



ANALYTICKO – POROVNÁVACÍ NÁVRH VYSOKO ZAŽŤAŽENÝCH MATERIÁLOV PRE VÝROBU TLAKOVÝCH NÁDOB Z KOMPOZITOV

ANALYTICAL COMPARING PROPOSAL OF HIGH LOAD MATERIALS FOR PRESSURE TANK COMPOSITES

Peter RUMAN - Marián HURAJT – Tomáš JEZNÝ

Abstract

The core of is the design of a hydrogen pressure vessel suitable for high pressure of approximately 75MPa. One of goals is to design a vessel from materials whose strength will meet mechanical requirements in regard to analytical, as well as numerical calculations. In order to achieve that objective, the simulation model of the designed pressure and subsequent comparison and evaluation of the calculations used to determine its dimensioning. Another objective is to design pressure vessel in regard to safety and weight requirements. Since it is necessary to bear in mind that the vessel in question is a portable one, designed as a car fuel tank, common materials used to manufacture such vessels, including their weight parameters compared with the suggested alternative.

Keywords

Pressure Vessel, Pressure, Strength, Carbon Fiber, Stress, Composite.

Úvod

Pri výbere volíme pre porovnanie materiálov z hľadiska pevnosti a hmotnosti navrhovanej nádoby. Ako prvým navrhovaným materiálom pre výrobu kompozitného materiálu je vysokopevnostná zliatina hliníka podľa euronormy AW-7075 (AW-AlZn5,5MgCu) a porovnávacím materiálom je legovaná ocel triedy STN EN 15121

1. Návrh nádoby z hliníka AW-7075

Pre dimenzovanie tlakovej nádoby si zvolíme vysokopevnostný hliník rady 7000 AW-7075 (AW-AlZn5,5MgCu), ktorý má medzu klzu $Re = 503\text{MPa}$ a medzu pevnosti v ťahu $Rm = 572\text{MPa}$. Táto rada hliníka sa s zvyšujúcou hrúbkou plechu na výrobu potrebného valcového lubu tlakovej nádoby znižuje, preto budeme navrhovať aj čo najnižšiu možnú prípustnú hrúbku materiálu. Vysokopevnostný hliník ma veľmi dobré mechanické vlastnosti predurčujú materiál 7075 na širokú oblasť použitia. Je potrebné upozorniť, že od hrúbky materiálu nad 80 mm sa pevnosť jadra z výrobných dôvodov postupne znižuje. Používa sa pri strojných súčiastiach so zvýšeným namáhaním pri menších hrúbkach použitého materiálu.[2]

Základný návrh tlakovej nádoby

$L = 1000\text{ mm}$, $Di = 350\text{ mm}$ (svetlý priemer bez hrúbky steny nádoby), vnútorný pretlak $p_1 = 75\text{MPa}$.



Ostatné veličiny dostaneme v priebehu ďalšieho výpočtu ako sú hrúbky stien tlakovej nádoby, ktoré získame z pevnostných výpočtov.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vysokopevnostného hliníka AW-7075 [2]

Youngov modul pružnosti	E = 71,7 GPa
Pevnosť v ťahu	Re = 572MPa
Medza klzu	Rm 503 MPa
Ťažnosť	0,33 %
Hustota	2 810 kg/m ³

Tab. 2 Zloženie zliatiny vysokopevnostného hliníka[2]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr + Ti	iné
0,40	0,50	1,2 - 2,0	0,30	2,1 - 2,9	0,18 - 0,28	5,1 - 6,1	0,20	0,15
* Hliník a bežné nečistoty tvoria zvyšok								

Výpočet dovoleného napätia

Dovolené namáhanie pri výpočte tlakových nádob podľa medzných stavov pre farebné kovy, kde patrí aj hliník a jeho zliatiny sa pre prevádzku určuje podľa vzťahu

$$\sigma = \eta \cdot \frac{R_e}{n_T} \quad (1)$$

Opravný koeficient pre dovolené namáhanie pre η je rovný 1.

$$\sigma_D = 1 \cdot \frac{503}{1,5} = 335,33 \text{ MPa}$$

Výpočet tlakovej nádoby z hliníka metódou hrubostenných nádob

Potrebnú hrúbku steny určíme z podmienky pevnosti z podmienky teórie najväčších napätí podľa Guesta, kde po vyjadrení dostaneme r_2 zo vzťahu

$$\frac{2p_1 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \leq \sigma_D \quad (2)$$
$$r_2 \geq \sqrt{\frac{\sigma_D \cdot r_1^2}{\sigma_D - 2p_1}}$$

po dosadení navrhovaných hodnôt bude:

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{335,33 \cdot 175^2}{335,33 - 2,75}} = 235,4 \text{ mm} = 235 \text{ mm.}$$



Hrúbka steny nádoby je potom

$$h_{Als} = r_2 - r_1 \quad (3)$$

$$h_{Als} = 235 - 175 = 60 \text{ mm.}$$

2. Návrh nádoby z Cr - Mo ocele

Pre druhý alternatívny návrh tlakovej nádoby si zvolíme žiaruvzdornú chróm-molybdénovú ocel' triedy 15 121 STN 41 5121, ktorá má medzu klzu $R_e = 350 \text{ MPa}$ a medzu pevnosti $R_m = 450 \text{ MPa}$.

Výpočet dovoleného napätia

Výpočty sa prevádzajú takým istým spôsobom ako pri výpočte hliníka len s tým rozdielom, že pri výpočte ocele postupujeme s mechanickými vlastnosťami daného materiálu.

$$\sigma_D = 1 \cdot \frac{350}{1,5} = 233,34 \text{ MPa}$$

Výpočet tlakovej nádoby z hliníka metódou hrubostenných nádob

Výpočet realizujeme rovnako ako pri hrubostenných nádobách hliníka zo vzťahu

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{233,34 \cdot 175^2}{233,34 - 2,75}} = 292,82 \text{ m} = 293 \text{ mm.}$$

Porovnanie zvolených materiálov

V nasledujúcej tabuľke si porovnáme na základe hustoty materiálov pri konkrétnom návrhu tlakovej nádoby vypočítame hmotnosti valcových lubov, keďže sa jedná o mobilnú nádrž ako zásobník paliva pre automobil. Táto hmotnosť vykazuje hmotnosť zatiaľ ako jednostennej tlakovej nádoby.

Tab. 3 Porovnanie hmotnosti materiálov

Navrhovaný materiál	Dovolené napätie σ_D	Hustota materiálu	Potrebná hrúbka steny nádoby	Hmotnosť lubu
Hliník AW-7075 (AW-AlZn5,5MgCu)	335 MPa	2810 kg/m ³	60 mm	59,01 kg
Cr - Mo ocel'	233 MPa	7850 kg/m ³	118 mm	324,2 kg

Z navrhovaných materiálov je jasné, že najvhodnejším materiálom pre základnú tlakovú nádobu budeme ďalej vo výpočtoch uvažovať z **hliníkom AW-7075**, kde hlavnými výhodami



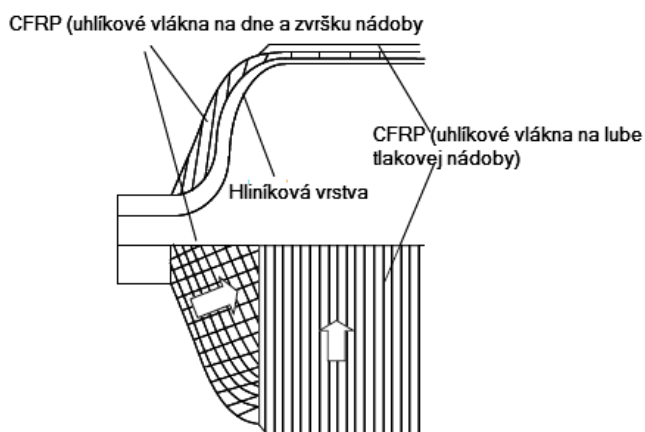
je z mechanických vlastností dovolené napätie, ktoré je vyššie pri podstatne 5 – násobne nižšej hmotnosti navrhovaného materiálu.

Určenie najväčších napätí podľa HMM teórie

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3} = \sqrt{\left[\frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_2^2}{r_2^2 + r_1^2} \right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{(p_1 - p_2) \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]^2} \leq \sigma_D \quad (4)$$
$$\sqrt{\left[\frac{75 \cdot 175^2 - 0.235}{235^2 + 175^2} \right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{(75 - 0) \cdot 235^2}{235^2 - 175^2} \right]^2} = 306,2 \text{ MPa}$$

$306,2 \text{ MPa} \leq 335,33 \text{ MPa}$ podmienka je splnená.

3. Návrh zložitej nádoby z kompozitných materiálov s uhlíkovými vláknami



Tieto materiály nám ponúkajú väčšiu tuhosť a pevnosť ako ktorékoľvek ostatné kompozity, sú však oveľa drahšie ako napr. kompozitné materiály spevnené sklenenými vláknami. Kontinuálne vlákna v polyesterovej alebo epoxidovej matrici dávajú najlepšie vlastnosti.

Obr. 1 Vrstvenie kompozitnej nádoby

Tab. 4 Mechanické vlastnosti epoxid – uhlíkových vlákien (CFRP) [2]

Youngov modul pružnosti	$E = 150 \text{ GPa}$
Pevnosť v ťahu	$R_e = 1\,050 \text{ MPa}$
Medza klzu	$R_m = 1\,050 \text{ MPa}$
Ťažnosť	0,32 – 0,35 %
Hustota	$1\,600 \text{ kg/m}^3$



Určenie dovoleného napätia uhlíkových vlákien sa vyjadrí obdobne ako v prípade hliníkovej zliatiny a nízko uhlíkovej ocele zo vzťahu (7)

$$\sigma_{Deuv} = 1 \cdot \frac{1050}{1,5} = 700 \text{ MPa}$$

V nasledujúcom kroku si určíme hrúbku uhlíkových vlákien, kde vychádzame z jednotlivých hrúbky nádoby z hliníka.

$$r_3 \geq \sqrt{\frac{\sigma_{Deuv} \cdot r_2^2}{\sigma_{Deuv} - 2p_{12}}} \quad (5)$$

$$r_3 \geq \sqrt{\frac{700 \cdot 204^2}{700 - 2 \cdot 38,75}} = 216,33 \text{ mm} = 217 \text{ mm}.$$

Pomerný tlak p_{12} vypočítame z hrúbky samotnej hliníkovej nádoby

$$p_{12} = 38,75 \text{ MPa}$$

Z tohto vzťahu vyplýva, že navrhovaná hrúbka epoxid - uhlíkových vlákien (CFRP) je

$$h_{euv} = r_3 - r_2 \quad (6)$$

$$h_{euv} = 217 - 204 = 13 \text{ mm}$$

Redukované napätie podľa HMM

Redukované napätie nám uvádza konečné prípustné zaťaženie vnútornej kompozitnej nádoby, ktoré musí spĺňať podmienku dovoleného napätia.

$$\sigma_{red}^{HMH} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 + \sigma_o^2 - (\sigma_r \cdot \sigma_t + \sigma_t \cdot \sigma_o + \sigma_o \cdot \sigma_r)} \quad (7)$$

$$\sigma_{red}^{HMH} =$$

$$\sqrt{(-75)^2 + 158,01^2 + 41,5^2 - [(-75) \cdot 158,01 + 158,01 \cdot 41,5 + 41,5 \cdot (-75)]}$$

$$\sigma_{red}^{HMH} = 201,79 \text{ MPa}$$

$$201,79 \text{ MPa} \leq 335 \text{ MPa}$$

V nasledujúcej tabuľke je porovnanie tlakových nádob z navrhnutého hliníka a nízko legovanej chróm molybdenovej ocele.

Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.

Tab. 5 Porovnanie hmotností pri rovnakých mechanických vlastnostiach



Vrstva tlakovej nádoby	Útvarová časť tlakovej nádoby	Kompozitná tlaková nádoba z vysokopevnostného hliníka (navrhovaná)	Kompozitná tlaková nádoba z nízko uhlíkovej ocele (porovnávacia)
I. Vrstva nádoby (Al, Cr–Mo)	Lub tlakovej nádoby	28,52 kg	98,91 kg
	Dno a zvršok tlakovej nádoby	36,89 kg	132,6 kg
II. Vrstva nádoby (CFRP)	Lub tlakovej nádoby	8,48 kg	8,77 kg
	Dno a zvršok tlakovej nádoby	11,58 kg	12,24 kg
Celková hmotnosť kompozitnej nádoby		85,47 kg	252,52 kg

Záver

V príspevku spomínané materiály nám ponúkajú väčšiu tuhosť a pevnosť ako ktorékoľvek ostatné kompozity, sú však oveľa drahšie ako napr. kompozitné materiály spevnené sklenenými vláknami. Kontinuálne vlákna v polyesterovej alebo epoxidovej matrici dávajú najlepšie vlastnosti. Porovnali a vypočítali sme a to na základe hustoty materiálov pri konkrétnom návrhu tlakovej nádoby hmotnosti valcových lubov, keďže sa jedná o mobilnú nádrž ako zásobník paliva pre automobil. Táto hmotnosť vykazuje hmotnosť zatiaľ ako jednodennej tlakovej nádoby. Redukované napätie nám uvádza konečné prípustné zaťaženie vnútornej kompozitnej nádoby, ktoré musí spĺňať podmienku dovoleného napätia. Z redukovaného napätia je známe, že napätie vyvolané v tlakovej nádobe zodpovedá návrhu rozmerov a voľbe materiálu.

Kľúčové slová

Tlaková nádoba, tlak, pevnosť, uhlíkové vlákno, dovolené napätie, kompozit.

Príspevok bol pripravený v rámci riešenia grantového projektu OP VaV ITMS 26220220028 Implementácia a modifikácia technológie na znižovanie výskytu síníc v stojatých vodách.



Použitá literatúra

- [1] František Trebuňa, František Šimčák: Odolnosť prvkov mechanických sústav. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2004., 980s., ISBN 9788080731489,
- [2] František Trebuňa, Vladimír Jurica, František Šimčák: Pružnosť a pevnosť II. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2002., 318s., ISBN 8071653640,
- [3] Ondráček E., Vrbka J., Janíček P.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. VUT v Brně.

Kontakt

Ing. Peter RUMAN, Ing. Marián HURAJT, Ing. Tomáš JEZNÝ
TU, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky
Park Komenského 8, 042 00 Košice
peter.ruman@tuke.sk, marian.hurajt@tuke.sk, tomas.jezny@tuke.sk.