

STUDIUM KOMPOZYTOWEGO ZBIORNIKA DO PRZECHOWYWANIA KRIOGENICZNEGO MATERIAŁU PĘDNEGO W RAKIECIE KOSMICZNEJ

WITOLD PERKOWSKI*, PAWEŁ BOGUSZEWICZ*, KRZYSZTOF HINC

**Instytut Lotnictwa, Centrum Technologii Kosmicznych, Pracownia Napędów*

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac koncepcyjno-obliczeniowych przeprowadzonych w ramach projektu wstępnego kompozytowego, średniociśnieniowego zbiornika kriogenicznego, przeznaczonego do przechowywania ciekłego metanu lub tlenu, przeznaczonego dla drugiego stopnia niewielkiej, dwustopniowej rakiety kosmicznej.

Słowa kluczowe: ciśnieniowy zbiornik kompozytowy, zbiornik kriogeniczny, zbiornik rakiety

WSTĘP

W 2009 roku w ramach projektu PECS 98108 (finansowanego przez ESA) przeprowadzone zostały w Instytucie Lotnictwa prace studialne nad kompozytowym zbiornikiem kriogenicznym. Prace te obejmowały: sformułowanie wstępnych WT na zbiornik, opracowanie koncepcji zbiornika, przegląd materiałów potencjalnie nadających się do jego wykonania, wstępne obliczenia wytrzymałościowe zbiornika, analizę MES zbiornika oraz wstępne opracowanie technologii jego wykonania i zamocowania w korpusie rakiety.

WSTĘPNE WARUNKI TECHNICZNE

Wstępne założenia dotyczące zbiornika opracowano na podstawie wcześniejszego studium niewielkiej, dwustopniowej rakiety kosmicznej, wynoszącej ładunek 200 kg na orbitę kołową o promieniu 600 km, używającej jako materiałów pędnych ciekłego metanu (LNG) i ciekłego tlenu (LOX). Dla przyjętego stosunku utleniacz/paliwo (Oxidizer/Fuel ratio) O/F = 2,7 oraz po uwzględnieniu gęstości składników materiału pędnego otrzymano niemal jednakowe objętości tych składników (różnica była poniżej 1%). Również oszacowany dopuszczalny strumień ciepła dopływającego był zbliżony w przypadku obu składników i, przynajmniej teoretycznie, można by zastosować taką samą izolację cieplną. Uznano zatem, że ze względu na ewentualne koszty zaprojektowania, wykonania i badań celowe byłoby zastosowanie zbiorników LOX i LNG o tych samych wymiarach i konstrukcji. Wybrano też dla nich kształt sferyczny, który bardzo dobrze nadaje się do wstępnych obliczeń, umożliwiając zastosowanie prostej analizy matematycznej i stanowi dobry punkt odniesienia, gdyż niespolony zbiornik o takim kształcie jest

z dużym prawdopodobieństwem optymalny masowo. W Tab.1 przedstawiono przykładowo wstępne WT na rozważany zbiornik LNG.

Tab. 1. Wstępne WT na zbiornik ciekłego metanu.

Parametr	Wymagania
Ciśnienie robocze	2 MPa (przy 112 K)
Ciśnienie testowe	3 MPa (przy 112 K)
Ciśnienie niszczące	4 MPa (przy 112 K)
Objętość	1,3356 m ³ (przy ok. 5% przestrzeni nienapełnionej)
Masa zawartej cieczy	537 kg (przy 112 K)
Przechowywana ciecz	CH ₄
Ciecze kompatybilne	N ₂ , O ₂
Promień wewnętrzny	0,683 m
Strumień paliwa maks.	2,28 dm ³ /s
Przyśp. wzdłużne maks.	77,5 m/s ² (pełny zbiornik + ciśnienie częściowe ok.1 MPa)
Przyśp. wzdłużne maks.	9,44 m/s ² (pełny zbiornik + ciśnienie robocze 2 MPa)
Dop. strumień ciepła średni	4330 W (tylko konwekcja i przewodzenie w założonym czasie 1960 s)
Masa zbiornika	25 kg max (kompletny zbiornik z przewodami i zamocowaniem)
Temp. ścianki zewn. min.	200 K

KONCEPCJA ZBIORNIKA

Przyjęto koncepcję sferycznego, trójwarstwowego zbiornika z zewnętrzną, nośną powłoką kompozytową (kompozyt włóknisty), z przymocowaną do niej wewnętrzną warstwą termoizolacyjną oraz z metalową, cienkościenną powłoką wewnętrzną (z angielska - liner).

Zalety takiego rozwiązania są następujące:

- zbiornik jest o 20-30% lżejszy od metalowego (np. tytanowego lub duralowego),
- metalowy liner zapewnia wymaganą szczelność i ułatwia przytwierdzenie króćców,
- kompozytowa powłoka nie jest narażona na bardzo niskie temperatury i chemiczne oddziaływanie przechowywanej cieczy, chroni też wewnętrzną warstwę termoizolacyjną przed uszkodzeniem mechanicznym i wilgocią,
- niepróżniowa termoizolacja jest tania i pewna (nie wymaga specjalnych uszczelnień),
- zewnętrzna, mocna struktura ułatwia zamocowanie zbiornika,
- zbiornik może znieść niewielkie uszkodzenia zewn. powłoki bez utraty zdolności do pracy.

Rozwiązanie ma też pewne wady:

- grubość izolacji zwiększa obciążenie i masę powłoki zewnętrznej (większy promień),
- izolacja wewnętrzna jest cięższa od zewnętrznej (musi być mocniejsza),
- dopuszczalne ciśnienie robocze zbiornika jest ograniczone wytrzymałością warstwy termoizolacyjnej,
- metalowy liner i cięższa izolacja sprawiają, że zbiornik jest cięższy od całkowicie kompozytowego zbiornika o ok. 50% (teoretycznie).

Należy tu podkreślić, że zbiornik ciśnieniowy wykonany całkowicie z kompozytu włóknistego, choć bardzo atrakcyjny masowo i konstrukcyjnie, jest bardzo trudny do opracowania w przypadku cieczy kriogenicznych. Problem stanowi osnowa spajająca włókna – typowe, stosowane w tym celu żywice (np. epoksydowe) łatwo pękają przy kontakcie z cieczą kriogeniczną pod wpływem wewnętrznych naprężeń (gradient temperatury oraz różnice w rozszerzalności liniowej osnowy i włókien), co powoduje przeciekanie zbiornika, jednak bez znaczącej utraty jego wytrzymałości (którą zapewniają włókna).

PRZEGLĄD MATERIAŁÓW

Liner – na powłokę kontaktującą się bezpośrednio z LNG, rozważane były nast. materiały:
 2020-T6 – wysokowytrzymały stop Al (dural),
 1061-0 – słaby mechanicznie stop Al. (praktycznie czyste aluminium),
 Ti6Al4V – stop tytanu, popularny w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych,
 AZ 91 – lotniczy stop magnezowo-litowy,
 CuCr1 – miedź chromowa (starzona i zgnieciona) o relatywnie wysokiej wytrzymałości,
 304 – typowa stal nierdzewna (stainless steel).

Tab. 2. Orientacyjne własności wybranych materiałów lineru (w temp. 110 K).

Materiał	Rm [MPa]	Re [MPa]	E [GPa]	ν [-]	$\alpha \cdot 10^6$ [1/K]	ρ [kg/m ³]
1061-0	150	33	69	0,30	21	2700
2020-T6	660	600	86	0,30	21	2700
Ti6Al4V	1200	1150	116	0,32	7	4500
CuCr1	450	360	115	0,34	16	8900
304	800	640	210	0,30	11	8000
AZ 91	280	140	450	0,30	26	1800

Rm – wytrzymałość na rozciąganie; Re – granica plastyczności; E – moduł Younga;
 ν – liczba Poissona; α – współczynnik rozszerzalności liniowej; ρ – gęstość.

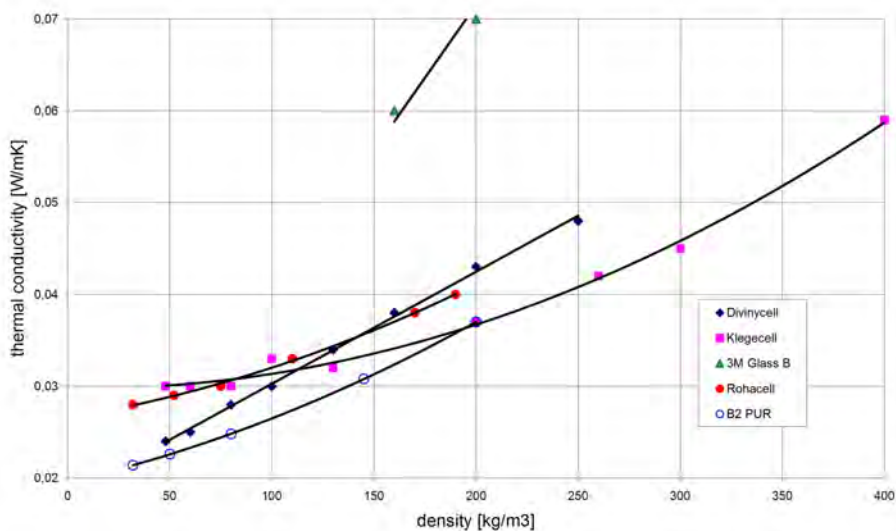
Powłoka zewnętrzna – zdecydowano, że najlepsze będzie zastosowanie kompozytu węglowego (carbon fiber composite). Przyjęto, że będzie to kompozyt węglowo-epoksydowy (carbon/epoxy composite) o ujednorodnionych kierunkowo własnościach (poprzez odpowiednie ułożenie włókien w kolejnych warstwach) przedstawionych w Tab.3. Aby ocenić wpływ modułu Younga kompozytu na obciążenia pozostałych warstw zbiornika, założono 2 znacząco różne wartości tego modułu: 100 i 200 GPa.

Tab. 3. Orientacyjne własności włóknistego kompozytu węglowego.

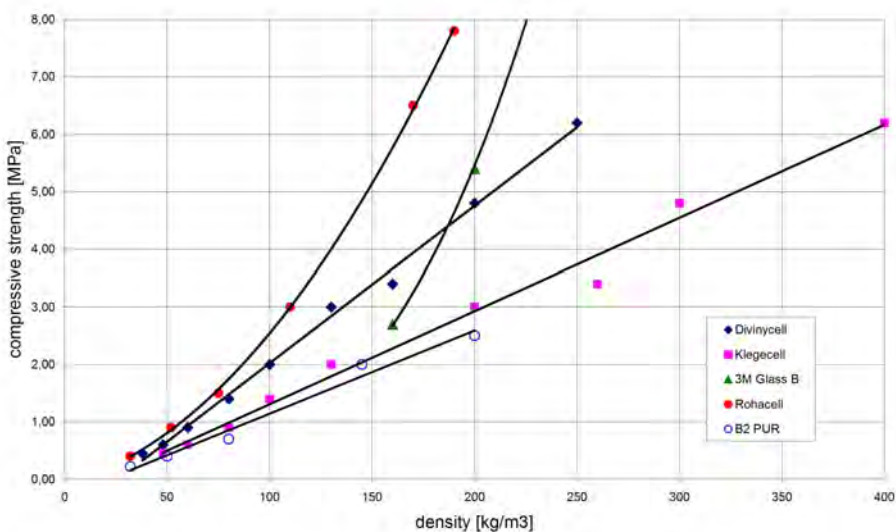
Materiał	Rm [MPa]	E [GPa]	ν [-]	$\alpha \cdot 10^6$ [1/K]	ρ [kg/m ³]
carbon/epoxy *	1000	100	0,25	0	1500
carbon/epoxy **	1000	200	0,25	0	1500

Izolacja - na pośrednią warstwę termoizolacyjną zbiornika rozważano następujące materiały:
 Divinycell – pianka PVC (polichlorek winylu),
 Klegecell – pianka PVC (polichlorek winylu),
 B2 - pianka PUF (poliuretan),
 Rohacell – pianka PMI (polimetakryloimid),
 3M Glass Bubbles - mikrosfery szklane.

Przewodność cieplną oraz wytrzymałość na ściskanie w funkcji gęstości (w temperaturze pokojowej) pokazano na Rys. 1-2. W niskich temperaturach przewodność cieplna tych materiałów spada, natomiast wytrzymałość rośnie, ale brak było danych, by uwzględnić ten efekt ilościowo. Zamiast wytrzymałością na ściskanie lepiej byłoby posłużyć się nieco większą wytrzymałością na tzw. hydrauliczne ściskanie (w literaturze anglojęzycznej: ICS – Isostatic Crush Strength lub HCP – Hydraulic Crush Point), gdyby dane te były dostępne.



Rys. 1. Przewodność cieplna rozważanych materiałów termoizolacyjnych w funkcji ich gęstości



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie rozważanych materiałów termoizolacyjnych w funkcji ich gęstości

Jak widać zdecydowanie najlepiej wypadają pianki Rohacell i Divinycell, natomiast pianka B2 jest zbyt słaba, a mikrosfery Glass Bubbles nie nadają się ze względu na zbyt dużą gęstość i przewodność cieplną. Po analizie danych materiałowych dla powyższych materiałów izolacyjnych (występują one w wielu odmianach różniących się gramaturą) ustalono, że na tym etapie, dla tego konkretnego zastosowania najwłaściwsze będą pianki: Rohacell (130 kg/m^3) i Divinycell (170 kg/m^3). Ich orientacyjne dane przedstawiono w tabeli Tab. 4.

Tab. 4. Orientacyjne własności mechaniczne i ciepne wybranych materiałów izolacyjnych.

Nazwa handlowa	ρ [kg/m ³]	R _m [MPa] (ściskanie)	E [MPa] (ściskanie)	λ [W/mK]	$\alpha \cdot 10^6$ [1/K]
Rohacell	130	4	220	0,033	32
Divinycell	170	4	210	0,038	29

WSTĘPNE OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE I MASOWE

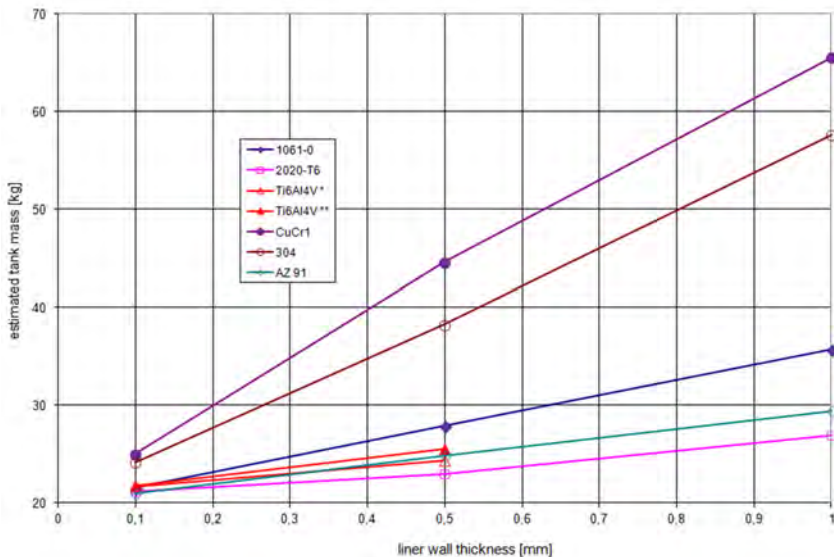
Analizę przeprowadzono na uproszczonym modelu zbiornika, którego założenia są następujące:

- Rozważa się 3-warstwowy sferyczny zbiornik o stałych grubościach warstw.
- Zakłada się że płaszcz zewnętrzny jest w pełni obciążony tj. grubość ścianki określa się dla naprężeń dopuszczalnych.
- Zakłada się że warstwa izolacji podlega hydrostatycznemu ściskaniu, a współczynnik ściśliwości objętościowej wyznacza się z ogólnie znanej zależności przybliżonej:

$$K = -V \frac{dp}{dV} = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

- Pianka izolacyjna zachowuje się jak ciecz i panuje w niej jednorodne ciśnienie.
- Gęstość pianki dobierana jest do jej aktualnego obciążenia ciśnieniem.
- Grubość warstwy pianki wyznaczana jest z jej przewodności cieplnej dla aktualnej gęstości i dla założonego, dopuszczalnego strumienia ciepła.
- Naprężenia w linerze rosną tylko do granicy plastyczności (Re) i ustalają się.

Wyniki przykładowych obliczeń przedstawiono na Rys. 3. Jedynie w przypadku tytanowego lineru rezultat zależał od tego, czy na płaszcz zewnętrzny zastosowano kompozyt węglowy carbon/epoxy *, czy karbon/epoxy ** (patrz Tab. 3).



Rys. 3. Masa zbiornika w funkcji grubości ścianki lineru, oszacowana dla $P = P_{\text{niszcz}} = 4$ MPa i dla pianki izolacyjnej Divinycell.

Jak widać na Rys. 3 miedź i stal nie nadadzą się na liner, gdyż zbiornik wyjdzie zbyt ciężki. Wykresy dla tytanu (indeks * lub ** oznacza powłokę zewnętrzną odpowiednio z kompozytu * lub ** – patrz Tab. 3) kończą się dla grubości ścianki 0,5 mm gdyż przy większej jej grubości liner staje się zbyt samonośny i grubość powłoki kompozytowej spada poniżej praktycznego minimum.

Wnioski z obliczeń wstępnych:

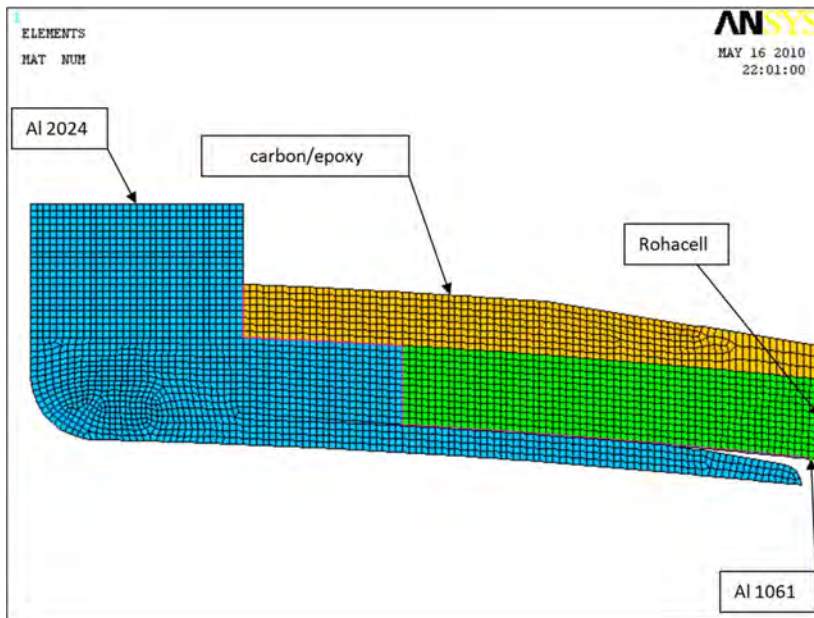
- Liner powinien być wykonany ze stopu lekkiego.
- Najmniejszą masę zbiornika uzyskano dla lineru z wysokowytrzymałego duralu.
- W celu uzyskania małej masy zbiornika należy zastosować możliwie małą grubość lineru (0,1 mm lub mniejszą).
- Ultracienki liner nie musi być wykonywany z wysokowytrzymałego stopu, wystarczy czyste aluminium (o wyborze materiału zdecyduje technologia).
- Należy zastosować kompozyt o jak największej wytrzymałości – stosowanie dużego modułu Younga jest niecelowe.
- We wszystkich przypadkach, z wyjątkiem Ti6Al4V** nastąpiło wyraźne przekroczenie granicy plastyczności w linerze.

Bardzo ważny jest wniosek ostatni, gdyż oznacza, że cienki liner zbiornika zostanie niemal na pewno odkształcony plastycznie podczas pierwszego testu ciśnieniowo-temperaturowego, w którym zbiornik powinien zostać poddany ciśnieniu próbnemu 3 MPa po wypełnieniu go np. ciekłym azotem. Problem pojawi się po opróżnieniu zbiornika, gdy po ogrzaniu liner się rozszerzy, ale na skutek wcześniejszego plastycznego odkształcenia okaże się „zbyt duży”, co przy braku wewnętrznego nadciśnienia spowoduje jego ściskanie i w rezultacie utratę szczelności. Problem polega na tym, aby liner „zapadł się” w sposób kontrolowany, tak by nie powstały lokalne „ostre” zmarszczki, mogące być źródłem pęknięć, a co za tym idzie utraty szczelności lineru. Zagadnienie jest złożone i wymaga zastosowania starannej, dobrze przemyślanej analizy MES, najlepiej popartej doświadczeniami w mniejszej skali. Inna możliwość to zastosowanie zbiornika „w ciemno” - bez uprzednich testów tego konkretnego egzemplarza (są precedensy w technice kosmicznej) lub utrzymywanie w jego wnętrzu niskiej temperatury (np. poprzez pozostawienie i utrzymywanie wewnątrz pewnej ilości ciekłego azotu) przez cały czas od testu zbiornika do jego zatankowania przedstartowego.

ANALIZA MES ZBIORNIKA

Przeprowadzono pewną ilość analiz MES dopracowując geometrię poszczególnych elementów zbiornika. Na Rys. 4. przedstawiono najciekawszy, biegunowy fragment zbiornika (rejon króćca) w finalnej geometrii. Widać na nim posiatkowane: króciec (Al 2024), piankę izolacyjną Rohacell), płaszcz kompozytowy (carbon/epoxy) oraz liner (Al. 1061), który jest tak cienki (0,1 mm), że przy tym powiększeniu niemal niewidoczny.

Z kolei w Tab. 5 przedstawia interesujący rezultat analizy maksymalnych naprężeń w poszczególnych elementach struktury zbiornika w czasie symulowanego cyklu napełniania-oprózniczenia. Symulacja testu zbiornika polegała na jednoczesnej zmianie temperatury na wewnętrznej powierzchni zbiornika i ciśnienia wewnętrznego od punktu do punktu. Temperatura zewnętrzna zbiornika była wynikiem przyjętego modelu przewodzenia ciepła przez ściankę trójwarstwową. Główne uproszczenia: przyjęcie jednorodnej temperatury wewnętrznej; przy opróżnianiu zbiornika naprężenia w linerze nie spadają - są stale związane z jego trwałym odkształceniem podczas napełniania zbiornika (dlatego pozostają na poziomie granicy plastyczności podczas opróżniania zbiornika).



Rys. 4. Fragment zbiornika w finalnej geometrii do obliczeń MES (ANSYS)

Tab. 5. Maksymalne naprężenia w elementach struktury zbiornika w symulowanym, testowym cyklu napełniania-oprózniczenia

Ciśnienie P [MPa]	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3	2,4	1,8	1,2	0,6	0
Temperatura T [K]	293	239	205	171	137	103	137	171	205	239	273
Króciec wlot. σ_{max} [MPa]	0	32	82	132	184	233	204	162	124	76	31
Liner σ_{max} [MPa]	0	36	43	50	60	72	67	73	75	75	74
Pianka σ_{max} [MPa]	0	1	2,4	3,8	5,2	6,6	5,3	3,6	2,8	1,6	0,4
Plaszczzew. σ_{max} [MPa]	0	161	321	481	642	801	650	491	329	167	6

Przeprowadzone analizy MES pozwoliły uściślić geometrię zbiornika, okazało się również, że typowana wcześniej pianka Rohacell 130 jest zbyt słaba i należy zastąpić ją pianką Rohacell 170 lub 190 (najlepiej tylko lokalnie - w okolicy króćców, oczywiście po uprzednim ustaleniu, że uskok sztywności pianki nie spowoduje lokalnego przeciążenia linera).

TECHNOLOGIA WYKONANIA ZBIORNIKA

Opracowano wstępnie następujące technologiczne kroki wykonania zbiornika:

- 1) Zbudowanie lekkiej, sferycznej formy pozytywowej (wewnętrznej) na metalowym, centralnym pręcie.
- 2) Nawleczenie na pręt centralny 2 króćców i tymczasowe przytwierdzenie ich do formy (bieguny).

- 3) Sklejenie na formie wcześniej ukształtowanych płatków lineru (pomiędzy sobą i z króćcami).
- 4) Spienienie bezpośrednio na linerze warstwy izolacyjnej (z użyciem lekkiej, dzielonej formy negatywowej).
- 5) Nawinięcie (z utwardzaniem) na warstwę piankową zewnętrznej powłoki (preimpregnat – wąska taśma).
- 6) Usunięcie pręta centralnego.
- 7) Usunięcie formy wewnętrznej (przez rozpuszczenie lub stopienie i wylanie przez króćce zbiornika).

Jednym z zasadniczych założeń projektu technologicznego jest wykonanie lineru z wcześniej ukształtowanych (wyoblonionych przez prasowanie na formie w kształcie wycinka sfery) płatków „południkowych” z cienkiej aluminiowej blaszki, sklejonych następnie na zakładkę z użyciem specjalnego kleju do zastosowań niskotemperaturowych – obiecujące są tu zwłaszcza kleje: Hysol EA 9430, Lord 3170. Wstępne próby w małej skali wykazały, że uformowanie w ten sposób sferycznego lineru będzie wymagało prawdopodobnie zastosowania ok. 20 płatków folii aluminiowej.

ZAMOCOWANIE ZBIORNIKA

Dla rozważanej aplikacji zaproponowano zawieszenie zbiornika w pewnego rodzaju sieci (kilkanaście taśm duralowych o szerokości ok. 20 mm i grubości ok. 1 mm, biegnących południkowo do niewielkiego pierścienia centralnego wokół dolnego króćca. Górne końce taśm byłyby przykręcone do korpusu rakiety mniej-więcej na wysokości zbiornikowego „równika”. Trzymanie boczne oraz przeniesienie momentów zapewniłby piankowy pas „równikowy”, przyklejony zarówno do zbiornika jak i do korpusu rakiety (stanowiąc jednocześnie wręgę usztywniającą korpus). Oszacowana masa takiego zamocowania to ok. 2 kg dla zbiornika ciekłego metanu. Tu pewna uwaga: o ile wynikające z przyspieszenia rakiety dodatkowe ciśnienie hydrostatyczne jest niewielkie w porównaniu z ciśnieniem roboczym, to przyspieszenie startowe ma oczywiście bardzo duży wpływ na obciążenie zamocowania zbiornika, które w rozważanym przypadku będzie musiało przenieść ok. 43250 N w przypadku zbiornika wypełnionego ciekłym metanem i ok. 114000 N gdy zbiornik wypełniony będzie ciekłym tlenem.

PODSUMOWANIE

1. Rozważane były konstrukcja i technologia wykonania niewielkiego, średnicciśnieniowego (do 3 MPa) zbiornika służącego do krótkookresowego przechowywania cieczy kriogenicznej w temperaturze ok. 100 K (czyli w praktyce: ciekłego metanu, tlenu i azotu), przeznaczonego dla niewielkiej rakiety kosmicznej.
2. Rozważany był zbiornik sferyczny, ale proponowane konstrukcja i technologia mogą być zastosowane i przy innym kształcie zbiornika (np. cylindryczny z eliptycznymi dennicami).
3. Obliczeniowa masa zbiornika (wersja z jednolitą pianką Rohacell 190) wyniosła ok. 21 kg. W zastosowaniach lotniczych i kosmicznych podstawowym parametrem jest masa zbiornika. „Jakość” zbiornika pod względem jego ciężaru, który jest bardzo istotnym parametrem w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych, jest współczynnik masowy F_m , zdefiniowany następująco:

$$F_m = \frac{P_n \cdot V}{m} \left[\frac{Nm}{kg} \right]$$

gdzie:

P_n – nadciśnienie niszczące zbiornik [Pa],

V – pojemność zbiornika [m³],

m – masa zbiornika [kg].

Typowa wielkość tego współczynnika dla zbiorników ciśnieniowych, zaprojektowanych do zastosowań kosmicznych, to obecnie około 250000 dla zbiorników typu COPV (Composite Overwrapped Pressure Vessel – zbiornik metalowy wzmocniony nawiniętym kompozytem włóknistym) oraz ok. 375000 dla zbiorników czysto kompozytowych. W przypadku rozważanego zbiornika osiągnięto (obliczeniowo) wynik 254400, co byłoby nader dobrym wynikiem dla zbiornika kriogenicznego.

4. Wykonanie zbiornika o przedstawionej konstrukcji nie jest łatwe i wymagałoby pokonania kilku problemów technologicznych, ale poza nawijką kompozytu nie wymaga zastosowania wysoce specjalistycznego i drogiego oprzyrządowania.

5. Konstrukcja zbiornika sprawia trudności przy przeskalowaniu – chcąc przetestować proponowane rozwiązania należałoby użyć modelu nie mniejszego niż 1:2 (ze względu na piankę nie można zanadto podnieść ciśnienia, z kolei ścianka kompozytowa nie może mieć zbyt małej grubości).

6. W przypadku zbiornika o proponowanej konstrukcji stosunkowo łatwo jest osiągnąć bezpieczny proces ewentualnej destrukcji, czyli utratę szczelności i wyciek przed rozerwaniem.

LITERATURA

- [1] Perkowski W. (2007), Obliczenia wstępne rakiety kosmicznej, Postępy Astronautyki, t. 30.
- [2] Perkowski W., Boguszewicz P., Wodyński P. (2009), Nowoczesne zbiorniki rakiet kosmicznych, Postępy Astronautyki, t. 31.
- [3] Materiały handlowe firm: 3M, Degussa, Evonik, Diab, Duna, Henkel (Loctite), Lord.
- [4] Własności materiałów opublikowane w Internecie na stronie MatWeb (matweb.com).

THEORETICAL STUDY OF COMPOSITE TANK FOR CRYOGENIC PROPELLANT STORAGE IN A SPACE ROCKET

Abstract

The article presents the results of conceptual and computational work carried out in the framework of the preliminary design of composite, cryogenic, medium pressure tank, intended for the storage of liquid methane or oxygen, onboard a second stage of a small, two-stage space rocket.

Keywords: composite pressure tank, cryogenic tank, rocket tank