

# KOVINSKI MEHOVI V VAKUUMSKI TEHNIKI

Dr. Jože Gasperič, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

## Metal bellows in vacuum technique

### Abstract

The properties and principles of design of metal bellows for the application in vacuum technique are described. Some practical examples of calculation are added for better understanding and practical use.

### Povzetek

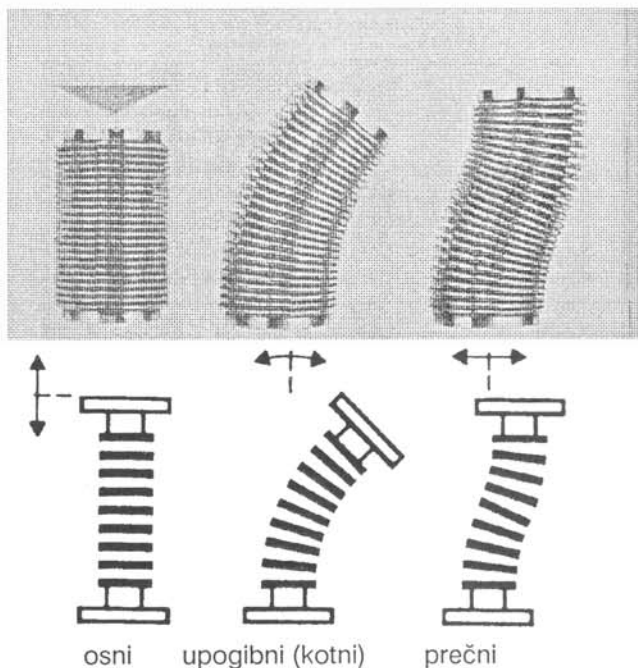
Članek obravnava kovinske mehove, njihove lastnosti ter osnove dimenzioniranja za potrebe v vakuumski tehniki. Osnove dimenzioniranja so opremljene z zgledi za boljše razumevanje oz. praktično uporabo.

## 1 Uvod

Kovinski mehovi so narebričene gibke cevi, ki jih uporabljajo predvsem v toplotni tehniki za kompenziranje temperaturnih raztezkov pri cevovodih, medtem ko imajo v vakuumski tehniki različno uporabnost, kot npr.:

- gibljive cevne povezave med posameznimi elementi zaradi mehanske prilagoditve pri montaži ali zaradi dušenja treslajev, ki jih povzročajo rotacijske črpalke in ki bi se sicer prenašali na druge dele vakuumskega sistema
- pomični element v ventilih in prenosnikih gibanja (translatorjih)
- temperaturni kompenzatorji v kriotehniki.

Poznamo več izvedbenih vrst kovinskih mehov in sicer: *navadne* (sl.1), *membranske* (sl. 2) in *miniaturne*, ki dovoljujejo različne pomike: *osne*, *upogibne* (kotne), *prečne* ter kombinacije le-teh (sl.1)



Slika 1. Osnovni pomiki kovinskih mehov

Temeljne zahteve, ki jih morajo izpolnjevati kovinski mehovi, ne glede na mesto, kjer jih uporabljamo, so: odpornost proti tlaku, vakuumska tesnost, temperaturna vzdržljivost, korozijska vzdržljivost (obstojnost), gibkost, zanesljivost in ekonomičnost ter dolga doba uporabnosti.

Materiali, iz katerih so izdelani kovinski mehovi, so predvsem avstenitna nerjavna jekla, bron ( $\text{CuSn}_6$ ), tombak ( $\text{CuZn}_{20}$ ) ter nikelj za miniaturne mehove. Poleg teh uporabljajo tudi druge materiale, predvsem zaradi posebnih lastnosti (titan, baker-berilij  $\text{CuBe}_2$  ter nikljeve zlitine: monel 400, hastelloy C-276, inconel 600, incoloy 800 oz. 825)

Seveda pa ni materiala, ki bi zadovoljil vse zahteve. Avstenitna nerjavna jekla pokrivajo veliko število potreb, bron in tombak sta "neželezna" materiala, baker-berilij ( $\text{CuBe}_2$ ) pa je zelo trd in primeren za merilne in regulacijske inštrumente zaradi velike prožnosti in majhne histereze.

V glavnem materiale za mehove hladno oblikujejo (valjanje, hidravlično stiskanje), razen miniaturnih mehov iz niklja (kemijsko oz. elektro nanašanje). Dodatna toplotna obdelava, razen za  $\text{CuBe}_2$ , ni potrebna in je celo škodljiva. Za uporabo mehov pri temperaturi nad  $500^\circ\text{C}$  vzamejo toplotno odporna ali visokotemperaturna avstenitna jekla oz. nikljeve zlitine, sicer pa titan ali čisti nikelj.

## 2 Lastnosti kovinskih mehov

### 2.1 Odpornost proti tlaku in temperaturi

Za vsak kovinski meh mora proizvajalec navesti podatek za dovoljen tlak pri temperaturi  $20^\circ\text{C}$ , ki ga imenujemo tudi referenčni tlak  $p_n$  (bar) in je empirično določen. Pri izračunih ga uporabljamo ne glede na to, ali gre za zunanje ali notranje tlake pri osno pomičnih, upogibnih (kotnih) ali prečno pomičnih mehovah ter ne glede na njihovo dolžino.

Dovoljeni delovni tlak izračunamo tako, da zmanjšamo referenčni tlak v primeru toplotnih preobremenitev (stresov), pri velikih notranjih ali zunanjih tlakih zelo dolgih mehovah ter velikih zunanjih tlakov pri upogibnih in prečno pomičnih mehovah.

Referenčni tlak  $p_n$  je, kot rečeno, podan za temperaturo  $20^\circ\text{C}$ . Če je delovna temperatura višja, moramo to upoštevati in ga pomnožiti s termičnim redukcijskim faktorjem  $k_t$ , ki je tabeliran za vsak material posebej v odvisnosti od temperature, da dobimo dovoljeni delovni tlak (za avstenitna jekla je  $k_t$  npr. 0.76 pri  $200^\circ\text{C}$ , 0.61 pri  $400^\circ\text{C}$ , ki je tudi najvišja dovoljena temperatura), medtem ko je za visokotemperaturna jekla

(700°C, max.) 0.72 pri 200°C, 0.57 pri 400°C in 0.12 pri 700°C. Najvišja dovoljena delovna temperatura za mehove iz bronca in tombaka je 250°C, za zlitino bakerberilij 200°C, za čisti nikelj pa 650°C.

Pri *dolgih* mehovih in *notranjem tlaku* je treba upoštevati še (zmanjševalni) faktor  $k_j$ , s katerim je treba pomnožiti referenčni tlak, da dobimo delovnega. Tudi ta je tabeliran [1]. Faktor  $k_j$  pada z drugo potenco glede na število reber in z naraščujočim številom letih kaj hitro pripelje do majhnih dovoljenih tlakov. Npr., pri notranjem premeru meha od 25 do 42 mm z 10 rebri je  $k_j$  enak 1, torej je notranji delovni tlak lahko kar enak referenčnemu, pri 20 rebrih je  $k_j$  le še 0.25 in je zato dovoljen notranji tlak le še četrtno referenčnega, pri 40 rebrih pa je  $k_j$  0.06.

Pri *dolgih* mehovih in *zunanjem tlaku*, kar je pri večini vakuumskih izvedb (razen pri ventilih), pa moramo upoštevati zmanjševalni faktor  $k_a$ , ki je za zgornji zglede precej bolj ugoden kot  $k_j$ , in je pri 20 rebrih:  $k_a = 0.6$ , pri 40 pa 0.44. Referenčni tlaki  $p_n$  so pri navadnih mehovih iz nerjavnega materiala, bronca oz. tombaka, ne glede na premer, razmeroma visoki (od 4 bar navzgor), zato faktorja  $k_a$  pri vakuumskih izvedbah (zunaj meha je atmosfera 1 bar, znotraj pa vakuum) z navadnimi mehovi ne bomo upoštevali, pač pa bo to potrebno za membranske in miniaturne mehove, kjer so referenčni tlaki ( $p_n$ ) 10-krat nižji;  $p_n$  od 0.4 bar navzgor, odvisno seveda od notranjega premera in materiala.

Pri vsakem mehu lahko opravimo tudi tlačni preskus. Če vzamemo 1.3-krat višji tlak od delovnega, to še ne pripelje do stalne deformacije profila reber, zmanjša pa delovno dobo uporabnosti izdelka. Visoka upornost proti tlaku pomeni tudi večjo debelino stene, kar je v nasprotju z našo željo po dolgih elastičnih pomikih oz. gibkosti, kar dovoljujejo tanjša stena. To pomankljivost lahko delno odpravimo, če uporabimo mehove, ki imajo stene, sestavljene iz več posameznih tankih plasti.

Če bi pri tlačnem preskusu povišali tlak za tri- do desetkrat nad dovoljenim, potem bi prišlo do porušitve, pred njo pa do plastične deformacije meha.

Če nameravamo mehove uporabiti kot osnovni element za merilne ali regulacijske naprave, potem sme biti obremenitev le 70% dovoljene zaradi zmanjšanja histereze, s tem pa zagotovimo dobro ponovljivost in dolgo uporabnost.

## 2.2 Odpornost proti koroziji

Temeljno pravilo je, da mora biti material, iz katerega je izdelan meh, enake kvalitete, kot je kompletna sestava oz. cevje. Standardno nerjavno jeklo je odporno proti velikemu številu korozivnih medijev, poleg tega pa ima še dolgo uporabnost.

## 2.3 Potisk

Potisk je sila, ki je definirana kot zmnožek učinkovitega preseka meha in delovnega tlaka. Ker deluje v vakuumski tehniki meh proti vakuumu (zunaj atmos-

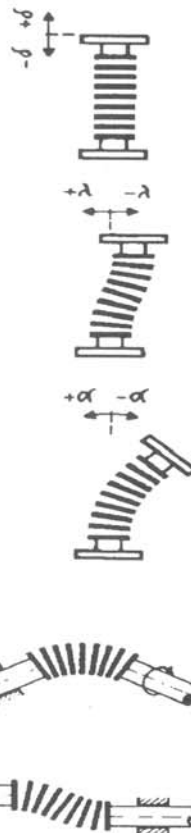
fera - znotraj vakuum) predstavlja delovni tlak tudi absolutnega. Efektivni presek meha lahko izračunamo po obrazcu:

$$a = (\pi/12)(d_1^2 + d_1d_2 + d_2^2)10^{-2} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (1)$$

pri čemer je  $d_1$  notranji premer meha (mm) in  $d_2$  zunanji (mm). Oboje velja tako za navadne kot za membranske in miniaturne mehove. Izračun potiska je pomemben za vse aplikacije z mehovi, kar bomo predstavili v enem od zgledov.

## 2.4 Elastičnost in načini gibanja

Kovinski mehovi so gibljivi do različnih stopenj in se zaradi zunanjih sil in momentov gibljejo osno, upogibno (kotno) ali prečno (zmično) oz. kombinirano.



Vsakemu od teh načinov gibanja, ki jih povzročajo zunanje sile, nasprotujejo notranje, imenovane *deformacijska upornost*, ki je sorazmerna zunanji obremenitvi, dokler ta ostane v mejah elastičnosti. Sorazmernostni faktor imenujemo *vzmetnost*.

Navadni kovinski in membranski mehovi imajo svojo glavno elastičnost v osni smeri. To izrabljamo v največ primerih uporabe. Največjo trajnost imajo, če izkoristimo njihovo osno gibljivost v obeh smereh: kot raztezek (+δ) in stisk (-δ). Simetrična porazdelitev gibanja v obeh smereh (50/50%) omogoča največje število gibov.

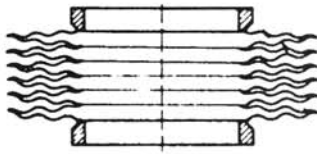
Za membranske mehove (sl. 2) pa je najbolj ugodno, če je raztezek 20% (+δ) in stisk 80% (-δ).

Enako kot za navadne kovinske mehove pri osnem gibanju velja tudi za prečno in upogibno, kjer pa je često potrebno vgraditi "prednapete" mehove.

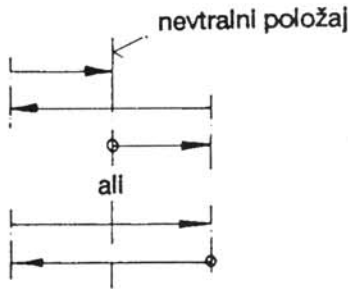
Mehovi lahko prenašajo tudi rotacijska gibanja, s tem pa majhna zvijanja, istočasno izravnavaajoč osne, prečne in upogibne neravnosti.

## 2.5 Trajnost mehov

Trajnost kovinskega meha je podana s številom gibov do prve netesnosti (leak), pri čemer smatramo gib premik v obe smeri ter vračanje v začetni položaj (sl.3) Če so tlaki in elastične deformacije v mejah dopustnosti, mora vsak meh vzdržati najmanj 10.000 gibov pri "hladni" obremenitvi in pravilni vgradnji. Število gibov do porušitve pa je navadno mnogo večje.



Slika 2. Shematski prikaz membranskega meha



Slika 3. Smeri gibanja meha pri enem gibu

Na trajnost oz. delovno dobo vplivajo: temperatura, amplituda elastičnega odklona, delovni tlak, (mehanska) prednapetost (razporeditev elastičnega gibanja), frekvenca obremenjevanja. Poleg teh pa zmanjšujejo trajnost nedovoljeni dejavniki, katerih učinek ni mogoče izračunati, kot npr. tlačni valovi, toplotni udari, korozija, nestrokovna vgradnja ipd.

Vakuumske črpalke povzročajo tresenje (pulzacije), hitro delujoči ventili pa tlačne sunke. V takih primerih priporočajo proizvajalci sestavljene ali večstenske mehove.

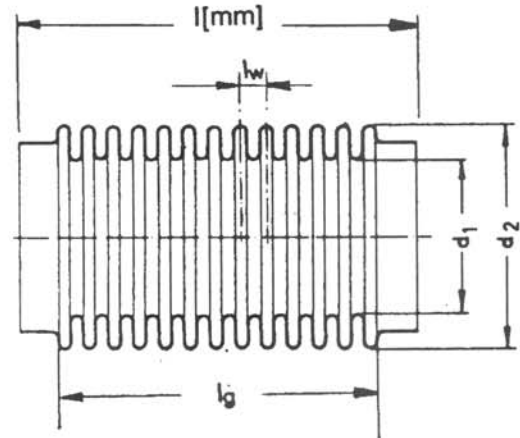
**2.6 Preskus kvalitete**

Za vsak namen uporabe obstajajo različni preskusi kvalitete mehov. Za vakuumiste je še najbolj pomembna vakuumska tesnost. Enostavna metoda, s katero lahko ugotavljamo netesnosti do  $10^{-4}$  mbarl/s, je z nadtlakom (meh, napolnjen z zrakom do nadtlaka 1 bar, potopimo v vodo in opazujemo morebitno izhajanje mehurčkov), kar je sicer dovolj dobra metoda za elemente, ki jih vgrajujemo v grobovakuumske dele vakuumskega sistema, sicer pa moramo uporabiti helijev detektor netesnosti. Netesnost mora biti manjša od  $1 \times 10^{-9}$  mbarl/s.

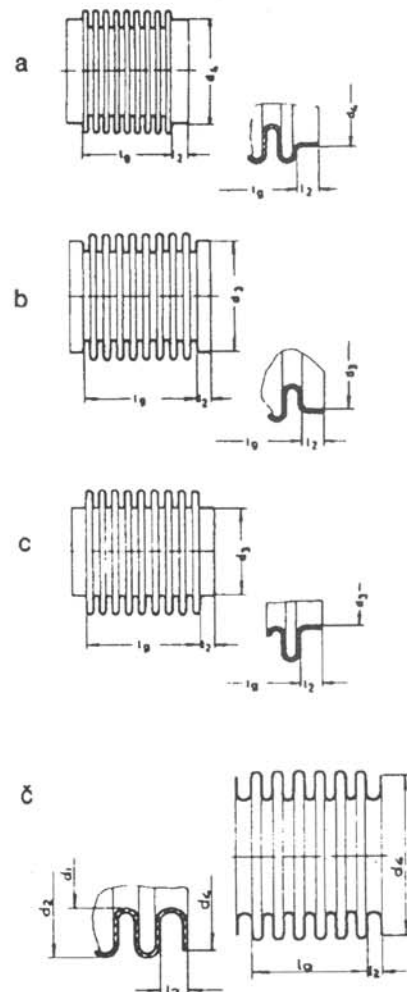
**3 Dimenzioniranje mehov**

Kovinske mehove izdelujejo le specializirana podjetja, zato je potrebno, da pred naročanjem ugotovimo, kakšne dimenzije in druge lastnosti mora imeti meh, da bo zadovoljil naše zahteve, pri čemer si pomagamo s proizvajalčevim katalogom. Določiti moramo material (npr. nerjavno jeklo z oznako proizvajalca), število sten, zunanji ( $d_2$ ) ali notranji premer ( $d_1$ ) v mm (sl.4)\*, število reber  $n_w$  (dolžina enega rebra,  $l_w$ , je razdalja med središči dveh zunanjih zgibov oz. med grebenoma) in dolžina narebričenja  $l_g$  [mm], pri čemer je  $l_g = n_w l_w$  oz.  $n_w = (l_g / l_w)$ . Dolžina narebričenja pa še

ni celotna dolžina meha. Upoštevati moramo še dolžino končnikov, katerih oblika pa je tudi pomembna zaradi prigradnje prirobnic. Najbolj običajne so tri vrste standardnih oblik končnikov ter posebna vrsta, primerna za varjenje, ki jih prikazuje sl. 5. Od proizvajalca moramo torej zahtevati primerno obliko končnika, njegovo dolžino  $l_2$  ter zunanji ( $d_4$ ) oz. notranji premer ( $d_3$ ). Pomemben podatek pri naročilu je celotna dolžina meha  $l$  (mm).



Slika 4. Shema navadnega kovinskega meha



Slika 5. Razne vrste končnikov pri navadnih mehovah

Da bi lahko pravilno pripravili naročilo, moramo poznati vse navedene dimenzije, najprej pa moramo izračunati število reber  $n_w$ . Pri osnem gibanju meha lahko uporabimo obrazec:

$$n_w = (\delta_b / \delta_n) , \quad (2)$$

pri čemer je  $\delta_b$  zahtevana celotna dolžina giba (oz. hoda; v obe smeri glede na nevtralno lego) kompletnega kovinskega meha in  $\delta_n$  nominalna dolžina osnega giba enega rebra oz. elastična deformacija enega rebra.\*\*

#### Zgled 1:

Za premikanje predmetov v vakuumskem sistemu potrebujemo dolžino celotnega hoda osnega manipulatorja 50 mm ( $\delta_b$ ). Glede na konstrukcijo smo izbrali notranji premer kovinskega nerjavnega enostenskega meha 27 mm (zunanji premer 41 mm). Iz tabele v Opombi 2 dobimo  $\delta_n = 0.54$ . Celotni gib enega rebra je torej  $2 \times 0.54 = 1.08$  mm;  $n_w = (\delta_b / \delta_n) = 50 / 1.08 \approx 46$ . Potrebujemo torej meh s 46 rebri, dolžino narebričenja  $l_g = n_w \times l_w = 46 \times 3.1 = 142.6$  mm. Vzamemo standardni končnik po sl. 5c z  $d_3 = 27$  mm in  $l_2 = 8$  mm. Celotna dolžina meha  $l = 8 + 142.6 + 8 \approx 162$  mm.

Analogni obrazec lahko uporabimo, če je gibanje upogibno (kotno). Število reber je  $n_w = (\alpha_b / \alpha_n)$  oz.  $\alpha_g = \alpha_n \times n_w$ , pri čemer je  $\alpha_g$  dovoljeni,  $\alpha_b$  pa zahtevani kot upogiba celotnega meha in  $\alpha_n$  dovoljeni kot upogiba enega rebra (v kotnih stopinjah).

#### Zgled 2:

Iz prejšnjega zgleda ( $n_w = 46$ ;  $\alpha_n = \pm 1.5$ ) lahko izračunamo dovoljeni odklon (upogib) meha v eno smer  $\alpha_g = 46 \times 1.5 = 69^\circ$  oz.  $138^\circ$  v celoti.

Če je gibanje prečno, pa je obrazec za izračun števila reber  $n_w$  takle:

$$n_w = \sqrt{\frac{\lambda_b}{\lambda_n}} \quad \text{oz.} \quad \lambda_g = \lambda_n \cdot n_w^2 \quad (3)$$

Pri čemer je  $\lambda_b$  zahtevana,  $\lambda_g$  pa dovoljena dolžina prečnega giba meha,  $\lambda_n$  pa normalna dolžina giba enega rebra.

#### Zgled 3:

Iz prvega zgleda lahko izračunamo prečen gib našega meha:

$$\lambda_g = 0.018 \times 46^2 = \pm 38 \text{ mm} ,$$

to pomeni skupni prečni gib  $2 \times 38 \text{ mm} = 76 \text{ mm}$

Pri vakuumskih ventilih uporabljamo kovinske mehove tudi kot vzmetna peresa. Vzmetnost je navadno podana za eno rebro v N/mm za nateg (+) ali stisk

oz. tlak (-). Le-ta pada obratnosorazmerno s številom reber. Osnova sila narašča sorazmerno z dolžino osnega giba:

$$C_{\delta g} = (C_{\delta} / n_w) \text{ [N/mm]} , \quad (4)$$

pri čemer je  $C_{\delta g}$  [N/mm] vzmetna sila celotnega meha,  $C_{\delta}$  pa enega rebra.

#### Zgled 4:

Vsi podatki iz prejšnjih zgledov;  $C_{\delta} = 66 \text{ N/mm}$  (iz tabele)

$$C_{\delta g} = 66 / 46 = 1.43 \text{ N/mm}$$

Če bi torej vzeli meh iz 1. zgleda, ki ima možnost celotnega stiska 25 mm (in prav toliko natega; skupaj 50 mm), bi bila v končni, stisnjeni legi sila na podlago (ustje ventila)  $1.43 \times 25 \approx 36 \text{ N}$ . In še vprašanje! Ali bi lahko ventil odprli proti atmosferi? Odgovor: Če bi ročico zaprtega ventila premaknili nazaj v nevtralno lego, bi bila vzmetna sila meha enaka nič, vendar bi nanj pritiskala še sila zaradi tlačne razlike (atmosfere-vakuum) z okoli 90 N (Po enačbi 1 je efektivna presečna ploskev meha  $9.2 \text{ cm}^2$ ). Tudi če bi z ročico ventila napeli ventil v nasprotno smer (za 25 mm od nevtralne lege), ventila ne bi mogli odpreti.

Za kombinirano gibanje meha, npr. osno in upogibno (kotno), dobimo celotno število reber enostavno tako, da seštejemo števili reber za osne gibe  $n_w \delta$  in upogibne  $n_w \alpha$ , torej:

$$n_w = n_w \delta + n_w \alpha .$$

Pri prenosu rotacijskega gibanja nastopi v mehu torzijski moment. Dopustni torzijski moment celotnega meha  $m_{rzB}$  je obratno sorazmerno s številom reber, torej:

\* Opomba 1: Razmerje med notranjim ( $d_1$ ) in zunanjim premerom ( $d_2$ ) je 0.6 ali več, optimalno 0.65 [1]

\*\* Opomba 2: Nekaj podatkov za enostenske mehove iz nerjavnega jekla [1]

$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$l_w$ (mm)	$\delta_n$ (mm)	$\alpha_n$ (°)	$\lambda_n$ (mm)	$C_{\delta}$ (N/mm)
8	13	1.4	$\pm 0.15$	$\pm 1.3$	$\pm 0.006$	140
10	17	1.7	$\pm 0.28$	$\pm 1.8$	$\pm 0.011$	50
16	24	2	$\pm 0.33$	$\pm 1.6$	$\pm 0.011$	60
22	34	2.8	$\pm 0.49$	$\pm 1.65$	$\pm 0.014$	84
27	41	3.1	$\pm 0.54$	$\pm 1.5$	$\pm 0.018$	66
33	50	4	$\pm 0.7$	$\pm 1.6$	$\pm 0.023$	38
38	56	4	$\pm 0.74$	$\pm 1.5$	$\pm 0.023$	80
42	60	4.3	$\pm 0.8$	$\pm 1.5$	$\pm 0.023$	90
51.4	71	4.6	$\pm 0.9$	$\pm 1.4$	$\pm 0.021$	160
60	82	5	$\pm 1.1$	$\pm 1.5$	$\pm 0.024$	140

$$m_{\tau z B} = m_{\tau z} \times (1/n_w) \text{ [Nm]}$$

pri čemer je  $m_{\tau z}$  dovoljen torzijski moment za eno rebro (tabelirano v /1/).

#### Zgled 5:

Vsi podatki iz prejšnjih zgledov ( $n_w = 46$ ,  $d_1 = 27$  mm,  $d_2 = 41$  mm). Iz tabele /1/ dobimo, da je dovoljen torzijski moment za eno rebro  $m_{\tau z} = 3.7$  za celotni meh pa le:  $m_{\tau z B} = (3.7/46) = 0.08$  Nm, odgovarjajoči kot zasuka pa je:  $\alpha = 0.04 \times 46 = 1.84^\circ$ , kar velja za enostenski nerjavni ali bronasti meh. Dvostenski meh lahko prenese približno dvakrat večji torzijski moment, tristenski pa trikrat večjega kot enostenski.

#### 4 Sklep

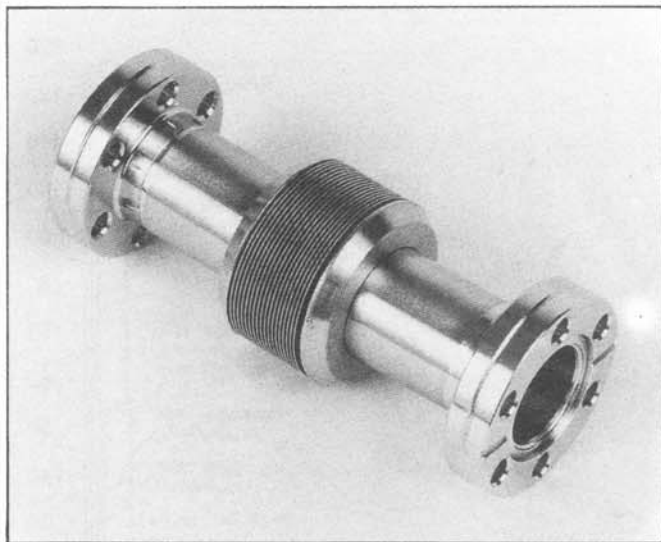
Kovinske mehove lahko s pridom uporabljamo v vakuumski tehniki kot gibljive cevne povezave med posameznimi vakuumskimi elementi, v ventilih in pri

prenosnikih gibanja ter v vakuumski kriotehniki. Gibljivi so v vseh smereh: osno, upogibno, prečno in kombinirano. Za strokovno ravnanje z njimi je potrebno poznavanje lastnosti in način dimenzioniranja in naročanja. Kovinske mehove, ki so različnih vrst (navadni, membranski, miniaturni), moramo opremiti z ustreznimi standardiziranimi prirobnicami. O načinu spajanja mehov s prirobnicami pa morda v drugem članku, kasneje.

#### 5. Literatura

- /1/ Metal bellows, Hydra Handbook no.441 E, Witzenmann GMBH, Pforzheim 1987
- /2/ Servometer, Miniature metal bellows and electroforms, Servometer Co., N.J.

## Gibke kovinske cevi z vakuumskimi priključki



S specialnimi postopki varjenja (TIG, mikroplazma, laser) izdelujemo vakuumske posode s pripadajočimi priključki in armaturami. Na standardne mehove iz nerjavnega jekla privarimo prirobnice tipa KF, LF ali CF iz ustreznega materiala. Glede na zahteve lahko prilagodimo dolžino cevi in obliko priključnih kosov. Vsi izdelki so preizkušeni na tesnost s helijevim leak detektorjem.