WORKING AND RADIAL TENSIONS OF THE CUP'S FLANGE
RADNI I RADIJALNI NAPONI VIJENCA POSUDE

Mirsad Merdanic[1], Said Pašalić[2], Mladen Todić[3]
[1]Tehnički Fakultet Bihać Univerziteta u Bihaću, mirsad.merdanic@bih.net.ba
[2]Tehnički Fakultet Bihać Univerziteta u Bihaću, said.pasalic@live.com
[3]Mašinski Fakultet Banja Luka Univerziteta u Banja Luci, mladen.todic@mf.unibl.org

Keywords: *Deep drawing, plastic strain, cup's flange, wrinkling, side tension, radial tension, difference between main tennsions.*

ABSTRACT:

Deep drawing as a type of plastic strain of sheet metal is different from bending. The basic difference is in the occurence of wrinkling on the cup's flange during deep drawing. This can be best observed and explained when drawing cylinder like cups. The wrinkling of the flange is produced by normal side tensions σ_t , but the difference between normal radial σ_r and these side tensions are also important because that difference is a condition for plastic flow for the given conditions of degree, speed, and strain temperature. That difference of those main tensions is constant from the periphery towards the flange's inwardness in any moment of the process.
This paper will demonstrate the theoretical values and diagrams of the working and radial tensions of the cup's flange and the three different cup's depths during deep drawing. This is because the maximum radial tension of the cup's flange σ_{rmax} is the greatest component of the working tension σ_1. For the balance of the inner forces of the flange, those forces are projected on its radial direction: as a result, the radial tension is the most important for the calculation of the pure drawing force F_1.

Ključne riječi: *Duboko izvlačenje, plastična deformacija, vijenac posude, naboravanje, bočni naponi, radijalni naponi, razlika glavnih napona.*

SAŽETAK:

Duboko izvlačenje kao obrada plastičnom deformaciom lima se razlikuje od savijanja. Osnovna razlika je u pojavi nabora odnosno falti na vijencu posude u toku izvlačenja. To se najbolje uočava i može objasniti na izvlačenju cilindričnih posuda. Naboravanje vijenca izazivaju normalni bočni naponi σ_t , ali je važna i razlika normalnih radijalnih i ovih bočnih napona, jer je ta razlika uslov plastičnog tečenja za zadane uslove stepena, brzine i temperature deformacije. Razlika tih glavnih napona je konstanta od periferije ka unutrašnjosti vijenca u bilo kojem trenutku procesa.
U ovom radu će se predočiti teoretske vrijednosti i dijagrami radnih i radijalnih napona vijenca posude u toku dubokog izvlačenja za tri dubine posude. Ovo zbog toga što su maksimalni radijalni naponi vijenca posude σ_{rmax} najveća komponenta radnog napona σ_1. Za ravnotežu unutrašnjih sila vijenca iste se projektuju na njegov radijalni pravac, pa su radijalni naponi najvažniji i za poračun čiste sile izvlačenje F_1.

1. UVOD

Za razliku od savijanja lima kao obrade plastičnom deformacijom, kod izrade posuda dubokim izlačenjem javljaju se nabori odnosno faltanje vijenca. To uzrokuju pritisni normalni naponi σ_t koji djeluju u tangencijalnom smjeru vijenca posude tj. bočno. Ti bočni naponi postoje zbog trokutastih elemenata vijenca koji putuju kao tanki klinovi prema otvoru matrice i pri tome se sabijaju i izvijaju. Tanji limovi su manje otporni, pa se naboravaju odnosno faltaju. Pored ovih, postoje i glavni naponi u radijalnom smjeru vijenca posude σ_r i veoma je važna razlika pomenutih napona, jer ona igra bitnu ulogu u hipotezama o početku plastičnog tečenja materijala. Tako prema hipotezi o najvećem smicajnom naponu (Tresca) i hipotezi najveće deformacione energije utrošene na promjenu oblika (Mises) su ovdje naponsko-deformacioni odnosi vijenca posude između ravanskog naponskog i ravanskog deformacionog stanja. Pošto se u konačnici sve reducira na radijalni napon vijenca važno je detaljnije predstaviti ovaj glavni napon prema analizama Siebela [1].

2. POSUDA, PLATINA I RADNI HOD

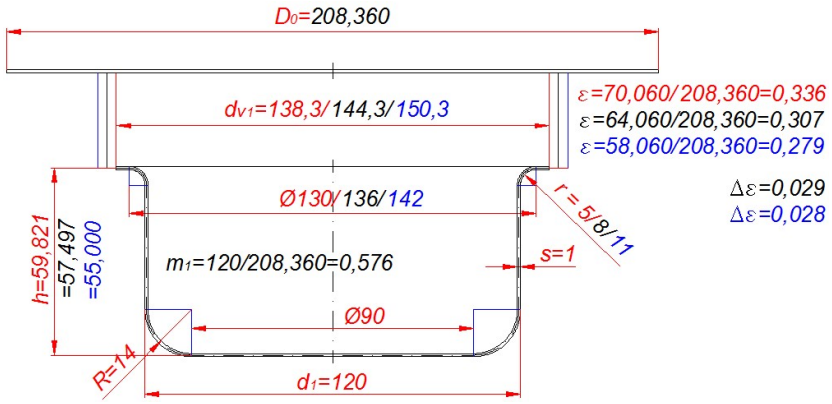
Prema trofaktornom tronivoskom planu eksperimenta [2] se izvlačila prikazana posuda, slika 1. Nazivi i nivoi promjenljivih parametara su bili: dubina izvlačenja h_x=18 / 36 / 54 mm, radijus zaobljenja ivice otvora matrice r=5 / 8 / 11 mm te zazor između matrice i izvlakača w=2,14 / 2,24 / 2,34 mm, a debljina lima izvučene posude je bila s=1 mm i materijal Č.0148 (po EN DC04).

Posuda je sa vijencem, donjeg radijusa zaobljenja R=14 mm i pošto su predviđena tri nivoa gornjih radijusa zaobljenja r, dimenzije tih posuda bi bile prema oznaci $r/d_v/d/h$: 5/138,3/120/59,821 mm; 8/144,3/120/57,497 mm i 11/150,3/120/55 mm. U sva tri slučaja je prečnik platine jedinstvena vrijednost (D_0=208,360 mm) koja je izračunata npr. za posudu 5/138,3/120/59,821 mm uz r_s=5,5 mm, r_v=69,15 mm, r_{so}=59,5 mm, h=59,821 mm i R_s=14,5 mm prema obrascu (2.1) iz [3]:

$$D_0 = \sqrt{8\left\{\frac{r_v^2}{2} + r_{so}\left[h - (r_s + R_s)\frac{4-\pi}{2}\right] + (r_s^2 - R_s^2)\frac{\pi - 3}{2}\right\}}. \tag{2.1}$$

Ako bi se međutim unaprijed usvojio prečnik platine od D_0=208,360 mm, tada bi se dubine triju posuda izračunale prema obrascu (2.2) iz [3], pa za r=5 mm je h=59,821 mm, za r=8 mm je h=57,497 mm i za r=11 mm je h=55 mm, slika 1.

$$h = \frac{\frac{D_0^2}{8} - \frac{r_v^2}{2} + r_{so}(r_s + R_s)\frac{4-\pi}{2} - (r_s^2 - R_s^2)\frac{\pi - 3}{2}}{r_{so}}. \tag{2.2}$$



Slika 1. Konačna posuda sa vijencem i zaobljenjima različitih dubina

Međutim, posude se neće izvlačiti na navedene maksimalne dubine iako to dozvoljava predviđeni odnos izvlačenja m_1=0,576. U toku eksperimenta je prema planu bilo 14 pokusa: 4 pokusa dubine 18 mm i to dva sa r=5 mm i dva sa r=11 mm, zatim 4 pokusa dubine 54 mm i to dva sa r=5 mm i dva sa r=11 mm i konačno 6 pokusa dubine 36 mm, svih šest sa r=8 mm.

Kako se neće ostvarivati maksimalne dubine triju posuda, tako se neće ostvariti ni odgovarajući konačni prečnici vijenaca d_v=138,3/144,3/150,3 mm. Umjesto ovih konačnih ostvarit će se varijabilni prečnici vijenaca, pa tako za dubinu od 36 mm sa r=8 mm je D_x=176,224 mm, a za dubinu od 54 mm sa r=5 mm je D_x=147,979 mm i sa r=11 mm je D_x=151,875 mm prema obrascu (2.3) iz [3]:

$$D_x = 2r_x = 2\sqrt{2\left[\frac{D_0^2}{8} - h_x r_{so} + r_{so}\left(r_s + R_s\right)\frac{4-\pi}{2} - \left(r_s^2 - R_s^2\right)\frac{\pi-3}{2}\right]}. \quad (2.3)$$

Za radni hod od 18 mm se ne mogu izračunati varijabilni prečnici vijenaca obrascem (2.3), jer taj hod pripada prvom dijelu radnog hoda. Granica između prvog i drugog dijela radnog hoda je momenat potpunog ostvarenja dna posude, a to je za h_g=r+R+s=r_s+R_s, pa je h_g=20, 23 i 26 mm. Zato treba prvo uspostaviti relaciju (2.4) iz [3] između ugla savijanja lima oko zaobljene ivice otvora matrice α_x i radnog hoda h_x u njegovom prvom dijelu:

$$\sin\alpha_x = \frac{\left(r_s + R_s\right)^2 - \sqrt{\left(r_s + R_s\right)^4 - \left\{\left(r_s + R_s\right)^2 + \left[h_x - \left(r_s + R_s\right)\right]^2\right\}\left\{\left(r_s + R_s\right)^2 - \left[h_x - \left(r_s + R_s\right)\right]^2\right\}}}{\left(r_s + R_s\right)^2 + \left[h_x - \left(r_s + R_s\right)\right]^2}. \quad (2.4)$$

Nakon ovoga se primjenom 1. Papus-Guldinove teoreme uspostavlja relacija (2.5) za varijabilni prečnik vijenca posude D_x u funkciji radnog hoda h_x u njegovom prvom dijelu [3]:

$$D_x = 2r_x = 2\sqrt{\frac{D_0^2}{4} - 2\left(l_2 \cdot r_2 + l_3 \cdot r_3 + l_4 \cdot r_4 + l_5 \cdot r_5\right) + \left(r_{os} + r_s\right)^2}. \quad (2.5)$$

Bilo bi veoma teško ovu relaciju dalje pojednostavljivati, a nije ni potrebno. Samo treba formule (2.4) i (2.5) korektno upisati u Excel. Srednji profil posude je podijeljen na 5 elementarnih linija i tu su naznačene sve mjere tj. dužine tih linija l_i i radijusi rotacije r_i težišta tih linija oko osi rotacije (osi posude). Tako se dobije varijabilni prečnik vijenca posude za dubinu od 18 mm koji iznosi: sa r=5 mm je D_x=197,553 mm a sa r=11 mm je D_x=199,923 mm.

3. PRORAČUN ČISTE SILE IZVLAČENJA STANDARDNIM OBRASCEM

Na temelju predašnjih podataka može se prići proračunu čiste sile izlačenja F_1. Prvo je izračunat površinski pritisak držača lima na vijenac posude p_{d1}=0,857 N/mm^2, a zatim sila držača lima za sve tri radijusa zaobljenja r=5, 8 i 11 mm: F_{d1}=17874,79 / 16801,43 / 15679,59 N respektivno [1]. Nakon toga je izračunat srednji specifični deformacioni otpor u Excelu, tabela 1

Tabela 1. Srednji specifični deformacioni otpor

Logaritamska deformacija vijenca φ		Stvarni napon $k1$	Srednji napon ks
$\varphi = \ln\frac{D_0}{D_x}$		$k_1 = 214 + 388{,}29 \cdot \varphi^{0{,}448}$	$k_s = \frac{k_0 + k_1}{2}$
	φ	$k1$	ks
		N/mm2	N/mm2
a) Za h/r/Dx=18/5/197,553 mm	0,05326	318,3724	266,1862
b) Za h/r/Dx=18/11/199,923 mm	0,041335	307,168	260,584
c) Za h/r/Dx=36/8/176,224 mm	0,167511	388,3926	301,1963
d) Za h/r/Dx=54/5/147,979 mm	0,342197	454,1662	334,0831
e) Za h/r/Dx=54/11/151,875 mm	0,31621	445,8168	329,9084

Konačno je formirana tabela 2. u Excelu u kojoj su uvrštene sve ulazne veličine i dobijene su tačne vrijednosti komponenata radnog napona i komponenata čiste sile izvlačenja [1][4]. U toj tabeli, u koloni N11-15 se nalazi radijalni napon na kraju hoda σ_{pb} kao i radijalni napon σ_p na početku radnog hoda, jer je on tad maksimalan i dat je u koloni C19-23.

Tabela 2. Proračun čiste sile izvlačenja F_1 po standardnom obrascu za radni napon σ_1

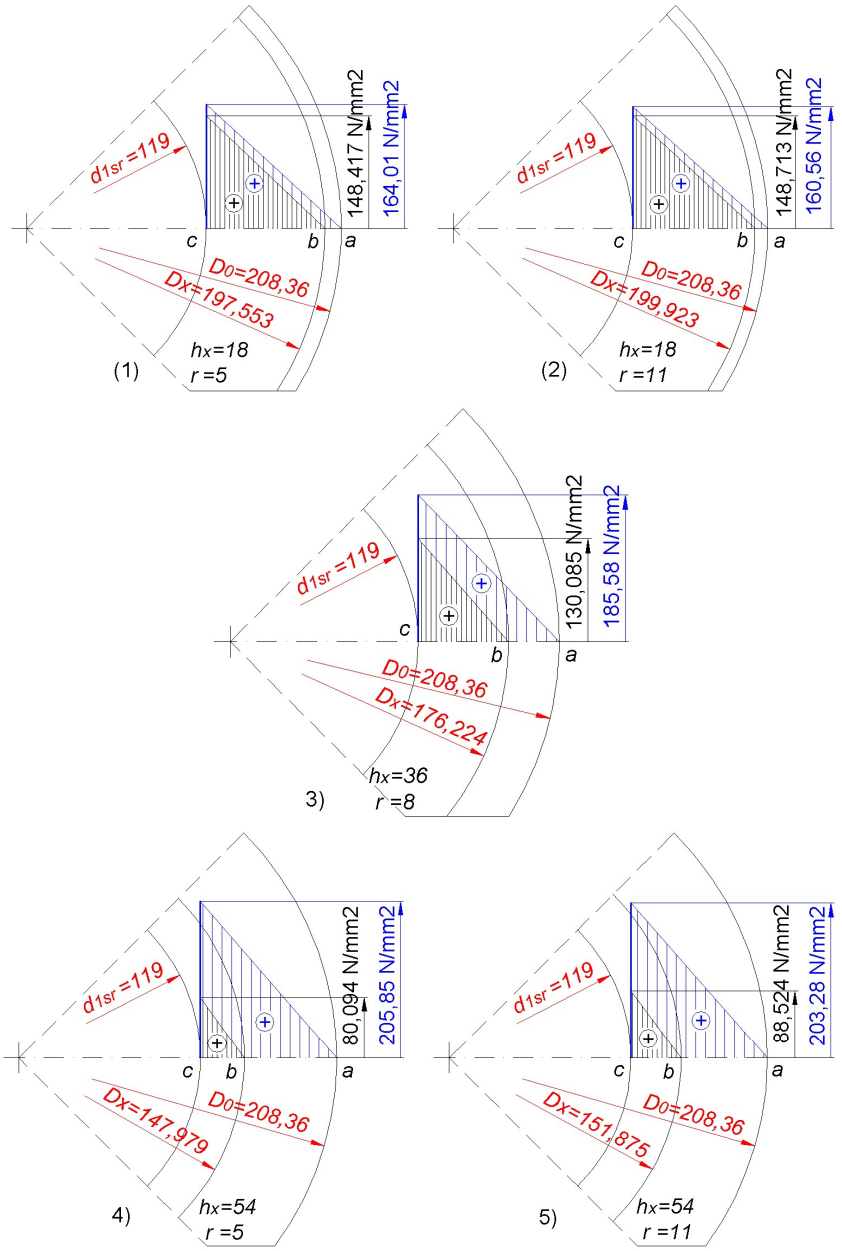
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	PRORAČUN čiste sile izvlačenja F1 PO STANDARDNOM OBRASCU ZA radni napon σ1													
2														
3	$F_1 = A_{o1}\cdot\sigma_1 = \pi\cdot d_{so1}\cdot s\cdot\left[e^{\mu\frac{\pi}{2}}\cdot\left(1{,}1\cdot k_s\cdot\ln\frac{D_0}{d_{so1}}+\frac{2\mu\cdot F_{d1}}{\pi\cdot d_{so1}\cdot s}\right)+k_s\frac{s}{2r_M+s}\right]$													
4														
5														
6	Prikaz raščlanjenog obrasca i podataka za proračun radnog napona σ1 (N/mm2) i čiste sile izvlačenja F1 (N) i njihovih komponenti													
7														Radijalni
8	$\pi d_{so1}s$	$e^{\mu\frac{\pi}{2}}$	$1{,}1\cdot k_s\cdot\ln\frac{D_0}{d_{so1}}$		$\frac{2\mu\cdot F_{d1}}{\pi\cdot d_{so1}\cdot s}$				$k_s\frac{s}{2r_M+s}$					napon na
9														kraju hoda
10				C19+E19		B19*C19	B19*E19		F19+G19	H19+I19				σ pb
11	a) Za silu F1: h=18, dso1=119 mm, ks=266,184 N/mm2, Fd=17874,792 N, D0=208,360 mm, Dx1=197,553 mm, r=5 mm													148,4167
12	b) Za silu F1: h=18, dso1=119 mm, ks=260,584 N/mm2, Fd=15679,587 N, D0=208,360 mm, Dx1=199,923 mm, r=11 mm													148,7126
13	c) Za silu F1: h=36, dso1=119 mm, ks=301,196 N/mm2, Fd=16801,426 N, D0=208,360 mm, Dx1=176,224 mm, r=8 mm													130,0852
14	d) Za silu F1: h=54, dso1=119 mm, ks=334,083 N/mm2, Fd=17874,792 N, D0=208,360 mm, Dx1=147,979 mm, r=5 mm													80,09358
15	e) Za silu F1: h=54, dso1=119 mm, ks=329,908 N/mm2, Fd=15679,587 N, D0=208,360 mm, Dx1=151,875 mm, r=11 mm													88,52347
16														
17	Proračun komponenti radnog napona i čiste sile izvlačenja (od plastične deformacije, trenja na vijencu i zaobljenju i od savijanja)													
18	Ao1	Poveć	σp	σp+σd	σd	σ'p	σ'd	σs	σ'p+σ'd	σ1	F'p	2F't	Fs	F1
19	373,8	1,13	164,01	171,662	7,65	185,973	8,6744	24,199	194,647	218,846	69525,8	3242,92	9046,61	81815,35
20	373,8	1,13	160,56	167,272	6,711	182,06	7,60909	11,33	189,669	200,999	68063,1	2844,66	4235,62	75143,4
21	373,8	1,13	185,58	192,775	7,191	210,434	8,15351	17,717	218,588	236,305	78670,8	3048,18	6623,65	88342,59
22	373,8	1,13	205,85	213,498	7,65	233,411	8,6744	30,371	242,086	272,457	87260,7	3242,92	11354,3	101857,8
23	373,8	1,13	203,28	209,986	6,711	230,494	7,60909	14,344	238,103	252,447	86170,2	2844,66	5362,43	94377,27

U tabeli 2. se vidi se da je sveobuhvatna formula za čistu silu izvlačenja F_1 raščlanjena na dio za površinu poprečnog presjega omotača posude A_{o1} i na komponente radnog napona σ_1. Vide se izdvojene formule i kolone za poprečni presjek omotača posude $\pi d_{so1}\cdot s$, za povećanje napona vijenca zbog trenja na zaobljenoj ivici otvora matrice $e^{\mu\pi/2}$, za maksimalni radijalni napon σ_p, za napon trenja na vijencu zbog sile držača lima σ_d, za napon savijanja lima oko zaobljene ivice otvora matrice σ_s. Na kraju se u koloni N19-23 nalaze vrijednosti za čistu silu dubokog izvlačenja F_1 za svaki odabrani radni hod i svaki radijus zaobljenja, pa je F_1= 75,143 - 101,858 kN.

3.1. Radijalni naponi σ_r vijenca na početku-*a* i na kraju-*b* radnog hoda h_x

Na slici 2. su u logaritamskom mjerilu prikazani dijagrami radijalnih napona za radne hodove h_x=18, 36 i 54 mm u kombinaciji sa radijusima zaobljenja r=5, 8 i 11 mm. Prema tom prikazu na početku radnog hoda od 18 mm je σ_r=0 na spoljašnjoj ivici vijenca (D_x=D_0=208,360 mm – tačka ***a***), a upravo tad je σ_r=σ_{max}=164,01 N/mm^2 na unutrašnjoj ivici vijenca (D_x=d_{1sr}=119 mm-tačka ***c***). Na kraju radnog hoda od 18 mm je spoljašnji prečnik vijenca D_x=197,553 mm – tačka ***b*** i tu je opet σ_r=0, ali je na unutrašnjem prečniku vijenca (D_x=d_{1sr}=119 mm) σ_r=σ_{max}=148,417 N/mm^2 - tačka ***c***. Napominje se da je duž cijelog radnog hoda od 18 mm cijeli vijenac napregnut od njegove spoljašnje do unutrašnje-krajnje ivice tj. od tačke ***a*** do tačke ***c***, ali su deformacije samo od tačke ***a*** do tačke ***b***. [5].

Radijalni napon raste od periferije vijenca ka unutrašnjosti, ali se da zaključiti da je taj napon od početka pa do kraja radnog hoda od 18 mm opao na unutrašnjoj ivici vijenca sa 164,01 na 148,417 N/mm^2. Na slici 2.2. je isti radni hod, ali je radijus zaobljenja r=11 mm. Slična analiza vrijedi i za naredne slike.



Slika 2. Radijalni naponi u toku radnog hoda h_x=18 mm (1 i 2), radnog hoda h_x=36 mm (3) i radnog hoda h_x=54 mm (4 i 5)

Treba napomenuti da se maksimalni radijalni napon uvijek događa na minimalnom prečniku vijenca tj. na srednjem prečniku omotača, kad vijenac i prestaje, u ovom slučaju na d_{1sr}=119 mm. Radijalni naponi vijenaca se razlikuje zbog različitih dubina i deformacija vijenca, odnosno zbog različitog konkretnog deformacionog otpora materijala vijenca tj. uticaja hladnog očvrščavanja

5. ZAKLJUČAK

Nakon definisanja dimenzija krajnje posude sa vijencem i prečnika kružnog limenog pripremka obrascima (2.1) i (2.2) izračunati su varijabilni prečnici vijenca za tri dubine posude prema obrascima (2.3), (2.4) i (2.5). Pokazano je da se prvi dio radnog hoda kreće od početka, pa do momenta potpunog formiranja dna posude, a drugi dio od tad pa do konačne dubine posude. Dakle, granični radni hod odnosno granična dubina je $h=r+R+s$=5+14+1=20 mm, a za r=8 i 11 mm je h=23 i 26 mm. Obrasci za prvi dio radnog hoda su neuporedivo složeniji, ali upotreba Excela to relativizira.

Na osnovu svega, može se dalje na sličan način uz pomoć Excela izračunati radni napon σ_1 za prvu (u ovo slučaju i jedinu) operaciju dubokog izvlačenja. Prvo je sveobuhvatna formula za radni napon raščlanjena na komponente i korektno upisana u predviđene ćelije jezikom Excela.

Radni napon u relaciji sa poprečnim presjekom omotača posude daje čistu silu izvlačenja F_1 koja djeluje čelom izvlakača na dno posude i uvlači lim u rupu matrice. To je sve pregledno prikazano u tabeli 2. Kako je radijalni napon samo jedna od komponenti radnog napona, ta dva napona odnosno ta dva pojma treba strogo razlikovati..

U navedenoj tabeli su i vrijednosti radijalnog napona vijenca posude σ_{pd} za pet varijabilnih radijusa vijenca, tri dubine (18, 36 i 54 mm) i tri radijusa zaobljenja (5, 8 i 11 mm) na početku (ćelije C19-C23) i na kraju (ćelije N11-N15) svakog od tri radna hoda, što je prikazano na slici 2. Vidi se da je u početku radnog hoda na periferiji vijenca radijalni napon jednak nuli (tačka ***a***) i da je opet u početku radnog hoda, ali na kraju vijenca radijalni napon maksimalan (tačka ***c***). Na kraju radnog hoda opet je na periferiji vijenca radijalni napon jednak nuli, ali je pri tom na kraju vijenca radijalni napon maksimalan (tačka ***b***). Dakle, sa odvijanjem procesa povećava se dubina posude odnosno radni hod, smanjuje se prečnik periferije vijenca na varijabilni prečnik, krajnji prečnik vijenca ostaje uvijek isti i jednak je prečniku omotača posude (tačka **c**). Baš na tom prečniku je radijalni napon maksimalan. Najveća vrijednost od svih maksimalnih radijalnih napona je u početku samog procesa, izoliran od uticaja trenja i zato se on tad i zove radijalni napon čiste plastične deformacije σ_p.

U tabeli 2. (redovi 19-23) se vidi da je radni napon maksimalan kad je dubina izvlačenja 54 mm i radijus zaobljenja 5 mm (ćelija J22 i iznosi σ_1=272,457 N/mm^2) a da je baš tad i sila izvlačenja maksimalna (ćelija N22 i iznosi F_1=101,858 kN). Tad je maksimalan i radijalni napon i iznosi σ_p=205,847 N/mm^2 (ćelija C22).

6. LITERATURA

[1] Musafija B.: Obrada metala plastičnom deformacijom, Svjetlost Sarajevo, 1991.
[2] Jurković M.: Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema, Mašinski Fakultet Bihać, 1999.
[3] Pašalić S.: Modeliranje i optimizacija sila dubokog izvlačenja lima i uticaj na kvalitet i stabilnost procesa, doktorska disertacija, Tehnički fakultet Bihać, 2015.
[4] Lange K.: Lehrbuch der Umformtechnik-Band 3 Blechumformung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975.
[5] Aleksandrović S.: Sila držanja i upravljanje procesom dubokog izvlačenja -Monografija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2005.