

ISTRAŽIVANJE SILA I NAPREZANJA ALATA ZA SPAJANJE BRADAVICAMA KOD SPAJANJA AlMg3 LIMA

The investigation of AlMg3 sheet metal clinching tool forces, and stresses

Josip Cumin¹, Antun Stoić¹, Miroslav Duspara¹, Ivan Samardžić¹

¹ Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu

Ključne riječi: spajanje limova bradavicama, alat, alatni materijal.

Sažetak

U radu je opisan postupak izračuna sila i naprezanja na kritičnim mjestima alata za spajanje limova bradavicama i naprezanja u mehanički izvedenom spoju. Numerička metoda konačnih elemenata, korištena je zajedno s matematičkim modelima i naputcima proizvođača sličnih alata za deformiranje, kako bi se na osnovu izračunatih naprezanja izabrao optimalni alatni čelik za izradu samog alata za spajanje bradavicama.

Keywords: sheet metal clinching, tool, tool material.

Abstract

This article shows methods used for the calculation of forces and stresses in the sheet metal clinching tool, for the joining of the sheet metal plates. Finite element method was used along with mathematical models and tool manufacturer guidelines, to calculate loading stresses, and to choose appropriate tool material for the clinching process.

1. Uvod

Postoji cijeli niz postupaka razvijenih s ciljem spajanja materijala. Postupak spajanja limovima bradavicama je postupak iz područja oblikovanja limova deformiranjem, a najsličniji postupak iz područja zavarivanja je elektrootporno zavarivanje limova.

Pri spajanju limova bradavicama deformiranjem lima, dolazi do kontakta između žiga i gornjeg lima. Tada gornji alat (žig) gura oba lima u šupljinu koja je definirana geometrijom donjeg alata (matrice), pri čemu je cilj stvaranje pregiba u limu. Dimenzije i geometrija alata, skupa s karakteristikama ponašanja materijala pri plastičnom tečenju imaju ulogu u stvaranju takvog pregiba među limovima. Na slici 1. prikazan je alat za spajanje limova bradavicama s prikazanim geometrijskim karakteristikama pregiba u tako dobivenom spoju.

Na slici su prikazane karakteristične vrijednosti takvog spoja kao što slijedi:

d_1 – promjer dna matrice [mm],

d_2 – promjer ruba kanala u matrici [mm],

d_3 – promjer žiga [mm],

α_1 – nagib stjenke matrice [°],

α_2 – nagib oboda žiga [°],

α_3 – nagib čela žiga [°],

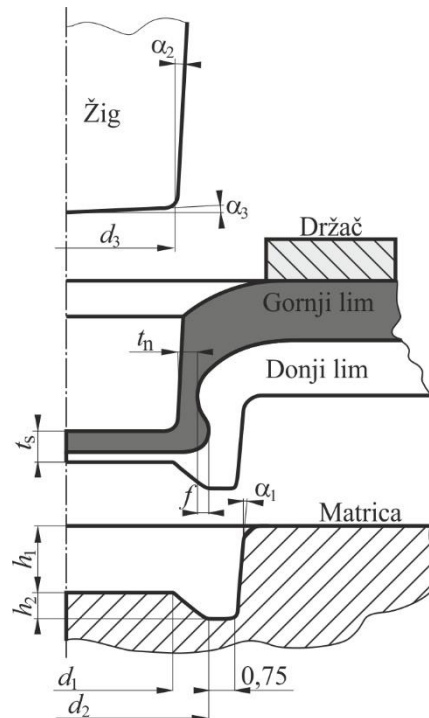
h_1 – udaljenost od ruba do središnjeg uzdignutog dijela matrice [mm],

h_2 – udaljenost od središnjeg uzdignutog dijela matrice do dna kanala [mm],

f – pregib u spoju limova [mm],

t_n – najmanja debljina gornjeg lima u spoju [mm],

t_s – najmanja debljina limova pri dnu spoja [mm],



Slika 1 Karakterističan izgled i geometrija alata za spajanje limova bradavicama

U prethodnim istraživanjima postupka spajanja limova bradavicama istraženi su neki od parametara alata kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje materijala pri tečenju i dobivanja spoja željenih mehaničkih i geometrijskih karakteristika. Prethodno su Y. Abe i suradnici istraživali mogućnost spajanja čeličnih limova visoke čvrstoće sa aluminijskim limovima u raznovrsnim konfiguracijama alata za spajanje [1]. Danas postoji trend spajanja istovrsnih materijala ovom tehnologijom ako nisu dobro zavarljivi zbog povećanog udjela ugljika, a također veliki dio ovakvih spojeva je izveden s raznovrsnim materijalima, najčešće u spoju čelika s aluminijem.

Xiaocong He1 i suradnici su istraživali čvrstoću i mogućnost apsorpcije energije u spojevima limova bradavicama [2]. Kroz pokuse i numeričke simulacije koristeći metodu konačnih elementa utvrdili su da je mjesto najvećeg naprezanja u limu u najtanjem dijelu (vratu) lima, te da je potrebno kontrolirati tu debljinu označenu s oznakom t_n na slici 1 [2].

Nedavna istraživanja [3,4] pokazuju da geometrija alata mora biti precizno usklađena kako bi se mogao izvesti kvalitetan spoj između limova. Parametri alata (procesni parametri) koji su najznačajniji su dimenzije promjera matrice (d_1 , d_2), visina matrice – odnosno omjer visina (h_1/h_2), kutovi nagiba na matrici i žigu (α_1 , α_2), promjer žiga d_3 , polumjer zaobljenja vrha žiga itd.

Eshtayeh M. i Hrairi M. su istraživali mogućnost spajanja raznorodnih materijala (Al 7075 s čeličnim limom) koristeći Grey optimizaciju baziranu na Taguchi metodi, na brojnim numeričkim simulacijama postupka spajanja koristeći metodu konačnih elemenata [5]. Pokazali su kroz multi odzivnu analizu, da je za pravilno formiranje pregiba f potrebno imati pravilan promjer i nagibe žiga (slika 1), kao i druge parametre alata koji su u skladu s istraživanjima [1-3], [4]. Također su preporučili da u buduća istraživanja bude uključen i utjecaj elastičnog povrata materijala na geometriju i dimenzije spoja limova, te da se istraži kako daljnja oštećenja takvog spoja (vlačna naprezanja kod pokušaja rastavljanja), te oštećenja strukture materijala imaju utjecaj na veličine t_n i t_s [5].

C. Lee i ostali su istraživali kako procesni parametri (ovdje geometrija alata) utječu na spajanje bradavicama čeličnih s aluminijskim limovima[6]. U istraživanjima su varirali zračnost između matrice i žiga, tip utora u matrici, oblik utora u matrici, gdje su zaključili da najveći utjecaj na čvrstoću takvog spoja ima polumjer zaobljenja gornjeg alata odnosno žiga.

U ovom radu cilj je bio pronaći kako različite geometrije alata utječu na pojavljivanje i veličinu preklopa u istovrsnim parovima limova od AlMg₃ materijala.

2. Materijal

Odabrani materijal za numeričke MKE simulacije je aluminijska legura AlMg3 (EN AW-5754). Legura je odabrana jer je često korištena u proizvodnji zbog izvrsnih antikorozivnih svojstava, izvrsne zavarljivosti i dobrih mehaničkih svojstava u postupcima oblikovanja deformiranjem. Matematički model materijala korišten za ulazne podatke, odnosno krivulja stvarnog napreznja plastičnog tečenja (k_f) u ovisnosti o prirodnoj (logaritamskoj) deformaciji preuzeta je iz kataloga krivulja plastičnog tečenja [7]:

AlMg3:

$$k_f = 270,1 \cdot \varphi^{0,11837} \cdot e^{\frac{-0,0038}{\varphi}} \quad (1)$$

Izraz (1) vrijedi pod sljedećim uvjetima:

$$\vartheta = 20 - 200 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\varphi = 0,03 - 2$$

$$\dot{\varphi} = 0,03 - 2 \text{ [1/s]}$$

Kako je taj materijal najčešće isporučen u skladišta/trgovine odžarenom stanju, izraz (1) iz kataloga svojstava materijala [7] odnosi se na odžareno stanje.

Modul elastičnosti materijala uzet je kao $E=70,4$ GPa, dok je Poissonov faktor $\nu = 0,33$ [7]

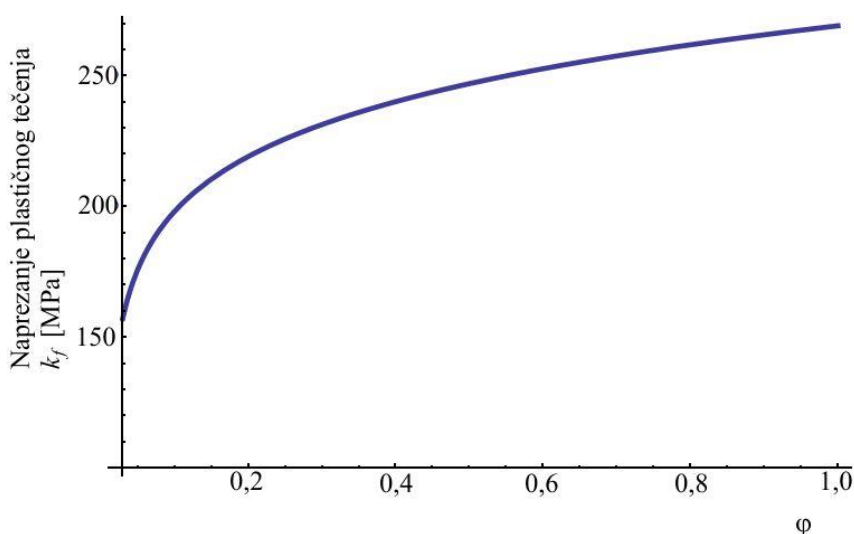
Za unos krivulja napreznja u MSC.MARC potrebno je izdvojiti samo plastični dio stvarne (logaritamske) deformacije koristeći sljedeći izraz [8]:

$$\varphi_{pl} = \varphi - \frac{k_f}{E} \quad (2)$$

gdje je:

k_f - napreznje plastičnog tečenja [MPa], te φ - stvarna (logaritamska) deformacija.

Elastična deformacija preračunava se automatski prema unesenim podacima modula elastičnosti i odnosa napreznja i deformacije za elastično područje [8]. Na slici 2 prikazana je krivulja korištena za metodu konačnih elemenata.

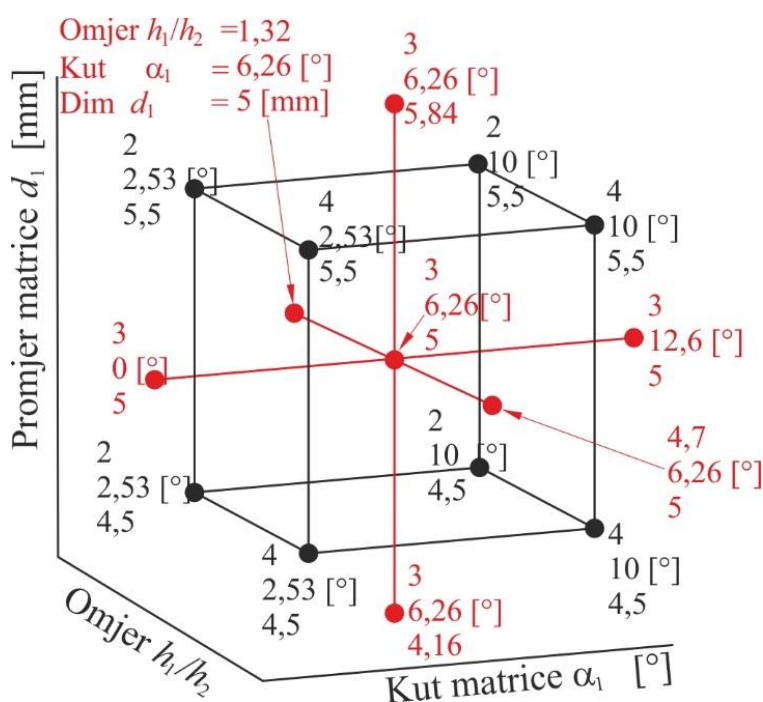


Slika 2 Korištena krivulja napreznja plastičnog tečenja AlMg3 materijala

3. Metoda

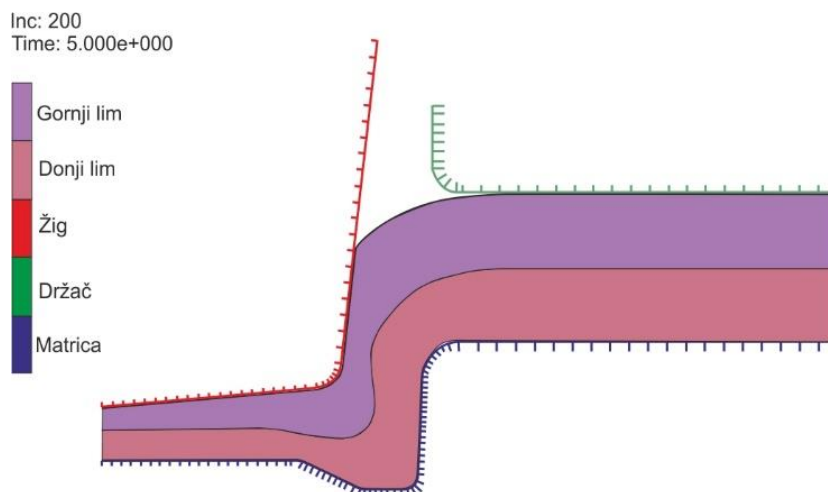
Korištena je numerička metoda konačnih elemenata u računalnom programu MSC.MARC. Sami numerički modeli su geometrijski konstruirani prema centralno kompozitnom planu pokusa koji je namjera provesti kroz pokuse nakon što alat bude izrađen. Mijenjani su parametri alata odnosno procesa na matrici: dimenzija d_1 , omjer visina matrice (h_1/h_2), te kut nagiba matrice α_1 koji su prikazani na slici 1.

Ostale dimenzije matrice su ostavljene konstantne kao $d_2 = d_1 + 1,5$ [mm], te je na taj način bila moguća brza izmjena geometrije matrice kroz ulazni editor programa. Na slici 3 prikazana su stanja (parametri alata) prema kojima su provedene numeričke simulacije, te prema kojima će naknadno biti provedeni eksperimenti.



Slika 3 Parametri alata korišteni u numeričkim simulacijama

Matrica, žig, aluminijski limovi te držač limova su modelirani kroz ulazni editor kao osnosimetrična tijela što je prikazano na slici 4.



Slika 4 Kontaktna tijela: matrica, žig, limovi i držač limova

Oba lima su modelirana na način da im debljina iznosi 1 mm, i vanjskog promjera 20 mm, kako bi se osiguralo da su krajevi lima u numeričkom modelu dovoljno udaljeni od osi, i da je moguće

prikazati polje promjena naprezanja kroz limove a pri tome zadržati optimalnu veličinu mreže konačnih elemenata. Tokom svih numeričkih simulacija korištene su sljedeće vrijednosti $d_3 = 6,5$ mm, kut nagiba oboda žiga $\alpha_2 = 6^\circ$, kut nagiba čela žiga $\alpha_3 = 5^\circ$, te polumjer zaobljenja brida žiga od $r = 0,4$ mm

U MKE programu model alata i limova je postavljen kao osnosimetričan slučaj radi uštede u vremenu izračuna. Od ostalih geometrijskih značajki korištene su funkcije „Assumed Strain“ i „Constant Dilatation“ koje su optimizirane da rješavaju moguće pojavljivanje „zablokirane“ mreže konačnih elemenata u određenom položaju što nepovoljno utječe na rezultat [8]. Preporuča se korištenje ovih funkcija kod simuliranja velikih deformacija mreže kada se koriste pravokutni elementi prvog reda zbog moguće pojave prevelikog broja određenih stupnjeva slobode i praktički inkompresibilnog ponašanja mreže [8].

Konačni elementu generirani su internim potprogramom i to kvadratni elementi tipa 10 [8] veličine stranica $0,08 \cdot 0,08$ mm. Korišteno je naknadno pozivanje internog potprograma „Advancing Front Quad“ u cilju popravljivanja jako distorzirane mreže nakon što budu zadovoljeni određeni kriteriji, gdje se vrši formiranje nove mreže unutar istog inkrementalnog koraka, koja ima definirane ciljne parametri duljine stranica konačnih elemenata od 0,05 mm. Budući da su kod nelinearne analize prisutne velike distorzije i rotacije elemenata potprogram za generiranje mreže se uključivao kada je stvarna (logaritamska) deformacija prešla vrijednosti $\varphi = 0,15$ te kada je došlo do prevelike deformacije pojedinog elementa u mreži poput unutarnjeg kuta elementa većeg od 120° .

Sama numerička simulacija je postavljena u elasto-plastičnoj nelinearnoj domeni, gdje je korištena teorija konačnih deformacija u rješavanju velikih pomaka, te opcija revidirane Lagrange metode, dok je za rješavanje matrica korišten pristup aditivne dekompozicije ($\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$), uz mogućnost korištenja i multiplikativne dekompozicije ($F = F_e F_\theta F_p$) ako se pojavi potreba prilikom nepostojanja konvergencije rješenja [8]. Nelinearna analiza je najčešće postavljena kroz određen broj pred-definiranih koraka i radi se kroz inkrementalno rješavanje, a često i veliki broj iteracija u određenom koraku sve dok se ne ispuni uvjet ravnoteže sila na način da relativna rezidualna sila bude manja od zadane vrijednosti.

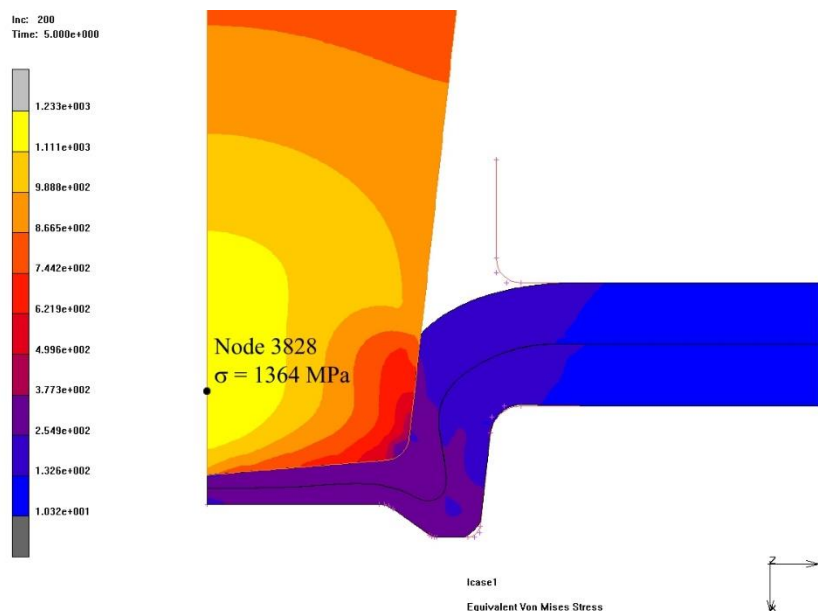
Pretpostavljeno je izotropno očvršćavanje materijala te je korišten von Misesov uvjet tečenja. Kontakti između mreža limova i žiga odrađeni su preko opcije CTABLE, gdje su definirane mreže elemenata svakog pojedinog tijela, te su još naknadno definirani čvorovi koji će tokom vremena uslijed deformiranja mreže doći u kontakt s drugim tijelom odnosno mrežom. Vanjski rubovi mreže su opisani analitički umjesto diskretnom metodom, pri čemu su označeni čvorovi koji tvore rub lima (mreže). Na žigu je zadano gibanje u z - osi, definirano u vremenskom intervalu, dok su na matricu postavljeni takvi rubni uvjeti da bude nepomična.

Faktori trenja definirani su: $\mu = 0,2$ između žiga/gornjeg lima, $\mu = 0,3$ između aluminijskih limova, $\mu = 0,12$ između donjeg lima/matrice postavljeni su s referencom na prethodna istraživanja u sličnom postupku spajanja limova [2,3]. Korišten je Coulombov model trenja s tangentnim pristupom.

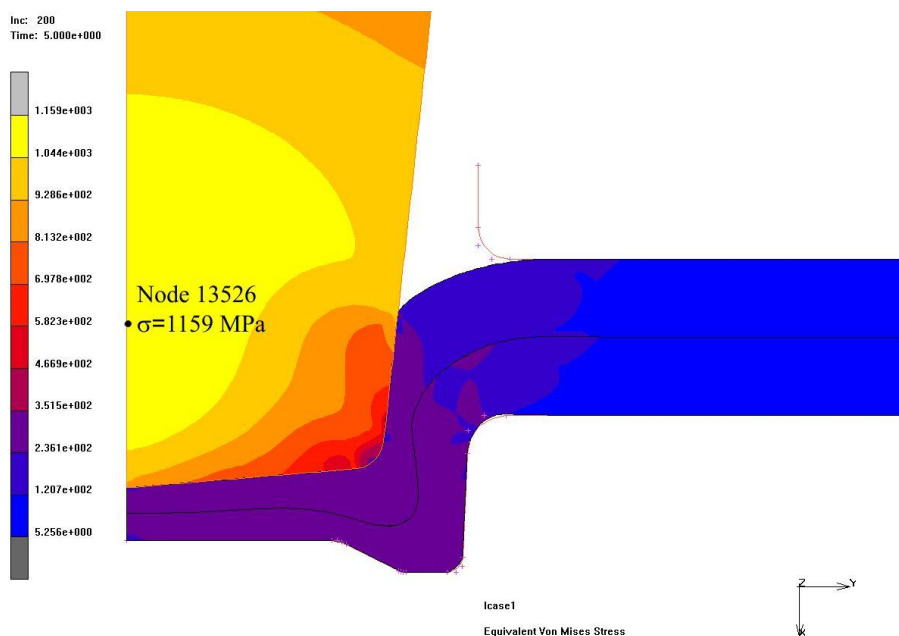
U tablici 1 dani su rezultati debljina pregiba f , debljina suženja debljine tj. vrata gornjeg lima t_n , i debljina dna spoja dva lima t_s koje su prikazane na slici 1. Poželjan je slučaj kada je veličina pregiba f najveća, dok je istovremeno debljina suženja gornjeg lima najveća jer je ista povezana s nosivosti ovakve vrste spoja.

Broj	d_1 [mm]	omjer h_1/h_2	α_1 [°]	AlMg ₃ (EN AW-5754)		
				f [mm]	t_n [mm]	t_s [mm]
1.	5	1,32	6,26	0,07	0,289	0,5
2.	5	3	12,6	0,018	0,32	0,6
3.	5,5	2	10	0,054	0,432	0,5
4.	4,5	4	2,53	0,0184	0,167	1,04
5.	4,5	2	10	0,0865	0,137	0,6
6.	5	3	0	0,077	0,204	0,8
7.	5	3	6,26	0,056	0,254	0,7
8.	5,84	3	6,26	0,097	0,44	0,4
9.	5	4,68	6,26	0,0345	0,24	0,84
10.	5,5	4	10	0,043	0,398	0,53
11.	4,5	2	2,53	0,078	0,149	0,79
12.	5,5	4	2,53	0,083	0,334	0,6
13.	5,5	2	2,53	0,08	0,363	0,42
14.	4,5	4	10	0,016	0,186	0,91
15.	4,16	3	6,26	0,017	0,156	1,06

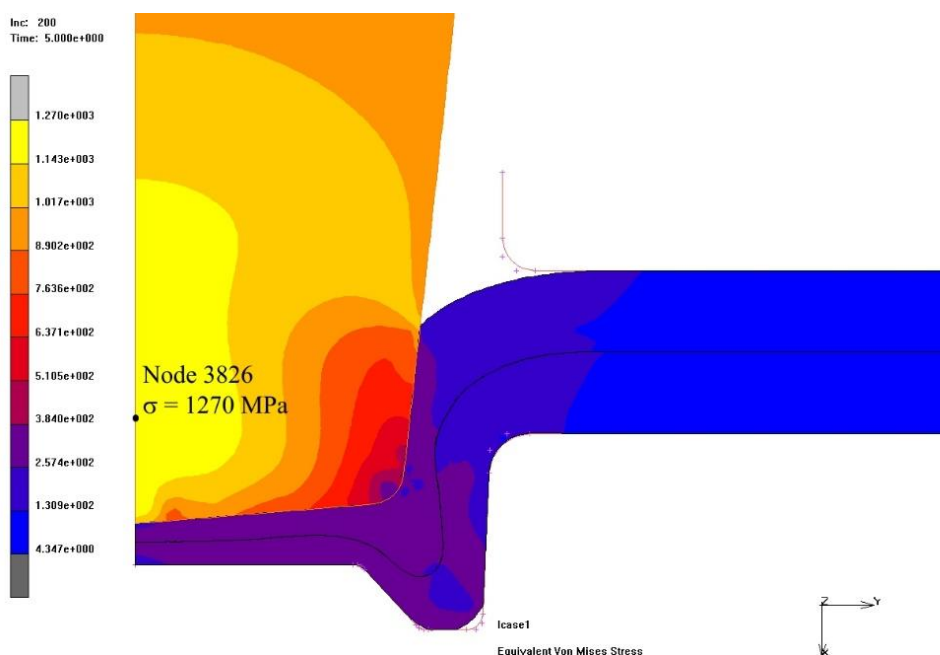
Plavom bojom su označeni slučajevi gdje su ostvareni najpovoljniji slučajevi, te je za njih provedena dodatna numerička analiza gdje je cijeli žig definiran također kao deformabilno tijelo u elastičnom području. To je napravljeno s ciljem određivanja maksimalnih tlačnih napreznja u žigu kako bi se moglo odrediti kritično mjesto, kritično napreznje i odabrati odgovarajući alatni čelik, budući da se radi o dosta tankom promjeru žiga (slika 5 - 7).



Slika 5 Najveće napreznje u žigu za slučaj 8. iz Tablice 1.



Slika 6 Najveće naprezanje u žigu za slučaj 12. iz Tablice 1.



Slika 7 Najveće naprezanje u žigu za slučaj 13 iz Tablice 1

S obzirom na tlačna naprezanja koja se javljaju u žigu potrebno je odabrati alatni čelik iz kojega će žig biti izrađen. Kod izrade štanci za žigove je često korišten alatni čelik za hladni rad oznake EN X153CrMoV12 (DIN 1.2379, AISI D2) koji ima dopuštena tlačna naprezanja od 3 500 MPa i lako je dobavljiv, a zadovoljava po pitanju naprezanja koja se tokom postupka spajanja limova pojavljuju [9,10].

Ovaj čelik odlikuje visok sadržaj ugljika, kroma i vanadija. Ovaj čelik moguće je toplinski obraditi na vrlo veliku tvrdoću od 60 - 63 HRC. Također, ovaj čelik ima odličnu otpornost na trošenje zbog čega se i koristi kod izrade štanci. Matrica je također predviđena da bude izrađena od istog čelika.

U ovom radu prikazano je kako parametri alata u vidu promjera matrice d_1 [mm], omjera visine matrice h_1/h_2 te kut nagiba matrice α_1 [°] utječu na stvaranje i veličinu pregiba f [mm], debljinu najtanjeg dijela gornjeg lima u području vrata t_n [mm] i debljinu dna spoja limova bradavicom t_s [mm]. U prethodnim istraživanjima pokazano je da vrijednost veličine pregiba f , te debljine t_n utječe na čvrstoću i nosivost ovakvog spoja dva lima. Dimenzioniranje alata i izbor odgovarajućeg alatnog čelika je važno kako ne bi došlo do loma alata tokom rada uslijed prevelikih djelujućih naprezanja.

U tablici su prikazana 3 slučaja parametara alata koji bi mogli napraviti najbolji spoj i za njih je provedena numerička simulacija metodom konačnih elemenata kako bi se barem aproksimirala djelujuća naprezanja za koje nije razvijen analitički model određivanja. Nakon što alat bude izrađen, u budućim istraživanjima provesti će se pokusi spajanja, te će rezultati biti analizirani i uspoređeni s rezultatima dobivenim metodom konačnih elemenata.

5. Literatura

- [1] Y. Abe, K. Mori, T. Kato: Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow. *J Mater Proc. Technol* 212 (4), (2012), 884–889.
- [2] Hel. X, Zhao L., Yang H., Xing B., Wang Y., Deng C. Gu F., Ball A.: Investigations of strength and energy absorption of clinched joints. *Computational Materials Science* vol. 94 (2014), 58–65.
- [3] F. Lambiase: Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies. *International journal of advanced manufacturing technologies* 66 (9), (2013), 2123–2131.
- [4] J. Mucha, L. Kaščak, E. Spišak: Joining the car body sheets using clinching process with various thicknesses and mechanical property arrangements. *Archives of civil and mechanical engineering* XI (1) (2011), 135–148.
- [5] M. Eshtayeh, M. Hrairi: Multi objective optimization of clinching joints quality using Grey-based Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol*, vol 87 (2016), 233–249
- [6] C. Lee, J. Kim, S. Lee, D. Ko, B. Kim: Parametric study on mechanical clinching process for joining aluminium alloy and high strength steel sheets. *Journal of mechanical science and technology* 24 (2010), 123–126.
- [7] Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies, Part 2: Non-ferrous Alloys - Light Metals: Deformation parameters. Springer-Verlag, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-13864-5_64, DOI: 10.1007/978-3-642-13864-5_57.
- [8] MSC.Software: "Volume B: Element library", MSC.Software, U.S.A, (2007).
- [9] AJACS/Mitsumi product data file: Characteristics of punching tools // Ajacs die sales, URL: <http://www.ajacs.com/metal-forming-catalog/misumi/369-pg1078-1109-product-data/file> (3.4.2017.).
- [10] Steel grades // X153CrMoV12 steel, URL: <http://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Tool-Steel-Hard-Alloy/x153crmov12.html> (3.4.2017.).