

USPOREDBA POSTUPAKA U PROIZVODNJI METALNIH MJEHOVA I ISPITIVANJE KRUTOSTI I IZVIJANJA

Marija Stoić¹, Igor Čretni², Branko Grizelj³, Antun Stoić⁴, Maja Čuletić Čondrić⁵, Miroslav Duspara⁶

^{1,5} Sveučilište u Slavanskom Brodu, Tehnički odjel

² Spiroflex d.o.o., Rušćica

^{3,4,6} Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet

Ključne riječi: metalni mjeh, tehnologija, oblikovanje, krutost mjeha

Key words: metal bellows, technology, forming, rigidity of the bellows

Sažetak: U radu su opisani različiti postupci izrade metalnih mjehova kao glavnog dijela metalnog kompenzatora. Karakteristike mjehova odstupaju ovisno o postupku koji je korišten pri izradi jer svaki postupak ima specifične načine dobivanja konačne geometrije valova. Opisani su osnovni pojmovi i značajke potrebne za izračun krutosti mijeha, poput maksimalnog broja ciklusa, vrsta krutosti, opisi formula i koeficijenata. Napravljen je izračun krutosti i dopuštenog tlaka izvijanja i te vrijednosti su uspoređene s eksperimentalno dobivenim vrijednostima u cilju provjere odstupanja koje nastaje kao posljedica postupka oblikovanja. Na kraju je dana tablica pregleda različitih postupaka te usporedba istih s prednostima i nedostacima.

Abstract: The paper describes various methods of manufacturing metal bellows as the main part of a metal compensator. The characteristics of the bellows differ depending on the process used in the manufacture because each process has specific ways of obtaining the final wave geometry. The basic concepts and features needed to calculate bellows stiffness are described, such as maximum number of cycles, types of stiffness, descriptions of formulas and coefficients. The calculation of stiffness and allowable buckling pressure was made and these values were compared with the experimentally obtained values in order to check the deviation that occurs as a result of the forming process. At the end, a table of overviews of different procedures is given, as well as a comparison of their advantages and disadvantages.

1 UVOD

Metalni kompenzatori koriste se kao dijelovi tlačnih posuda ili cjevovoda. Metalni mijeh je osnovni dio kompenzatora, a sastoji se od paralelnih koncentričnih valova oblikovanih iz relativno tankog materijala. Ovisno o zahtjevima, na mijeh se spajaju priključci najčešće zavarivanjem, tvrdim lemljenjem, lijepljenjem i sl.

Mjehove možemo podijeliti prema načinu izrade:

- Mjehovi koje oblikujemo iz cijevi deformacijom lima poput hladnog valjanja, hidrooblikovanja, ekspaniranja.
- Mjehovi ili dijafragme koji se izrađuju rubnim zavarivanjem zasebno duboko vučenih listića lima.
- Mjehovi izrađeni elektroformiranjem, a na elektrolitički vodljivom kalupu koji se kasnije odstranjuje taloži se naslaga metala određene debljine.

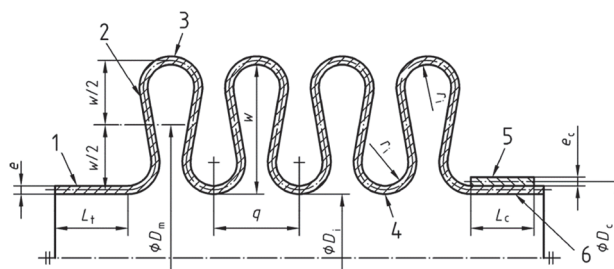
Metalni mijeh je tankostjeni fleksibilni element koji se sastoji od jednog ili više valova, a dobiva se postupkom oblikovanja metalnog cilindra u paralelne valove okomite na središnju os.

Oblik valova, broj slojeva, debljina sloja i broj valova određuju otpornost mijeha na tlak, njegovu krutost i maksimalni broj ciklusa.

Metalni mjehovi su konstruirani kako bi izdržali zadani radni tlak i temperaturu, u isto vrijeme apsorbirajući pomake i vibracije cjevovoda ili druge opreme na koju su pričvršćeni. Mogu apsorbirati tri vrste pomaka, ili kombinaciju tih pomaka:

- Aksijalni pomak
- Lateralni pomak
- Kutni pomak [1]

Na slici 1. dan je prikaz mjeha „U“ oblika, bez ojačanja između valova.



Slika 1. Mjeh „U“ oblika [2]

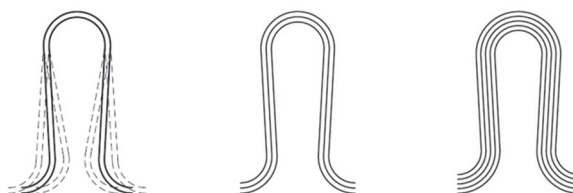
Dijelovi na slici, označeni brojevima od 1 do 5 označavaju:

- 1 - cilindrični završetak mijeha bez prstena za ojačanje
- 2 - val
- 3 - vanjski radijus vala
- 4 - unutarnji radijus vala
- 5 - prsten za ojačanje
- 6 - cilindrični završetak mijeha s prstenom za ojačanje

Za potrebe izračuna te na umetnutim slikama i dijagramima koristit će se oznake prema EJMA [3], i EN14917 [2]. Maksimalni broj ciklusa koje metalni mijeh može izdržati prije stvaranja pukotine se dobiva izračunom, a zasniva se na:

- Izračunu ekvivalentnog naprežanja dobivenog putem izračuna pojedinačnih naprežanja koja nastaju kao posljedica djelovanja tlaka i pomaka mijeha.
- Wöhlerovoj krivulji izrađenoj kroz postupak dugotrajnog cikliranja (zamaranja) različitih tipova mjehova
- Izračunu maksimalnog broja ciklusa korištenjem ekvivalentnog naprežanja i podataka iz wöhlerove krivulje, uzimajući u obzir sigurnosni faktor.

Mjehovi s većim brojem slojeva (slika 2.) imaju veću otpornost na deformacije, a time i veći broj ciklusa.



Slika 2. Prikaz vala s više slojeva [2]

Mjehovi čija je ukupna debljina slojeva jednaka debljini materijala kod jednoslojnog mjeha, imaju manju krutost, a time i veći broj ciklusa prije stvaranja pukotine.

2 KRUTOST MIJEHA

Mijeh se ponaša slično kao opruga, no njegova karakteristika nije uvijek linearna. Nelinearnost uzrokuje elastoplastično svojstvo materijala. Najčešće se radi o linearno-degresivnoj karakteristici koja je prikazana na slici 3. Karakteristika ovisi o pomaku mijeha odnosno ukoliko se radi o relativno malom pomaku, tada se može reći da je njegova karakteristika linearna (vrijedi Hooke-ov zakon) od točke A do B (stiskanje mijeha). Ukoliko se radi o većem pomaku, daljnjom kompresijom prelazimo granicu tečenja te veza između sile i pomaka više nije linearna sve do točke C.

Smanjenjem sile krivulja ponovo postaje linearna sve dok više nema djelovanja sile gdje je vidljivo kako se mijeh nije vratio u početnu točku (histereza mijeha). Za povrat mijeha u početnu poziciju potrebno je djelovati negativnom silom i produljiti mijeh.

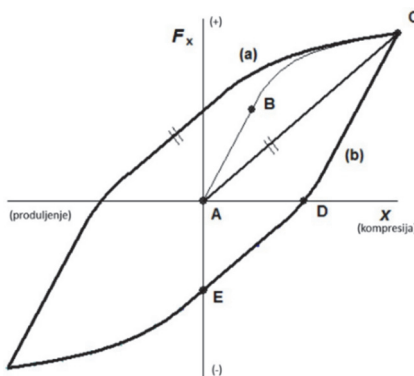
Kako bismo osigurali funkcionalnost sklopa, bitno je poznavati karakteristiku mijeha odnosno bitno je odrediti sile koje djeluju na priključku mijeha.

Krutost mijeha može biti:

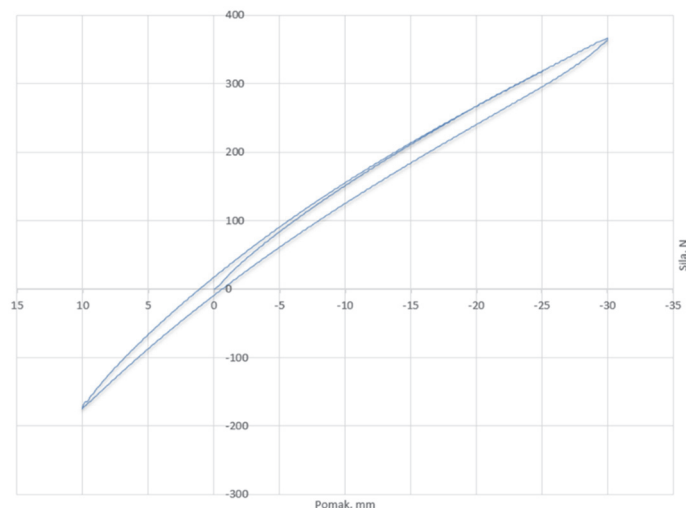
- Aksijalna elastična krutost (od točke A do B) - vrijedi samo u elastičnom području
- Efektivna krutost (od točke A do C) - ovisi o pomaku mijeha, elastično-plastično područje
- Radna krutost . temelji se na efektivnoj krutosti na koju dodatno utječe:
 - bočni kut vala
 - trenje između slojeva kada je mijeh pod tlakom

Za potrebe izračuna izvijanja mijeha uzima se aksijalna elastična krutost. Slika 4. prikazuje jednu karakterističnu krivulju koja se razlikuje za svaku geometriju vala i pomak mijeha.

Krivulje različitih mjehova razlikuju se ovisno o debljini slojeva i broju slojeva.



Slika 3. Teoretska krivulja aksijalne krutosti mijeha [2]



Slika 4. Krivulja aksijalne krutosti izmjerena na mijehu [1]

Elastična krutost jednog vala računa se prema formuli (EJMA):

$$f_{iu} = 1,7 \times \frac{D_m \times E_b \times t_p^3 \times n}{w^3 \times C_f} \quad (1)$$

gdje je:

f_{iu}	krutost jednog vala, N/mm
D_m	srednji promjer mijeha, mm
E_b	modul elastičnosti, N/mm
t_p	debljina jednog sloja lima - stanjen zbog deformacije, mm
n	broj slojeva lima
w	visina vala, mm
C_f	Andersonov koeficijent oblika

Elastična krutost mijeha računa se:

$$K_{sr} = \frac{f_{iu}}{N} \quad (2)$$

gdje je

K_{sr}	krutost mijeha
N	broj valova mijeha

Formula za izračun elastične krutosti mijeha koji se sastoji od N valova prema EN14917 [2]:

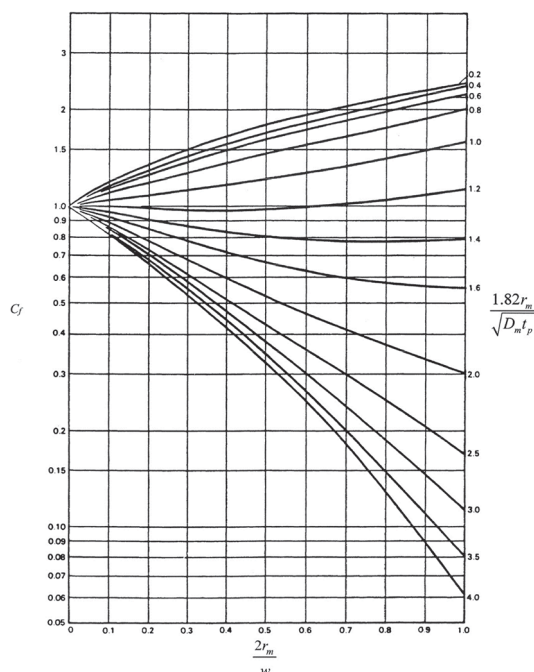
$$K_B = \frac{\pi}{2 \times (1 - \nu_B^2)} \times E_B \times \frac{n_p}{N} \times D_m \times \left[\frac{e_p^*}{w} \right]^3 \times \frac{1}{C_f} \quad (3)$$

gdje je :

K_B	krutost mijeha, N/mm
D_m	srednji promjer mijeha, mm
E_b	modul elastičnosti, N/mm
e_p^*	debljina jednog sloja lima - stanjen zbog deformacije, mm
n_p	broj slojeva lima
w	visina vala, mm

Osim modula elastičnosti bitno je napomenuti i Andersonov koeficijent C_f [3].

Izračuni mjehova zasnivaju na navedenim koeficijentima izvorno ucrtanim u dijagram, slika 5., ali su, zbog lakše obrade podataka, točke na linijama svakog koeficijenta prebačene u tablicu, slika 6.



Slika 5. Koeficijent C_f - dijagramski prikaz [3]

$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$	$\frac{2r_m}{w}$																				
	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
0.2	1.000	1.116	1.211	1.297	1.376	1.451	1.524	1.597	1.669	1.740	1.812	1.882	1.952	2.020	2.087	2.153	2.217	2.282	2.349	2.421	2.501
0.4	1.000	1.094	1.174	1.248	1.319	1.386	1.452	1.517	1.582	1.646	1.710	1.775	1.841	1.908	1.975	2.045	2.116	2.189	2.265	2.345	2.430
0.6	1.000	1.092	1.163	1.225	1.281	1.336	1.392	1.449	1.508	1.568	1.630	1.692	1.753	1.813	1.871	1.929	1.987	2.049	2.119	2.201	2.305
0.8	1.000	1.066	1.122	1.171	1.217	1.260	1.300	1.340	1.380	1.422	1.465	1.511	1.560	1.611	1.665	1.721	1.779	1.838	1.896	1.951	2.002
1.0	1.000	1.026	1.052	1.077	1.100	1.124	1.147	1.171	1.195	1.220	1.246	1.271	1.298	1.325	1.353	1.382	1.415	1.451	1.492	1.541	1.600
1.2	1.000	1.002	1.000	0.995	0.989	0.983	0.979	0.975	0.975	0.976	0.980	0.987	0.996	1.008	1.022	1.038	1.056	1.076	1.099	1.125	1.154
1.4	1.000	0.983	0.962	0.938	0.915	0.892	0.870	0.851	0.834	0.820	0.809	0.799	0.792	0.787	0.783	0.780	0.779	0.780	0.781	0.785	0.792
1.6	1.000	0.972	0.937	0.899	0.860	0.821	0.784	0.750	0.719	0.691	0.667	0.646	0.627	0.611	0.598	0.586	0.576	0.569	0.563	0.560	0.561
2.0	1.000	0.948	0.892	0.836	0.782	0.730	0.681	0.636	0.595	0.557	0.523	0.492	0.464	0.439	0.416	0.394	0.373	0.354	0.336	0.319	0.303
2.5	1.000	0.930	0.867	0.800	0.730	0.665	0.610	0.560	0.510	0.470	0.430	0.392	0.360	0.330	0.300	0.275	0.253	0.230	0.206	0.188	0.170
3.0	1.000	0.920	0.850	0.780	0.705	0.640	0.580	0.525	0.470	0.425	0.380	0.342	0.300	0.271	0.242	0.212	0.188	0.167	0.146	0.130	0.115
3.5	1.000	0.900	0.830	0.750	0.680	0.610	0.550	0.495	0.445	0.395	0.350	0.303	0.270	0.233	0.200	0.174	0.150	0.130	0.112	0.092	0.081
4.0	1.000	0.900	0.820	0.735	0.655	0.590	0.525	0.470	0.420	0.370	0.325	0.285	0.252	0.213	0.182	0.152	0.130	0.109	0.090	0.074	0.061

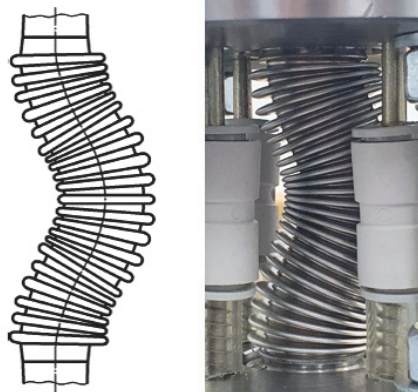
Slika 6. Tablični prikaz vrijednosti koeficijenta C_f [3]

Prekomjerni tlak ili aksijalna kompresija mogu uzrokovati nestabilnost mijeha koje mogu umanjiti njegovu otpornost na tlak, skratiti životni vijek i smanjiti fleksibilnost.

Postoje tri vrste nestabilnosti koje se uvijek moraju izbjeći:

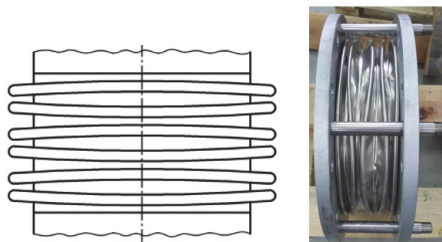
- izvijanje mijeha (unutarnji tlak)
- nestabilnost ravnine valova (unutarnji tlak)
- nestabilnost od vanjskog tlaka

Izvijanje mijeha je poprečni pomak središnjeg dijela koji rezultira zakrivljenošću središnje osi mijeha, a prikazano je na slici 7.



Slika 7. Izvijeni mijeh [1]

Nestabilnost ravnine valova je lokalno savijanje i rotacija ravnine jednog ili više valova na način da valovi više nisu okomiti na os mijeha (slika 8.). Pri povećanju tlaka dolazi do pojave nepravilnih iskrivljenja i nagiba valova, a povezano je s uzdužnim naprežanjem na savijanje i stvaranjem plastičnih zglobova na unutarnjim i vanjskim radijusima valova.



Slika 8. Nestabilnost ravnine valova [1]

2.1 Ispitivanje krutosti i izvijanja

Za eksperimentalni dio ovog rada korišteni su mjevovi s „U“ oblikom vala dobiveni deformacijom lima postupkom hladnog valjanja.

Materijal mijeha: 1.4571, prema EN 10028-7:2016 [8]

Materijal 1.4571 prema EN 10028-7 odnosno približno jednak 316Ti prema AISI (American Iron and Steel Institute) spada u grupu austenitnih nehrđajućih čelika koje odlikuje vrlo visoka duktilnost (kod tanjih limova A_{80} često iznad 55%) i čvrstoća ($R_{p1.0\%} = 270$ MPa pri 20°C).

Osim standardnih legiranih elemenata koji karakteriziraju nehrđajuće čelike poput kroma i nikla, za materijal 1.4571 bitno je napomenuti:

Molibden - povećava otpornost na koroziju u kloridnoj atmosferi

Titan - povećava otpornost na interkristalnu koroziju, pogodan za korištenje na povišenim temperaturama

Dobro je zavarljiv, ne zahtjeva predgijavanje ni toplinsku obradu nakon zavarivanja.

$D_m = 124,75$ mm ; $E_b = 200000$ N/mm² ; $t_p = 0,2379$ mm ; $n = 1$; $w = 11,50$; $c_f = 1,4066$ mm ; $N = 30$; $q = 8$ mm

Izračun krutosti i izvijanja

Najprije je napravljen izračun krutosti prema dvije norme: EJMA 10 i EN14917:2009+A1:2012 i korištenjem formula (1), (2) i (3).

Vrijednosti dobivene izračunom prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba krutosti i tlakova izvijanja [1]

	Vrijednosti dobivene izračunom	
	EJMA 10	EN14917:2009+A1:2012
K_{sr} (K_B)	8,9 N/mm	9,04 N/mm
P_{sc}	0,4 bara	1,58 bara

Ispitivanje krutosti i izvijanja

Nakon napravljenog izračuna pristupilo se eksperimentalnom dijelu gdje je mjereno stvarno izvijanje.

Manometar korišten za mjerenje tlaka izvijanja kao i mjerna ćelija na uređaju za ispitivanje krutosti, su umjereni, a rezolucije dovoljne za precizno očitavanje vrijednosti.

Naprava za ispitivanje izvijanja (Slika 9.) konstruirana je tako da se mijeh pričvrstio putem okretnih prirubnica na slijepe prirubnice vijcima te su one spregnute s 4 navojna vretena. Obzirom da se ispitivanje provodilo zrakom, daljnji lateralni pomak srednjeg dijela mijeha nakon trenutka u kojem se mijeh izvije je spriječen spregama kako ne bi došlo do prevelikog izvijanja i pucanja. (Slika 10.).



Slika 9. Mijeh prije izvijanja [4]



Slika 10. Mijeh nakon izvijanja [4]

Izmjerena krutost mijeha je 7,4 N/mm, a izmjereni tlak pri kojem je došlo do izvijanja je 2,05 bara.

Izračuni krutosti mijeha prema normama EJMA 10 i EN14917:2009+A1:2012 imaju približne rezultate. Stvarna krutost (izmjerena eksperimentom) je manja za 16,85 % od vrijednosti dobivene prema EJMA 10, odnosno za 18,14 % manja od vrijednosti dobivene izračunom prema EN14917. Ova odstupanja su prihvatljiva jer su normama predviđena standardna odstupanja od ± 30 %.

Maksimalni dopušteni radni tlak pri izračunu izvijanja (P_{sc}) ima značajno različite vrijednosti između dvije norme. Treba napomenuti da je EJMA 10 vrijednost fiksna i ne ovisi o pomaku mijeha, dok kod EN14917 P_{sc} uzima u obzir pomake. EN14917 uzima u obzir promjenu duljine tj. promjenu nastalu od plastične deformacije valova ($c_{dyn,x}$).

Tlak na kojem se mijeh prema slici 10. izvije je 2,05 bara. Nakon izvijanja mijeh je plastično deformiran toliko da se sniženjem tlaka više ne može samostalno vratiti u svoj početni položaj. Ukoliko se ručno vrati nazad, tlak na kojem se mijeh izvije je sada značajno manji. Može se reći kako je nakon izvijanja mijeh neupotrebljiv za daljnji rad.

3 POSTUPCI OBLIKOVANJA METALNIH MJEHOVA

Za eksperimentalni dio rada korišten je okrugli mijeh „U“ oblika valova te je u nastavku dan prikaz različitih postupaka izrade ovakvog oblika mijeha.

Postupci su:

1. mehaničko oblikovanje roliranjem
2. mehaničko oblikovanje ekspanzivanjem
3. hidrooblikovanje
4. oblikovanje elastomerom
5. elektro formiranje (elektrodepozicija)

Zajedničko svim postupcima proizvodnje „U“ oblika mijeha, osim elektro formiranja, je izrada početne cijevi od koje se nastavlja postupak oblikovanja valova.

Početna cijev može biti šavna ili bešavna.

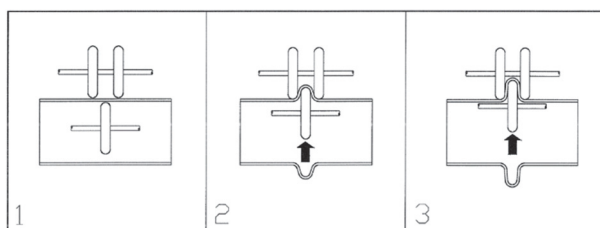
Šavna cijev se izrađuje iz lima koji se reže na potrebne duljine kako bi se oblikovao zahtijevani promjer i duljina mijeha, a koje ovise o izabranom postupku oblikovanja. Nakon rezanja lim se savija u oblik cijevi te se uzdužno zavaruje.

Osim rezanja pojedinačnih komada lima određene duljine, postoji mogućnost izrade beskonačne šavne cijevi iz beskonačne trake. Ovakva cijev se najprije zavaruje, a nakon toga reže na predviđenu duljinu. Za proizvodnju beskonačnih cijevi koriste se posebni strojevi, a najčešće se ovakav postupak koristi u velikoserijskoj proizvodnji mjehova.

Bešavna cijev izrađuje se postupkom valjanja. Osnovne tehnološke operacije su zagrijavanje sirovca, bušenje, kako bismo dobili šuplje tijelo, dogrijavanje cijevnice, valjanje cijevnice u cijev i konačno oblikovanje određenog promjera i debljine stjenke. Nekada se za izradu bešavnih cijevi koristio Pilger postupak, a danas se sve više pogona modernizira te je uvođenje kontinuiranog lijeva i kompjuterizacije postrojenja dovelo do značajnih poboljšanja kvalitete. [5]

3.1 Mehaničko oblikovanje valjanjem

Oblikovanje valjanjem radi na principu izrade pojedinačnih ili višestrukih valova na početnoj cijevi pomoću parova rotirajućih diskova (slika 11.). Diskovi su postavljeni s vanjske i unutarnje strane cijevi. Oblikovanja valova je kontrolirano, a cijev se, zbog deformacije valova, skraćuje. Cijev rotira oko vratila na kojem se nalazi unutarnji disk koji svojim gibanjem prema paru vanjskih diskova postepeno stvara ispupčenje sve do zadane visine vala.



Slika 11. Shematski prikaz oblikovanja s fiksnom osovinom [1]

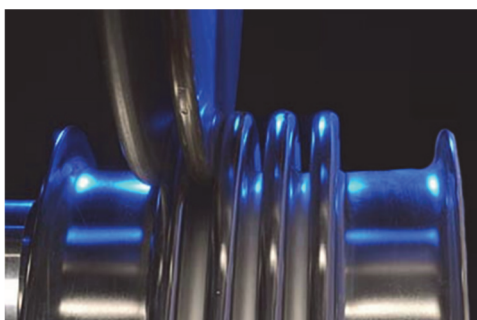
Ovim postupkom oblikovanja mogu se izrađivati mjehovi vrlo velikog raspona promjera od 15 mm do preko 5000 mm. Postupak je pogodan za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju.

Oblikovanje se najčešće izvodi kroz nekoliko operacija u kojima se postepeno dobiva konačni U-oblik vala. Na slici 12. je prikazana jedna međufazna operacija koja dodatno sužava val.



Slika 12. Međufazna operacija pri postupku oblikovanja [1]

Na slici 13. je prikazana zadnja operacija oblikovanja s jasno vidljivim U-oblikom vala.

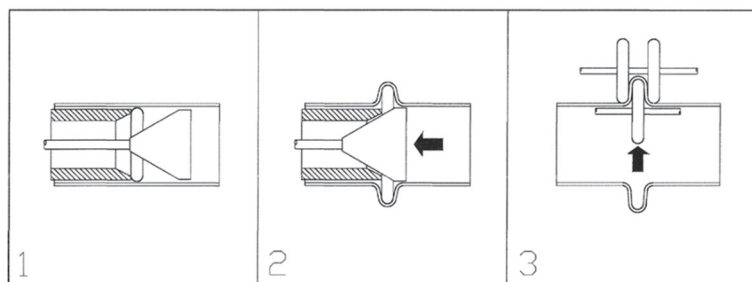


Slika 13. Završna operacija pri postupku oblikovanja [7]

3.2 Mehaničko oblikovanje ekspanzivanjem

Pojedinačni valovi se oblikuju iz cijevi ekspandirajućim unutarnjim diskom. Tijekom ekspandiranja potrebno je stupnjevito oblikovanje vala (Slika 14. i Slika 15.). Između svakog stupnja je potrebno zakretati mijeh kako bi se dobio što pravilniji oblik. Postupak se ponavlja dok se ne oblikuju svi valovi. [3]

Nakon istiskivanja je potrebno dodatno roliranje svakog vala kako bi se postigao konačni oblik.



Slika 14. Shematski prikaz mehaničkog oblikovanja ekspandiranjem [1]



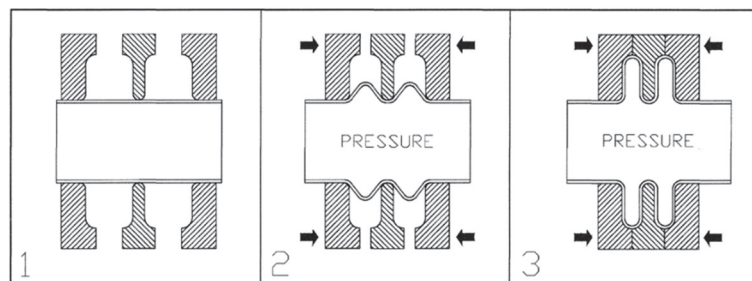
Slika 15. Oblikovanje mijeha ekspandiranjem [1]

3.3 Hidrooblikovanje vodom

Kod ovog postupka mijeh se oblikuje vodom pod relativno visokim tlakom. Vrijednosti tlaka kreću se od nekoliko desetaka bara do nekoliko stotina bara. Veličina tlaka ovisi o vrsti materijala, promjeru cijevi, debljini sloja i broju slojeva. Cijev se postavi u stroj, oko cijevi se montiraju kružni prstenovi (alati) koji su obrađeni prema odgovarajućoj konturi. Prstenovi su međusobno udaljeni uzduž cijevi na zadanu duljinu koja je otprilike jednaka razvijenoj duljini vala. Cijev se puni vodom i tlači tlakom potrebnim za početak cirkularnog tečenja materijala cijevi. Operacija oblikovanja se nastavlja simultanim cirkularnim tečenjem i kontroliranim uzdužnim skraćanjem cijevi, sve dok se ne dobije zahtijevani oblik i dimenzije.

Ukoliko je debljina stijenke cijevi velika, zbog hladnog očvršćenja može se dogoditi da nije moguće do kraja oblikovati mijeh tj. dobiti traženi promjer i oblik. Tada je moguće kao međufazu postupka pristupiti toplinskoj obradi do temperature rekristalizacije kako bi se povećala istezljivost materijala i omogućilo ponavljanje postupka.

Prikaz postupka hidrooblikovanja vodom dan je na slici 16.



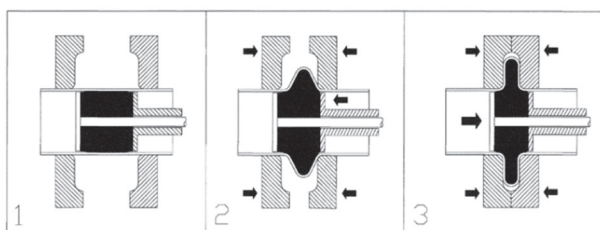
Slika 16. Shematski prikaz hidro oblikovanja [1]

Prednost hidro oblikovanja je mogućnost proizvodnje velikih serija. Svi valovi mijeha se izrađuju u jednoj operaciji što značajno smanjuje troškove. Nedostatak je velika cijena i neprilagodljivost alata za oblikovanje. Za svaku promjenu promjera mijeha ili drugih geometrijskih karakteristika potrebno je uvijek mijenjati kompletan alat. To ovaj postupak čini najmanje fleksibilnim u odnosu na druge postupke.

3.4 Oblikovanje elastomerom

Cijev se postavi na unutrašnji trn koji sadrži gumeni umetak. S vanjske strane se postave višedijelni alati koji definiraju oblik vala.

Djelovanjem aksijalne sile, guma mijenja svoj oblik i povećanjem promjera gura cijev prema van i oblikuje val. Otpuštanjem aksijalne sile na gumu, ona se vraća u početni položaj nakon čega se međusobno približavaju vanjski alati i daju valu konačan oblik. Ovim postupkom oblikujemo jedan po jedan val. Prikaz postupka je na slici 17.



Slika 17. Shematski prikaz oblikovanja elastomerom [1]

3.5 Elektroformiranje (elektro depozicija)

Elektro formiranje mjehova (slika 18.) je postupak elektro depozicije tankog sloja metal na ranije izrađeni kalup elektro platingom. Kalup se kemijskim putem otapa, te ostaje elektro platingani oblik tj. mijeh kao konačan proizvod. [6] CNC obradom mogu se proizvesti minijturni kalupi, manji od milimetra u promjeru i vrlo preciznih dimenzija.

Tijekom postupka platinga, kalup se ponaša kao katoda, dok je izvor materijala za elektro formiranje anoda. Katoda i anoda su uronjene u kupku i spojene su na izvor galvanske struje (istosmjerna električna struja). Zatvaranjem strujnog kruga na anodi metal otpušta elektrone, a kation putuje kroz otopinu do katode gdje prima elektrone i izlučuje se iz otopine (katodno taloženje). Kontrolom vremena platinga i gustoćom strujnog toka određuje se debljina elektro formiranja.

Elektro formiranje se koristi za izradu mjehova minijturnih promjera, kompleksne geometrije i visoka nepropusnosti.



Slika 18. Postupak elektroformiranja [1]

4 USPOREDBA POSTUPAKA

U tablici 2. je dana usporedba opisanih postupaka oblikovanja mjehova. Prikazane su razlike te neke specifičnosti pojedinih postupaka. Ne može se jednoznačno reći da neki postupak „bolji“ od ostalih. Svaki od navedenih postupaka može u određenom slučaju biti optimalno rješenje.

Tablica 2. Usporedba postupaka [1]

	Mehaničko oblikovanje roliranjem	Mehaničko oblikovanje ekspanzivanjem	Hidro oblikovanje	Oblikovanje elastomerom	Elektro formiranje
Promjeri oblikovanja	15mm i više	150mm i više	6 mm i više	40mm - 250mm	1mm – 200mm
Vrsta proizvodnje	pojedinačna i maloserijska	maloserijska	velikoserijska	srednje serijska do velikoserijska	pojedinačna i maloserijska
Broj slojeva	višeslojni	višeslojni	višeslojni	višeslojni	jednoslojni
Relativna krutost	smanjena	srednja	srednja	srednja	vrlo malena

5 ZAKLJUČAK

U radu je prikazan pregled postupaka oblikovanja mjehova te je napravljen dio izračuna mijeha koji može biti povezan s izborom postupka, a odnosi se na izračun krutosti i izvijanja.

Izračun pokazuje veliki utjecaj krutosti na dopušteni radni tlak kod mjehova s većim omjerom duljine i promjera zbog pojave izvijanja. Izračuni krutosti mijeha prema EJMA 10 i EN14917:2009+A1:2012 imaju vrlo slične rezultate. Stvarna

krutost (izmjerena) je manja za 16,85 % od vrijednosti dobivene prema EJMA, te za 18,14 % manja od vrijednosti dobivene EN14917 izračunom. Ova odstupanja su prihvatljiva jer su normama predviđena standardna odstupanja od ± 30 %.

Postupak oblikovanja značajno utječe na krutost mijeha, pa izbor postupka ne ovisi samo o rasponu promjera određenog postupka ili kapacitetu tj. snazi stroja, već i drugim zahtjevima koji utječu na radne karakteristike konačnog proizvoda.

Ukoliko se radi o pojedinačnoj proizvodnji optimalno je izabrati mehaničko oblikovanje roliranjem. Za velike serije treba težiti hidrooblikovanju koje omogućava jednoliku geometriju mijeha ponavljajuće kvalitete. Za minijaturne mjevove i kompleksnu geometriju izbor je sužen na elektroformiranje koje osigurava visoku nepropusnost, ali uz značajno veću cijenu i ne toliko veliku otpornost na tlak.

Može se zaključiti da osim nekih od glavnih elemenata izračuna mijeha poput otpornosti na tlak, izvijanja te dopuštenog broja ciklusa, pravilan izbor postupka oblikovanja je važan element u procesu ostvarenja zahtijevanih karakteristika metalnog mijeha.

6 REFERENCES

- [1] Čretni Igor, Tehnologija izrade metalnih mjehova, Završni rad, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Tehnički odjel, 2021.
- [2] HRN EN 14917:2009+A1:2012: Metalni ekspanzioni mijeh za tlačnu primjenu, 2012.
- [3] Expansion Joints Manufacturers Association 10: EJMA Standards, Terrytown, New York, 2015.
- [4] Metalni mjehovi i kompenzatori, Spiroflex d.o.o., Ruščica, 2010.
- [5] Mamuzić I., Devčić N., Putokazi modernizacije pilger postrojenja, Metalurgija 2007.
- [6] Electroforming Basics, Servometer, Cedar Grove, New York, 2015.
- [7] <https://www.ht-pt.com/en/press-manufacture/metal-bellow-machines/>
- [8] HRN EN 10028-7:2016-10 Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene - 7. dio: Nehrđajući čelici, 2016.