

NUMERYCZNA ANALIZA ZNISZCZENIA ABSORBERA ENERGII ZBUDOWANEGO Z RUR CIENKOŚCIENNYCH PODDANYCH ZGNIOTOWI

M. KOTELKO, S.LIPA

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Politechniki Łódzkiej
Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

W pracy przedstawiono zagadnienie nośności w fazie zniszczenia absorbera energii zbudowanego z rur cienkościennych poddanych bocznemu (promieniowemu) zgniotowi. Omówiono metody analizy fazy zniszczenia absorberów energii. Przedstawiono model obliczeniowy metody elementów skończonych (MES) oraz wyniki obliczeń numerycznych MES. Przeprowadzono analizę wpływu liczby elementów rurowych i ich wymiarów oraz sformułowano wstępne wnioski dotyczące tego wpływu na nośność w fazie zniszczenia i ilość energii dysypowanej przez absorber. Wyniki obliczeń MES przedstawiono w postaci wykresów obciążenia w funkcji odkształcenia absorbera oraz map odkształceń i naprężeń.

1. WPROWADZENIE

Wraz ze wzrostem wymagań dotyczących bezpieczeństwa pojazdów, szczególnie samochodów osobowych, zaistniała potrzeba projektowania urządzeń, których zadaniem jest kontrolowane wyhamowanie, a w rezultacie, zatrzymanie poruszającej się masy. Jednym z możliwych rozwiązań konstrukcyjnych takiego urządzenia jest konstrukcja cienkościenna, która pochłania energię kinetyczną układu dynamicznego poprzez konwersję jej na energię odkształcenia plastycznego. Konstrukcję taką nazywamy absorberem energii.

W latach 60-tych XX-go wieku zalecenia normatywne w przemyśle samochodowym dotyczące bezpieczeństwa spowodowały rozwój nowej gałęzi w dziedzinie analizy inżynierskiej, zwanej „*impact crashworthiness*” zajmującej się takimi właśnie elementami konstrukcyjnymi, a szerzej – zachowaniem się układu dynamicznego przy zetknięciu z przeszkodą. W chwili obecnej stosuje się różne typy cienkościennych absorberów energii [1], zbudowane z różnych elementów odkształcalnych, pochłaniających energię uderzenia. Należą do nich bębny stalowe, rury (słupy) o przekroju kołowym lub pryzmatycznym poddane osiowemu ściskaniu, elementy sandwiczowe typu ulowego, ściskane stożki cienkościenne (*frusta*) ściskane profile cienkościenne typu omega i wiele innych.

Odrębnym typem absorberów energii są rury lub pierścienie cienkościenne, poddane bocznemu (promieniowemu) zgniotowi. Obciążone promieniowo układy rur cylindrycznych są stosowane między innymi jako amortyzatory przy zderzeniu pojazdu z przeszkodą [2]. W niektórych rozwiązaniach są one zbudowane w postaci układu rur na przemian metalowych i niemetalowych.

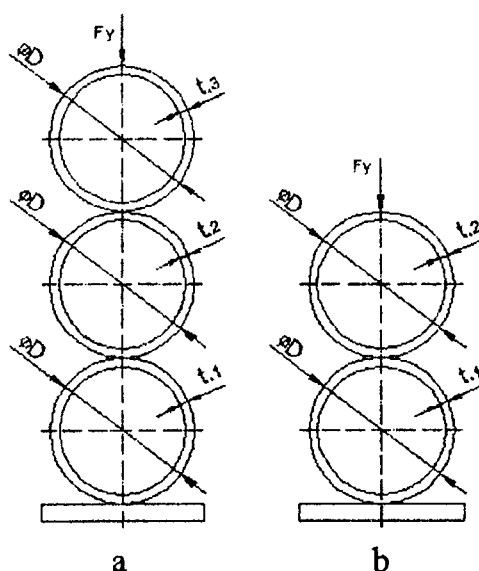
Zgniot pojedynczych rur metalowych o przekroju kołowym pomiędzy dwiema sztywnymi płytami badali De Runtz i Hodge [3]. Przeprowadzili badania doświadczalne oraz bardzo przybliżoną analizę teoretyczną zagadnienia. Zgniotowi i analizie fazy

zniszczenia rur cienkościennych o przekroju eliptycznym wzmocnionych cięgnami średnicowymi i obciążonych promieniowo za pomocą dwu sztywnych płyt poświęcona jest praca Wu i Carney'a [2]. Przeprowadzili oni analizę nośności w fazie zniszczenia takich rur stosując metodę kinematyczną i wykorzystując jednocześnie założenia teorii sztywno-plastycznej [4], oraz jednocześnie szacując nośność w fazie zniszczenia „od dołu” za pomocą metody statycznej. Praca zawiera także wyniki obliczeń MES za pomocą pakietu ABAQUS i wyniki analizy wpływu różnych parametrów geometrycznych absorbera na jego nośność w fazie zniszczenia i ilość pochłanianej energii. W publikacji [5] ci sami autorzy porównali otrzymane wyniki obliczeń teoretycznych z wynikami eksperymentu. Stwierdzili, że obciążenia rury o przekroju eliptycznym wzdłuż wielkiej osi elipsy zwiększa ilość energii absorbowanej. Zbadali także wpływ cięgien średnicowych na wielkość energii dysypowanej oraz nośność w fazie zniszczenia.

2. CEL I PRZEDMIOT PRACY

W dotychczasowych pracach dotyczących absorberów pierścieniowych lub rurowych poddanych zgniotowi w kierunku promieniowym nie rozważano takich, które zbudowane byłyby z więcej niż jednego elementu odkształcalnego. Ponieważ większa liczba takich elementów powoduje wzrost energii dysypowanej i nośności w fazie zniszczenia oraz wydłuża czas reakcji absorbera w warunkach kolizji, w niniejszej pracy rozpatrzono absorbery typu rurowego poddane zgniotowi w kierunku promieniowym, zbudowane z dwu lub trzech elementów rurowych.

Przedmiotem pracy był zatem absorber wieloczłonowy, zbudowany z elementów rurowych poddanych bocznemu (promieniowemu) zgniotowi (Rys.1).



Rys. 1. Schemat absorbera: a) z trzema elementami rurowymi, b) – z dwoma elementami rurowymi

Celem pracy była analiza parametryczna i zbadanie wpływu liczby elementów rurowych oraz ich geometrii i konfiguracji na nośność w fazie zniszczenia i ilość energii pochłanianej przez absorber. Dokonano tego za pomocą obliczeń teoretycznych metodą elementów skończonych (MES). Praca ma charakter wstępnej analizy zagadnienia.

Przewiduje się weryfikację doświadczalną otrzymanych wyników numerycznych oraz opracowanie rozwiązania metodą analityczną, która byłaby przydatna dla konstruktora we wstępnej fazie projektowania absorbera, pozwoliłaby bowiem na opracowanie stosunkowo prostych algorytmów obliczania nośności w fazie zniszczenia.

Przeanalizowano trzy różne przypadki absorbera zbudowanego z trzech elementów rurowych (Rys.1) o różnych grubościach ścianek oraz jeden absorber składający się z dwu elementów. Grubości ścianek i konfigurację wszystkich rozpatrzonych absorberów zestawiono w Tabelicy 1.

Tabelica 1. Wymiary absorberów

| Symbol absorbera | Liczba elementów rurowych | t_1 mm | t_2 mm | t_3 mm | D mm |
|------------------|---------------------------|----------|----------|----------|-------|
| AB3-1 | 3 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 44.25 |
| AB3-2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 42 |
| AB3-3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 42 |
| AB2 | 2 | 5.5 | 5.5 | - | 44.25 |

Długość wszystkich elementów rurowych wynosiła $l = 150$ mm. Każdy z absorberów zbudowany był z elementów rurowych o jednakowych średnicach zewnętrznych.

3. METODY ANALIZY FAZY ZNISZCZENIA ABSORBERÓW ENERGII

W większości przypadków cienkościennych absorberów energii proces zniszczenia inicjowany jest sprężystym lub sprężysto-plastycznym wyboczeniem jednej lub kilku ścianek, po którym następuje propagacja obszarów uplastycznionych zlokalizowanych w tzw. *załomach plastycznych*, w wyniku czego tworzą się lokalne przeguby plastyczne, będące węzłami plastycznego mechanizmu zniszczenia [4,8]. Wielkość energii dysypowanej w procesie deformacji tego mechanizmu jest miarą efektywności absorbera. Drugim czynnikiem wpływającym na efektywność absorbera jest jego nośność we wstępnej fazie zniszczenia. Jeżeli jest ona za wysoka, to może spowodować zbyt wysokie prędkości w fazie uderzenia. Z drugiej strony, jeżeli nośność ta jest zbyt niska, powoduje to zmniejszenie energii dysypowanej.

Uwagi powyższe dotyczą również absorbera zbudowanego z cienkościennych elementów rurowych poddanych bocznemu zgniotowi, jednakże charakter ich zniszczenia jest nieco inny. W przypadku pojedynczego, nie wzmocnionego walca, po osiągnięciu siły zgniotu odpowiadającej uplastycznieniu w strefie przyłożenia siły następuje propagacja obszarów uplastycznionych, aż do utworzenia się czterech przegubów plastycznych rozmieszczonych równomiernie co 90° [2].

Analizę pracy absorbera w fazie zniszczenia, w szczególności oszacowanie jego nośności w tej fazie można przeprowadzić stosując *oszacowanie dolne* nośności (poprzez implementację metody statycznej) lub *oszacowanie górne* – stosując metodę kinematyczną. W pierwszym przypadku należy spełnić warunek uplastycznienia i warunek równowagi, stosując np. metodę statycznie dopuszczalnych pól naprężeń [6,7]. Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż dla wielocłonowego absorbera będącego przedmiotem rozważań konieczna jest także analiza możliwych ścieżek równowagi, a w szczególności wyznaczenie ścieżek pokrytycznych przy ewentualnej utracie stateczności

globalnej lub lokalnej układu. W drugim przypadku należy rozważyć kinematycznie dopuszczalny mechanizm plastyczny [4]. Nośność w fazie zniszczenia jest wówczas określana z zasady mocy przygotowanych o następującej postaci:

$$P \cdot \dot{\delta} = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^P(\beta, \chi) dV \quad (1)$$

gdzie, $\dot{\delta}$ - prędkość płynięcia (δ - przemieszczenie uogólnione), P - siła uogólniona, β - wektor parametrów kinematycznych mechanizmu, χ - wektor parametrów geometrycznych mechanizmu, $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ - tensor prędkości odkształcenia plastycznego.

Pierwszym krokiem w rozwiązaniu zagadnienia nośności w fazie zniszczenia absorbera jest określenie geometrii plastycznego mechanizmu, a zatem sformułowanie wektorów χ i β w równaniu (1). Powinny one być określone na drodze teoretycznej identyfikacji pola przemieszczeń lub prędkości za pomocą MES oraz zweryfikowane badaniami doświadczalnymi. Niniejsza praca dotyczy pierwszej części tak sformułowanego problemu.

4. MODEL OBLICZENIOWY ABSORBERA I WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH.

Absorber będący przedmiotem rozważań zamodelowano jako zagadnienie płaskie, wykorzystując symetrię układu. Założono, że elementy rurowe obciążone są jak na Rys.1. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu ANSYS. Do budowy modelu MES użyto elementów skończonych typu PLANE183 i PLANE42. Rozwiązano zagadnienie nieliniowe, a zatem do obliczeń przyjęto model materiału biliniowego ze wzmocnieniem liniowym po uplastycznieniu o następujących parametrach:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa} ; \nu = 0.3 ; \sigma_{pl} = 250 \text{ MPa} ; E_t = 2500 \text{ MPa}$$

gdzie: σ_{pl} - granica plastyczności, E_t – moduł styczny.

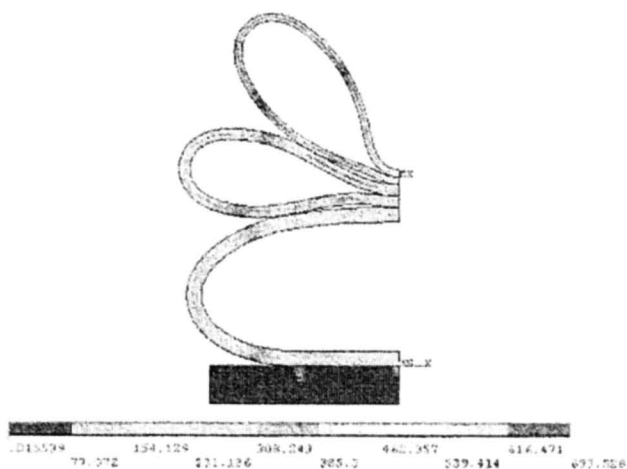
W obliczeniach nie narzucono wartości granicznej wytrzymałości doraźnej materiału na rozciąganie lub ściskanie. Zatem mapy przedstawione na Rys. 2 mają charakter identyfikacyjny, zaś wykresy na Rys. 3 i 4 mają sens fizyczny tylko do pewnych (nie sprecyzowanych w obliczeniach) wartości siły obciążającej.

Na Rys. 2 pokazano postaci odkształcenia i mapy naprężeń zredukowanych obliczanych wg hipotezy Hubera - Misesa dla absorberów trój-członowych o różnych grubościach ścian poszczególnych członów walcowych. Jak widać, odkształcenia najbardziej obciążonych członów są bardzo duże i sięgają 95 % średnic początkowych, aczkolwiek należy podkreślić, że w rzeczywistym absorberze (zależnie od wytrzymałości doraźnej materiału i ewentualnych naprężeń resztkowych) zniszczenie skrajnych włókien ściany walca może nastąpić przed osiągnięciem tak dużej deformacji.

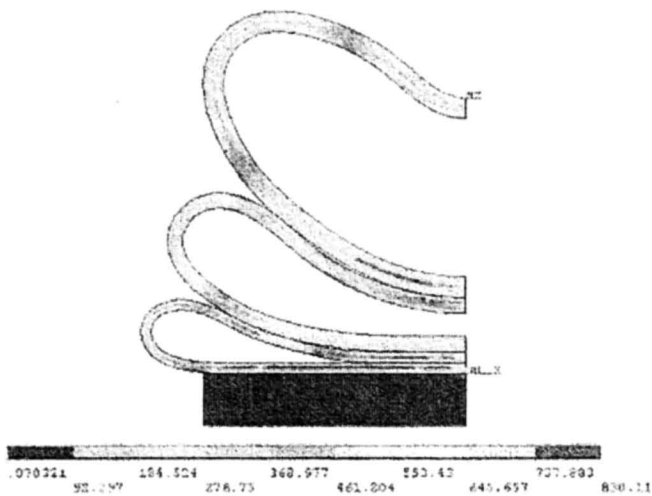
Z otrzymanych postaci odkształcenia można wnioskować, że w najbardziej obciążonych elementach rurowych powstaje cztero-przegubowy mechanizm plastyczny, nie jest to wszakże mechanizm tzw. *prawdziwy*, ale w odniesieniu do całego absorbera – *quasimechanizm* [4].



rys.2-a



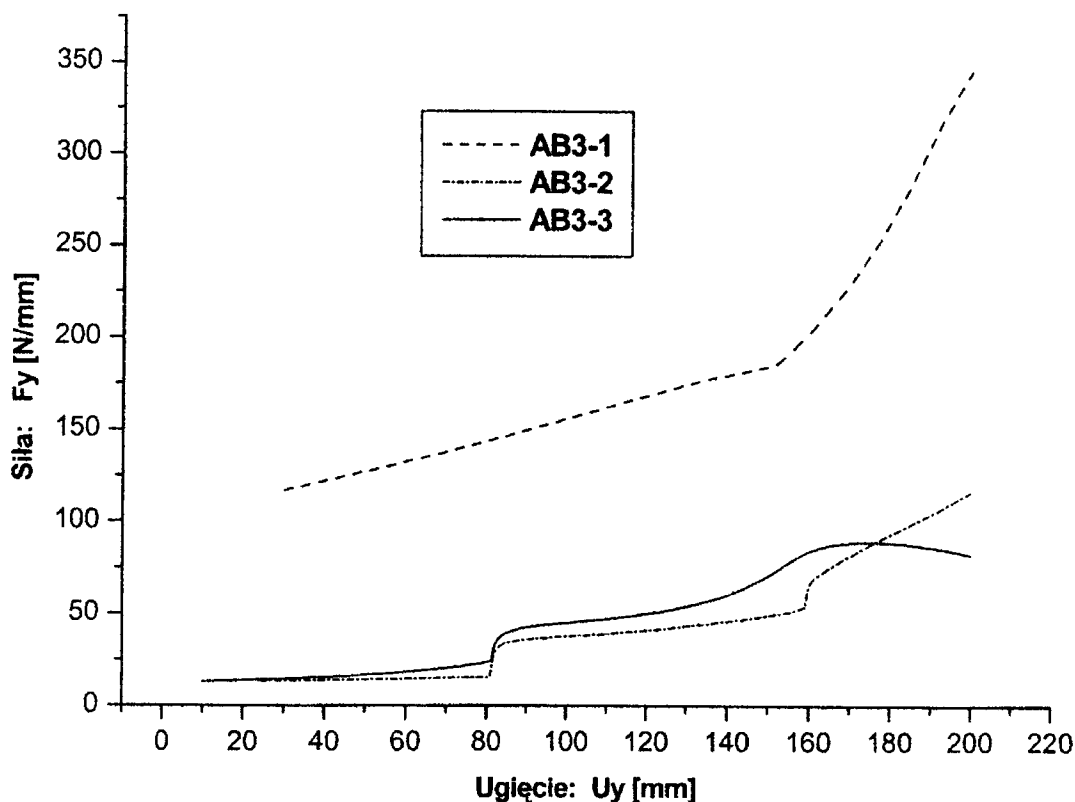
rys.2-b



rys.2-c

Rys. 2. Postaci odkształceń absorberów trój-członowych
a) AB3 – 1 , b) AB3-2 , c) AB3-3

Na Rys. 3 przedstawiono odpowiednie wykresy pracy trój-członowych absorberów, tj. wykresy siły zgniotu w funkcji ugięcia. Ze względów wspomnianych we wstępie absorber typu AB3 – 1 charakteryzuje się zbyt wysoką nośnością w fazie zniszczenia, natomiast absorber typu AB3 – 3 wydaje się być efektywny zarówno z punktu widzenia nośności przy zniszczeniu, jak i ilości energii dysypowanej.



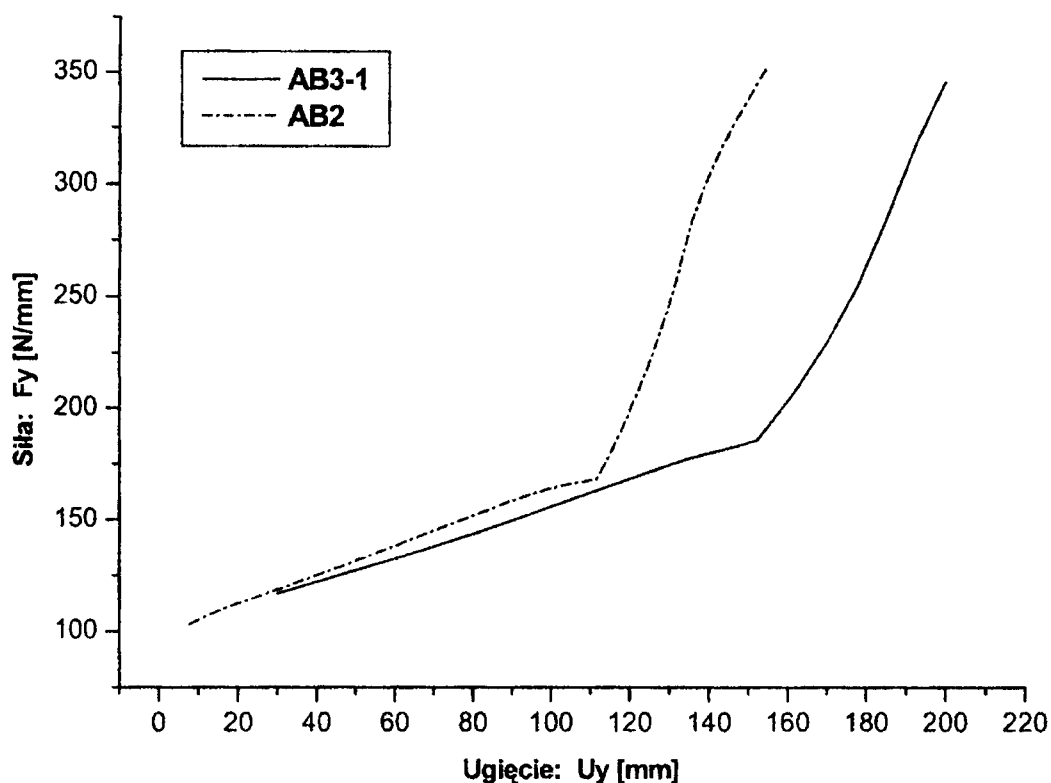
Rys. 3. Wykresy pracy absorberów trój-członowych o różnych grubościach ścian elementów rurowych

Interesujące jest zestawienie wykresów pracy (siła – ugięcie) absorbera dwu- i trój-członowego o jednakowych grubościach ścian elementów rurowych. Gradient wzrostu siły zgniotu jest prawie taki sam dla obu absorberów, z przesuniętym jedynie punktem „przejścia” deformacji plastycznej z elementu skrajnego na następny.

5. UWAGI KOŃCOWE

Otrzymane wyniki obliczeń MES są zbieżne z tymi, jakie uzyskali De Runtz i Hodge za pomocą metody analitycznej [3], a następnie Wu i Carey [2] metodą zarówno analityczną, jak i numeryczną dla absorbera jednoczłonowego. Wyniki te potwierdzają także celowość stosowania absorberów wieloczłonowych, ze względu na wielkość energii dysypowanej w procesie zniszczenia i stanowią materiał wyjściowy do opracowania teoretycznego modelu plastycznego mechanizmu, tj. kinematycznie dopuszczalnego pola przemieszczeń w metodzie kinematycznej, dla absorberów wieloczłonowych.

Wykresy pracy absorberów (zależność siła zgniotu – ugięcie) wskazują na konieczność uwzględnienia wzmocnienia materiału po uplastycznieniu, nawet przy założonym w obliczeniach numerycznych stosunkowo niskim module stycznym.



Rys. 4. Zestawienie wykresów pracy absorbera dwu- i trój-członowego o jednakowej grubości ścian elementów rurowych.

LITERATURA

- [1] Alghamdi A.A.A., Collapsible impact energy absorbers: an overview, *Thin-walled Struct.*, v.39, pp. 189-213, Elsevier 2001
- [2] Wu L., Carney J.F., Initial collapse of braced elliptical tubes under lateral compression, *Int. J. Mech.Sci.*, v. 39, No 9, pp.1023-1036, 1997
- [3] De Runtz J.A., Hodge P.G., Crushing of a tube between rigid plates, *J. of Appl. Mech.*, pp. 391-395, September 1963,
- [4] Kotelko M., Mechanizmy zniszczenia zginanych dźwigarów cienkościennych o ścianach izo- i ortotropowych, *Z. N. Politechniki Łódzkiej* Nr 844, *Rozprawy Nauk.* Nr 273, Łódź 2000.
- [5] Wu L, Carney III JF. Experimental analysis of collapse behaviour of braced elliptical tubes under lateral compression. *Int. J Mech. Sci.* 1998;40(8):761–77.
- [6] Szczepiński W., Szlagowski J., *Projektowanie konstrukcji metodą granicznych pól naprężeń*, PWN, Warszawa-Poznań 1985
- [7] Gill. S. S., Large deflection rigid-plastic analysis of a built-in semicircular arch. *Int. J. Mech. Engng Ed.*, 1976, 4, pp. 339-355.
- [8] Abramowicz W., Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-walled Struct.*, v.41, No 2-3, Elsevier February 2003, pp.91-109

NUMERICAL COLLAPSE ANALYSIS OF TUBULAR MULTI-MEMBER ENERGY ABSORBERS UNDER LATERAL COMPRESSION

In the paper the problem of collapse and energy dissipation of tubular multimember energy absorber subject to lateral compression is presented. Methods of analysis of collapse and initial collapse loads of the absorber are discussed. A numerical Finite Element (FE) model of the considered absorber and results of numerical calculations are presented. An analysis of the influence of the number of tubular members and also dimensions and lay-out of members upon the collapse load and an amount of the dissipated energy of plastic deformation is conducted. Results of numerical calculations are presented in the form of load-deformation diagrams and deformation patterns.