

VLIV VÝROBNÍCH IMPERFEKČÍ NA STABILITU TENKOSTĚNNÉ SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE

Petr PAŠČENKO

*Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, ulice Studentská 95, 532 10 Pardubice, ČR,
e-mail: petr.pascenko@upce.cz*

Abstrakt

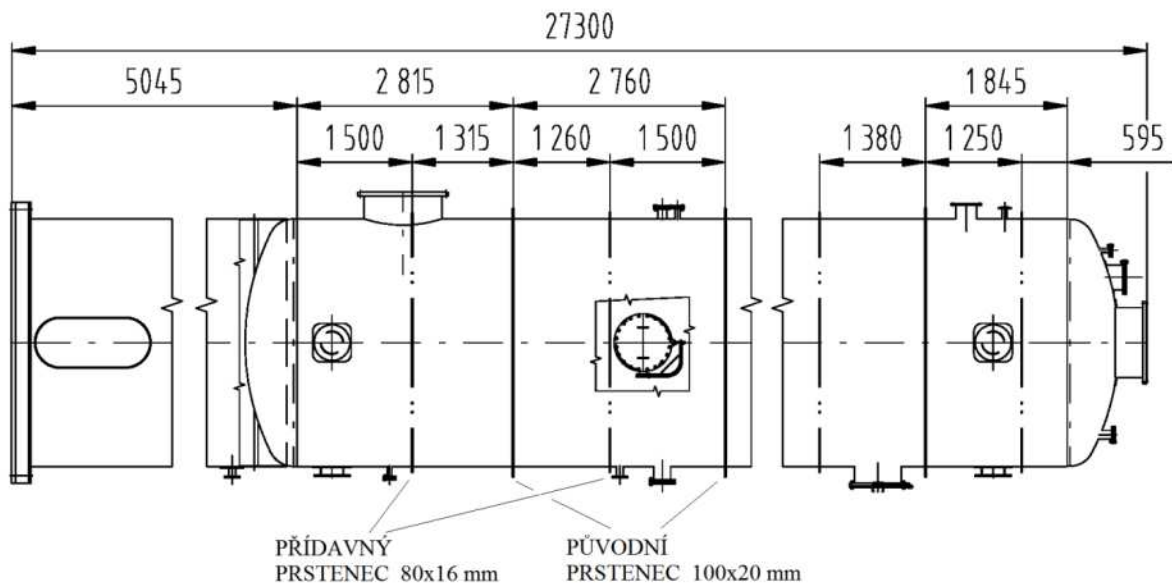
Práce se zabývá analýzou stability tenkostěnné skořepinové konstrukce - vertikální nerezové nádrže - s výraznými výrobními imperfekcemi. V rámci tohoto článku je provedena podrobná výpočtová MKP analýza stability středové části válcového pláště nádrže na maximální vnější přetlak 0,1 MPa (vakuum). Při počítačové simulaci daného problému jsou uvažovány analýzy LBA, GMNA, GMNIA. Při výpočtech jsou uvažovány vlivy jednotlivých konstrukčních dílů na celkové vlastnosti konstrukce. Je proveden odhad tvaru boulení válcového pláště a kontrola stability válcového pláště. Z provedených výpočtů vyplývá, že stabilitu tenkostěnné skořepinové konstrukce s nadměrnými imperfekcemi je třeba ověřit numericky. Z porovnání výsledků numerické nelineární analýzy a výpočtu podle Evropského doporučení ECCS vyplývá téměř dvojnásobný rozdíl v bezpečné odolnosti nádrže proti ztrátě stability. To znamená, že v tomto případě by respektování výsledků podle ECCS mohlo být výrazně na straně nebezpečné a vést v krajním případě i k havárii konstrukce. Důležitým faktorem při ztrátě stability je afinita tvaru stabilitního boulení reálné (imperfektní) skořepiny k přirozenému tvaru boulení ideální skořepiny. Výpočtovou simulací s využitím lineární a nelineární analýzy ideální skořepiny vyplývá rozdíl v počtu obvodových vln v okamžiku ztráty stability. Bylo zjištěno, že se nemění u konstrukce v průběhu ztráty stability tvar boulení, tzn. počet obvodových vln. Navzdory tomu je pro zabezpečení spolehlivosti výsledků zcela nezbytné při řešení ztráty stability pláště nádrže s nadměrnými imperfekcemi provést opakovaně nelineární analýzu imperfektní konstrukce GMNIA pro počáteční imperfekce s různým počtem obvodových vln

Úvod

Článek je zaměřen na zkoumání vlivu nadměrných počátečních imperfekcí tvaru na stabilitu středové oblasti válcového pláště **vertikální nerezové nádrže** zatížené vnějším přetlakem. U nádrže došlo v průběhu výroby, transportu a stavby ke vzniku nadměrných imperfekcí tvaru. Imperfekce se zde vyskytují zejména v podobě úhlovitosti hran svarových spojů, lokálních prohlubní, ovality průřezu, popř. zvlnění pláště ve více obvodových vlnách. Je třeba analyzovat nejen vliv hloubky imperfekcí, ale i afinitu jejich tvaru k přirozenému tvaru stabilitního hroucení předemné konstrukce. Na základě výsledků analýz jsou formulovány obecnější závěry. Problém je převzat z výzkumně-vývojové zprávy [1].

1. Stručný popis problému

V rámci tohoto článku je řešena stojatá válcová nerezovou nádrž (mat. 1.4571) o průměru $\phi 3,2\text{ m}$ a celkové výšce $27,3\text{ m}$ (výška včetně podstavce z obyčejné uhlíkové oceli). Válcový plášť nádrže tloušťky 12 mm je na spodním okraji opatřen klenutým dnem tloušťky 12 mm a na horním okraji klenutým víkem tloušťky 8 mm . Schéma nádrže v horizontální poloze je uvedeno na obrázku 1.



Obr. 1: Schéma nerezové nádrže.

V průběhu výroby, transportu a stavby nádrže došlo na válcovém plášti ke vzniku *nadměrných imperfekcí tvaru*. Imperfekce se vyskytují zejména v podobě úhlovitosti hran svarových spojů, lokálních prohlubní, ovality průřezu (2 obvodové vlny) popř. zvlnění pláště ve více obvodových vlnách. Na základě měření imperfekcí je třeba ve výpočtových analýzách vzít v úvahu obvodové vlny o amplitudě $w_{0max} = \pm 20$ mm. Tato hodnota může být ještě zvýšena o vliv vnějších sil a momentů do hrdla DN500. Na obrázku 2 je uvedena fotografie válcového pláště předmětné nádrže s typickou imperfekcí tvaru.



Obr. 2: Imperfekce tvaru ve formě obvodových vln.

V rámci tohoto článku je provedena podrobná výpočtová MKP analýza stability středové části válcového pláště nádrže na maximální vnější přetlak 0,1 MPa (vakuum). Přídavné osově zatížení od vlastní tíhy nádrže je zanedbáno. Jsou

uvažovány imperfekce ve tvaru ovality a více obvodových vln. Pokud se konstrukce ukáže jako nevyhovující, bude navrženo dodatečné vyztužení obvodovým prstencem s opětovnou výpočtovou verifikací stabilitní únosnosti.

2. Výpočtová analýza stávajícího stavu

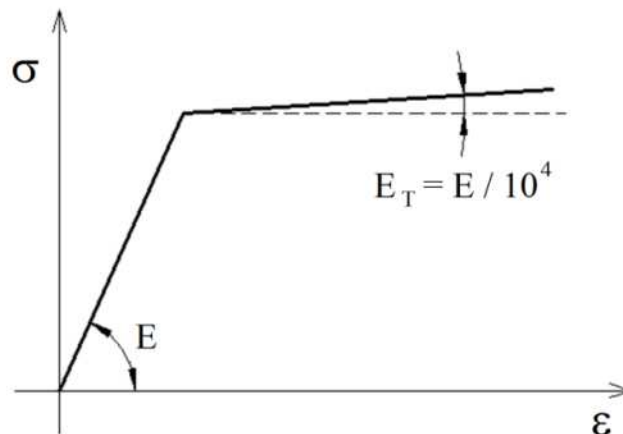
V následujícím textu je provedena výpočtová MKP analýza stability válcového pláště s nadměrnými imperfekcemi tvaru. Na základě výsledků měření geometrie nádrže byly na válcové skořepině zjednodušeně definovány tři typy tvarových imperfekcí:

- 2 obvodové vlny (ovalita skořepiny),
- více obvodových vln (zvlnění skořepiny).

a to s maximální naměřenou amplitudou $w_{0max} \approx \pm 20 \text{ mm}$. Tuto hodnotu je třeba nyní korigovat o vliv vnějších sil a momentů působících do hrdel, neboť tyto vnášejí do válcové skořepiny nádrže přídatné ohybové namáhání. Ohybové namáhání má obdobný dopad na stabilitu skořepiny, jako mají počáteční imperfekce tvaru, viz lit. [2]÷[7]. Při počítačové simulaci daného problému jsou uvažovány následující analýzy:

- LBA – lineární bouřící analýza ideální skořepiny,
- GMNA – geometricky a materiálově nelineární analýza ideální skořepiny,
- GMNIA – geometricky a materiálově nelineární analýza reálné skořepiny,

kde za ideální skořepinu se zde pokládá skořepina bez počátečních imperfekcí tvaru a za reálnou skořepinu skořepina s počátečními imperfekcemi tvaru. Jiné typy imperfekcí než geometrické, rozšířené o vliv vnějšího zatížení do hrdel, lze v tomto případě považovat za druhotné a nejsou tedy v analýzách zohledněny. U materiálově nelineárních analýz je pro jednoduchost uvažován von Misesův bilineární model chování materiálu s tangenciálním modulem $E_T = E/10^4$ (viz obrázek 3).

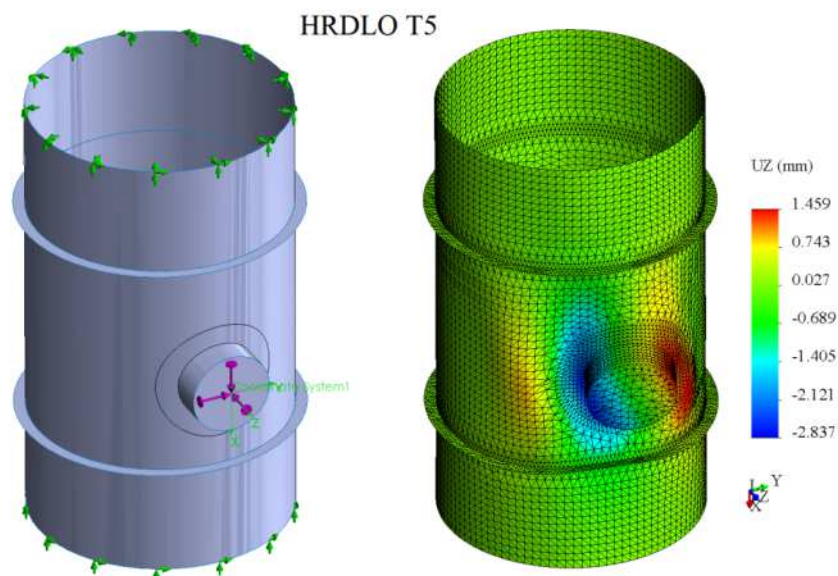


Obr. 3: Nelineární pružně-plastický model chování materiálu (Von Misesův bilineární model).

2.1 Analýza tuhosti pláště v oblasti hrdla DN500

Cílem této analýzy je zjistit, jaký vliv na stabilitu válcového pláště mají přídatné síly do hrdel. Zjištěné počáteční imperfekce tvaru vnášejí do válcového pláště ohybový stav. To samé platí i o vnějších silách a momentech do hrdel. V následujícím textu jsou porovnány maximální posuvy pláště v okolí hrdla od vnějších sil a momentů s maximálními naměřenými výrobními imperfekcemi. K tomu

účelu je v programu COSMOSWorks 2010 [9] sestaven prvkový výpočtový model (viz obrázek 4).



Obr. 4: Podíl vnějších sil do hrdla DN500 na deformaci válcového pláště.

Výpočtový model reprezentuje část nádrže s hrdlem DN500. Model je sestaven z 16899 skořepinových trojúhelníkových prvků SHELL. Modelu jsou přiřazeny materiálové charakteristiky z tab. 1. Na hrdlo působí soustava sil a momentů od potrubní trasy. Hodnoty sil a momentů jsou uvedeny v tabulce 2 a jsou vztaheny k lokálnímu kartézskému souřadnému systému hrdla na obrázku 4. Horní i spodní okraj modelu jsou kloubově uloženy.

V pravé části obrázku 4 se nachází deformovaný výpočtový model s vykreslenými posuvy U_z ve směru osy hrdla. Z číselné stupnice je zřejmé, že maximální posuv dovnitř nádrže činí $U_{zmax} = -2,837 \text{ mm}$. Na základě tohoto výsledku jsou v následujících výpočtových analýzách uvažovány korigované imperfekce se zvýšenou hodnotou amplitudy $w_{0max} = \pm 25 \text{ mm}$ oproti původní naměřené hodnotě $w_{0max} = \pm 20 \text{ mm}$. Tím by měl být dostatečně zohledněn přídavný vliv vnějších sil a momentů hrdel na stabilitu válcového pláště nerezové nádrže.

Tab. 1: Materiálové charakteristiky – mat. 1.4571, $t \leq 75 \text{ mm}$

T [°C]	E [MPa]	R _{p1,0} [MPa]	R _m [MPa]
20	2,000E+5	260	520
200	1,847E+5	196	520

Tab. 2: Zatížení do hrdel

HRDLO	SÍLY A MOMENTY DO HRDEL					
	F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
DN500	30	30	±83	50	100	100

2.2 Výpočtová analýza stability středové oblasti nádrže

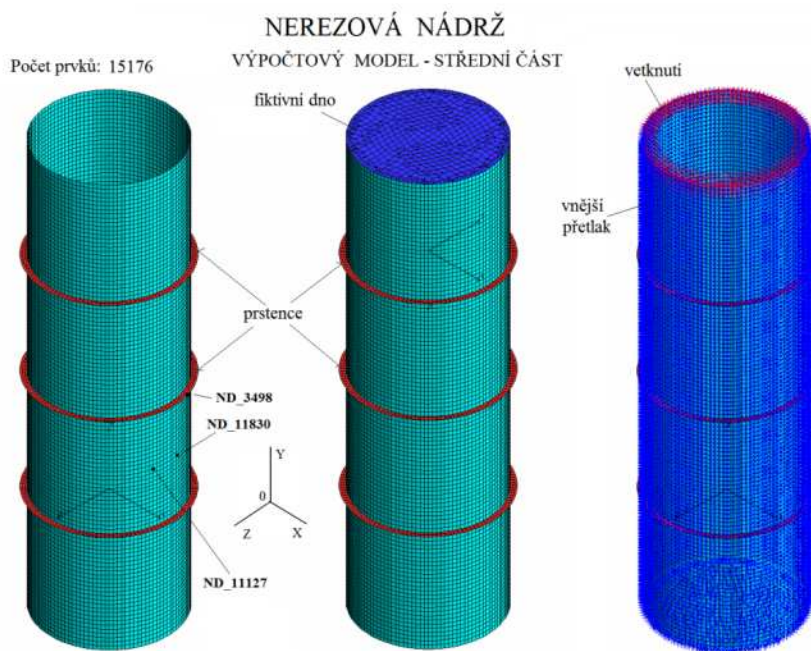
V této kapitole je provedena výpočtová analýza stability středové části nerezové nádrže. Na obrázku 5 se nachází prvkový výpočtový model části nerezové výztužné obvodovými prstenci. Zbylé části konstrukce jsou nahrazeny okrajovými podmínkami (vetknutí). Model je sestaven z 15176 skořepinových prvků SHELL. Modelu jsou přiřazeny materiálové charakteristiky z tab. 1. Výpočtový model je zatížen jednotkovým vnějším přetlakem $p=1\text{ MPa}$. Na modelu jsou vybrány reprezentativní uzly prvkové sítě pro vykreslování zatěžovacích charakteristik. Jedná se o uzly ND_3498, ND_11127 a ND_11830.

2.3 Odhad tvaru boulení válcového pláště

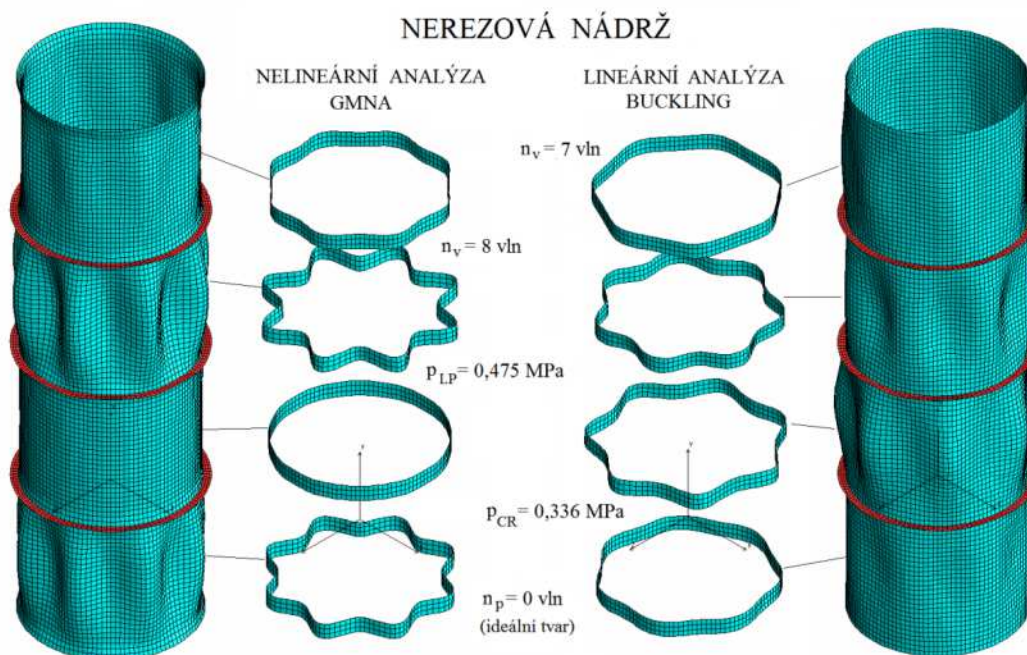
Nyní je proveden odhad nejméně příznivého tvaru imperfekce válcového pláště. Tento tvar by měl být afinní k přirozenému tvaru deformace skořepiny při ztrátě stability [6], [7]. Jsou provedeny dvě analýzy, a to LBA a GMNA.

A) Lineární boulicí analýza LBA

Analýza LBA je založena na teorii vlastních čísel a vlastních tvarů, kde první vlastní číslo reprezentuje při jednotkovém zatížení kritický tlak p_{CR} , při kterém ideální skořepina ztrácí stabilitu [2]. Tomu odpovídá první vlastní tvar deformace. LBA je korektní pouze pro konstrukční uzly se zcela převládajícím membránovým namáháním ve stěně. Z toho důvodu je tato analýza použita pouze k odhadu počtu obvodových vln při ztrátě stability ideální válcové skořepiny (počet počátečních obvodových vln ideální skořepiny $n_p=0$). V pravé části obrázku 6 je uveden deformovaný výpočtový model v prvním vlastním tvaru s počtem výsledných obvodových vln $n_v=7$ ve všech třech sekcích válcového pláště (sekce mezi prstenci). Prvnímu vlastnímu tvaru odpovídá první vlastní číslo, tzn. vnější kritický přetlak $p_{CR}=0,336\text{ MPa}$. Tato hodnota je zanesena do tabulky 3.



Obr. 5: Výpočtový model středové části nádrže.



Obr. 6: Odhad tvaru boulení – výsledky analýzy LBA a GMNA.

B) Geometricky a materiálově nelineární analýza GMNA

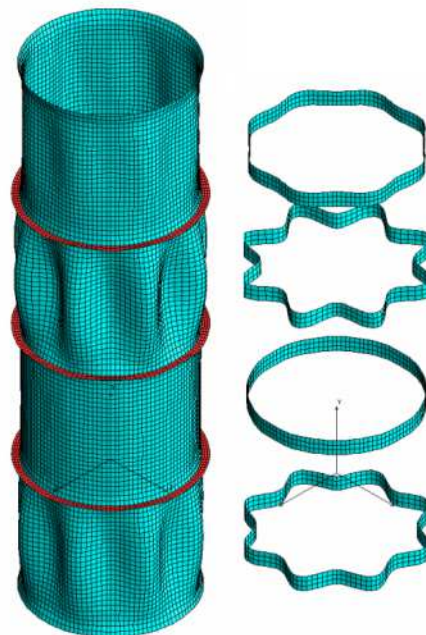
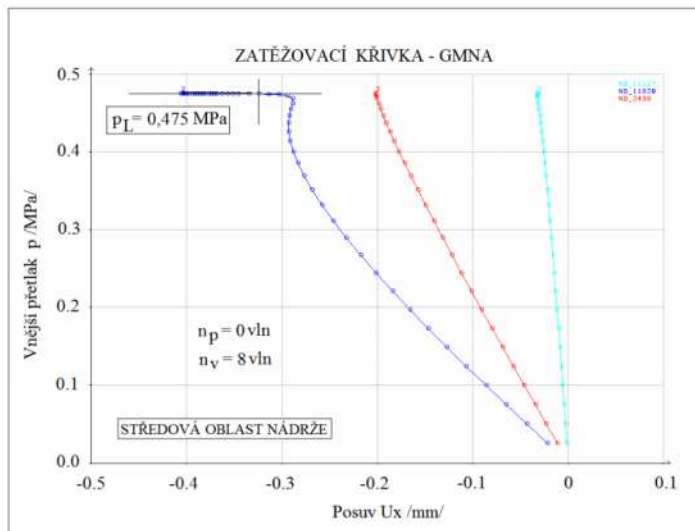
Nelineární analýza GMNA má obecnější charakter a lze ji aplikovat i na skořepinové konstrukce s velkým podílem ohybového namáhání ve stěně. GMNA je zde nyní také použita k odhadu nejméně příznivého tvaru imperfekce válcového pláště. Důvodem je zajištění vyšší spolehlivosti dosažených výsledků. Nelineární analýza probíhá tím způsobem, že se výpočtový model přitěžuje postupně a v každém výpočtovém kroku se nachází rovnováha mezi vnějšími a vnitřními silami. Výsledkem je rovnovážná křivka (zatěžovací křivka), vyjadřující závislost zatížení na posuvu vybraného uzlu prvkové sítě výpočtového modelu (uzly prvkové sítě ND_3498, ND_11127, ND_11830, viz obrázek 5).

V levé části obrázku 6 je uveden deformovaný výpočtový model v mezním stavu ztráty stability v pružně-plastickém oboru. Výsledný počet vln je $n_v=8$. Tomu odpovídá vnější mezní přetlak $p_L=0,475 \text{ MPa}$. Tato hodnota je opět zanesena do tabulky 3. Na obrázku 7 se nachází výsledná rovnovážná křivka. Jedná se o závislost zatížení na posuvu U_x vybraných uzlů prvkové sítě ND_3498, ND_11127, ND_11830.

NEREZOVÁ NÁDRŽ - STŘEDOVÁ ČÁST

TVAR POČÁTEČNÍ IMPERFEKCE: $n_p=0$ vln (ideální skořepina)

TVAR DEFORMACE: $n_v=8$ vln



Obr. 7: Zatěžovací křivka – analýza GMNA.

2.4 Kontrola stability válcového pláště

Nyní je provedena série nelineárních výpočtových analýz reálné skořepiny GMNIA (geometricky a materiálově nelineární analýza imperfektní skořepiny) se snahou nalézt minimální hodnotu mezního vnějšího přetlaku p_L , při kterém dojde ke ztrátě stability. Jsou uvažovány následující tvary počáteční imperfekce:

- $n_p=2$ obvodové vlny (ovalita skořepiny),
- $n_p=3 \div 9$ pravidelných obvodových vln.

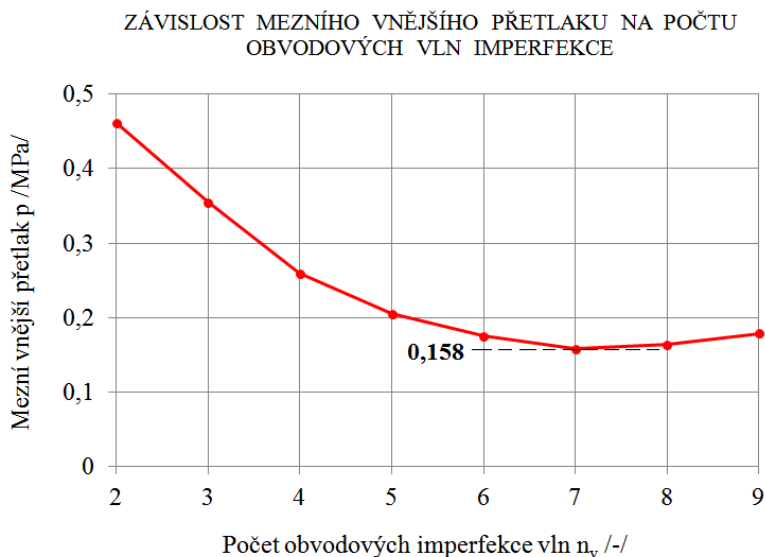
V tabulce 3 jsou uvedeny výsledné hodnoty mezních vnějších přetlaků p_L a tomu odpovídající výsledné počty obvodových vln n_v deformovaného modelu.

Tab. 3: Výsledky numerických analýz původní konstrukce

POŘADÍ ANALÝZY	TYP ANALÝZY	n_p /vlny/	p_{CR} /MPa/	p_{LP} /MPa/	n_v /vlny/
1	LBA	0	0,336	-	7
2	GMNA	0	-	0,475	8
3	GMNIA	2 (ovalita)	-	0,462	8
4	GMNIA	3	-	0,355	3
5	GMNIA	4	-	0,260	4
6	GMNIA	5	-	0,235	5
7	GMNIA	6	-	0,176	6
8	GMNIA	7	-	0,158	7
9	GMNIA	8	-	0,164	8
10	GMNIA	9	-	0,169	9

Hodnoty mezního vnějšího přetlaku p v závislosti na počtu obvodových vln n_v pro střední část nádrže jsou vyneseny do diagramu na obrázku 8. Z diagramu

vyplývá, že nevyztužená konstrukce ztrácí stabilitu při hodnotě vnějšího přetlaku $p_L=0,158 \text{ MPa}$ v podobě 7 obvodových vln.



Obr. 8: Mezní přetlak v závislosti na počtu vln imperfekce.

3. Vyhodnocení výsledků

Z tabulky 3 je patrné, že minimální mezní vnější přetlak $p_L=0,158 \text{ MPa}$ byl zjištěn pro počáteční imperfekci ve tvaru 7 obvodových vln, stanovenou analýzou vlastních čísel a tvarů LBA. Vzhledem ke skutečnosti, že vliv počátečních imperfekcí byl do výpočtu zahrnut již modelováním tvaru imperfekcí, lze při stanovení dovoleného přetlaku použít pouze součinitele bezpečnosti vzhledem k mezi kluzu $S=1,5$.

Dovolený přetlak

$$p_D = \frac{p_L}{S} = \frac{0,158}{1,5} = 0,105 \text{ MPa}$$

Pozn.: Podle ECCS [3] je hodnota dovoleného přetlaku válcového pláště s „běžnými imperfekcemi“ přibližně dvojnásobná, tedy $p_D = 0,196 \text{ MPa}$.

Podmínka pevnosti a stability

$$p_{out} = 0,1 \text{ MPa} \leq p_D = 0,105 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad \text{Vyhovuje!}$$

Z výsledků vyplývá, že středová část válcového pláště s nadměrnými počátečními imperfekcemi na zatížení vnějším přetlakem vyhovuje. Rezerva je zde však minimální!

Pozn.: Středová oblast nádrže sice podle výpočtových analýz stabilně vyhovuje, avšak spolehlivost tohoto výsledku nemusí být vzhledem k možné chybě v měření imperfekcí zcela zaručena. Z toho důvodu byla vyztužena všechna pole mezi stávajícími základními prstenci $135 \times 20 \text{ mm}$ mezilehlými subtilnějšími prstenci $80 \times 16 \text{ mm}$.

Závěr

Analýza provedená v rámci tohoto článku vede k jednoznačnému závěru, že stabilitu tenkostěnné skořepinové konstrukce s nadměrnými imperfekcemi je třeba ověřit numericky. Z porovnání výsledků numerické nelineární analýzy a výpočtu podle Evropského doporučení ECCS vyplývá téměř *dvojnásobný* rozdíl v bezpečné odolnosti nádrže proti ztrátě stability. To znamená, že v tomto případě by respektování výsledků podle ECCS mohlo být výrazně na straně nebezpečné a vést v krajním případě i k havárii konstrukce. Tento závěr lze vyjádřit podmínkou

$$p = 0,1 \text{ MPa} \approx (p_D)_{NUM} = 0,105 \text{ MPa} < (p_D)_{ECCS} = 0,196 \text{ MPa}$$

Důležitým faktorem při ztrátě stability je afinita tvaru stabilitního boulení reálné (imperfektní) skořepiny k přirozenému tvaru boulení ideální skořepiny. Již z porovnání výsledků lineární a nelineární analýzy ideální skořepiny vyplývá rozdíl v počtu obvodových vln v okamžiku ztráty stability. Zatímco lineární analýza vede k počtu obvodových vln $n_0=7$, nelineární analýza k počtu vln $n_0=8$. Jednou z příčin může být zavedení nelineárního chování materiálu u nelineárního výpočtového modelu.

Z tabulky 3 je dále patrné, že u všech případů zkoumaného počtu vln $n_0=3\div 9$, kromě ovality s počtem vln $n_0=2$, se nemění u konstrukce v průběhu ztráty stability tvar boulení, tzn. počet obvodových vln. Navzdory tomu je pro zabezpečení spolehlivosti výsledků zcela nezbytné při řešení ztráty stability pláště nádrže s nadměrnými imperfekcemi provést opakovaně nelineární analýzu imperfektní konstrukce GMNIA pro počáteční imperfekce s různým počtem obvodových vln n_0 a stejné amplitudě w_0 . Řešením je pak takový tvar ztráty stability, který vede k minimální hodnotě mezního vnějšího přetlaku p_L (viz obrázek 8).

LITERATURA

- [1] Paščenko P.: Stainless Steel Tank – Stability Verification of Cylindrical Shell (In Czech). Research and development report of AK-Mechanika, s.r.o., Pardubice, 2012.
- [2] Bushnell D.: Computerized buckling analysis of shells, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, ISBN 90-247-3099-6, 1985.
- [3] ECCS (2008): Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations, Fifth edition, Published by ECCS, ISBN 92-9147-000-92.
- [4] ČSN EN 1993-1-6 (2010) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí.
- [5] ČSN 69 0010, část 4.14 (1990): Tlakové nádoby stabilní, technická pravidla, výpočet pevnosti. Válcové části nádob, Československá státní norma. Federální úřad pro normalizaci a měření, Praha.
- [6] Wunderlich W., Deml M. (1997) "Direct evaluation of the worst imperfection shape in shell buckling", Computer methods in applied mechanics and engineering, 149 (1997) 2001-222.
- [7] Wunderlich W., Albertin U. (2000) "Analysis and load carrying behavior of imperfection sensitive shells", International journal for numerical methods in engineering, 47,255-273.
- [8] FEM Computer program COSMOS/M, Version 2.95 by SRAC (Structural Research and Analysis Corporation), Los Angeles, California.
- [9] FEM Computer program COSMOSWorks 2010, Advanced Professional, SolidWorks Corporation.