

## Výpočet skořepiny tlakové nádoby.

Václav Slaný  
BS design Bystřice nad Pernštejnem

### Úvod

Indukční průtokoměry mají ve své podstatě svařovanou konstrukci základního tělesa. Její pevnost se musí posuzovat jako netopená tlaková nádoba podle ČSN EN 13445 - NETOPENÉ TLAKOVÉ NÁDOBY [1],[2],[3]. V žádném případě se neposuzuje jako trubka, i když svou konstrukcí se trubce silně přibližuje a často z ní vychází. Sama konstrukce je specifická provedením a volbou materiálu. Trubky pro svařence průtokoměrů DN 15 až DN 250 jsou bezešvé nebo švové-svařované, dodávané obchodní organizací od hutního výrobce. Trubky DN 300 až DN 2000 jsou vyráběny skružením plechu a podélným svařením styčné hrany pevnostním svarem tvaru "V". Uprostřed trubky na protilehlých stranách jsou vyvrtány dva otvory pro elektrody měřících sond. Mimo zadání jmenovité světlosti a jmenovitého tlaku průtokoměru je nutné uvést teplotu kapaliny, která bude průtokoměrem měřena. Tento údaj se mění ve veličinu výpočtové teploty.

### Volba materiálu

Všechny trubky jsou vyrobeny z materiálu DIN 1.4301. Jedná se o ocel austenitickou, která koresponduje s výběrem v [1]. Mechanické hodnoty materiálu pro výpočet lze převzít z evropských norem [6], [7], [8]. Měly by být pro základní teplotu a výpočtovou teplotu materiálu, aby se dala vypočítat hodnota dovoleného napětí materiálu. Jestliže norma neobsahuje konkrétní mechanické hodnoty materiálu podle výpočtové teploty, tyto musí být stanoveny lineární interpolací mezi dvěma sousedními hodnotami. Takto získané hodnoty se nesmí zaokrouhlovat.

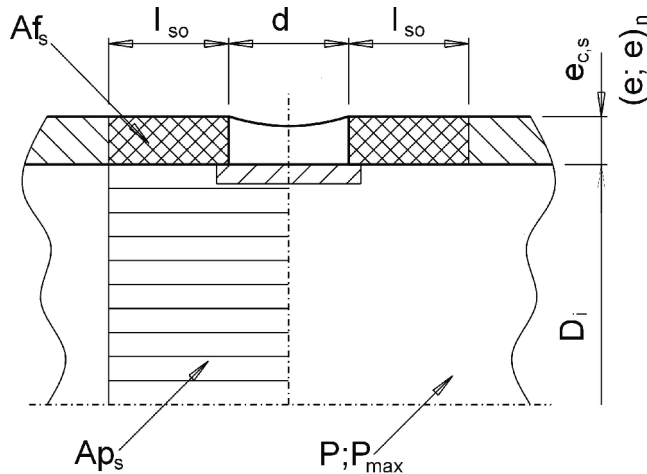
Příklad veličin s hodnotami pro výpočet (převzat z [6]):

-minimální mez pevnosti materiálu při 20 °C	$R_{m/20}=540$ Mpa
-minimální mez pevnosti materiálu při 150 °C	$R_{m/150}=357$ Mpa
-minimální mez kluzu materiálu při 20 °C	$R_{p1,0/20}=260$ MPa
-minimální mez kluzu materiálu při 150 °C	$R_{p1,0/150}=172$ MPa

Podle [3] je třeba svařenec indukčního průtokoměru zařadit do některé ze zkušebních skupin, které určují příslušnou úroveň nedestruktivního zkoušení svarových spojů podle typu svarových spojů a technologie svařování. Typ řídicího spoje (podélný svar trubky) je určující pro zařazení svařence do zkušební skupiny 3 (článek 6.6 a tabulka 6.6.1-1). Podle tohoto zařazení je třeba mimo 100% vizuální kontroly svaru provádět také minimálně u 10% délky svaru kapilární zkoušku propustnosti a u 10% délky svaru kontrolní zkoušku ultrazvukem nebo prozařováním (tabulky 6.6.2-1, 6.6.3-1 a příloha A). Hutní výrobce švových svařovaných trubek by měl určit podle výše zmíněných kritérií, do které zkušební skupiny trubky zařadit, nebo přímo uvést hodnotu součinitele svarového spoje (z). Pokud není výrobcem uvedeno, platí hodnota součinitele svarového spoje (z) uvedená v [2] (čl. 5.6) a [5]. Při pochybách posouzení se volí vždy hodnota menší (na stranu bezpečnosti).

## Výpočet skořepiny

Matematický model vzorového výpočtu, který je zpracován podle citované ČSN EN [2], vychází z metodiky výpočtu a hodnotami vypočtených veličin a jejich porovnáním spolehlivě zobrazí splněné respektive nesplněné podmínky správné volby tloušťky stěny trubky pro skořepinu průtokoměru. Na obrázku č. 1 jsou zachyceny vztahy jednotlivých veličin. Obrázek je převzat z [2]. Pro zjednodušení platí pojem skořepina stejně jako trubka, protože skořepinu průtokoměru tvoří v podstatě trubka.



Obrázek č. 1 Válcová skořepina s osamoceným otvorem.

## Metodika výpočtu

Válcová skořepina (trubka) je zatížena vnitřním tlakem.

Podmínka platnosti výpočtu podle [2] (čl. 7.4.1) je splněna, když poměr tloušťky stěny trubky k jejímu vnějšímu průměru není větší než 0.16 ( $e/D_e < 0.16$ ). Na základě předběžného porovnání vnějších průměrů trubek k tloušťkám stěny, používaných u výrobců indukčních průtokoměrů, výpočet podle citované normy platí pro všechny uvažované trubky průtokoměrů.

Výpočtem podle [2] se stanoví:

1) Požadovaná (minimální) tloušťka stěny trubky ( $e$ ) (vzorec 7.4-1)

$$e = (P \times D_i) / (2 \times f \times z - P) \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

kde:  $f = f_d$  . . . . . dovolené napětí v tahu (MPa) (čl. 6 a tabulka 6-1)

vztahené k výpočtové teplotě ( $t$ );  $f_d = R_{p1,0t} / 1.5$

$P$  . . . . . výpočtový tlak v trubce (MPa)

$D_i$  . . . . . vnitřní průměr trubky (mm)

$z$  . . . . . součinitel svarového spoje (čl. 5.6 a tabulka 5.6-1)

Výsledná hodnota tohoto vzorce vyjadřuje minimální tloušťku stěny trubky bez přídavku na nepřesnost výroby trubky (hutní tolerance tloušťky stěny =  $c_1$ ) a přídavku na opotřebení stěny trubky vlivem koroze ( $c_2$ ). Tolerance tloušťky stěny trubky od hutního dodavatele je  $\pm 10\%$ . Tolerance tloušťky plechu, ze kterého se trubky stáčí, je závislá na jmenovité tloušťce plechu a pohybuje se od 10% (tl. 3 až 4 mm) po 4% (tl. 25 mm). Tyto údaje jsou převzaty z [4]. Podmínka správnosti výpočtu je splněna, když jmenovitá tloušťka stěny trubky ( $e_n$ ) je větší než součet požadované (minimální) tloušťky stěny ( $e$ ),

přídavku na toleranci tloušťky stěny a přídavku na opotřebení stěny trubky. Pro trubku z materiálu DIN 1.4301 bude platit  $c_2=0$ .

$$e_n > e + c_1 + c_2 \quad (2)$$

Splněním podmínky je dokázáno, že trubka o tloušťce stěny podle uvedeného vzorce vyhovuje po stránce pevnosti zadanému tlaku, při zadané hodnotě dovoleného napětí použitého materiálu. Nemusí však vyhovět, jestliže se do její stěny vyvrtají osamocené otvory.

## 2) Pravidla pro vyztužování (čl. 9.5.2)

Vyztužený otvor ve stěně trubky (skořepině) je definován dle čl. 9.2.5 jako – cituji – “otvor, u kterého je vyztužení provedeno skořepinou, hrdlem, výztužným límcem nebo výztužným prstencem“. V případě trubek průtokoměrů přichází vyztužení přirozenou cestou tj. zvětšením tloušťky stěny trubky (skořepiny) oproti předešlé výpočtem stanovené minimální tloušťce. Je to dáno i technologickou potřebou při výrobě.

Toto vyztužování jmenovitou tloušťkou stěny trubky ( $e_n$ ), od níž se odečtou přídavky  $c_1$  a  $c_2$  (výsledkem je  $e_{c,s}$ ), se bude posuzovat podle obrázku 9.4-1. Je nutno upozornit, že otvor je zaslepený namontovanou elektrodou sondy.

Vyztužující délka ( $l_{so}$ ) (vzorec 9.5-2)

$$l_{so} = ((D_i + e_{c,s}) \times e_{c,s})^{0,5} \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

kde:  $D_i$  . . . . . vnitřní průměr trubky (mm)  
 $e_{c,s}$  . . . . . předpokládaná tloušťka stěny (mm) ( $e_{c,s} = e_n - c_1 - c_2$ )

Nosná plocha příčného průřezu ( $A_{fs}$ ) (vzorec 9.5-19 a 9.5-20)

$$A_{fs} = e_{c,s} \times l_{so} \quad (\text{mm}^2) \quad (4)$$

Plocha zatížená tlakem ( $A_{ps}$ ) (vzorec 9.5-22). Tento vzorec se mění vzhledem k zaslepení otvoru na ( $A_s$ ) (vzorec 9.5-23)

$$A_{ps} = A_s = r_{is} \times (l_{so} + 0,5 \times d) \quad (\text{mm}^2) \quad (5)$$

kde:  $r_{is} = D_i/2$  . . . vnitřní poloměr křivosti trubky (skořepiny) v místě středu otvoru (mm)  
 $d$  . . . . . průměr kolmého otvoru ve stěně trubky (mm)

Podle pravidel pro vyztužování (čl. 9.5.2) se použije vzorec (9.5-7), který se upraví pro aplikaci dle obrázku 9.4-1.

$$A_{fs} \times (f_s - 0.5 \times P) > P \times A_{ps} \quad (\text{N}) \quad (6)$$

kde:  $f_s = f_d$  . . . . . dovolené napětí v tahu (MPa)  
 $P$  . . . . . výpočtový tlak v trubce (MPa)

Takto upravená levá strana rovnice uvádí sílu, kterou odolá trubka (skořepina) s kolmým zaslepeným otvorem síle od vnitřního tlaku kapaliny (uvedené pravou stranou rovnice) v místě vyvrtného otvoru. Srozumitelnějším je porovnání výpočtového tlaku

v trubce ( $P$ ) a maximálního tlaku ( $P_{\max}$ ), který snese trubka v místě vyvrtaného otvoru. Tak vznikne podmínka

$$P_{\max} > P$$

K výpočtu veličiny  $P_{\max}$  se použije vzorec (9.5-10) upravený pro aplikaci dle obrázku 9.4-1.

$$P_{\max} = A f_s \times f_s / (A p_s + 0,5 \times A f_s) \text{ (MPa)} \quad (7)$$

Pro získání hodnoty maximálního zkušební tlaku se veličina  $f_s$  nahradí veličinou  $f_{\text{test}}$ . Pro tu platí součinitel bezpečnosti materiálu 1.05 (čl. 6.3.2). Zkoušení svařenců průtokoměrů u výrobce se provádí při teplotě 20 °C, proto i minimální mez kluzu bude určena pro tuto teplotu. ( $f_{\text{test}} = R_{p1,0/20} / 1.05$ )

$$P_{\text{test}} = A f_s \times f_{\text{test}} / (A p_s + 0,5 \times A f_s) \text{ (MPa)} \quad (8)$$

Podle [3] (čl. 10.2.3.3.1) nesmí být zkušební tlak při standardní hydraulické zkoušce ( $P_t$ ) nižší, než stanoví vzorec (10.2.3.3.1-2) a [5].

$$P_t = 1,43 \times P_s \text{ (MPa)} \quad (9)$$

kde:  $P_s$  . . . . . nejvyšší dovolený tlak (MPa), v případě svařenců průtokoměrů shodný s výpočtovým tlakem ( $P$ )

Tlaková zkouška se řídí pokyny podle [3] článku 10.2.3, které byly zahrnuty do [5].

## Shrnutí

Touto metodikou výpočtu trubky průtokoměru se zaslepeným kolmým otvorem uprostřed stěny trubky jsou vyvolány dvě základní podmínky:

$$e_n > e + c_1 + c_2 \quad \text{a} \quad P_{\max} > P$$

Splněním obou podmínek je prokázána správná volba tloušťky stěny trubky pro svařenec průtokoměru, kterou provedl výrobce. Jejich nesplnění pak upozorní výrobce na nutnost změny tloušťky (zesílení) stěny, pokud nechce jít do rizika poruchy z titulu menší pevnosti trubky (skořepiny) svařence průtokoměru.

Nad rámec [2] je pro informaci výpočtem určen deformační a destrukční tlak při výpočtové teplotě. Jejich překročením hrozí za podmínek výpočtové teploty trvalá deformace respektive roztržení trubky. Pro výpočet deformačního tlaku je použit již upravený vzorec (9.5-10), v němž dovolené napětí  $f_s$  je nahrazeno minimální mezí kluzu  $R_{p1,0/t}$  podle výpočtové teploty.

$$P_a = A f_s \times R_{p1,0/t} / (A p_s + 0,5 \times A f_s) \text{ (MPa)} \quad (10)$$

Pro výpočet destrukčního tlaku je použit již upravený vzorec (9.5-10), v němž dovolené napětí  $f_s$  je nahrazeno minimální mezí pevnosti  $R_{m/t}$  podle výpočtové teploty.

$$P_b = A f_s \times R_{m/t} / (A p_s + 0,5 \times A f_s) \text{ (MPa)} \quad (11)$$

## Závěr

Vzorový výpočet v příloze tohoto textu je výstupem z výpočtového programu, který je zpracován podle již dříve zmíněného matematického modelu. Respektováním výpočtu je zaručeno, že nedojde k poruše skořepiny vnitřním tlakem, případně k její deformaci. Bude tak dodrženo [5] a konstrukce průtokoměru bude po stránce pevnosti skořepiny odpovídat všem podmínkám evropské normy i současným zákonným předpisům.

## Literatura:

- [1] ČSN EN 13445-2 Netopené tlakové nádoby - materiály
- [2] ČSN EN 13445-3 Netopené tlakové nádoby – Konstrukce a výpočty
- [3] ČSN EN 13445-5 Netopené tlakové nádoby – Kontrola a zkoušení
- [4] ČSN 42 5315 Plechy z ocelí třídy 17, válcované za tepla
- [5] Nařízení vlády č. 26/2003 sb. - Technické požadavky na tlaková zařízení
- [6] EN 10028-7 Plechy a pásy-korozivzdorná ocel, austenitická
- [7] EN 10216-5 Bezešvé trubky- korozivzdorná ocel, austenitická
- [8] EN 10217-7 Svařované trubky- korozivzdorná ocel, austenitická

**TRUBKA PRŮTOKOMĚRU**

Výpočet platí pro trubku zatíženou vnitřním tlakem, bez vyztužení okraje kolmého a zaslepeného otvoru.

Zadání:

Jmenovitá světlost průtokoměru DN **300** PN **16**

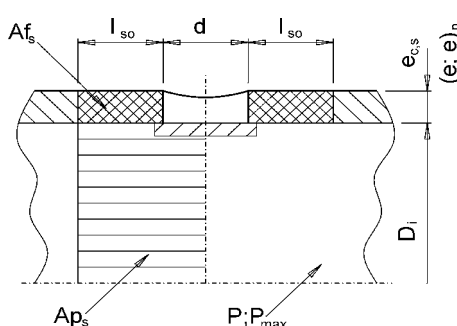
Trubka s kolmým a zaslepeným otvorem ve stěně

Provedení trubky: skružením z plechu

Materiál trubky:	DIN 1.4301		
Mez kluzu při výpočtové teplotě	$R_{p1,0/t} =$	172,0	MPa
	$z =$	0,70	
Součinitel bezpečnosti materiálu		1,50	
Vnitřní průměr trubky	$D_i =$	310,0	mm
Jmenovitá tloušťka stěny trubky	$e_n =$	4,0	mm
Jmenovitý průměr kolmého otvoru	$d =$	8,0	mm
Přídavek na nepřesnost stěny	$c_1 =$	0,4	mm
Přídavek na korozi stěny trubky	$c_2 =$	0,0	mm
Nejvyšší dovolený tlak v trubce	$P_s =$	1,6	MPa
Výpočtový tlak v trubce	$P =$	1,6	MPa
Výpočtová teplota	$t =$	150	°C

Výpočet:

Materiál trubky: dovolené napětí  $f_d = f_s =$  114,7 MPa



Požadovaná tloušťka stěny  $e =$  3,1 mm

Předpokládaná tloušťka stěny  $e_{c,s} =$  3,6 mm

Maximální přípustný tlak v trubce  $P_{max} =$  2,35 MPa

Nejnižší zkušební tlak při 20 °C  $P_t =$  3,02 MPa

Maximální zkušební tlak při 20 °C  $P_{test} =$  5,07 MPa

Deformační tlak při výpoč. teplotě  $P_a =$  3,52 MPa

Destrukční tlak při výpoč. teplotě  $P_b =$  7,32 MPa

Doplňující údaje pro kontrolu:

Maximální vyztužující délka  $l_{so} =$  33,60 mm

Nosná plocha příčného průřezu  $A_{f_s} =$  120,96 mm<sup>2</sup>

Plocha zatížená tlakem  $A_{p_s} =$  5842,40 mm<sup>2</sup>

Podmínka:

$e_n > e + c_1 + c_2$  výpočet podmínice **VYHOVUJE**

$P_{max} > P$  výpočet podmínice **VYHOVUJE**

Poznámka:

Mez kluzu ( $R_{p1,0/t}$ ) je stanovena s ohledem na výpočtovou teplotu ( $t$ ) dle EN 10027-7

Požadovaná tloušťka stěny ( $e$ ) a maximální přípustný tlak v trubce ( $P_{max}$ ) platí při výpočtové teplotě

Nejnižší zkušební tlak při 20 °C ( $P_t$ ) lze chápat jako smluvní nebo katalogový údaj

Výpočet provedl: Slaný Václav

Zpracováno dle ČSN EN 13445:2003

BS design Bystřice nad Pernštejnem

Dne: 12.3.2009

Objekt výpočtu: Matematický model pevnosti trubky průtokoměru

List: 1

**TRUBKA PRŮTOKOMĚRU DN 300 PN 16**

Listů: 1