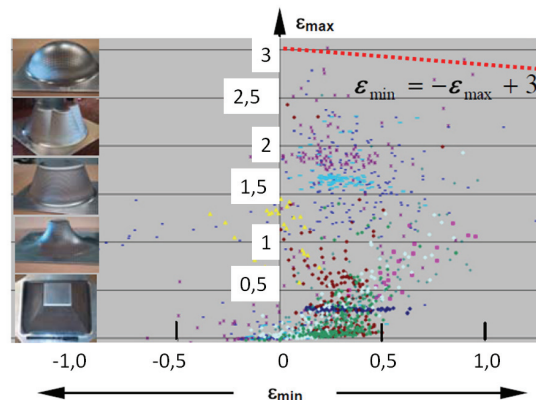


Slika 2.16 Vrste ispitnih uzoraka upotrebljavanih za izradu dijagrama sposobnosti oblikovanja u SPIF procesu [6]



Slika 2.17 Promjena kuta u ispitivanju krnjeg stošca: a) putanja za postizanje kuta od 30°, b) putanja za postizanje kuta od 45° i c) putanja za postizanje kuta od 70°

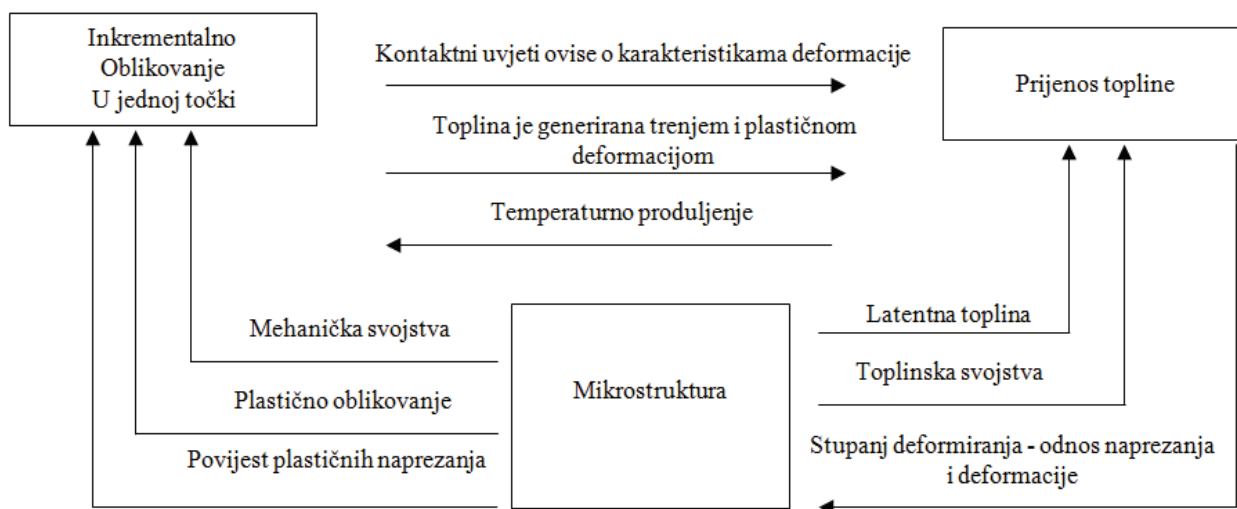
Taj test se određuje za zadani materijal a maksimalni kut vučenja predstavlja jednu od osnovnih granica sposobnosti oblikovanja inkrementalnim oblikovanjem. Provođe se istraživanja i sa kombiniranjem različitih ispitnih oblika (krnji stožac, krnja piramida, sfera, hiperbola idr.) istoga materijala, slika 2.20 [6, 47]. Takav grafički prikaz dan je na slici 2.18 gdje su za jedan materijal AA 3003-0 debljine 1,21 mm ispitivani razni oblici.



Slika 2.18 Dijagram sposobnosti inkrementalnog oblikovanja - materijal AA 3003-0, debljina 1,21 mm, bojama su označeni različiti ispitni uzorci [6, 47, 48]

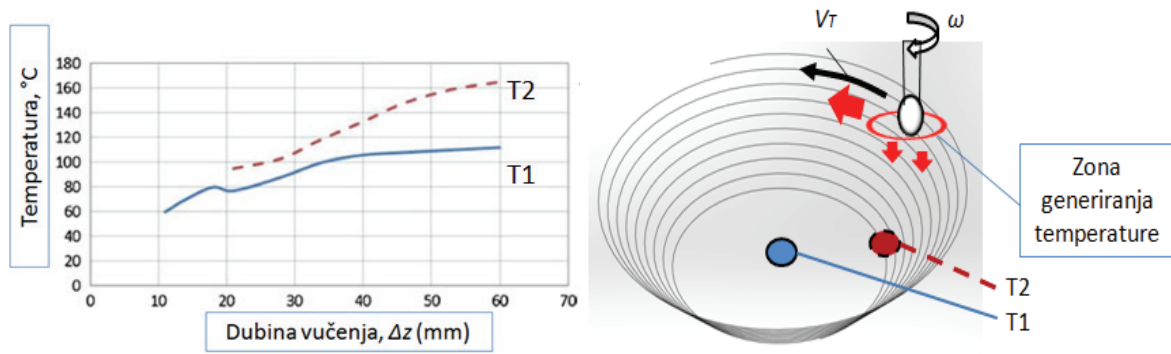
Za izradu dijagrama sposobnosti oblikovanja ispisuju se mreže kružnica na lim te se deformacija mjeri na temelju promjene oblika kružnice [40]. Spajanjem točaka logaritamskih deformacija φ_1 (ε_{max}) i φ_2 (ε_{min}) izrađen je dijagram sposobnosti oblikovanja za svaki od prikazanih oblika, slika 2.18. Ponašanje materijala i maksimalna sposobnost oblikovanja kod asimetričnog inkrementalnog oblikovanja može se definirati prema maksimalnoj vrijednosti kuta vučenja α_{max} [24]. Prema raznim istraživanjima utvrđeno je da na kut vučenja najviše utječe debljina stjenke obratka, dok smanjeni utjecaj imaju radijus alata R_{al} i udaljenost horizontalnih prolaza između alata S_C . Često se provodi i test utiskivanja u dva vertikalna pomaka alata Δz u svrhu predviđanja ponašanja materijala u SPIF procesu. U literaturi [43] u prvom vertikalnom pomaku alata $\Delta z = 3$ milimetra i prema odabranim parametrima pokreće se 60 milimetara po stegnutom ispitnom uzorku. U drugom vertikalnom pomaku alata $\Delta z = 6$ mm, alat se pokreće 60 milimetara po već oblikovanoj liniji na ispitivanom uzorku. Ponovljivost se rezultata osigurava stezanjem ploče moment ključem.

U ovome istraživanju ispitat će se sposobnost inkrementalnog oblikovanja za zadane materijale TH415 i TS230. Uz grafički prikaz sposobnosti oblikovanja potrebno je pratiti i temperaturne promjene budući da one utječu na povećanje sposobnosti oblikovanja, prikazano na slici 2.19, 2.20 i 2.21 [49]. Kako se alat kreće po zadanoj putanji dolazi do povećanja temperature u kojoj se zrna produljuju i rastu [50].



Slika 2.19 Interakcija parametara u procesu plastičnog oblikovanja [50]

U ovome provedenom istraživanju na tankstjenim limovima TH415 i TS230 primijećeno je povećanje sposobnosti oblikovanja pri rastu temperature. Još jedan važan parametar koji se javlja jest smanjenje temperature zbog prekomjernog stanjivanja lima, prije nastanka pukotine. U tom pogledu primijećeno je da se promjene sile i temperature poklapaju i mogu koristiti za optimiranje procesa [49].



Slika 2.20 Temperatura krnjeg stošca mjerena termoparima T1 i T2 za materijal AA6082 - T6, kut $52,5^\circ$ [49]

2.3.3. Materijal

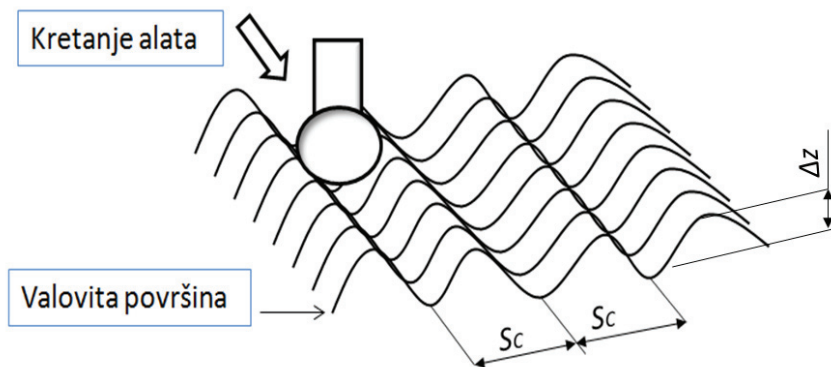
Česta su istraživanja o sposobnostima i nedostacima postojećih i inovativnih materijala na tržištu. Materijali koji se istražuju u inkrementalnom oblikovanju u jednoj točki jesu tanke ploče za koje nije potrebna velika sila utiskivanja. Najčešće se ispituju materijali debljine 1 do 2 mm npr. 1060 aluminij [7], čelik npr. DC04 (W. nr. 1.0338) [6], termoplast PP (polipropilen) [51]. Tablica 2.1 prikazuje materijale koji se najčešće istražuju kao i pripadajuće debljine lima. U pregledanoj literaturi aluminij debljine ispitivane ploče od 0,3 do 0,5 mm je pokazao veliku sposobnost oblikovanja postizanjem kutova i do 80° [49]. Autor nije pronašao istraživanja vezana za inkrementalno oblikovanje tankostjenog lima.

Tablica 2.1 Prikaz istraživanih materijala drugih autora

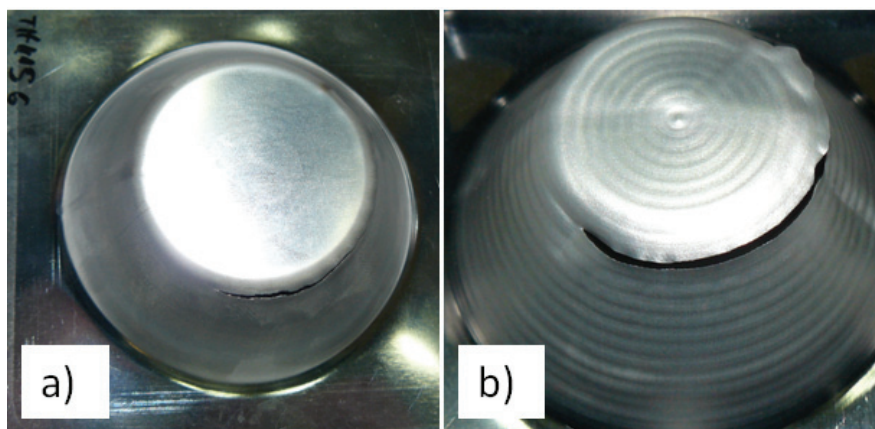
Literatura	Materijal	Debljina lima
[6]	DC04 (W. nr. 1.0338)	1 mm
[7]	1060 aluminij	1 mm
[12]	AZ31, Al-1010	1,5 mm
[12]	Polypropylene	3 mm
[13]	DC05 (W. nr. 1.0338)	1 mm
[13]	Al 3003	1 mm
[15]	AA 1050-O	1 mm
[21, 54]	TiAl6V4	1 mm
[22]	DC04 (W. nr. 1.0338)	0,7 mm
[24]	AlMn 99.8	1 mm
[44]	Al6082-T6	1 mm
[44]	AlMgSc	0,5 mm; 3,2 mm
[49]	Aluminij	0,3 mm
[50]	AA1050-O, AA1050-H24, AA6082-T6	1 mm
[52]	AA5052	1 mm
[53]	Titan, magnezijevu slitinu AZ31	1 mm
[55]	CP Ti	1 mm
[56]	AA3003-O	1,2 mm

2.3.4. Površinska hrapavost

Konačno stanje površine u SPIF procesu može se predočiti rebrastim utorima, slika 2.21. Alat ulazi u materijal i uzrokuje deformaciju utiskivanjem na način da stvara jednu utisnutu liniju na površini materijala, utor. Kontinuiranim djelovanjem alata formira se površina koja se sastoji od niza utora koji su međusobno udaljeni ovisno o odabranom horizontalnom pomaku S_C između prolaza alata. Površina koja se formira ovisi i o vertikalnom pomaku alata u z - osi Δz i radijusu alata R_{al} , slika 2.22. Jedan od glavnih problema kod inkrementalnog oblikovanja jest brzina obrade. Povećanje brzine obrade ostvaruje se povećanjem parametara Δz , S_C i R_{al} , izrada većih utora, što utječe na odstupanje od geometrije traženog oblika [24]. Dodatan problem pri izradi proizvoda određene kvalitete predstavlja i utjecaj alata na materijal. Alat zbog svojih nesavršenosti, do kojih može doći tijekom jednog obradnog ciklusa, može prouzrokovati ogrebotine i nepredvidive rezove u tijeku obrade ili u narednoj obradi. Zato alati trebaju biti pregledani i po potrebi očišćeni između obrada, a najjednostavnije je polirati prije svake obrade direktno na CNC stroju.



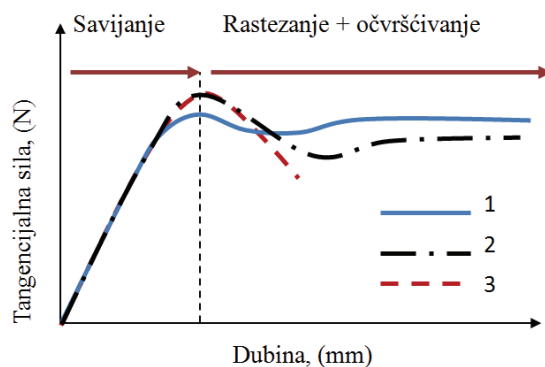
Slika 2.21 Valovitost konačne površine formirane SPIF procesom



Slika 2.22 Površinski izgled ispitivanog materijala TH415: a) udaljenost između horizontalnog prolaza alata $S_C = 0,25$, vertikalni pomak alata u z - osi $\Delta z = 0,25$ mm, b) $S_C = 1$ mm, $\Delta z = 1$ mm

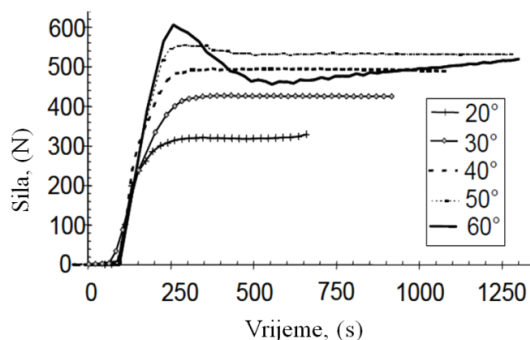
2.3.5. Sila

U SPIF procesu jedan od važnijih parametara obrade je veličina sile koju je potrebno primijeniti kako bi se lim deformirao. Sila koja se javlja na alatu može se pratiti postavljanjem mjernih traka i na taj način se može pratiti kritična sila oblikovanja u procesu, [6]. Postoji mogućnost postavljanja piezoelektričnog senzora ispod ploče koja je stegnuta radnom napravom te je na bazi ostvarenog kuta moguće izmjeriti normalnu (okomita) i tangencijalnu komponentu sile [15]. Sila najviše ovisi o debljini lima, a zatim o kutu u kojemu alat dolazi u kontakt sa materijalom [15]. Pri tom je moguće utvrditi tri trenda ponašanja sile, slika 2.23: 1 - Sila nakon što se postigne maksimalnu vrijednost ostaje konstantna, dolazi do pojave očvršćivanja materijala koji kompenzira stanjivanje lima, 2 - vrhunac u kojemu dolazi do točke u kojoj je stanjivanje lima pretjerano tijekom početne faze rastezanja i 3 - trend u kojemu se debljina lima smanjuje do pucanja [3, 6, 13]. Istraživanja se kod inkrementalnog oblikovanja u dvije točke, slika 2.26, bave utjecajem sile, pravilnim pozicioniranjem alata, te je utvrđeno da se može postići povećanje kuta i do 12,5 % [3].



Slika 2.23 Tri trenda promjene tangencijalne sile, 1 - sila je konstantna, 2 - došlo je do pretjeranog stanjivanja u početnoj fazi obrade, 3 - debljina se smanjuje do pucanja [15]

Na slici 2.24 prikazano je ponašanje sile u odnosu na odabrani kut krnjega stošca, ispitivani materijal je aluminij AA3003-0 debljine 1,21 mm, vertikalni pomak alata $\Delta z = 0,5$, radijus alata 10 mm, posmak 2000 mm/min [24].



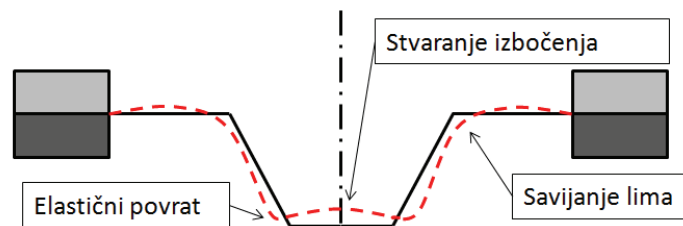
Slika 2.24 Promjena veličine sile pri izradi kuta krnjeg stošca

Sila u procesu pri kojoj materijal naglo počinje popuštati, nastaje lom, može se smatrati kritičnom silom u inkrementalnom oblikovanju. U nekim istraživanjima postavljeni su matematički izrazi koji na temelju mehaničkih svojstava materijala daju dobru pretpostavku kritične sile ispitivanog materijala. Kod ispitivanja krnjeg stošca kut izrade ima veliki utjecaj na promjenu veličine kritične sile u SPIF procesu. Prema slici 2.24 moguće je vidjeti utjecaj promjene kuta $\alpha = 20^\circ$ do 60° , pri izradi krnjeg stošca iz aluminija. Poznavanjem utjecaja promjene kuta na kritičnu silu, moguće je mijenjati nagib alata s ciljem izrade složene geometrije proizvoda. Promjenom kuta postiže se ravnoteža i materijal se ne lomi. Ravnotežu je moguće održavati ukoliko se kontinuirano prati sila u procesu i preventivno reagira u trenucima postizanja kritične sile. Osim promjenom kuta obrade, postoji i mogućnost smanjenja promjera alata, čime se mijenja kut i vertikalni pomak alata Δz , a kritična se sila popuštanja materijala mijenja. Moguće je izraditi krnji stožac sa promjenom kuta α [15]. Na kritičnu silu utječe i udaljenost između horizontalnog prolaza alata S_C . U slučaju da je udaljenost S_C mala dolazi do pretjeranog deformiranja već deformiranih slojeva što izaziva nekontroliranu promjenu ponašanja kritične sile. Iz tog razloga kako bi se postavio pouzdan SPIF proces deformiranja potrebno je poznavati udaljenost S_C koja omogućuje praćenje kritične sile. U istraživanju [15] utvrđen raspon minimalne udaljenosti $S_C = 0,3 - 0,5$ mm potrebna da se izbjegne nekontrolirano ponašanje sile za aluminij (AA 1050-0) debljine 2 mm. U tom istraživanju je došlo do pojave kritične sile na 28 mm postignute dubine krnjeg stošca, kut obrade $\alpha = 70^\circ$. Promatranjem ponašanja sile utvrđena je kritična sila, trenutak popuštanja materijala na dubini od 26 mm s alatom promjera 18 mm i vertikalnom pomaku alata pomakom $\Delta z = 0,3$ mm. Promjenom promjera alata sa 18 na 12 mm i promjenom vertikalnog pomaka alata $\Delta z = 0,3$ na $\Delta z = 1$ mm postignuto je veće iskorištenje materijala sa konačnom dubinom od 40 mm, stanjivanje lima je iznosilo 50 % tj. sa 2 mm lim se stanjio na 1 mm. U ovome istraživanju ispitati će se kritična sila za odabrane tankostjene limove TH415 i TS230 te udaljenost između prolaza alata S_C . Parametri će se mijenjati kako bi debljina lima ostala konstantna.

2.3.6. Točnost proizvoda

Geometrijsku grešku definira udaljenost između idealne i ostvarene geometrije. Odstupanja mjera u industriji za proizvode tankoga lima kreću se $\pm 0,2$ mm od traženih dimenzija proizvoda, a inkrementalnim oblikovanjem moguće je zadovoljiti točnost odstupanja traženih dimenzija proizvoda od $\pm 0,3$ mm, [57, 58]. Geometrijska točnost u procesu inkrementalnog oblikovanja deformiranjem ovisi o stezanju lima pomoću radne naprave, ponašanju materijala za vrijeme obrade, oslobađanju lima iz radne naprave i konačnu točnost završnog proizvoda. Pravilno stezanje lima u radnu napravu važno je kako bi se osiguralo ponovljivost obrade. Lim najčešće debljine od 1 mm steže se sa desetak i više vijaka ravnomjerno po obrubu stezne naprave.

Nepravilno stezanje, popuštanje jednog ili više vijaka uzrokuje promjene u konačnim dimenzijama proizvoda. Iz tog razloga važna je kontrola stezanja i stezanje lima po njegovim rubovima jednolikom silom. Zadatak sile stezanja je da se spriječi iskakanje materijala iz naprave za vrijeme obrade i osiguranje ostvarivanja ponovljivosti konačnih dimenzija proizvoda. Za vrijeme obrade dolazi do početnog savijanja lima u području utiskivanja alata, javlja se i elastični povrat na kraju obrade prestankom utiskivanja alata što rezultira stvaranjem izbočenja, slika 2.25. Početno savijanje lima je moguće kompenzirati potpornom pločom.



Slika 2.25 Odstupanje konačne geometrije od zadanog oblika [59]

Lim se iz stezne naprave oslobađa na način da se ravnomjerno otpušta sila kako bi se smanjio utjecaj elastičnog povrata. Na kraju obrade odrezuje se višak materijala što može dovesti do promjene dimenzije proizvoda zbog elastičnog povrata ali i zbog lošeg odrezivanja.

Jedan od problema inkrementalnog oblikovanja je, da se deformacije ne ograničavaju samo na područje alata i lima već dolazi i do sekundarnih deformacija koje manje ili više utječu na konačan izgled proizvoda. U procesu obrade stvaraju se mjesta očvršćenja koje utječu na točnost proizvoda. Te su točke rezultat deformacija djelovanja alata, stezanja radnom napravom te sekundarne deformacije procesa obrade. Postoje oblici kojima odgovara namjerno deformiranje lokalnih zona kako bi se postiglo njihovu geometriju i usmjerilo plastično tečenje materijala [7, 57]. Lokalne zone deformacije koje djeluju kao mjesta očvršćenja mogu se uzrokovati ciljanim izrezivanjem lima, namjernim stanjivanjem određenih zona na limu ili izrezivanjem rubova lima. Upotrebom deformiranih zona moguće je postići složenije geometrije te utjecati na funkcionalnost konačnog proizvoda [7, 57]. Proces inkrementalnog oblikovanja omogućuje ponovno deformiranje oblika proizvedenih konvencionalnim strojevima za deformiranje. Iz tog razloga upotrebljava se u svrhu ispravljanja grešaka u obliku već gotovih proizvoda.

2.3.7. Elastični povrat

Elastični povrat je dimenzijska promjena koja se nakon prestanka djelovanje sile kao posljedica zaostalih naprezanja. Kod inkrementalnog oblikovanja do elastičnog povrata dolazi nakon što je obrada završena, prilikom otpuštanja materijala iz stezne naprave i prilikom odrezivanja viška materijala. U slučaju da se obrada vrši u više faza, zbog prekida u obradi alat nema konstantan kontakt sa limom također dolazi do pojave elastičnog povrata pri svakom rasterećenju [60, 61].

Elastični povrat uzrok je geometrijske netočnosti konačnog proizvoda. Kod konvencionalnog oblikovanja pri pojavi elastičnog povrata koji značajno utječe na tražene dimenzije konačnog proizvoda alati se popravljaju mehanički (ukovnji kod kovanja na batu, matrice kod dubokog vučenja a isto tako zatvoreni alati za savijanje lima). Kao primjer može se spomenuti kombinacija žiga i ukovnja, koja se popravljaju kako bi se kompenzirao elastični povrat da bi se dobio točan proizvod. Takav popravak može uključivati i 5 do 10 pokušaja prije nego se postigne zadovoljavajuća geometrija proizvoda. U SPIF procesu dovoljno je mijenjati parametre na stroju npr. unosom podataka u "NC program" kojim je definirana putanja. Kod konvencionalnog oblikovanja moguće je određeno vrijeme držati lim stegnut između žiga i ukovnja kako bi se smanjio efekt elastičnog povrata. Stezanje radi eliminacije elastičnog povrata kod inkrementalnog oblikovanja nije moguće zbog oblikovanja u jednoj točki.

Problem predviđanja elastičnog povrata u SPIF procesu je kompleksan, jer podrazumijeva različite geometrijske oblike i uvjete obrade u kojima se materijal može naći. Elastičan povrat materijala na početku izrade oblika krnjeg stošca jedan je od razloga zašto u većini istraživanja obrada ne počinje iz središta stegnutog lima. Mnogo točnije dimenzije traženog oblika ostvaruju se utiskivanjem alata u najdalji rub ispitivanog uzorka (ovisi o dimenzijama radne naprave) i usmjeravanju obrade prema sredini krnjeg stošca. Udaljenost utiskivanja alata u stegnuti lim ovisi o promjeru alata, alat prolazi uz rub radne naprave.

3. Odabir materijala

U ovome se istraživanju ispitivanja sposobnosti oblikovanja tehnologijom SPIF provode na bijelim limovima TS230 (W. nr. 1.0371) i TH415 (W. nr. 1.0377). Bijeli se lim sastoji od hladno valjanog niskougljičnog čelika presvučenog kositrom koji se nanosi kontinuiranim elektrolitičkim postupkom. Pod crnim se limom² podrazumijeva se niskougljični ili meki čelični lim izrađen u pločama ili trakama, debljine 0,125 - 0,49 mm, sa sadržajem ugljika do maksimalno 0,13 % C [62]. U slučaju da je površina crnog lima pokrivena obostrano nanesenim tankim slojem kositra, minimalne čistoće 99,85 %, koji mu daje bijelu boju, tada se on naziva bijelim ili kositrenim limom³. Ako je površina crnog lima pokrivena obostrano nanesenim slojem kroma, koji mu daje sivu boju, tada se on naziva kromiranim limom. Ako jedna površina ima veću masu prevlake od druge, tada se takvi limovi nazivaju diferencijalni limovi. Bijeli limovi proizvedeni procesom koji uključuje hladno valjanje, a poslije toga žarenje, nazivaju se jednostruko stanjeni⁴, dok se oni koji se poslije žarenja ponovno hladno valjaju sa stupnjem redukcije i do 50 % nazivaju dvostruko stanjenim⁵ limovima. Na slici 3.1 prikazan je slijed postupaka u proizvodnji ambalažnog lima nakon toplog valjanja [20].

Tehnološka shema proizvodnje hladnovaljanih traka, koja slijedi proizvodnju toplovaljanih traka, u osnovi se sastoji od sljedećih proizvodnih postupaka, slika 3.1:

1. Dekapiranje u kadi s kiselinom.
2. Hladno valjanje.
3. Elektrolitičko čišćenje.
4. - 5. Toplinske obrade (žarenje u zvonu⁶ ili kontinuirano žarenje⁷).
6. Temper valjanje, jednostruko stanjivanje lima (SR).
7. Dvostruko stanjivanje lima (DR).
8. Nanošenje prevlake kositra.
9. Nanošenje prevlake polimera.
10. Odrezivanje.
11. Kontrola.
12. Pakiranje.

² Crni lim - blackplate

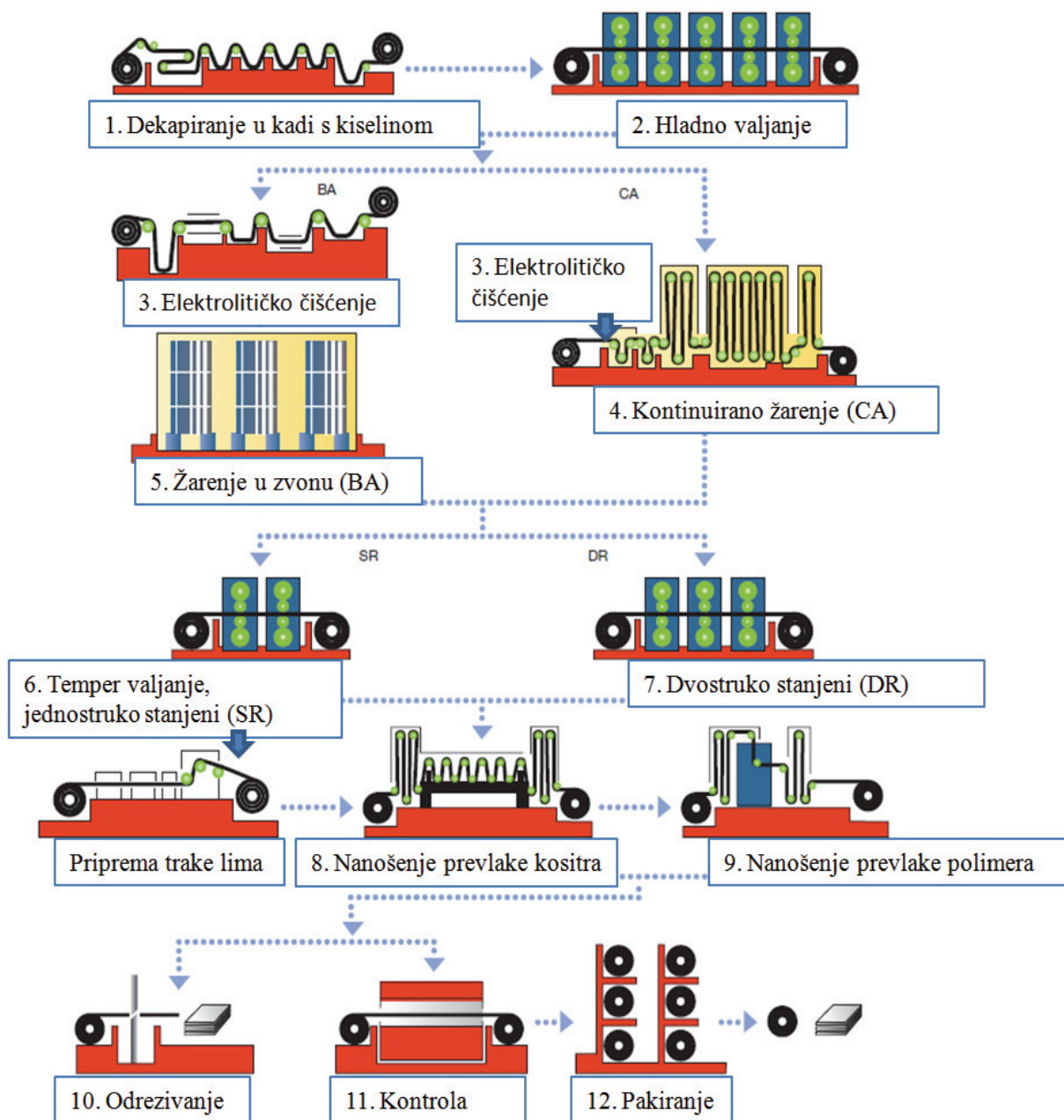
³ Kositreni lim - tinplate

⁴ Jednostruko stanjen - single reduced (SR)

⁵ Dvostruko stanjen - double reduced (DR)

⁶ Žarenje pod zvonom - batch (box) annealing (BA)

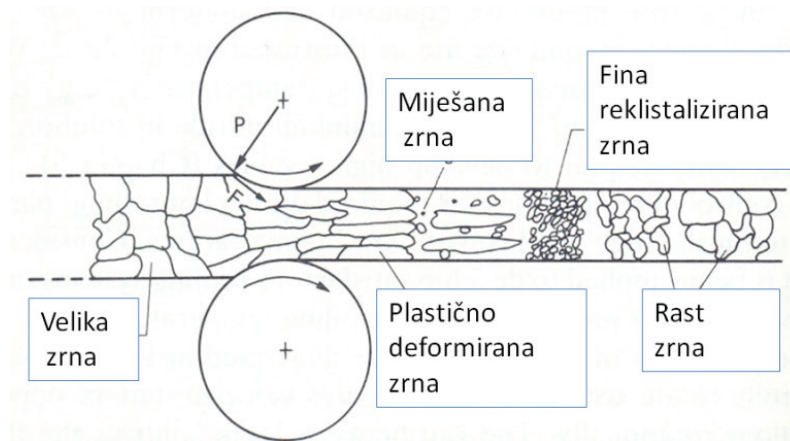
⁷ Kontinuirano žarenje - continuous annealing (CA)



Slika 3.1 Slijed postupaka u proizvodnji ambalažnog lima nakon toplog valjanja [20]

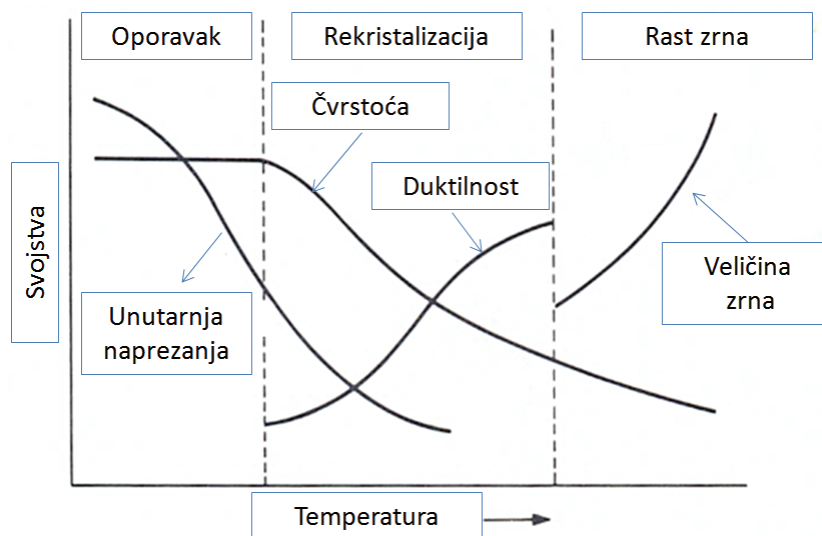
Postupak dekapiranja ima za cilj s površine trake ukloniti okside željeza tj. obgor. Dekapiranjem u kadi s kiselinom (obično HCl kiselina) postiže se razmjerno glatka i čista vanjska površina trake lima. Dekapiranje se koristi za skidanje okom nevidljivog površinskog sloja oksida. Za čelik se izvodi u otopini 30 - 50 g/l sumporne ili solne kiseline u trajanju od 30 do 60 sekundi, pri čemu istovremeno dolazi i do slabijeg nagrivanja osnovnog materijala [20]. U postupku hladnog valjanja debljina čelične trake može se smanjiti 85 - 90 %, čime se bitno povećava tvrdoća. Smatra se da 70 - 90 % kristalnih zrna prilikom hladnog valjanja dobije usmjerenu orijentaciju. Kristali se usitne skupa s usmjerenom orijentacijom zrna što uzrokuje očvršćenje deformiranog metala, a stupanj očvršćenja povećava se kontinuirano s deformacijom, slika 3.2.

Kako otpor prema deformaciji raste, tako duktilnost znatno opada pa hladnovaljani lim ima malu sposobnost plastične deformacije.



Slika 3.2 Usmjeravanje zrna toplom deformacijom, nakon rekristalizacije zrna u slučaju sekundarne rekristalizacije (vidi sliku) prestaju biti usmjerena [19]

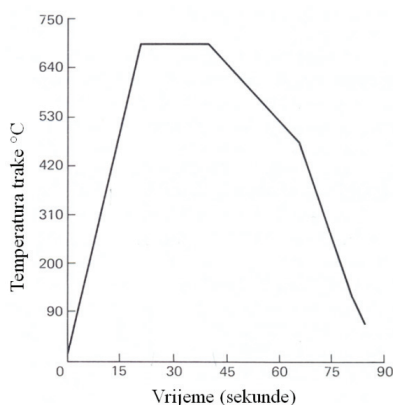
Za odstranjenje sredstva za podmazivanje i prljavštine te naknadno nanošenje prevlake kositra, trake se prije postupka toplinske obrade elektrolitički čiste i odmašćuju, prvo elektrolitičkom otopinom, a onda elektrolitom. Proces žarenja ima za cilj ukloniti sva naprezanja u hladnovaljanoj traci, odstraniti tvrdoću i poboljšati plastičnost, slika 3.3.



Slika 3.3 Pobljšavanje svojstava metalnog lima žarenjem [19]

Rekristalizacijsko žarenje može se obavljati kontinuirano prolazom trake kroz peć i tada govorimo o kontinuiranom žarenju (*engl.* continuous annealing - CA). Lim koji je kontinuirano žaren (CA) ima sitniju strukturu zrna i jednoličniji površinski raspored tvrdoće od lima koji se žari u kolotovima u zvonastim žarnim pećima. Postupak se temelji na prolazu jedne trake lima kroz dugu peć pri brzinama od 800 m/min. Različiti postupak utječe na različita mehanička svojstva dobivenih metala. Materijal je krući sa povećanim efektom elastičnog povrata materijala u odnosu na materijal dobiven pod zvonom. Vrijeme zadržavanja lima u peći je 90 sekundi, slika

3.4, što je puno brže od 4 dana žarenja pod zvonom (*engl.* batch (box) annealing - BA). Proces se sastoji od 4 zone: 1. Grijanje, apsorpiranje, sporo hlađenje te brzo hlađenje. Najviša temperatura je 650 °C - 690 °C te varira u ovisnosti o željenim svojstvima konačnog materijala. Čelici koji su deoksidirani (*engl.* killed steels) zahtijevaju temperaturu 30 °C višu od čelika koji sadrže dovoljno željeznih oksida (*engl.* rimmed steel) koji kreiraju površinski rub bez šupljina (lijep površinski izgled), 30 sekundi sporo hlađenje pri temperaturi od 500 °C uklanja naprezanja i uvijanja. Poslije toga hlađenje ide brže te je vrijeme od 20 sekundi ispod 500 °C prekratko da bi se formirala zrna dendrita. Materijal koji se dobiva je žilav, međutim sposobnost oblikovanja pri dubokom vučenju je smanjena. Variranjem vremena moguće je utjecati na veličinu zrna ferita.



Slika 3.4 Vrijeme trajanja kontinuiranog žarenja (CA) [19]

Kod žarenja namotaja pod zvonom (BA), nekoliko se stotina tona namotaja postavlja u zvono i zagrijava do 30 sati. Početnih 5 do 12 sati vrši se apsorpiranje maksimalne topline ovisno o željenom temperiranju konačnih svojstava lima. Za mekše se limove koristi temperatura 650 °C a 670 °C za čvršće limove. Hlađenje traje jednako dugo, a jedan ciklus traje otprilike 4 dana. Njime se postižu niže vrijednosti tvrdoće ali i veća nejednolikost mehaničkih svojstava. Međutim, žarenjem se u zvonastim pećima dobivaju bolje karakteristike plastičnosti nego kod CA. Velik utjecaj na mehaničke karakteristike čelika ima izbor vrste žarenja i način hlađenja u tom postupku. Ubrzano hlađenje lima kao i nepridržavanje tehnoloških parametara tijekom postupka rekristalizacijskog žarenja dovodi do prezasićenosti ferita (α - Fe) dušikom i ugljikom što nužno rezultira pojavom nehomogenog tečenja tj. pojavom Lüdersovih traka u daljnjoj preradi. Lüdersove trake nastaju zbog nakupina atoma N i C u prostorima linijskih dislokacija te lokalno stvaraju atmosfere koje uzrokuju nehomogeno tečenje materijala. Temper valjanjem u hladno valjanoj toplinski obrađenoj limenoj traci formira se određena mikrogeometrija i kvaliteta površine, to osigurava bolja mehanička svojstva lima. Stupanj izduženja koji se postiže temper valjanjem ovisi o debljini trake i obično se kreće od 1,2 do 2,5 %. Tijekom proizvodnje lim može jedanput biti izložen postupku hladnog valjanja (jednostruko stanjeni - vrsta lima koja je u najširoj upotrebi). Ako se lim poslije žarenja još hladno valja (dvostruko stanjeni limovi) onda se poslije drugog valjanja ne primjenjuje žarenje. Te limove karakterizira visoka tvrdoća i vlačna

čvrstoća, te usmjerena struktura zrna. Nakon temper valjanja traka putuje do dijela gdje se izvodi elektrolitičko nanošenje kositra tj. kositrena metalizacija. Traka kao katoda prolazi kroz elektrolit u koji su uronjene kositrene anode koje se elektrolitički otapaju i talože na traci. Kositar se na taj način može otapati i taložiti na čeličnu traku u bilo kojoj željenoj debljini na svakoj strani posebno. Prema potrebi trake se također mogu laminirati i lakirati sukladno daljnjim potrebama. Na lim se prema potrebi i sukladno obliku nanosi debljina odgovarajućeg materijala, a zatim se peče 8 do 20 minuta na temperaturama od 175 °C do 225 °C. Ključni zadatak koji prijanjajući premaz/lak mora izdržati jest ostati neoštećen tijekom odabrane obrade deformiranjem, kod koje se lim oblikuje u konačan proizvod. Kao prevlaka na čeličnu osnovu nanosi se kositar. Standardni diferencijalni nanos kositra označava se sa oznakom "D", a nanos bez oznake "D" označava se na limu u pravilnim razmacima sa bijelim linijama radi jasnog prepoznavanja. U provedenom istraživanju lim TS230 ima diferencijalan nanos D2,8/5,60 (g/m²) gdje je nanos od 5,60 g/m² označen u razmacima od 7,5 mm. U ovome radu istražuju se dva materijala:

1. TS230 (W. nr. 1.0371, T50HF) D2,8/5,60 41 ST/Fin kontinuirano žaren (ST - *engl.* stone finish - brušena površina - hrapavost $Ra = 0,35 - 0,60 \mu\text{m}$), [62].
2. TH415 (W. nr. 1.0377) E2,8/2,8 CA FS 0,24 mm, kontinuirano žaren, polusjajna (ST - *engl.* stone finish - brušena površina - hrapavost $Ra = 0,35 - 0,60 \mu\text{m}$). Željezara Smederevo, USS steel Srbija, [63]. Mehanička svojstva čelika preuzeta iz literature prikazana su u tablici 3.1 i 3.2 dok su već ispitivani tankostjeni limovi prikazani u tablici 3.3. Lim TS230 još nije bio ispitivan.

Tablica 3.1 Mehanička svojstva čelika, [64]

Materijalna svojstva čelika	Ugljični čelici	Legirani čelici	Nehrđajući čelici	Alatni čelici
Gustoća, ρ (kg/m ³)	7850	7850	7750 - 8100	7720-8000
Youngov modul elastičnosti, E (GPa)	190 - 210	190 - 210	190 - 210	190 - 210
Poissonov koeficijent, ν	0,27 - 0,3	0,27 - 0,3	0,27 - 0,3	0,27 - 0,3
Koeficijent temperaturno rastezanja, α, β (10 ⁻⁶ /0 K)	11 - 16,6	9,0 - 15	9,0 - 20,7	9.4 - 15,1
Koeficijent toplinske vodljivosti, λ (W/(m·0 K))	24,3 - 65,2	26 - 48,6	11,2 - 36,7	19,9 - 48,3
Specifični toplinski kapacitet, c (J/(kg·0 K))	450 - 2081	452 - 1499	420 - 500	
Vlačna čvrstoća, R_m (MPa)	276 - 1882	758 - 1882	515 - 827	640 - 2000
Granica proporcionalnosti, R_p (MPa)	186 - 758	366 - 1793	207 - 552	380 - 440
Postotak produljenja, A (%)	10 - 32	4 - 31	12 - 40	5 - 25
Tvrdoća, HB (Brinell 3000 kg)	86 - 388	149 - 627	137 - 595	210 - 620

Tablica 3.2 Mehanička svojstva ambalažnih limova prema EN 10202:2001 [17, 67]

Bijeli lim	Vlačna svojstva (MPa)		Rockwellova vrijednost tvrdoće HR30Tm			
	R_p	R_m	AISI/ASTM	0,21 < t ≤ 0,28 (mm)	t ≤ 0,21 (mm)	t > 0,28 (mm)
TS230 - BA-T50 (W. nr. 1.0371)	230 ± 50	325 ± 50	T1 49 ± 4	52 max	53 max	51 max
TH415 - T61 CA (W. nr. 1.0377)	415 ± 50	435 ± 50	/	61 ± 4	62 ± 4	60 ± 4

Tablica 3.3 Usporedba materijalnih karakteristika tankostjenih limova prema [65, 67], TS230 još nije bio ispitivan

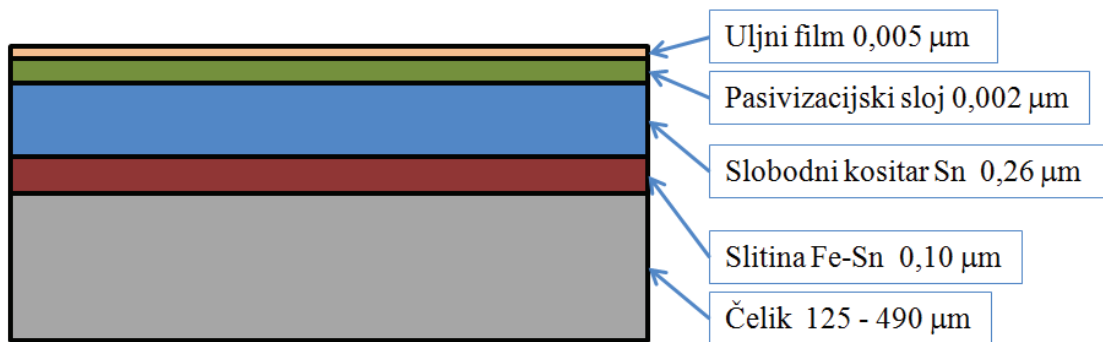
Bijeli lim	Granica proporcionalnosti, R_p , (MPa)	Faktor materijala C^8 , (MPa)	EkspONENT očvršćenja, n^9	Debljina lima, (mm)
TH415, (W. nr. 1.0377) [65]	295-372	385 - 405	0,1522 - 0,1951	0,24
TS260, (W. nr. 1.0379) [65]	210	663,27	0,2046	0,2
TS275, (W. nr. 1.0375) [65]	275	581,55	0,1571	0,2
TH435, (W. nr. 1.0378) [65]	465	685,44	0,0843	0,19
TH520, (W. nr. 1.0384) [65]	530	775,53	0,077	0,24
TH380, [65]	380	481,05	0,0651	0,24

Metalografski gledano, to su bijeli limovi čiji materijal (čelična osnova) ima prostorno centriranu kubičnu rešetku tj. radi se o metalima feritno-perlitne strukture. Sam kositar ima tetragonalnu kristalnu rešetku. Mehanička svojstva bijelih limova određena su vrstom korištenog čelika te mehaničkim i toplinskim obradama u procesu proizvodnje. U tvrtci *Thyssen Krup Europe* proizvode se u debljinama od 0,125 mm do 0,499 mm za potrebe ambalažne industrije [62, 66]. Test koji omogućuje najbolji uvid u mehanička svojstva materijala jest konvencionalni dijagram $\sigma - \epsilon$, u kojemu se kao granica tečenja smatra tzv. donja granica tečenja koja je jasno raspoznata u dijagramu, a kod materijala koji nemaju izraženu granicu tečenja, uzima se ona vrijednost naprezanja ($\sigma_{0,2}$) kod kojeg ostaju trajne deformacije od 0,2 %. Ispitivani materijal TH415 [65] ima jasno izraženu gornju i donju granicu tečenja dok ispitivani materijal TS230 nema izraženu gornju i donju granicu tečenja. Uvjeti za ispitivanje i dimenzije probne epruvete određeni su prema Europskim normama EN 10002-1 i EN 10002-2. Klase tih limova prema ovoj normi

⁸ Faktor materijala C - strength coefficient [13, 18]

⁹ Koeficijent očvršćenja n - strain hardening exponent [13, 18]

označavaju se tako da na prvom mjestu dolazi slovo "T" (označava temper). Na drugom mjestu je oznaka "S" za klase žarene pod zvonom, ili "H" za kontinuirano žarene klase. Na treće mjesto dolazi brojevana oznaka za početak tečenja. Kod Europske norme vlačni testovi formiraju osnovu klasifikacije prikazane u tablici 3.4. Također, prema istoj normi (10202:2001) test pogodan za procjenjivanje proizvoda od bijelog lima jest Rockwellov test tvrdoće HR 30 Tm, uz napomenu da služi kao vodič dok je vlačni test primaran. Bijeli se lim sastoji od čelične osnove i prevlake kositra, struktura presjeka bijelog lima s debljinama nanosa prikazana je na slici 3.5 [65, 68].



Slika 3.5 Struktura presjeka bijelog lima s debljinama nanosa [65, 68].

Izgled površine ovisi o teksturi valjaka i srednjem aritmetičkom odstupanju profila hrapavosti (Ra), tablica 3.4.

Tablica 3.4 Završna obrada površine prema europskom standardu EN 10 203: 1991 E [67]

Završna obrada metalnog lima	Kod čelične baze	Bijeli lim/ECCS	Rastopljeno	Nominalna hrapavost površine baze od čelika, Ra (μm)
Sjajna	BR (<i>engl. bright finish</i>), glatka	TPL	Da	$Ra \leq 0,25$ (μm)
Fino brušena	FS (<i>engl. fine stone</i>)	TPL	Da	$Ra = 0,25 - 0,45$ (μm)
Fino brušena	FS (<i>engl. fine stone</i>)	ECCS	-	$Ra = 0,25 - 0,45$ (μm)
Brušena	ST (<i>engl. stone</i>)	TPL	DA	$Ra = 0,35 - 0,60$ (μm)
Brušena	ST (<i>engl. stone</i>)	ECCS	-	$Ra = 0,35 - 0,60$ (μm)
Srebrna	SG (<i>engl. silver finish</i>), pjeskarena	TPL	DA	$Ra \geq 0,90$ (μm)
Mat	MM (<i>engl. matt finish</i>), pjeskarena	TPL	Ne	$Ra \geq 0,90$ (μm)

Oznaka ECCS se koristi prilikom označavanja elektrolitičkog lima presvučenog kromovim oksidom dok oznaka "TPL" označava lim oslobođen kositra.

Rastapanje je postupak u kojemu se nataložen kositar zagrijava do svoje točke otapanja 232 °C i brzo gasi u hladnoj vodi, te tako nastaje miješana prevlaka čelično kositrene legure i slobodan kositar sa sjajnom završnom površinom.

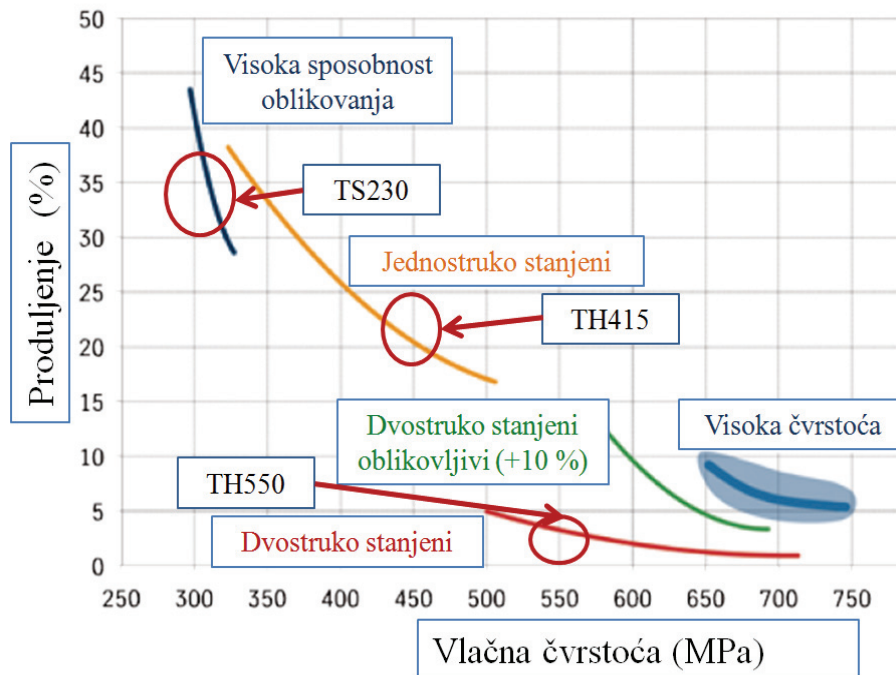
Prva početna slova engleskih naziva ove podjele prema hrapavosti površine dodaju se kao dodatne oznake prilikom označavanja lima. Sjajna površina dobivena je otapanjem prevlake na čeličnoj osnovi, a postignuta valjanjem na specijalno poliranim valjcima. Fina brušena površina postignuta je otapanjem prevlake na čeličnoj osnovi i ima hrapavost površinske strukture paralelnu pravcu valjanja. Takva kvaliteta fino brušene površine dobivena je valjanjem lima na specijalno brušenim valjcima. Brušenu površinu karakteriziraju brazde u pravcu valjanja, koje nastaju upotrebom radnih valjaka koji su bili brušeni na niži stupanj od onih za postizanje fine brušene površine. Srebrna površina dobivena je otapanjem prevlake na čeličnoj osnovi grubo zrnatog izgleda na pjeskarenim valjcima. Mat površina s malim koeficijentom refleksije koju ima neotopljena prevlaka nanescena na čeličnu osnovu zrnatog izgleda, dobivena je na pjeskarenim valjcima.

U istraživanju je ispitivana strana sa 2,8 g/m² nanosa kositra. U tablici 3.5 prikazan je kemijski sastav tipa "A" i tipa "B" bijelog lima prema EN 10202:2001 s tim da tip "B" nije pogodan za zavarivanje.

Tablica 3.5 Kemijski sastav čelične osnove bijelog lima prema [17, 67]

Elementi	% maseni postotak	
	Tip A	Tip B
Ugljik, C	0,04 - 0,08	0,09 - 0,12
Mangan, Mn	0,18 - 0,35	0,30 - 0,50
Sumpor, S	0,020	0,020
Fosfor, P	0,020	0,020
Silicij, Si	0,030	0,030
Bakar, Cu	0,080	0,080
Nikal, Ni	0,080	0,080
Kositar, Sn	0,020	0,020
Arsen, As	0,020	0,020
Molibden, Mo	0,020	0,020
Krom, Cr	0,080	0,080
Dušik, N	0,008	0,008
Aluminij, Al	0,02 - 0,08	0,002 - 0,008
Ostali	0,02	0,02

TS230 služi za ekstra duboko vučene limenke i sve vrste oblikovanja gdje se traži najviša deformabilnost. TH415 služi za vučene poklopce i prstene veće čvrstoće, te podove limenki, TH550 služi za plašteve limenki, zatvarači/otvarači¹⁰ i podove limenki. Sposobnost produljenja za materijal TS230 kreće se od 28 do 38 % dok se za materijal TH415 kreće od 17 do 27 % i predstavljaju duktilne materijale, slika 3.6. Kao primjer krhkog tankostjenog materijala može se spomenuti TH550 gdje se produljenje kreće oko 3 %.



Slika 3.6 Tankostjeni materijali, odnos produljenja i vlačne čvrstoće [66]

¹⁰ Zatvarači/otvarači limenki - twist-off

4. Oblikovljivost materijala, nepravilnosti u kristalnim strukturama

4.1. Temeljni zakoni tehnologije oblikovanja metala

Kako bi se razumjelo ponašanje materijala prilikom tehnologije oblikovanja važno je poznavanje temeljnih zakona koji pojašnjavaju pojave međusobne veze uzroka i posljedica pojedine obrade.

Temeljni zakoni obrade metala deformiranjem:

1. zakon nepromjenjivosti volumena,
2. zakon najmanjeg otpora,
3. zakon neravnomjernosti deformacija, dopunskih i zaostalih naprezanja,
4. zakon sličnosti i modeliranje procesa obrade metala deformiranjem, OMD.

4.1.1. Zakon o nepromjenjivosti volumena

Zakon o nepromjenjivosti volumena uzima u obzir metal i oblik paralelopipeda te promatra njegovo deformiranje. Volumen se deformacijom ne mijenja osim kovanjem gdje susrećemo promjenu 0,1 % volumena u slučajevima kada dolazi do popunjavanja sitnih šupljina unutar materijala nastalih prilikom lijevanja. Paralelopiped mijenja oblik promjenom dimenzija u x, y i z - osi. Te promjene označuju se sa relacijom početnog i konačnog stanja dimenzija te se može uzeti da vrijedi konstantnost volumena $(x_1/x_0)(y_1/y_0)(z_1/z_0) = 1$. Logaritmiranjem nastaje relacija $\ln(x_1/x_0) = \varphi_x$ te je moguće pisati $\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0$, što predstavlja sumu logaritamskih deformacija. Sukladno tome, stupanj deformacije je mjera koja prikazuje promjenu odnosa dimenzija tijela prije i poslije izvršene deformacije. Stupanj deformacije može se koristiti i za mjeru deformacijskog rada te za mjeru veličine očvršćenja materijala. Očvršćivanje materijala izračunava se na temelju podataka krivulje naprezanja plastičnog tečenja k_f - deformacije φ ($k_f - \varphi$) [18]. Pri izvođenju više sukcesivnih deformacija stupanj deformacije izračunava se za svaku fazu a ukupni stupanj deformacije je suma ostvarenih deformacija po fazama. Brzina deformacije različita je od pojma brzine alata te se dobiva iz promjene dimenzija po vremenu, prema relaciji $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$, a kod konstantne brzine može se pisati relacija za srednju brzinu $\dot{\varphi} = \varphi/t$.

4.1.2. Zakon najmanjeg otpora promatra tečenje materijala

Materijal teče u pravcima najmanjeg otpora, prema principu najmanjeg opsega i pokušava održati stanje ravnoteže [69]. Pomak kod tečenja svake točke u materijalu koja se nalazi u ravnini okomitoj na pravac djelovanja sile je uvijek u pravcu najkraće normale tog pravca. Maksimalna deformacija se javlja u pravcu gibanja većine točaka u elementu, ovo vrijedi kod primjera sabijanja prizme ravnim alatima. Može se reći da najmanjem otporu odgovara princip minimuma ukupne energije deformacije koji glasi da će tijelo poprimiti oblik koji minimizira ukupnu potencijalnu energiju [69].

4.1.3. Zakon neravnomjernosti deformacije, dopunska i zaostala naprezanja

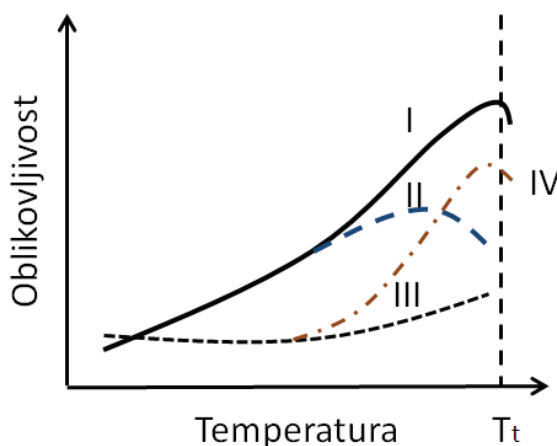
Neravnomjerna (nehomogena) deformacija je posljedica realnih uvjeta obrade deformiranjem koji ne dopuštaju ravnomjernu deformaciju. Razni su geometrijski i fizički čimbenici koji utječu na nehomogeno tečenje materijala. Kao fizikalna pojava, trenje uzrokuje lokalizirano deformiranje i otežava tečenje materijala, a ujedno postoji mogućnost pojave nejednakog očvršćenja materijala u procesu obrade. Kao posljedica neravnomjerne deformacije javljaju se i dodatna, dopunska naprezanja. Zaostala naprezanja su ona koja ostaju u deformiranome tijelu i nakon prestanka djelovanja sile, te pokušavaju vratiti materijal u stanje ravnoteže. Slojevi na tijelu materijala koji teže većoj promjeni od srednje, predaju slojevima koji teže manjoj promijeni, sile predznaka koji povećavaju promjenu. Dok slojevi koji teže manjoj promijeni, predaju slojevima koji teže većoj promijeni, sile predznaka koji tu promjenu smanjuje [69]. Iz tih zaostalih naprezanja nastaju fizičke posljedice u strukturi materijala tako da određena zrna imaju usmjerenu orijentaciju ili se javljaju dopunska naprezanja bez pretežne orijentacije. U strukturi materijala dolazi do međusobnog djelovanja kristalnih zrna, dislokacija čija je orijentacija određena s pravcima naprezanja te pravcima usmjerenja kristalografskih osi zrna [69]. Zagrijavanjem naprezanja nestaju zbog rekristalizacije zrna te je tu pojavu potrebno uzeti u obzir prilikom tople obrade. Kod hladne deformacije nema rekristalizacije te su zaostala naprezanja konstantna pojava. Veličina zaostalih naprezanja ovisi o temperaturi pri kojoj je kristalizacija nastupila i brzini deformacije. Zaostala naprezanja uzrokuju smanjenje oblikovljivosti materijala, smanjuju otpornost na koroziju, smanjuju otpor na udarnu žilavost a mogu izazvati i pojavu pukotine bez djelovanja vanjskih sila, [69]. Posebna pojava koja smanjuje oblikovljivost materijala predstavlja koncentracija većih lokalnih deformacija zbog iscrpljivanja plastičnih svojstava materijala. U tim slučajevima može doći do stvaranja unutarnjih pukotina i razdvajanja materijala. Fizički čimbenici za ograničavanje neravnomjernosti deformacije jesu ravnomjerno temperaturno polje materijala i ravnomjerna sila trenja u postupku oblikovanja.

4.1.4. Zakon sličnosti

Pri razvoju novih postupaka u tehnologiji oblikovanja metala važno je poznavanje sile, rada deformiranja i rasporeda naprezanja u deformacijskoj zoni. Teoretski pristup postavlja određene uvjete kao što su konstantnost faktora trenja ili nepromjenjivost naprezanja plastičnog tečenja. Ti uvjeti se smatraju glavnim uvjetima u teorijskom pristupu ali takve pretpostavke ne odgovaraju promjenjivim uvjetima obrade [69]. Uvjeti obrade uzrokuju niz poteškoća pri ostvarivanju mjerenja na stvarnom eksperimentu. Kako bi se ostvario dobar model važno je primijeniti teoriju sličnosti kojom je moguće doći do spoznaje o ponašanju materijala u procesu obrade. Određen uvid u ponašanje materijala može se steći usporedbom dva tijela koja su geometrijski slična te na koje je izvršen postupak deformiranja prema određenim uvjetima. Pretpostavljaju se četiri temeljna uvjeta sličnosti:

1. Dimenzijska jednakost modela i stvarnih dimenzija, kemijskog sastava, faznog stanja, mikro i makro-strukture, mehaničkih svojstava i krivulje naprezanje - deformacija.
2. Temperature prilikom deformiranja modela i stvarnog predmeta moraju biti jednake.
3. Stupnjevi deformacije moraju međusobno odgovarati.
4. Trenje na površinama koje dolaze u kontakt sa alatom moraju biti identične.

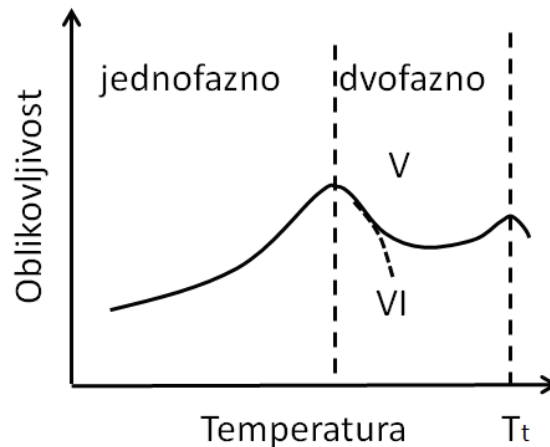
Međutim, te uvjete je teško ispuniti i međusobno su proturječne zbog promjenjivog utjecaja temperature te dolazi do razlike između stvarnog eksperimenta i modela. Javljaju se slučajevi u kojima dolazi do različite rekristalizacije metala i samim time različitog ponašanja krivulje $k_f - \varphi$. Kod povišenih temperatura i kod promjena brzina deformiranja do kojih dolazi u procesu obrade nemoguće je ispuniti sve uvjete sličnosti. Oblikovljivost metala uvijek je ovisna o temperaturi. Kod čistih slitina oblikovljivost kontinuirano raste s porastom temperature sve do temperature taljenja T_t linija označena s "I", slika 4.1. Kod slitina s kristalnim zrnima koja naglo rastu dolazi do smanjenja oblikovljivosti slika 4.1, označeno s krivuljom "II". Povećano zrno u mikrostrukturi metala smanjuje oblikovljivost [69]. Prema krivulji "III" na slici 4.1 ponašaju se slitine s netopivim masama, kod njih se oblikovljivost malo povećava. Pod "IV" se ponaša slitina s topivim komponentama npr. čelik s topivim karbidima [69].



Slika 4.1 Oblikovljivost metala spram porasta temperature [69]

Kod deformiranja kod povišenih temperatura, slitine se ponašaju prema krivulji "V", slika 4.2, pa se kao primjer može se spomenuti da se na taj način mijenja oblikovljivost nehrđajućeg čelika s kromom. Krivulja "VI", slika 4.2, prikazuje promjenu oblikovljivosti slitina koje kod zagrijavanja izlučuju drugu fazu niskog tališta, što se pojavljuje kod željeza sa sumporom ili magnezija s cinkom [69].

Sadržaj ugljika ima značajan utjecaj na oblikovljivost, što veći postotak to manja oblikovljivost. Dodatci poput kroma i molbidena smanjuju oblikovljivost, dok nikal povećava sposobnost oblikovanja. Posebno negativan utjecaj na oblikovljivost ima sumpor u toplome i fosfor u hladnome stanju [69].



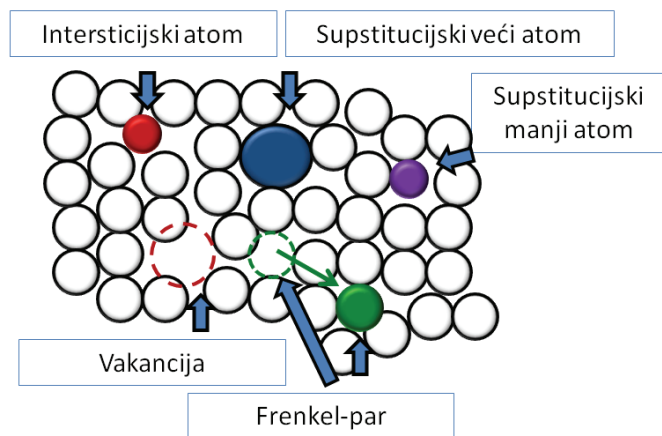
Slika 4.2 Promjena sposobnosti oblikovanja u dvije faze [69]

4.2. Nesavršenosti u kristalnim strukturama

Promjenom temperature te utjecajem vanjske sile dolazi do pomicanja atoma i kristalnih rešetki, stoga je važno poznavati zbivanja u mikrostrukturi materijala kako bi se razumio nastanak i razvoj plastične deformacije. Prilikom kristalizacije taljevine svi atomi ne uspiju zauzeti svoje mjesto u kristalnoj rešetki stvarajući nesavršenosti koje utječu na ponašanje materijala. Kristalizacijom se stvaraju kristali koji se međusobno spajaju u zrna a zatim u polikristale, a orijentacija tako nastalih kristala je slučajna. Idealna kristalna rešetka ne postoji već pri stvaranju kristalnih rešetki dolazi do pojave: 1) točkaste (nuldimenzijske) nesavršenosti, 2) linijske nesavršenosti (jednodimenzijske, dislokacije), 3) površinske nesavršenosti (dvodimenzijske) ili 4) volumne nesavršenosti (trodimenzijske) [69 - 73].

4.2.1. Točkaste nesavršenosti (nuldimenzijske)

Nesavršenosti mogu imati fizikalne ili kemijske uzroke, slika 4.3. Fizikalne nesavršenosti predstavljaju vakancije kod kojih dolazi do pojave praznih prostora u kristalnoj strukturi, javljaju se jer se atomi nisu smjestili na svoja mjesta u prostoru. Kemijske nesavršenosti predstavljaju supstitucijski ili zamjenski atomi te intersticijski ili uključinski atomi. Supstitucijski atomi mogu biti manji ili veći te se smještaju u prazna mjesta kristalne rešetke. Intersticijski su atomi koji imaju znatno manji promjer od osnovnog atoma u rešetki te se mogu smjestiti između atoma osnovne rešetke. Postoji i Frenkel-par ili Frenkel greška koja je rezultat da atom u kristalnoj rešetki napusti svoje mjesto te postaje intersticijski na način da se smješta blizu prijašnje lokacije na mjesto koje atom obično ne zauzima. Frankel greška nastaje zbog toplinskih vibracija te postoji teorija da kristal nema grešaka pri 0 Kelvina [69 - 73].



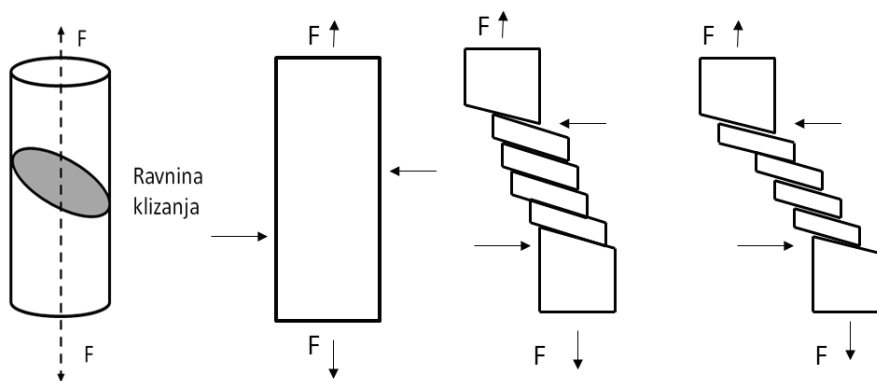
Slika 4.3 Točkaste nesavršenosti u kristalnoj rešetki

4.2.2. Linijske nesavršenosti (jednodimenzijske, dislokacije)

Glavni mehanizam stvaranja plastične deformacije predstavlja pomicanje dislokacija. Dislokacije predstavljaju linijske nesavršenosti u kristalnoj rešetki nastale prilikom stvaranja kristala gdje se više vakancija povezuje u jednu liniju. Teorija dislokacija podrazumijeva da se pod utjecajem naprezanja, prilikom plastične deformacije, dio kristala pomiče po određenoj ravnini koja se naziva ravnina klizanja. Može se reći da je svaki proces plastične deformacije u suštini proces smicanja, slika 4.4, [69, 74].

Smično naprezanje jednako $\tau = G \cdot \gamma$ (G je modul smicanja, γ - smična (kutna) deformacija), a u kliznoj ravnini određeno je kutom zbog djelovanja sile $F_s = \tau_s \cdot A_s$, pri čemu je:

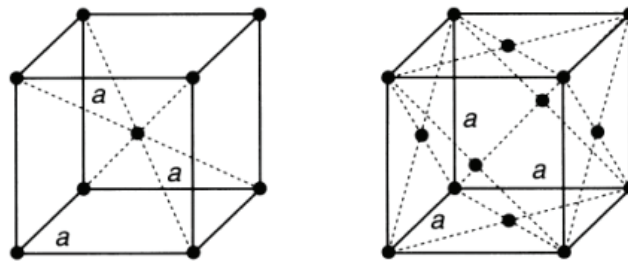
- F_s - smična sila,
- τ_s - smično naprezanje,
- A_s - površina smicanja.



Slika 4.4 Klizanje pod djelovanjem vlačne sile [71]

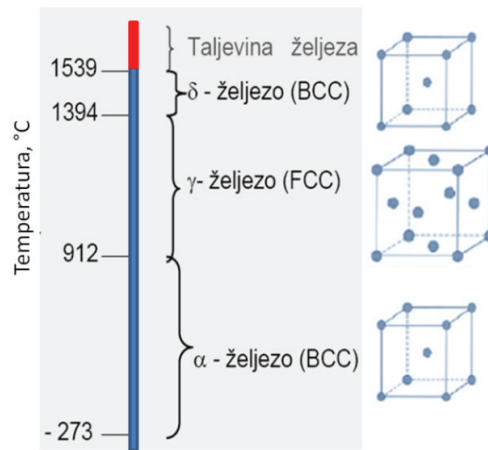
Kod klizanja ravnine klizanja i smjerovi klizanja poznati su kao klizni sistemi. Kod metala se najčešće susreće prostorno centriranu kubičnu rešetku (BCC)¹¹, (V, W, Mo, Nb, Fe α) te plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC)¹², (Al, Pb, Cu, Fe γ), slika 4.5 [18].

¹¹ Prostorno centrirana kubična rešetka - BCC - body centered cubic.



Slika 4.5 Najčešće kubične rešetke kod metala: prostorno centrirana kubična rešetka (BCC) - lijevo i plošno centrirana kubična rešetka (FCC) - desno [71, 75]

Kod bijeloga lima prilikom hlađenja na temperaturu od 20 °C javlja se BCC rešetka koja se sastoji od (α - Fe), slika 4.6. Prijelaz iz jedne u drugu strukturu kristalne rešetke naziva se fazna pretvorba. Prema slici 4.6 u intervalu od 912 °C do 1394 °C kristalna rešetka je FCC, dok je od 911 °C na niže BCC rešetka.



Slika 4.6 Kristalizacija bijelog lima [74]

Kod tehnologije inkrementalnog deformiranja materijala u provedenim eksperimentima obrade tankostjenog lima postignuta je maksimalna temperatura od 176 °C te je rešetka koja djeluje u procesu deformiranja BCC. Ako su u metalu prisutne dislokacije, tada oko dislokacija postoji zona manje čvrstoće jer je razmak između atoma uzduž dislokacije poremetio atomske veze. Iz tog razloga malo opterećenje koje ne bi imalo utjecaja na savršeni kristal može biti dovoljno da se dislokacija pomakne i samim time materijal se plastično deformira.

4.2.3. Površinske nesavršenosti (dvodimenzijske, plošne)

Pod najvećim površinskim greškama smatraju se granice zrna. Atomi u granici zrna nisu u savršenom kristalnom rasporedu zbog nejednolikog rasta kristala. Granice zrna nastaju prilikom skrućivanja i prilikom kristalnih pretvorbi. Granice kristalnih zrna predstavljaju uski pojas koji dijeli kristalna zrna različite orijentacije [74].

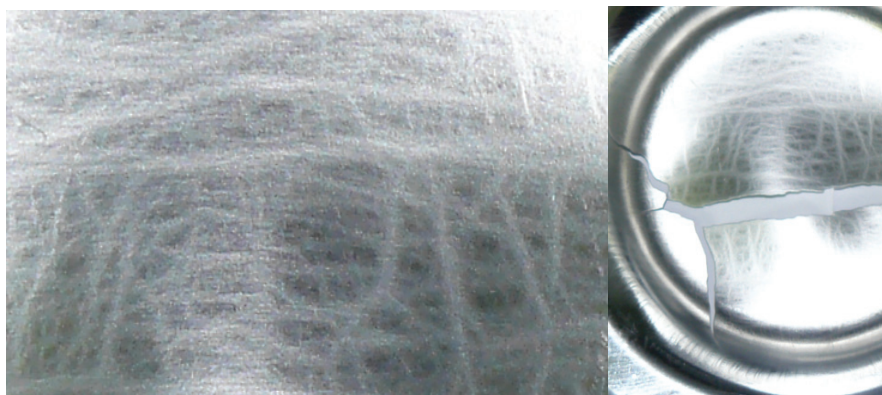
¹² Plošno centrirana kubična rešetka - FCC - face centered cubic.

4.2.4. Volumenske nesavršenosti (trodimenzijske)

Dijelimo ih na praznine¹³, uključke i pukotine a nastaju za vrijeme proizvodnje materijala. Praznine predstavljaju prostore gdje u kojima nedostaje veći broj atoma u kristalnoj rešetki. Ukoliko nastaju kada mjehurići zraka (ili nekog plina) ostaju zarobljeni unutar strukture materijala u procesu njegove kristalizacije, tada ih nazivamo pore. Ukoliko praznine nastaju zbog skupljanja metala prilikom hlađenja, tada ih nazivamo kavitacijama. Pukotine nastaju zbog različitih brzina kristalizacije u strukturi materijala. Jako utječu na mehanička svojstva jer se oko pukotine javlja koncentracija naprezanja te ona predstavlja mjesto iz kojeg kreće lom materijala. Uključci stranih čestica nastaju kada uslijed kristalizacije materijala različite prljavštine i nečistoće ostaju zarobljene unutar kristalne rešetke [74].

4.3. Lüdersove trake (Lüders' bands)

Lüdersove trake¹⁴ na slici 4.7 i slici 4.8 predstavljaju lokaliziranu plastičnu deformaciju koja rezultira nehomogenim tečenjem materijala [75, 76]. Pojedinačna zrna u strukturi polikristala deformiraju se nehomogeno, a susjedna zrna općenito se međusobno deformiraju u skladu sa zrnima u svome okruženju. Stoga slijedi da se deformacije na granici zrna razlikuju od onih od unutrašnjosti zrna.



Slika 4.7 Pojava Lüdersovih traka pri izvedbi Marciniak testa, lim TH415



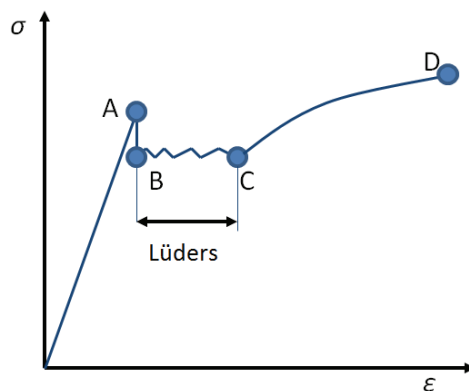
Slika 4.8 Pojava Lüdersovih traka pri izvedbi vlačnog testa, lim TH415

Deformacija se pronosi sa zrna na zrno i pojedinačna zrna prenose deformaciju sukladno svojim mogućnostima oblikovanja. Zrna s povoljnom orijentacijom su ona pod kutom od 45° u odnosu

¹³ Praznine - voids

¹⁴ Lüdersove trake - slip bands" ili "stretcher - strain marks

na vlačnu os, te ih možemo nazvati primarnim zrnima i koja prva počinju s prijenosom deformacije. Kod Lüdersovih traka dolazi do pojave plastične deformacije zbog intersticijskih atoma (najčešće dušik (N) ili ugljik (C)) koji uzrokuju lokalno očvršćivanje materijala unutar samoga zrna tj. stvaraju se mala deformirana područja [65]. To uzrokuje nagomilavanje dislokacija za čiji je pomak potrebno veće naprezanje, takvo ponašanje rezultira nejednakim deformiranjem materijala i pojavom Lüdersovog izduženja¹⁵. Materijal teče nehomogeno što se na krivulji $\sigma - \epsilon$ prikazuje područjem od točke „B“ do točke „C“, na slici 4.9. Točka "A" na slici 4.18 prikazuje fenomen koji je čest kod pojedinih čelika, kao što je slučaj s ispitivanim TH415 materijalom. Povišena granica krivulje naprezanje - deformacija rezultat je starenja gdje se takvo starenje materijala prikazuje sa povišenom početnom granicom na krivulji naprezanje-deformacija nakon čega materijal teče kontinuirano. Materijali sa izduženjem „BC“ prema većim od 1 % su nepovoljni za obradu deformiranjem upravo iz razloga pojave nehomogenog tečenja materijala i pojave Lüdersovih traka [77].



Slika 4.9 Dijagram $\sigma - \epsilon$, područje u kojem su moguće pojave Lüdersovih linija (traka) [65, 77]

4.4. Utjecaj vrste naprezanja na oblikovljivost

Sama plastičnost materijala sposobnost je da pod djelovanjem vanjskih sila materijal mijenja trajno oblik bez pojave pukotine i promjene strukture što se odnosi na standardne uvjete ispitivanja svojstva materijala. Deformabilnost se odnosi na realne procese obrade deformiranjem koji uključuju uvjete tehnologije a to su temperatura, stanje naprezanja i brzina deformiranja. Deformabilnost zavisi od niza utjecajnih čimbenika što se može prikazati pomoću izraza (4.1):

$$D = f(T, \varphi, \dot{\varphi}, T_{\sigma}, T_{\mu}, \dots) \quad (4.1)$$

gdje su :

T - temperatura obrade,

¹⁵ Područje se naziva i "yield point elongation"

φ - logaritamska deformacija,

$\dot{\varphi}$ - brzina deformacije,

T_σ - tenzor naprezanja,

T_μ - sila kontaktnog trenja na površini obratka i alata [69].

Ako se u procesu plastične obrade koristi ista vrsta materijala i ako se proces deformiranja izvodi u hladnom stanju sa istim stupnjem i brzinom deformacije uz kvalitetno podmazivanje dobivamo izraz oblika:

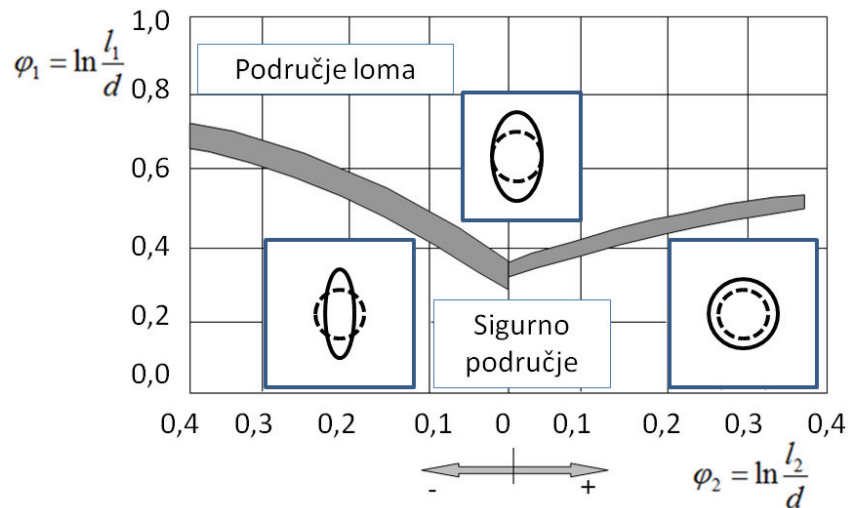
$$D = f(T_\sigma, \dots). \quad (4.2)$$

Prema tome deformabilnost materijala ovisi o stanju naprezanja, što znači da se izborom optimalne sheme komponenata glavnih naprezanja procesa plastične obrade može postići visok intenzitet granične deformabilnosti. Najveću deformabilnost daje ono stanje naprezanja gdje se ostvaruje najveći stupanj deformacije trenutka pojave oštećenja (razaranje, prva pukotina) a naziva se granični stupanj deformacije φ_{eg} . Prema tome, najveću deformabilnost izražavamo graničnim stupanjem deformacije tj.:

$$\varphi_{eg} = f(T_\sigma). \quad (4.3)$$

Kako je efektivna deformacija definirana kao $\varphi_e = \ln(l/l_0)$ ukupna deformacija ostvarena tijekom vlačnog testa. Iz svega navedenog vidimo da se teži optimalnom stanju naprezanja pa možemo reći da je tada efektivna deformacija¹⁶ $\varphi_e = \varphi_{eg}$. U procesima oblikovanja metala mogu se sresti mehaničke sheme naprezanje - deformacijsko stanje u zoni deformiranja (jednoosno, dvoosno, troosno stanje naprezanja) koji predstavljaju osnovne pokazatelje kvalitete tehnološkog procesa plastične obrade metala. Kako bi se na optimalan način „prenijela“ materijalu deformacija a da ne dođe do pojave pukotine vrlo je važno ispitati svojstva materijala ali i ispitati utjecaj tehnološke metode obrade na ponašanje materijala. Prema rezultatima ispitivanja materijala ulazi se u proces te se na temelju različitih uvjeta obrade pripremaju stabilni okviri izrade specifičnih proizvoda. U razmatranju sposobnosti oblikovanja materijala 1968. godine, po prvi je puta upotrijebljen je termin granične deformabilnosti na slici 4.10 za područje obrade lima od strane inženjera Keelera i Goodwina [78].

¹⁶ Efektivna deformacija φ_e - effective plastic strain,



Slika 4.10 Keeler - Goodwinov dijagram sposobnosti oblikovanja metala [69, 79]

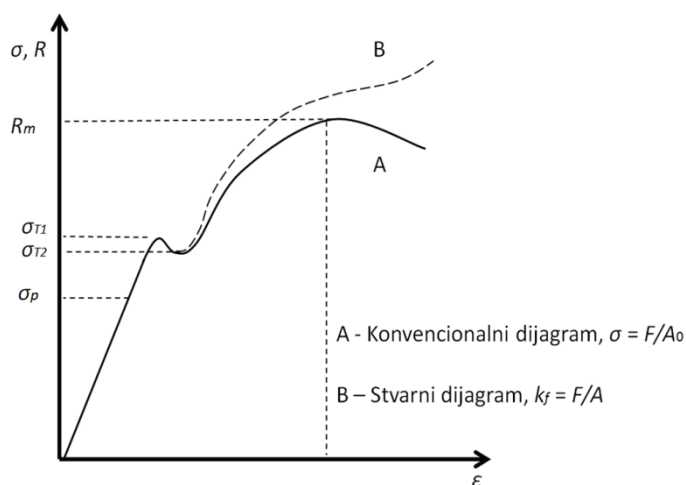
Oni su eksperimentalno utvrđivali odnose deformacija u dva međusobno ortogonalna pravca na istom grafičkom prikazu. Sve točke ispod krivulje predstavljale su deformacije pri kojima neće doći do pukotine u materijalu. Dok su točke na samoj krivulji i iznad nje označavale deformacije pri kojima dolazi do pojave pukotine. Spajanjem kritičnih točaka dobiva se krivulja granične sposobnosti oblikovanja za ispitivani metal, dijagramom sposobnosti deformiranja ispitivanog materijala. Samo ispitivanje provodi se na način da se na metal postavi mreža sa kružnicama i mjeri njenu promjenu npr. u elipsu, na način da se izračunava odnos $\varphi = \ln (l_i/d)$.

5. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, vlačni i Marciniak test

Ispitivanja se materijala provode s ciljem određivanja svojstava materijala. Rezultati ispitivanja se koriste u proračunima potrebnim za izvedbu procesa deformiranja proizvoda. U ovome radu prikazati će se ispitivanje prema standardnim testovima i to vlačni test za određivanje dijagrama naprezanje - deformacija, dat će se i dijagram sposobnosti oblikovanja pomoću Marciniak testa. Zatim će se napraviti ispitivanje sposobnosti inkrementalnog oblikovanja za odabrane materijale i napraviti usporedba dobivenih rezultata. Primjena novih tehnologija i optimizacija postojećih procesa plastične obrade podrazumijeva istraživanje deformabilnosti posebno u području tečenja, koeficijenta normalne i planarne anizotropije, stanja deformiranja te krivulje sposobnosti oblikovanja metala.

5.1. Vlačni test

Vlačnim se testom utvrđuje međusobna zavisnost naprezanja i deformacije, a koja se zavisnost prikazuje $\sigma - \epsilon$ dijagramom. Epruveta se pod aksijalnim opterećenjem razvlači do loma. Tijekom razvlačenja materijal epruvete pruža otpor i epruveta se produljuje. Na dijagramu se zapaža točka najveće vlačne čvrstoće, a taj je trenutak praćen značajnim suženjem presjeka epruvete nakon čega dolazi do daljnjeg produljenja epruvete praćeno smanjenjem čvrstoće materijala te konačno do loma. Plastično ponašanje materijala započinje kada se ustanove trajne i nepovratne deformacije. U standardiziranim ispitivanjima zbog poteškoće određivanja točke tečenja kod materijala koji nemaju izraženu granicu tečenja, koristi se naprezanje $R_{p0,2}$ ($\sigma_{0,2}$), tj. naprezanje pri kojemu ostaju trajne deformacije od 0,2 % ($\epsilon = 0,002$). Dimenzije epruveta su standardizirane. Na slici 5.1 prikazan je odnos naprezanje - deformacija ($\sigma - \epsilon$), za slučaj mekog čelika.



Slika 5.1 Dijagram naprezanje - deformacija, ($\sigma - \epsilon$)

Na slici 5.1 krivulja „A“ predstavlja konvencionalni (inženjerski) dijagram čija se krivulja dobiva dijeljenjem vlačne sila sa početnom površinom poprečnog presjeka. Do granice proporcionalnosti σ_p krivulja se ponaša prema Hookeovoj relaciji (zakonu) (5.1). Krivulja „B“ na slici 5.1 jest stvarni dijagram, a kod njega se uzima u obzir smanjenje poprečnog presjeka tijekom deformiranja.

Na slici 5.1 oznaka σ_{T1} označavaju naprezanje na gornjoj, a σ_{T2} naprezanje na donjoj granici tečenja. Na konvencionalnom se dijagramu zapaža točka najveće vlačne čvrstoće, R_m , i ona označava najveće naprezanje koje materijal prilikom ispitivanja može podnijeti. U stvarnom se dijagramu naprezanje - deformacija, ponašanje materijala može opisati tzv. Holloman-Ludwigovom relacijom. Jednadžba koja se koristi u području proporcionalnosti je Hookeova relacija:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (5.1)$$

gdje je :

σ - naprezanje, E - Youngov modul elastičnosti, ε - deformacija.

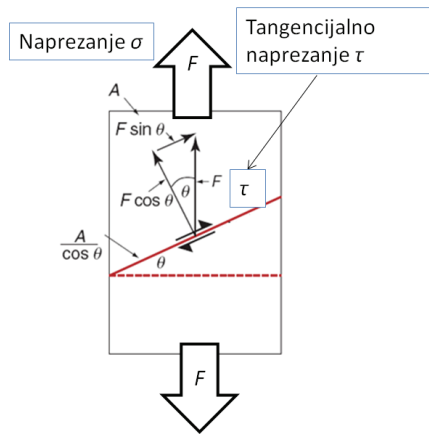
Relacija kojom se opisuje ponašanje materijala pri tečenju često se piše u obliku:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n, \quad (5.2)$$

što predstavlja tzv. Holloman - Ludwigovu relaciju. U području tehnologije obrade materijala zapis se ove relacije može naći i u obliku:

$$k_f = C \cdot \varphi^n, \quad (5.2a)$$

U izrazima (5.2), prva veličina lijeve strane (σ odnosno k_f) predstavlja naprezanje tečenja, C je faktor materijala, dok je ε odnosno φ - deformacija. Pri procesima plastičnih obrada izradaka, kada se pojavljuju velike deformacije, za opis se takve deformacije rabi geometrijska deformacija. Nadalje, eksponent očvršćivanja n može imati vrijednosti od $n = 0$ (idealno plastičan - *engl.* perfectly plastic solid) ili $n = 1$ (elastičan - *engl.* elastic solid). Za većinu metala eksponent očvršćivanja n ima vrijednosti između 0,10 i 0,50, dok se kod niskougličnih čelika kreće od 0,14 do 0,32. Na veličinu faktora materijala C i eksponenta očvršćivanja n utječe vrsta materijala, brzina deformacije, temperatura i veličina zrna. Kod manjih zrna eksponent očvršćenja n je manji, dok faktor materijala C postaje veći, [69]. Slika 5.2 prikazuje stanje jednoosnog naprezanja i ponašanje materijala u presjecima štapa pri različitim kutovima 0° , 45° i 90° od smjera djelovanja opterećenja valjanja. Smjer orijentacije valjanja lima prilikom njegove proizvodnje ima značajne posljedice u operacijama dubokog vučenja. Svojstva valjanih ploča kod većine metala nisu uvijek jednolike u svim smjerovima, odnosno postoji određeni stupanj anizotropije. Točna povijest određene anizotropije ovisi o kemijskom svojstvu materijala te procesu izrade (tj. ljevanje, valjanje, izvlačenje, žarenje itd.). Anizotropija ima veliki utjecaj u operacijama vučenja a sa mikroskopom se može primijetiti orijentacija zrna.



Slika 5.2 Stanje jednoosnog naprezanja, najveće naprezanje je $\tau = \sigma/2$ u ravnini od 45° u odnosu na os djelovanja sile [89]

Koeficijent anizotropije obilježava se slovom r , naziva se još i Lankfordovim koeficijentom koji izražava omjer poprečnog naprezanja i debljine. Koeficijent r daje dobru procjenu o sposobnosti lima da se deformira u obliku dubokog vučenja, varira ovisno o smjeru u kojemu se ispitni uzorak uzima iz ploče lima. Greška koja nastaje zbog anizotropije je ušičavost. Poznavanjem anizotropije materijala možemo utjecati na konačan proizvod i eliminirati pojavu ušičavosti koja rezultira škartom i općenito lošim iskorištenjem materijala. Bitna razlika kod toplo i hladno valjanog lima je različito ponašanje kod pojave ušičavosti. Koeficijent anizotropije r izračunava se prema [69, 76]:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}}, \quad (5.3)$$

gdje je:

φ_b - deformacija širine lima, φ_t - deformacija debljine lima, b_0 - početna širina ispitivane epruvete, b - širina ispitivane epruvete poslije deformacije, l_0 - početna duljina epruvete i l - duljina epruvete poslije deformacije. Debljina lima se dobiva prema zakonu o konstantnosti volumena $l_0 \cdot b_0 \cdot t_0 = l \cdot b \cdot t = \text{konstantno}$.

Anizotropija se otkriva pomoću vlačnog testa te se označava koeficijentima r_0 , r_{45} i r_{90} , prema izrazu (5.4) dobiva se srednja vrijednost koeficijenta normalne plastične anizotropije r_s [76]:

$$r_s = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}. \quad (5.4)$$

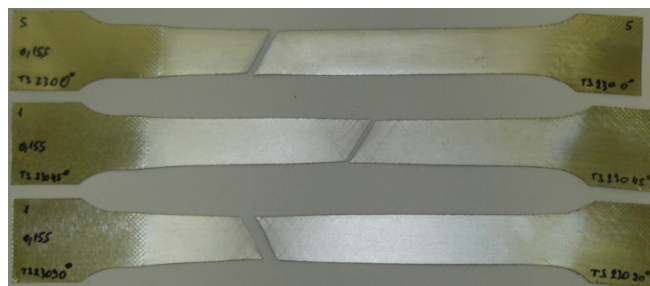
Na temelju relacije 5.3 za duboko vučenje metalnih limova tolerancija je $r_s = 0,8 - 6$ a za izotropne limove $r_s = 1$ [12]. Koeficijent ravninske anizotropije je mjerilo Δr koje govori kakvo je odstupanje normalne plastične anizotropije na kut α . Kada bi bilo $\Delta r = 0$, (5.5), materijal bi se u svim smjerovima jednako rastezao.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}. \quad (5.5)$$

Anizotropija je ovdje značajna pri izračunu faktora materijala C te eksponenta očvršćenja n za ispitivani lim. Pri izračunu je potrebno uzeti u obzir orijentaciju ispitnih epruveta u smjerovima

0°, 45° i 90° kako bi se definiralo ponašanje lima u postupcima deformiranja. Pri tome se faktor materijala C te eksponent očvršćenja n izračunavaju prema izrazu 5.5, izračun srednje vrijednosti važi i za R_p i R_m [76].

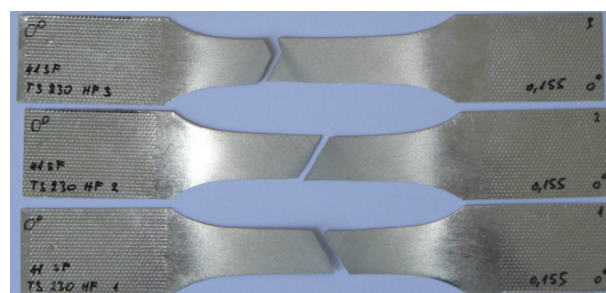
Izveden je vlačni test kako bi se definiralo ponašanje materijala Hollomon-Ludwigovom krivuljom očvršćivanja materijala. Odabrana je veličina standardne epruvete za limove 250 x 30 mm prema EN ISO 6892-1, testiranja su napravljena na CVTU Prag, Češka Republika. Metalni limovi su rezani vodenim mlazom u smjeru 0°, 45° i 90° te je izrezano 5 epruveta u svakome smjeru, slike 5.3, 5.4 i 5.5. Zbog naknadnog lakiranja limovi u kojemu limovi prolaze proces rekristalizacije tj. griju se na 200 °C i drže se na toj temperaturi 20 minuta, izrezale su se epruvete i za provjeru razlike između žarenih i nežarenih limova. Zbog pojave Lüdersovih traka na materijalu TH415 napravila su se dodatna testiranja sa manjim epruvetama dimenzija 150 x 25 mm za materijale TH415 i TS230 žarene i nežarene. Rezultati su prikazani u tablicama 5.1 do 5.6 i pomoću slika 5.6 do 5.14 ukupno je testirano 60 epruveta za ispitivanje svojstava materijala TH415 i 60 epruveta za ispitivanje svojstava materijala TS230. U tablici 5.1 i 5.2 prikazani su rezultati vlačne čvrstoće R_m i ukupnog produljenja pri točki loma epruvete A_t .



Slika 5.3 Vlačni test, ispitane epruvete, kut 0°, 45° i 90° - materijal TS230



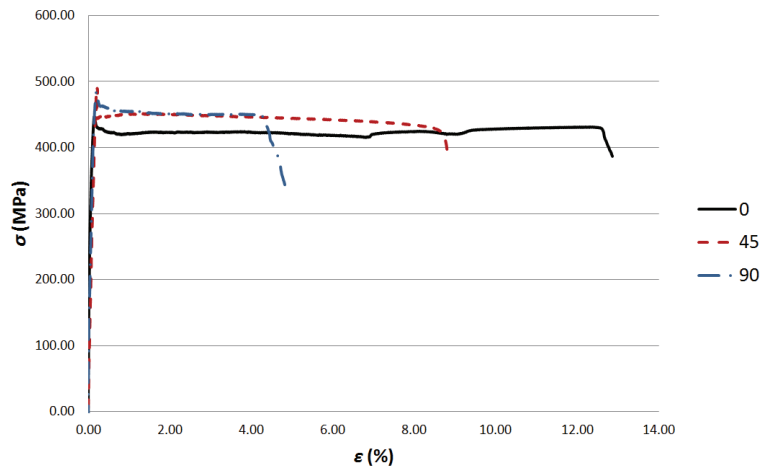
Slika 5.4 Vlačni test, ispitane epruvete, kut 0°, 45° i 90° - materijal TH415



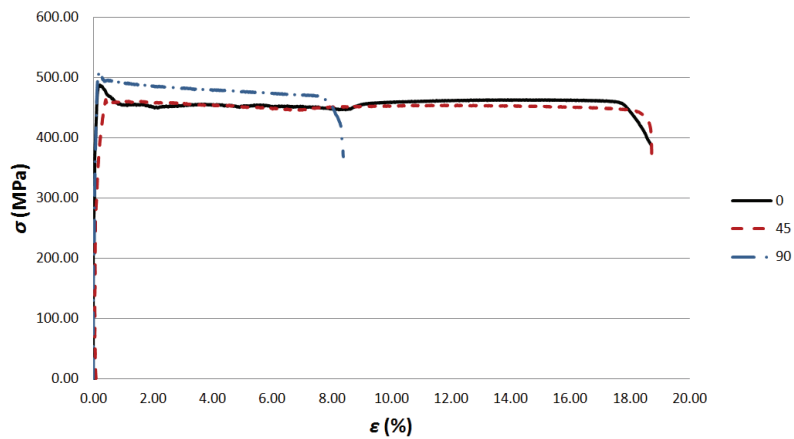
Slika 5.5 Vlačni test, ispitane epruveta dimenzija 150 x 30 mm, materijal TS230

Tablica 5.1 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90°, materijal TH415 žaren, veličine epruveta A₈₀ i A₄₀

Žareno TH415	Epruvete A ₈₀		Epruvete A ₄₀	
Kut uzorka u odnosu na smjer valjanja lima	R _m (MPa)	A _t (%)	R _m (MPa)	A _t (%)
0°	455	11	474,98	18
45°	485,9	17	471,62	19
90°	491	11	506,31	8



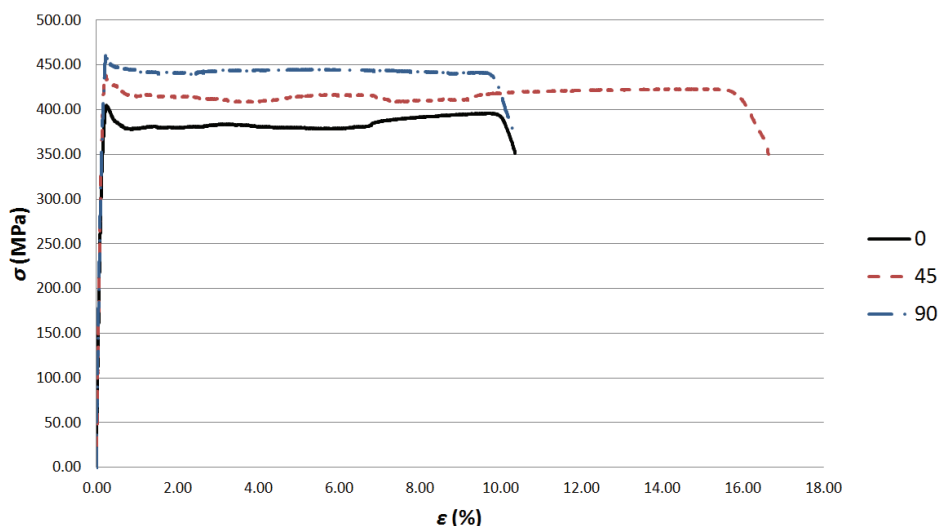
Slika 5.6 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0°, 45°, 90°, žarene epruvete A₈₀



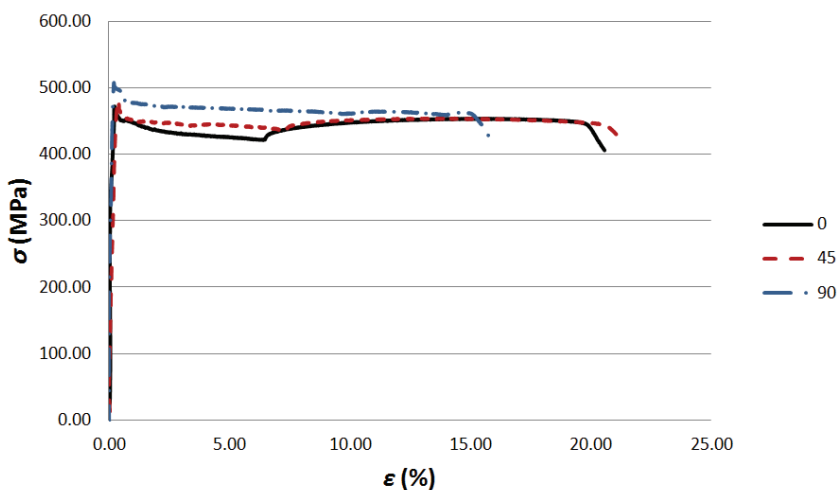
Slika 5.7 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0°, 45°, 90°, žarene epruvete A₄₀

Tablica 5.2 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90, materijal TH415 nežaren, veličine epruveta A₈₀ i A₄₀

TH415, nežaren	Epruvete A ₈₀		Epruvete A ₄₀	
Kut uzorka u odnosu na smjer valjanja lima	R _m (MPa)	A _t (%)	R _m (MPa)	A _t (%)
0°	445,85	11	471	20
45°	439,83	17	486	21
90°	472,19	11	502	16



Slika 5.8 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{80}



Slika 5.9 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{40}

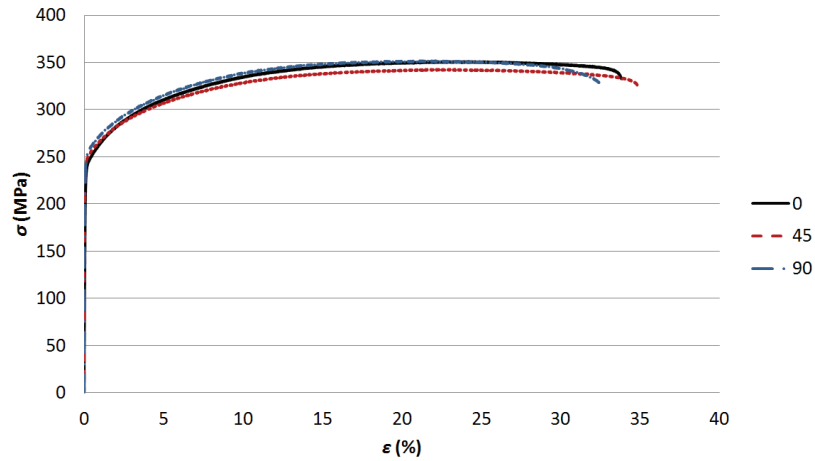
U tablici 5.3 i 5.4 prikazani su rezultati vlačne čvrstoće R_m , faktora materijala C , eksponenta očvršćenja n te ukupnog produljenja pri točki loma epruvete A_t .

Tablica 5.3 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0° , 45° i 90° , materijal TS230 žareno, veličine epruveta A_{80} i A_{40}

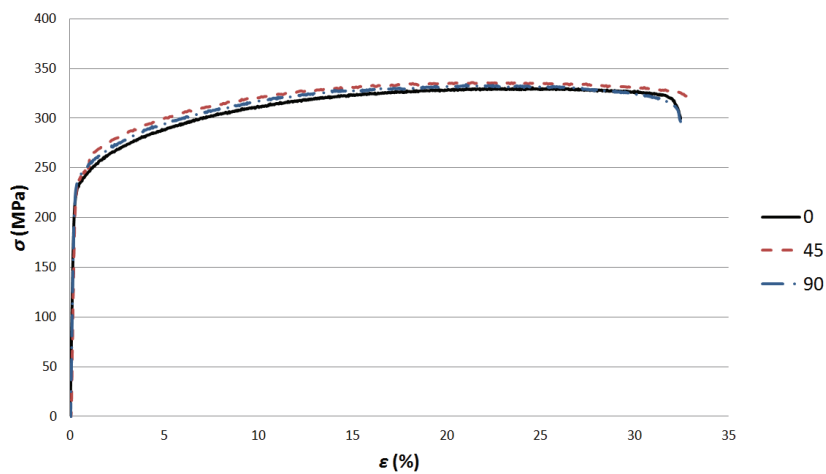
TS230, žaren Kut uzorka u odnosu na smjer valjanja lima	Epruvete A_{80}				Epruvete A_{40}			
	R_m (MPa)	C (MPa)	n	A_t (%)	R_m (MPa)	C (MPa)	n	A_t (%)
0°	352,09	408,66	0,0903	33,51	332,31	382	0,0915	32
45°	342,4	394,8	0,0828	35	333,78	389	0,0864	33
90°	350,69	411	0,0878	32,46	333,75	388	0,0906	32

Tablica 5.4 Rezultati ukupnog faktora materijala C i eksponenta očvršćenja n za materijal TS230, žaren

TS230, žaren	Epruvete A_{80}	Epruvete A_{40}
C (MPa)	402,31	387,61
n	0,0859	0,0887



Slika 5.10 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TS230, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{80}



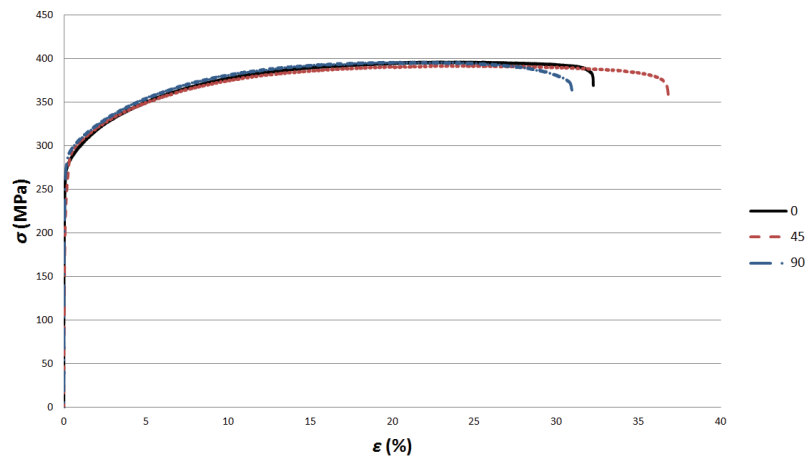
Slika 5.11 Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TS230, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{40}

Tablica 5.5 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0° , 45° i 90° , materijal TS230, nežaren, veličine epruveta A_{80} i A_{40}

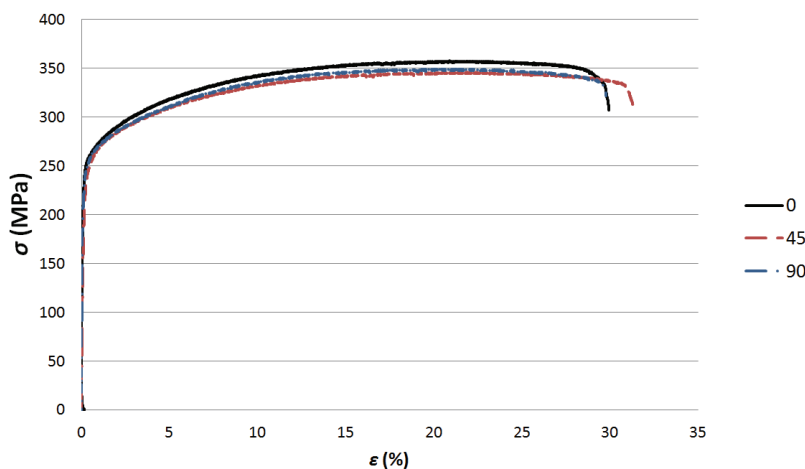
Nežareno TS230 Kut uzorka u odnosu na smjer valjanja lima	Epruvete A_{80}				Epruvete A_{40}			
	R_m (MPa)	C (MPa)	n	A_t (%)	R_m (MPa)	C (MPa)	n	A_t (%)
0°	401,48	474,22	0,0966	33,17	354,97	424	0,047	29,93
45°	390,8	458,35	0,086	37,32	346,37	398	0,082	30,65
90°	388,23	485,57	0,098	31,27	349,7	410	0,09	28,34

Tablica 5.6 Ukupni faktor materijala C i eksponent očvršćenja n za materijal TS230, nežaren

TS230, nežaren	Epruvete A_{80}	Epruvete A_{40}
C (MPa)	469,12	407,5
n	0,0919	0,0755



Slika 5.12 Dijagram $\sigma - \epsilon$ materijal TS230 za kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{80}



Slika 5.13 Dijagram $\sigma - \epsilon$ - materijal TS230 za kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{40}

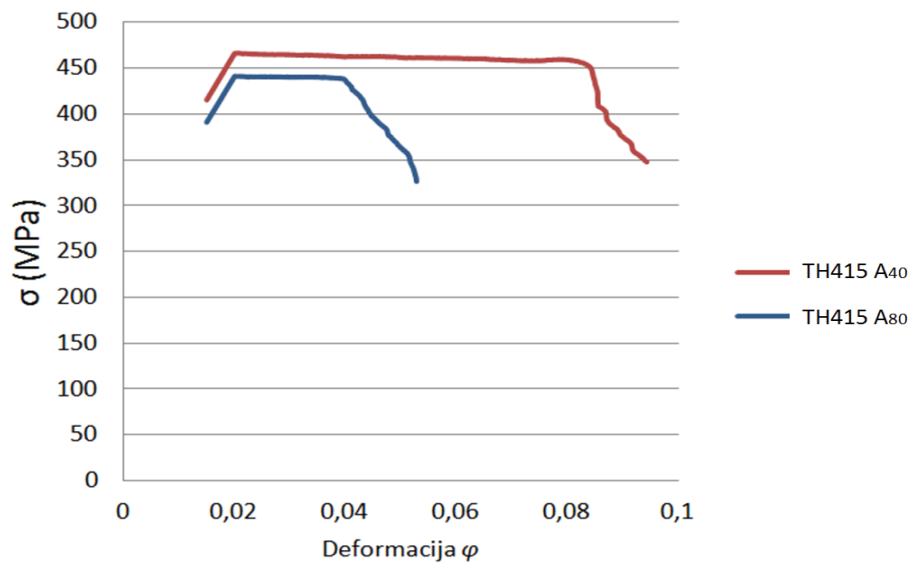
Tablica 5.7 prikazuje dobivene srednje faktore materijala C i eksponenta očvršćenja n za provedene eksperimente na limu TS230 žaren. Kako se planira ispitivati žarene limove u simulaciji će se koristiti dobivene vrijednosti za žarene epruvete. Srednja vrijednost tako dobivenih rezultata koristiti će se u softveru ABAQUS. Ispitati će se mogućnost simuliranja inkrementalnog procesa oblikovanja limova TS230.

Tablica 5.7 Rezultati srednje vrijednosti faktora materijala C i eksponenta očvršćenja n za ispitivani lim TS230 prema dobivenim rezultatima tablice 5.4

	TS230
C	394,96 (MPa)
n	0,0873

Za materijal TH415 ustanovljeno da je eksponent očvršćenja približno jednak nuli. Materijal se ponaša prema idealno plastičnom stanju tečenja. Iz tog razloga zbrojene su vrijednosti dobivene vlačnim testom od deformacije $\varphi = 0,02$ do najkraćeg produljenja postignutom. Rezultirajuće

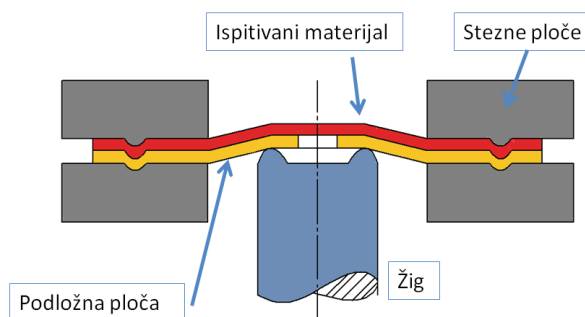
srednje vrijednosti dobivene su od ispitanih žarenih epruveta A₄₀ i A₈₀ za kutove 0°, 45° i 90°, slika 5.14.



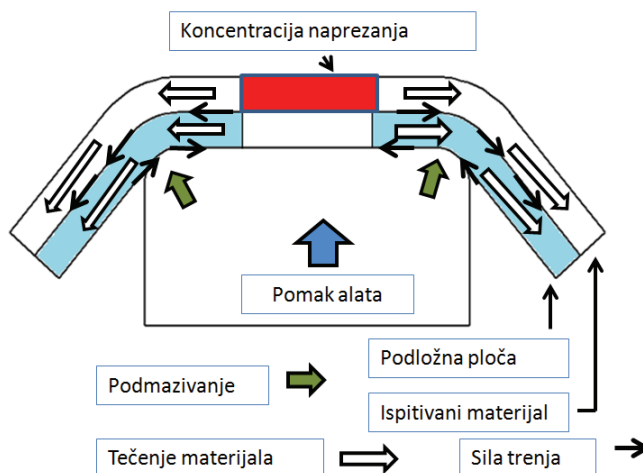
Slika 5.14 Dijagram $\sigma - \varphi$ - materijal TH415 žarene epruvete A₄₀ i A₈₀, srednje vrijednosti raspona deformacije φ za ispitane kutove epruveta 0°, 45° i 90°

5.2. Marciniak ispitivanje

Ispitivanje tipa „Marciniak“, test sposobnosti oblikovanja lima izveden je na Sveučilištu u Ljubljani, "Fakulteti za strojništvo", "Laboratorij za preoblikovanje (LAP)", prema laboratorijskim dokumentima za izvedbu Marciniak testa [82]. Marciniak ispitivanje ima kao cilj utvrditi biaksijalna granična naprezanja materijala bez prisutnosti površinskog trenja, te otkrivanje grešaka jednolikim rastezanjem materijala što uzrokuje ranu pojavu lokalizirane pukotine najčešće paralelno u smjeru valjanja. Rezultati se prikazuju dijagramom sposobnosti deformiranja lima a smjernice o izvođenju ispitivanja nalaze se u standardu ISO 12004. Slika 5.15 prikazuje žig te shemu alata u kontaktu s materijalima koji se koriste u Marciniak ispitivanjima. Između steznih ploča postavlja se ispitivani materijal i podložna ploča sa rupom u centru. Alat se utiskuje u lim i postižu se različita deformacijska stanja. Tečenje materijala podložne ploče uzrokuje dodatno trenje u ispitivanom materijalu. Funkcija podložne ploče je da eliminira trenje na način da promjeni smjer površinskog trenja koje se javlja na ispitivanom uzorku. Pojavljuje se koncentracija naprezanja i konačni lom materijala u središnjem području ispitivanog materijala, iznad rupe u podložnoj ploči. Rupa na podložnoj ploči osigurava da ispitivano područje koje se snima nije u kontaktu sa ispitivanim limom, slika 5.16.

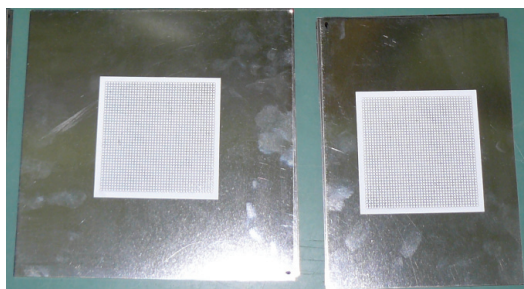


Slika 5.15 Shema alata u Marciniak testiranjima



Slika 5.16 Marciniak ispitivanje - koncentracija naprezanja [79]

Materijal podložne ploče treba biti isti kao ispitivani ali deblji, moguće je koristiti i druge materijale koji imaju veću sposobnost deformiranja od ispitivanog. Debljina podložne ploče utječe na silu kojom se djeluje u Marciniak ispitivanju, tanja ploča rezultira manjom silom u ispitivanju. Jednako tako deblja ploča ima veću sposobnost deformiranja, te je potrebno da osigura deformaciju ispitivanog lima, lom ne smije nastati na podložnoj ploči. Prema potrebnoj sili da se maksimalno deformira ispitivani lim bira se debljina podložne ploče. Standard ISO 12004 2:2008 za izradu dijagrama sposobnosti oblikovanja razmatra debljinu lima od 0,3 do 4 mm. Izvedena je analiza materijala TH415 i TS230 s ciljem dobivanja dijagrama sposobnosti oblikovanja¹⁷ lima. Analize lima izvedene su na različito odrezanim oblicima u cilju dobivanja različitih točaka pucanja, a samim time i različitih deformacija, što omogućava izradu dijagrama granične deformabilnosti. Ispituju se uzorci različitih širina kako bi se ispitalo sposobnost naprezanja materijala (jednoosno, dvoosno i ravninsko stanje naprezanja). Za potrebe ispitivanja izrezani su uzorci početnih dimenzija za svaki materijal, 200 x 140 mm, 20 uzoraka te 200 x 200 mm, 15 uzoraka, slika 5.17.



Slika 5.17 Pripremljeni uzorci limova TS230 i TH415 za ispitivanje prema Marciniaku

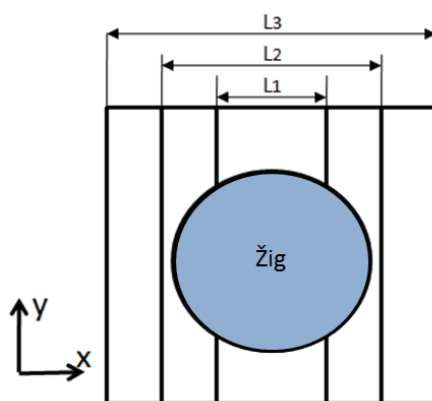
Na svakom uzorku je formirana kružna mreža, 41 x 41 kružnica, sa kružnicama promjera 2 mm, slika 5.17. Kružna mreža tiskana je prema dokumentaciji za sitotisak u tvrtci *Derlink*, Slovenija. Za potporni materijal pri testiranju odabran je materijal DC01, debljine 1 mm, kako bi se osigurala veća sposobnost deformiranja podložne ploče od ispitivanog materijala. Na svakoj potpornoj ploči je vodenim mlazom izrezana kružnica promjera 30 mm radi potrebe lokaliziranja pojave pukotine, slika 5.18.



Slika 5.18 Pripremljene podložne ploče, materijal DC01 debljine 1 mm

¹⁷ Dijagram sposobnosti oblikovanja - Forming limit diagram - (FLD)

Na taj način osigurava se ispitivanje sposobnosti deformiranja ispitivanog materijala kod kojega će ranije nastati lom. Ispitni uzorci počinju dimenzijama 200 x 200 mm te se naknadno smanjuju prema odabranom planu mjerenja i rezultati se ispisuju na dijagram sposobnosti oblikovanja lima. Kada se koristi veća širina ispitnog uzorka, tada su vanjske sile koje djeluju veće od unutarnjih što rezultira biaksijalnim rastezanjem. U slučaju kada se koristi ispitni uzorak sa manjom širinom tada vanjske sile u x smjeru uzrokuju veće unutarnje sile u y smjeru, što rezultira rastezanjem u x smjeru i sažimanjem u y smjeru, slika 5.19. Kod manjih širina ispitanih uzoraka rezultati se pozicioniraju na lijevu stranu dijagrama sposobnosti oblikovanja. Uzorci kod kojih je pukotina započela sa rastom na rubovima, zbog zareza na rubu epruvete nisu uzeti u obzir. U ovome ispitivanju koristile su se širine od 200, 140, 130, 128, 125, 120, 100, 70, 40, 30 i 22 milimetara.



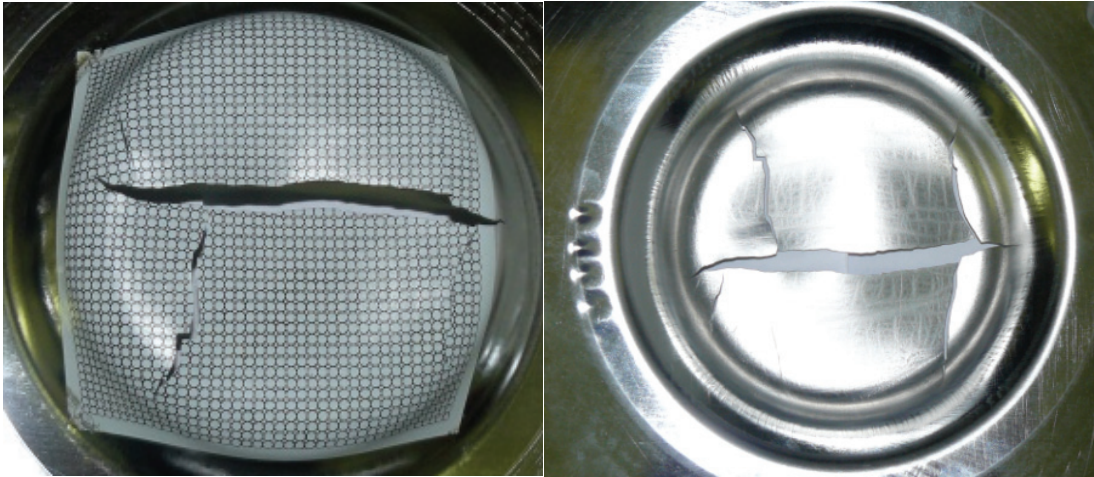
Slika 5.19 Promjena širina ispitivanih uzoraka potrebna za izradu krivulje sposobnosti oblikovanja

Analiza je sprovedena monokromatskom kamerom (objektiv Navitar 1024 x 1024 ½ CCD) na hidrauličkoj preši LITOSTROJ HUO 2-250-400, slika 5.20, softverom za grafometrijsku analizu. Točnost snimanja kamere je $\pm 2,5$ % pri mjerenju kružnica $d = 2$ mm. Izvršeno je određivanje deformacija pomoću analize promjera nedeformirane mreže (kružnice) i deformirane mreže (elipse). Za analizu odabrane su kružnice u neposrednoj blizini nastanka pukotine na promatranoj mreži.

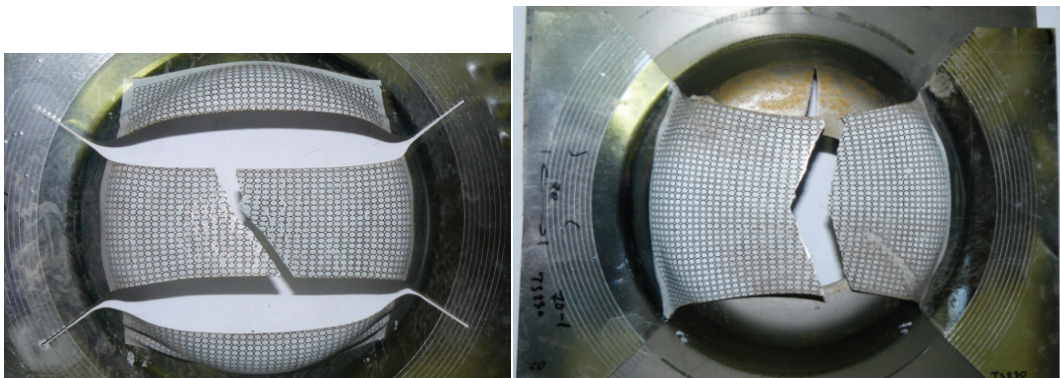


Slika 5.20 Stroj HUO 2-250-400 sa postavljenom monokromatskom kamerom objektiv Navitar (1024 x 768 ½ CCD), snimala se postavljena mreža kružnica [82]

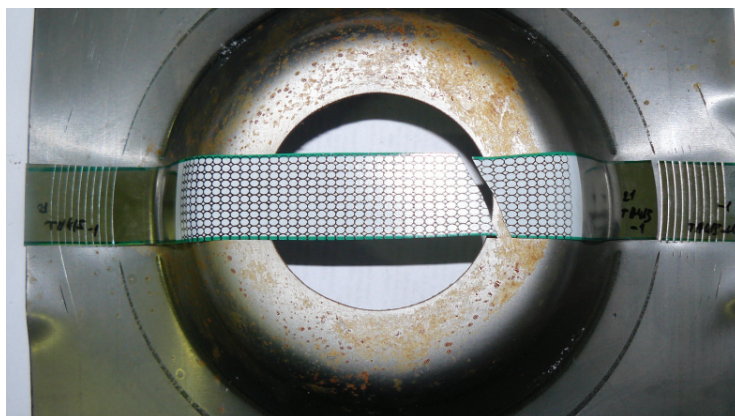
Orijentacija i oblik svake analizirane elipse i kružnice izračunavan je iz 200 točaka na njihovom opsegu (konturi), što se vidi na slici 5.21, 5.22 i 5.23. Iz svih 200 točaka koje aproksimiraju elipsu, računalo automatski, slika 5.23, postavlja dijagram sposobnosti oblikovanja, slika 5.25. Prilikom oblikovanja žig je nepomičan a matrica se pomiče prema dolje, kako bi se održala konstantna udaljenost između kamere i ispitivane epruvete tijekom pokusa.



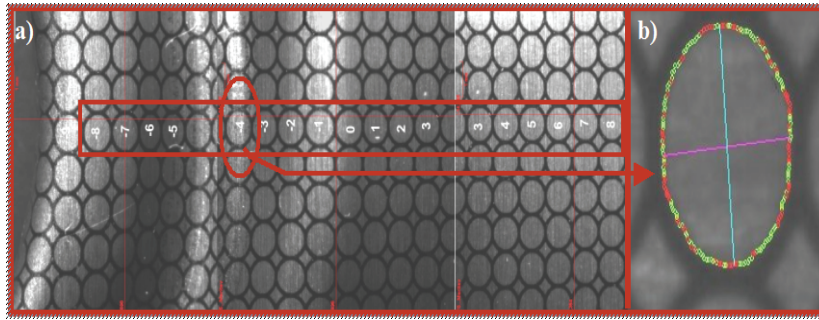
Slika 5.21 Lomljenje limova, kod TH415 došlo je do pojave Lüdersovih traka



Slika 5.22 Specijalna izvedba epruvete od 40 mm i od 70 mm



Slika 5.23 Primjer epruvete sa 30 mm te izgled deformirane podložne ploče



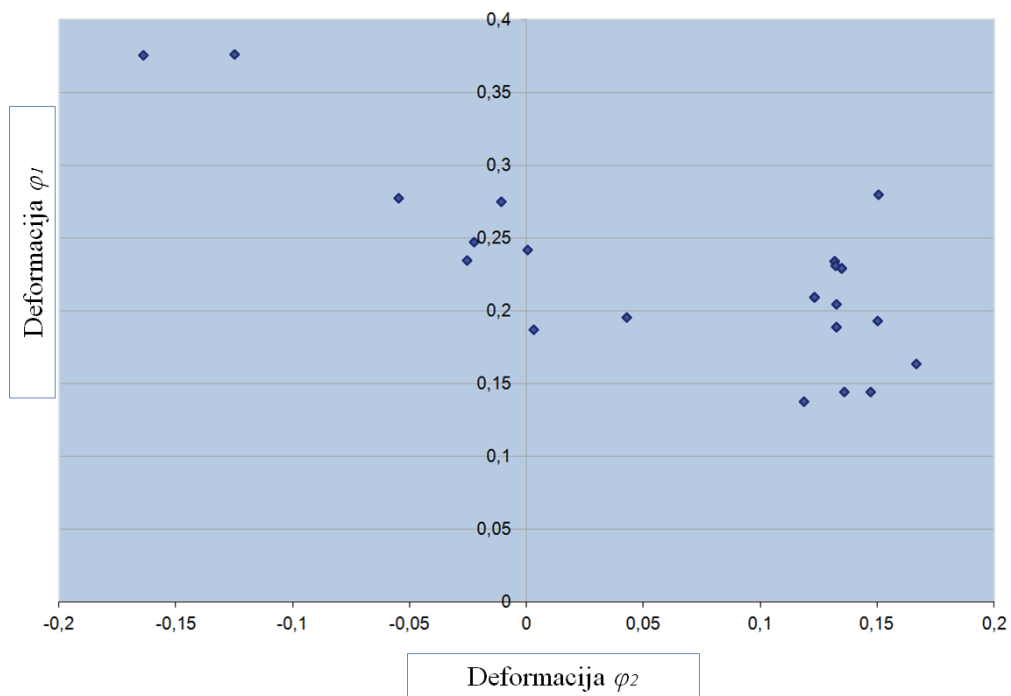
Slika 5.24 Odabir točaka za analizu dijagrama za sposobnost oblikovanja: a) odabir točaka, b) ispitivanje opsega (konture) [83]

Slika 5.25 i tablica 5.8 prikazuju eksperimentalne rezultate ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TH415. U tablici 5.8 su prikazani uspješni pokusi ispitivanja lima TH415 sa pripadajućom širinom epruvete i ispitanim brojem točaka. Slika 5.26 prikazuje krivulju sposobnosti oblikovanja za materijal TH415. Deformacije se izračunavaju prema izrazu [40]:

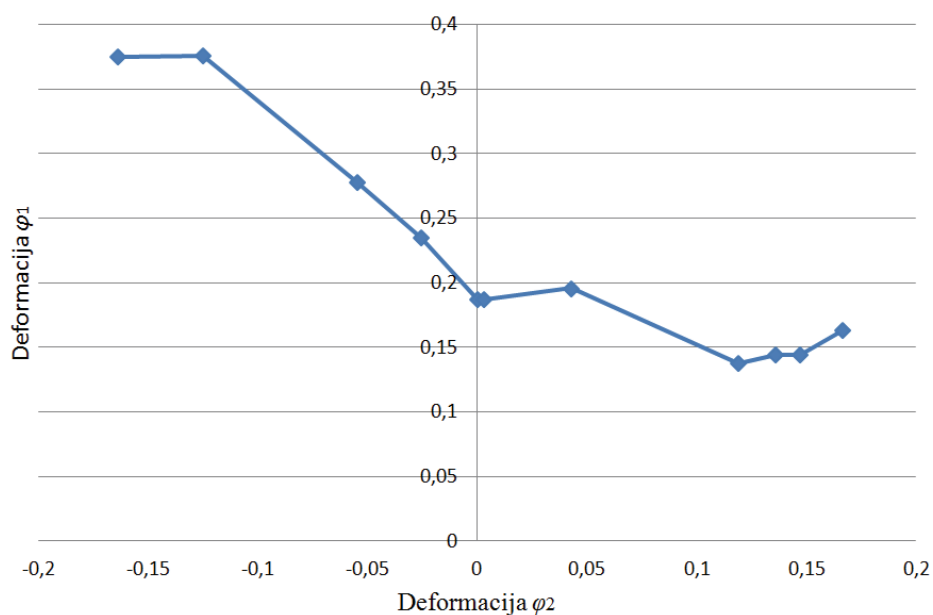
$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d} \text{ i } \varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d}, \quad (5.6)$$

gdje je:

d = početni promjer kružnice, a l_1 = širina kružnice u odnosu na početni promjer, l_2 = visina kružnice u odnosu na početni promjer.



Slika 5.25 Eksperimentalni rezultati ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TH415



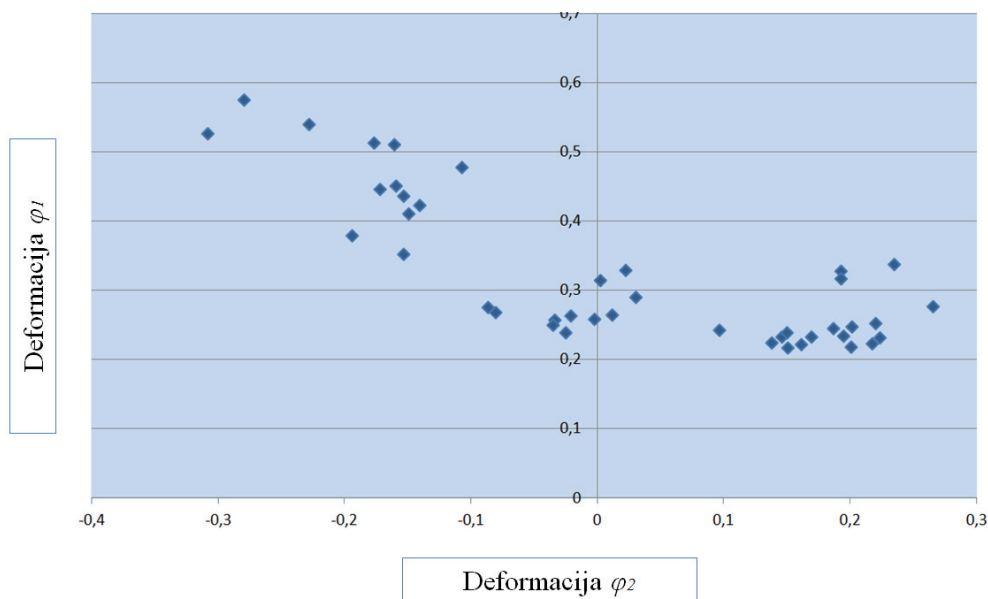
Slika 5.26 Krivulja sposobnosti oblikovanja za materijal TH415

Tablica 5.8 Rezultati ispitivanih epruveta za Marciniak test, materijal TH415

Širina uzorka (mm) - broj uzorka - broj ispitanih točaka	φ_1	φ_2
200_2_1	0,1349	0,2289
200_2_2	0,132	0,2337
200_2_3	0,1234	0,2091
200_2_4	0,1349	0,2289
200_2_5	0,132	0,2337
200_2_6	0,1234	0,2091
200_2_7	0,1349	0,2289
200_2_8	0,132	0,2337
200_2_9	0,1234	0,2091
200_1_1	0,1328	0,2044
200_1_2	0,1667	0,1633
200_1_3	0,1325	0,1888
200_3_1	0,1501	0,1931
200_3_2	0,1325	0,1888

Širina uzorka (mm) - broj uzorka - broj ispitanih točaka	φ_1	φ_2
140_2_1	0,1507	0,28
140_2_2	0,1321	0,2307
140_4_1	0,1473	0,1445
140_4_2	0,1362	0,1441
130_1	0,1189	0,1378
70_4	-0,1248	0,376
120_3	-0,0254	0,2348
100_1	-0,0547	0,2776
22_1	-0,1638	0,3753
125_1_1	-0,0109	0,2749
125_1_2	-0,0225	0,2473
125_1_3	0,0006	0,2418
128_1_1	0,043	0,1957
128_1_2	0,0031	0,1869

Slika 5.27 i tablica 5.9 prikazuju eksperimentalne rezultate ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TS230. U tablici 5.11 su prikazani pokusi ispitivanja lima TS230 sa pripadajućom širinom epruvete i ispitanim brojem točaka. Slika 5.28 prikazuje krivulju sposobnosti oblikovanja za materijal TS230. Na slici 5.29 prikazana je usporedba dobivenih dijagrama sposobnosti oblikovanja za materijal TS230 i TH415.

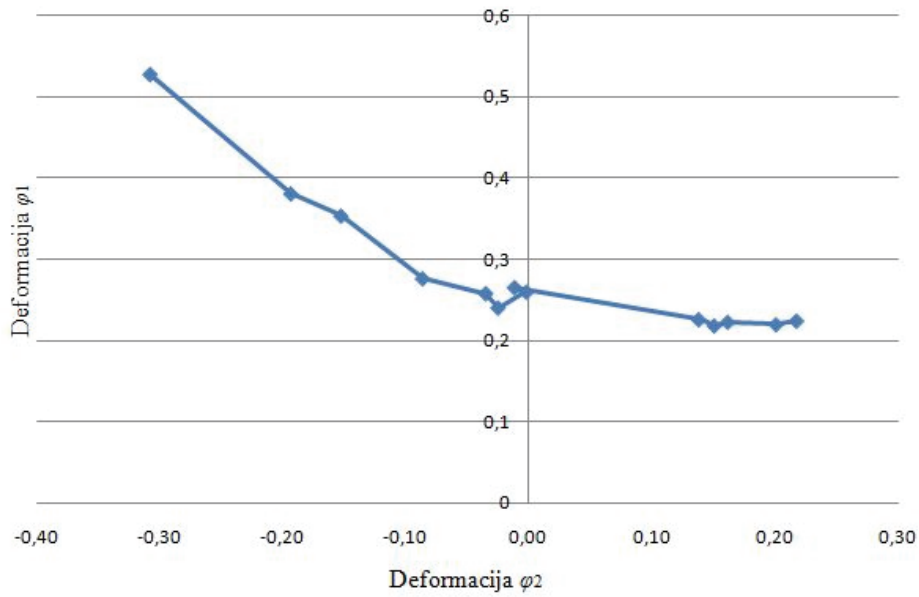


Slika 5.27 Eksperimentalni rezultati ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TS230

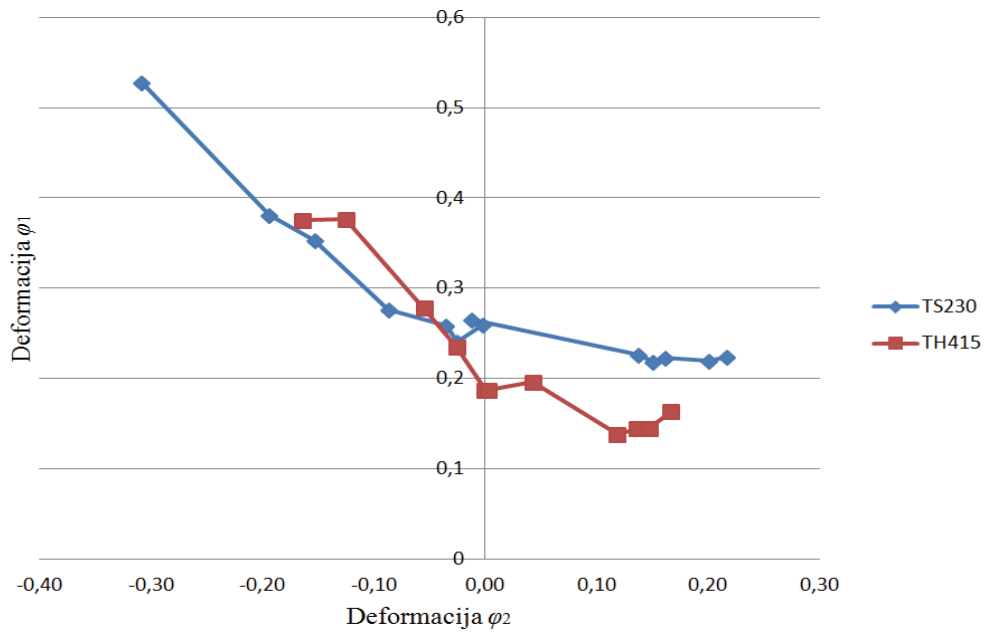
Tablica 5.9 Rezultati ispitivanih epruveta za Marciniak test, materijal TS230

Širina uzorka (mm) - broj uzorka - broj ispitanih točaka	φ_1	φ_2
200_1	0,2339	0,1696
200_1_2	0,2229	0,1617
200_2_1	0,3296	0,1925
200_2_2	0,3177	0,1928
200_3_1	0,2775	0,2655
200_3_2	0,3385	0,2349
130_2_1	0,2642	-0,021
130_2_2	0,26	-0,0021
120_1_1	0,2691	-0,0805
120_1_2	0,2763	-0,0866
40_2_1	0,5277	-0,3083
40_2_2	0,5764	-0,2797
40_3	0,5408	-0,22795
70_1_1	0,5143	-0,1769
70_1_2	0,4119	-0,1494
70_1_3	0,5118	-0,1605
70_2_1	0,4241	-0,1406
70_2_2	0,4786	-0,107
100_2_1	0,3535	-0,153
100_2_2	0,4522	-0,1596
100_3_1	0,437	-0,1533
100_3_2	0,4468	-0,1722

Širina uzorka (mm) - broj uzorka - broj ispitanih točaka	φ_1	φ_2
120_3_1	0,2581	-0,034
120_3_2	0,2518	-0,0352
130_1_1	0,2405	-0,0252
130_1_2	0,2655	0,0118
130_3_1	0,3299	0,0225
130_3_2	0,2913	0,0307
140_1_1	0,226	0,1381
140_1_2	0,2184	0,1507
140_1_3	0,2342	0,146
200_6_1	0,2402	0,15
135_2_1	0,2335	0,2233
135_2_2	0,2536	0,2201
135_2_3	0,2352	0,1945
132_1_1	0,2439	0,0968
135_3_1	0,2243	0,2177
135_3_2	0,2488	0,2015
135_3_3	0,2198	0,201
135_3_4	0,2461	0,1865
30_1_1	0,3809	-0,1938
132_2_1	0,3161	0,0021



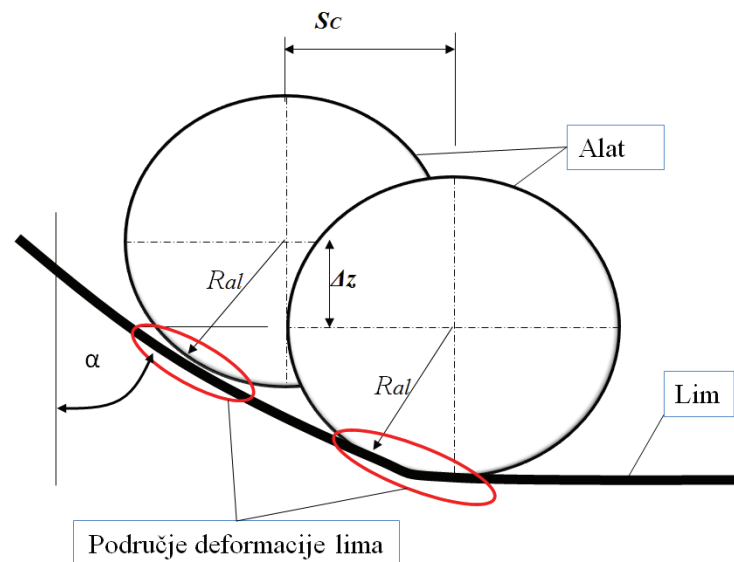
Slika 5.28 Krivulja sposobnosti oblikovanja za materijal TS230



Slika 5.29 Usporedba krivulja sposobnosti oblikovanja ispitivanih limova TS230 i TH415

6. Analitičko modeliranje SPIF procesa

Za razliku od drugih postupaka, kod inkrementalnog oblikovanja deformiranje se izvodi u vrlo malom i limitiranom kontaktnom području, u jednoj točki. Na slici 6.1 prikazana je shema kontakta alata u procesu.



Slika 6.1 Deformirani i nedeformirani dijelovi lima prilikom oblikovanja [13]

Deformirani slojevi na limu ovise o radijusu alata R_{al} , kutnoj brzini ω , te o posmaku v_T (brzini kretanja po definiranoj putanji), vertikalnom pomaku Δz i udaljenosti između horizontalnih prolaza alata S_c . Tijekom obrade deformacija se kreće odabranom putanjom sve dok se ne postigne određeni oblik. Obradni centri omogućuju da se parametri mijenjaju tijekom obrade. Najveći utjecaj na veličinu deformiranih slojeva u jednoj točki imaju parametri vertikalnog pomaka Δz i udaljenost između prolaza alata S_c . Mala udaljenost između prolaza alata S_c uzrokuje prijelaz preko već deformiranih slojeva. Veliki vertikalni pomak Δz može uzrokovati pretjerano utiskivanje alata u lim što može dovesti do loma. Kako bi se uspostavio kontrolirani proces deformiranja potrebno je uskladiti parametre Δz i S_c . Poznavanje distribucije deformiranih i nedeformiranih dijelova lima osigurava kvalitetno postavljanje procesa [13, 43].

Kod tankostjenog lima malo neslaganje u parametrima uzrokuje nepravilnosti na površini materijala i nastanak pukotine. Osim toga, kombinacija ta dva parametra utječe na hrapavost površine te zajedno sa kutnom brzinom ω i posmakom v_T utječu i na temperaturu u procesu. Slika 6.2 prikazuje naprezanja kod dubokog vučenja i inkrementalnog oblikovanja [84]. Time poznavanje krivulje očvršćivanja i njenog ponašanja nudi širi raspon proizvodnih mogućnosti. Pri tome je kod tankostjenog materijala važno pratiti nepravilnosti u strukturi koji utječu na strukturu i usmjerenje zrna te širenje dislokacija. Zagrijavanjem materijal omekšava i dolazi do efekta dinamičke rekristalizacije zrna. Zrna postaju manja, jednakih veličina i usmjerenja, te

Nakon rasterećivanja materijal se ponaša prema pravcu „HG“ koji je paralelan sa pravcem „OE“. Pri ponovnom opterećenju proces se nastavlja odvijati po pravcu „HG“ te se od točke „G“ nastavlja sa deformiranjem. U procesu inkrementalnog oblikovanja javlja se višestruki prolaz alata po već deformiranom sloju. Prema tome uzimajući u obzir sliku 6.2 i 6.3 možemo zaključiti kako će se ponašati materijal pri lokalnom deformiranju inkrementalnim oblikovanjem u jednoj točki.

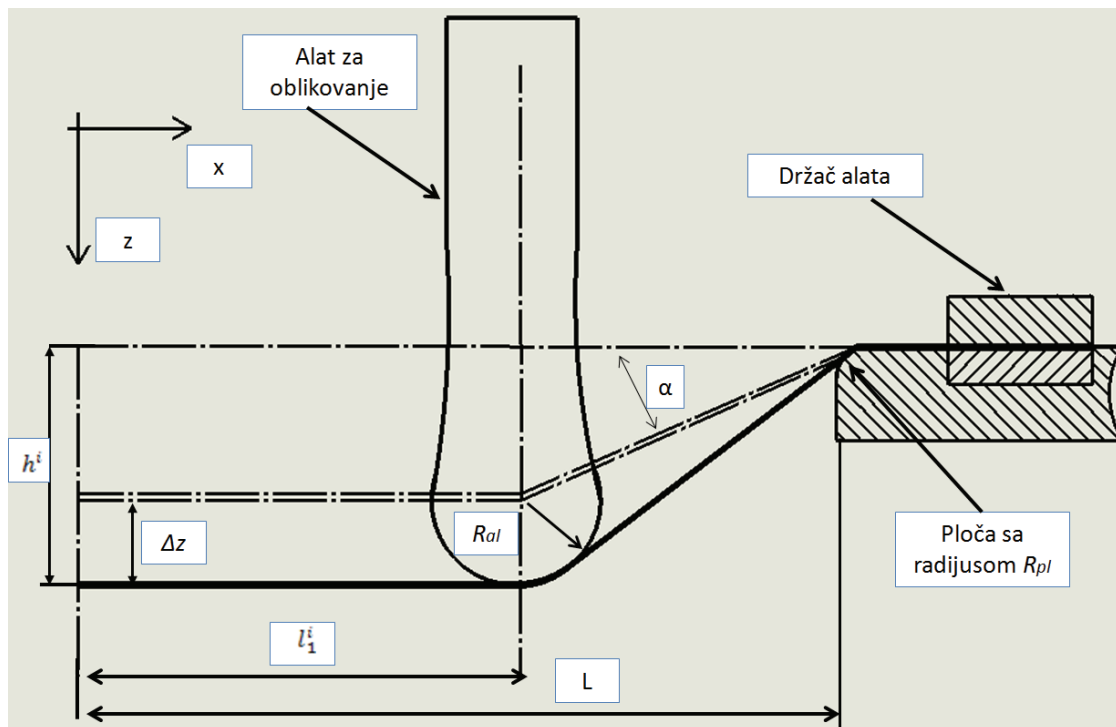
Na slici 6.4 Iseki H. je predložio 2D model temeljen na modelu ispuščivanja [84]. Gdje je R_{al} radijus alata, Δz vertikalni pomak u z - osi, h^i ukupna prijeđena visina, l_1^i udaljenost središta alata od centra oblikovanog predmeta, R_{pl} odabrani radijus ploče, L ukupna duljina od ruba naprave do centra oblikovanja.

Po modelu Iseki H. [13, 84], slika 6.4 i 6.5 za „plastično naprezanje“ pretpostavlja se:

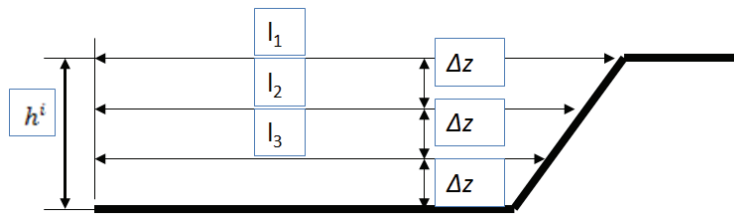
- naprezanje u modelu prilikom oblikovanja odgovara približno ravninskom stanju naprezanja čeličnih limova,
- ploča je izotropna,
- ploča se jednoliko deformira u kontaktu sa alatom,
- u slučaju konstantnog spuštavanja alata, metal se rasteže sukladno izrazu (6.1), slika 6.5, a ukupno rastezanje jednako zbroju manjih rastezanja.

$$(l_{2+}^i l_3^i \geq l_1^{i+1}). \quad (6.1)$$

Pri tom treba uzeti u obzir da je ukupni vertikalni pomak uvjetovan sa $h^i = \sum \Delta z_i$.



Slika 6.4 Shematski prikaz 2D inkrementalnog oblikovanja [13, 84]

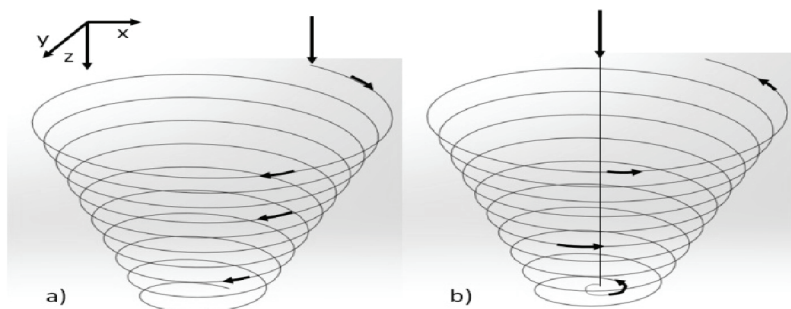


Slika 6.5 Shematski prikaz promjene duljine sukladno izrazu (6.1)

Po modelu Iseki H. [13, 85] također se pretpostavlja:

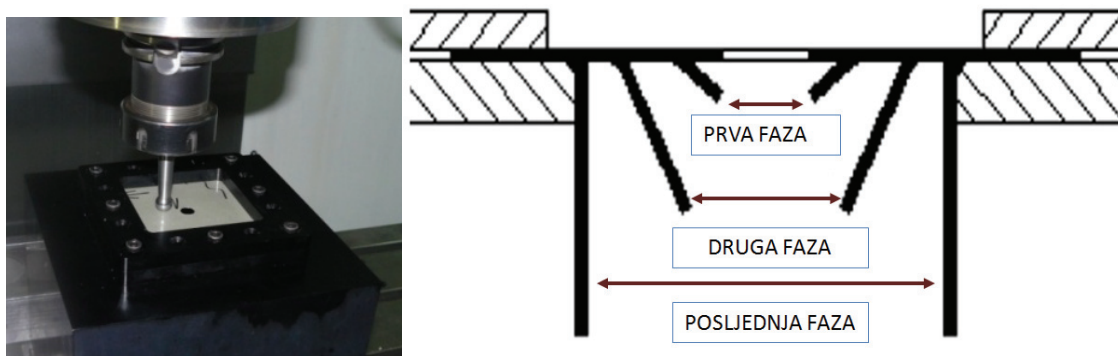
- nema trenja između alata i izratka, točka kontakta između alata i ploče može biti aproksimirana pravokutnim trokutom,
- da su sile oblikovanja konstantne u horizontalnoj ravnini,
- naprezanje savijanja i sile trenja se mogu zanemariti zbog ravninskog stanja naprezanja i u slučaju kada alat idealno rotira tj. postigne se valjanje,
- nedeformirani dio blizak lokalno deformiranom dijelu se kruto pomiče zbog krutosti kristalnih rešetki,
- krivulja naprezanja je pretpostavljena Holloman - Ludwigovom relacijom.

Pretpostavka bez trenja je iz razloga da se postigne idealno valjanje bez trenja. Međutim, kod tankostjenog lima trenjem je moguće povećati temperaturu i time povećati sposobnost oblikovanja što je prikazano provedenom istraživanju u ovome radu. Sile jesu konstantne u horizontalnoj ravnini, ali zbog rotacijskog djelovanja te odabrane putanje i stanjivanja materijala, sile mijenjaju svoje vrijednosti. Potrebno je definirati i udaljenost horizontalnih prolaza alata S_C koja osigurava stabilno ponašanje sile u procesu. Kod obrade lima moguće je iskoristiti kritičnu silu na način da se prati točka popuštanja materijala te da se u tom trenutku promijeni putanja, kut ili dimenzije alata. Na taj se način mogu se identificirati točke popuštanja i mijenjanjem parametara obrade povećati sposobnost deformiranja lima. Putanju alata u SPIF obradi najlakše je opisati spiralom koja se kontinuirano spušta, slika 6.6. Alat kružno rotira i prema obradnim parametrima vertikalnog pomaka Δz i udaljenosti između horizontalnog prolaza alata S_C spušta se prema dolje. Postoje dvije glavne izvedbe od vanjskog oboda te pomak u z - osi, slika 6.6 a), te ulaz alata u centar stegnutog lima te pomak u z - osi slika 6.6 b). U oba slučaja se lim deformira sloj po sloj, svaki sloj je udaljen za odabrani Δz .



Slika 6.6 Putanja alata a) od ruba prema centru i b) od centra prema rubu [6]

U slučaju na slici 6.6a lim se deformira stvarajući kružnice od maksimalnog odabranog promjera prema najmanjem. U slučaju na slici 6.6b lim se deformira iz središta ili blizu središta stegnuto lim, te se kružnice stvaraju od najmanjeg promjera prema najvećem. Prilikom spuštanja u svakom se trenutku mogu mijenjati parametri obrade kako bi se postigao optimalni proces i tražena geometrija. Prednost odabira putanje pomaka alata po vanjskom obodu stegnuto lim je formiranje vanjskog kruga koji uravnotežuje stanja naprezanja te smanjuje elastični povrat. Na stegnutom limu u blizini ruba radne naprave stvara se deformirani sloj koji daje krutost potrebnu da se kontrolirano izvode nove deformacije. Odabir takve putanje dovodi do stabilnijeg procesa i konačnih dimenzija. Ukoliko se obrada vrši odabirom putanje pri kojoj se alat pokreće iz središta stegnuto lim, doći će do savijanja lima prilikom utiskivanja alata u stegnuti lim. Pri odabiru takve putanje u početku obrade, prilikom stvaranju novih deformacija dolazi do promjena geometrije zbog diskontinuiranog kontakta alata sa limom. Ispitivanja se provode kako bi se stabiliziralo takvu obradu, a najčešće rješenje koje se koristi je oblikovanje sa otvorenom rupom u centru [7], slika 6.7.



Slika 6.7 Obrada izratka (rupa u centru) - lijevo, višefazno oblikovanje - desno [3, 7]

Valja napomenuti, da je geometriju moguće postići i mikro-oblikovanjem cijelih slojeva. Taj proces je spor i nije ovisan o temperaturi, međutim trajanje za proizvod iste kvalitete je i do 20 puta veće od klasičnog spuštanja po obodu. Takav proces je nepraktičan osim u slučajevima ravnjanja limova i ciljanog očvršćivanja proizvoda.

6.1. Stanjivanje lima

Prema [22] istraživano je stanjivanje lima, pri čemu je ispitivana razlika veličine vertikalnog pomaka Δz , te udaljenosti između prolaza alata S_C . Kod asimetričnog inkrementalnog oblikovanja (AISF) debljina lima se smanjuje zbog lokalnog deformiranja. Sinusoidna krivulja korištena kod oblikovanja valjanjem¹⁸, smatra se dobrom aproksimacijom [24, 46] koja opisuje stanjivanje lima ovisno o lokalnom kutu vučenja α . Inkrementalno oblikovanje karakterizirano je

¹⁸ Oblikovanje valjanjem - shear spinning

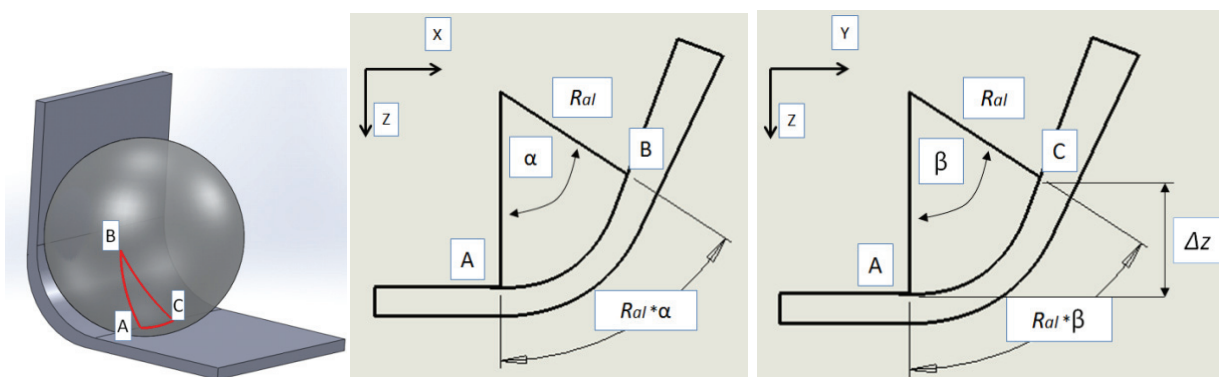
cikličkim lokaliziranim deformacijama. Kim i Yang koriste sinusoidalni zakon (6.2) kako bi opisali aproksimaciju konačne debljine [46]:

$$t_f = t_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right), \quad (6.2)$$

gdje je: t_0 - početna debljina lima, t_f - konačna debljina lima, a α kut mjereno u odnosu na horizontalnu ravninu. Za strategiju oblikovanja u jednome nizu vertikalnih pomaka Δz , gdje se alat kreće u z - osi i za malene kutove α može se reći da je sinusoidalni zakon dobra aproksimacija debljine lima na kraju postupka oblikovanja. U kombinaciji sa krivuljom sposobnosti oblikovanja sinusoidalni zakon proračuna stanjivanja lima nudi dobru procjenu ponašanja materijala u procesu obrade.

6.2. Kontaktne površine inkrementalnog oblikovanja

Kontaktne površine definirane malom zonom na rubu deformiranog lima sa promjenjivim oblikom ovisno o elasto-plastičnim naprezanjima koja se javljaju zbog promjene u procesnim parametrima. Zato se ona računa po metodi sferne trigonometrije, sferičnog trokuta s kutom od 90 stupnjeva¹⁹ koji je lociran na glavi površine alata za oblikovanje [13, 86], slika 6.8.

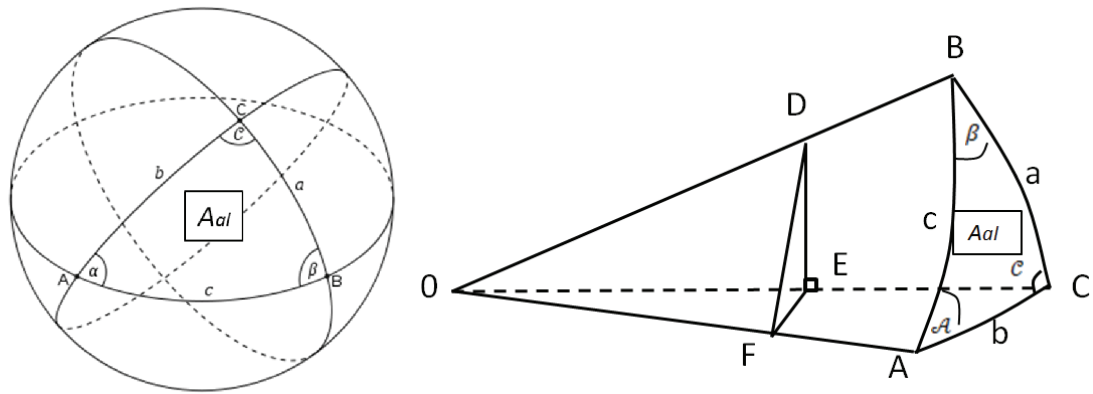


Slika 6.8 Određivanje kontaktne površine alata u obradi [13]

Prema teoriji za izračun sferne trigonometrije ukoliko se pretpostavi da vrijedi da je jedan od kutova C jednak 90° a ostali kutovi manji od 90° tada sljedeći izrazi vrijede (slika 6.9) [86]:

- $\sin a = \sin \alpha \cdot \sin c = \tan b \cdot \cot \beta$,
- $\sin b = \sin \beta \cdot \sin c = \tan a \cdot \cot \alpha$,
- $\cos \alpha = \cos a \cdot \sin \beta = \tan b \cdot \cot c$,
- $\cos \beta = \cos b \cdot \sin \alpha = \tan a \cdot \cot c$,
- $\cos c = \cot \alpha \cdot \cot \beta = \cos a \cdot \cos b$.

¹⁹ Sferni trokut sa pretpostavkom kuta od 90° - right angled spherical triangles [13, 86]



Slika 6.9 Kontaktno područje - sferni trokut s pravim kutom [13, 86]

Strane sferne glave alata kružni su lukovi sa centralnom točkom a svi kružni lukovi definiraju centralnu točku glave alata. Suma unutarnjih kutova A, B, C uvijek je veća od π tako da se sferični trokut A_{al} (površina alata) može izraziti prema relaciji:

$$A_{al} = R_{al}^2 \cdot (\mathcal{A} + \mathcal{B} + \mathcal{C} - \pi), \quad (6.3)$$

gdje je R_{al} radijus glave alata. Ukoliko je jedan od kutova u trokutu jednak 90° , tada je sferični trokut limitiran linijom od točke A do točke C i B kako je prikazano na slici 6.8 i 6.9. Za a , b i c vrijede sljedeće relacije [13]:

$$a = R_{al} \cdot \alpha, \quad (6.4)$$

$$b = R_{al} \cdot \beta, \quad (6.5)$$

$$c = R_{al} \cdot (\arccos(\cos(\alpha) \cos(\beta))). \quad (6.6)$$

Važno je naglasiti da kontaktna površina ovisi o kutu kontakta sa materijalom koji se oblikuje te vertikalnom pomaku alata Δz . Prema slučaju u kojemu je $\mathcal{C} = 90^\circ$ slijedi [13]:

$$\begin{aligned} \tan a &= \sin b \cdot \tan \mathcal{A} \\ \tan(a) &= \sin(\beta) \tan \mathcal{A} \\ \mathcal{A} &= \arctan \frac{\tan \alpha}{\sin \beta}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \tan b &= \sin a \cdot \tan \mathcal{B} \\ \tan(\mathcal{B}) &= \sin(a) \tan(\mathcal{B}) \\ \mathcal{B} &= \arctan \frac{\tan \beta}{\sin a}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

U relacijama 6.7 i 6.8 α je kut izratka, a β se može definirati relacijom (6.9):

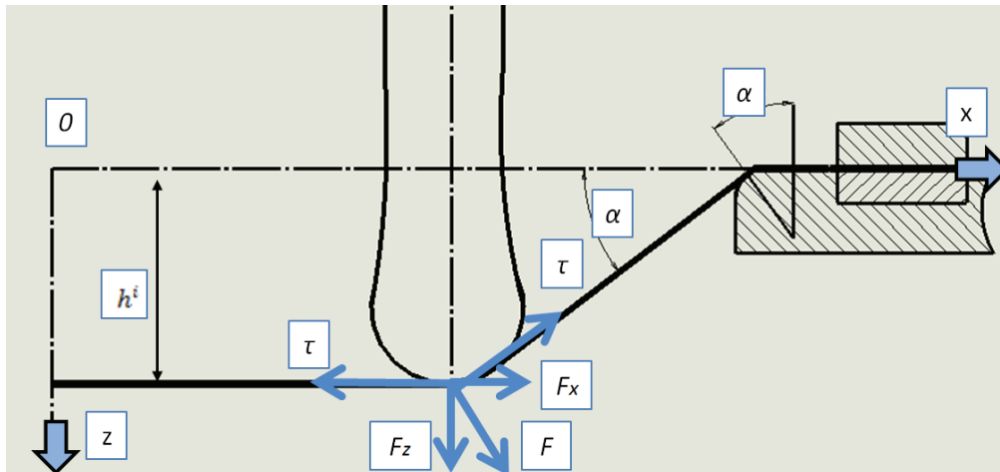
$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{R_{al} - \Delta z}{R_{al}} = 1 - \frac{\Delta z}{R_{al}}, \\ \beta &= \arccos \left(1 - \frac{\Delta z}{R_{al}} \right). \end{aligned} \quad (6.9)$$

Na taj način se može opisati kontaktna površina alata [13]:

$$A_{al} = R_{al}^2 \left(\arctan \frac{\tan \alpha}{\sin \beta} + \arctan \frac{\tan \beta}{\sin a} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (6.10)$$

6.3. Sila oblikovanja u inkrementalnom oblikovanju u jednoj točki

Kao kritična sila oblikovanja smatra se F_z [13, 84]. Određivanjem kritične sile oblikovanja, slika 6.10, te njenim promatranjem u procesu obrade moguće je odrediti faktor sigurnosti stabilnog tehnološkog procesa obrade. Potrebno je odrediti kritični kut obrade i razinu sile u tom trenutku.



Slika 6.10 Uvjeti stanja ravnoteže [13]

Smična sila je:

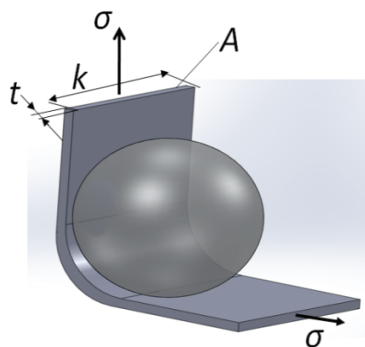
$$F_s = \int \tau dA, \quad (6.11)$$

gdje je:

F_s = smična sila,

τ = smično naprezanje.

Prema slici 6.11 k - je širina lima na koje djeluje naprezanje σ , a t - debljina tankostjenog lima, A - površina poprečnog presjeka $A = k \cdot t$, [13].



Slika 6.11 Naprezanje u točki oblikovanja [13]

Prema uvjetu stanja ravnoteže slika 6.10, dolazi se do izraza koji se koristi za izračun sile kod inkrementalnog oblikovanja lima [13]:

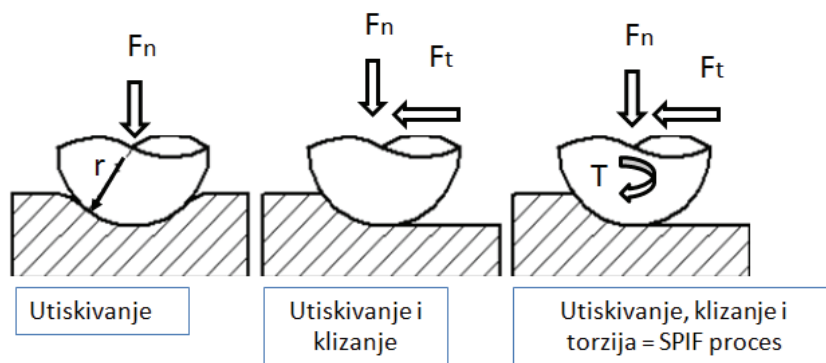
$$F_z^i = 2 \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \cdot \left(\sqrt{R_{al}^2 - (R_{al} - \Delta z)^2} + \frac{t_0 \cdot e^{-\varphi_x^i}}{2}\right) \cdot t_0 \cdot C \cdot (\varphi_x^i)^n \cdot e^{-\varphi_x^i} \cdot \sin \alpha^i, \quad i = 1 : n, \quad (6.12)$$

gdje je:

R_{al} - radijus alata, Δz - vertikalni pomak alata, C - faktor materijala, t_0 - početna debljina lima, α - kut oblikovanja, n - eksponent očvršćenja.

6.4. Trenje u procesu inkrementalnog oblikovanja

U inkrementalnom se oblikovanju koristi osim vertikalnog pomaka alata, posmak i rotacija oko vlastite osi. Rotacija alata oko vlastite osi može biti konstantna, može se mijenjati tijekom procesa ili alat može vršiti obradu bez rotacije. Mijenjanjem brzine vrtnje oko vlastite osi moguće je utjecati na zagrijavanje materijala. Izvor zagrijavanja materijala je trenje. Trenje u procesu inkrementalnog oblikovanja rezultat je utiskivanja, klizanja i torzije, slika 6.12.



Slika 6.12 Mehanizam trenja u procesu inkrementalnog oblikovanja [90]

Alat putuje po površini materijala i rotira se oko vlastite osi. U svim slučajevima trenje nastaje zbog klizanja alata po površini materijala neovisno o rotaciji alata [90]. Brzina rotacije alata može smanjiti trenje u odnosu na trenje klizanja, iz tog razloga može se pretpostaviti manje trenje od trenja dobivenog klizanjem [91].

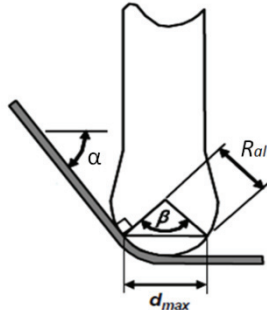
Zagrijavanje lima raste sa većim brojem rotacija i brzinama obrade. Trenje klizanjem uzrokuje generiranje topline koje je proporcionalno relativnom kretanju alata po površini materijala. Zagrijavanje lima će biti minimalno ukoliko je relativna brzina kretanja između alata i površine materijala mala (postizaje se trenje kotrljanjem a ne klizanjem). Sposobnost oblikovanja se povećava kako se brzina posmaka smanjuje i što je manje trenje između alata i lima [46]. Da bi se postiglo kotrljanje potrebno je da prijedena udaljenost pri konstantnom posmaku (v_T) bude jednaka prosječnom opsegu alata u kontaktu sa materijalom pomnoženom sa kutnom brzinom (ω). Ukoliko se pretpostavi područje kontakta, slika 6.13, u rasponu od d_{max} do d_0 , može se odrediti $d_{sr}=d_{max}/2$, trenje kotrljanjem se postiže prema [6]:

$$\omega = \frac{v}{\pi \cdot d_{sr}}, \quad (6.13)$$

$$d_{max} = R_{al} \sqrt{2(1 - \cos\beta)}, \quad (6.14)$$

$$\omega = \frac{v}{\pi \cdot R_{al} \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)}}, \quad (6.15)$$

gdje je: α kut savijanja, $\beta = 2\alpha$, v = brzina [6].



Slika 6.13 Shema izračuna trenja kotrljanja [6]

U ovome istraživanju sprovedi će se ispitivanje uređajem Tribometar (u poglavlju 10) kako bi se utvrdilo koeficijente trenja klizanja. U ispitivanju će se koristiti ispitni uzorak promjera 20 mm, kojim će se ispitivati ispitne epruvete lima silama od 10 do 40 N. Prema tri zakona trenja dobiven koeficijent trenja je jednak pri različito primijenjenim silama zbog linearnog odnosa.

Postoje tri zakona trenja:

1. Prvi Amontonsov zakon: „sila trenja izravno je proporcionalna primijenjenim opterećenjem“.
2. Drugi Amontonsov zakon: „sila trenja je neovisna o veličini kontaktnog područja“.
3. Coulombov zakon: „kinetičko trenje je neovisno o brzini klizanja“.

Za iskazivanje veličine trenja koristi se koeficijent (μ), njime se opisuje smična naprezanja koja se javljaju kao posljedica normalnog naprezanja [87]. Kod obrade deformiranjem Coulombov zakon ne vrijedi za sva stanja naprezanja, jer smično naprezanje τ_k ne može nadvisiti maksimalno smično naprezanje τ_{max} . Iz tog razloga razvijen je zakon „*engl.* interface friction law“ u kojemu se koristi izraz faktor smičnog trenja (m) [87, 88]. Postoje tri modela izražavanja smičnog naprezanja koje se javlja pri trenju (6.16, 6.17 i 6.18) [87]:

$$\tau_k = \mu \cdot \sigma_n, \quad (6.16)$$

gdje je:

τ_k - smično naprezanje koje se javlja pri kontaktu alata i lima,

σ_n - odgovarajuće normalno naprezanje,

μ - koeficijent trenja.

Izraz (6.17) poznat je kao Coulombov zakon, prema njemu postoji direktna proporcionalnost između smičnog naprezanja i normalnog naprezanja pri trenju, pri tome je koeficijent trenja konstantna vrijednost.

$$\tau_k = \mu \cdot K, \quad (6.17)$$

gdje je:

K - efektivno naprezanje.

Zakon trenja prema izrazu (6.18) vrijede kod procesa valjanja, izvlačenja, sužavanja i proširivanja. Kod njih je kontaktno naprezanje niže od efektivnog naprezanja.

$$\tau_k = m \cdot \tau_{max}, \quad (6.18)$$

gdje je :

τ_{max} - maksimalno smično naprezanje materijala koji se deformira,

m - faktor smičnog trenja²⁰ [87].

Zakon trenja prema (6.19) odgovara procesima kod kojih je normalno naprezanje veće od efektivnog naprezanja, u djelu kontaktne površine dolazi do pojave lijepljenja materijala uz alat. Smično naprezanje τ_k je u tom slučaju neovisno o normalnom naprezanju σ_n . Faktor smičnog trenja m kreće se u granicama od $m = 0$ za uvjet u kojemu nema trenja, do $m = 1$ za uvjet u kojemu dolazi do pojave lijepljenja [87]. Veza između faktora smičnog trenja m i koeficijenta trenja μ :

$$m = \mu \cdot \sqrt{3}. \quad (6.19)$$

²⁰ Faktor smičnog trenja (m) - shear factor.

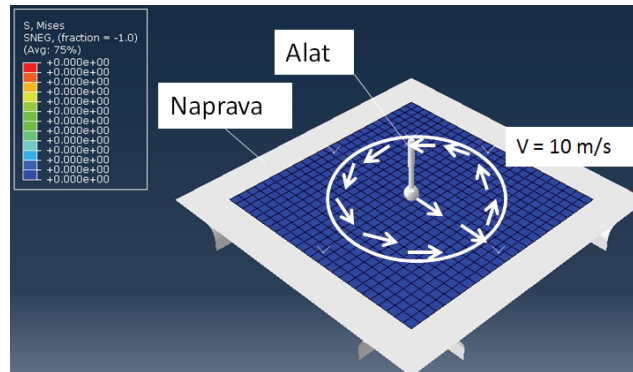
7. Numerički pristup rješavanju problema

7.1. Metoda konačnih elemenata (MKE)

Metoda konačnih elemenata je matematička tehnika potpomognuta računalom. Konačni elementi mogu biti jednodimenzijski, dvodimenzijski ili trodimenzijski. Mreža konačnih elemenata povezanih čvorovima opisuje ispitivano tijelo. Svaki element predstavlja dio fizičke strukture čiji ukupan broj utječe na gustoću mreže. Gustoća mreže utječe na rezultate koji se dobivaju analizom. Vrijeme potrebno za analizu ispitivanog tijela ovisi o količini informacija koju treba proračunati i snazi procesora koji se koristi. Optimalno vrijeme potrebno za proračun ponašanja modela ovisi o usporedbi dobivenih podataka sa provedenim eksperimentalnim ispitivanjem. Moguće je optimirati proračun na način da se definira gušća mreža na ciljanim područjima modela koji značajno ne utječu na rezultate. U ovome istraživanju odabran je softver ABAQUS za potrebe izrade modela i simuliranja inkrementalnog oblikovanja [13, 22, 43]. U pristupu rješavanja procesa deformiranja moguće je izvršiti proračun pomoću ABAQUS/Standard (Implicit) metode ili ABAQUS/Explicit. Razlika između ta dva procesora ogleda se u tome što je Implicit razvijan na osnovu teorije malih deformacija, dok se Explicit bazira na teoriji velikih deformacija. ABAQUS/Standard koristi Newton - Raphsonovu metodu za rješavanje nelinearnih problema. Kod nelinearne analize rješenje se ne dobiva rješavanjem sistema jednadžbi u jednom koraku, već je potrebno postupno dolaziti do rješenja. ABAQUS/Standard dijeli simulaciju na određeni broj inkremenata i traži rješenje za svaki inkrement, tako da se kombinira inkrementalni i iterativni postupak traženja rješenja nelinearnog problema. Implicitna metoda konačnih elemenata zahtjeva da se sistem jednadžbi računa na kraju svakog inkrementa za koji se traži rješenje. Kako model postaje složeniji i kako se povećava broj elemenata ovaj sistem jednadžbi se povećava. Isto tako za izračunavanje nelinearnih problema potreban je veći broj inkremenata. Time se nameće zaključak da za analizu procesa deformiranja, (koji su nelinearni, kako po pitanju materijala tako i po pitanju graničnih uvjeta (kontaktni uvjeti - trenje)), ova metoda postaje neadekvatna zbog velikog broja iteracija (inkremenata) do dobivanja konačnog rješenja. Za razliku od implicitne, eksplicitna metoda, koja se koristi u ABAQUS/Explicitu, ne zahtjeva izračunavanje uzastopnog sistema jednadžbi ili izračunavanje globalne matrice krutosti. Umjesto toga traži se dinamička ravnoteža od jednog inkrementa do drugog [92]. U ovome istraživanju odabrana je simulacija ABAQUS/Explicit metodom zbog složenosti SPIF procesa obrade u kojemu dolazi do istovremenog pomaka alata u x, y, i z - osi te rotacije oko vlastite osi [12, 13, 19, 61, 92]. Nedostatak Explicit analize je nemogućnost praćenja povijesti deformiranja u svrhu definiranja kuta elastičnog povrata.

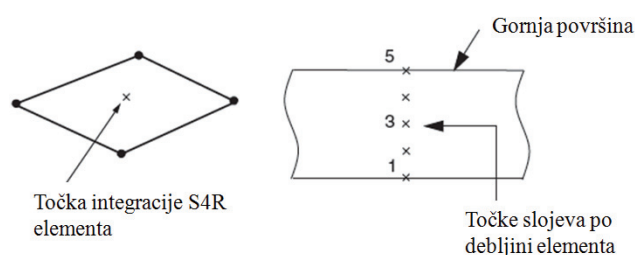
7.2. Simulacija softverskim rješenjem ABAQUS

MKE model postavljen je u softveru ABAQUS 6.10. Model se sastoji od 3D krutih nedeformabilnih tijela (alat i radna naprava) te odabranog deformabilnog tijela koji predstavlja bijeli lim, slika 7.1.



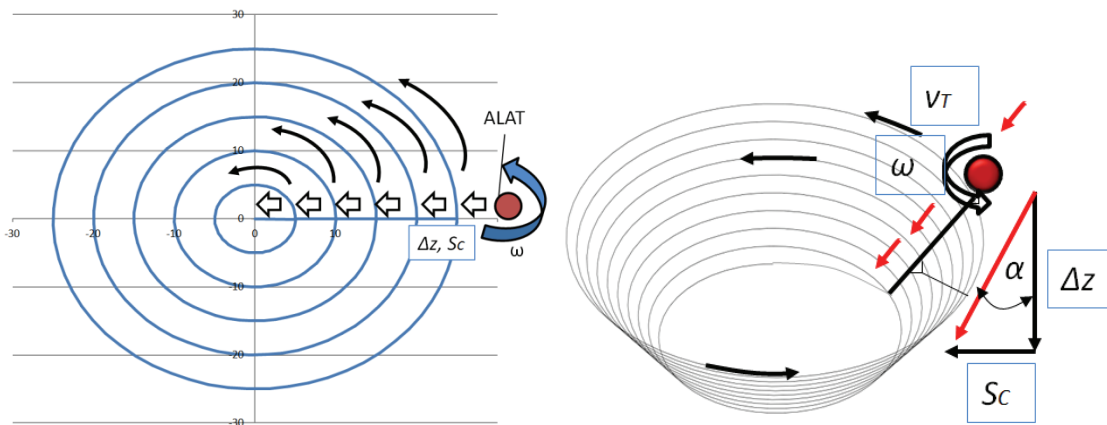
Slika 7.1 MKE model SPIF procesa u softveru ABAQUS

Deformabilnom tijelu je definirano elastoplastično ponašanje unosom podataka za krivulju naprezanje-deformacija, gustoće čeličnog lima, Poissonovog koeficijenta (0,3) i Youngovog modula elastičnosti (210 GPa). Krivulja naprezanje-deformiranje aproksimirana je pomoću Holloman-Ludwigove relacije (5.2) i eksperimentalno dobivenih rezultata vlačnog testa. Trenje je izračunato prema rezultatima provedenim u poglavlju 10. U simulaciji je za promjer alata 6 mm uzet koeficijent trenja $\mu = 0,25$ za lim TS230 dok je za trenje lima TH415 uzet koeficijent trenja $\mu = 0,4$. U simulaciji je korišten ljuskasti element (S4R) „*engl.* shell element“, sa 5 točaka integracije debljine lima (Simpson metoda izračuna), slika 7.2 [18, 20]. Korištena je mreža sa 2606 čvorova i 2513 elemenata S4R. Upotreba ljuskastog S4R elemenata umjesto 3D solid elemenata odabrana je prema literaturi koja upućuje na dobar odnos točnosti i vremena proračunavanja interakcije elemenata [13]. Solid elementi zahtijevaju minimalno tri sloja elemenata koji se spajaju što dovodi do značajno većeg broja stupnjeva slobode koje je potrebno proračunati. Prema literaturi brzina kretanja alata koja se koristi u simulacijama kreće se od 8 do 30 m/s [13]. U ovome istraživanju odabrana je maksimalna brzina kretanja alata $v = 10$ m/s, pri toj brzini, u Explicit proračunu svojstva materijala koji se oblikuju nisu ovisna o brzini oblikovanja [13].



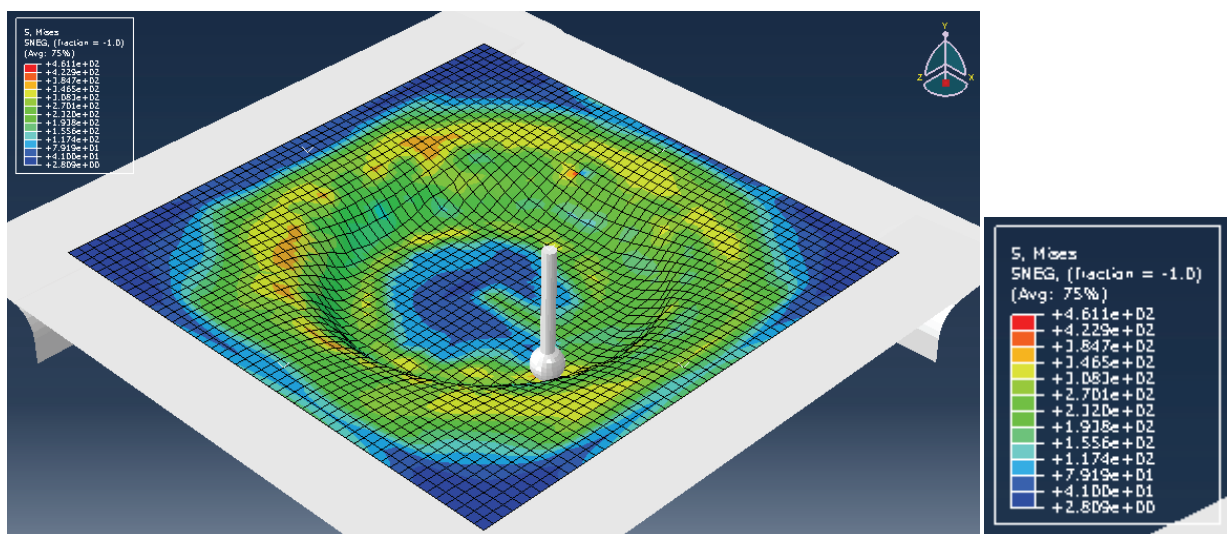
Slika 7.2 Odabir točaka integracije, te slojeva prema debljini ispitivanog materijala

Za odabir putanje alata u modelu SPIF procesa odbrana je naredba „smooth step“. Putanja je definirana kako bi se kretanjem alata postigao oblik krnjeg stošca, slika 7.3. Slika 7.3 daje shematski prikaz putanje alata - istovremeno kretanje u x i y smjeru (opisuje se kružnica), rotacija oko vlastite osi, vertikalni inkrementalni pomak alata Δz , te inkrementalni pomak u x - osi prema središtu krnjeg stošca - vertikalni prolaz alata S_C .



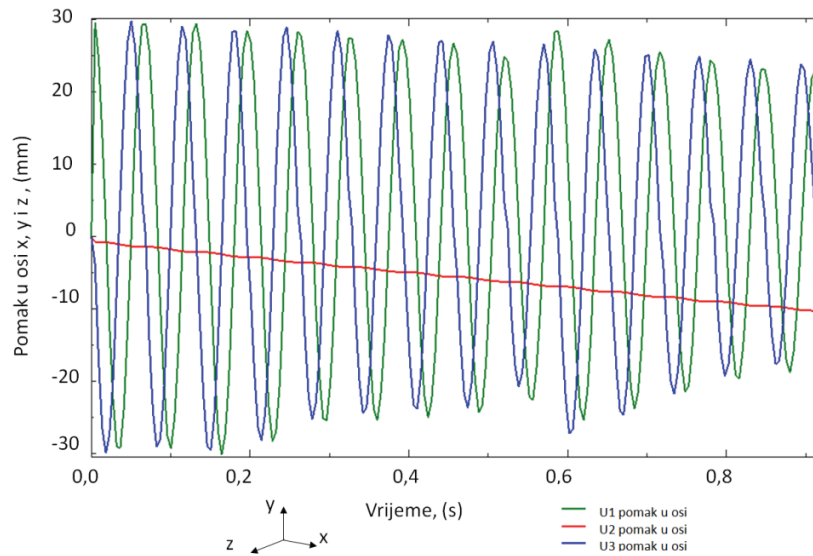
Slika 7.3 Prikaz izrade putanje gibanja alata u simulaciji

Slika 7.4 prikazuje rezultate Von Mises stanja naprezanja za simulaciju oblikovanja ispitivanog modela lima TH415 dubine 10 mm, kut 58° SPIF procesom.

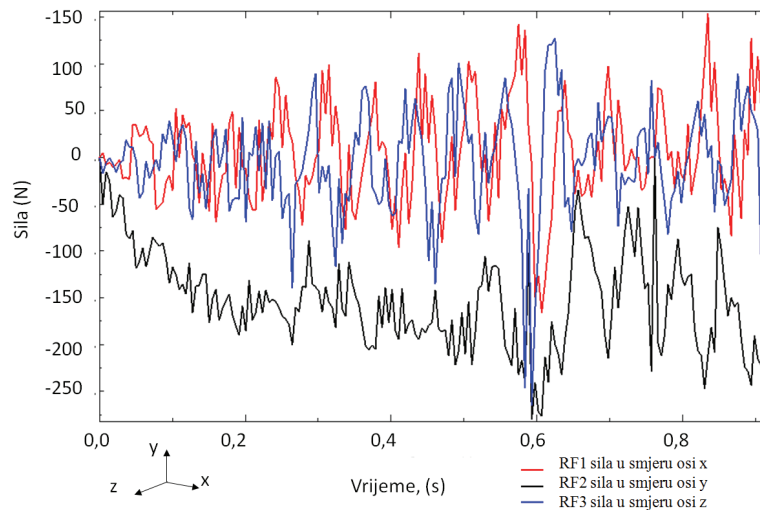


Slika 7.4 Von Mises stanje naprezanje lim TH415, simulacija krnjeg stošca visina 10 mm

Slika 7.5 prikazuje pomak alata u smjeru x, y i z - osi za vrijeme oblikovanja krnjeg stošca od 10 mm visine, za lim TS230. Vertikalni pomak Δz je u simulaciji izvršen prema U2 (y - osi). Iz slike 7.5 može se primijetiti ravnomjerni vertikalni pomak Δz , te istovremeni kružni pomak alata u osi U1 (x - osi) i U3 (z - osi) - osi za lim TH415, kut 58° . Slika 7.6 pokazuje veličine sile prilikom rotacije u smjeru x, i z - osi te sa silom u smjeru y - osi. Preklapanje sile u smjeru x i y - osi posljedica je kružne putanje alata.

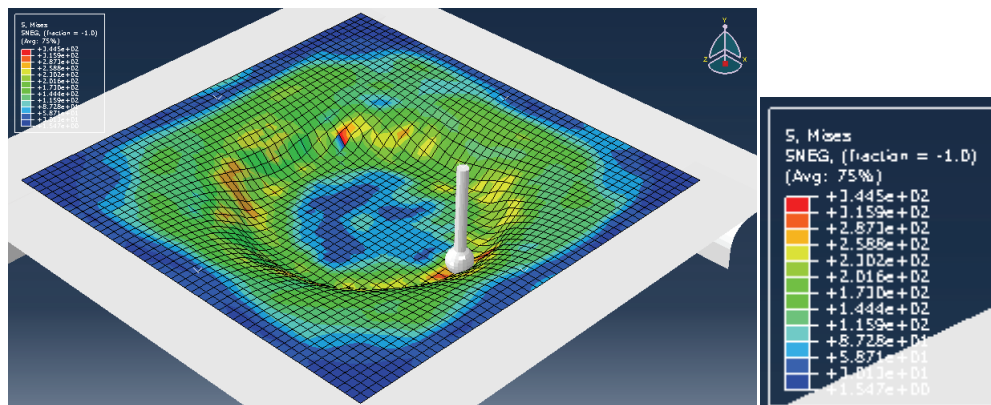


Slika 7.5 Pomaci alata u koordinatnom sustavu tijekom procesa obrade u U1 (x - os), U2 (y - os) i U3 (z - os) - osi za materijal TH415, kut 58°



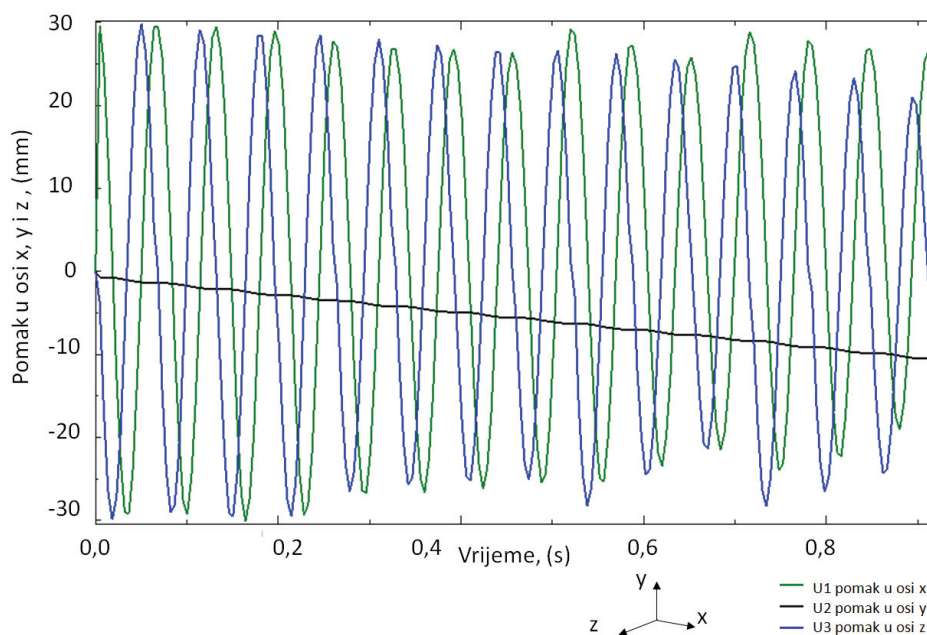
Slika 7.6 Djelovanje sile u x, y i z - osi

Slika 7.7 prikazuje rezultate Von Mises stanja napreznaja za simulaciju oblikovanja ispitivanog modela lima TS230 dubine 10 mm, kut 58° SPIF procesom.

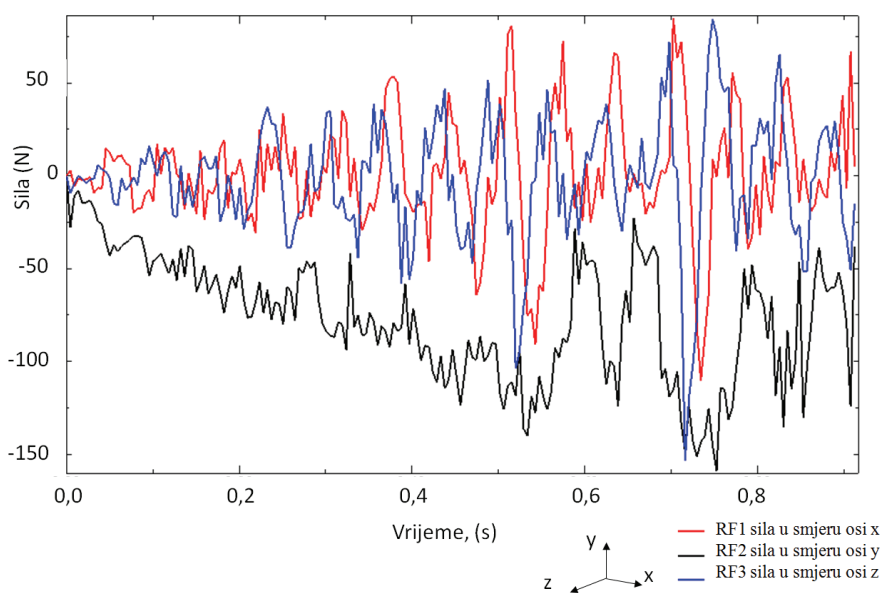


Slika 7.7 Von Mises stanje napreznaje lim TS230, simulacija krnjeg stošca visina 10 mm

Slika 7.8 prikazuje pomak alata u smjeru x, y i z - osi za vrijeme oblikovanja krnjeg stošca od 10 mm visine za lim TS230. Vertikalni pomak Δz je u simulaciji izvršen prema U2 (y - osi). Iz slike 7.8 može se primijetiti ravnomjerni vertikalni pomak Δz , te istovremeni kružni pomak alata u osi U1 (x - os) i U3 (z - os) - osi za lim TS230, kut 58° . Slika 7.9 pokazuje veličine sila prilikom rotacije u smjeru x, i z - osi te sa silom u smjeru y - osi. Interpretacija reaktivne sile ovisi o putanji alata te iz tog razloga nije ravnomjerna. Sila u smjeru x - osi raste prilikom kretanja alata u smjeru y - osi i obrnuto.

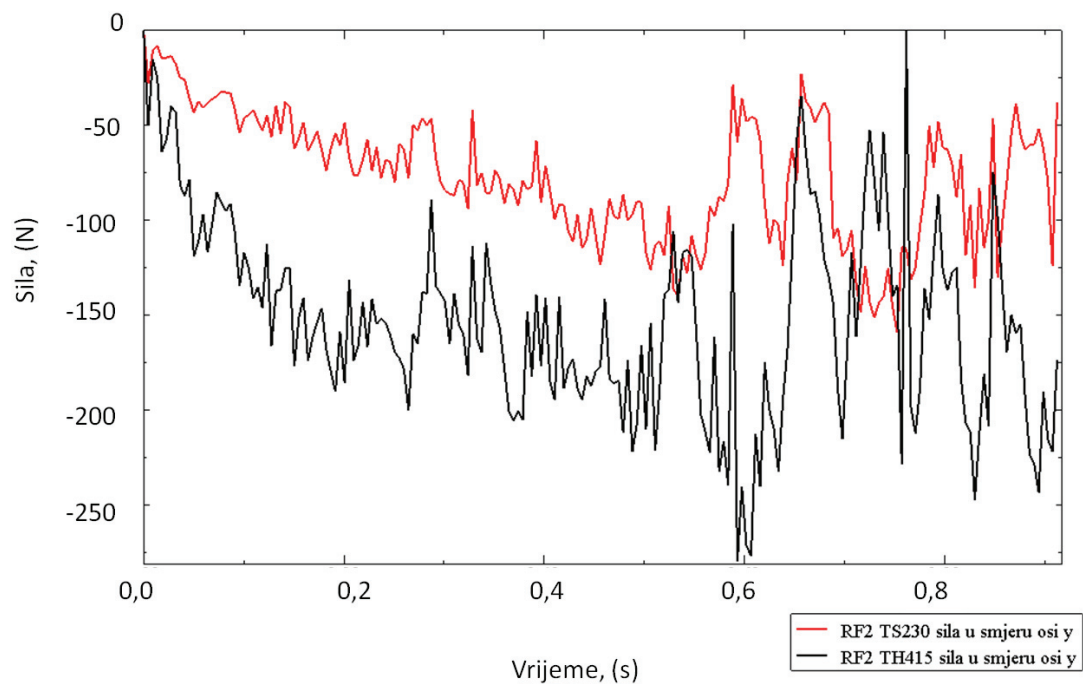


Slika 7.8 Pomaci alata u koordinatnom sustavu tijekom procesa obrade u U1 (x - os), U2 (y - os) i U3 (z - os) -osi za materijal TS230, kut 58°



Slika 7.9 Djelovanje sile u x, y i z - osi

Na slici 7.10 prikazana je usporedba sila koje se javljaju u procesu za lim TS230 i TH415, pri izradi krnjeg stošca visine 10 mm, kut 58° .



Slika 7.10 Usporedba sila u y - osi (RF2) za ispitivani lim TS230 i TH415, kut 58°

8. Eksperimentalni plan istraživanja SPIF procesa

8.1. Stroj

Ispitivanja SPIF procesa obrade izvršena su u tvrtki *Elcon-Geretebau* na CNC kontroliranom stroju WEMAS VZ 750, stroj za obradu glodanjem slika 8.1.



Slika 8.1 Stroj WEMAS VZ 750

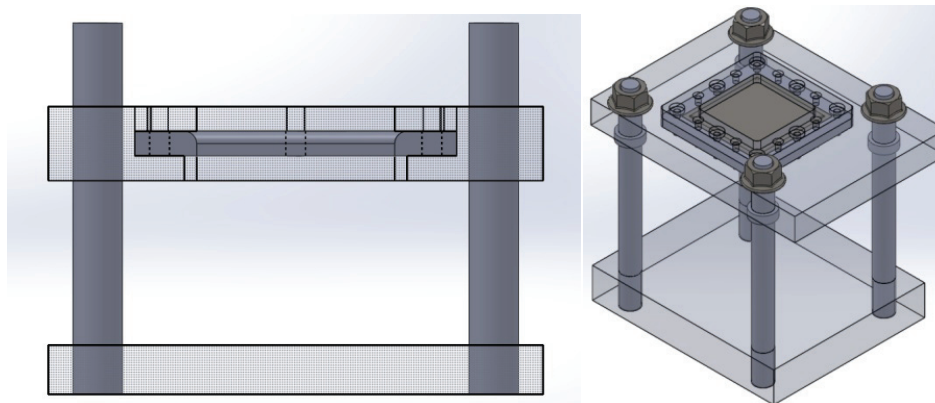
Karakteristike primijenjene glodalice su prezentirane u tablici 8.1. Općenito svi CNC kontrolirani mjerni strojevi su podobni za izvedbu inkrementalnog oblikovanja. Velike brzine, veliki radni volumeni i dovoljna krutost su poželjni parametri.

Tablica 8.1 Karakteristike stroja WEMAS VZ 750

Upravljačka ploča	HEIDENHEIN TNC 530
Godina proizvodnje	2004 g.
Veličina radnog stola	1000 x 500 mm
Maksimalna radna površina X, Y, Z	750 mm, 500 mm, 500 mm
Snaga glavnog vretena	7,5 kW
Maksimalna brzina vrtnje	20 - 8000 o/min
Brzina posmaka	1 - 5000 mm/min

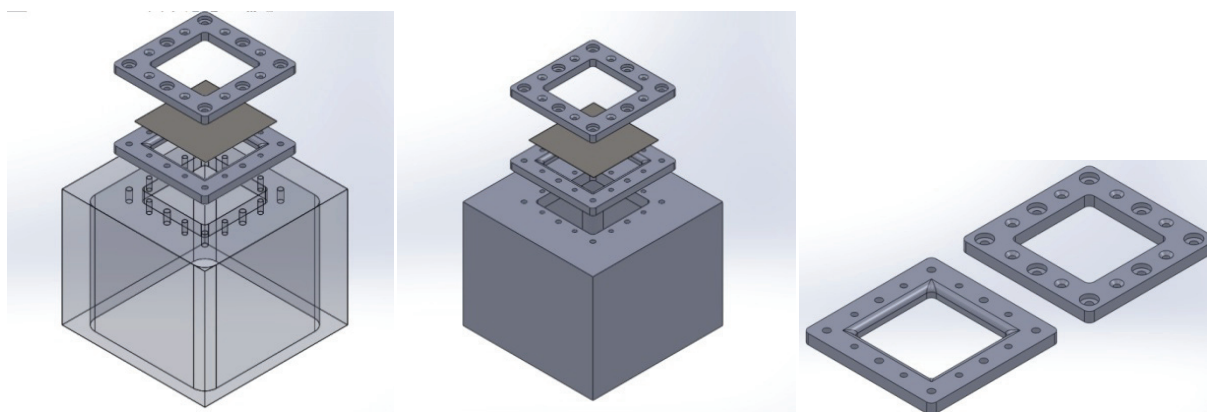
8.2. Odabir radne naprave za držanje lima

Radna naprava treba osigurati čvrsto stezanje i izbjegavati pojavu vibracija. Pomaci radne naprave nisu poželjni iako su u istraživanju s potpornim oblikom [9] vertikalno pomicali napravo u cilju ostvarivanja konstantnog stanja napreznja kako bi smanjili zaostala napreznja. Slika 8.2 prikazuje dizajn klasične izvedbe radne naprave sa potpornim stupovima. Klasična izvedba omogućava lako postavljanje predmeta ispod naprave.



Slika 8.2 Dizajn klasične radne naprave za SPIF proces u programu *SolidWorks*

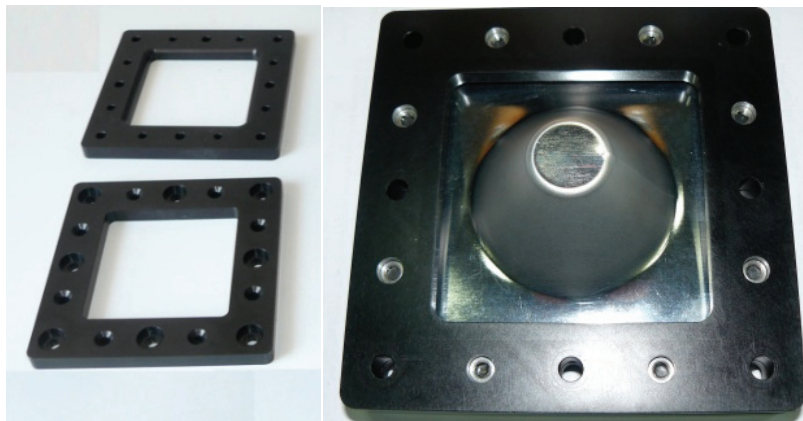
To rješenje sa vertikalnim pomicanjem naprave vrlo je slično principu inkrementalnog oblikovanja u dvije točke gdje se također s potpornim alatom traži veće naprezanje ploče lima. Postoji nekoliko uvjeta koje radna naprava mora zadovoljiti od kojih je najvažniji da osigura preciznost i točnost izrade. Preciznost podrazumijeva ponovljivost mjerenih rezultata i da bi to osigurala radna naprava mora imati konstantne uvijete stezanja, dobru krutost te mora biti dizajnirana na način da na odgovarajući način sudjeluje u izradi. Klasična izrada se zasniva na četiri stupa koji osiguravaju ploču na koju se postavljaju prsteni koji stežu lim koji se obrađuje. Klasični dizajn je odbačen u korist naprave koja osigurava veću krutost, izrađena je od jednog bloka slitine aluminija AlMg4.5Mn u tvrtci *Elcon-Geretebau* slika 8.3, 8.4 i 8.5.



Slika 8.3 Dizajn naprave u programu *SolidWorks*

Izrađena naprava ima manju mogućnost pojave vibracije nego što je to slučaj sa klasičnom izvedbom. Osim toga naprava je napravljena na način da se može stegnuti na vertikalnoj i na horizontalnoj glodalici. Budući da se obrađuje tankostjeni lim, pažnja je posvećena izradi posebnih prstena koji olakšavaju stezanje izratka sa radne naprave. Naime, na tankome limu važno je promatrati utjecaj gravitacije, točke stezanja i putanju alata naspram točaka stezanja zbog efekta elastičnog povrata. U samoj obradi naprava sudjeluje na proces izrade donjim dijelom prstena koji je u kontaktu sa limom, tom području zbog povećanog kontakta i

rezultirajućeg istežanja preporuča se upotreba radijusa na radnoj napravi. Koliki radijus koristiti u radnoj napravi ovisi o svojstvima veličine ispitivanog uzorka, radijusu alata s kojim se vrši obrada i o samim svojstvima alata. U ovome istraživanju na prstenu za stezanje na koji se lim postavlja odabran je radijus R5. Veća iskoristivost u procesu maloserijske proizvodnje i smanjenje vremena kod procesa glodanja postiže se upotrebom modularnih radnih naprava. Isti princip se može upotrijebiti i za tehnologiju inkrementalnog oblikovanja.



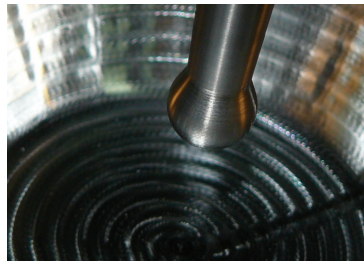
Slika 8.4 Konačna izvedba radne naprave i prstena za stezanje



Slika 8.5 Prikaz radne naprave stegnute u škipce

8.3. Alati

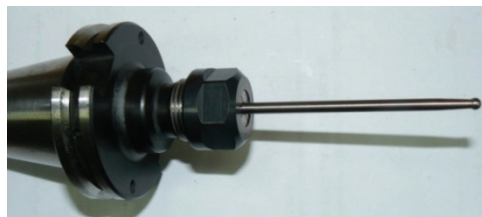
Alati koji se koriste u SPIF procesu jesu čelične šipke sa sferom na kraju, slika 8.6.



Slika 8.6 Alat nakon izvršene SPIF obrade

Sličnost s standardnim glodalima iskorištava se u programiranju obrade na CNC stroju što pojednostavljuje upotrebu. U ovome istraživanju putanja kretanja alata programirala se je „NC programom“, u softveru VeriCUT. Za odabir alata s kojim se vrši obrada u eksperimentima odabran je alat za glodanje utora.

Alat se može podijeliti na tri dijela: na sferu koja ulazi u kontakt, dio potreban da se ostvari zadovoljavajuća dubina te odgovarajući dio za potreban za stezanje. Dio potreban za stezanje osigurava krutost alata i njegovo stezanje utječe na pojavu vibracije. Na slici slika 8.7 prikazano je stezanje alata promjera $\text{Ø}6$ mm u standardni nosač alata CAT 40.



Slika 8.7 Standardni nosač alata CAT 40, stegnut alat promjera $\text{Ø}6$ mm

Za potrebe inkrementalnog oblikovanja alat treba imati povoljna mehanička svojstva, tj. dobar omjer između žilavosti i tvrdoće, obično su to alati od volfram (W) karbida ili kaljene šipke od alatnog čelika sa zaobljenom glavom radijusa npr. $\text{Ø}4$ do $\text{Ø}20$ mm [11, 24, 52]. Tvrdoća takvih alata kreće se od 60 - 65 HRC. Postoji mogućnost i da se kaljeni alati prevuku slojem Fe_3C cementitom. U ovome istraživanju su korišteni alati ukupne duljine 140 mm, dio alata je sa Strojniškog fakulteta, Ljubljana [13] a dio je posebno izrađen u tvrtci *PPM alati*, Čakovec za potrebe istraživanja slika 8.8.



Slika 8.8 Karbidni alati $\text{Ø}4$ mm, $\text{Ø}6$ mm (tri alata), $\text{Ø}8$ mm (dva alata), $\text{Ø}12$ mm, $\text{Ø}16$ mm [13, 18]

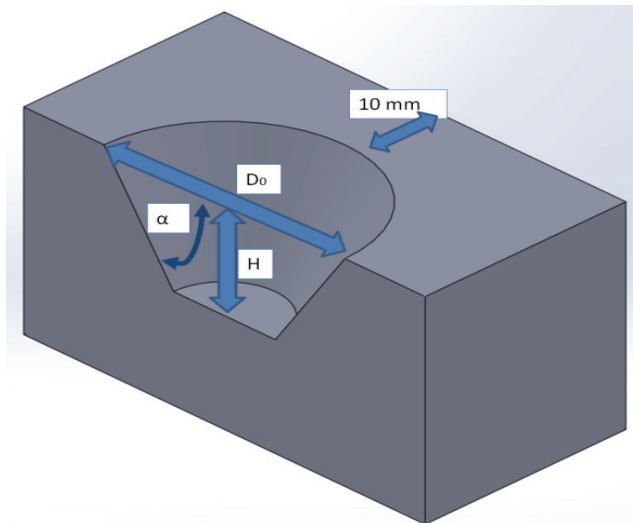
U nekim istraživanjima glave su prevučene polimernim plastičnim materijalima kako bi se spriječile kemijske reakcije ali u tim slučajevima trošenje takvih slojeva i njihov utjecaj je upitan [6, 12, 59, 61]. Mehanička naprezanja pri inkrementalnom oblikovanju mogu biti prevelika i to može dovesti do uništenja alata izvijanjem ili torzijom posebno kod alata s malim radijusima npr. Ø4 mm. U tijeku istraživanja na limu TH415 provedeno je testiranje sa alatom promjera Ø4 mm, alat je pokazao zadovoljavajuću krutost i sposobnost obrade. Najčešći promjer alata koji se koristi u istraživanjima je Ø12 mm do Ø12,5 mm, [6]. Koristi se i materijal volfram (W) karbid sa TiN prevlakom [56] ali i DIN 1.2510 (AISI O1 Tool Steel - US) [90]. Alati većeg radijusa deformiraju veće područje na limu što osigurava bolje tečenje materijala i veću mogućnost oblikovanja [11]. Alati promjera manjega od Ø12 mogu se koristiti za lokalne deformacije i mikro-deformiranje slika 8.9. Prema literaturi [6] najčešći promjer alata kod inkrementalnog oblikovanja je od 12 mm i debljina lima od 1 mm.



Slika 8.9 Prikaz različitih izvedbi alata koji se koriste u SPIF procesu oblikovanja [6, 12, 59, 61]

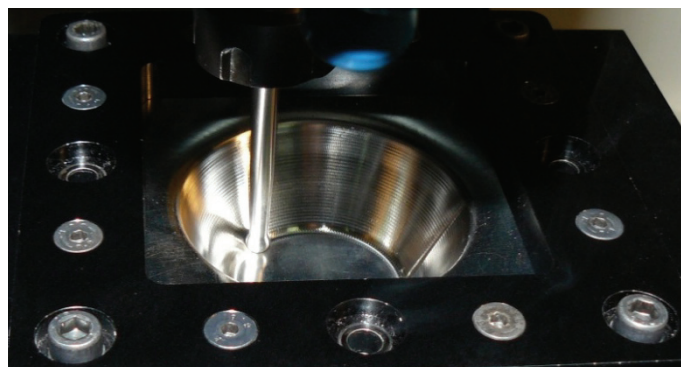
8.4. Eksperimentalni plan istraživanja

Kako bi se izradio eksperimentalni plan različiti koraci moraju biti uzeti u obzir. Najprije je važno definirati CAD crtež ispitnog uzorka, zatim je potrebno odabrati parametre obrade te se na temelju njih generira putanja alata za oblikovanje. CAD crtež generiran je u softveru *SolidWorks*. Putanja alata je generirana najprije u softverskom rješenju *Solidcam*, te kasnije u softverskom rješenju *VeriCUT*. Izrađene je niz modeli stožaca prema slici 8.10 sa promjenom u kuta od 30° do 90°. Izvršena je simulacija za odabrane kuteve u softverskom programu *VeriCUT*, te je generiran „NC program“ sukladan izradi krnjeg stošca prije i tijekom izvedbe eksperimenata. Postoji mogućnost grube izrade odabirom funkcije „*izrada džepa*“ ili fine izrade odabirom funkcije „*završna obrada*“. Utvrđena je mogućnost da se na stroju izvrši obrada identična simulaciji metodom konačnih elemenata te analitičkom modelu. Za CNC odabrani stroj *WEMAS VZ 750* u tvrtci *Elcon-Geretebau* programiran je „NC program“ za izradu krnjeg stošca u softveru *VeriCUT*. Svi eksperimenti izrade krnjeg stošca su provedeni u tvrtci *Elcon-Geretebau*.



Slika 8.10 Dizajn krnjeg stošca korištenog u provedenom ispitivanju SPIF procesa

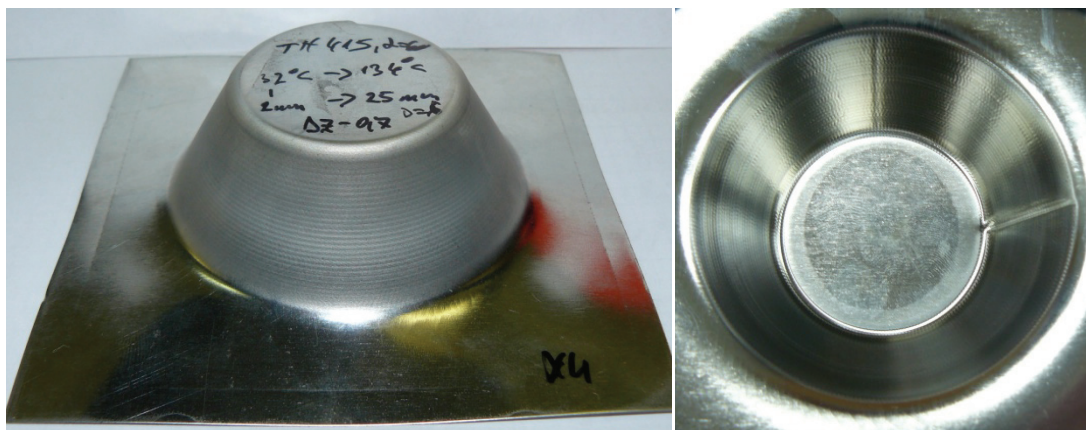
Za ispitivanje limova TH415 i TS230 odabrane su početne dimenzije ploča 0,24 x 100 x 100 mm za lim TH415 i 0,155 x 100 x 100 mm za lim TS230. Radni prostor iznosi nakon stezanja 80 x 80 mm, 10 mm ostavljeno je za stezanje, slika 8.10. Pristupilo se je ispitivanju, slika 8.11 za materijal TH415 u pogledu najvećeg mogućeg kuta i optimalnih parametara prije nastanka loma.



Slika 8.11 Ispitni uzorak u procesu obrade, lim TH415

Ispitivanja su izvršena na veličini početnog promjera krnjeg stošca od $\text{Ø}70$, $\text{Ø}65$ i $\text{Ø}60$ mm. Ispitani su kutovi 40° , 45° , 50° , 55° , 57° , 58° , 60° , 63° , 64° i 65° za lim TH415 bez maziva. Ispitan je kut 65° , 66° , 67° za lim TH415 sa mazivom Biocut. Idealni parametri otkriveni u provedenim ispitivanjima jesu alat radijusa 6 mm, posmak 2000 mm/min, brzina vrtnje 3000 o/min, $\Delta z=0,7$ mm i $S_C = 0,11$ mm. Postupak je uspješan ukoliko je postignuta visina krnjeg stošca bez nastanka loma, kod neuspješnih uzoraka ustanovljeno je da je najveća visina uzorka 10 mm za lim TH415 i za lim TS230. Također postupak je uspješan u trenutku kada je napregnuti materijal postigao kontinuirani porast u temperaturi iznad 35°C . Ispitivanje je provedeno kako bi se ustanovilo utjecaj radijusa alata uz isti posmak i brzinu okretaja. Promjena alata na promjer od 8 mm i na 4 mm također je pokazala uspješnu SPIF obradu. Provedeno je ispitivanje kako bi se ustanovio utjecaj vertikalnog pomaka Δz te je mijenjan u rasponu od 0,3 do 3 mm. Najbolje ponašanje je utvrđeno u rasponu vertikalnog pomaka $\Delta z = 0,5 - 1$ mm. Pri Δz

koji je veći od 1 mm došlo je do pojave pregrijavanja lima a kod 3 mm loma. Za daljnje ispitivanje odabran je konstantni vertikalni pomak $\Delta z = 0,7$ mm. Obrada sa promjenom promjera alata 4 mm, 6 mm i 8 mm uspješno izvedena pri izradi kuta 60° . Za daljnja ispitivanja odabran je promjer alata 6 mm. Udaljenost između pomaka S_C ispitivana je u rasponu od 0 do 25 % promjera alata. Za daljnja ispitivanja odabran je konstantan razmak $S_C = 0,11$ mm. Brzina vrtnje ispitana je u rasponu od 200, 1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 o/min, dok je brzina posmaka ispitana u rasponu od 1000, 2000, 3000 i 4000 mm/min. Povećanjem brzine vrtnje iznad 3000 o/min i povećanjem brzine posmaka dolazi do pregrijavanja lima. Pri manjim brzinama nije došlo do razvijanja potrebne temperature što je rezultiralo lomom. Slika 8.12 prikazuje izradu krnjeg stošca kuta od 60° , odabrani su parametri od 3000 o/min, 2000 mm/min brzina posmaka, promjer alata 6 mm, $S_C = 0,11$ mm i $\Delta z = 0,7$ mm izmjerena temperatura od 134°C na konačnoj visini krnjeg stošca od 25 mm.



Slika 8.12 Prikaz izratka - lim TH415 X4 kut od 60°

Tablica 8.2 prikazuje najveće ostvarene kutove prilikom ispitivanja sposobnosti oblikovanja materijala TH415. Pored kutova prikazanih u tablici 8.2 pri istim uvjetima obrade dodano je podmazivanje mazivom Biocut kako bi se ispitao njegov utjecaj na lim TH415, tablica 8.3.

Tablica 8.2 Ispitivanje sposobnosti oblikovanja za lim TH415, ISPITANI kutovi od 57° , 60° , 63° i 64°

Bijeli lim	TH415-22- 60°	TH415-23- 63°	TH415- 64°	TH415- 57°
Najveća postignuta visina x	53 mm			
Visina	25 mm	25 mm	20 mm	46 mm
Stanje	Uspješan	Uspješan	Neuspješan	Uspješan

Tablica 8.3 Pokus s podmazivanjem Biocut lim TH415, ispitani kutovi 65° , 66° i 67°

Bijeli lim br.	TH415- 65°	TH415- 66°	TH415- 67°
Mazivo	Biocut	Biocut	Biocut
Visina	32 mm	45 mm	
Stanje	Uspješan	Uspješan	Neuspješan

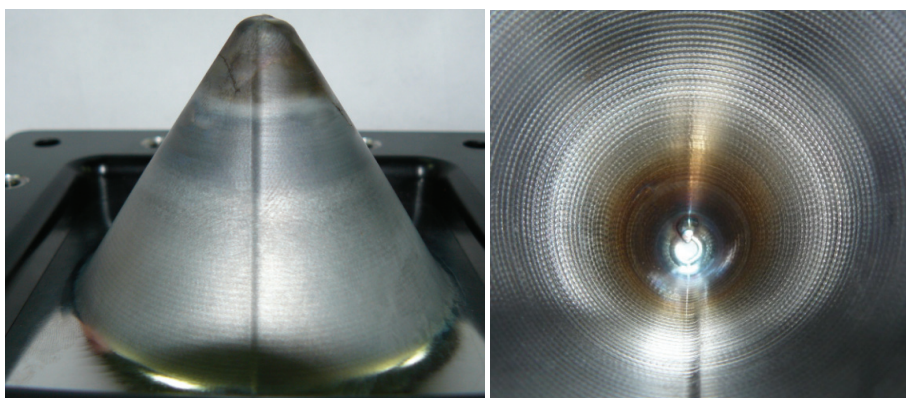
Postignut je najveći kut od 63° stupnja za lim TH415 bez podmazivanja, slika 8.13, maksimalna temperatura obrade pokazala je 176°C . Može se primijetiti da je razlika od 42°C u temperaturi pri istim režimima obrade pri oblikovanju krnjeg stošca od kuta 60° i kuta od 63° , slika 8.12 i slika 8.13.



Slika 8.13 Prikaz izratka kut 63° , lim TH415

Pri pokušaju izrade kuta od 64° pojavio se je lom materijala i nije postignuta visina veća od 10 mm. U eksperimentima je postavljeno ispitivanje krnjeg stošca do dubine od 25 mm. Provedeni su i eksperimenti postizanja maksimalne visine stošca, kod kojih je primijećeno da je stanjivanje konstantno. Stanjivanje ovisi o postavljenim parametrima udaljenosti između horizontalnih prolaza alata S_C i odabranog vertikalnog pomaka u z - osi Δz . U slučaju kritičnog kuta krnjeg stošca od 63° izvedeno je nekoliko pokusa i izvučen je cijeli stožac.

Sljedeći pokušaj uključio je sredstvo za podmazivanje alata Biocut, dodan pri istim uvjetima obrade. Ostvaren je kut od 64° , 65° i 66° dok je pri kutu od 67° i 68° došlo do pojave loma. Dobiven je najveći kut od 66° za materijal TH415 sa podmazivanjem Biocut, pri tome je izvučen cijeli stožac do visine od 45 mm. Trenje je pozitivno utjecalo na postupak oblikovanja a temperatura je bila dovoljno niska da nije došlo do pojave pregrijavanja metala. Obrada bez podmazivanja pri konstantnim uvjetima obrade izaziva kontinuirani porast zagrijavanja što je pri pokusu sa 45 mm visine obrade izazvalo pregrijavanje materijala, slika 8.14.



Slika 8.14 Prikaz izratka TH415 (uzorak x1) izvučenog sa konstantnom brzinom i bez podmazivanja, pregrijavanje lima na visini od 35 mm gdje se temperatura kreće iznad 180°C , kut od 57°

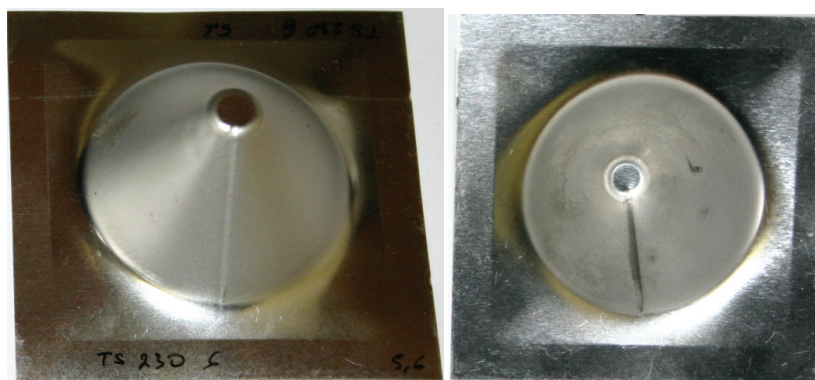
Kako bi se to izbjeglo postoji mogućnost dodavanja maziva ili mijenjanje parametara obrade (smanjenje posmaka ili brzine vrtnje).

Izvršeno je ispitivanje i za lim TS230 debljine 0,155 mm D2,8/5,60 (g/m²). Zbog diferencijalnog nanosa kositra na lim D2,8/5,60 izvršeno je ispitivanje sa strane nanosa od 2,8 (g/m²). Za materijal TS230 odabran je početni promjer kruga krnjeg stošca od 60 mm ispitani su kutovi od 45°, 50°, 55°, 57°, 58°, 59° i 60°. Tablica 8.4 prikazuje sposobnost oblikovanja TS230 za kutove 45°, 50°, 55°, 57°, 58° i 60°.

Tablica 8.4 Ispitivanje sposobnosti oblikovanja za lim TS230 kutove od 45°, 50°, 55°, 60°, 57° i 58°

	TS230-4-45°	TS230-5-50°	TS230-6-55°	TS230-7-57°	TS230-58°	TS230-7-60°
Visina	28 mm	32 mm	40 mm	40 mm	45 mm	10 mm
Stanje	Uspješan	Uspješan	Uspješan	Uspješan	Uspješan	Neuspješan

Za lim TS230 najveći postignuti kut je iznosio 58°. Na slici 8.15, prikazan je uzorak kut 55° visina 40 mm. Pri obradi TS230 nije dolazilo do pregrijavanja lima. Na slici 8.16 prikazan je uzorak TS230 - 7, ispitivan kut od 60°, iako je došlo do porasta temperature došlo je do loma pri 7 mm visine. Uzorak u kojemu je korišteno podmazivanje utjecalo je na smanjenje temperature u obradi i pojavu loma. Odstupanja od zadanih parametara obrade izazivalo je lom. Trajanje obrade variralo je od 2 do 3 minute.

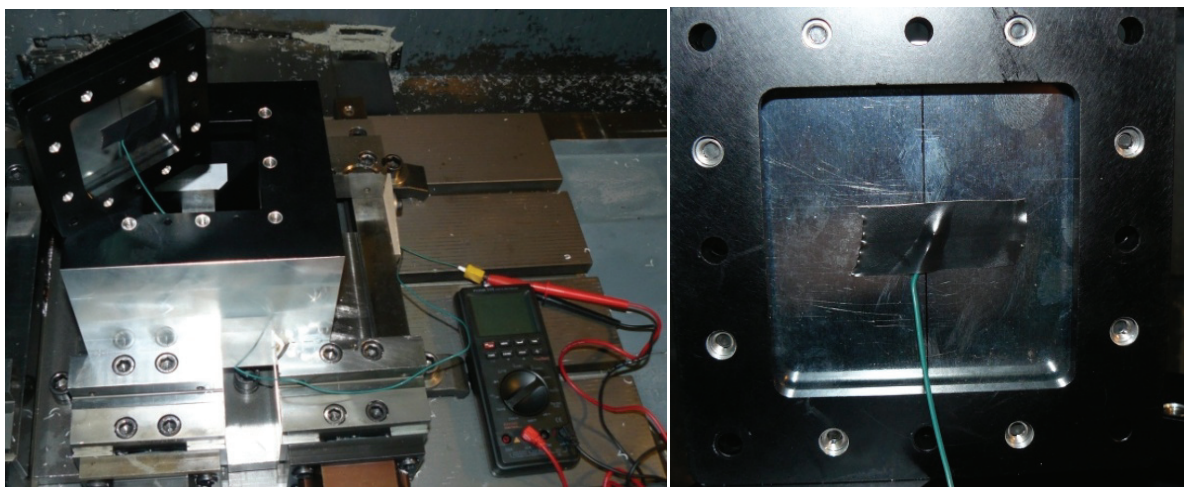


Slika 8.15 Uzorak TS230 - 6, kut 55° visina 40 mm



Slika 8.16 Uzorak TS230 - 7, kut 60° visina 7 mm

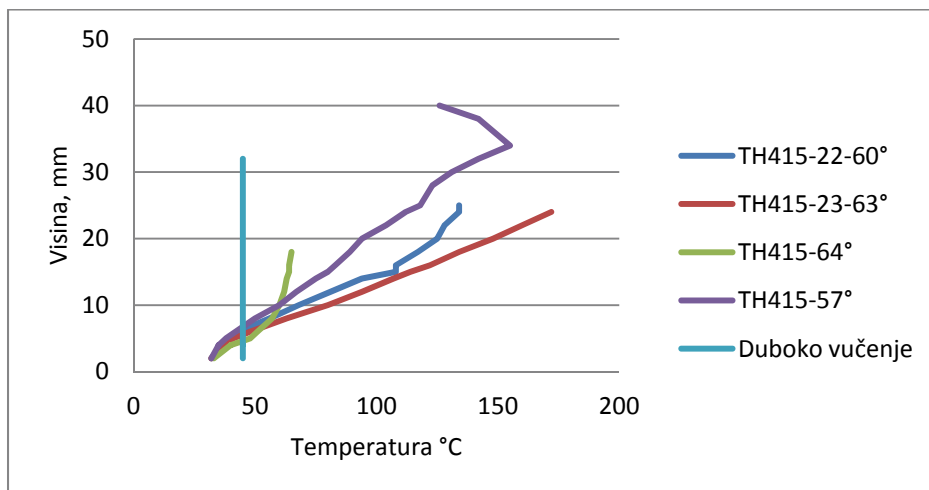
U ispitivanjima izrade krnjeg stošca mijenjani su parametri obrade i putanja alata u obradi. Ustanovljeno je da kontinuirani doticaj alata za vrijeme obrade uzrokuje porast temperature lima. Pokušaji promjene putanje (spirala, izlaz i ponovni ulaz u lim sa određenim pomakom, variranje parametra S_C i Δz) nisu uspjeli uspostaviti konstantnu temperaturu u procesu obrade. Samo sa porastom temperature i kontinuiranim kontaktom alata za vrijeme obrade koji je održavao postojanost temperature postignuti su uspješni uzorci. U svim pokusima gdje nije uspostavljen porast temperature materijal nije prelazio visinu od 10 mm. U provedenim ispitivanjima izmjerena je ulazna temperatura lima u procesu od 25°C do maksimalno izmjerene od 176 °C, pri izradi kuta od 63° za lim TH415. Kod kuta od 64° iako je su parametri obrade uzrokovali porast temperature redovito je dolazilo do loma na visini od 18 mm. Mjerenje temperature izvedeno je postavljanjem termopara na centar ispitivanog lima prema slici 8.17.



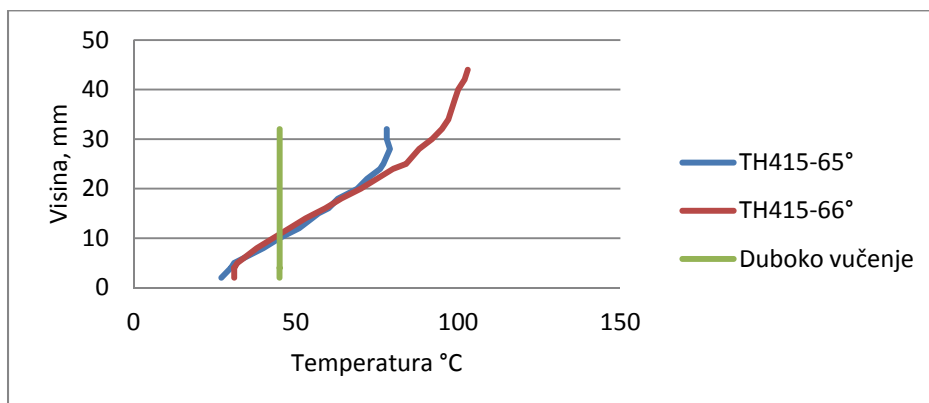
Slika 8.17 Temperaturne sonda - termopar tip „K“ korišten za ispitivanje temperature

Korišten je termopar tip „K“ a rezultati su očitavani sa multimetra. Princip rada termopara zasniva se na spajanju krajeva žica dva različita metala. Njihovim spajanjem dobiva se temperaturna sonda termopar. Ako se na krajeve termopara djeluje različitim temperaturama, između njih nastaje elektromotorna sila poznata pod nazivom termoelektrični napon, a veličina termoelektričnog napona ovisi o razlici temperatura krajeva i vrsti materijala žice termopara. Tip „K“ koji je korišten u eksperimentu sastoji se od spoja legure chromel koja sadrži 90 posto nikla i 10 posto kroma te legure alumel koji se sastoji od 95 % nikla, 2 % mangana, 2 % aluminija i 1 % silicija. Osjetljivost termopara „K“ je oko 41 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$. Termopar tip „K“ ima mogućnost mjerenja - 40 °C do 260 °C. Za potrebe mjerenja termopar tipa „K“ je spajan na centar ispitivanog lima. Te su prema prijedenoj visini zapisivane promjene u temperaturi slika 8.18, 8.19 i 8.20. Slika 8.18 prikazuje raspodjelu temperatura prema visinama obrade za postignute kutove 57°, 60°, 63° i 64° te usporedbu sa temperaturom u procesu izradu limenke. Za potrebe usporedbe sa procesom dubokog vučenja izvršena je kontrola temperature žigova i obrađenih limenki u tvrtci *MGK-pack*. Za vrijeme izrade limenki tehnologijom dubokog vučenja,

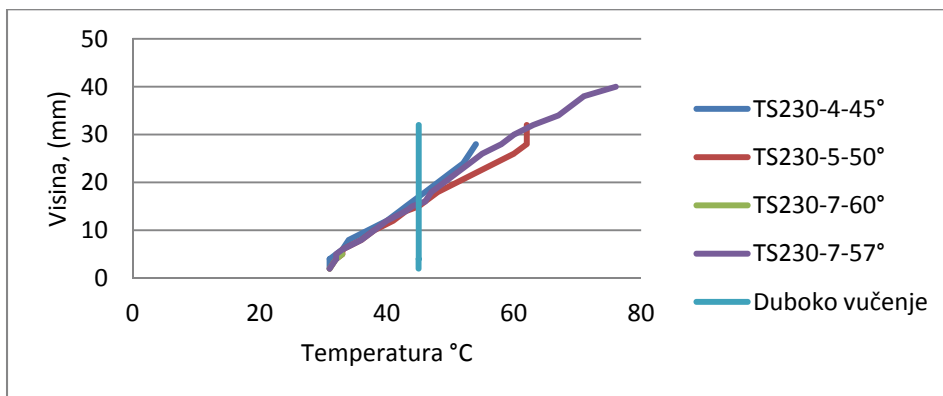
lim TS230, izvršena su mjerenja temperature laserskim pištoljem. Utvrđena je temperatura žiga od 31 °C, temperatura izvučene limenke neposredno nakon obrade iznosila je 45 °C. Limenka izrađena od lima TS230 prije ulaza u proces kod dubokog vučenja ima sobnu temperaturu u rasponu od 20 do 25 °C. Promatrano je duboko vučenje dubine obrade tankostjenih limenki u tvrtci *MGK-pack* koje iznosi do 32 mm za materijal, a početna dimenzija promjera ulaznog lima za mjerenu limenku iznosi 120 mm.



Slika 8.18 Varijacija temperatura u procesu obrade ispitivanih uzoraka



Slika 8.19 Raspodjela temperature za TH415, kutovi 65° i 66°



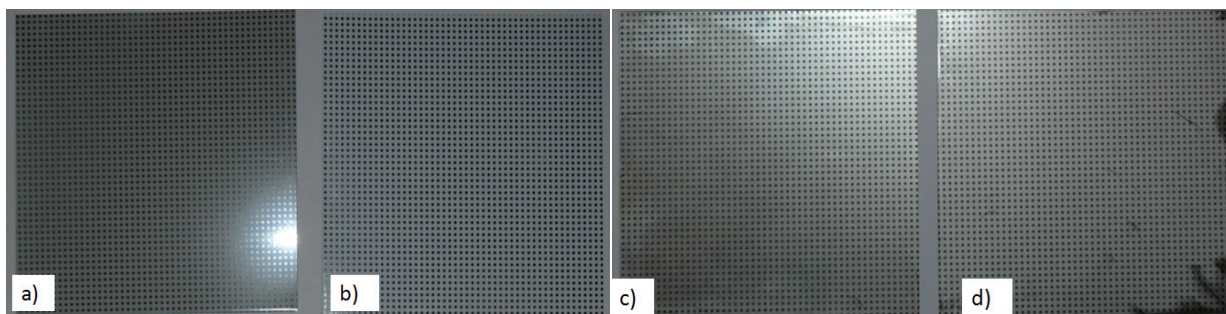
Slika 8.20 Raspodjela temperature za TS230, kutovi 45°, 50°, 60° i 57°

8.5. Uzorci za provjeru rezultata sustavom ARGUS

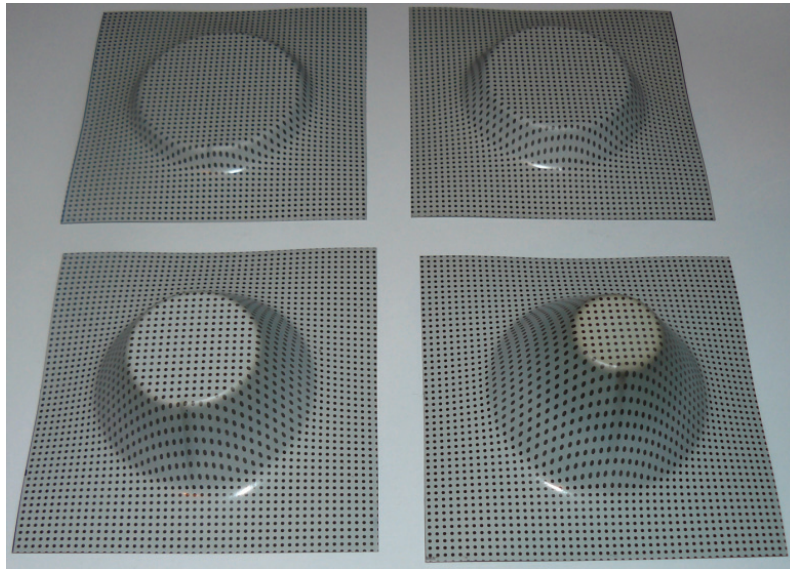
Nakon ispitivanja pristupilo se je izradi konačnih uzoraka kako bi se moglo mjeriti digitalizacijskim sustavom ARGUS. Plan eksperimenata je postavljen prema tablici 8.5. Kao početni materijal korišteni su uzorci dimenzija 100 x 100 mm, slika 8.20. Na slici 8.20 prikazan je uzorka materijala TH415 lakiran a) te nelakiran c), slika 8.20 b) i d) prikazuju materijal TS230 lakiran i nelakiran. Na slici 8.21 prikazana je izrada konačnih obradaka za ispitivanje za lim TH415 lakiran. Niz obradaka izrađen je sa istim parametrima ali različitim visinama, slika 8.21. Izrađen je i niz lakiranih uzoraka različitih visina sa kutom od 58° za oba ispitivana lima kako bi se usporedila geometrija TH415 i TS230. Jednako tako izrađeni su ispitni uzorci nelakiranog materijala TH415 kako bi se ispitao utjecaj laka na sposobnost deformiranja ispitivanog lima. Već u eksperimentalno fazi primijećeno je da materijal TH415 nije bio u sposobnosti proizvesti visinu od 35 mm već je pucao na 28 mm. Budući da je kod obrade bez laka lim postizao maksimalnu dubinu postavljene obrade može se zaključiti da je lak smanjio sposobnost oblikovanja lima. Korišten je bijeli lak METLACK 818 - 045 (Italija) za materijal TS230 te HAFT SCHEKOLIN - 4800500002 (Švicarska) za materijal TH415. Slika 8.22 i slika 8.23 prikazuju vanjsku i unutarnju površinu obrade materijala TH415 i TS230.

Tablica 8.5 Niz konačnih uzoraka potrebnih za provjeru i analizu rezultata sustavom ARGUS

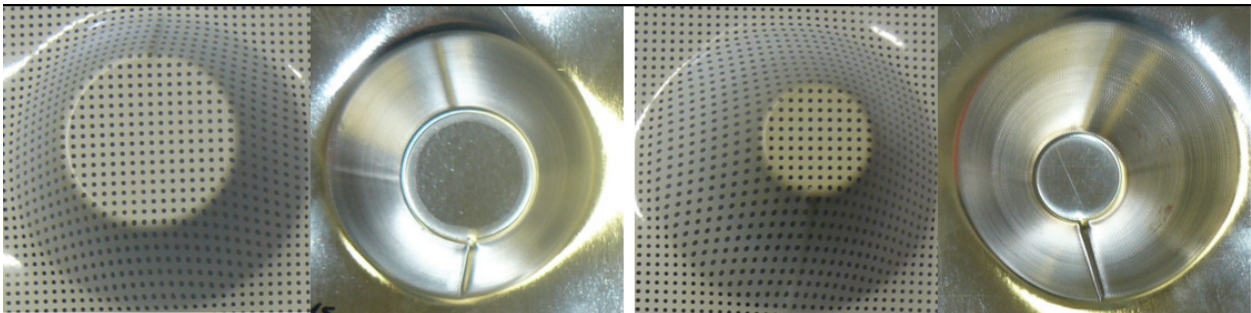
Oznaka pokusa	1	2	3	4	5
TH415 - 63° nelakiran	0	32 mm, puklo	25 mm	15 mm	10 mm
TS 230 - 58° nelakiran	0	35 mm	25 mm	15 mm	10 mm
TH415 - 58° lakiran HAFT	0	45 mm	25 mm	15 mm	10 mm
TH415 - 63° bijeli lak	0	/	25 mm	15 mm	10 mm
TS230 - 58° lakiran HAFT	0	35 mm	25 mm	15 mm	10 mm



Slika 8.21 Ispitni uzorci dimenzija 100 x 100 mm, TH415 lakiran a), TS230 lakiran b), TH415 nelakiran c), TS230 nelakiran d)



Slika 8.22 Prikaz 4 ispitivana stadija obrade za materijal TH415, 10 mm, 15 mm, 25 mm i 35 mm kut 63°



Slika 8.23 Prikaz 2 ispitivana stadija obrade za materijal TH415 , 25 mm i 35 mm, kut 63°, alat Ø6 mm, $\Delta z = 0,6$ mm

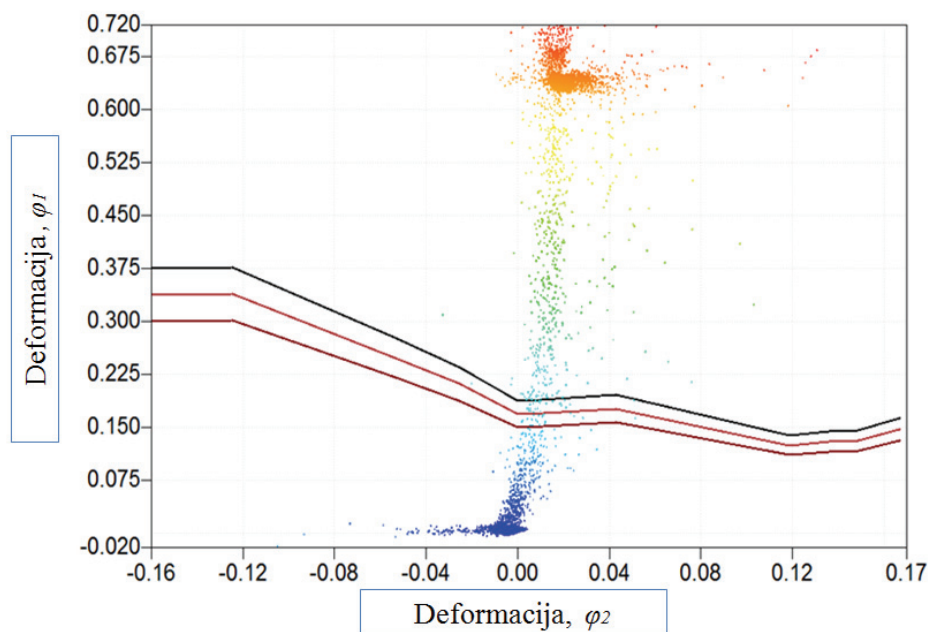


Slika 8.24 Prikaz 2 ispitivana stadija obrade, materijal THS230, 25 mm i 35 mm, kut 58°, alat Ø6 mm, $\Delta z = 0,6$ mm

9. Mjerenje digitalizacijskim sustavima

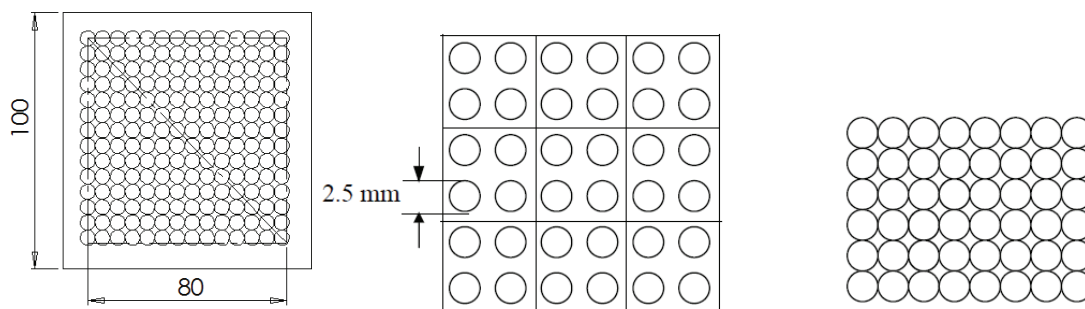
9.1. Mjerenje sustavom ARGUS

ARGUS je sustav za analizu oblikovanja limova [95]. Kako bi se provela analiza procesa deformiranja, na objekt (nedeformirani lim) se nanosi pravilna mreža kružnica. U ovome ispitivanju odabran je postupak postavljanja kružnica litografiranjem. Tako pripremljeni lim se deformira. Nakon toga, oko i na objekt postavljaju se kodirane mjerne točke i snima se više snimaka sa sustavom ARGUS. Poslije toga program ARGUS pronalazi kodirane mjerne točke i centre točaka na svim slikama. Pomoću kodiranih točaka vrši se određivanje položaja kamere u trenutku snimanja što omogućuje određivanje položaja svih točaka. 3D položaj točaka predstavlja stvaran oblik deformiranog lima. Međusobni odnos četiri susjedne točke definiraju lokalne pomake (deformacije φ_1 i φ_2) koje su unesene u procesu deformiranja. Ove vrijednosti se mogu prikazati u grafičkom obliku kao različite boje ili kao grafički prikaz sposobnosti oblikovanja metala. Pod pretpostavkom da je volumen nepromjenjiv, može se odrediti i smanjenje debljine lima u procesu deformiranja. Analiza stanja deformacija se koristi za rješavanje problema koji mogu nastati prilikom oblikovanja metala. U procesu oblikovanja materijal je pod opterećenjem te dolazi do različitih stanja naprezanja i tečenja materijala. Nakon što se materijal deformira, distribucija deformacije u procesu može se vizualizirati te se kritična područja mogu identificirati sa grafičkim prikazom sposobnosti oblikovanja. Svaki materijal ima svoju individualnu graničnu krivulju sposobnosti oblikovanja, slika 9.1, koja se obično određuje prema Nakajima ili Marciniak testu dubokog vučenja posebno određenih epruveta.

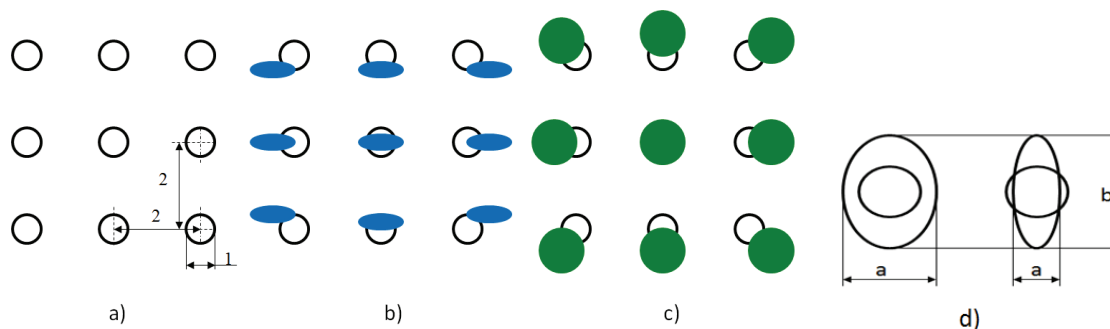


Slika 9.1 Dijagram sposobnosti oblikovanja - materijal TH415, kut 58° [95]

U ovome radu, izmjerit će se granična krivulja pomoću Marciniak testa a rezultati toga testa usporediti će se sa testom sposobnosti inkrementalnog oblikovanja. Rezultat će biti formiranje krivulje koja će prikazati karakteristike ponašanja materijala i identifikaciju kritičnih točka te će se na taj način omogućiti da proces oblikovanja bude optimiran. U oba slučaja za mjerenje naprezanja koristit će se grafometrijska metoda, koja se temelji na mjerenju mreže kružnica. Mreže za kontrolu stanja deformiranja sadrže kružnice koje imati manji ili veći razmak. Nakon što se kružnica deformira pretvara se u elipsu kod jednoosnog stanja naprezanja, dok se kod dvoosnog pretvara u ravnomjerniju kružnicu, slika 9.2 i 9.3. Koriste se različite kružnice koje ovise o vrsti uređaja za mjerenje ili vrsti nanošenja istih na lim npr. kružnice promjera od 2,5 mm, zatim od 0,25 mm do 1 mm [40, 65].



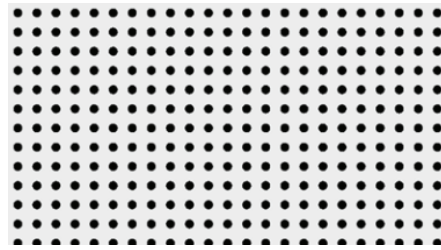
Slika 9.2 Različite metode postavljanja kružnica, [40]



Slika 9.3 Deformacija se očituje ovisno o djelovanju naprezanja, a) početni raspored kružnica (promjer 1 mm udaljenost 2 mm), b) jednoosno stanje naprezanja, c) dvoosno stanje naprezanja, d) shema deformiranja kružnica

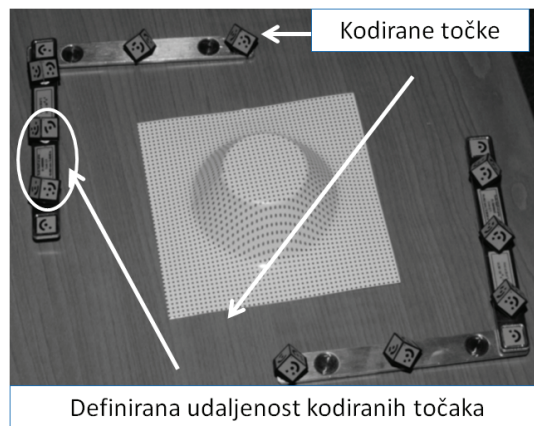
Deformacije se izračunavaju prema izrazu (5.7). Fotogrametrija je postupak mjerne tehnike kojim se iz jedne ili više međusobno povezanih fotografija određuje položaj, oblik i veličina snimljenog predmeta. Na predmet koji se mjeri postavljaju se kružnice, rubovi kružnica moraju biti oštri. Boja kružnica treba biti crna, tj. kontrastna u odnosu na boju površine ispitivanog materijala. Promjer kružnica odabran za mjerenje je $d = 1$ mm a odabrani razmak od centara kružnica je 2 mm. Ove vrijednosti funkcioniraju za objekte veličine 10 cm do 1 m. Razmaci kružnica i promjeri mogu se po potrebi i dodatno simetrično skalirati, ali se to prakticira kod proizvoda reda veličine nekoliko centimetara. Mreža kružnica mora biti što pravilnija, kvadratična. Za potrebe eksperimenata kružnice su postavljene tehnologijom litografiranjem u tvrtci *MGK-pack*, slika 9.4. Odabrana je mreža kružnica veličine 1 mm. Razmak od središta

svake kružnice je 2 mm. U provedenom mjerenju došlo je do refleksije svjetlosti uzrokovane slojem laka, pa je u cilju smanjenja ove pojave upotrijebljen bijeli prah.



Slika 9.4 Odabrana mreža točkica za mjerenje sustavom ARGUS

Za potrebe mjerenja ispitnih uzoraka korišten je ARGUS sustav za analizu oblikovanja limova, na slici 9.5 prikazano je mjerenje ispitnog uzorka. U tablici 9.1 prikazana je konfiguracija sustava za mjerenje ARGUS [95]. Kako sam postupak mjerenja nije moguće izvesti kontinuiranim mjerenjem, zbog vertikalne glodalice koja se koristi u obradi mjerenje je izvedeno prema nekoliko stadija istovjetne obrade, a mijenjala se je visina krnjeg stošca.



Slika 9.5 Postavljanje kodiranih točaka

Tablica 9.1 Konfiguracija sustava za mjerenje ARGUS

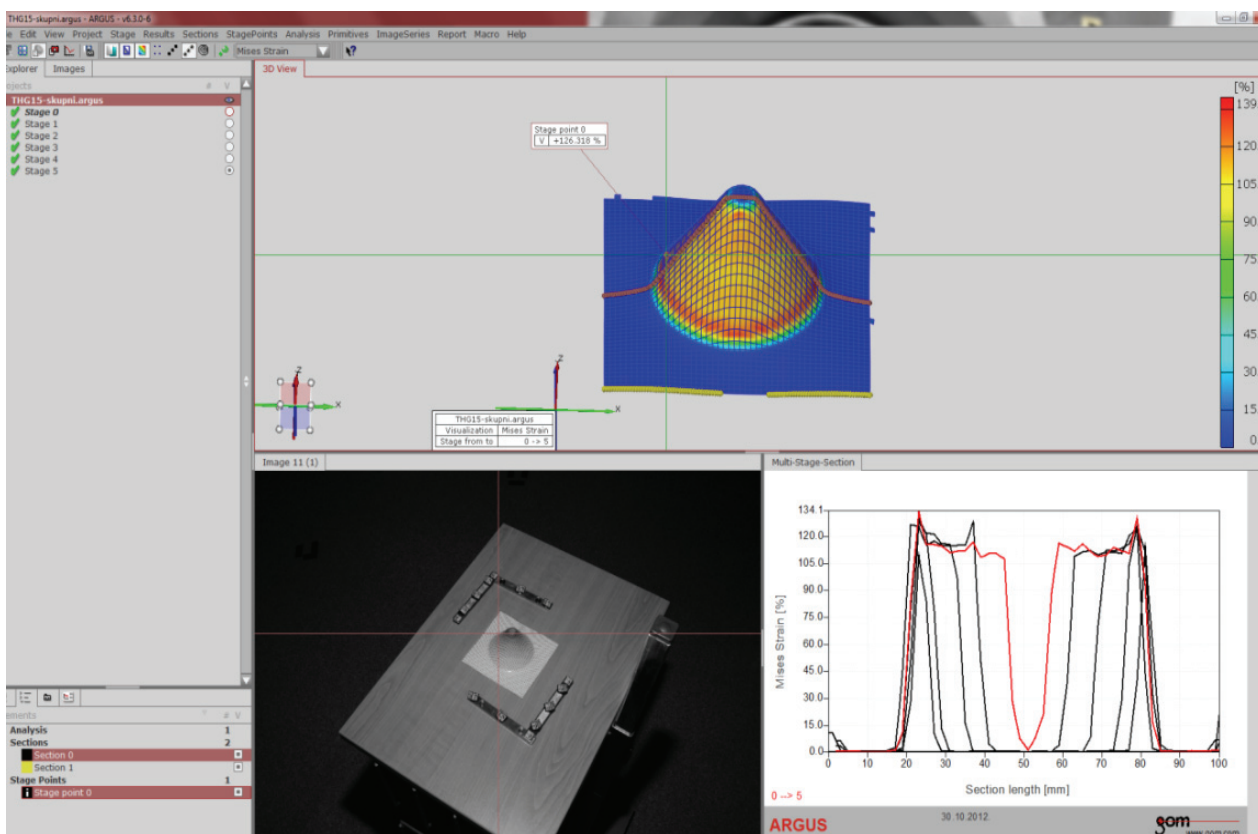
Rezolucija kamere (px)	4280 x 2840
Mjerno područje	100 mm ² do 100 m ² , slobodno se može podešavati
Mjerne točke	Uobičajeno 10 000 ali može do 1 000 000 točaka.
Raspon naprezanja (%)	0,5 do > 300
Točnost naprezanja (%)	do 0,1
Dimenzije senzora (mm ³)	300 x 170 x 115
Način kalibracije	Samokalibrirajući

Mjerenje se izvodi na način da se najprije snimi ravninsko stanje nedeformiranog lima, na način da se snimi ukupno 12 snimaka od čega se prve 4 snimke snimaju pod kutom od 90° i služe za kalibraciju. Kalibracijskim se snimkama nazivaju one snimke koje su snimljene iz središnjeg

položaja kamere svaka zarotirana za 90° (uzduž optičke osi kamere). Te su četiri kalibracijske snimke potrebne za izračun optičke distorzije objektiva i pozicije glavnih točaka. Nakon toga pripremljeni objekt se snima digitalnom kamerom iz različitih pozicija. Snimke se uvode u softver i prepoznaje se mreža točaka te se detektiraju promjene od početnog ili prethodnog stanja deformiranja. Rezultati omogućavaju praćenje procesa deformiranja lima. Deformacije se mjere te je moguće izraditi dijagram sposobnosti oblikovanja deformiranog lima. Rezultati mjerenja sustavom ARGUS za cijelu površinu modela jesu:

- 3D koordinate na površini deformiranog lima,
- stupanj deformacije (glavne komponente deformacija),
- vizualizacija redukcije debljine lima,
- usporedba s dijagramom $\sigma - \varepsilon$ (sposobnost oblikovanja) i samim time detekcija kritičnih točaka na temelju dijagrama $\sigma - \varepsilon$ [95].

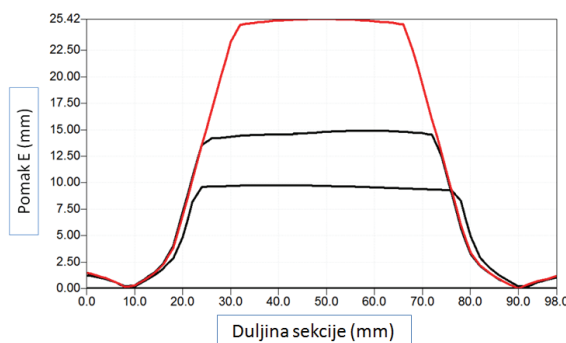
Rezultati se prezentiraju kao gusta mreža podataka koja je nastala na temelju određivanja 3D koordinata na površini deformiranog lima. Na slici 9.6 je prikazano sučelje sa rezultatima mjerenja softverom ARGUS - v6.3.0-6.



Slika 9.6 Rezultati mjerenja TH415 za kut od 58° i visinu 45 mm

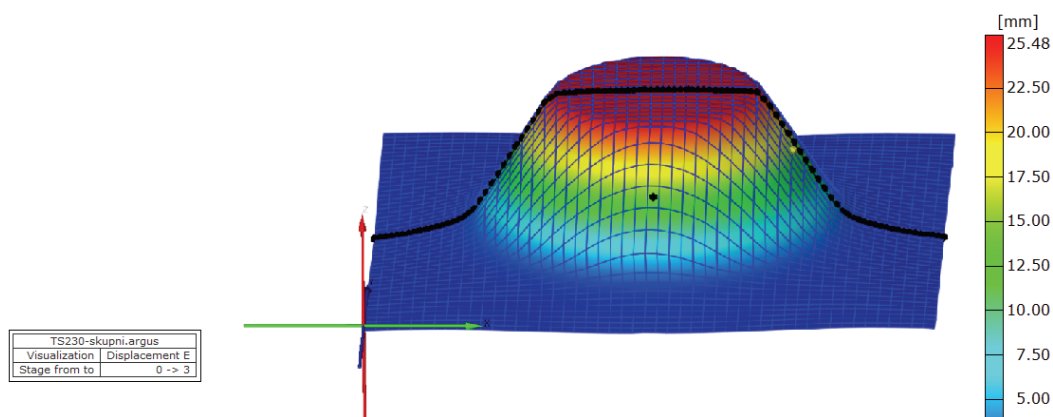
9.2. Rezultati mjerenja lima TS230

Mjerenja su vršena sustavom ARGUS u tvrtci *Topomatika*, Zagreb [95]. Na slici 9.7 prikazana je usporedba uzoraka površine 100 x 100 mm materijala TS230, kut 58°. Uzorci su lakirani i visine krnjeg stošca iznose 10, 15 i 25 mm i prema tome stadiji obrade se dijele na prvi, drugi i treći (crvena linija na slici 9.7). Pri ponovljenoj obradi s istim odabranim parametrima obrade ali s promjenom visine, došlo je do dobrog poklapanja kod visine od 25 mm i 15 mm. Kod uzorka od 10 mm visine došlo je do odstupanja dimenzija. Kako je svaki puta korišten novi uzorak, to se može pripisati variranju u svojstvima materijala i samome stezanju. Prema slici 9.7 primjećuje se da je materijal na duljini sekcije od 0 do 10 mm te od 90 do 100 mm deformiran. Do toga je došlo prilikom vađenja ispitnog uzorka iz steznog prstena zbog efekta elastičnog povrata materijala. U području sekcije od 10 do 30 mm (70 - 90 mm) došlo je do kontinuirane deformacije lima pri vertikalnom pomaku $\Delta z = 0,6$ mm, $S_C = 0,3$ mm za kut od 58°. Područje sekcije od 30 do 70 mm nije se obrađivalo ali došlo je do pojave laganog savijanja zbog naprezanja kojima je to područje bilo podvrgnuto tijekom obrade.



Slika 9.7 Usporedba poprečnog presjeka uzoraka TS230 za 10, 15 i 25 mm

Slika 9.8 prikazuje 3D prikaz visine krnjeg stošca od 25 mm. Primjećuje se da je konačna dimenzija visina od 25,48 mm što označava da je ostvarena točnost konačne dimenzije + 0,5 mm.



Slika 9.8 Postignuta visina krnjeg stošca

Slike 9.9, 9.10 te 9.11 prikazuju raspodjelu stanja deformacije prema kriteriju Von Mises za stadij obrade 1, 2 i 3 (visine krnjeg stošca od 10, 15 i 25 mm). Von Mises deformacija²¹ ili ekvivalentna Von Mises deformacija (9.1) dobiva se iz tenzora deformacije (9.3), postupak je jednak dobivanju Von Mises stanja naprezanja, [96].

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2)}{2} + \frac{3(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}{4}}, \quad (9.1)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \frac{2}{3}\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon_{zz}, \\ e_{yy} &= -\frac{1}{3}\varepsilon_{xx} + \frac{2}{3}\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon_{zz}, \\ e_{zz} &= -\frac{1}{3}\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon_{yy} + \frac{2}{3}\varepsilon_{zz}, \\ \gamma_{ij} &= 2 * \varepsilon_{ij}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Tenzor deformacije definira se izrazom:

$$\varepsilon_{ij} = [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}. \quad (9.3)$$

Kod sustava digitalizacijskog mjerenja ARGUS, deformacija je mjera promjene linijskog elementa i definira se izrazom [97]:

$$\bar{\lambda} = \lim_{l \rightarrow 0} \left(\frac{l + \Delta l}{l} \right), \quad (9.4)$$

gdje je $\bar{\lambda}$ - relativno produljenje beskrajno male veličine linijskog elementa.

Deformacije ε_x i ε_y imaju nedostatak da se definiraju u ovisnosti od koordinatnog sustava. Taj nedostatak može biti eliminiran izračunom glavnih i pomoćnih vrijednosti deformacija. Simetrična matrica pomaka U može biti transformirana u glavni dijagonalni oblik:

$$U = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & 1 + \varepsilon_y \end{pmatrix}. \quad (9.5)$$

Dvije vrijednosti $\bar{\lambda}_1$ i $\bar{\lambda}_2$ mogu biti izračunate prema sljedećoj relaciji:

$$\bar{\lambda}_{1,2} = 1 + \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right)^2 - (\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y - \varepsilon_{xy}^2)}, \quad (9.6)$$

Ovisno o izboru mjere deformiranja, omjer izduženja $\bar{\lambda}_1$ i $\bar{\lambda}_2$ se može pretvoriti u odgovarajućim vrijednosti deformacije. Na temelju veće vrijednosti $\bar{\lambda}$ određuje se deformacija (ε_1 or φ_1), na temelju manje vrijednosti $\bar{\lambda}$ određuje se deformacija (ε_2 ili φ_2). Odgovarajući vektor određuje dva smjera deformacije φ_1 i φ_2 . Odgovarajuće vrijednosti naprezanja su na taj način definirane neovisno o koordinatnom sustavu i univerzalno su primjenjive [97].

²¹ Von Mises deformacija - Von Mises strain

Ako je debljina materijala u odnosu na cijelu površinu mala, potrebno je učestalo izvoditi preostalu debljinu materijala prema deformaciji površine. Kako korištene optičke mjerne tehnike ne mogu ostvariti podatke u toj dimenziji, treća glavna deformacija ε_3 može se izračunati iz deformacija ε_1 i ε_2 , uz pretpostavku konstantnog volumena. Konstantnost volumena može se definirati na sljedeći način:

$$\bar{\lambda}_1 \cdot \bar{\lambda}_2 \cdot \bar{\lambda}_3 = 1.$$

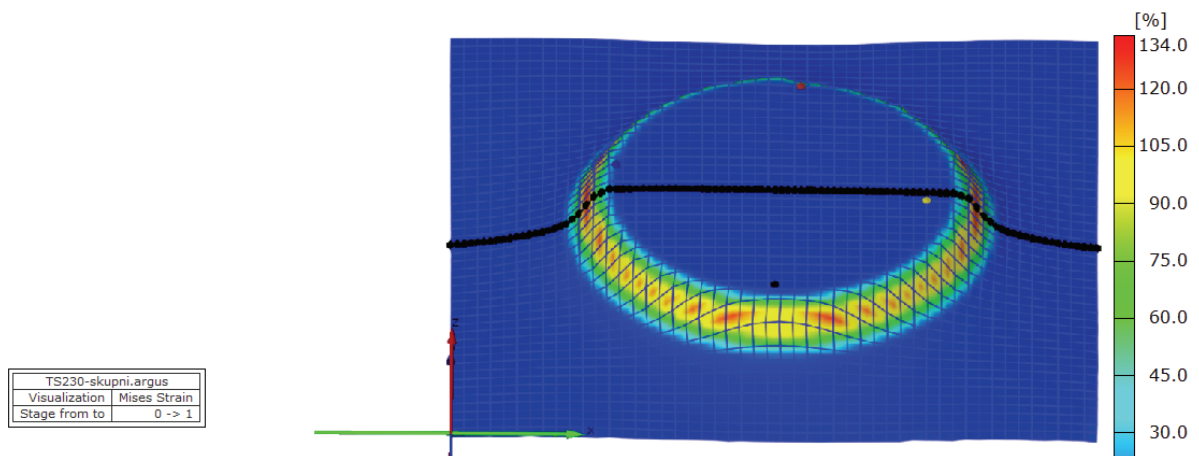
Efektivna deformacija izračunava se prema Von Misesu i Von Tresca prema sljedećem izrazu [97]:

$$\varphi_{vmises} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)}, \quad (9.7)$$

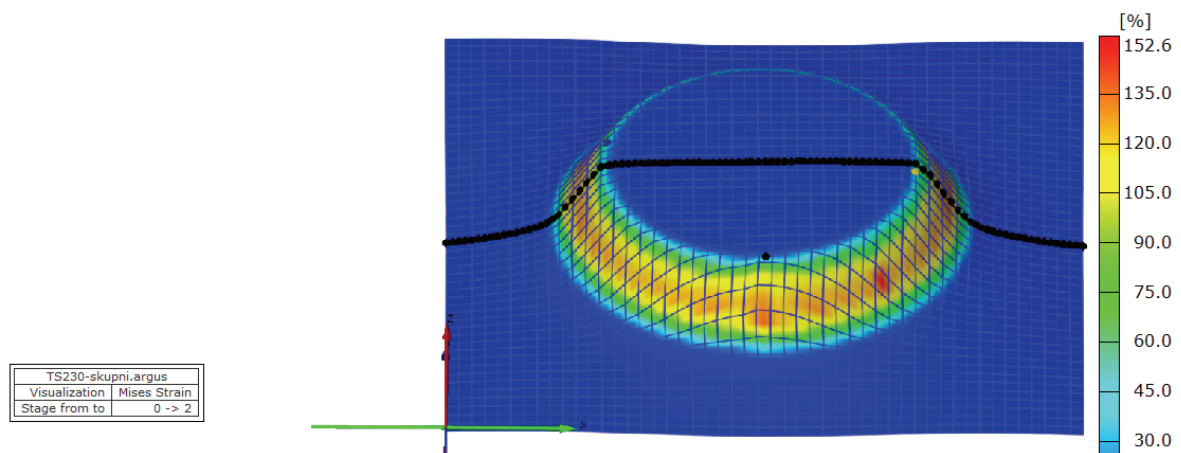
Kako je φ_3 uključen u izraz, efektivna deformacija vrijedi samo u slučaju ako je volumen konstantan. Efektivna deformacija prema Von Tresca proizlazi iz sljedećeg izraza [97]:

$$\varphi_{vtresca} = |\varphi|_{max}. \quad (9.8)$$

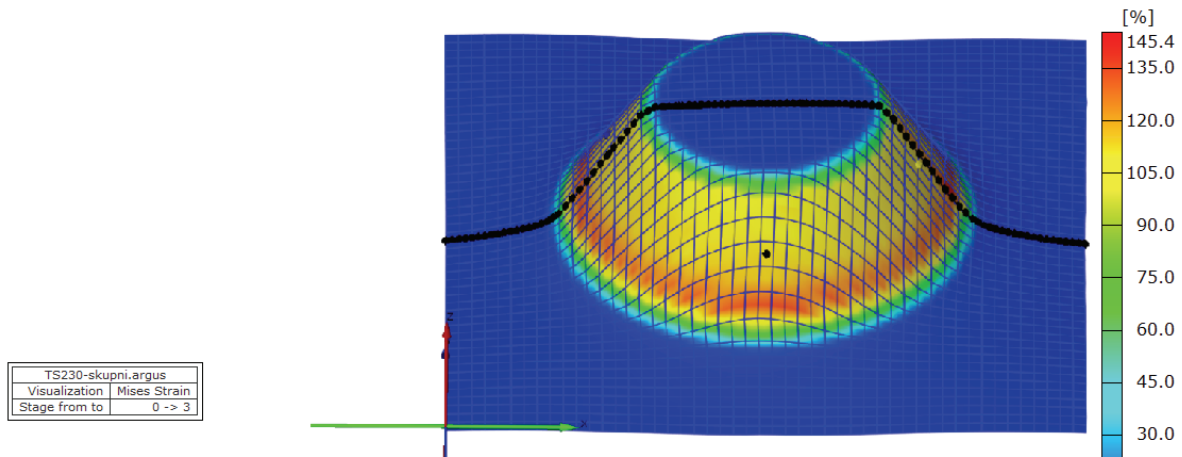
Na uzorku visine krnjeg stošca od 25 mm primjećuje se veća koncentracija deformiranja na početnom radijusu od 60 mm. Za očekivati je da će do kritičnog popuštanja materijala doći u tom području međutim u procesu obrade do loma je došlo na suprotnom kraju.



Slika 9.9 Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca od 10 mm za materijal TS230

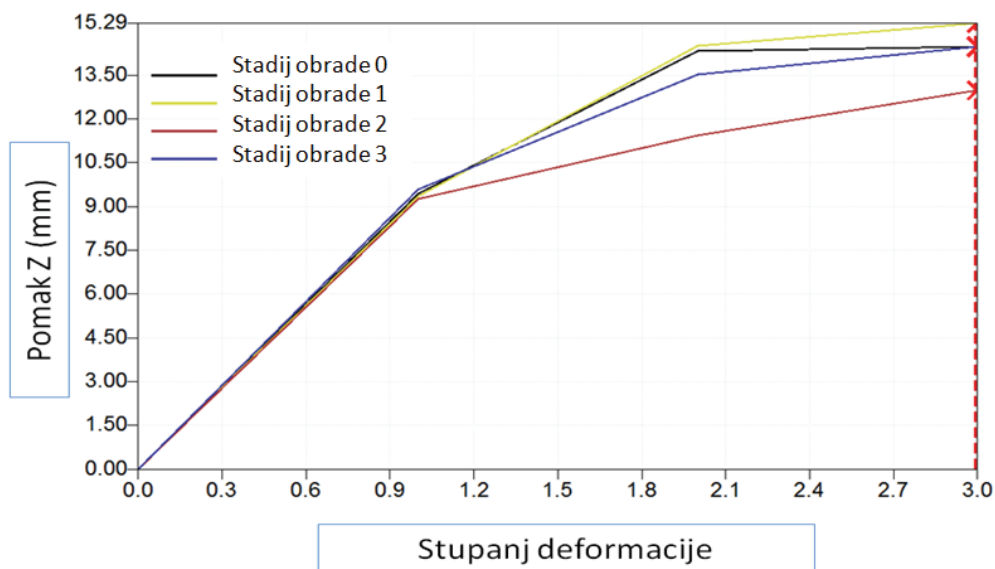


Slika 9.10 Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca 15 mm za materijal TS230



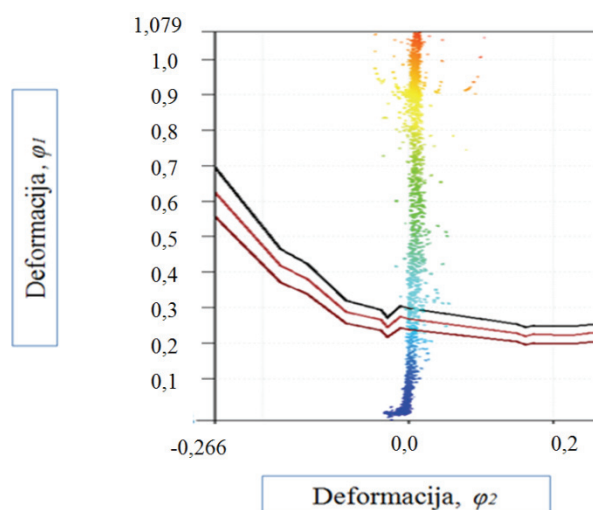
Slika 9.11 Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca 25 mm za materijal TS230

U toku mjerenja prema stadijima obrade promatrano je ponašanje 4 točke, slika 9.12 pravilno raspoređene prema obodu krnjeg stošca (točke označene na slikama 9.9, 9.10, 9.11). Na slici 9.12 primjećuje se njihovo odstupanje prema promatranim stadijima 1, 2 i 3. Znatnije odstupanje crvene linije uvjetovano je pozicioniranjem te točke na liniju silaska Δz alata u materijal.



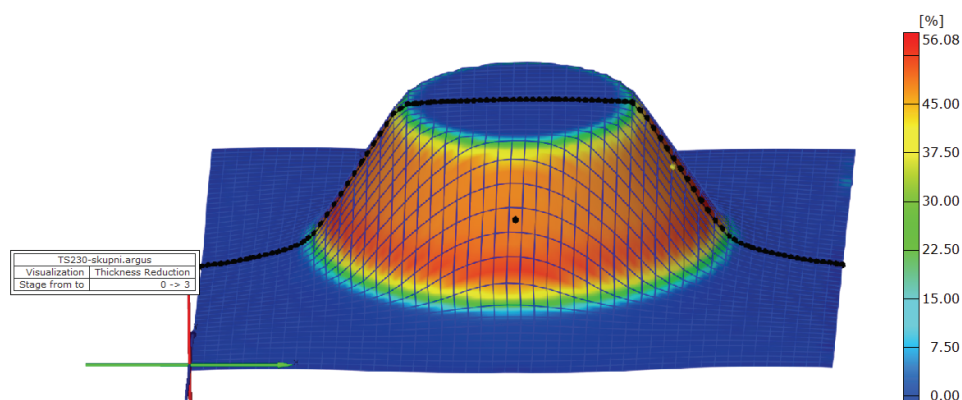
Slika 9.12 Pomak promatrane točke Z u različitim stadijima obrade

Dijagram mogućnosti inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca za materijal TS230 sa kutom krnjeg stošca od 58° visina od 25 mm prikazan je na slici 9.13. U usporedbi sa postignutim dijagramom ostvarenog sa Marciniak testom gdje je sposobnost deformacije od $\varphi_1 = 0,20$ do $0,35$, može se vidjeti prema slici 9.13 da je inkrementalnim postupkom moguće ostvariti i do $\varphi_1 = 1,079$. Na slici 9.13 je sa tri linije prikazano područje odstupanja $\varphi_2 = \pm 0,05$ od srednjih vrijednosti postignutih Marciniak testom za materijal TS230.

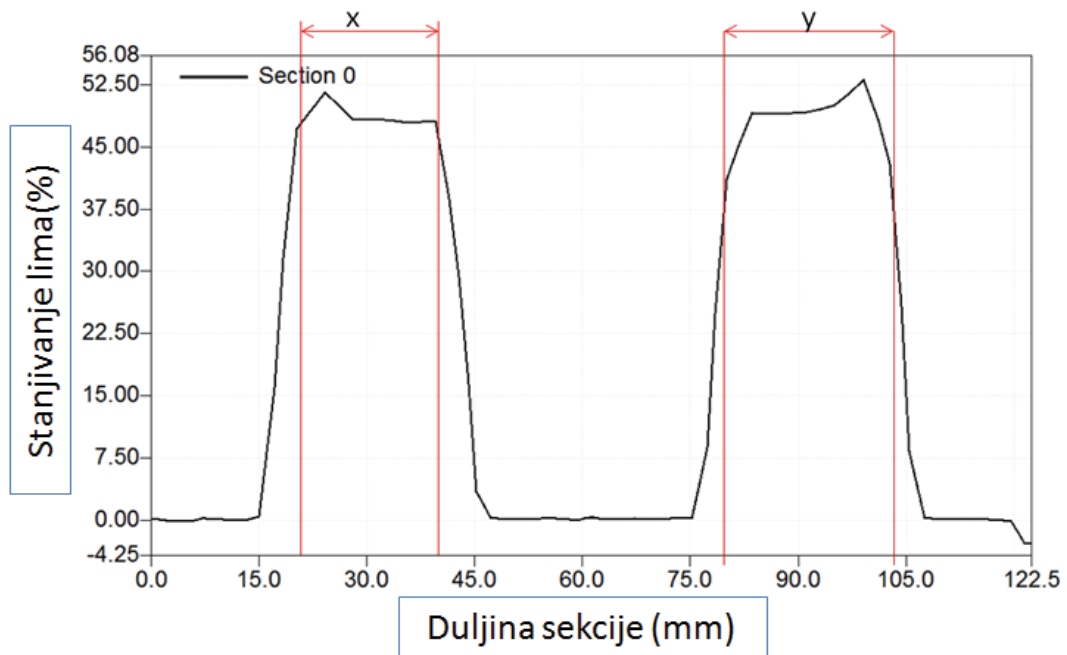


Slika 9.13 Dijagram sposobnosti oblikovanja za materijal TS230, kut od 58°, visina 25 mm

Slika 9.14 prikazuje stanjivanje tankostjenog lima TS230 sa kutom krnjeg stošca od 58° visine od 25 mm. Prema jednadžbi 6.2 iz poglavlja 6 o analitičkom modelu, dobiva se, stanjivanje lima u iznosu od 0,0855 mm za kut od 58°. Kako je najveće izmjereno stanjivanje lima sustavom ARGUS iznosilo 52,50 % tj. prema jednadžbi 6.2 stanjivanje lima iznosi 0,0882 mm ukoliko je uračunat početni nanos laka koji je iznosio 0,05 mm za materijal TS230. Bez laka prema jednadžbi 6.2 stanjivanje lima iznosi 0,0813 mm. Jednadžba 6.2 daje vrlo dobru procjena s odstupanjem od - 0,0042 mm bez laka (5 %) i + 0,0027 mm sa lakom (3 %). Sama raspodjela stanjivanja lima prema obrađivanoj površini može se iščitati iz presjeka na slici 9.15. Stezni prsten koji je korišten pri oblikovanju krnjeg stošca definiran je prema duljini sekcije od 0 do 15 mm i na kraju na duljini sekcije od 106 do 122 mm iz tog razloga u tome području nema stanjivanja lima. Također na centralnom dijelu nema stanjivana prema duljini sekcije od 45 do 75 mm. U predjelu dužine sekcije od 15 do 45 mm i 75 do 105 mm dolazi do naglog skoka tako da u području x i y dolazi do konstantnog stanjivanja lima od 52,50 %. Izmjerena su manja odstupanja u odnosu na analitički model u iznosu od 2 do 3 % što je zanemarivo malo. Objašnjenje se može naći u anizotropnosti materijala.



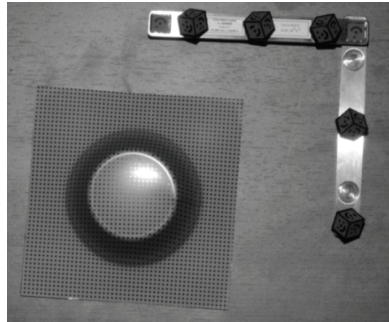
Slika 9.14 Prikaz stanjivanja tankostjenog lima TS230



Slika 9.15 Prikazane su razlike u stanjivanju lima ispitivanog uzorka, materijal TS230, kut 58°, visina 25 mm

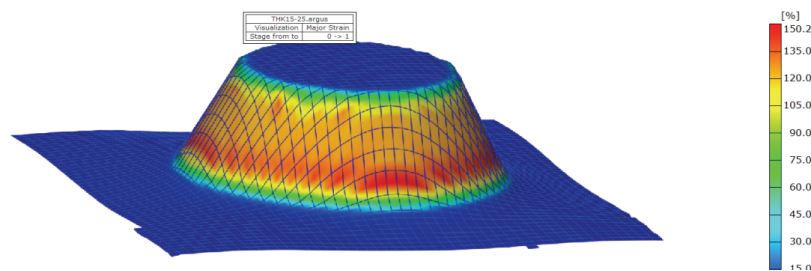
9.3. Rezultati mjerenja lima TH415

Maksimalna sposobnost deformiranog lima TH415 pri izradi odabranog oblika krnjeg stošca postigla se pri kutu od 63° . Za potrebe usporedbe TS230 i TH415 odabrana je visina krnjeg stošca od 25 mm te kut od 63° prilikom određivanja maksimalne sposobnosti oblikovanja materijala TH415. Materijal je lakiran sa bijelim lakom METLACK 818-045 - Italija.

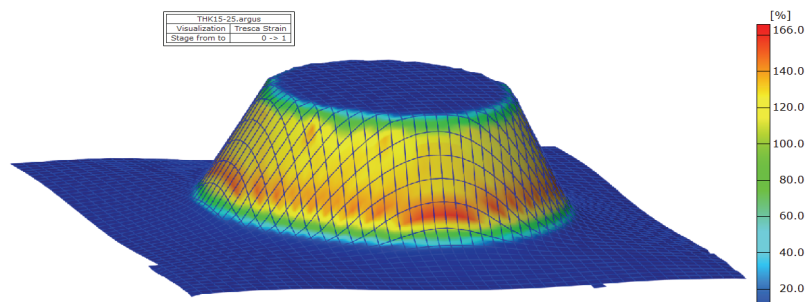


Slika 9.16 Uzorak krnjeg stošca TH415 sa kutom 63° , visina 25 mm, mjerena sustavom ARGUS

Na slici 9.17 i 9.18 prikazana su stanja deformiranja prema deformacija φ_I i prema ekvivalentnom Tresca kriteriju za deformiranje. Deformacija kod Tresca kriterija, slika 9.18 je veća za 15,8 % od deformacije φ_I na slici 9.17. U oba izračuna može se primijetiti da je stupanj deformacije kod promjera od 60 mm veći kao i kod materijala TS230. Može se zaključiti da je konstantni stupanj deformiranja postignut nakon što se uspostavila dovoljno velika temperatura koja je povećala oblikovljivost materijala. U procesu obrade lom je nastajao u početku obrade pri visini krnjeg stošca od 10 mm ili pri visinama od 28 do 33 mm u slučaju lakiranog materijala TH415. Nelakirani materijal TH415 postizao je veće vrijednosti dubine od 35 mm.

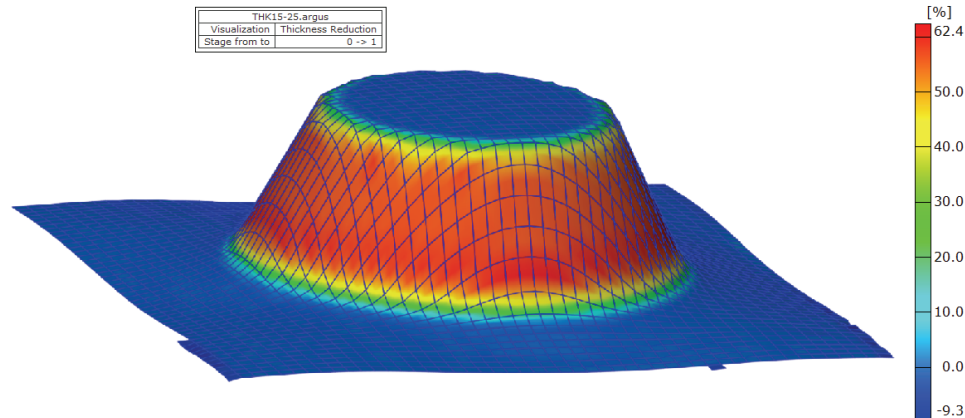


Slika 9.17 Raspodjela deformacija φ_I za krnji stožac TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm



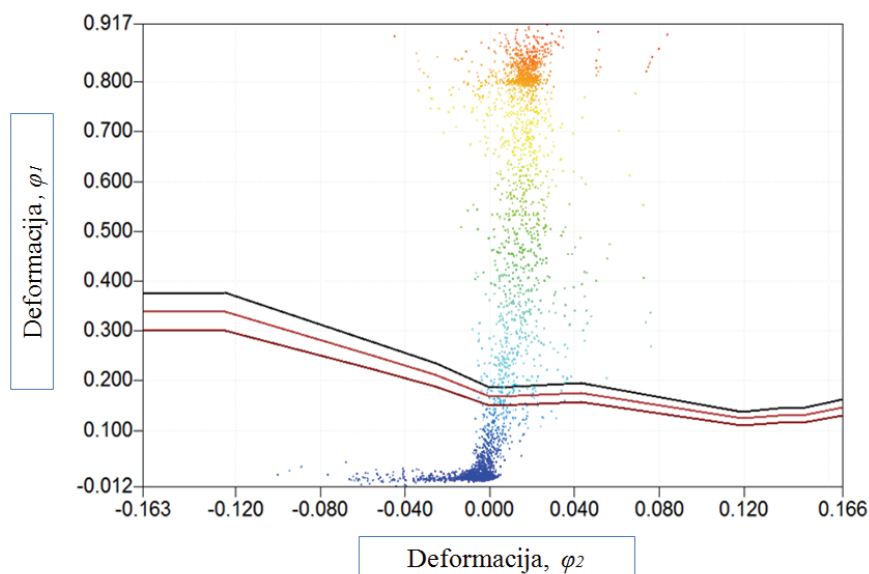
Slika 9.18 Raspodjela deformacija prema Tresca kriteriju za krnji stožac TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm

Slika 9.18 prikazuje izmjereno stanjivanje lima od 60 % za uzorak krnjeg stošca TH415 debljine 0,24 mm visine 25 mm i kutom od 63°.



Slika 9.19 Postotak stanjivanja lima uzorka TH415 početne debljine 0,24 mm kut uzorka 63° te visina 25 mm

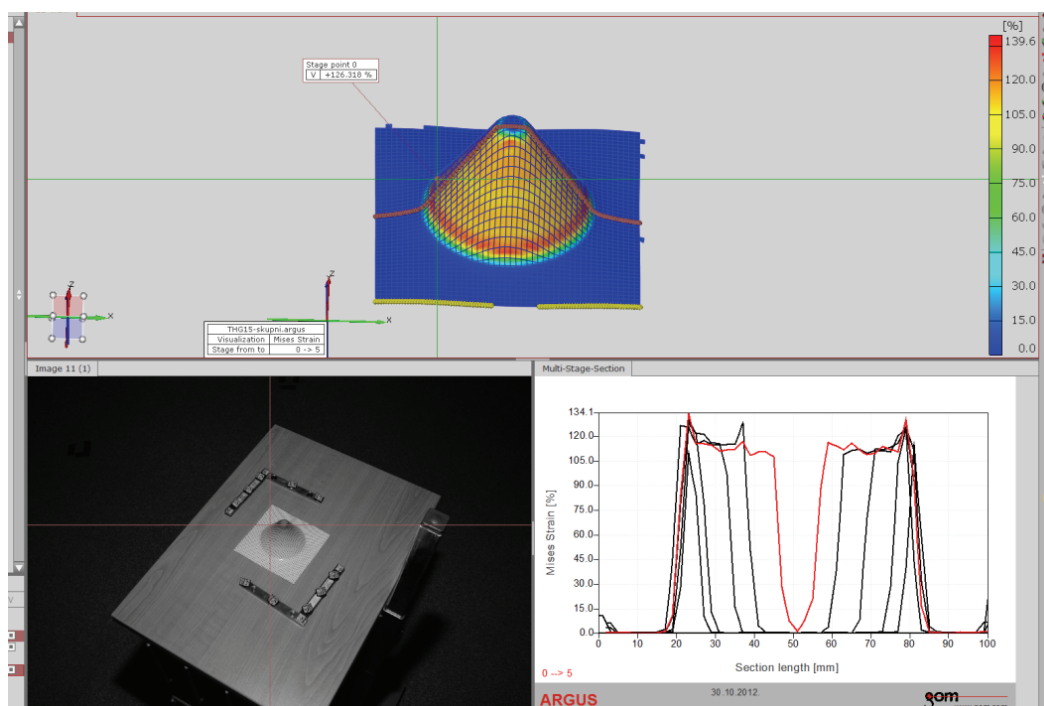
Marciniak test upotrijebljen je za izradu dijagrama sposobnosti oblikovanja lima TH415. Za maksimalnu sposobnost inkrementalnog oblikovanja odabran je oblik krnjeg stošca. Dijagram sposobnosti inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca za materijal TH415 sa kutom od 63° s visinom od 25 mm prikazana je na slici 9.20. Prikazan je nizom točkica čija je deformacija a u smjeru $\varphi_1 = 0,917$. U usporedbi sa postignutim dijagramom ostvarenog sa Marciniak testom sposobnost deformacije u rasponu $\varphi_2 = \pm 0,20$, iznosi $\varphi_1 = 0,30$ dok se prema slici 9.20 primjećuje da je inkrementalnim oblikovanjem za isti raspon $\varphi_1 = 0,917$. Postignuta je 3 puta veća deformacija φ_1 inkrementalnim oblikovanjem. Na slici 9.20 prikazana je aritmetička sredina odstupanja rezultata Marciniak testom od $\varphi_1 = \pm 0,05$ ispitanog lima TH415 od vrijednosti $\varphi_1 = 0,30$. Razlog je da se kao sigurno područje u kojemu ne dolazi do loma uzima sigurni razmak od 10 % ispod najviše ostvarenih vrijednosti deformacija ostvarenih u Marciniak ispitivanju.



Slika 9.20 Dijagram sposobnosti oblikovanja za TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm

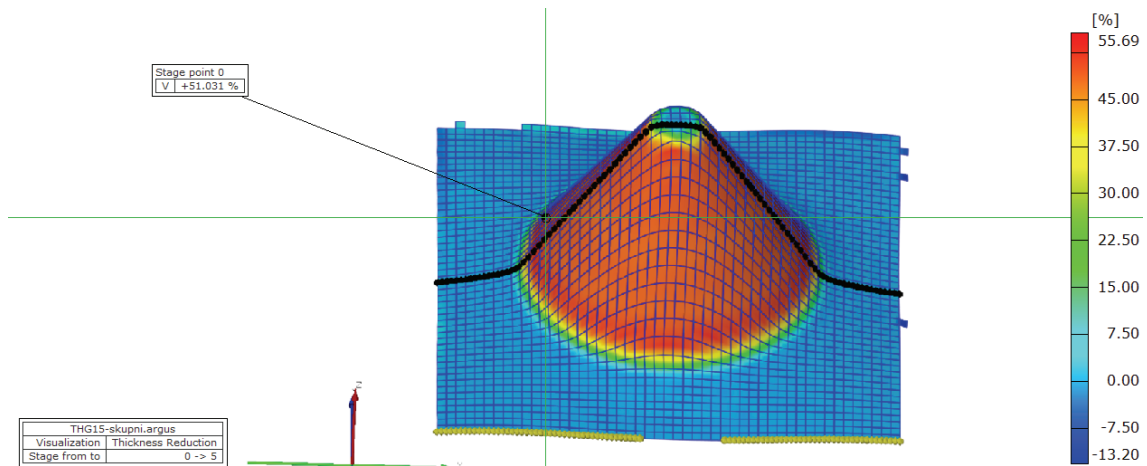
9.4. Analiza izrade lakiranog krnjeg stošca

Radi dodatnih ispitivanja i usporedbi te temeljitog uvida u stanje oblikovanja lakiranog uzorka izmjeren je materijal TH415 s kutom od 58° . Ispitano je stanje niza uzoraka koji predstavljaju pet stadija obrade. Svi stadiji obrade osim početnog (visina 0 mm), imaju jednak korišten promjer alata od 6 mm, $S_C = 0,3$ mm, kut obrade 58° , brzina vrtnje 3000 o/min, posmak 2000 mm/min $\Delta z = 0,6$ mm. Ali visina obrade je mijenjana u svakom stadiju obrade. Mjereni stadiji obrade jesu: visine krnjeg stošca od 0 mm (nedeformirani lim), 15 mm, 25 mm, 35 mm te 45 mm. Na slici 9.21 prikazano je sučelje softvera GOM ARGUS v 6.10-6 sa ispitivanim uzorkom krnjeg stošca TH415.



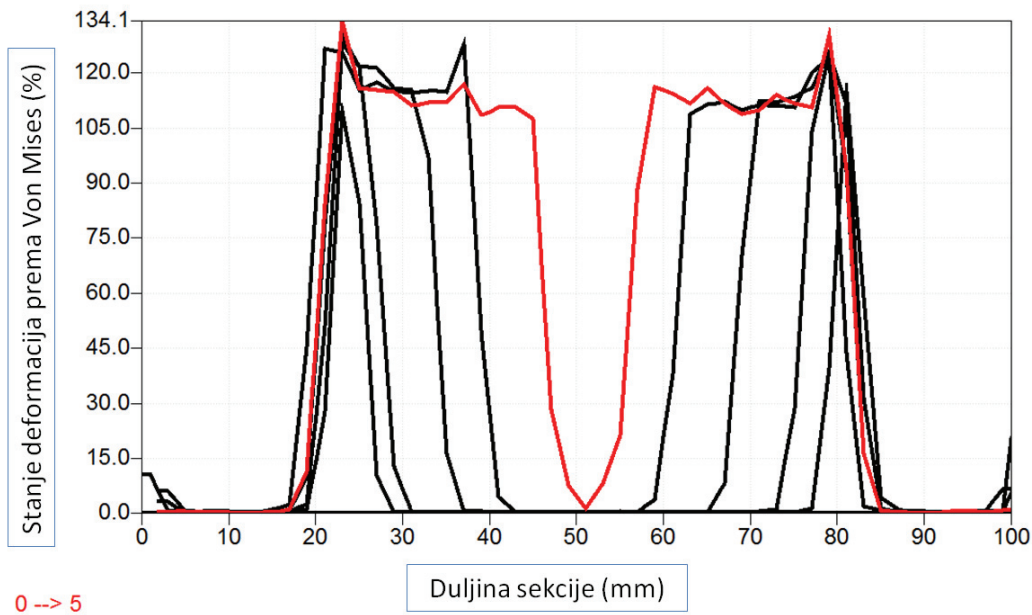
Slika 9.21 Odabrano je ispitivanje u 5 stadija od 10 - 45 mm sa kutom od 58° materijal TH415

Na slici 9.22 prikazano je stanjivanje lima krnjeg stošca u petom stadiju obrade, visina 45 mm, za materijal TH415 s kutom od 58° . Stanjivanje lima iznosi 0,133 mm za izmjerenih 55,69 %. Prema jednadžbi 6.2 stanjivanje lima za kut od 58° iznosi 0,132 mm, te je razlika 0,013 mm ili 55 %. Kod stanjivanja lakiranog lima debljina iznosi 0,245 mm, te je prema jednadžbi 6.2 stanjivanje lima od 0,1351 mm ili 55,1 %, može se zanemariti utjecaj laka na konačno stanjivanje.



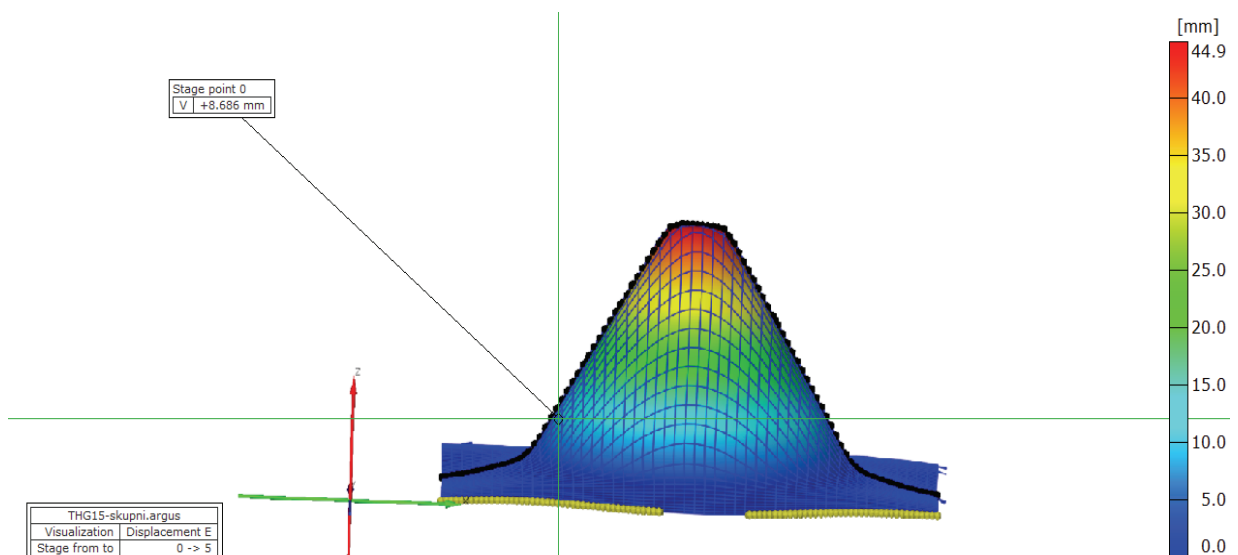
Slika 9.22 Stanjivanje lima u stadiju obrade 5 (45 mm) sa kutom od 58°, materijal TH415

Na slici 9.23 prikazano je ponašanje deformacija prema Von Misesu za presjeke kod svakog stadija obrade označene brojem od 1 do 5, a crvenom bojom označen je stadij obrade 5 od 45 mm. Sa slike 9.23 primjećuje se nagli skok opterećenja u početku obrade te blagi pad opterećenja u tijeku obrade što može biti objašnjeno povećanjem temperature u procesu obrade.

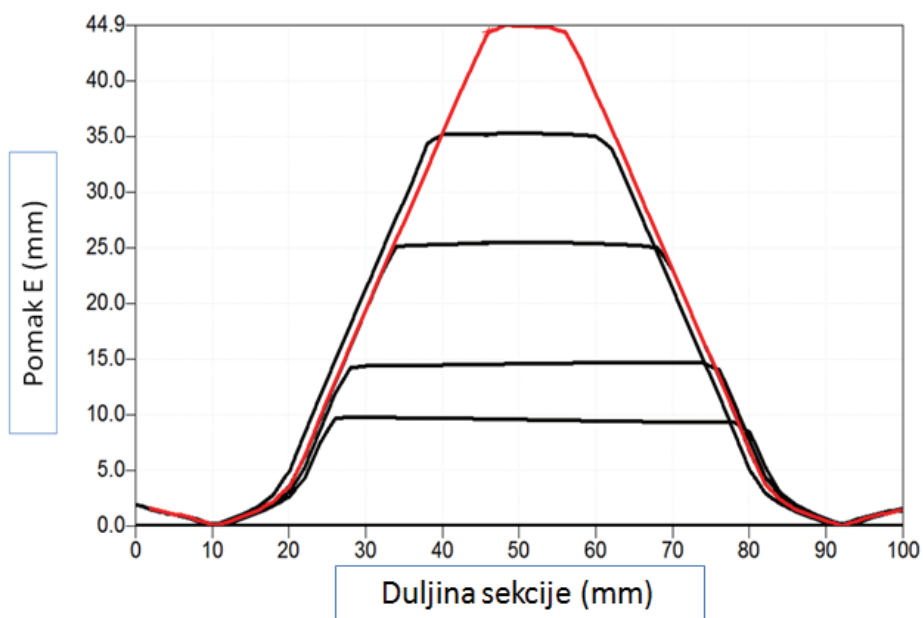


Slika 9.23 Usporedba stanja deformacija prema Von Misesu

Slika 9.24 prikazuje konačne dimenzije izratka u pet stadija obrade od 0 do 45 mm visine krnjeg stošca s kutom od 58°. Primjećuje se da je konačna izmjerena dimenzija 44,9 mm te je greška u dimenziji 0,1 mm. Postignuta je dobra točnost konačnog proizvoda. Slika 9.25 prikazuje ponovljivost izrade eksperimenata u pet stadija istovjetne obrade. Primjećuje se dobro geometrijsko poklapanje te se odstupanje može objasniti elastičnim povratom nakon opuštanja materijala iz stezne naprave.

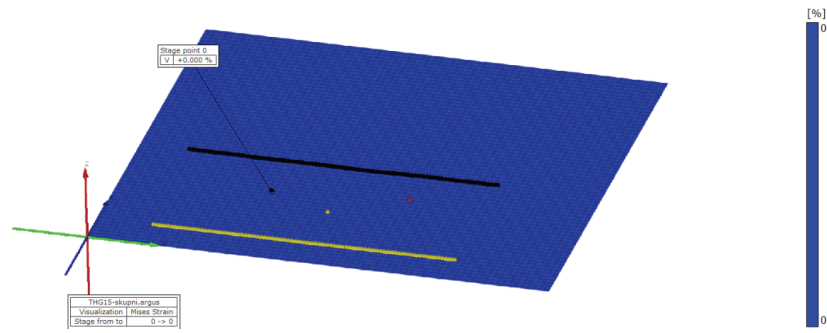


Slika 9.24 Prikaz mjerenja visine stošca od 45 mm, kut 58°, lim TH415, izmjereno 44,9 mm

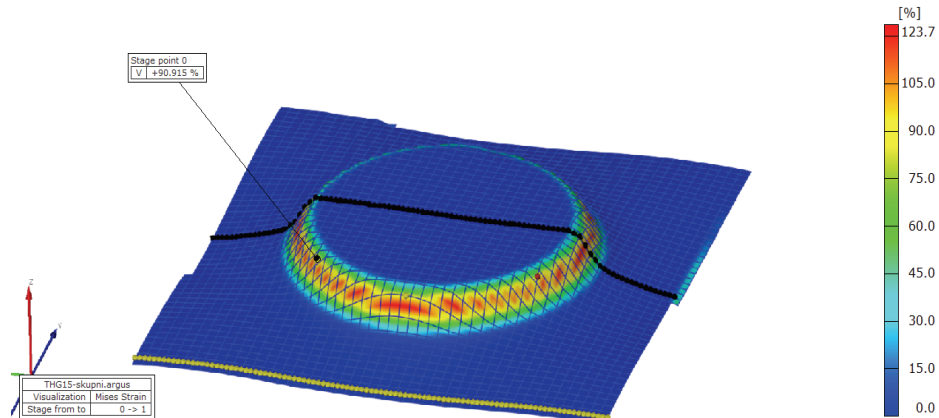


Slika 9.25 Preklapanje 5 različitih uzorka krnjeg stošca visine od 10 do 45 mm za materijal TH415, kut od 58°

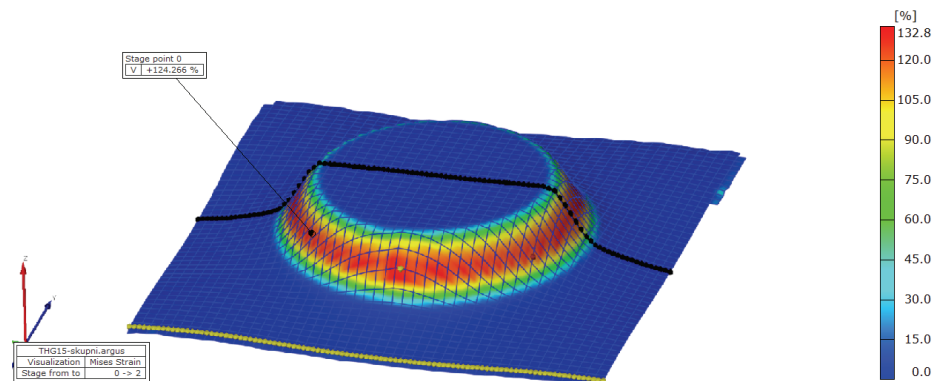
Slike 9.26 do 9.31 prikazuju deformacijsko stanje prema Von Misesu za pet stadija obrade sa pripadajućim geometrijama. Za analizu su odabrane tri točke kako bi se promatrao njihov pomak od prvog do petog stadija obrade sa razmakom u visini obrade od 10 mm, osim drugog stadija obrade gdje je pomak u visini obrade 5 mm. Primjećuje se konstantna deformacija od drugog do četvrtog stadija obrade od 131 %, dok je u prvom stadiju obrade deformacija iznosila 123,7 % u petom stadiju obrade porasla je na 139 %.



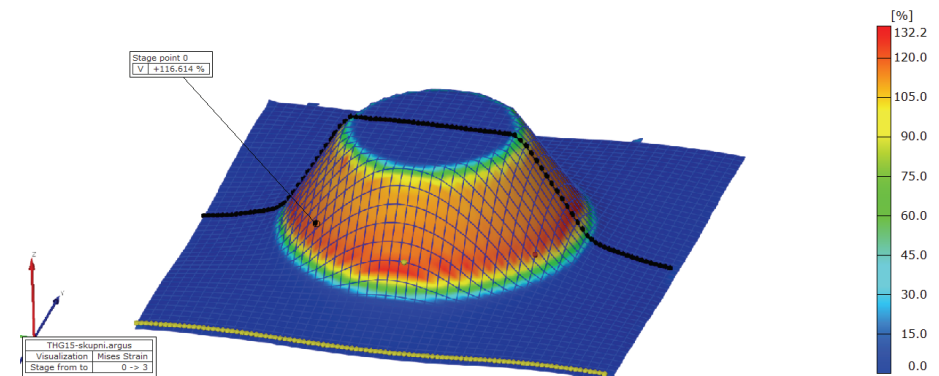
Slika 9.26 Odabrane točke na obodu nedeformiranog lima, promatra se njihovo ponašanje tijekom obrade



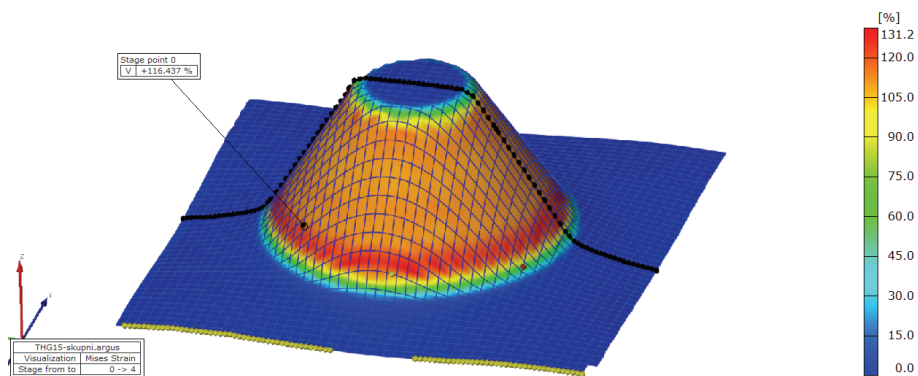
Slika 9.27 Krnji stožac materijal TH415, kut od 58° prvi stadij obrade, visina od 10 mm



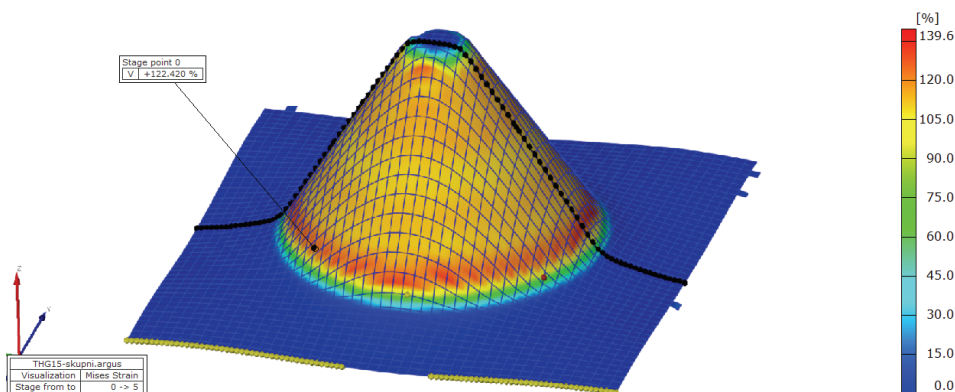
Slika 9.28 Krnji stožac materijal TH415, kut od 58° drugi stadij obrade, visina od 15 mm



Slika 9.29 Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, treći stadij obrade, visina od 25 mm

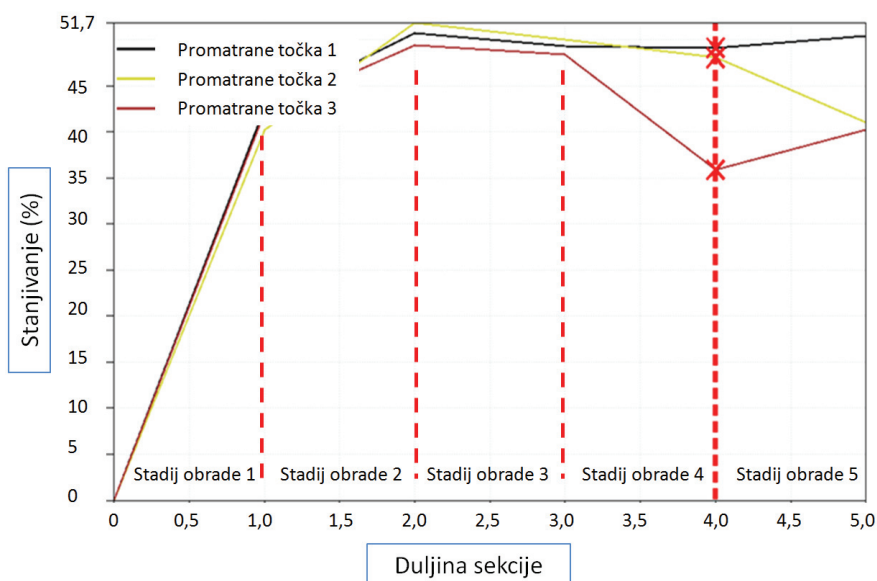


Slika 9.30 Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, četvrti stadij obrade, visina od 35 mm



Slika 9.31 Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, peti stadij obrade, visina od 45 mm

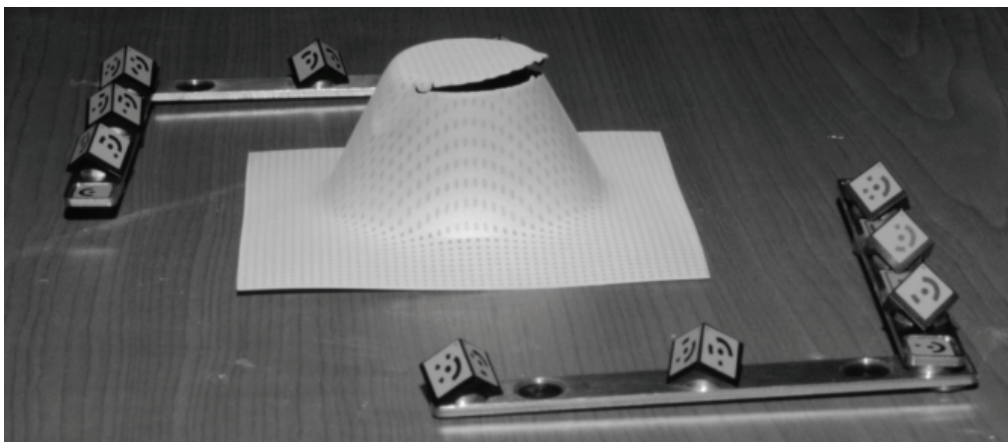
Na slici 9.22 prikazano je stanjivanje lima na samome izratku dok je na slici 9.32 prikazano stanjivanje lima u promatranim točkama za pet različitih stadija obrade krnjeg stošca (visine 10, 15, 25, 35 i 45 mm). Primjećuje se da se po obodu debljina krnjeg stošca jednoliko stanjuje sa naglim skokom do 42 % te konstantno stanjivanje lima od drugog do petog stadija obrade, stanjivanje lima se kreće u rasponu od 50 do 51,7 %.



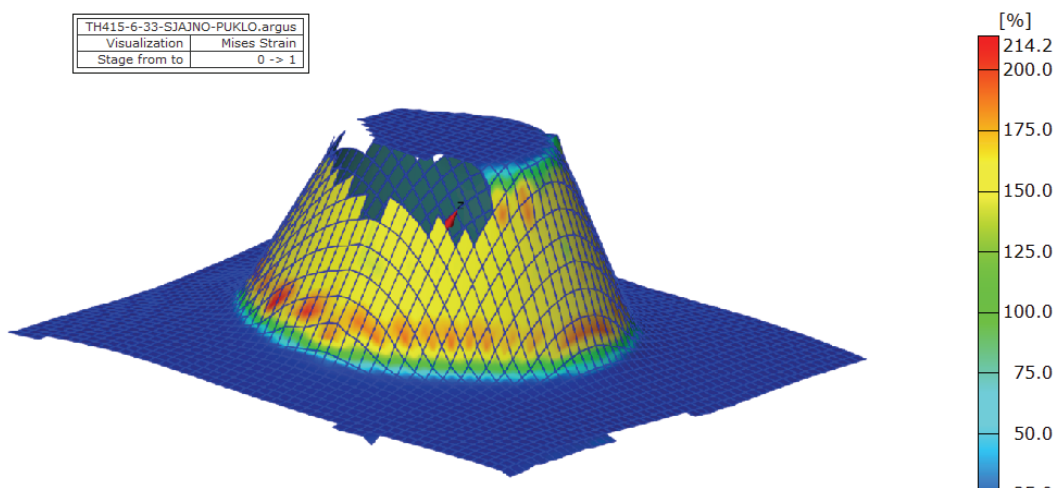
Slika 9.32 Stanjivanje lima u 3 promatrane točke, visine 10, 15, 25, 35 i 45 mm, kut 58°, materijal TH415 lakiran

9.5. Utjecaj laka na krivulju sposobnosti oblikovanja

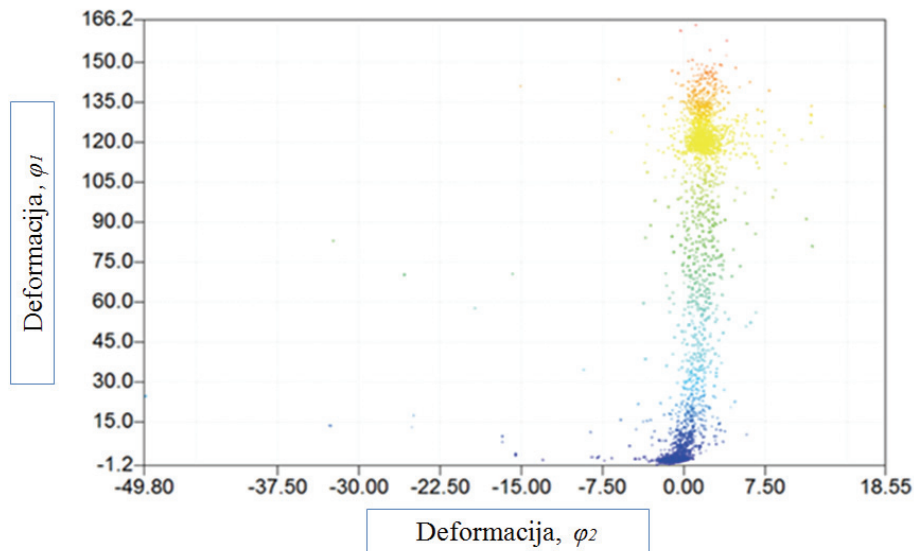
U procesu obrade pukotine su nastajale pri 10 milimetara visine. Tek nakon postizanja optimalnih parametara te efekta rasta temperature došlo se je do povećanja sposobnosti oblikovanja lokalnim zagrijavanjem lima. Pri tom je u pojedinim trenucima došlo do popuštanja materijala i do loma. Kod TH415 kritična visina je nastajala kod visine od 28 mm do 33 mm za lakirani lim. Na slici 9.33 prikazana je digitalizacija jedne nastale pukotina za materijal TH415 lakiran, visine 33 mm s kutom od 63°. Na slici 9.34 prikazano je stanje deformacija prema Von Misesu za nastalu pukotinu. Iz slike je vidljivo da je pojačana deformacija koncentrirana na početnom dijelu obrađivanog stošca tj. kod promjera od 60 mm. Na slici 9.35 prikazana je izmjerena sposobnost oblikovanja za prikazani slučaj.



Slika 9.33 Uzorak TH415 visina od 33 mm, kut od 63°, digitalizacija pukotine

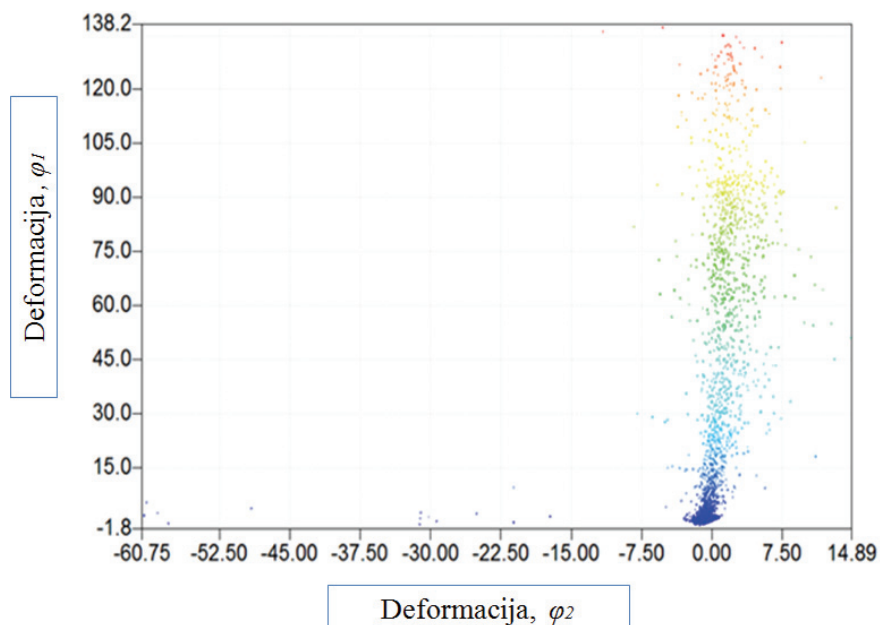


Slika 9.34 Stanje deformacija prema Von Misesu TH415 visina od 33 mm, kut od 63°, digitalizacija pukotine

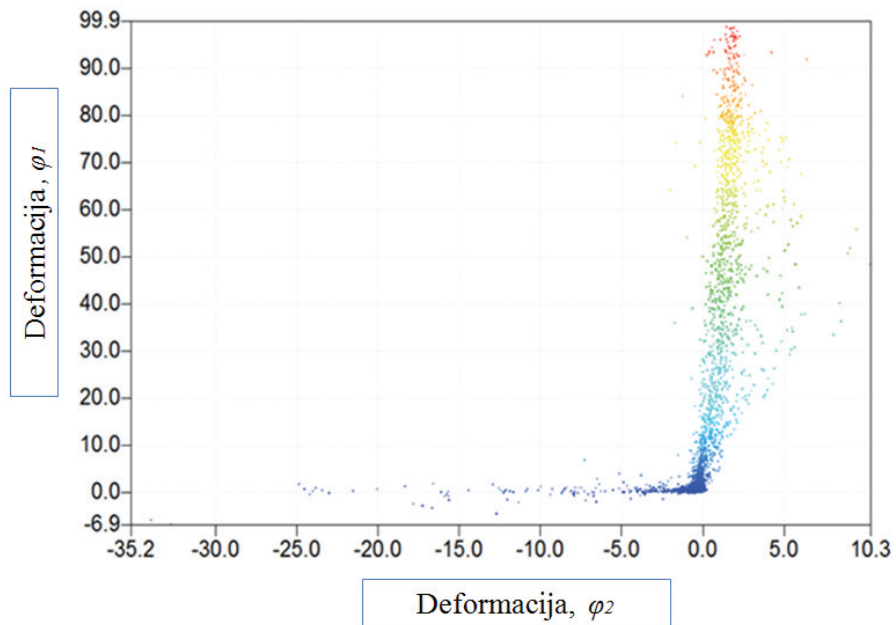


Slika 9.35 Dijagram sposobnosti oblikovanja za puknuti materijal visine od 33 mm, kut od 63°

Kako bi se istražio utjecaj laka na sposobnost oblikovanja napravljena je usporedba između lakiranog i nelakiranog lima TH415. Za izradu lakiranog uzorka sa točkicama korišten je bijeli lak METLACK 818-045 (Italija). Nelakirani lim imao je samo postavljene točkice, zbog refleksije svjetlosti upotrijebljen je fini bijeli prah. Na slikama 9.36 i 9.37 prikazani su rezultati za uzorak TH415-5-10 lakirani i nelakirani. Oba uzorka su izrađena sa istim kutom od 58° i visinom od 10 mm. Može se primijetiti da je kod lakiranog materijala došlo do užeg područja sposobnosti oblikovanja od $\varphi_2 = \pm 0,05$ dok je kod nelakiranog od $\varphi_2 = \pm 0,075$. Također vidljivo je da je deformacija nelakiranog lima kut od 58° a visina od 10 mm do $\varphi_1 = 1,382$ dok je kod lakiranog $\varphi_1 = 0,999$ te je zaključak da lak ukrućuje lim te mu smanjuje polje deformiranja.



Slika 9.36 Sposobnost oblikovanja za nelakirani materijal TH415, visina 10 mm, kut 58°



Slika 9.37 Sposobnost oblikovanja za lakirani materijal TH415, visina 10 mm, kut 58°

10. Dodatna ispitivanja tvrdoće, trenja, nepravilnosti u postupku obrade, hrapavost

10.1. Ispitivanje tvrdoće

U postupku inkrementalnog oblikovanja lokalnim mikro-deformacijama se djeluje duž cijele površine proizvoda. Za očekivati je promjena tvrdoće izrađenog proizvoda kao posljedicu deformiranja. Ispitivanja tvrdoće lima TS230 (W. nr. 1.0371, T50-BA, T1) i lima TH415 (W. nr. 1.0377, T61-CA, T4-CA) izvedena su u tvrtci *MGK-pack* i uspoređena sa standardom tablica 10.1 [65 - 67].

Tablica 10.1 Usporedba označavanja bijelog lima prema mehaničkim svojstvima

Oznaka bijelog lima		Tvrdoća prema Rockwellu 30 T	Standard
Jednostruko stanjen	T1	46 ÷ 52	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T2	50 ÷ 56	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T2,5	52 ÷ 58	JIS G 3303, AR 700, CNS G 3097, AS 1517
	T3	54 ÷ 60	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T3-CA	54 ÷ 60	JIS G 3303, M AR 700
	TS	56 ÷ 62	JIS G 3303
	T4	58 ÷ 64	JIS G 3303, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T4-CA	58 ÷ 64	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T5-CA	62 ÷ 68	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	T6-CA	67 ÷ 73	JIS G 3303, AS 1517
Dvostruko stanjen	DR7	62 ÷ 68	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	DR8	70 ÷ 76	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	DR9	73 ÷ 79	JIS G 3303, AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097, AS 1517
	DR9M	74 ÷ 80	JIS G 3303 AR 700, ASTM A 623, CNS G 3097
	DR10	77 ÷ 83	JIS G 3303, AR 700, CNS G 3097

Napravljeni su testovi kontrole tvrdoće za materijal TS230 prema Rockwell metodi HR 15 T koja je kasnije pretvorena prema tablici HRN EN ISO 6508-1 norme u HR 30 T i za materijal

TH415 prema HR 30 T, [98]. Prema rezultatima prikazanim na tablicama 10.2 i 10.3 oba testirana materijala zadovoljavaju standard. Za lim TS230 izmjerena je tvrdoća HR30 T = 51 što zadovoljava standard raspona tvrdoće prema Rockwellu 30 T od 46 ÷ 52, prema tablici 10.1. Za lim TH415 izmjerena je tvrdoća HR30 T = 61,3 što zadovoljava standard raspona tvrdoće prema Rockwellu od 58 ÷ 64, prema tablici 10.1.

Tablica 10.2 Testiranje tvrdoće nedeformiranog lima TS230 prema, [98]

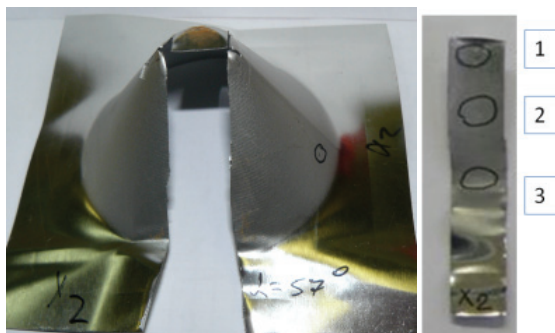
Rockwell metoda HR 15 T				
Uzorak	Izmjerene vrijednosti			Aritmetička sredina
1	77,5	77,9	78,1	78,2
2	77,6	77,2	77,1	77,3
3	77,0	77,2	77,0	77,1
Ukupno				77,5
Prema Standardu za tanke limove [98], HRN EN ISO 6508-1, HR30 T = 51				

Tablica 10.3 Testiranje tvrdoće nedeformiranog lima TH415 prema, [98]

Rockwell metoda HR 30 T				
Uzorak	Izmjerene vrijednosti			Aritmetička sredina
1	61,1	61,9	62,2	61,7
2	61,1	60,8	60,9	60,9
3	61,5	60,9	61,1	61,2
Ukupno				61,3
Prema Standardu za tanke limove [77], HRN EN ISO 6508-1, HR30 T = 61,3				

U tehnologiji inkrementalnog oblikovanja kontinuirano se deformira površina, izmjerena je tvrdoća kako bi se provjerila promjena te mogućnost pojave uniformnosti postignute tvrdoće duž izratka. Promjena tvrdoće nakon izvedenog eksperimenta kontrolirana je s inkrementalno izrađenim uzorcima X1 TH415 kutom od 57° te X1 TS230 sa kutom od 57°, slike 10.1 i 10.2. Tvrdoća je mjerena prema Rockwell metodi HR 15 T za oba materijala jer je zbog stanjivanja materijal TH415 stanjen na 0,12 mm (50 %), prema standardu dobivene vrijednosti pretvorene su u HR 30T. Uzorci su izrezani pomoću cirkularne pile kako ne bi došlo do dodatnih deformacija te su rezultati mjereni u 3 pozicije ravnomjerno raspoređene na uzorcima. U oba slučaja došlo je do povećanja tvrdoće duž cijelog ispitivanog uzorka. Kod materijala TS230 u poziciji 1 i 3 tvrdoća je veća dok je u poziciji 2 došlo do pada tvrdoće. Prema najmanjem rezultatu došlo je do

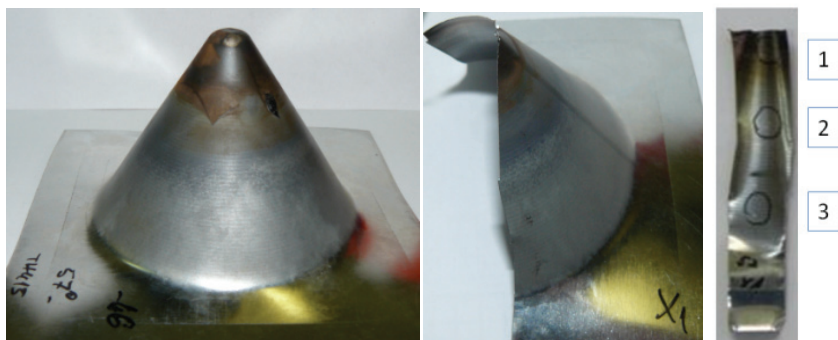
povećanja od 4 % tvrdoće za lim TS230, a u slučaju računanja prosječne vrijednosti dobivenih rezultata do 9 % povećanja tvrdoća. Kod materijala TH415 došlo je do preklapanja rezultata u poziciji 1 i 2, rezultati su prikazani u tablici 10.4 i 10.5. Porast tvrdoće za lim TH415 za najmanji izmjereni rezultat je 9 % dok je za prosječnu vrijednost dobivenih rezultata tvrdoća povećana za 13,5 %.



Slika 10.1 Uzorak X2 TS230 kut 57° mjerjenje tvrdoće

Tablica 10.4 Rezultati mjerenja tvrdoće deformiranog uzorka materijal X1 TS230

Uzorak X1 TS230	HR 15 T	HR 30 T	Nedefformirani HR 30 T
1	81	58,5	51
2	78,4	53	51
3	79,8	56	51



Slika 10.2 Uzorak X1 TH415 kut 57° mjerjenje tvrdoće

Tablica 10.5 Rezultati mjerenja tvrdoće deformiranog uzorka materijal X2 TH415

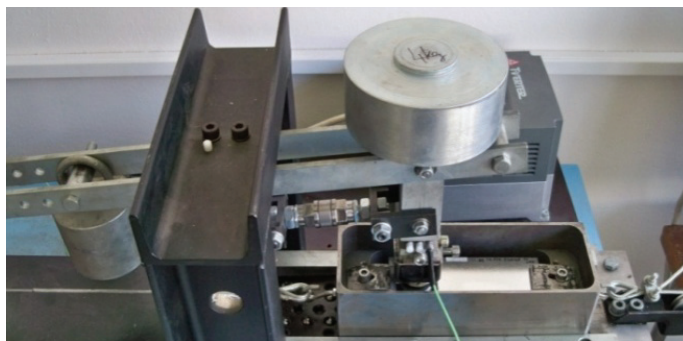
Uzorak X1 TH415	HR 15 T	HR 30 T	Nedefformirani HR 30 T
1	86,9	71	61,3
2	87	71	61,3
3	85	67	61,3

10.2. Ispitivanje trenja

Ispitivanje trenja provedeno je na Sveučilištu u Pragu, "České Vysoké Učení Technické Fakulta Strojní (ČVUT-FSI)". Kontakt između dvije površine izaziva trenja te ono ispituje radi kontrole kvalitete konačnog proizvoda, kontrole temperaturnog zagrijavanja i sprječavanja trošenja alata. Prema literaturi u obradi deformiranja koriste se velike sile u postupku oblikovanja metala te je trenje u obradi deformiranja prešom moguće definirati prema sljedećem [65]:

- Kombinacija zlatnog (baza epoksi fenola) i Ondina 15 ulja, $\mu = 0,03$.
- Molibdendisulfid (MoS_2) je $\mu = 0,05$.
- Ulje za hladnu obradu Molykote (molibdendisulfid u koloidnoj otopini ulja) $\mu = 0,1$.
- Mineralno ulje L-0532 FG, $\mu = 0,15$.
- Bez podmazivanja, kositreni lima je imao $\mu = 0,17$.

U inkrementalnom oblikovanju dolazi do opterećenja, klizanja i torzije prilikom obrade. U ovom istraživanju izvedeno je ispitivanje pri utiskivanju malim silama i klizanjem. Radi uvida u stanje koeficijenta trenja definirano je novo testiranje kositrenog lima za materijale TH 415 2,8/2,8 FS 0,21 mm i TS230 2,8/5,6 FS 0,155 mm. Dodatno je testirano i trenje laka Gold lacquer, Overprint varnish i Alupigmented lacquer nanesenog na materijal TH 550 2,8/2,8 FS 0,155 mm, [99]. Istraživanje je napravljeno u suradnji sa tvrtkom *MGK-pack* koja je sudjelovala sa materijalom i lakovima, Sveučilištem u Pragu ČVUT-FSI koje je izvršilo testiranje te Tehnički fakultet u Rijeci koje je sudjelovalo u stjecanju znanja i obradi rezultata. Lim ima čeličnu osnovu sa nanosom kositra kao i TS230 2,8/5,6 FS i TH415 2,8/2,8 FS te bi trenje nanesenog laka trebalo imati jednako ponašanje i u slučaju ova dva materijala. U provedenom istraživanju u suradnji sa Sveučilištem u Pragu ČVUT-FSI ispitana su statička (μ_s) i dinamička trenja (μ_d) na materijalu TS230 i TH415 sa strane nanosa kositra od 2,8 g/m². Sukladno tome trenje bi trebalo biti jednoliko. Uređaj za utvrđivanje trenja naziva se Tribometar koji može biti u izvedbi sa kuglom ili diskom. Tribometar s diskom se sastoji od igle koja se podvrgava opterećenju te ulazi u kontakt s rotirajućim diskom slika 10.3.



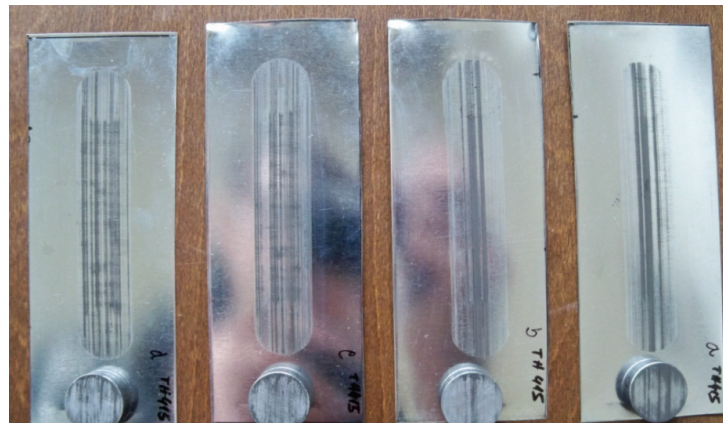
Slika 10.3 Uzorci opterećeni silom od 10 - 40 N u Tribometru TOP 3

Igla može imati bilo kakav oblik ali obično ima sferni oblik i služi za simulaciju specifičnog kontakta. Koeficijent trenja se određuje odnosom sile trenja i sile opterećenja na igli. Za testiranje trenja koristila se je podložna ploča dimenzija 135 x 50 mm na koju se postavlja predmet i alatne epruvete Ø20 x 8 mm, slika 10.4, za izazivanje trenja koji je specifičan prema alatu koji se koristi u proizvodnji. U provedenom ispitivanju materijal TH415 i TS230 su pričvršćeni na podložnu ploču a kao alatna epruveta korišten je čelik 41Cr4 (Steel 41Cr4) korišten pri izradi matica M20 sa klasom čvrstoće 10,9.

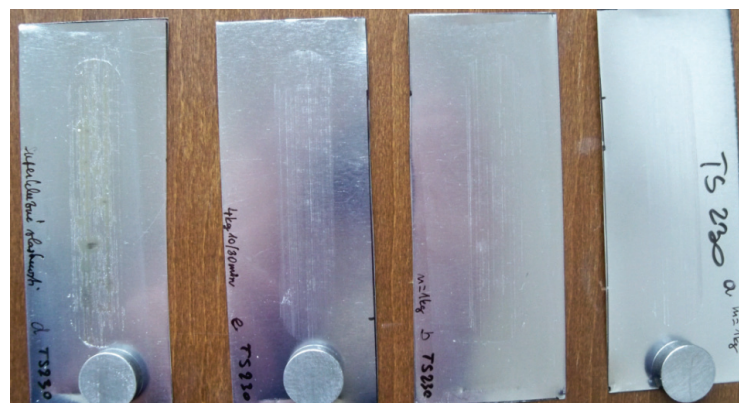


Slika 10.4 Epruvete za testiranje trenja, podložna ploča i alatna epruveta

Izvršeno je ispitivanje slika 10.5 i slika 10.6 prema uvjetima testiranja prikazanim u tablici 10.6, te su ostvareni rezultati prikazani u tablici 10.7 i 10.8.



Slika 10.5 Testirani uzorci TH415



Slika 10.6 Testirani uzorci TS230

Tablica 10.6 Uvjeti ispitivanja Tribometrom za lim TS230 i TH415

Oznaka	Opterećenje (N)	Teoretski tlak (MPa)	Prijeđeni put (m)	Vrijeme (min)	Dinamički ciklusi po minuti
TS230a	10	0,03	199,5	30	35
TS230b	10	0,03	199,5	30	35
TS230e	40	0,13	199,5	30	35
TS230d	40	0,13	199,5	30	35
TH415a	10	0,03	199,5	30	35
TH415b	10	0,03	199,5	30	35
TH415c	40	0,13	66,5	10	35
TH415d	40	0,13	66,5	10	35

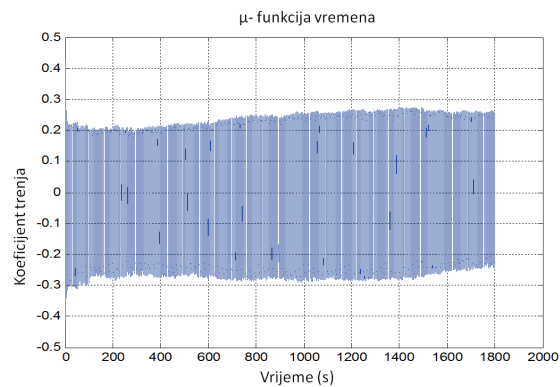
Tablica 10.7 Rezultati za postavljene uvjete opterećenja, za limove TS230 i TH415

Vrijeme	μ_s (20 - 40 s)	μ_d (20 - 40 s)	μ_s (560 - 580 s)	μ_d (560 - 580 s)	μ_s (1760 - 1780 s)	μ_d (1760 - 1780 s)
TS230a	0,2234	0,2042	0,2674	0,2508	XX	0,2665
TS230b	0,2038	0,1977	0,2473	0,2429	XX	0,3170
TS230e	0,2077	0,2023	0,2694	0,2641	0,2843	0,2840
TS230d	0,2292	0,2072	0,2357	0,2096	0,2421	0,2252
TH415a	0,4415	0,3843	0,4883	0,4738	0,5645	0,5318
TH415b	0,4499	0,4101	0,4964	0,4392	0,6268	0,6189
TH415c	0,4476	0,3945	0,4923	0,4449	XX	XX
TH415d	0,4262	0,3739	0,4650	0,4203	XX	XX

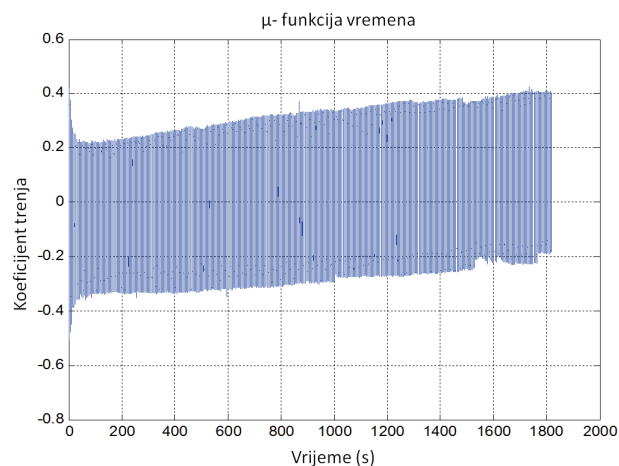
Tablica 10.8 Aritmetička sredina rezultata ispitanih uzoraka koeficijenta trenja kositra, TS230 i TH415

	Opterećenje (N)	μ_s (20- 40 s)	μ_d (20 - 40 s)	μ_s (560 - 580 s)	μ_d (560 - 580 s)	μ_s (1760 - 1780 s)	μ_d (1760 - 1780 s)
TS230	10	0,2136	0,2009	0,2573	0,2468	0	0,2917
TS230	40	0,2184	0,2047	0,25255	0,23685	0,2632	0,2546
TH415	10	0,4457	0,3972	0,4923	0,4565	0,5956	0,5753
TH415	40	0,4369	0,3842	0,47865	0,4326	0	0

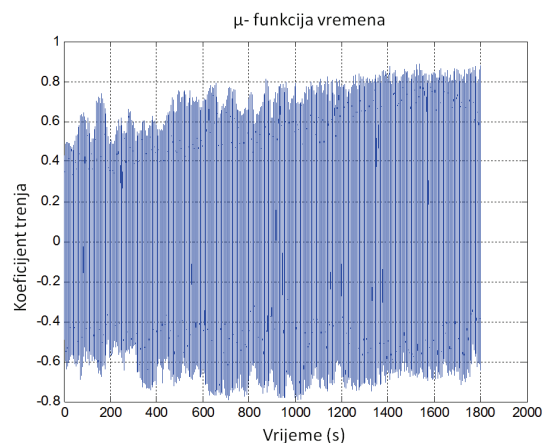
Na slikama 10.7 - 10.10 prikazani su rezultati mjerenja dinamičkih ciklusa trenja. Usporedbom rezultata iz tablice 10.8, prema slikama 10.7 - 10.10 primjećuju se razlike između trenja gdje je trenje kod TS230 u prosjeku za 50 % manje od trenja materijala TH415 pri istom nanosu kositra od $2,8 \text{ g/m}^2$. Važno je napomenuti da je lim TS230 debljine $0,155 \text{ mm}$ dok je lim TH415 debljine $0,24 \text{ mm}$, dok je tlak u oba pokusa bio jednak. Slika 10.7 sadrži negativan predznak koeficijenta trenja zbog izračuna u softveru Matlab. Jedan ciklus sadrži kretanje alatne epruvete unaprijed i unazad, izračunate vrijednosti su iste npr. $-0,4 = 0,4$.



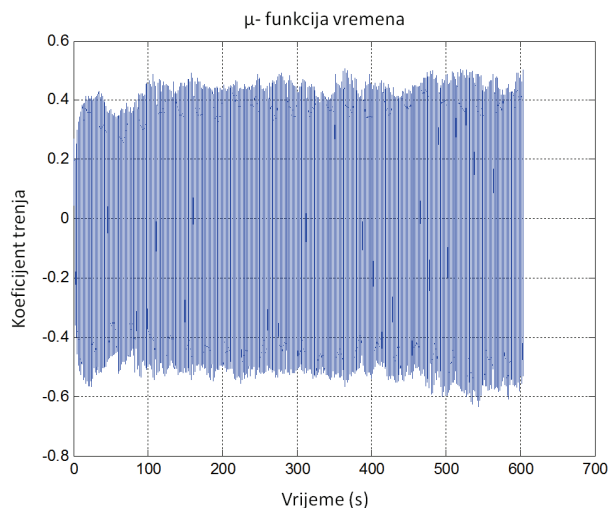
Slika 10.7 Prikaz ponašanja materijala TS230 test "TS230a" pri opterećenju od 10 N



Slika 10.8 Prikaz ponašanja materijala TS230 test "TS230e" pri opterećenju od 40 N

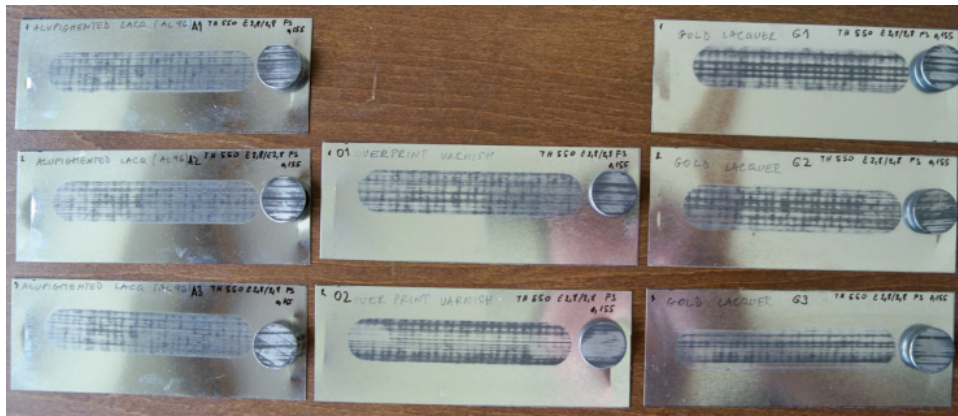


Slika 10.9 Prikaz ponašanja materijala TH415 test "TH415a" pri opterećenju od 10 N

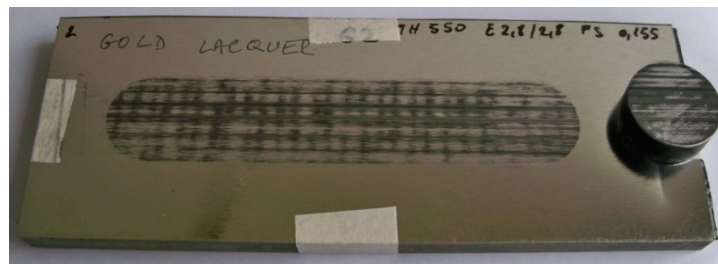


Slika 10.10 Prikaz ponašanja materijala TH415 test "TH415d" pri opterećenju od 40 N

Kod proizvodnje vučene limenke bijeli lim se obavezno obostrano lakira i to je dovoljno da se postigne uspješan proizvod. Pored zaštite lima, lak ima i ulogu stvaranja optimalnog koeficijenta trenja potrebnog za tečenje lima. Kod izrade limenki ne koristi se podmazivanje već se sve bazira na nanosu laka koje u prosjeku iznosi $8,5 \text{ g/mm}^2$ te se posebna pažnja pridaje ostrim radiusima i rubovima. Oštećenja lakova uzrokuju povećanu mogućnost pojave korozije. Lak se nanosi obostrano na lim, međutim razlikuje se vanjski nanos i unutarnji ovisno o upotrebi. U provedenom istraživanju svi uzorci su bili podvrgnuti testu od 10 minuta, ostvarena su statička i dinamička trenja laka iznad $\mu = 0,3$ i $0,4$ što je iznad očekivanog. Za procese dubokog vučenja idealno bi bilo koristiti sivi ljev, zbog ugljika koji može djelovati kao mazivo, međutim, koristi se karbidni alatni čelik zbog otpora prema trošenju. Trenje između sivog ljeva u kontaktu sa sivim ljevom kod ispitivanja bez maziva jednako je $\mu = 1,1$; kod klizanja bez maziva $\mu = 1,1$ te kod klizanja uz mazivo $\mu = 0,07$. Trenje između čelika i sivog ljeva je kod statičnog testa bez maziva jednako je $\mu = 0,4$ a sa mazivom jednako je $\mu = 0,21$. Trenje na galvanizirani čelik od statičnog ispitivanja bez maziva jednako je $\mu = 0,10 - 0,2$ a uz mazivo $\mu = 0,09 - 0,18$. Trenje kod ljevanog željeza na kositreni lim pri testu bez maziva je $\mu = 0,32$. Testiranje tankoga lima moguće je izvršiti ukoliko se simulira opterećenje sile deformiranja u prosjeku 80 tona, te upotreba alatnog cementiranog čelika kao ticala. Opterećeni su sa nominalnom silom od 40 N. Rata uzimanja uzorka je bila 250 Hz = tijekom 1 sekunde izmjereno je 250 vrijednosti sile trenja. Nakon 10 minuta pronađeno je da je glavna površina prevlake odstranjena, time je zaključeno da je optimalno vrijeme testa 10 minuta. Svi uzorci nakon toga su opterećeni 10 minuta slika 10.11 i slika 10.12. Brzina ciklusa je bila 35 ciklusa po 1 minuti. Duljina 1 ciklusa iznosila je $2 \times 0,095 \text{ m} = 0,19 \text{ m}$. U trajanju od 10 minuta prijeđen je put od 66,5 metara. U praksi $\mu_d > 0,5$ je nepoželjan.

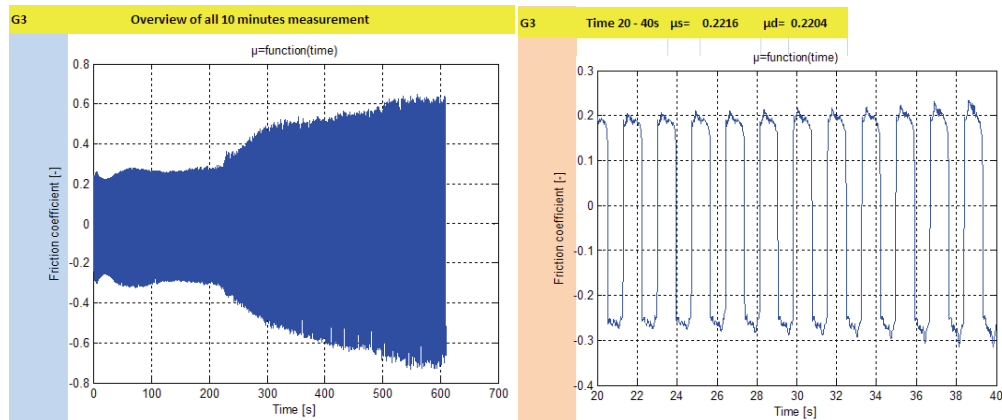


Slika 10.11 Testirani uzorci [99]



Slika 10.12 Uzorak G2 za materijal sa prevlakom Gold lacquer TH 550 E2,8/2,8 FS 0,155 mm [99]

Za test Alupigmented lacquer (A) srednja vrijednost izvršenih testova za 10 minuta, slika 10.13, rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,589$ a dinamički koeficijent je $\mu_d = 0,55$. To ispitivanje je nakon 50 sekundi rezultiralo sa koeficijentima trenja iznad 0,5 nakon prvih 50 sekundi testiranja te održavalo raspon do kraja testiranja. Za test Overprint varnish (O) srednja vrijednost izvršenih testova 10 minuta rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,599$ a dinamički je $\mu_d = 0,537$. To ispitivanje je također kao i Alupigmented lacquer (A) nakon 50 sekundi rezultiralo sa koeficijentima trenja iznad 0,5 nakon prvih 50 sekundi testiranja te održavalo raspon do kraja testiranja. Za test Gold lacquer (G) srednja vrijednost izvršenih testova za 10 minuta rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,623$ a dinamički je $\mu_d = 0,573$. Međutim do 200 sekundi koeficijent trenja je iznosio $\mu_d = 0,3$ nakon čega je došlo do naglog skoka na $\mu_d > 0,5$, slika 10.13. U tehnologiji dubokog vučenja bitno je što se događa u statičkom opterećenju od prvih 20 do 40 sekundi. Na slici 10.13 može se vidjeti ponašanje u toku svih 10 minuta za Gold lacquer (G). Za inkrementalno oblikovanje najpogodniji je Gold lacquer (G) koji je potrebno ispitati u uvjetima obrade. Za test Alupigmented lacquer (A) srednja vrijednost izvršenih testova za 20 - 40 sekundi rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,426$ a dinamički je $\mu_d = 0,365$. Za test Overprint varnish (O) srednja vrijednost izvršenih testova 20 - 40 sekundi rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,436$ a dinamički koeficijent je $\mu_d = 0,382$. Za test Gold lacquer (G) srednja vrijednost izvršenih testova za 20 - 40 sekundi rezultirala je statičkim koeficijentom $\mu_s = 0,368$ a dinamički koeficijent je $\mu_d = 0,333$.



Slika 10.13 Rezultat ispitivanja trenja Gold lacquer [99]

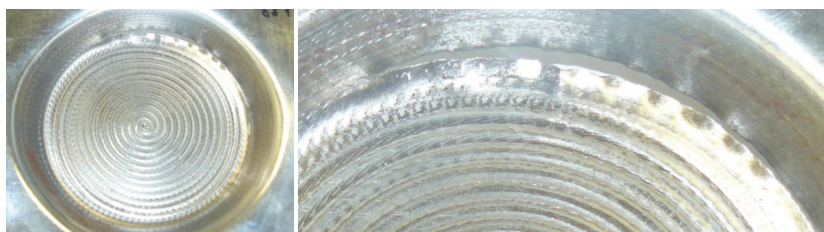
10.3. Nepravilnosti u postupku obrade

Istraživanju sposobnosti oblikovanja pristupilo se standardnim ispitivanjem izrade krnjeg stošca, promatra se sposobnost izrade najvećeg mogućeg kuta. Početna ispitivanja pokazala su da lom nastaje neovisno o kutu izrade na 10 mm visine krnjeg stošca, slika 10.14, kod materijala TH415 i kod materijala TS230. Materijali TH415 i TS230 pri odabranim parametrima klasičnog inkrementalnog oblikovanja nisu bili u stanju izdržati veće deformiranje bez izazivanja trenja i zagrijavanja. Do loma je dolazilo popuštanjem materijala zbog naprezanja nakon čega postoji mogućnost ulaza alata u izazvanu nepravilnost i napredak pukotine tj. odrezivanje lima.



Slika 10.14 Popuštanje materijala pri hladnoj obradi na 10 mm visine

Uvođenjem deformiranja sveukupne površine svakoga sloja dalo je bolje rezultate i postigla se je visina od 15 mm, slika 10.15, međutim za izradu je bilo potrebno više vremena (10 - 20 minuta).



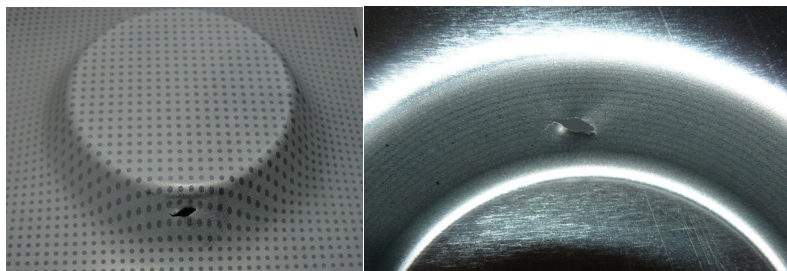
Slika 10.15 Popuštanje materijala pri hladnoj obradi na 15 mm visine, spiralna putanja, metoda deformiranja cjelokupne ravnine prije spuštanja na novu ravninu

Nakon uspješno definiranih parametara obrade u kojima se uvodila toplina izazvana trenjem što je rezultiralo postignutom visinom od 40 mm, krenulo se sa ispitivanjem maksimalnog kuta obrade. Kod materijala TS230 maksimalni kut je definiran na 58°, dok je ispitna epruveta kut 59°, slika 10.16, pukla na 10 mm visine. Kod materijala TH415 do loma je došlo pri kutu od 64° bez podmazivanja, uvođenjem maziva do loma je došlo pri kutu od 67°.



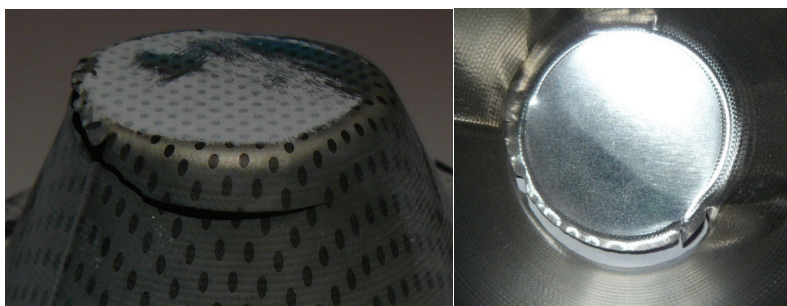
Slika 10.16 Popuštanje materijala kut 59° pri optimalnim parametrima 10 mm visine

Na slici 10.17 prikazana je pukotina nastala zbog nepravilnosti u strukturi odabrane epruvete TH415 lakirane bijelim lakom. Alat je prešao preko nepravilnosti a pukotina je počela napredovati ali nije uzrokovala lom cijeloga izratka. Pukotina se nije razvila sa svakim ciklusom obrade već se je njeno napredovanje zaustavilo nakon prijelaza alata u obradu viših slojeva.



Slika 10.17 Pukotina nastala zbog nepravilnosti u strukturi materijala

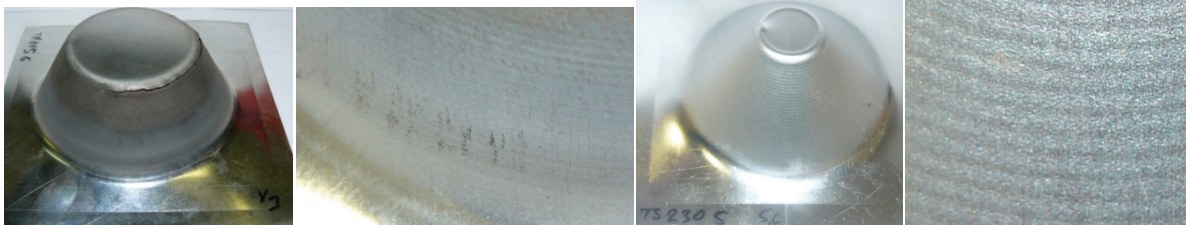
Na slici 10.18 prikazan je lom na materijalu TH415 sa odabranom visinom oblikovanja od 35 mm. Nastali lom pri visini od 33 mm prati liniju oblikovanja koju alat izvodi na samome izratku, pukotina je nastala pri obradi viših slojeva. Došlo je do djelovanja dovoljno velikog naprezanja da jedan od slojeva popusti i pukotina je napredovala u skladu sa prethodno deformiranom linijom prolaza alata. Budući da je u prijašnjim pokusima dokazano da je moguće izraditi visinu veću od 33 mm lom je nastupio zbog nepravilnosti u strukturi materijala.



Slika 10.18 Pukotina materijala TH415 nastala pri visini od 33 mm

10.4. Hrapavost

Ispitana je kvaliteta hrapavosti konačne površine za materijale TH415 i TS230 u tvrtci *MGK-pack*. Ispitivana je površina materijala TH415 i TS230 prije i nakon obrade, slika 10.19. Eksperiment je ponovljen tri puta za svaku površinu sa uređajem TR-100, slika 10.20. Vrijednosti etalona za umjeravanje: $Ra = 3,27 (\mu\text{m})$, $Rz = 13,2 (\mu\text{m})$ sa tolerancijom $\pm 3 \%$.

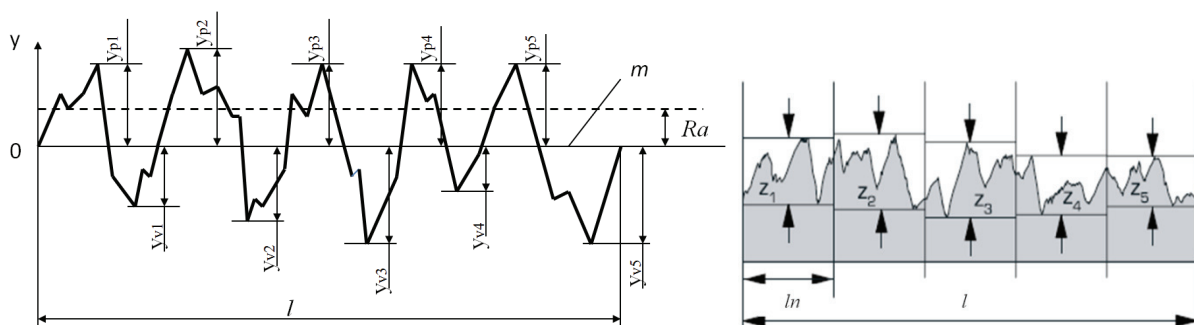


Slika 10.19 Ispitani uzorci X3 TH415 i X5 TS230 i prikaz površine



Slika 10.20 Korišten je uređaj za mjerenje hrapavosti TR-100 "Surface roughness tester" sa pripadajućim etalonom

Ispitana je površina materijala TH415 uzoraka X1 TS230 X5 prije i nakon obrade u tri različite točke na odabranom uzorku prema standardu ISO 4287:1997. Na slici 10.21 prikazana je srednja referentna crta profila neravnine m , srednja aritmetičkoj vrijednost Ra . Uređaj TR-100 mjeri najveću visinu profila hrapavosti Rz prema standardu ISO 4288 (DIN 476/1-1974). Pri tome se Rz računa kao prosječni maksimum udaljenosti vrha od udoline unutar 5 duljina vrednovanja ln za duljinu ukupno ispitivanog profila hrapavosti l , slika 10.21.



Slika 10.21 Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra lijevo, duljina vrednovanja ln i računanje parametra Z_1 do Z_5 za izračun Rz desno

Ispitan je parametar hrapavosti Ra srednja aritmetičkoj vrijednosti odstupanja apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l , izraz:

$$Ra = \frac{1}{n_{hr}} \sum_{i=1}^{n_{hr}} |y_i|, \quad (10.1)$$

gdje je:

Ra (μm) - srednje aritmetičko odstupanje profila, l (μm) - mjerna duljina hrapavosti površine, $y(x)$, y_i (μm) - visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu, n - broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine hrapavosti površine, srednja referentna crta profila neravnine m .

Ispitana je najveća visina profila hrapavosti Rz :

$$Rz = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}, \quad (10.2)$$

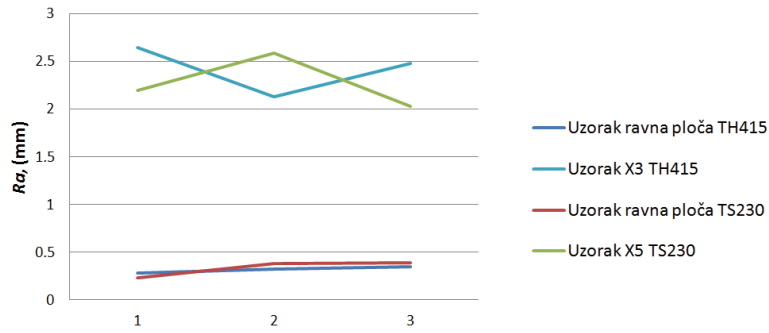
gdje je:

Rz (μm) - najveća visina profila hrapavosti za 5 ispitnih duljina ln , Z_1 do Z_5 (μm) - numerirane visine profila hrapavosti u ispitnim duljinama vrednovanja ln na ispitivanoj duljini profila l .

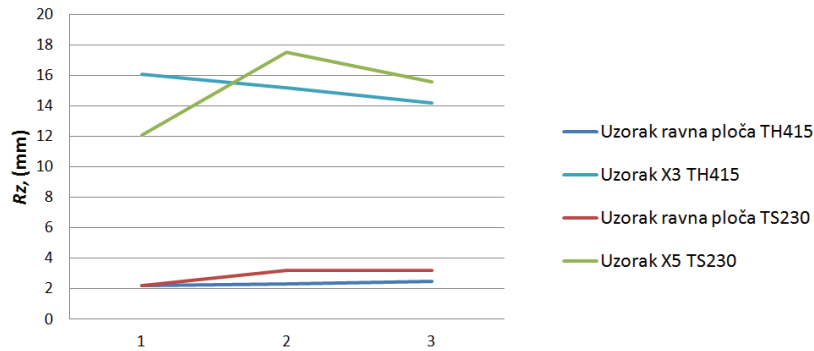
Rezultati su prikazani u tablici 10.9 za materijal TH415 i TS230 te na slikama 10.22 i 10.23. Ispitana je hrapavost za vertikalni pomak $\Delta z = 0,7$ mm i razmak nula između prolaza, radijus alata 6 mm. Usporedba materijala pri jednakom posmaku, brzini vrtnje i vertikalnom pomaku Δz rezultirala je jednakom hrapavošću površine kod dva različita materijala. Mjerni uređaj TR-100 je automatski mjerio 5 duljina vrednovanja ln koje se nalaze na ukupnoj duljini ispitivane površine l .

Tablica 10.9 Rezultati mjerenja hrapavosti obrade materijala TH415 i TS230

Uzorak ravna ploča TH415	Ra (μm)	Rz (μm)	Uzorak ravna ploča TS230	Ra (μm)	Rz (μm)
Mjerenje 1	0,28	2,2	Mjerenje 1	0,23	2,2
Mjerenje 2	0,32	2,3	Mjerenje 2	0,38	3,2
Mjerenje 3	0,35	2,5	Mjerenje 3	0,39	3,2
Aritmetička sredina	0,316	2,33	Aritmetička sredina	0,33	2,86
Uzorak X3 TH415	Ra (μm)	Rz (μm)	Uzorak X5 TS230 6	Ra (μm)	Rz (μm)
Pozicija mjerenja 1	2,65	16,1	Pozicija mjerenja 1	2,20	12,09
Pozicija mjerenja 2	2,13	15,2	Pozicija mjerenja 2	2,59	17,5
Pozicija mjerenja 3	2,48	14,2	Pozicija mjerenja 3	2,03	15,6
Aritmetička sredina	2,42	15,16	Aritmetička sredina	2,27	15,06



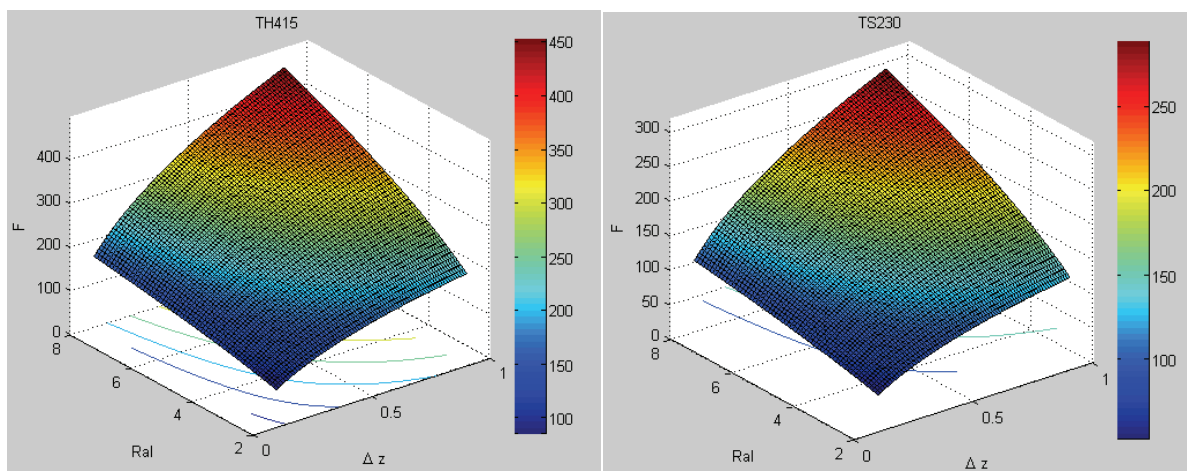
Slika 10.22 Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a za materijal TH415 i TS230 prije i nakon obrade



Slika 10.23 Srednje vrijednosti neravnina R_z za materijal TH415 i TS230 prije i nakon obrade

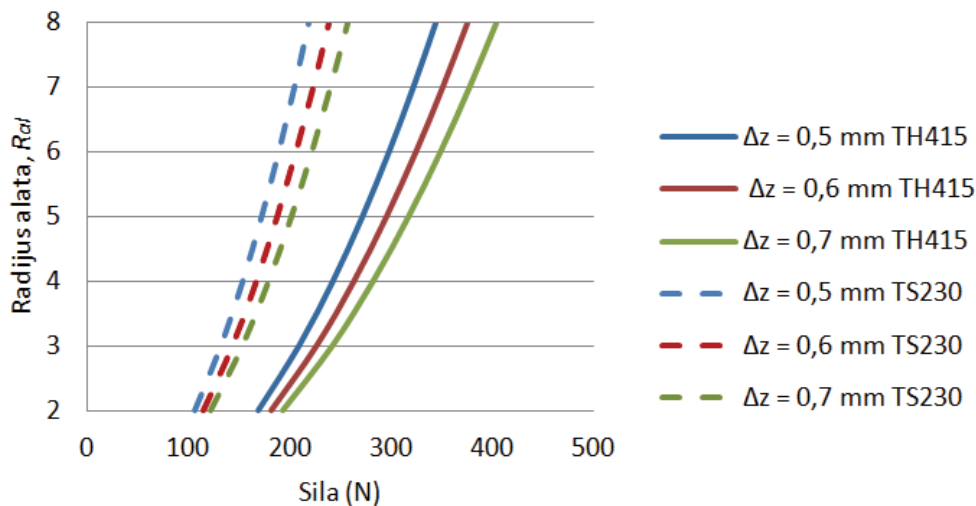
10.5. Ispitivanje sile

Pomoću izraza (6.12) moguće je izračunati početnu silu deformiranja i uvrštavanjem promjene debljine lima prema izrazu (6.2) radnu silu u procesu. Na slici 10.24 prema izrazu (6.12) i materijalnim svojstvima dobivenim eksperimentalno za TH415 i TS230 izračunate su sile koje djeluju na početku procesa obrade, pri kutu od 50° , za raspon radijusa alata $R_{al} = 2 - 8$ mm te vertikalnom pomaku alata $\Delta z = 0,1 - 0,7$ mm.



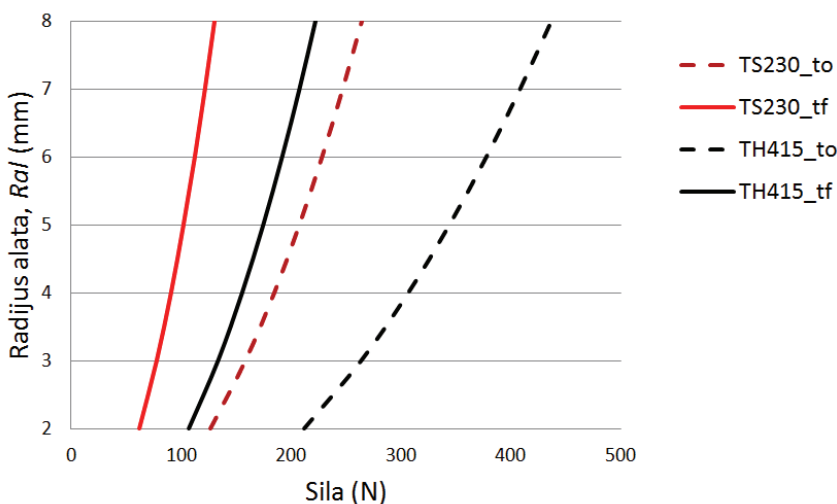
Slika 10.24 Mogućnost utjecaja sile prema (6.12) u ovisnosti o vertikalnom pomaku alata Δz i radijusu alata R_{al} korištenih u istraživanju materijala TH415 i TS230, pri kutu od 50°

Na slici 10.24 prikazano je variranje sile u ovisnosti o promjeni vertikalnog pomaka alata $\Delta z = 0,5 - 0,7$ mm za materijale TH415 i TS230, prema kutu od 50° za raspon radijusa alata $R_{al} = 2 - 8$ mm. Može se primijetiti, da su sile na početku procesa za tankostjeni lim male te da se ovisno o parametrima procesa kreću od 121 do 427 N slika 10.25, dok je radna sila ovisna o kutu deformiranja i u prosjeku 50 % manja od početne sile deformiranja.



Slika 10.25 Raspon sile za različiti odabir $\Delta z = 0,5 - 0,7$ mm, kut od 50° , $R_{al} = 2 - 8$ mm za materijal TS230 i TH415 50°

Temeljem eksperimenata utvrđeno je da je kut 58° kritičan za materijal TS230 a kut 63° je kritičan za materijal TH415. Za materijal TH415 sa podmazivanjem moguće je postići i kritičan kut od 66° . Prema jednadžbi (6.2) ovisno o kutu savijanja može se promatrati utjecaj stanjivanja ispitanih limova. Tanji lim znači manju silu potrebnu za deformiranje. Iz toga razloga moguće je za kritične kutove 58° za materijal TS230 i 63° za materijal TH415, odrediti promjenu sile, slika 10.26 tablica 10.10.

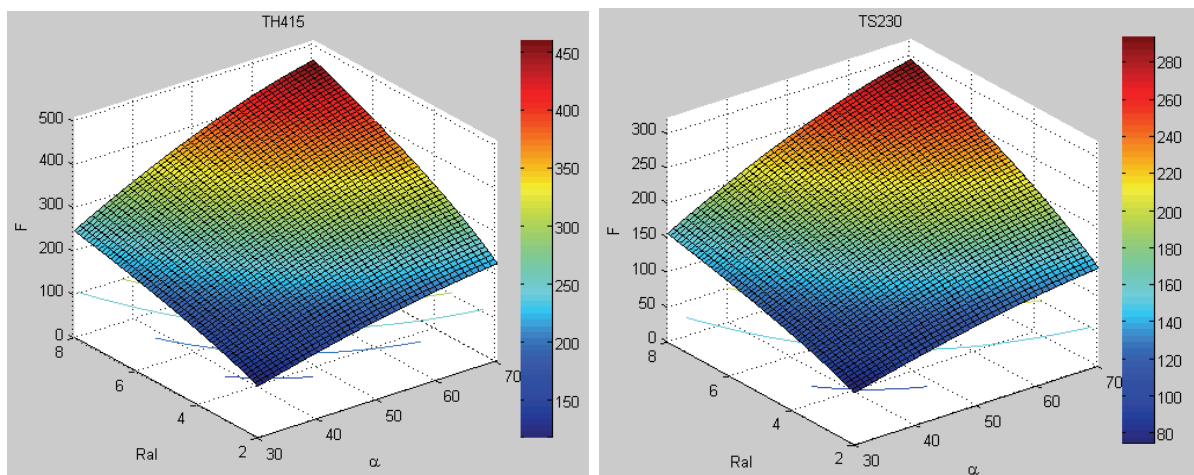


Slika 10.26 Promjena debljine lima ovisno o sili deformiranja za $R_{al} = 2 - 8$ mm, $\Delta z = 0,6$ mm za materijal TS230 i TH415, kut 58° kritičan za materijal TS230 i kut 63° za materijal TH415

Tablica 10.10 Promjena sile nakon što je uspostavljeno konstantno stanjivanje lima prema jednadžbi 6.2, t_o početna debljina i t_f konačna debljina pri kritičnom kutu 58° za materijal TS230 ($t_o = 0,155$ mm; $t_f = 0,085$ mm) i 63° za materijal TH415 ($t_o = 0,24$ mm; $t_f = 0,144$ mm)

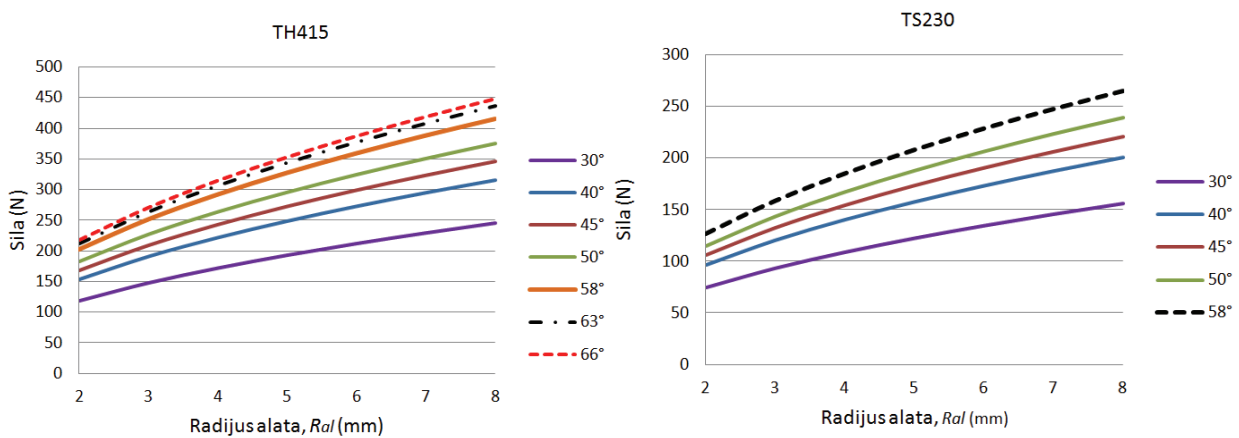
	$R_{al} = 2$ mm	$R_{al} = 3$ mm	$R_{al} = 4$ mm	$R_{al} = 5$ mm	$R_{al} = 6$ mm	$R_{al} = 7$ mm	$R_{al} = 8$ mm
TS230_ t_o (N)	126,9	158,7	185	207,8	228,4	247,2	264,6
TS230_ t_f (N)	62,08	77,89	90,95	102,3	112,6	121,9	130,6
TH415_ t_o (N)	211,8	263,7	306,6	344	377,6	408,3	436,8
TH415_ t_f (N)	106,7	133,5	155,6	174,9	192,2	208,1	222,8

Na slici 10.27 prikazan je utjecaj promjene kuta na početnu silu deformiranja $R_{al} = 2 - 8$ za materijal TS230 i TH415, $\Delta z = 0,6$ mm.



Slika 10.27 Utjecaj promjene kuta na silu deformiranja, $R_{al} = 2 - 8$ mm, materijal TS230 i TH415, $\Delta z = 0,6$ mm

Na slici 10.28 prikazan je utjecaj promjene kuta na silu deformiranja za materijal TS230 i TH415, $R_{al} = 2 - 8$, $\Delta z = 0,6$ mm.



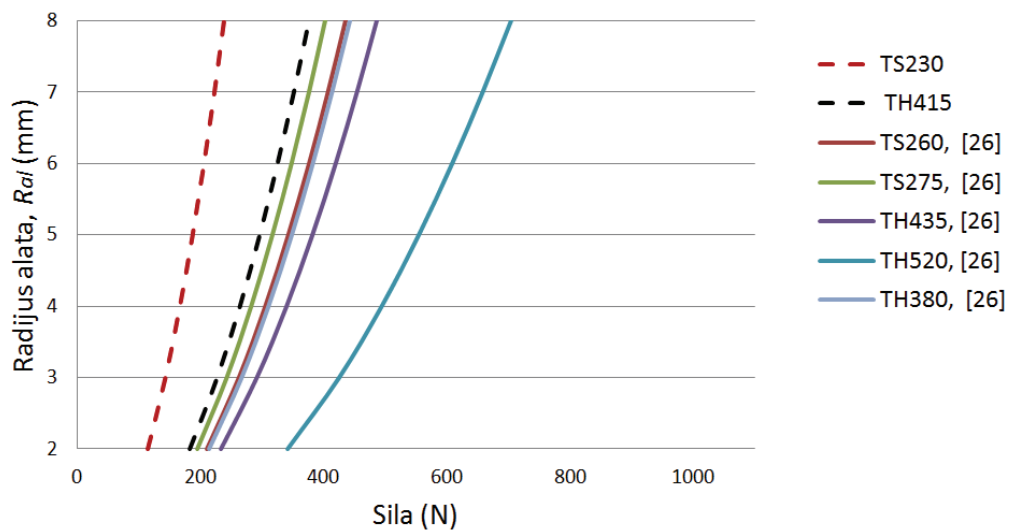
Slika 10.28 Utjecaj promjene kuta na silu deformiranja za $R_{al} = 2 - 8$ mm, $\Delta z = 0,6$ mm, kritični kutovi 58° (TS230) i 63° (TH415)

Budući da je veličina kritične sile F_z konstantna tijekom oblikovanja u horizontalnoj ravnini prema tablici 10.11 može se odabrati kritičnu silu na početku u procesa.

Tablica 10.11 Sile pri kritičnom kutu 58° za materijal TS230, 63° za materijal TH415, 66° za materijal TH415 sa podmazivanjem

	$R_{al} = 2 \text{ mm}$	$R_{al} = 3 \text{ mm}$	$R_{al} = 4 \text{ mm}$	$R_{al} = 5 \text{ mm}$	$R_{al} = 6 \text{ mm}$	$R_{al} = 7 \text{ mm}$	$R_{al} = 8 \text{ mm}$
TS230 58° (N)	126,9	158,7	185	207,8	228,4	247,2	264,6
TH415 58° (N)	201,6	251	291,8	327,4	359,4	388,6	415,8
TH415 63° (N)	211,8	263,7	306,6	344	377,6	408,3	436,8
TH415 66° (N)	217,2	270,4	314,4	352,7	387,1	418,6	447,9

Na slici 10.29 i prema tablici 3.3 prikazana je usporedba sila na početku procesa obrade za kut od 50° nekoliko komercijalnih tankostjenih limova prema tablici 3.3 [65].



Slika 10.29 Raspon sila za $\Delta z = 0,6 \text{ mm}$, kut od 50° , $R_{al} = 2 - 8 \text{ mm}$ za materijale prema tablici 6.1 TS230 i TH415

11. Zaključak

11.1. Pregled rezultata

Osnovni je trend u metaloprerađivačkoj industriji povećanje količine prerađenoga lima uz smanjenje njegove debljine. U radu je predstavljena analiza inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki kod tankostjenog materijala. U suradnji sa tvrtkom *MGK-pack* koja proizvodi ambalažu od tankostjenog lima odabran je oblik krnjeg stošca radi potencijalne implementacije na tržištu. Simulacije su provedene kako bi se utvrdili uvjeti izrade uspješnog SPIF procesa za materijal TS230 i TH415. Oblik krnjeg stošca odabran je u suradnji sa industrijom radi potencijalnog iskorištavanja tehnologije. Jedna od bitnijih značajki ovoga procesa jest mogućnost popravljivanja procesa s unosom računalnih naredbi bez potrebe popravka alata i naprava kako bi se postigao gotov proizvod. Istraživanje je implementirano u industrijskom okruženju. U radu je proveden niz istraživanja kako bi se utvrdio stabilni tehnološki proces izrade proizvoda tehnologijom inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF). Parametri koji uvjetuju uspješan SPIF proces tankostjenog materijala su objašnjeni. Prilikom odabira načina obrade proizvoda moguće je proračunati tehnološko ekonomsku analizu izrade u usporedbi sa konvencionalnim postupcima oblikovanja. Prema pregledanoj literaturi još nisu izvedena ispitivanja inkrementalnog oblikovanja na bijelome limu. Jednako tako mjerenje tankostjenog lima sustavom ARGUS također nije pronadeno u literaturi. Kroz provedeno eksperimentalno istraživanje dokazano je, da se tankostjeni lim TS230 i TH415 mogu obrađivati inkrementalnom tehnologijom ako se ispune određeni uvjeti obrade. Ispitana je primjena tehnologije inkrementalnog oblikovanja na tankostjeni lim TS230 debljine 0,155 mm te lim TH415 debljine 0,24 mm. U literaturi su dostupni mnogi materijali međutim tankostjeni lim, te općenito čelik tanji od 0,5 mm nije obrađivan [1 - 21]. Utvrđen je optimalan odnos između vertikalnog pomaka Δz , radijusa alata R_{al} , udaljenosti između prolaza alata S_C , posmaka v_T i brzine rotacije vretena ω koji omogućuje postizanje većeg stupnja deformacije tankostjenog lima.

Kako bi se to dokazalo izvršeni su sljedeći koraci i dobiveni sljedeći rezultati:

- Ispitana su svojstva materijala TS230 i TH415 koja ulaze u proces inkrementalnog oblikovanja. Objašnjen je pojam oblikovljivosti materijala i utjecaj nepravilnosti u kristalnim strukturama.
- Proveden je vlačni test i definirane su krivulje naprezanje-deformacija za odabrane materijale TS230 i TH415. Za materijal TS230 je određen faktor materijala C i eksponent očvršćenja n .

- Za inkrementalno oblikovanje testom krnjeg stošca izradili su se dijagrami sposobnosti oblikovanja za materijal TS230 i TH415. Ispitivanje materijala TS230 dogovoreno u suradnji sa tvrtkom *MGK-pack*, prema pregledanoj literaturi nije pronađeno ispitivanja tog tipa.
- Za ispitivanje sposobnosti inkrementalnog oblikovanja tankostjenog lima TS230 i TH415 odabran je oblik krnjeg stošca koji predstavlja jednu od metoda utvrđivanja sposobnosti oblikovanja u SPIF tehnologiji. SPIF tehnologija prema pregledanoj literaturi još nije primijenjena na bijele limove debljine do 0,24 mm. Izveden je eksperimentalan plan utvrđivanja utjecajnih parametara obrade te je dokazano da je obrada moguća pri specifičnoj kombinaciji parametara. Ustanovljeno je da porast temperature utječe na uspješnu izradu krnjeg stošca u SPIF procesu. Iz tog razloga potrebno je postaviti parametre obrade pri kojima dolazi do zagrijavanja lima. Optimalna temperatura ustanovljena je u rasponu od 35 °C do 50 °C, te ovisi o zadanim parametrima obrade. Pri temperaturama od 70 °C kod TS230 i 180 °C kod TH415 dolazi do pregrijavanja tankostjenog lima. Ispitana je temperatura kod oblikovanja tankostjenih limenki tehnologijom dubokog vučenja u proizvodnim uvjetima te je utvrđeno da je njihova temperatura u zadanim uvjetima 45 °C. Porast temperature je moguć zbog tankog lima od 0,155 mm (TS230) do 0,24 mm (TH415) koja omogućava zagrijavanje do željene temperature.
- Proveden je plan mjerenja kako bi se ustanovila ponovljivost, točnost, stanjivanje lima te stanje deformacije nakon izvršenog inkrementalnog oblikovanja. Mjerenje je provedeno digitalizacijskim sustavom ARGUS. Mjerenja su pokazala da je proces inkrementalnog oblikovanja stabilan i ponovljiv. Ponovljivost obrade dokazana je usporedbom ostvarenih obradaka za materijal TS230 u 3 pokusa i TH415 u 5 pokusa. Konačna dimenzija visine na planiranoj visini od 45 mm iznosila je 44,9 mm te je greška u dimenziji 0,1 mm. Može se reći da je postignuta dobra točnost konačnog proizvoda. Ispitni uzorci su bili stegnuti za vrijeme obrade. Nakon otpuštanja iz stezne naprave došlo je do elastičnog povrata u stegnutom, nedeformiranom dijelu obratka. Taj elastični povrat područja obratka koji nije obrađivan nije utjecao na dimenzije ostalog obrađivanog područja obratka.
- Prema odabranim parametrima stanjivanje lima je iznosilo do 60 %, budući da je stanjivanje lima konstantno duž deformiranog presjeka. Zaključak je da se može utjecati na željenu debljinu stjenke tankostjenog lima varijacijom parametara obrade. Stanjivanje lima je mjereno sustavom ARGUS.

- Izmjerena je maksimalna sposobnost oblikovanja SPIF tehnologijom za TH415 na temelju postizanja maksimalnog kuta krnjeg stošca od 63° bez upotrebe podmazivanja. Za materijal TS230 utvrđen je maksimalni kut od 58° . Kod materijala TH415 izveden je pokus podmazivanja pomoću Biocut maziva koji je rezultirao smanjenjem temperature i izvedbom većeg kritičnog kuta od 63° . Pomoću Biocut maziva uspješno je proizveden kut od 64° , 65° , 66° dok je do loma došlo kod 67° i 68° . Kod materijala TS230 nije postignuta zadovoljavajuća temperatura i pokusi primjene Biocut maziva su bili neuspješni. Budući da je trenje bilo manje došlo je do manje sposobnosti zagrijavanja te je mazivo Biocut imalo negativan utjecaj. Potrebno je ispitati maziva sa većim lokalnim zagrijavanjem. Prema dobivenim kutovima bez upotrebe maziva, 63° za TH415 i 58° za TS230 izvršeno je mjerenje sposobnosti oblikovanja SPIF procesa i izrađeni su dijagrami sposobnosti oblikovanja za materijale TH415 i TS230.
- Područje na dijagramu inkrementalnog oblikovanja za maksimalni kut od 58° zauzelo je raspon od $\varphi_2 = \pm 0,10$ za lim TS230. Ispitana je sposobnost oblikovanja materijala Marciniak testom gdje je TS230 pokazao sposobnost oblikovanja od $\varphi_1 = 0,26$ za $\varphi_2 = - 0,10$ do $\varphi_2 = 0,10$. Pri inkrementalnom oblikovanju lim TS230 za kut 58° i visinu od 25 mm pokazao je sposobnost oblikovanja od $\varphi_1 = 1,079$ u rasponu $\varphi_2 = \pm 0,10$.
- Za TH415 u rasponu od $\varphi_2 = - 0,10$ sposobnost oblikovanja lima iznosi $\varphi_1 = 0,35$, za $\varphi_2 = 0$ iznosi $\varphi_1 = 0,20$, za $\varphi_2 = 0,05 - 0,20$ iznosi $\varphi_1 = 0,15$. Za lim TH415 za maksimalni kut od 63° $\varphi_2 = - 0,10$ do $\varphi_2 = 0,20$ inkrementalnim oblikovanjem postignuta je deformacija $\varphi_1 = 0,917$, visina krnjeg stošca 25 mm. Izradila se prva usporedba inkrementalnog oblikovanja i Marciniak testa za materijal TH415.
- Materijal TH415 je pokazao sposobnost oblikovanja $\varphi_1 = 1,382$, $\varphi_2 = \pm 0,075$. kod nelakiranog lima kut 58° visina 10 mm. Kod lakiranog lima pri jednakim uvjetima obrade sposobnost oblikovanja bila $\varphi_1 = 0,999$, $\varphi_2 = \pm 0,05$. Zaključak je da korišteni lak ukrućuje lim te mu smanjuje sposobnost deformiranja.
- Koeficijenti trenja materijala TS230 i TH415 su određeni eksperimentalno na uređaju TOP 3 Tribometar pod opterećenjem od 10 i 40 N. Iz rezultata se primjećuju razlike između trenja dva lima sa jednakim nanosom kositra. Lim TS230 ima debljinu 0,155 mm dok lim TH415 ima debljinu 0,24 mm iz tog razloga je trenje lima TS230 je u prosjeku za 50 % manje od trenja materijala TH415 pri istom nanosu kositra od $2,8 \text{ g/m}^2$.

- Ispitano je povećanje hrapavosti površine prije i nakon izvršenih pokusa te su rezultati pokazali da se hrapavost za različite materijale pri istim obradnim parametrima poklapaju.
- Ispitana je tvrdoća pri istim uvjetima obrade za lim TS230 i TH415 pri izradi kuta od 57° te je ustanovljeno prosječno povećanje tvrdoće od 9 % za lim TS230 i 13,5 % za lim TH415.

Na temelju analitičkog modela izračunate su kritične sile u procesu potrebne za uspješnu obradu SPIF procesom nekoliko komercijalno dostupnih tankostjenih limova.

Numeričkom simulacijom sile i njenog toka tijekom obrade moguće je ustanoviti uvjete uspješnog SPIF procesa. Izrađen je protokol inkrementalne obrade najprije u računalnoj simulaciji a zatim i u eksperimentu temeljen na spoznajama analitičkog modela. Računalna procedura simulacije metodom konačnih elementa (softver ABAQUS) pokazala je da primijenjeni model daje dovoljnu točnost za potrebe prakse. Računalna metoda simulacije SPIF procesa daje mogućnost određivanja utjecajnih čimbenika na kvalitetu izrade proizvoda. U računalnoj proceduri pokazano je ponašanje sile, vertikalnog pomaka Δz i kutne brzine u x, y i z koordinatnim osima za vrijeme trajanja procesa inkrementalnog oblikovanja.

Mogućnosti programiranja na CNC stroju ispitane su pomoću softvera Solidcam te je programiran potrebni NC program za obradu krnjeg stošca. Postavljen je eksperimentalni plan te su izvršene obrade na stroju za glodanje. Pri tom je za potrebe eksperimenata dizajnirana radna naprava te potrebni alati. Proizvodni proces je uspostavljen sukladno odabranim materijalima te je utvrđen stabilni odabir parametara u procesu obrade. Utvrđeno je da na obradu tankostjenog lima osim kuta i sile deformiranja najveći utjecaj ima temperatura. Temperatura je namjerno izazvana trenjem kako bi se uspješno izveo proces inkrementalnog oblikovanja. Elaborirani su i istraženi parametri procesa obrade pri modeliranju i analizi procesa zajedno s karakteristikama obradnog sustava. Prema određenom planu mjerenja izveden je niz eksperimentalnih ispitivanja, u kojemu je ispitano dovoljno uzoraka da se potvrde optimumi obrade tankostjenog lima za razmatrane slučajeve.

11.2. Buduća istraživanja

Potrebno je detaljno istražiti krivulju naprezanja - deformacije tankostjenih materijala TS230 i TH415 u temperaturnom pojasu od 40 °C do 100 °C. Potrebno je istražiti i mikrostrukturu u temperaturnom području za materijale TS230 i TH415 prilikom inkrementalnog oblikovanja od 35 °C do 70 °C, budući da dolazi do pojave izduženja kristalnih zrna koji omogućavaju veću oblikovljivost materijala s fokusom na temperaturu od 45 do 50 °C. Prema pregledanoj literaturi ispitivani su različiti materijali većinom debljine 1 do 2 milimetara te je u tim

istraživanjima fokus stavljen na silu i njenu vezu sa krivuljom očvršćivanja, a mikrostruktura deformiranih zrna nije dovoljno ispitivana. Iz tog razloga postoji mogućnost dolaska do novih spoznaja. Važno je ispitati i mogućnost zagrijavanja metala strujom te utjecajne čimbenike poput radijusa alata, posmaka, brzine obrade koji povećavaju ili smanjuju generiranu temperaturu i utjecaj na oblikovljivost materijala.

Nakon provedene inkrementalne obrade tankostjenog lima potrebno je ispitati promjenu deformacijskog stanja vlačnim testom. Takav pokus pridonio bi novim spoznajama potrebnim za višefazno inkrementalno oblikovanje. Istraživanje je potrebno proširiti i na ostale tankostjene materijale TH550, TH435, TS275, TS245, TH580 i TH620 kako bi se potvrdili utjecajni čimbenici u njihovom oblikovanju. Svakako je potrebno ispitati i ponašanje ostalih metalnih materijala (čelik, aluminij, bakar) debljine 0,100 do 1 mm kako bi se ustanovilo da li računalna procedura vrijedi i za njih. U tom pogledu potrebno je ispitati kolika su dimenzijska odstupanja i koji su utjecajni faktori koji pridonose odstupanju ili mogućem lomu. Poseban izazov je istražiti krhke materijale sa smanjenom mogućnošću oblikovanja poput TH550 koji ima sposobnost produljenja od 5 % kako bi se potencijalno povećala mogućnost njihove upotrebe. Kako je lokalnim očvršćenjem moguće smanjiti elastično ponašanje materijala potrebno je ustanoviti sustav optimalnog deformiranja a da se ne poremeti točnost postizanja dimenzijskih veličina poput ravnosti, kružnosti itd.. U istraživanju je postignuto mjerenje tankostjenog lima sustavom ARGUS te je pokazalo dobre rezultate u pogledu stanjivanja tankostjenog lima, ponovljivosti mjerenja i izrade dijagrama sposobnosti oblikovanja. U tom pogledu potrebno je nastaviti ispitivanje ATOS sustavom i ostalih metoda poput oblika sfere, krnjeg stošca, hiperbole, piramide kako bi se za pojedini materijal izradio cjelovitiji dijagram sposobnosti oblikovanja. Takav dijagram je kasnije potrebno ispitati na kompleksnom izratku sa naglaskom na konkavne i konveksne površine kako bi se ustanovilo stabilan tehnološki prozor za proces inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki. Kako je mjerenje sustavom ARGUS izvedeno sa 12 slika u laboratoriju i izradom izradaka u više faza, nove spoznaje su moguće primjenom kontinuiranog mjerenja sustavom ATOS. Time je moguće postići mjerenje izrade proizvoda u stvarnom vremenu za vrijeme obrade. Kako je sposobnost oblikovanja utvrđena mogućnošću postizanja kutova, potrebno je ispitati ponašanje tankostjenih limova u tehnologiji inkrementalnog oblikovanja u dvije točke. Inkrementalno oblikovanje u dvije točke postavlja drugačiji sustav naprezanja što može dovesti do veće oblikovljivosti lima. U ovome istraživanju zbog ponovljivosti rezultata nisu testirana maziva osim u nekoliko pokusa, što je pokazalo veću sposobnost oblikovanja deformiranjem. Stoga je potrebno ispitati utjecaj maziva sa pozitivnim utjecajem na lokalno zagrijavanje kako bi se pozitivno utjecalo na sposobnost oblikovanja deformiranjem. Potrebno je ispitati trenje metodom „Pin on Disk“ koja je rotaciona i može dati bolji uvid u

stvarno trenje od metode klizanjem (TOP 3 Tribometar) koja je korištena u ovome istraživanju. Prema strojnom parku moguće je izraditi prilagodljivu radnu napravu koja bi skratila vrijeme obrade i pružila veći raspon izrade različitih proizvoda. „NC program“ generiran je preko softverskih rješenja Solidcam i VeriCUT sa metodom glodanja džepa. Kako to nisu namjenski softveri i ne omogućuju fleksibilnost u obradi potrebno je razviti softversko rješenje unutar CAM softvera posebnu aplikaciju koja bi bila namijenjena isključivo procesu inkrementalnog oblikovanja. Sukladno tome takvu aplikaciju je potrebno spojiti sa softverima koji nude proračun metodom konačnih elemenata, na način da se pojednostavi programiranje putanje kretanja alata. Izvršiti će se istraživanje tehnoekonomske isplativosti inkrementalnog oblikovanja bijeloga lima u industriji i očekuje se značajan doprinos. Tehnologija SPIF procesa omogućuje očvršćivanje i dodatnu deformaciju limova te oblikovanje već ranije deformiranih limova. Rezultati istraživanja primijeniti će se na veću iskoristivost materijala te u svrhu izrade prototipova.

Popis literature

- [1] G. Ingarao, R. Di Lorenzo, F. Micari, Sustainability Issues in Sheet Metal Forming Processes: an Overview; *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, 2011, pp. 337 - 347.
- [2] W. C. Emmens, G. Sebastiani, A. H. van den Boogaard, The Technology of Incremental Sheet Forming - A Brief Review of the History, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, 2010, pp. 981 - 997.
- [3] M. Kršulja, K. Kuzman, M. Plančak, M. Miljenko, Z. Car, Investigation of Single Point Incremental Forming Process Applied on Thin Sheet Metal, *International Conference on Innovative Technologies IN-TECH/ Car, Zlatan; Kudláček, Jan; Pepelnjak, Tomaž; (ur.)*. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, pp. 583 - 586.
- [4] B. Mason, Sheet Metal Forming for Small Batches. Bachelor Thesis, Univ. of Nottingham, 1978.
- [5] L. Lamminen, B. Wadman, R. Küttner, T. Svinning, Prototyping and Low Volume Production of Sheet Metal Component, *Nordic Industrial Found*, 2003.
- [6] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54 (2), 2005, pp. 88-114.
- [7] Z. Cui, L. Gao, Studies on Hole-flanging Process Using Multistage Incremental Forming, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, 2010, 124 - 128.
- [8] M. Bambach, B. TalebAraghi, G. Hirt, Strategies to Improve the Geometric Accuracy in Asymmetric Single Point Incremental Forming, *Production Engineering Research and Development*, vol. 3, 2009, pp. 145 - 156.
- [9] B. T. Araghi, G. L. Manco, M. Bambach, G. Hirt, Investigation Into a New Hybrid Forming Process: Incremental Sheet Forming Combined with Stretch Forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 58 (1), 2009, pp. 225 - 228 .
- [10] M. Pohlak, Küttner, R.; J. Majak, K. Karjust & A. Sutt, Simulation of Incremental Forming of Sheet Metal Products, 4th International DAAAM Conference, 29 - 30th April 2004, Tallinn, Estonia.
- [11] C. Giardini, E. Ceretti, A. Attanasio, Optimization of Sheet Incremental Forming Process by Means of FE Simulations. In: *Proceedings of the ESAFORM 2005, Cluj-Napoca, RO, 2005*.
- [12] L. V. Sy, Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet, PhD thesis, Supervisor: Prof. Paolo F. Bariani, University of Padova 2009.
- [13] A. Petek, The Definition of Stable Technological Window by Incremental Metal Forming, PhD thesis, Supervisor: Prof. Karl Kuzman, University of Ljubljana 2008.

- [14] M. Skjoedt, N. Bay, B. Endelt, G. Ingarao G, Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup. Proceedings of the 11th ESAFORM Conference, vol. 1, 2008, pp. 1199 - 1202.
- [15] G. Ambrogio, L. Filice, F. Micari, A Force Measuring Based Strategy for Failure Prevention in Incremental Forming, J. Mater. Process. Technol., vol. 177, 2006, pp. 413 - 416.
- [16] J. Jeswiet, J. R. Duflou, A. Szekers, Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming, Adv. Mater. Res., vol. 6 (8), 2005, pp. 449 - 456.
- [17] Tinsplate Euronorm EN10202eng, Cold Reduced Tinmill Products - Electrolytic Tinsplate and Electrolytic Chromium/Chromium Oxide Coated Steel, CEN - European Committee for Standardization Brussels 2001.
- [18] M. Math, Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Zagreb: Fakultet strojarstva I brodogradnje, ISBN 953-6313-21-9, 1999, Zagreb..
- [19] E. Morgan, Tinsplate and Modern Canmaking Technology, Pergamon press Ltd, 1985. ISBN 0-08-028681-1.
- [20] Corus group, The Manufacturing Route for Tinsplate Products, www.tatasteelpackaging.com, 2012.
- [21] J. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, De Baerdemaeker, H., Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement, CIRP Ann. Manuf. Technol., vol. 56, 2007, pp. 273 - 276.
- [22] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardinib, L. Mazzonia, Asymmetric Two Points Incremental Forming: Improving Surface Quality and Geometric Accuracy by Tool Path Optimization, J. Mater. Process. Technol., vol. 197, 2008, pp. 59 - 67.
- [23] M. Ham, J. Jeswiet, Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, Canada CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 55 (1), 2006, pp. 241 - 244.
- [24] H. Meier, C. Magnus, V. Smukala, Impact of Superimposed Pressure on Dieless Incremental Sheet Metal Forming With Two Moving Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 60 (2011), pp. 327 - 330.
- [25] Technical documentation, Amino Company, <http://www.aminonac.ca>, 2012.
- [26] University of Cambridge, Institute for Manufacturing, Department of Engineering, SPIF process laboratory, <http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2005/isf/>, 2012.
- [27] Sheet metal forming - Spinning process, <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>, 2012.
- [28] M. Sasso, M. Callegari, D. Amodio, Formatura incrementale: una cella robotizzata integrata per produzione e controllo qualità, XXXV Convegno nazionale AIAS - Ancona, 2006, pp. 13-16.

- [29] H. Meier, J. Zhu, B. Buff, R. Laurischkat, CAx Process Chain for Two Robots Based Incremental Sheet Metal Forming Original Research Article Procedia CIRP, vol. 3, 2012, pp. 37-42.
- [30] G. Palumbo, M. Brandizzi, Experimental Investigations On the Single Point Incremental Forming of a Titanium Alloy Component Combining Static Heating with High Tool Rotation Speed, Materials & Design, vol. 40, 2012, pp. 43-51.
- [31] S. Kobayashi, I. K. Hall, E. G. Thomsen: A Theory of Shear Spinning of Cones, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol. 83, pp. 125-130, 1961
- [32] J. Jeswiet, E. Hagan: A Review of Conventional and Modern Single-Point Sheet Metal Forming Methods, Proc. Instn. Mech. Engrs., part B: J. Eng. Manuf., vol. 217, 2003.
- [33] R. Kopp, J. Schulz: Flexible Sheet Forming Technology by Double-sided Simultaneous Shot Peen Forming, Annals of Cirp, vol. 51/1, 2002.
- [34] T. Wang, M. J. Platts, J. Wu, The Optimisation of Shot Peen Forming Processes, J. Mater. Process. Technol., vol. 206 (1 - 3), 2008, pp. 78-82
- [35] W. C. Emmens, Water Jet Forming of Steel Beverage Cans, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46 (11), 2006, pp. 1243 - 1247.
- [36] B. Jurisevic, K. Kuzman, M. Junkar, Water Jetting Technology: an Alternative in Incremental Sheet Metal Forming, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol 31, 2006, pp.18 - 23.
- [37] A. Petek, B. Jurišević, K. Kuzman, M. Junkar, Comparison of Alternative Approaches of Single Point Incremental Forming Processes, J. Mater. Process. Technol., 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.033.
- [38] B. Jurišević, V. Sajn, M. Junkar, F. Kosel, Experimental and Numerical Study of the Tool in Water Jet Incremental Sheet Metal Forming, Proceedings of the 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME 2006, Alpexpo-Grenoble, 2006.
- [39] H. Iseki, Flexible and Incremental Bulging of Sheet Metal Using High-Speed Waterjet, JMSE International Journal, series C, vol. 44, 2001, 486 - 493.
- [40] B. Q. Shi, J. Liang, Circular Grid Pattern Based Surface Strain Measurement System for Sheet Metal Forming, Optics and Lasers in Engineering, vol. 50, (9), 2012, pp. 1186 - 1195
- [41] Montes Srl., Sheet metal Division, Incremental forming, www.montes.it, 2012.
- [42] Katholieke Universiteit Leuven, SPIF Production Processes - Cranial plate, http://www.mech.kuleuven.be/pp/research/spif_cranial.en.html, 2012.
- [43] P. Groche, M. Turk, Smart Structures Assembly Through Incremental Forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 60, 2011, pp. 21 - 24.
- [44] M. S. Shim, J. J. Park, The Formability of Aluminium Sheet in Incremental Forming, J. Mater. Process. Technol., vol. 113, 2001, pp. 654 - 658.

- [45] T. J. Kim, D. Y. Yang, Improvement of Formability for the Incremental Sheet Metal Forming Process, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 42, 2000, pp. 1271 - 1286.
- [46] Y. H. Kim, J. J. Park, Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130 - 131, 2002, pp. 42 - 46.
- [47] D. Young, J. Jeswiet, Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminum Sheet. *IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture*, vol. 219 part B, 2005, pp. 1 - 6.
- [48] J. J. Park, Y. H. Kim, Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, 2003, pp. 447 - 453.
- [49] G. Buffa & D. Campanella & L. Fratini, On the Improvement of Material Formability in SPIF Operation Through Tool Stirring Action, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* DOI 10.1007/s00170-012-4412-9.
- [50] M. Oldenburg, P. Åkerström, G. Bergman, P. Salomonsson, Microstructure Evolution and Mechanical Response in the Hot Stamping Process, 6th European LS-DYNA. Users' Conference, 2007, pp. 2.135 - 2.144, www.dynalook.com/european-conf-2007.
- [51] M. B. Silva, L. M. Alves, P. A. F. Martins, Single Point Incremental Forming of PVC: Experimental Findings and Theoretical Interpretation, *European Journal of Mechanics/Solids*, vol. 29, 2010, pp. 557 - 566.
- [52] R. Malhotra, A. Bhattacharya, A. Kumar, N. V. Reddy, J. Cao, A New Methodology for Multi-Pass Single Point Incremental Forming With Mixed Toolpaths, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, 2011, pp. 323 - 326.
- [53] G. Ambrogio, L. Filice, Manco, L., Warm Incremental Forming of Magnesium Alloy AZ31. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 57, 2008, pp. 257 - 260.
- [54] G. Fan, F. Sun, X. Meng, L. Gao, G. Tong, Sustainability Issues in Sheet Metal Forming Processesan Overview, 2010. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* doi:10.1007/s00170-009-2472-2.
- [55] G. Hussain, L. Gao, Z. Y. Zhang, Formability Evaluation of a Pure Titanium Sheet in the Cold Incremental Forming Process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, 2008, pp. 920 - 926.
- [56] P. Eyckens, dissertation, Formability in Incremental Sheet Forming: Generalization of the Marciniak-Kuczynski Model, May 2010, Katholieke Universiteit Leuven, België.
- [57] J. M. Allwood, D. Braunb, O. Music, The Effect of Partially Cut-Out Blanks on Geometric Accuracy in Incremental Sheet Forming, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, 2010, pp. 1501 - 1510.
- [58] F. Micari, G. Ambrogio, A Common Shape for Conducting Incremental Forming Tests, 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrucken, 9 June 2004.

- [59] J. M., Allwood, G. P. F King, J. Duflou, A Structured Search for Applications of the Incremental Sheet-Forming Process by Product Segmentation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 219 (2), 2005, pp. 239 - 244.
- [60] F. Micari, G. Ambrogio, L. Filice, Shape and Dimensional Accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the Art and Future Trends, J. Mater. Process. Technol., vol. 191, 2007, pp. 390 - 395.
- [61] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 53 (1), 2004, pp. 203 - 206.
- [62] Tehnički podaci tankostjenih limova, Tvornica čeličnih limova Thyssen Krupp Rasselstein, <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com>, 2012.
- [63] USS steel Srbija, Željezara Smederevo, (<http://www.ussteel.com/>), 2012.
- [64] Mehanička svojstva čelika, www.efunda.com/materials.com, 2012.
- [65] B. Barišić, Analiza pojave Ludersovih traka u procesu izrade proizvoda iz tankostjenog lima, doktorska disertacija, mentor: Prof. Goran Cukor, Rijeka 2005.
- [66] MGK-pack - Pluto - Tinsplate spec 2012, Privatni dokumenti tvrtke MGK-pack - Pluto, Rijeka 2012.
- [67] Europski standard, EN 10 203: 1991 E, Hladnovaljani proizvodi od bjeloga lima - bjeli lim sa prevlakom od kositra, BS EN 10202:200, ISBN 0 580 372049, 2001.
- [68] Metallic Coated Steel - User Manual, Arcelor, PR-UM-MCO-EN-02/2006, Luxembourg, www.fcs.arcelor.com.
- [69] A. Povrzanović, Odabrana poglavlja obrade metala deformiranjem, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, ISBN: 953-6313-01-4, 1996.
- [70] D. Hull and D. J. Bacon, Introduction to Dislocations Fifth Edition, ISBN: 978-0-08-096672-4 2011, Published by Elsevier Ltd, 2011.
- [71] A. F. Liu, Mechanics and Mechanisms of Fracture an Introduction, ASM international, Materials Park, OHIO, ISBN: 0-87170-802-7, 2005.
- [72] J. Lin, D. Balint and M. Pietrzyk, Microstructure Evolution in Metal Forming Processes, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-0-85709-074-4, 2012.
- [73] Y. Lee, J. Pan, R. B. Hataway, M. E. Barkey, Fatigue Testing and Analysis (Theory And Prattice), ISBN 0-7506-7719-8, 2004.
- [74] I. Katavić, Uvod u materijale, Tehnički fakultet Rijeka, Fintrade & tours: Tehnički fakultet Sveučilište u Rijeci, 2008. ISBN 978 - 953-96899-3-1.
- [75] B. Barisic, T. Pepelnjak, M. D. Math, Predicting of the Lüders' Bands in the Processing of TH Material In Computer Environment by Means of Stochastic Modeling, J. Mater. Process. Technol., vol. 203 (1 - 3), 2008, pp 154 - 165.

- [76] F. Gologranc, Preoblikovanje 1 dio, Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1991, ISBN: 86-7217-081-4.
- [77] Z. Marciniak, J. L. Duncan, S. J. Hu, Mechanics of Sheet Metal Forming, ISBN: 07-5065-300-0, 2002, London.
- [78] T. Pepelnjak, K. Kuzman, Numerical Determination of the Forming Limit Diagrams, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 20 (1-2), 2007.
- [79] H. J. Bong, F. Barlat, M. G. Lee, D. C. Ahn, The Forming Limit Diagram of Ferritic Stainless Steel Sheets: Experiments and Modeling, International Journal Mechanical Sciences, vol. 64 (1), 2012, pp. 1 - 10.
- [80] A. P. T. M. J. Lamberts, Effect of EDT on Formability of Aluminum Automotive Sheet, Report number MT05.52, September - December 2005.
- [81] M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon, Materials Engineering Science Processing and Design, ISBN-13: 978-0-7506-8391-3, Elsevier Ltd., 2007.
- [82] Laboratorijski dokumenti za izvedbu Marciniak testa, Univerza v Ljubljani Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za preoblikovanje LAP, <http://lab.fs.uni-lj.si/lap/html/pages/si-index.htm>, 2012.
- [83] T. Pepelnjak, B. Barišić, Analysis And Elimination of the Stretcher Strains On TH415 Tinplate Rings in the Stamping Process, J. Mater. Process. Technol., vol. 186, 2007, pp. 111 - 119.
- [84] R. Malhotra, L. Xue, T. Belytscho, J. Cao, Mechanics of Fracture in Single Incremental Forming, J. Mater. Process. Technol., vol. 212, 2012, pp. 1573 - 1590.
- [85] H. Iseki, An Aproximate Deformation Analysis and FEM Analysis for the Incremental Bulging of Sheet Metal Using a Spherical Roller, J. Mater. Process. Technol., vol. 111, 2001, pp. 150-154.
- [86] G. V. Brummelen, Heavenly Mathematics, The Forgotten Art of Spherical Trigonometry, Princeton University press, ISBN: 978-0-691-14892-2, 2013.
- [87] M. Plančak, D. Vilotić, Tehnologija plastičnog deformisanja, Novi Sad, ISBN: 978-86-7892-054-7, 2007.
- [88] T. Altan, Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications, ASM International, 2004, ISBN: 0871708051.
- [89] C. Lequesne, C. Henrard, C. Bouffioux, J. R. Duflou, A. M. Habraken, Adaptive Remeshing for Incremental Forming Simulation, Proceedings of Numisheet 2008 Conference, Interlaken, Switzerland, pp. 399 - 403.
- [90] C. Giardini, E. Ceretti, A. Attanasio, M. Pasquali, Analysis of the Influence of Working Parameters on Final Part Quality in Sheet Incremental Forming, 3rd Int. Conf. on Dies and Molds 2004, Bursa, Turkey, June 17 - 19, 2004, pp. 191 - 198.

- [91] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. M. C. Minutolo, The Influence on Tool rotation on an Incremental Forming Process, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, 2009, pp. 4621 - 4626.
- [92] Abaqus/CAE User's Manual, Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2010.
- [93] L. Carrino, G. Giuliano and M. Strano, The Effect of the Punch Radius in Dieless Incremental Forming, *IPROMS 2009 Conference*.
- [94] G. Hirt, Tools and Equipment used in Incremental Forming, 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrücken, 9 June 2004.
- [95] Topomatika, Sustavi za mjerenje deformacija, <http://www.3d-deformacije.com/argus-analiza-oblikovanja-limova>, 2012.
- [96] J. Manie and W. P. Kikstra DIANA-FAE, Users Manual - Analysis Procedures, Release 9.4.4, First edition, December 27, 2011, www.support.tnodiana.com.
- [97] Aramis 6.1 - User Manual - Software, GOM mbH - Optical measuring techniques, Germany, 2009.
- [98] HRN EN ISO 6508-1, Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu - 1. Dio: Ispitna metoda (skala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), (ISO 6506-1:2005; EN ISO 6508-1:2005), 2008.
- [99] M. Kršulja, P. Rožkanin, J. Kudláček, L. Pomenić, Z. Car, Investigation of Coatings Friction Coefficient Used in Production of Deep Drawn Packaging Cans, *International Conference on Innovative Technologies IN-TECH*; Car, Zlatan; Kudláček, Jan; Pepelnjak, Tomaž; (ur.). Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, pp. 443 - 446.

Popis oznaka i simbola

Simbol	Naziv
n_{hr}	Broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerene duljine.
n_{okr}	Brzina vrtnje, (o/min).
v	Brzina, (mm/s).
$\dot{\varphi}$	Brzina deformacije, (s^{-1}).
t	Debljina tankostjenog lima, (mm).
D	Deformabilnost.
$\varepsilon, \varepsilon_{max}, \varepsilon_{min}$	Deformacija, (%)
ln	Duljina vrednovanja, (μm).
n	Eksponent očvršćenja.
C	Faktor materijala (MPa).
m	Faktor smičnog trenja.
K	Efektivno naprezanje, (MPa).
σ_p	Granica proporcionalnosti, (MPa).
ρ	Gustoća, (kg/m^3).
r	Koeficijent anizotropije.
μ_d	Koeficijent dinamičkog trenja.
Δr	Koeficijent ravninske anizotropije.
μ_s	Koeficijent statičkog trenja.
α, β	Koeficijent temperaturnog rastezanja, ($10^{-6}/K$).
λ	Koeficijent toplinske vodljivosti, ($W/(m \cdot K)$).
μ	Koeficijent trenja.
r_0, r_{45} i r_{90}	Koeficijenti anizotropije.
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y$	Komponente duljinske deformacije, u x, y i z - osi.
CD	Kontinuirani koeficijent rasprskavanja na otvoru, 0,9.
$\alpha, \alpha_{max}, \phi$	Kut spuštanja alata, maksimalni ostvareni kut, ($^{\circ}$).
ω	Kutna brzina, (rad/s).
$\gamma_{ij}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Kutna deformacija, odnosno njene komponente.
$\mathcal{A}, \beta, \mathcal{C}$	Kutovi sferičnog trokuta, (rad).
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z,$	Logaritamska deformacija.
φ_e	Logaritamski stupanj efektivne deformacije.

φ_{eg}	Logaritamski stupanj granične deformacije.
φ_{vmises}	Logaritamski stupanj efektivne deformacije prema Von Mises uvjetu.
$\varphi_{vtresca}$	Logaritamski stupanj efektivne deformacije prema Tresca uvjetu.
τ_{max}	Maksimalno smično naprezanje, (MPa).
U	Matrica pomaka.
l	Mjerna duljina hrapavosti površine, (μm)
G	Modul smicanja, (MPa).
σ	Naprezanje, (MPa).
k_f	Naprezanje plastičnog tečenja (σ odnosno k_f), (MPa).
σ_{T1}, σ_{T2}	Naprezanje gornje (σ_{T1}) i donje granice tečenja (σ_{T2}), (MPa).
$R_{p0,2}, (\sigma_{0,2})$	Naprezanje pri kojemu ostaju trajne deformacije od 0,2 % ($\varepsilon = 0,002$).
σ_n	Normalno naprezanje, (MPa).
t_f	Nova stanjena debljina lima, (mm).
S_C	Odabrani razmak između horizontalnih prolaza alata, (mm).
t_0	Početna debljina lima, (mm).
ν	Poissonov koeficijent.
Δz	Pomak alata u z - osi, (mm).
v_T	Posmak, (mm/s).
A	Postotak produljenja, (%).
A_{al}	Površina alata, (mm^2).
A_s	Površina smicanja, (mm^2).
P_s	Površinski tlak, (MPa).
d_{max}	Promjer alata u kontaktu sa limom, (mm).
d_{WJ}	Promjer mlaza tekućine, (mm).
$\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3$	Relativno produljenje beskrajno male veličine linijskog elementa.
R_{al}	Radijus glave alata, (mm).
R5	Radijus naprave, (mm).
R_{pl}	Radijus ploče, (mm).
F_z, F_x	Sila, (N).
F_{WJ}	Sila vodenog mlaza, (N).
T_μ	Sila kontaktnog trenja na površini obratka i alata, (N).
γ	Smična (kutna) deformacija.
F_s	Smična sila, (N).

τ_s, τ	Smično naprezanje, (MPa).
τ_k	Smično naprezanje koje se javlja pri kontaktu alata i lima, (MPa).
c	Specifični toplinski kapacitet, (J/(kg·K)).
Rz	Srednje visina neravnina, (μm).
Ra	Srednje aritmetičko odstupanje profila, (μm).
m	Srednja referentna crta profila neravnine.
r_s	Srednja vrijednost koeficijenta normalne plastične anizotropije.
a, b, c	Strane sferičnog trokuta, (mm).
k	Širina lima u zahvatu alata, (mm).
T_σ	Tenzor naprezanja.
ε_{ij}	Tenzor deformacije.
T	Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$).
T_t	Temperatura taljenja, (K).
p_w	Tlak tekućine, (MPa).
HRC	Tvrdoća po Rockwellu.
HB	Tvrdoća, (Brinell 3000 kg).
l_1^i	Udaljenost središta alata od centra oblikovanog predmeta, (mm).
h_{so}	Udaljenost vodenog mlaza, (mm).
L	Ukupna duljina od ruba naprave do centra oblikovanja, (mm).
h^i	Ukupna prijeđena visina, (mm).
A_t	Ukupno produljenje pri točki loma epruvete, (%)
A_{80}, A_{40}	Veličina ispitivane epruvete u vlačnome testu, (mm).
$y(x), y_i$	Visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu, (μm).
R_m	Vlačna čvrstoća, R_m (MPa).
Z_1 do Z_5	Visine profila hrapavosti prema podjeli ispitivane duljine profila l na jednolike duljine vrednovanja l_n , (μm).
E	Youngov modul elastičnosti, (GPa).

Popis slika

Slika 1.1	Alat stegnut na glodalici lijevo, CAD model obrađenih slojeva iz softvera SolidCAM - desno [3].....	1
Slika 2.1	Shema inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca u jednoj točki, poprečni presjek - lijevo, spiralna putanja vertikalnog pomaka Δz i S_C - desno [23]	7
Slika 2.2	Inkrementalno oblikovanje s neodređenim potpornim alatom [22].....	8
Slika 2.3	Inkrementalno oblikovanje sa specijalnim oblikom potpornog alata [22].....	8
Slika 2.4	Inkrementalno oblikovanje u dvije točke s dva identična alata u međusobnom djelovanju [22]	8
Slika 2.5	Shema opisivanje konture uzorak broj 23, $\Delta z = 0,7$, $S_C = 0,25$ mm.....	9
Slika 2.6	Radna naprava postavljena na glodalicu Bridgeport VMC 800, jedan od strojeva korišten u istraživanju	9
slika 2.7	Upotreba robota u SPIF procesu [28]	10
Slika 2.8	Prikaz rotacijskog oblikovanja [27]	11
Slika 2.9	Prikaz usporedbe konvencionalnog i smičnog rotacijskog oblikovanja [27]	11
Slika 2.10	Tehnologija oblikovanja mlazom čeličnih kuglica [34, 35]	12
Slika 2.11	Inkrementalno oblikovanje vodenim mlazom [36].....	13
Slika 2.12	Proizvodi za provođenje plinova, sudoperi, [41]	14
Slika 2.13	Primjena u medicini, metalne ploče za oštećene kosti lubanje [42]	14
Slika 2.14	Primjena u automobilskoj industriji, deformiran prednji poklopac motora automobila [25]	15
Slika 2.15	Dijagram sposobnosti oblikovanja Marciniak test i krnji stožac SPIF proces, φ_1 i φ_2 logaritamske deformacije [6].....	15
Slika 2.16	Vrste ispitnih uzoraka upotrebljivanih za izradu dijagrama sposobnosti oblikovanja u SPIF procesu [6].....	16
Slika 2.17	Promjena kuta u ispitivanju krnjeg stošca: a) putanja za postizanje kuta od 30° , b) putanja za postizanje kuta od 45° i c) putanja za postizanje kuta od 70°	16
Slika 2.18	Dijagram sposobnosti inkrementalnog oblikovanja - materijal AA 3003-0, debljina 1,21 mm, bojama su označeni različiti ispitni uzorci [6, 47, 48]	16
Slika 2.19	Interakcija parametara u procesu plastičnog oblikovanja [50]	17
Slika 2.20	Temperatura krnjeg stošca mjerena termoparima T1 i T2 za materijal AA6082 - T6, kut $52,5^\circ$ [49].....	18
Slika 2.21	Valovitost konačne površine formirane SPIF procesom.....	20
Slika 2.22	Površinski izgled ispitivanog materijala TH415: a) udaljenost između horizontalnog prolaza alata $S_C = 0,25$, vertikalni pomak alata u z - osi $\Delta z = 0,25$ mm, b) $S_C = 1$ mm, $\Delta z = 1$ mm.....	20
Slika 2.23	Tri trenda promjene tangencijalne sile, 1 - sila je konstantna, 2 - došlo je do pretjeranog stanjivanja u početnoj fazi obrade, 3 - debljina se smanjuje do pucanja [15].....	21
Slika 2.24	Promjena veličine sile pri izradi kuta krnjeg stošca.....	21
Slika 2.25	Odstupanje konačne geometrije od zadanog oblika [59].....	23
Slika 3.1	Slijed postupaka u proizvodnji ambalažnog lima nakon toplog valjanja [20].....	26
Slika 3.2	Usmjeravanje zrna toplom deformacijom, nakon rekristalizacije zrna u slučaju sekundarne rekristalizacije (vidi sliku) prestaju biti usmjerena [19]	27
Slika 3.3	Poboljšavanje svojstava metalnog lima žarenjem [19].....	27
Slika 3.4	Vrijeme trajanja kontinuiranog žarenja (CA) [19].....	28
Slika 3.5	Struktura presjeka bijelog lima s debljinama nanosa [65, 68].....	31
Slika 3.6	Tankostjeni materijali, odnos produljenja i vlačne čvrstoće [66]	33
Slika 4.1	Oblikovljivost metala spram porasta temperature [69].....	36
Slika 4.2	Promjena sposobnosti oblikovanja u dvije faze [69]	37

Slika 4.3	Točkaste nesavršenosti u kristalnoj rešetki.....	38
Slika 4.4	Klizanje pod djelovanjem vlačne sile [71].....	38
Slika 4.5	Najčešće kubične rešetke kod metala: prostorno centrirana kubična rešetka (BCC) - lijevo i plošno centrirana kubična rešetka (FCC) - desno [71, 75].....	39
Slika 4.6	Kristalizacija bijelog lima [74]	39
Slika 4.7	Pojava Lüdersovih traka pri izvedbi Marciniak testa, lim TH415.....	40
Slika 4.8	Pojava Lüdersovih traka pri izvedbi vlačnog testa, lim TH415.....	40
Slika 4.9	Dijagram $\sigma - \varepsilon$, područje u kojem su moguće pojave Lüdersovih linija (traka) [65, 77]	41
Slika 4.10	Keeler - Goodwinov dijagram sposobnosti oblikovanja metala [69, 79]	43
Slika 5.1	Dijagram naprezanje - deformacija, ($\sigma - \varepsilon$)	44
Slika 5.2	Stanje jednoosnog naprezanja, najveće naprezanje je $\tau = \sigma/2$ u ravnini od 45° u odnosu na os djelovanja sile [89].....	46
Slika 5.3	Vlačni test, ispitane epruvete, kut 0° , 45° i 90° - materijal TS230.....	47
Slika 5.4	Vlačni test, ispitane epruvete, kut 0° , 45° i 90° - materijal TH415	47
Slika 5.5	Vlačni test, ispitane epruveta dimenzija 150 x 30 mm, materijal TS230	47
Slika 5.6	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{80}	48
Slika 5.7	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{40}	48
Slika 5.8	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{80}	49
Slika 5.9	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TH415, kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{40}	49
Slika 5.10	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TS230, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{80}	50
Slika 5.11	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TS230, kut 0° , 45° , 90° , žarene epruvete A_{40}	50
Slika 5.12	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ materijal TS230 za kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{80}	51
Slika 5.13	Dijagram $\sigma - \varepsilon$ - materijal TS230 za kut 0° , 45° , 90° , nežarene epruvete A_{40}	51
Slika 5.14	Dijagram $\sigma - \varphi$ - materijal TH415 žarene epruvete A_{40} i A_{80} , srednje vrijednosti raspona deformacije φ za ispitane kutove epruveta 0° , 45° i 90°	52
Slika 5.15	Shema alata u Marciniak testiranjima.....	53
Slika 5.16	Marciniak ispitivanje - koncentracija naprezanja [79].....	53
Slika 5.17	Pripremljeni uzorci limova TS230 i TH415 za ispitivanje prema Marciniaku.....	54
Slika 5.18	Pripremljene podložne ploče, materijal DC01 debljine 1 mm.....	54
Slika 5.19	Promjena širina ispitivanih uzoraka potrebna za izradu krivulje sposobnosti oblikovanja.....	55
Slika 5.20	Stroj HUU 2-250-400 sa postavljenom monokromatskom kamerom objektiv Navitar (1024 x 768 $\frac{1}{2}$ CCD), snimala se postavljena mreža kružnica [82].....	55
Slika 5.21	Lomljenje limova, kod TH415 došlo je do pojave Lüdersovih traka	56
Slika 5.22	Specijalna izvedba epruvete od 40 mm i od 70 mm	56
Slika 5.23	Primjer epruvete sa 30 mm te izgled deformirane podložne ploče.....	56
Slika 5.24	Odabir točaka za analizu dijagrama za sposobnost oblikovanja: a) odabir točaka, b) ispitivanje opsega (konture) [83].....	57
Slika 5.25	Ekperimentalni rezultati ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TH415	57
Slika 5.26	Krivulja sposobnosti oblikovanja za materijal TH415	58
Slika 5.27	Ekperimentalni rezultati ispitivanja sposobnosti oblikovanja za materijal TS230	59
Slika 5.28	Krivulja sposobnosti oblikovanja za materijal TS230	60
Slika 5.29	Usporedba krivulja sposobnosti oblikovanja ispitivanih limova TS230 i TH415	60
Slika 6.1	Deformirani i nedeformirani dijelovi lima prilikom oblikovanja [13]	61
Slika 6.2	Usporedba istezanja metala kod dubokog vučenja (a, b, c) i inkrementalnog oblikovanja d [84]	62
Slika 6.3	Konvencionalni i stvarni dijagram naprezanje - deformacija, $\sigma - \varepsilon$	62
Slika 6.4	Shematski prikaz 2D inkrementalnog oblikovanja [13, 84]	63

Slika 6.5	Shematski prikaz promjene duljine sukladno izrazu (6.1).....	64
Slika 6.6	Putanja alata a) od ruba prema centru i b) od centra prema rubu [6].....	64
Slika 6.7	Obrada izratka (rupa u centru) - lijevo, višefazno oblikovanje - desno [3, 7].....	65
Slika 6.8	Određivanje kontaktne površine alata u obradi [13].....	66
Slika 6.9	Kontaktno područje - sferni trokut s pravim kutom [13, 86].....	67
Slika 6.10	Uvjeti stanja ravnoteže [13].....	68
Slika 6.11	Naprezanje u točki oblikovanja [13].....	68
Slika 6.12	Mehanizam trenja u procesu inkrementalnog oblikovanja [90].....	69
Slika 6.13	Shema izračuna trenja kotrljanja [6].....	70
Slika 7.1	MKE model SPIF procesa u softveru ABAQUS.....	73
Slika 7.2	Odabir točaka integracije, te slojeva prema debljini ispitivanog materijala.....	73
Slika 7.3	Prikaz izrade putanje gibanja alata u simulaciji.....	74
Slika 7.4	Von Mises stanje naprezanje lim TH415, simulacija krnjeg stošca visina 10 mm ..	74
Slika 7.5	Pomaci alata u koordinatnom sustavu tijekom procesa obrade u U1 (x - os), U2 (y - os) i U3 (z - os) - osi za materijal TH415, kut 58°	75
Slika 7.6	Djelovanje sile u x, y i z - osi.....	75
Slika 7.7	Von Mises stanje naprezanje lim TS230, simulacija krnjeg stošca visina 10 mm	75
Slika 7.8	Pomaci alata u koordinatnom sustavu tijekom procesa obrade u U1 (x - os), U2 (y - os) i U3 (z - os) -osi za materijal TS230, kut 58°	76
Slika 7.9	Djelovanje sile u x, y i z - osi.....	76
Slika 7.10	Usporedba sila u y - osi (RF2) za ispitivani lim TS230 i TH415, kut 58°.....	77
Slika 8.1	Stroj WEMAS VZ 750.....	78
Slika 8.2	Dizajn klasične radne naprave za SPIF proces u programu <i>SolidWorks</i>	79
Slika 8.3	Dizajn naprave u programu <i>SolidWorks</i>	79
Slika 8.4	Konačna izvedba radne naprave i prstena za stezanje	80
Slika 8.5	Prikaz radne naprave stegnute u škripce	80
Slika 8.6	Alat nakon izvršene SPIF obrade.....	81
Slika 8.7	Standardni nosač alata CAT 40, stegnut alat promjera Ø6 mm.....	81
Slika 8.8	Karbidni alati Ø4 mm, Ø6 mm (tri alata), Ø8 mm (dva alata), Ø12 mm, Ø16 mm [13, 18].....	81
Slika 8.9	Prikaz različitih izvedbi alata koji se koriste u SPIF procesu oblikovanja, [6, 12, 59, 61]	82
Slika 8.10	Dizajn krnjeg stošca korištenog u provedenom ispitivanju SPIF procesa.....	83
Slika 8.11	Ispitni uzorak u procesu obrade, lim TH415.....	83
Slika 8.12	Prikaz izratka - lim TH415 X4 kut od 60°	84
Slika 8.13	Prikaz izratka kut 63°, lim TH415	85
Slika 8.14	Prikaz izratka TH415 (uzorak x1) izvučenog sa konstantnom brzinom i bez podmazivanja, pregrijavanje lima na visini od 35 mm gdje se temperatura kreće iznad 180 °C, kut od 57°	85
Slika 8.15	Uzorak TS230 - 6, kut 55° visina 40 mm	86
Slika 8.16	Uzorak TS230 - 7, kut 60° visina 7 mm	86
Slika 8.17	Temperaturna sonda - termopar tip „K“ korišten za ispitivanje temperature	87
Slika 8.18	Varijacija temperatura u procesu obrade ispitivanih uzoraka.....	88
Slika 8.19	Raspodjela temperature za TH415, kutovi 65° i 66°	88
Slika 8.20	Raspodjela temperature za TS230, kutovi 45°, 50°, 60° i 57°.....	88
Slika 8.21	Ispitni uzorci dimenzija 100 x 100 mm, TH415 lakiran a), TS230 lakiran b), TH415 nelakiran c), TS230 nelakiran d)	89
Slika 8.22	Prikaz 4 ispitivana stadija obrade za materijal TH415, 10 mm, 15 mm, 25 mm i 35 mm kut 63°.....	90
Slika 8.23	Prikaz 2 ispitivana stadija obrade za materijal TH415 , 25 mm i 35 mm, kut 63°, alat Ø6 mm, Δz =0,6 mm	90

Slika 8.24	Prikaz 2 ispitivana stadija obrade, materijal THS230, 25 mm i 35 mm, kut 58°, alat Ø6 mm, $\Delta z = 0,6$ mm	90
Slika 9.1	Dijagram sposobnosti oblikovanja - materijal TH415, kut 58° [95]	91
Slika 9.2	Različite metode postavljanja kružnica, [40]	92
Slika 9.3	Deformacija se očituje ovisno o djelovanju naprezanja, a) početni raspored kružnica (promjer 1 mm udaljenost 2 mm), b) jednoosno stanje naprezanja, c) dvoosno stanje naprezanja, d) shema deformiranja kružnica	92
Slika 9.4	Odabrana mreža točkica za mjerenje sustavom ARGUS	93
Slika 9.5	Postavljanje kodiranih točaka	93
Slika 9.6	Rezultati mjerenja TH415 za kut od 58° i visinu 45 mm	94
Slika 9.7	Usporedba poprečnog presjeka uzoraka TS230 za 10, 15 i 25 mm	95
Slika 9.8	Postignuta visina krnjeg stošca	95
Slika 9.9	Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca od 10 mm za materijal TS230	97
Slika 9.10	Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca 15 mm za materijal TS230	97
Slika 9.11	Raspodjela deformacija prema Von Misesu za visinu krnjeg stošca 25 mm za materijal TS230	98
Slika 9.12	Pomak promatrane točke Z u različitim stadijima obrade	98
Slika 9.13	Dijagram sposobnosti oblikovanja za materijal TS230, kut od 58°, visina 25 mm	99
Slika 9.14	Prikaz stanjivanja tankostjenog lima TS230	99
Slika 9.15	Prikazane su razlike u stanjivanju lima ispitivanog uzorka, materijal TS230, kut 58°, visina 25 mm	100
Slika 9.16	Uzorak krnjeg stošca TH415 sa kutom 63°, visina 25 mm, mjeren sustavom ARGUS	101
Slika 9.17	Raspodjela deformacija φ_I za krnji stožac TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm	101
Slika 9.18	Raspodjela deformacija prema Tresca kriteriju za krnji stožac TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm	101
Slika 9.19	Postotak stanjivanja lima uzorka TH415 početne debljine 0,24 mm kut uzorka 63° te visina 25 mm	102
Slika 9.20	Dijagram sposobnosti oblikovanja za TH415 kut uzorka 63° te visina 25 mm ..	102
Slika 9.21	Odabrano je ispitivanje u 5 stadija od 10 - 45 mm sa kutom od 58° materijal TH415	103
Slika 9.22	Stanjivanje lima u stadiju obrade 5 (45 mm) sa kutom od 58°, materijal TH415	104
Slika 9.23	Usporedba stanja deformacija prema Von Misesu	104
Slika 9.24	Prikaz mjerenja visine stošca od 45 mm, kut 58°, lim TH415, izmjereno 44,9 mm	105
Slika 9.25	Preklapanje 5 različitih uzorka krnjeg stošca visine od 10 do 45 mm za materijal TH415, kut od 58°	105
Slika 9.26	Odabrane točke na obodu nedeformiranog lima, promatra se njihovo ponašanje tijekom obrade	106
Slika 9.27	Krnji stožac materijal TH415, kut od 58° prvi stadij obrade, visina od 10 mm.	106
Slika 9.28	Krnji stožac materijal TH415, kut od 58° drugi stadij obrade, visina od 15 mm	106
Slika 9.29	Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, treći stadij obrade, visina od 25 mm	106
Slika 9.30	Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, četvrti stadij obrade, visina od 35 mm	107
Slika 9.31	Krnji stožac materijal TH415, kut od 58°, peti stadij obrade, visina od 45 mm.	107
Slika 9.32	Stanjivanje lima u 3 promatrane točke, visine 10, 15, 25, 35 i 45 mm, kut 58°, materijal TH415 lakiran	107

Slika 9.33	Uzorak TH415 visina od 33 mm, kut od 63°, digitalizacija pukotine	108
Slika 9.34	Stanje deformacija prema Von Misesu TH415 visina od 33 mm, kut od 63°, digitalizacija pukotine	108
Slika 9.35	Dijagram sposobnosti oblikovanja za puknuti materijal visine od 33 mm, kut od 63°	109
Slika 9.36	Sposobnost oblikovanja za nelakirani materijal TH415, visina 10 mm, kut 58°	109
Slika 9.37	Sposobnost oblikovanja za lakirani materijal TH415, visina 10 mm, kut 58° ...	110
Slika 10.1	Uzorak X2 TS230 kut 57° mjerenje tvrdoće.....	113
Slika 10.2	Uzorak X1 TH415 kut 57° mjerenje tvrdoće.....	113
Slika 10.3	Uzorci opterećeni silom od 10 - 40 N u Tribometru TOP 3	114
Slika 10.4	Epruvete za testiranje trenja, podložna ploča i alatna epruveta	115
Slika 10.5	Testirani uzorci TH415	115
Slika 10.6	Testirani uzorci TS230.....	115
Slika 10.7	Prikaz ponašanja materijala TS230 test "TS230a" pri opterećenju od 10 N.....	117
Slika 10.8	Prikaz ponašanja materijala TS230 test "TS230e" pri opterećenju od 40 N.....	117
Slika 10.9	Prikaz ponašanja materijala TH415 test "TH415a" pri opterećenju od 10 N.....	117
Slika 10.10	Prikaz ponašanja materijala TH415 test "TH415d" pri opterećenju od 40 N.....	118
Slika 10.11	Testirani uzorci [99]	119
Slika 10.12	Uzorak G2 za materijal sa prevlakom Gold lacquer TH 550 E2,8/2,8 FS 0,155 mm [99].....	119
Slika 10.13	Rezultat ispitivanja trenja Gold lacquer [99].....	120
Slika 10.14	Popuštanje materijala pri hladnoj obradi na 10 mm visine.....	120
Slika 10.15	Popuštanje materijala pri hladnoj obradi na 15 mm visine, spiralna putanja, metoda deformiranja cjelokupne ravnine prije spuštanja na novu ravninu	120
Slika 10.16	Popuštanje materijala kut 59° pri optimalnim parametrima 10 mm visine	121
Slika 10.17	Pukotina nastala zbog nepravilnosti u strukturi materijala.....	121
Slika 10.18	Pukotina materijala TH415 nastala pri visini od 33 mm	121
Slika 10.19	Ispitani uzorci X3 TH415 i X5 TS230 i prikaz površine.....	122
Slika 10.20	Korišten je uređaj za mjerenje hrapavosti TR-100 "Surface roughness tester" sa pripadajućim etalonom.....	122
Slika 10.21	Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a lijevo, duljina vrednovanja l_n i računanje parametra Z_1 do Z_5 za izračun R_z desno	122
Slika 10.22	Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a za materijal TH415 i TS230 prije i nakon obrade	124
Slika 10.23	Srednje vrijednosti neravnina R_z za materijal TH415 i TS230 prije i nakon obrade.....	124
Slika 10.24	Mogućnost utjecaja sile prema (6.12) u ovisnosti o vertikalnom pomaku alata Δz i radijusu alata R_{al} korištenih u istraživanju materijala TH415 i TS230, pri kutu od 50°	124
Slika 10.25	Raspon sile za različiti odabir $\Delta z = 0,5 - 0,7$ mm, kut od 50°, $R_{al} = 2 - 8$ mm za materijal TS230 i TH415 50°	125
Slika 10.26	Promjena debljine lima ovisno o sili deformiranja za $R_{al} = 2 - 8$ mm, $\Delta z = 0,6$ mm za materijal TS230 i TH415, kut 58° kritičan za materijal TS230 i kut 63° za materijal TH415.....	125
Slika 10.27	Utjecaj promjene kuta na silu deformiranja, $R_{al} = 2 - 8$ mm, materijal TS230 i TH415, $\Delta z = 0,6$ mm.....	126
Slika 10.28	Utjecaj promjene kuta na silu deformiranja za $R_{al} = 2 - 8$ mm, $\Delta z = 0,6$ mm, kritični kutovi 58° (TS230) i 63° (TH415)	126
Slika 10.29	Raspon sila za $\Delta z = 0,6$ mm, kut od 50°, $R_{al} = 2 - 8$ mm za materijale prema tablici 6.1 TS230 i TH415.....	127

Popis tablica

Tablica 2.1 Prikaz istraživanih materijala drugih autora.....	19
Tablica 3.1 Mehanička svojstva čelika, [64].....	29
Tablica 3.2 Mehanička svojstva ambalažnih limova prema EN 10202:2001 [17, 67]	30
Tablica 3.3 Usporedba materijalnih karakteristika tankostjenih limova prema [65, 67], TS230 još nije bio ispitivan	30
Tablica 3.4 Završna obrada površine prema europskom standardu EN 10 203: 1991 E [67]	31
Tablica 3.5 Kemijski sastav čelične osnove bijelog lima prema [17, 67].....	32
Tablica 5.1 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90°, materijal TH415 žaren, veličine epruveta A ₈₀ i A ₄₀	48
Tablica 5.2 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90, materijal TH415 nežaren, veličine epruveta A ₈₀ i A ₄₀	48
Tablica 5.3 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90, materijal TS230 žareno, veličine epruveta A ₈₀ i A ₄₀	49
Tablica 5.4 Rezultati ukupnog faktora materijala C i eksponenta očvršćenja n za materijal TS230, žaren.....	49
Tablica 5.5 Vlačni test, srednje vrijednosti 5 provedenih ispitivanja za kut 0°, 45° i 90, materijal TS230, nežaren, veličine epruveta A ₈₀ i A ₄₀	50
Tablica 5.6 Ukupni faktor materijala C i eksponent očvršćenja n za materijal TS230, nežaren ..	50
Tablica 5.7 Rezultati srednje vrijednosti faktora materijala C i eksponenta očvršćenja n za ispitivani lim TS230 prema dobivenim rezultatima tablice 5.4	51
Tablica 5.8 Rezultati ispitivanih epruveta za Marciniak test, materijal TH415.....	58
Tablica 5.9 Rezultati ispitivanih epruveta za Marciniak test, materijal TS230	59
Tablica 8.1 Karakteristike stroja WEMAS VZ 750	78
Tablica 8.2 Ispitivanje sposobnosti oblikovanja za lim TH415, ispitani kutovi od 57°, 60°, 63° i 64°	84
Tablica 8.3 Pokus s podmazivanjem Biocut lim TH415, ispitani kutovi 65°, 66° i 67°	84
Tablica 8.4 Ispitivanje sposobnosti oblikovanja za lim TS230 kutove od 45°, 50°, 55°, 60°, 57° i 58°	86
Tablica 8.5 Niz konačnih uzoraka potrebnih za provjeru i analizu rezultata sustavom ARGUS ..	89
Tablica 9.1 Konfiguracija sustava za mjerenje ARGUS.....	93
Tablica 10.1 Usporedba označavanja bijelog lima prema mehaničkim svojstvima	111
Tablica 10.2 Testiranje tvrdoće nedeformiranog lima TS230 prema, [98]	112
Tablica 10.3 Testiranje tvrdoće nedeformiranog lima TH415 prema, [98]	112
Tablica 10.4 Rezultati mjerenja tvrdoće deformiranog uzorka materijal X1 TS230	113
Tablica 10.5 Rezultati mjerenja tvrdoće deformiranog uzorka materijal X2 TH415	113
Tablica 10.6 Uvjeti ispitivanja Tribometrom za lim TS230 i TH415	116
Tablica 10.7 Rezultati za postavljene uvjete opterećenja, za limove TS230 i TH415.....	116
Tablica 10.8 Aritmetička sredina rezultata ispitanih uzoraka koeficijenta trenja kositra, TS230 i TH415.....	116
Tablica 10.9 Rezultati mjerenja hrapavosti obrade materijala TH415 i TS230.....	123
Tablica 10.10 Promjena sile nakon što je uspostavljeno konstantno stanjivanje lima prema jednadžbi 6.2, t _o početna debljina i t _f konačna debljina pri kritičnom kutu 58° za materijal TS230 (t _o = 0,155 mm; t _f = 0,085 mm) i 63° za materijal TH415 (t _o = 0,24 mm; t _f = 0,144 mm)	126
Tablica 10.11 Sile pri kritičnom kutu 58° za materijal TS230, 63° za materijal TH415, 66° za materijal TH415 sa podmazivanjem.....	127

Životopis

Kandidat Marko Kršulja rođen je 31.12.1979. godine u Puli, Republika Hrvatska. Osmogodišnju školu završio je u Potpićnu (općina Kršan, Istarska županija) 1994. godine. Srednjoškolsko obrazovanje završio je u Labinu, "Mate Blažina", smjer opća gimnazija 1998. godine. Diplomirao je na Sveučilišnom studiju strojarstva na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na Proizvodnom zavodu s ocjenom izvrstan u rujnu 2006. godine s diplomskim radom pod naslovom "Optimizacija stezne radne naprave za glodanje uporabom genetskog algoritma", pod vodstvom mentora red. prof. dr. sc. Zlatana Cara, dipl. ing.

Marko Kršulja, diplomirani inženjer strojarstva, sklopio je ugovor o radu u Prosincu 2006. godine u svojstvu znanstvenog novaka na projektu: (projekt 0069023) "Bionički montažni sustavi" (glavni nositelj: red. prof. dr. sc. Branko Katalinić, dipl. ing.), tijekom 2007 prebačen na projekt "Numeričko modeliranje, simulacija i optimizacija u oblikovanju lima" (projekt 069-1201787-1754) (voditelj projekta: izv. prof. dr. sc. Branimir Barišić, dipl. ing. do 2011 godine te kasnije red. prof. dr. sc. Zlatana Cara, dipl. ing.).

U svojstvu asistenta Marko Kršulja sudjelovao je u izvođenju laboratorijskih i auditornih vježbi za kolegije Mjerna tehnika i kontrola kvalitete, Mjerenje u proizvodnji, Računalom podržana mjerenja, Tehnologija oblikovanja, Računalna simulacija proizvodnih procesa, Tehnologija obrade II, Automatizacija, Umjetna inteligencija, Umjetna inteligencija u robotici i Fleksibilni inteligentni sustavi na Tehničkom fakultetu u Rijeci.

Radi potrebe znanstvenog usavršavanja Marko Kršulja je boravio na nekoliko sveučilišta: University of Novi Sad Serbia, University of Prague Czech Republic, University of Zlin Czech Republic, University of Ostrava Czech Republic, University of Ljubljana Slovenia, University of Miskolc Hungary.

Aktivno je sudjelovao u organizaciji međunarodne konferencije International Conference on Innovative Technologies IN-TECH u Pragu 2010, Bratislavi 2011. i Rijeka 2012. godine gdje je i prezentirao rezultate svojih istraživanja. Sudjelovao na konferenciji CADAM 2008 godine održanoj na Krku, grad Krk. Sudjelovao na konferenciji ITC 2011 održanoj u Zlinu, Češka Republika.

Izabran u Studentskom Zboru kao zamjenik predstavnika svih studenata poslijediplomskog znanstvenog studija Sveučilišta u Rijeci za akademsku godinu 2010/2012. Izabran u vijeće Tehničkog fakulteta Rijeka kao predstavnik studenata poslijediplomskog znanstvenog studija za akademsku godinu 2010/2012 te 2012/2014. Publicirao više radova iz tehnologije oblikovanja metala deformiranjem, mjerne tehnike i automatizacije. Služi se engleskim i talijanskim jezikom u govoru i pismu.

Podaci o autoru i doktorskoj disertaciji

1. AUTOR

Ime i prezime: Marko Kršulja
Datum i mjesto rođenja: 31.12.1979., Pula
Naziv fakulteta, studija i godina završetka dodiplomskog studija: Tehnički fakultet Rijeka, Strojtarstvo, 2006.
Naziv fakulteta, smjera i godina završetka poslijediplomskog studija: Tehnički fakultet Rijeka, Proizvodno strojtarstvo, 2013.
Sadašnje zaposlenje: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

2. DOKTORSKA DISERTACIJA

Naslov: Unaprjeđenje procesa inkrementalnog preoblikovanja u jednoj točki
Broj stranica, slika, tablica i bibliografskih podataka: 150, 184, 32, 99
Znanstveno polje i grana: Strojtarstvo, Opće strojtarstvo
Fakultet na kojem je rad obranjen: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

3. OBRANA I OCJENA

Datum prijave teme: 14.07.2008.
Datum predaje rada: 15.04.2013
Datum prihvaćanja ocjene rada: 19.7.2013

Sastav povjerenstva za ocjenu:

1. Red. prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik
2. Red. prof. dr. sc. Josip Brnić, dipl. ing., član
3. Doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, - Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
4. Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., mentor, član
5. Red. prof. dr. sc. Miroslav Plančak, dipl. ing., član.

Datum obrane: 2. rujan 2013

Sastav povjerenstva za obranu:

1. Red. prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik (FSB, Zagreb)
2. Red. prof. dr. sc. Branko Grizelj, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
3. Red. prof. dr. sc. Pero Raos, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
4. Izv. prof. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, sumentor (Fakulteta za strojništvo Univerza v Ljubljani, Slovenija)
5. Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., član, sumentor

Datum promocije:

Oznaka: DD Tek. broj: UDK: 539.388.2:621.914.3:53.083:519.6:539.421(043)

UNAPRJEĐENJE PROCESA INKREMENTALNOG PREOBLIKOVANJA U JEDNOJ TOČKI

Marko Kršulja

Sveučilište u Rijeci
Tehnički fakultet
Hrvatska

Ključne riječi:

inkrementalno oblikovanje metala
deformiranje
CNC stroj
kontrola procesa
mjerenje
3D fotogrametrija

Sažetak:

U ovome je radu proveden niz istraživanja kako bi se utvrdio stabilni tehnološki proces izrade tankostjenih proizvoda tehnologijom inkrementalnog oblikovanja u jednoj točki (SPIF - single point incremental forming). Pretpostavljeno je da je moguće primijeniti tehnologiju inkrementalnog oblikovanja na tankostjeni lim. Istraživanja su provedena na čeličnome limu TS230 (broj čelika prema EN 10027-2 je W. nr. 1.0371) debljine 0,155 mm i na limu TH415 (broj čelika prema EN 10027-2 je W. nr. 1.0377) debljine 0,24 mm s ciljem utvrđivanja optimalnih parametara u njihovoj obradi SPIF tehnologijom. Provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava s ciljem utvrđivanja pouzdanosti ulaznih parametara kako bi se jasno definirala točnost izrade tražene geometrije krnjeg stošca pomoću SPIF procesa. Proveden je vlačni test kako bi se definirao konvencionalni dijagram naprezanje - deformacija, te Marciniak test kako bi se formirao dijagram deformabilnosti SPIF tehnologijom. Postavljeni su analitički modeli koji opisuju stanjivanje lima, kritične sile te pojavu trenja za ispitivane limove u SPIF procesu. Prema rezultatima analitičkog modela za izračun sile u SPIF procesu za tankostjene limove provedeno je ispitivanje trenja za odabrane materijale TS230 i TH415. Uzimajući u obzir rezultate vlačnoga testa i ispitivanja trenja postavljeni su uvjeti za modeliranje, analizu i simulaciju SPIF procesa u softveru ABAQUS. Za izradu modela odabran je oblik krnjeg stošca, simulacije su provedene kako bi se utvrdili uvjeti izrade uspješnog SPIF procesa za materijal TS230 i TH415. Na temelju prikupljenih podataka postavljen je plan eksperimenata za istraživanje u realnim proizvodnim uvjetima te je pristupljeno eksperimentalnoj verifikaciji

modela. Odabran je CNC stroj, CNC-glodalica WEMAS VZ 750, te je projektirana specijalna radna naprava te su odabrani alati za inkrementalno oblikovanje. Postavljeni su modeli za izvedbu SPIF procesa na odabranom stroju pomoću softvera Solidcam i VeriCUT. Prema dobivenim spoznajama izveden je eksperimentalni plan izrade krnjeg stošca kako bi se utvrdilo funkcioniranje modela. Nakon uspješno izvedenog SPIF procesa i utvrđivanja optimalnih parametara obrade, postavljen je eksperimentalni plan mjerenja stanjivanja lima, ponovljivosti oblika te sposobnosti izvedenog inkrementalnog oblikovanja. Sposobnost inkrementalnog oblikovanja tankostjenog lima mjerena je metodom 3D fotogrametrije (digitalizacijski sustav ARGUS), a dobiveni su rezultati uspoređeni sa dobivenim rezultatima Marciniak ispitivanja. Sustavom 3D fotogrametrije kontrolirana je ponovljivost oblika i stanjivanje tankostjenog lima. Ustanovljena je maksimalna sposobnost inkrementalnog oblikovanja za ispitivane materijale s oblikom krnjeg stošca. Objasnjeni su parametri koji uvjetuju uspješnu obradu SPIF procesom tankostjenog materijala. Izvršena su dodatna mjerenja tvrdoće, hrapavosti i topline.

Rad nije objavljen.

Mentor: Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing.

Komentor: Doc. dr. Tomaž Pepelnjak, univ. dipl. ing.

Povjerenstvo za ocjenu:

1. Red. prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik
2. Red. prof. dr. sc. Josip Brnić, dipl. ing., član
3. Doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, - Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
4. Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., mentor, član
5. Red. prof. dr. sc. Miroslav Plančak, dipl. ing., član.

Povjerenstvo za obranu:

1. Red. prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik (FSB, Zagreb)
2. Red. prof. dr. sc. Branko Grizelj, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
3. Red. prof. dr. sc. Pero Raos, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
4. Izv. prof. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, sumentor (Fakulteta za strojništvo Univerza v Ljubljani, Slovenija)
5. Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., član, sumentor

Datum obrane: 2. rujan 2013

Datum promocije:

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci
(150, 184, 32, 99, hrvatski jezik)

Code: DD No: UDC: 539.388.2:621.914.3:53.083:519.6:539.421(043).

FURTHERING THE PROCESS OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING

Marko Kršulja

University of Rijeka
Faculty of Engineering
Croatia

Keywords:

incremental sheet forming
deformation
CNC milling machine
process control
measurements
3D photogrammetry

Summary:

In this work series of investigations were conducted in order to establish a stable technological process of manufacturing tinplate products with single point incremental forming technology (SPIF). In beginning of investigation it was assumed that SPIF technology is applicable on thin sheet metal. Investigations were conducted on two materials steel tinplate TS230 (W. nr. 1.0371 according to EN 10027-2) thickness of 0.155 mm and steel tinplate TH415 (W. nr. 1.0377 according to EN 10027-2) thickness of 0.24 mm with the goal of establishing optimal parameters in their manufacture with SPIF technology. Investigation of mechanical properties will be conducted with the goal to establish reliable input parameters in order to clearly define the accuracy of investigated truncated cone dimensions with SPIF process. A tensile test was conducted in order to define material stress - strain curve and Marciniak investigation in order to create forming limit diagram (FLD) for SPIF technology. Analytical models were defined in order to describe effect of sheet metal thinning, defining critical force and friction for investigated sheet metal in SPIF process. Friction investigation was conducted for materials TS230 and TH415 according to results obtained from analytical model for defining critical forces in SPIF process for thin sheet metals. Considering obtained results of tensile and friction investigation conditions for modelling, analysis and simulation of SPIF process in ABAQUS software are obtained. A truncated cone was selected for model development, a series of simulations were conducted in order to establish conditions for successful SPIF process of selected materials TS230 and TH415. On the basis of collected data a plan of experiments for real production conditions was proposed and verification of proposed was conducted. The CNC machine, CNC milling machine WEMAS VZ 750 was selected, the special work holder and tooling necessary for SPIF process proposed and created. Models for execution of SPIF process

on milling machine were selected with softer Solidcam and VeriCUT. According to acquired know-how an experimental plan for creation of truncated cone was executed in order to confirm functionality of developed model. After successful execution of SPIF process and confirmation of optimal working parameters an experimental plan was prepared in order to measure with 3D fotogrametry. Thinning of sheet metal, geometry shape repeatability and FLD were measured with 3D fotogrametry system ARGUS. FLD diagrams for material TS230 and TH415 for selected geometry shape of truncated cone was defined. Obtained FLD diagrams of SPIF process were compared with obtained FLD diagrams of Marciniak investigation. Explanation of influential parameters that influence successful SPIF process of thin sheet metal is given. Additional measurements of hardness, roughness and heat were conducted.

This dissertation has not been published.

Mentor: Red. prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing.
Comentor: Doc. dr. Tomaž Pepelnjak, univ. dipl. ing.

Reviewers:

1. Prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik
2. Prof. dr. sc. Josip Brnić, dipl. ing., član
3. Doc. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, - Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
4. Prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., mentor, član
5. Prof. dr. sc. Miroslav Plančak, dipl. ing., član.

Examiners:

1. Prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing., predsjednik (FSB, Zagreb)
2. Prof. dr. sc. Branko Grizelj, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
3. Prof. dr. sc. Pero Raos, dipl. ing., član, (SF, Slavonski Brod)
4. Assoc. prof. dr. sc. Tomaž Pepelnjak, dipl. ing., član, sumentor (Fakulteta za strojništvo Univerza v Ljubljani, Slovenija)
5. Prof. dr. sc. Zlatan Car, dipl. ing., član, sumentor

Oral examination: 2. september 2013

Degree conferred:

This dissertation is deposited in the library of the University of Rijeka, Faculty of Engineering. (150, 184, 32, 99, Croatian language)
