ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: TRANSPORT z. 27 Nr kol. 1295

Krzysztof Grajek

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ZBIORNIKÓW CYSTERN KOLEJOWYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono niektóre założenia i wyniki analizy wytrzymałościowej zbiorników cystern do transportu benzyny i do ciekłych gazów. Opisano typy elementów skończonych, którymi modelowano zbiorniki. Omówiono też problemy związane ze spełnieniem kryteriów wytrzymałościowych.

STRENGTH ANALYSIS OF RAILWAY CISTERN TANKS BY FINITE ELEMENT METHOD

Summary. The paper presents some assumptions and results of the strength analysis of cistern tanks for petrol and liquid gas transport. The types of finite elements for tank modelling have been presented. The problems connected with fulfilling the strength criteria have been discussed.

Cysterna kolejowa jest obiektem służącym do transportu materiałów ciekłych. Mogą to być różne substancje, ale w pracy zajmowano się zbiornikami na paliwa takie, jak benzyna oraz na skroplone gazy, np. propan-butan. W każdym przypadku jest to materiał palny i niebezpieczny, dlatego też szczególnego znaczenia nabiera analiza wytrzymałości zbiornika. Rozwój metod numerycznych, a zwłaszcza Metody Elementów Skończonych pozwolił wykorzystać tę metodę do wyznaczenia rozkładu naprężeń oraz do oceny wytrzymałości zbiornika. Metoda Elementów Skończonych doskonale radzi sobie z modelowaniem postaci geometrycznej analizowanego obiektu, również wprowadzanie obciążeń różnego typu nie nastręcza większych trudności. Problemem pozostaje ustalenie wielkości obciążenia, które w przypadku pojazdu szynowego cechuje się dużą składową dynamiczną. W przypadku tych konkretnych zbiorników skorzystano z ustaleń normowych zawartych we właściwych przepisach narodowych kraju, który te wagony zamówił (Rosja). Takie podejście do obciążeń pozwala wykorzystać zebrane w ciągu wielu lat obserwacji dane charakterystyczne dla danej sieci kolejowej.

Obciążenia te można podzielić na obciążenia grawitacyjne oraz obciążenia dynamiczne wywołane niejednorodnością ruchu. W obciążeniach dynamicznych można wyróżnić siły wywołane jazdą po nierównościach toru, siły hamowania oraz uderzenia przy formowaniu składu. Czasem dochodzą jeszcze obciążenia ciśnieniem przewożonego medium. Przyjęty podział obciążeń wynika raczej z tego, że zajmowano się cysterną na benzynę oraz na skroplone gazy.

Nie zamierzano wprowadzać pełnej systematyki obciążeń występujących w różnych cysternach. Następny problem analizy i to niezależnie od zastosowanej metody wyznaczania naprężeń, to zagadnienie kryteriów, które muszą być spełnione, aby można było cysternę dopuścić do eksploatacji. W przepisach dotyczących ruchu kolejowego te kryteria są określone i w obliczeniach dążono do uzyskania wielkości, które pozwoliłyby na sprawdzenie tych warunków.

Przyjmując Metodę Elementów Skończonych jako podstawowe narzędzie, którym mają być wyznaczone naprężenia, należy podjąć decyzję, jakiego typu element skończony będzie stosowany do modelowania. W różnych systemach MES są różne typy elementów, które radzą sobie lepiej lub gorzej z modelowaniem cysterny. Ponieważ analizę prowadzono systemem PROMES [1,2], wybrano powłokowy element czterowęzłowy. Ten pozornie prosty element jest bardzo wygodny w przygotowaniu danych, a jednocześnie jest wystarczająco dokładny w analizie. Jego dokładność wynika z tego, że wewnętrznie zbudowany jest z czterech trójkątów opartych na krawędziach elementu czworokątnego oraz na piątym węźle, znajdującym się w środku ciężkości elementu. Z macierzy sztywności trójkątów agreguje się macierz sztywności dla obiektu pięciowęzłowego, następnie w wyniku kondensacji statycznej stopni swobody przekształca się ją do rozmiaru odpowiadającego przyjętym czterem węzłom. Ten zabieg pozwala określić go jako quasi - superelement. Taka budowa elementu skończonego umożliwia dosyć swobodną deformację czworokąta nawet do figury wklęsłej oraz dopuszcza jego nieplanarność. Siły wewnętrzne w takim elemencie są wyznaczane w środku ciężkości, przy czym specjalna procedura uśredniająca wartości z trójkątów doskonale wygładza wszelkie oscylacje mające swoje źródła w aproksymacji. Element powłokowy łączy w sobie opis stanu tarczowego i zgięciowego; w układzie lokalnym oba te stany są rozdzielone. Dopiero poprzez transformację dochodzi do ich sprzęgnięcia. Stan tarczowy opisany jest superparametrycznym elementem z rodziny serendipowskiej, w którym wprowadzono dwie pozawęzłowe funkcje kształtu. Natomiast stan zgięciowy opisany jest niedostosowanymi funkcjami kształtu. Pomimo takiego przybliżenia otrzymuje się wyniki o dokładności w pełni wystarczającej dla praktyki inżynierskiej. W takich elementach poza obciążeniami węzłowymi można wprowadzać obciążenia objętościowe (grawitacyjne) oraz obciążenia powierzchniowe (ciśnienia), którymi można modelować parcia hydrostatyczne. W elemencie powłokowym otrzymuje się trzy składowe naprężenia stanu tarczowego oraz trzy jednostkowe momenty gnące stanu zgięciowego. Na powierzchni elementu powłokowego naprężenia stanu tarczowego sumują się z naprężeniami wywołanymi zginaniem. Dla tego płaskiego stanu naprężenia wyznacza się naprężenie zredukowane, które określa wytężenie.

W modelu przyjęto również element belkowy, który jest odcinkiem o stałym przekroju. W takim elemencie przyjęto kwadratowe funkcje kształtu, dzięki czemu są one spójne z funkcjami kształtu przyjętymi w opisie stanu zgięciowego powłoki. Ta zgodność pozwala na łączenie obu typów elementów tworząc w ten sposób powłokowe poszycie użebrowane elementami belkowymi.

Analizowane cysterny zewnętrznie niewiele różniły się między sobą. Obie były walcowe o eliptycznych dennicach. W środku długości na górze był właz z kołnierzem zamykany pokrywą. Różnice zaczynały się przy grubościach, ponieważ cysterna przeznaczona do transportu benzyny miała poszycie o grubości 8 mm w górnej strefie oraz 12 mm w strefie dolnej, natomiast cysterna do transportu ciekłego gazu miała walcowe poszycie o stałej grubości 24 mm. Tak znaczna różnica grubości wynikała z tego, że skroplony gaz musi być transportowany pod roboczym ciśnieniem 2 MPa. Podobne różnice wystąpiły w grubości dennic, która dla cysterny z benzyną miała tylko 12 mm, a dla cysterny przeznaczonej do ciekłego gazu miała 26 mm. Ponieważ przyjęcie cienkiej blachy w cysternie na benzynę nie gwarantuje kształtu, stąd wprowadzono w niej sześć wręg o teowym przekroju. Dwie wręgi umieszczono w przekrojach podporowych, a pozostałe pomiędzy nimi. Cysterny spoczywają w standardowych łożach o kącie opasania około 80°. Pomiędzy łożem a poszyciem znajdują się drewniane listwy zmniej-

szające naprężenia stykowe. Listwy te w modelu obliczeniowym uwzględniono jako sprężyste podpory. W modelach obu cystern wprowadzono górne włazy, a w cysternie na benzynę również dolny otwór spustowy. Do wyznaczenia położenia węzłów znajdujących się na krawędzi przenikania dwóch walców o różnych średnicach wykorzystano specjalny program generacyjny. Wcześniej ustalono też profil przekroju dennicy. Natomiast pozostałe węzły utworzono wykorzystując standardowe generatory systemu PRO-MES. W obu modelach wprowadzono również fragmenty modelowane elementami belkowymi. Były to dolne łapy, do których mocowane są poziome sprzęgi ustalające zbiornik w kierunku jazdy. W cysternie na benzynę elementami belkowymi zamodelowano wręgi. Przy ustalaniu charakterystyk geometrycznych przekroju wręg uwzględniono współpracę poszycia. Ponieważ zbiorniki są symetryczne względem pionowej podłużnej płaszczyzny, pominięto niewielkie oddziaływania boczne i zbudowano model obejmujący tylko połowę zbiornika. W płaszczyźnie symetrii założono odpowiednie warunki brzegowe modelujące oddziaływanie odrzuconej połowy obiektu.

Do obliczeń przyjęto następujące obciążenia:
- grawitacyjne dla pustego zbiornika,
- hydrostatyczne modelujące oddziaływanie grawitacyjne ciekłego medium,
- ciśnienie równomierne,
- poziome grawitacyjne,
- poziome hydrostatyczne.

Obciążenie grawitacyjne pustego zbiornika powoduje automatyczne wyznaczenie sił węzłowych we wszystkich elementach. Wielkość tych sił jest zależna od ciężaru właściwego materiału oraz od wielkości i grubości elementu powłokowego lub długości i pola przekroju elementu belkowego.

Obciążenie hydrostatyczne jest zależne od ciężaru właściwego oraz od położenia lustra cieczy. W systemie PRO-MES obciążenia hydrostatyczne zadaje się bardzo wygodnie, ponieważ system sam określa, które elementy są nad lustrem cieczy, a które są zwilżone. Możliwość ta była tym istotniejsza, że zarówno dla benzyny, jak i dla gazu jest ograniczony stopień napełnienia (85%). W przypadku zbiornika na ciekły gaz przyjęto jeszcze obciążenie hydrostatyczne wody w pełni zapełnionego zbiornika. Obciążenie to występuje tylko przy próbie wodnej.

Stałe ciśnienie wprowadzono po to, aby zamodelować ciśnienie robocze i próbne w cysternie na ciekły gaz oraz podciśnienie, które może wystąpić w cysternie na benzynę.

Poziome obciążenie grawitacyjne modeluje część sił poosiowych, które wystąpią w czasie hamowania lub przy uderzeniu podczas przetaczania. Ponieważ przepisy określają dopuszczalne wartości tych sił, wystarczyło określić, jaka ich część jest przejmowana przez masę zbiornika, a jaka przez ciekłe medium. W systemie PRO-MES można wprowadzać dowolny mnożnik grawitacyjny, dzięki czemu łatwo można było dobrać jego wartość z warunku równości sumy sił z częścią założonej siły uderzenia.

Pozostałą część poziomej siły uderzenia przejmuje masa medium. Siła ta powoduje rozkład hydrostatyczny. Przy założeniu lustra cieczy w jednej z dennic można tak dobrać mnożnik poziomej grawitacji, aby suma sił poziomych była równa części założonej siły uderzenia.

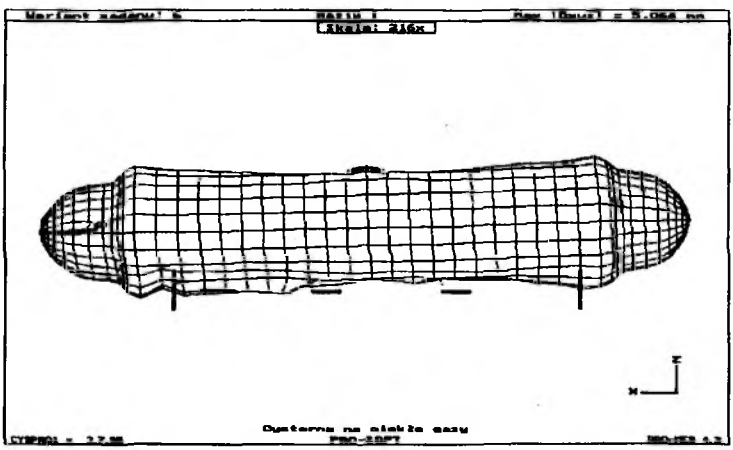
Mając tak zdefiniowane obciążenia można metodą superpozycji wyników analizować różne stany zbiorników. Przyjęto dwa stany podstawowe: przetaczanie oraz jazdę. W pierwszym stanie założono brak dynamiki ruchów torowych, za to przyjęto maksymalną poziomą siłę uderzenia. W drugim stanie wprowadzono współczynnik dynamiczny zwiększający siły pionowe. Jego wartość zależy od sztywności zawieszenia, mas nieresorowanych oraz od maksymalnej szybkości jazdy [3]. Siłę poziomą przyjęto wtedy znacznie mniejszą. Modeluje ona oddziaływania poosiowe podczas hamowania. W zbiorniku cysterny na ciekły gaz przyjęto jeszcze jeden stan kryterialny. Była to próba wodna, w czasie której zbiornik jest w pełni wypełniony wodą i obciążony ciśnieniem większym o 50% od ciśnienia roboczego. W przypadku

cysterny na benzynę jako pomocniczy rozpatrzono też przypadek pustego zbiornika poddanego podciśnieniu.

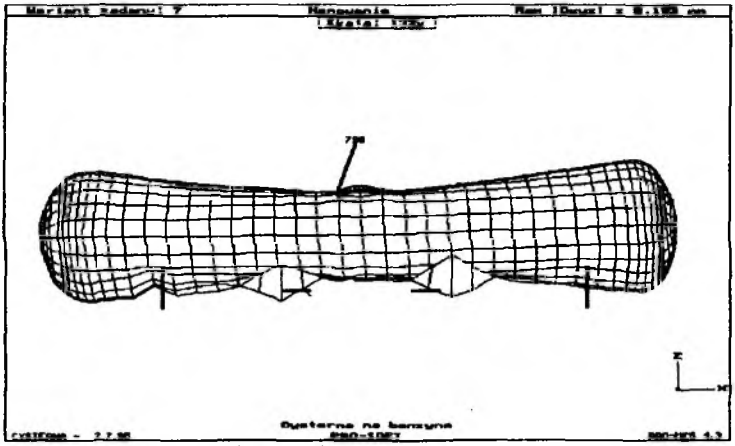
Obliczenia Metodą Elementów Skończonych pozwalają na dokładną analizę przemieszczeń i naprężeń wywołanych założonym obciążeniem, ale liczba wyników jakie są emitowane po rozwiązaniu jest tak duża, że bez odpowiedniej formy graficznej prezentacji ich analiza jest utrudniona. W systemie PRO-MES wyniki są prezentowane w pełni graficznie. Na ekranie monitora można zobaczyć odkształcenia obiektu w różnej skali, pod różnymi kątami patrzenia, a nawet z ograniczoną liczbą składowych. Naprężenia są prezentowane na kilka sposobów. Rozkład naprężeń redukowanych ma postać barwnych map, w których kolor odpowiada przedziałowi wartości. W odróżnieniu od innych systemów MES przyjęto konwencję termiczną, w której najniższym wartościom naprężeń odpowiada kolor czarno - brązowy, a poprzez kolory czerwone i pomarańczowe dochodzi się do żółtej strefy o najwyższych wartościach. Taka konwencja prowadzi do wyróżnienia stref maksymalnie wytężonych, ponieważ kolor żółty jest najsilniej odbierany przez ludzkie oko.

Dla potrzeb drukarek czarno-białych barwny rozkład może być zastąpiony układem wyróżnionych stref, w których naprężenia należą do kolejnych przedziałów. Można również sporządzić warstwice naprężeń redukowanych. Dużą pomocą mogą być rysunki rozkładu naprężeń głównych, które pozwolą określić, jakie naprężenia dominują w wytężeniu danego punktu. Ponadto w systemie PRO-MES można łatwo sporządzać różnego rodzaju wykresy oraz można odczytać wartości w dowolnym elemencie.

Graficzna wizualizacja przemieszczeń pozwala łatwo stwierdzić, że w przypadku cysterny na ciekły gaz dominuje ciśnienie robocze (rys. 1), które wywołuje charakterystyczne odkształcenia dennic. W cysternie na benzynę dennice nie doznają takich odkształceń (rys. 2). W obu cysternach można zauważyć owalizację przekroju środkowego, w którym znajduje się właz. Zbiornik na benzynę doznaje większej owalizacji, ponieważ jest bardziej wiotki.

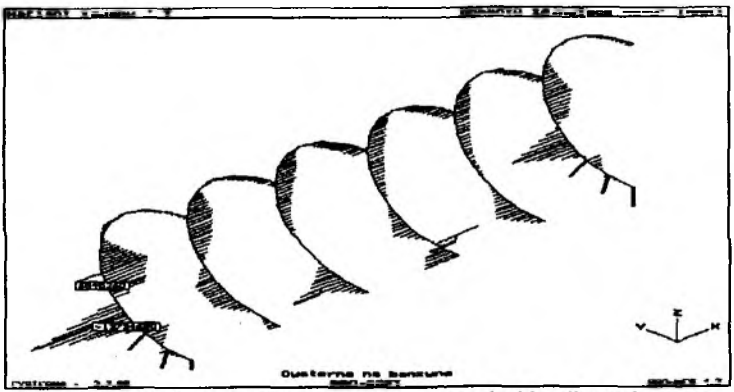


Rys. 1. Odkształcenia zbiornika na ciekłe gazy przy hamowaniu
Fig. 1. Deformations of the tank for liquid gas during the braking

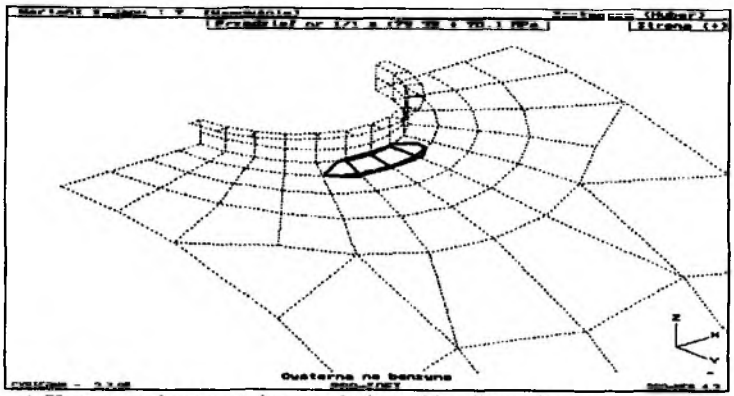


Rys. 2. Odkształcenia zbiornika na benzynę
Fig. 2. Deformations of the tank for petrol

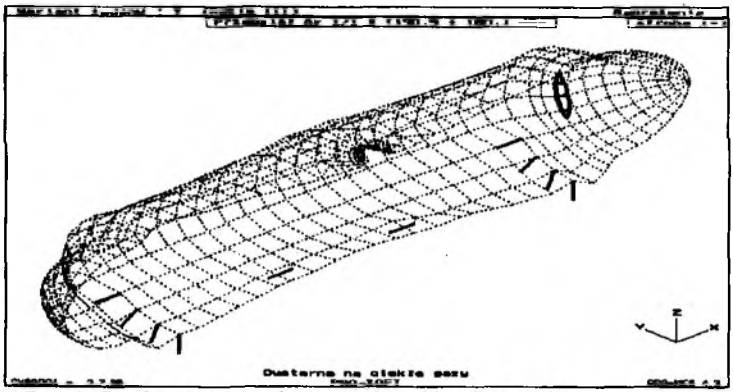
Analiza naprężeń wykazała, że maksymalne naprężenia lokalizują się zupełnie w innym miejscu w zbiorniku na benzynę niż w zbiorniku na gaz. Widać to wyraźnie zwłaszcza w przypadku obciążeń występujących przy hamowaniu. W cysternie na benzynę największe naprężenia występują we wręgach, zwłaszcza w tych, które są w płaszczyźnie podpór (rys. 3). Duże naprężenia pojawiają się w pobliżu podłużnych łap, które przejmują poziome siły na ramę wagonu, oraz w pobliżu włazu (rys. 4).



Rys. 3. Rozkład momentów gnących we wręgach zbiornika na benzynę
Fig. 3. The distribution of bending moment in frames of tank for petrol



Rys. 4. Koncentracja naprężeń przy włazie w zbiorniku na benzynę
Fig. 4. Concentration of stresses near the door in the tank for petrol



Rys. 5. Strefa największych naprężeń w zbiorniku na ciekłe gazy
Fig. 5. The zone of maximum stresses in the tank for liquid gas

To miejsce jest zresztą najbardziej wytężone również dla obciążeń bez sił poziomych. Widać z tego, jak ważne jest odpowiednie wzmocnienie tego miejsca nakładką.

W zbiorniku na gaz maksymalne wytężenie występuje po wewnętrznej (!) stronie dennicy na przejściu z małego łuku w duży (rys.5). Szczegółowa analiza naprężeń głównych wykazała w tym miejscu silne naprężenia rozciągające w kierunku południkowym oraz duże ujemne naprężenia obwodowe. Jest to stan zgodny z postacią odkształcenia dennicy.

Po wyznaczeniu maksymalnych naprężeń dla typowych obciążeń można było porównać je z wartościami kryterialnymi określonymi przez odpowiednie przepisy. W przypadku cysterny na gaz okazało się, że wartości ekstremalne przy obciążeniach eksploatacyjnych przekraczają nieznacznie (6%) wartości dopuszczalne. Taka sytuacja rodzi pytanie, czy fakt ten dyskredytuje konstrukcje? Odpowiadając na to pytanie należy pamiętać, że wartość dopuszczalna została określona z uwzględnieniem efektów trwałościowych, a miejsce, w którym pojawia się maksymalne naprężenie, cechuje się stałą grubością, brakiem gwałtownych zmian kształtu oraz niewielką zmiennością. Te czynniki prowadzą do wniosku, że pomimo formalnego przekroczenia pułapu można taką konstrukcję dopuścić do eksploatacji.

W podsumowaniu warto podkreślić, że zastosowanie Metody Elementów Skończonych do analizy zbiorników pozwoliło wnikliwie poznać odkształcenia jak i wytężenia, jakie w nich wystąpią. Początkowy nakład pracy, jaki należy ponieść na przygotowanie danych opisujących ten pozornie prosty obiekt, zwraca się z nawiązką w sytuacji, kiedy trzeba wprowadzić zmiany konstrukcji np. postaci wręg, zmiany grubości, czy strefy i grubości nakładki przy włazie.

Literatura

[1] Grajek K.: PRO-MES 4, Przewodnik po systemie, Gliwice 1995.
[2] Grajek K.: System PRO-MES do obliczeń wytrzymałościowych metodą elementów skończonych, Inżyniera i Budownictwo, nr 12/92
[3] Normy do obliczeń i projektowania nowych i zmodernizowanych wagonów kolei Ministerstwa Komunikacji Drogowej na tor 1520 mm, Ministerstwo Budowy Maszyn Ciężkich i Transportowych ZSRR, Ministerstwo Komunikacji Drogowej ZSRR, 1983.

Recenzent: dr hab. inż. prof. Pol. Śl. Andrzej Wilk

Wpłynęło do redakcji : 10.05.1995

Abstract

The paper presents some assumptions and results of the strength analysis of cistern tanks for petrol and liquid gas transport. The analysis has been carried out numerically by means of a universal system of finite element method named PRO-MES. Four-point coat elements and beam elements have been used to model a tank. Tank casing has been modelled with coat elements, while reinforcement of axial supports with beam elements. In the case of a petrol tank transverse stiffening frames have been modelled with beam elements. Gravitational and hydrostatic loads have been assumed according to the rules valid in the country where the railway cars are supposed to be used. Numerical calculation results are presented in a graphical form according to visual possibilities of PRO-MES system. Completely different deformations have been found out in the tanks for petrol transport than in the tanks for liquid gas transport. In the latter case the deformations are mainly caused by operating pressure, necessary to maintain the gas in a liquefied state. Also the places of maximum stresses have been different for both tanks. In the tank for petrol transport the biggest efforts have occured in the frames, especially in those which are in supporting places. There are also concentrations near the door, connected with the sudden changes of the shape. In the tank for liquid gas the biggest stresses occur on the inner (!) side of the bottom where a small curvature passes into a big one. The stress is 6 % bigger than admissible value. However, there is no change of shape and stresses in this place. Thus, in the author's opinion the tank can be used in its form in spite of exceeding the admissible value.