

VALIDATION AND OPTIMIZATION OF ISO CONTAINER FOR DYNAMIC LOAD AT TRANSPORT

I. Sedlák*, H. Konečná*

Summary: *The contribution addresses static and dynamic calculation of vessel container in ISO frame of ICC type. The container must be designed in such a way to withstand the effects of inertial forces appearing at its transport. The results of the optimization and design modifications were verified by practical tests.*

1. Popis problému

ISO kontejner ICC-20-E-10 je přepravní kontejner zkapalněných kryogenních plynů řady 1, vhodný pro mezinárodní výměnu a přepravu po silnici, železnici a moři včetně záměny mezi těmito způsoby přepravy. Posuzovaný ISO kontejner ICC-20-E-10, viz obr.1, představuje dvouplášťovou přepravní vakuově izolovanou nádobu umístěnou v rámové konstrukci, určenou k transportu kryogenních plynů (LIN, LOX, LAR, N20). Vnitřní tlaková nádoba slouží k uchování kryogenních zkapalněných plynů, vnější nádoba obklopující vnitřní nádobu umožňuje dosažení vakua v meziprostoru obou nádob. Vnitřní nádoba je uložena prostřednictvím dvou podpor umístěných ve dnech a dalších dvou podpor na bocích pláště vnitřní nádoby do pláště vnější nádoby. Její vnější průměr je 2200 mm, celková délka je 5845 mm a tloušťka pláště je 5.7 mm. Dno je tvořeno plechem o tloušťce 7.5mm. Vnější válcová nádoba má vnější průměr 2408 mm a celkovou délku 6033 mm. Tloušťka jejího pláště je 3 mm. Rozteč jejích obvodových vnitřních výztuh T40x1.5 je 380 mm. Jako izolační prvky v uložení mezi vnitřní a vnější nádobou slouží sklotextilová pouzdra. Na rámovou konstrukci je kromě vnější nádoby připojeno příslušenství přepravních nádob. Rám má především ochrannou a manipulační funkci. Jeho rozměry jsou:
2591 x 2438 x 6058 mm.

Vlastní nádrže mají samonosný charakter. Cílem řešení bylo odhalit kritická místa konstrukce a navrhnout potřebné konstrukční úpravy, resp. nalézt možné úspory její hmotnosti. Celková hmotnost kontejneru včetně náplně činila 34000kg.

* Ing. Ivan Sedlák, Ph.D.: Univerzita obrany v Brně, Fakulta vojenských technologií, Katedra strojírenství, Kounicova 65, 612 00 Brno; tel.: +420 973 443 583; E-Mail: ivan.sedlak@unob.cz

* Ing. Hana Konečná, Ph.D.: Univerzita obrany v Brně, Fakulta vojenských technologií, Katedra strojírenství, Kounicova 65, 612 00 Brno; tel.: +420 973 443 583; E-Mail: hana.konecna2@unob.cz



Obr.1 Kontejner ICC – 20 – E – 10

Výrobcem původně navržený kontejner nevyhověl při ověřovacích zkouškách. Na obr. 2 je zachycena dynamická zkouška konstrukce pro zatížení zrychlením ve směru podélné osy nádrže rovnému čtyřnásobku gravitačního zrychlení. Výsledky této zkoušky jsou na obr.3, kde je vidět vznik dvou prohlubní pláště vnější nádoby směrem dovnitř o hloubce 12 a 7 mm. ISO kontejner ve zkoušce nevyhověl.



Obr.2. Dynamická zkouška kontejneru



Obr.3 Trvalé deformace po dynamické zkoušce

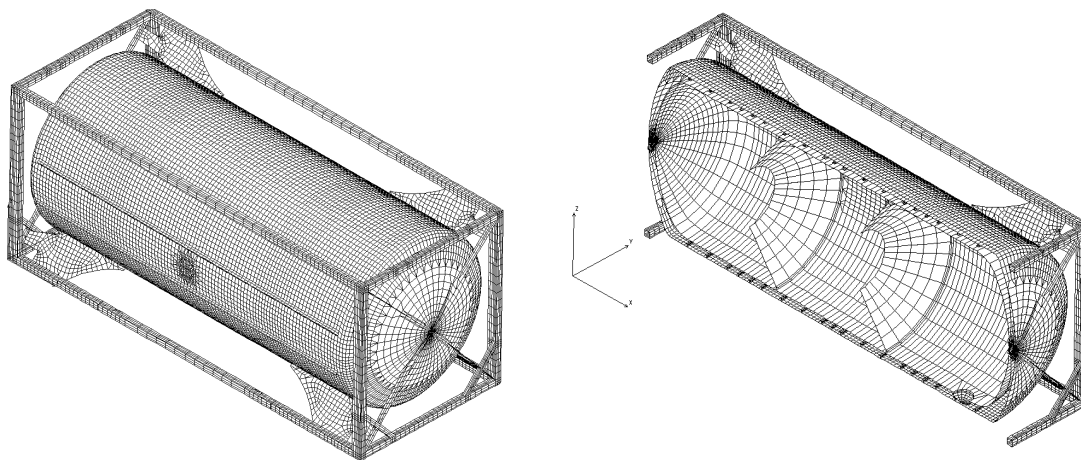
S ohledem na charakter řešené úlohy bylo nutné provést pevnostní, tuhostní a stabilitní kontrolu konstrukce ISO kontejneru - to znamená kontrolu vnitřní a vnější tlakové nádoby a rámu kontejneru. Předpokládaná kritická místa konstrukce byla především v oblastech uložení vnitřní nádoby do vnější, a dále v oblasti uložení vnější nádoby do rámu. Při modelování zatížení se vycházelo z požadavků předepsaných v ADR a v ISO 1496-3. Z pohledu modelovaných zatěžovacích stavů byla prověřena předepsaná zatížení simulující jak podmínky běžného provozu a manipulace, tak i zatížení odpovídající extrémním podmínkám, kterým může být kontejner při jeho používání vystaven, a jejichž simulaci fyzickým testováním měl být kontejner podroben při schvalovacím procesu realizovaném ve VÚKV Praha.

Celkem bylo modelováno sedmnáct zatěžovacích stavů, jedenáct z nich bylo posouzeno napjatostně, šest stabilitně a u dvou byla navíc kontrolována míra deformací ISO kontejneru.

2. Výpočtový MKP model ISO kontejneru

Na základě poskytnuté výkresové dokumentace byl pomocí programového systému COSMOS/M vytvořen kompletní MKP model celého ISO kontejneru. Pro modelování jednotlivých částí konstrukce byly použity prvky skořepinové, objemové a kontaktní z knihovny programu COSMOS/M. Model byl vytvořen v souladu s požadavky zadání tak, aby umožnil věrohodné posouzení jednotlivých zatížení vycházejících z ADR a ISO 1496-3.

Pro modelování vnější a vnitřní nádrže byly použity skořepinové prvky SHELL4 v modifikaci se zvýšenou přesností pro symetrické i nesymetrické úlohy. Transportní rám konstrukce byl modelován také těmito skořepinovými prvky. Vazby mezi vnitřní a vnější nádobou v radiálních a axiálních uloženích jsou na skutečné konstrukci realizovány vloženými kroužky kompozitu Sklotextit FR4. V modelu byly vazby modelovány kontaktními prvky mezi odpovídajícími stykovými plochami, přenášejícími pouze tlakové zatížení. Kompozitové prstence byly modelovány objemovými prvky SOLID a řešeny samostatně na základě zatížení známého z kontaktních prvků. Pro vlastní řešení napětí a deformací bylo využito nelineárního modulu programu COSMOS/M. Použitá metoda je Newton-Raphsonova s přepočtem matice tuhosti a kontrolou v každém iteračním kroku. Pro vyhodnocování napětí ve skořepinových prvcích byla využita Trescova pevnostní teorie. Finální model byl tvořen 59 837 prvky, z toho bylo 800 prvků kontaktních. Vlastní síť prvků s výjimkou úložných křidélek vnější nádrže byla vytvořena parametricky. Řešená úloha vedla na řešení soustavy 343 752 rovnic. Vlastní výpočet s ohledem na poměrně velký počet zatěžovacích stavů, limitovaný čas a potřebu testování možných konstrukčních úprav byl poměrně náročný. Z tohoto důvodu byl také využíván pro dílčí výpočty kompletní model s redukováným počtem elementů na počet 35 884, který představoval 198 738 rovnic. Pro stabilitní problémy byly s ohledem na charakter řešené úlohy kontaktní prvky nahrazeny prvky pružinovými. Pro účely výpočtu se vycházelo dle zadavatele z naplnění vnitřní nádrže kapalným argonem o hustotě $\rho = 1405.5 \text{ kg/m}^3$. Maximální hmotnost přepravované látky byla 28 200 kg. Výpočtový model kontejneru je na obr. 4.



Obr. 4 Výpočtový model

3. Zatěžovací stavy vycházejících z ADR a ISO 1496-3

Z principu konstrukce ISO kontejneru nebylo nutné modelovat teplotní zatížení. Dle článku 6.7.4.2.12. ADR musí přepravní ISO kontejner odolat statickému zatížení ekvivalentnímu dynamickému účinku setrvačných sil hmot ISO kontejneru, zatíženého zrychlením ve směrech os globálního souřadného systému, za současného působení vnitřního a vnějšího přetlaku na nádoby ISO kontejneru.

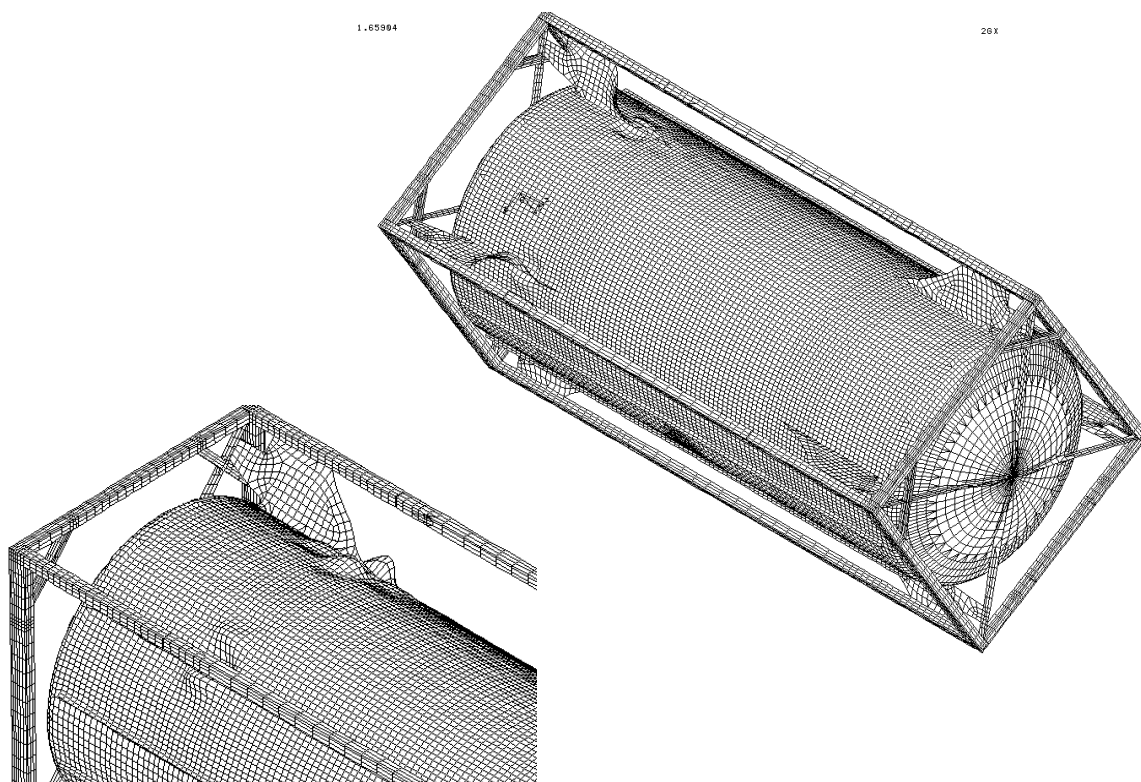
Pevnostní a stabilitní posouzení požadované ADR bylo provedeno pro příslušné zatěžovací stavy. Podle tohoto předpisu bylo řešeno celkem 8 úloh pro násobky gravitačního zrychlení 1g až 2g působící v osách x,y,z v kombinaci s tlakovým zatížením.

Dále bylo nutné ověřit konstrukci kontejneru pro zatížení definované dle ISO 1496-3, kapitola 6.

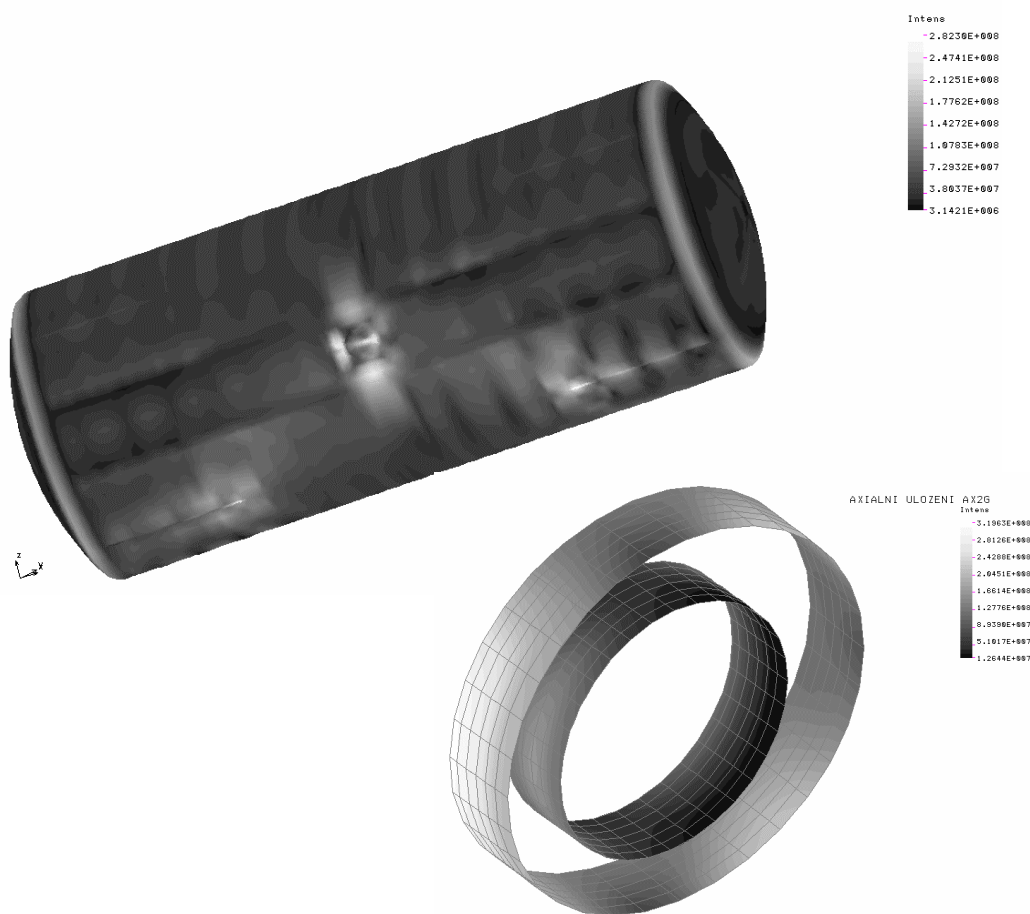
Příslušné zatěžovací stavy zde simulovaly zkoušku stohováním a zkoušky zdvímáním za rohové prvky. Jednalo se o napětíové a stabilitní výpočty. Mimoto zde byla zkoumána podélná a příčná tuhost, a také vnější a vnitřní podélná i příčná odolnost. Zatížení zde bylo uvažováno dle ISO buď předepsanými silami nebo násobky gravitačního zrychlení a tlakem.

Okrajové podmínky vycházely ze způsobu realizace jednotlivých zkoušek a obecně byly pro jednotlivé zatěžovací stavy různé.

Ukázky výsledků řešení pro zatížení zrychlením $a_x = 2g$ a tlakem jsou na následujících obrázcích. Na obr. 5 je řešení stabilitního problému a na obr. 6 jsou napětí v plášti vnější nádoby a axiálním uložení vnitřní nádrže.



Obr. 5 Řešení stabilitního problému – deformace



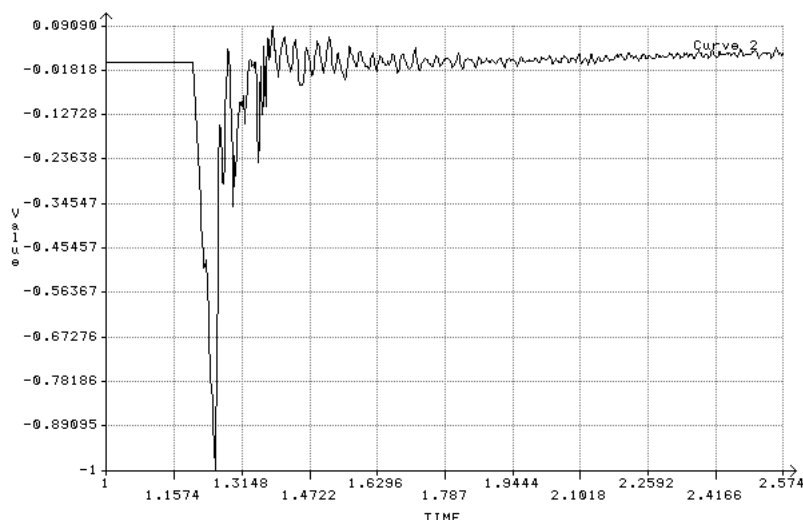
Obr. 6 Napětí ve vnějším plášti a v příčném uložení vnitřní nádrže

Vzhledem k tomu, že zadavatelem bylo zadání specifikováno tak, že konstrukce ISO kontejneru má vydržet praktické zkoušky ve zkušebním ústavu, tak se vyskytla otázka do jaké míry bude výpočet podle normy vystihovat reálné dynamické namáhání při praktické zkoušce. Vlastní dynamická zkouška se provádí na kontejneru připevněném odpovídajícím způsobem na železniční vagón. Ten je uveden do pohybu a náhle zbrzděn nárazem do překážky. Zrychlení vzniklé při rázu se snímá čtyřmi akcelerometry, umístěnými na rám kontejneru. Nájezdová rychlost vagónu se postupně zvyšuje, až je při nárazu dosaženo hodnot zrychlení předepsaných příslušnou zkouškou. Pro výpočtové potřeby se podařilo získat akcelerogram reálné zkoušky a pomocí něho bylo provedeno srovnání napětí získaného statickým výpočtem s napětím vzniklým modelováním dynamické zkoušky. Použitý akcelerogram je na obr.7.

Byly porovnávány následující varianty výpočtu:

- a) statický a dynamický výpočet pro zrychlení jinak nezátížené konstrukce rovné jednonásobku resp. dvojnásobku gravitačního zrychlení.
- b) statický a dynamický výpočet pro zrychlení konstrukce zatížené provozním tlakem rovné jednonásobku gravitačního zrychlení.

U dynamického výpočtu bylo zrychlení zadáváno v souladu s realitou zkoušky jako zrychlení základu. Cílem srovnání bylo porovnat maximální napětí v konstrukci, resp. jednotlivých komponentech konstrukce, při řešení statickém a dynamickém, které by posloužilo k posouzení kontrolované konstrukce.

Obr. 7 Akcelerogram a_x

Srovnáním podle bodu a) bylo spočítáno, že pro maximum $a_x = g$ je v případě dynamického řešení maximální intenzita napětí σ_{int} pro celou konstrukci větší o 29% a např. pro plášť vnější nádrže o 34%. Srovnání odezvy pro maximum $a_x = 2g$ s příslušným statickým řešením ukázalo, že maximální intenzita napětí v celé konstrukci je u dynamického řešení o 3% vyšší a pro plášť vnější nádrže o 23% vyšší. Pro posouzení ovšem bylo podstatné zjistit, jak se budou lišit napětí statického a dynamického řešení při maximálním provozním zatížení kontejneru - bod b).

Srovnáním bylo zjištěno, že maximální hodnota intenzity napětí pro celou konstrukci vyšla oběma postupy téměř shodně, a stejně tak pro plášť vnitřní nádrže, ale např. pro plášť vnější nádrže dával dynamický výpočet hodnotu o 23% vyšší. Bylo tedy možné konstatovat, že při vlastní dynamické zkoušce nastanou u některých komponent konstrukce napětíové špičky, které mohou být významně vyšší než jsou hodnoty napětí získané statickým výpočtem podle ADR a ISO 1496-3.

S touto skutečností je třeba počítat, má-li namáhání kontejneru vyhovovat předepsaným pevnostním kritériím, a především přestát úspěšně vlastní dynamickou zkoušku.

Na základě výsledků výpočtu byl navržen vyšší počet výztužných žebel pláště vnější nádoby, upraven tvar a tloušťka úložných křídel vnější nádoby do rámu a doplněny podélné vnitřní výztuhy mezi žebry v exponovaných oblastech. Kromě toho byl upraven původní obdélníkový průřez příčného uložení vnitřní nádrže na kruhový, který vykazuje lepší výsledky v napětíovém i stabilitním výpočtu. Dále byl v nejnútnejší míře s ohledem na nárůst hmotnosti modifikován průřez tenkostěnných profilů tvořících rám a velikost a poloha výztuží v čelech rámu. Závěrem bylo možné konstatovat, že byly provedeny na základě výpočtů nejnútnejší úpravy konstrukce tak, aby snesla zatížení podle ADR a ISO 1496-3 a zkoušky prováděné při schvalovacím procesu realizovaném ve VÚKV Praha při minimálním nárůstu hmotnosti.

4. Závěr

Výpočtem pomocí MKP se podařilo úspěšně optimalizovat konstrukci kontejneru, který je v současné době schválen a zhruba jeden rok v provozu. Vlastní úloha byla řešena ve spolupráci s firmou KPSAG, která byla zadavatelem úkolu a provedla pevnostní, stabilitní a únavové posouzení řešené konstrukce. Při řešení dané úlohy se jednoznačně ukázalo, že nelze vystačit pouze se statickým řešením daného problému.

5. Poděkování:

Příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MO0FVT0000404 Výzkum a vývoj moderních materiálů a technologií pro aplikace ve vojenské technice.

6. Literatura

Manuál COSMOS/M 2.7, 2003, USA
Předpis ADR
ISO 1496-3,
EN 13530-2.