

WIESŁAW BEREZA\*

## WSPÓŁCZESNE METODY ANALIZY KONSTRUKCJI PNEUMATYCZNYCH

---

### CONTEMPORARY METHODS OF ANALYSES PNEUMATIC STRUCTURES

---

#### Streszczenie

Współczesne metody obliczeniowe z zastosowaniem metod numerycznych pozwalają na dokładne projektowanie konstrukcji wiotkich, takich jak konstrukcje pneumatyczne, wiotkie membrany, w których może wystąpić zjawisko pofałdowania lub zwiotczenia powodujące wyłączenia z pracy. Wyodrębnienie tych stref jako obszarów nieefektywnej pracy oraz obszarów inicjujących zagrożenie dla konstrukcji może być dokładnie analizowane i minimalizowane. Pozwala to na coraz szersze zastosowanie tego rodzaju konstrukcji w budownictwie jako realizacji o niskich kosztach nakładu, krótkim czasie powstania oraz szybkiej amortyzacji.

*Słowa kluczowe: powłoki pneumatyczne, konstrukcje wiotkie, pofałdowanie*

#### Abstract

The contemporary methods of calculations with use of numerical methods make possible for precisely design whippines structural like pneumatic shell, membrane structures which take place effect of wrinkled or anoty – only by work. The separate of this sphere as places of ineffective work or places being a menace to structural might be precisely analyses and minimize. It makes possible to use wider application this kind building structure as realization with low building cost, with short time of realization and fast amortization.

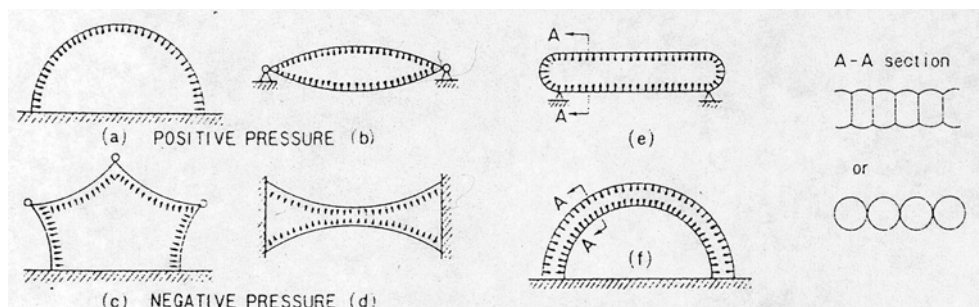
*Keywords: pneumatic shell, membrane structures, wrinkled*

---

\* Mgr inż. Wiesław Bereza, Instytut Projektowania Budowlanego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Konstrukcje pneumatyczne odznaczają się tym, że ich nośność, kształt i stateczność jest uzyskiwana przez zamknięcie określonych geometrycznie stref powietrza (ogólnie: gazu, cieczy, materiału sypkiego), pozostających w stanie nadciśnienia w stosunku do otaczającego konstrukcję ośrodka. Wytworzenie takich stref jest możliwe w wyniku zastosowania wiotkich, wytrzymałych materiałów z tworzyw sztucznych lub pochodzenia roślinnego, z których najczęściej wykonuje się powłoki pneumatyczne. Ze względu na stosowany materiał, powłoki te nie przenoszą zginania ani ściskania, a jedynie rozciąganie i mogą znajdować się bądź to w stanie błonowym (płaski stan naprężenia), gdy oba naprężenia są dodatnie ( $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 > 0$ ), bądź też w jednoosiowym stanie naprężenia z możliwością powstawania fałdów ( $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ). Grubość powłok pneumatycznych jest mała w stosunku do ich pozostałych wymiarów i dlatego są to konstrukcje wiotkie; zakłada się, że znajdują się one w płaskim stanie naprężenia. Z punktu widzenia mechaniki, konstrukcje te charakteryzują się dużą odkształcalnością oraz na ogół nieliniową sprężystością i brakiem sztywności na ściskanie. Cechy te determinują model ośrodka, na gruncie którego jest możliwa pełna analiza zakresu ich pracy.



Ryc. 1. Typowe struktury pneumatyczne

Fig. 1. The typical pneumatic shells

Pierwowzorem konstrukcji pneumatycznych były balony, które następnie zostały przeniesione do budownictwa lądowego, zaistniały bowiem warunki sprzyjające wznoszeniu tego typu konstrukcji. Wydaje się, że wyjście poza formy budownictwa konwencjonalnego może stworzyć okazję do znalezienia form technicznych budownictwa nowego typu, odznaczającego się przede wszystkim dużą efektywnością realizacyjną, przy zachowaniu wartości użytkowych właściwych tym formom, a nawet stworzeniu nowych, np. łatwej przenośności, szybkiej realizacji. Pierwszą naziemną konstrukcją pneumatyczną (typu hangaru lotniczego) zaprojektował i zrealizował w 1917 r. inżynier angielski F.W. Lanchester. Jednak rzeczywisty rozwój tych konstrukcji datuje się dopiero od 1944 r., kiedy W. Bird zaprojektował kilka konstrukcji o typowym charakterze użytkowym. Były to osłony dla obrotowych anten radarowych wykonane z materiału niestanowiącego przeszkody dla fal radaru. Następne konstrukcje to hangary i magazyny wzniesione na Alasce. Ten ostatni przykład udowodnił wielką przydatność konstrukcji pneumatycznych, które wybudowane w bardzo niekorzystnych warunkach klimatycznych (temperatury do około  $-50^{\circ}\text{C}$  i huraga-

nowe wiatry) wykazały swoją przydatność i odporność na te warunki atmosferyczne przez co najmniej dziesięć lat. Badania w tunelach aerodynamicznych udowodniły, że już przy nadciśnieniu około 0,0045 at. (0,045 MN/m<sup>2</sup> – w zasadzie jest to nadciśnienie niewywołujące żadnych szkodliwych wpływów na organizm ludzki, a w większości przypadków nawet nieodczuwalne przez zdrowego człowieka) konstrukcje te z powodzeniem znoszą skutki najsilniejszych wiatrów dochodzących do prędkości 320 km/h.

W kolejnych latach nastąpił szybki rozwój konstrukcji pneumatycznych we wszystkich krajach świata dysponujących kadrą naukową i zapleczem w postaci przemysłu chemicznego. Budowle takie zaczęły powstawać na każdej szerokości geograficznej, przy dużych mrozach i pod tropikalnym słońcem. Zaczęto wznosić konstrukcje pneumatyczne nie tylko jako magazyny, silosy, hangary i kopuły chroniące anteny, lecz także wykonywać z nich różnego rodzaju zbiorniki na ciecze i materiały sypkie oraz coraz częściej obiekty wystawowe i przekrycia obiektów sezonowych – amfiteatrów, basenów. Fakt, iż z powłok pneumatycznych można uzyskać praktycznie dowolną bryłę, przyciągnął wielu architektów operujących ciekawą, ekspresyjną formą. Inny kierunek to coraz częstsze zastosowanie błon pneumatycznych w przemyśle jako elementy wielu aparatów i maszyn. Współczesne powłoki pneumatyczne nie są już nieporadnymi budowlami, o małej ekspresji architektonicznej. Jest to coraz częściej budownictwo nawiązujące do form, z jakimi spotykamy się w przyrodzie, jakich potrzebuje dzisiejsza medycyna – modele serca, naczyń krwionośnych czy też inne formy przyrody ożywionej.

## 2. Projektowanie

Konstrukcje tego typu wciąż jednak pociągają za sobą liczne problemy natury projektowej. Z jednej strony jest to występujący coraz częściej przy bardziej skomplikowanych kształtach tzw. problem krojczego, podejmujący zagadnienie doboru kształtu wycinanych, a następnie sklepanych (zszywanych, nitowanych) elementów składowych. Z drugiej strony są to problemy związane z analizą zachowania się konstrukcji pneumatycznych, tj. zjawiska lokalnej utraty stateczności (występowanie stref pofałdowania lub tzw. wybuleń) oraz problemy dynamiki, jak np. flutter. Stan fizyczny takich struktur pneumatycznych, a więc geometrię odkształcenia i naprężenia opisuje teoria wiotkich powłok. Powinna ona, oprócz wymienionego na początku warunku nieujemności naprężeń głównych wyrażonego przez jednostronne więzy  $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 > 0$ , uwzględniać:

- nieliniowość geometryczną, na którą wpływają:
  - przeważnie duże przemieszczenia, a często i skończone odkształcenia powłoki,
  - możliwości powstawania i zanikania strefy fałdów ( $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ),
- zmianę grubości powłoki w miarę jej odkształcania się; jest to niezbędne do analizy zjawiska utraty stateczności,
- anizotropię i różnorodną nieliniowość fizyczną materiału pozwalającą na opisanie takich cech, jak wysoka elastyczność, pełzanie, starzenie się, plastyczność,
- wpływ temperatury.

Poprawne rozwiązanie zagadnień związanych ze statyczną analizą dużych deformacji wiotkich ustrojów powłokowych jest możliwe tylko na gruncie mechaniki ośrodków ciągłych w ramach teorii odkształceń skończonych. Problemem jest analizowanie konstrukcji wiotkich poddanych nie tylko obciążeniom równomiernie rozłożonym, śledzącym, ale

również skupionym. Uwzględnienie nieliniowości geometrycznej, a często i fizycznej sprawia, że w większości przypadków problem błon pneumatycznych jest analitycznie nierozwiązalny. Podobne kłopoty występują w odniesieniu do powłok o nieregularnych kształtach. Obecnie jednak zagadnienia te, dzięki rozwojowi metod numerycznych, przestały być nierozwiązalnymi. Wśród nich najlepsze rezultaty dają:

1. Metoda całkowania numerycznego nieliniowych równań przemieszczeniowych (dotyczy to jednak tylko powłok obrotowo-symetrycznych o wyraźnym, w postaci funkcji, rozkładzie obciążeń).
2. Metoda różnic skończonych.
3. Metoda elementów skończonych.

Decydującym czynnikiem w projektowaniu budowli pneumatycznych jest zapewnienie stateczności konstrukcji. Oznacza to, że należy tak dobrać nadciśnienie wewnętrzne, by w żadnym jej punkcie nie wystąpiły naprężenia powodujące fałdowanie się powłoki. Ciśnienie to powinno być dodatkowo pomnożone przez odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa wynoszący 1,2–6,0 w zależności od rodzaju konstrukcji, jej przeznaczenia, użytego materiału, rozmiarów i dokładności wyznaczenia sił wewnętrznych. Wymiarowanie metodami analitycznymi (często tablicowanymi) uwzględnia (dla warunków polskich) współczynnik bezpieczeństwa  $n_r = 2,5\text{--}3,5$  w zależności od konstrukcji. Decydującym czynnikiem o stosowalności tak dużej rezerwy w nośności konstrukcji były otrzymywane dotychczas w procesie projektowym wyniki przybliżone. Dlatego zagadnienia ścisłego określenia rozkładu naprężeń w powłoce oraz znalezienia stref miejscowej utraty stateczności są wciąż aktualne.

### 3. Przykłady analizy stref pofałdowania

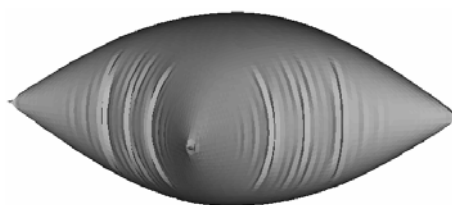
Liczne opracowane i rozbudowane procedury obliczeniowe na bazie analizy komputerowej pozwalają obecnie na rzeczywistą analizę konstrukcji z wizualizacją teoretycznych stref odkształceń, pofałdowań lub zwiótczeń powodujących wyłączenia z pracy.

Udowodnieniem poprawności otrzymywanych rezultatów z obliczeń numerycznych może być tylko porównanie z wynikami badań doświadczalnych. Problemem pozostaje sprawa modelowania imperfekcji materiałowych oraz geometrycznych, która staje się najczęściej źródłem strefy zwiótczenia.



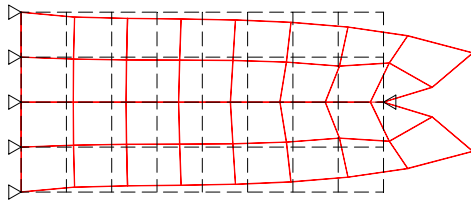
Ryc. 2. Wizualizacja otrzymanych własnych wyników dla symetrycznej płaskiej membrany obciążonej siłą skupioną

Fig. 2. The visualization of my own analyses results for symmetrical flat membrane structure loaded by concentrated force



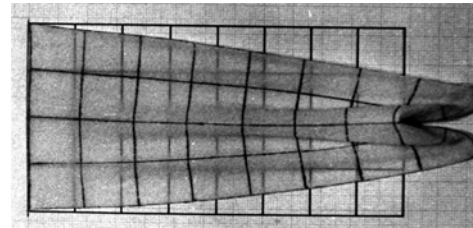
Ryc. 3. Wizualizacja otrzymanych wyników dla symetrycznej „poduszki” obciążonej

Fig. 3. The visualization of analyses result for symmetrical "pillow" internal loaded



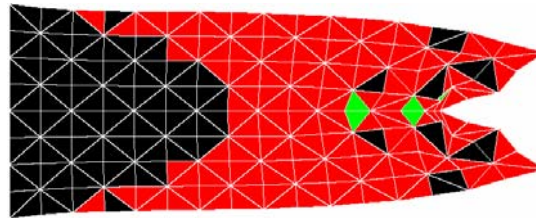
Ryc. 4. Konfiguracja początkowa i zdeformowana wg analizy numerycznej

Fig. 4. Primary configuration and deform configuration according to numerical analysis



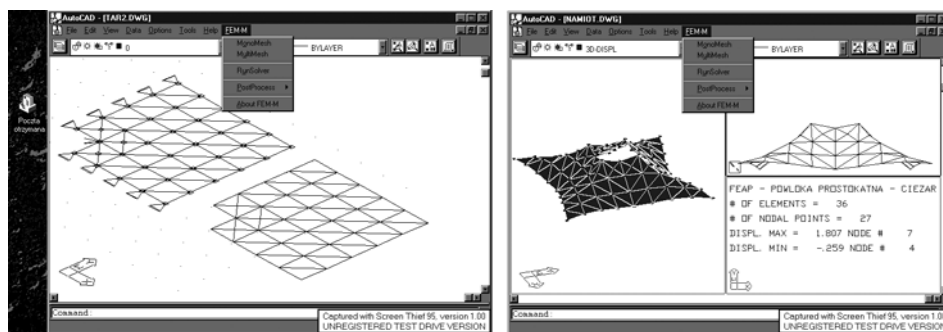
Ryc. 5. Konfiguracja zdeformowana wg badania modelowego

Fig. 5. The deform configuration according to model testing



Ryc. 6. Konfiguracja zdeformowana z zaznaczeniem stref pofałdowania (czarny – element pracujący, ciemnoszary – element pofałdowany, jasnoszary – element wyłączony z pracy)

Fig. 6. The deform configuration with point out spheres of wrinkled (black means working element, dark grey means wrinkled element, light grey means out of action element)



Ryc. 7. Przykład pre- i postprocessingu dla analizy: zadanie kwadratowej membrany z wyciętym środkiem, obciążonej siłą skupioną w punktach narożnych oraz ciśnieniem wewnętrznym

Fig. 7. The examples for pre- and post processing for analyse is given square membrane structures with cut-out centre which is loaded by concentrated force in corners points and internal pressure

Wyodrębnienie stref pofałdowania i zwiotczenia w przypadku konstrukcji wiotkich jest bardzo ważnym etapem w procesie projektowania. Strefy te to obszary nieefektywnej pracy, w których zastosowany materiał nie pracuje. Dodatkowo strefy takie stają się najczęściej źródłem korozji biologicznej. Zalegająca w fałdach wilgoć, śmieci i inne elementy przyspieszają zjawiska starzenia się materiału oraz powodują nierównomierne obciążenie i powstawanie stref kumulacji obciążeń w obszarach nagromadzenia śmieci, śniegu itp.

Metoda elementów skończonych pozwalająca na modyfikowanie charakterystyk materiałowych poszczególnych fragmentów konstrukcji w zależności od sposobu ich pracy umożliwia wyodrębnienie stref pofałdowania i ich dokładne wskazanie w kolejnych iteracjach obliczeniowych. Metoda ta wydaje się szczególnie przydatna, gdyż w przeciwieństwie do innych nie ma żadnych ograniczeń w zakresie geometrii analizowanych konstrukcji oraz sposobu ich obciążania.

#### 4. Podsumowanie, wnioski

Współczesne metody obliczeniowe z zastosowaniem metod numerycznych, w tym główne metody elementów skończonych (MES), pozwalają na dokładne i bezpieczne projektowanie konstrukcji wiotkich, takich jak: konstrukcje pneumatyczne, wiotkie membrany, konstrukcje cięgnowe, w których może wystąpić zjawisko pofałdowania lub zwiotczenia powodujące wyłączenia z pracy. Wyodrębnienie tych stref jako obszarów nieefektywnej pracy oraz obszarów inicjujących zagrożenie dla konstrukcji może być dokładnie analizowane i minimalizowane.

Pozwala to na coraz szersze zastosowanie tego rodzaju konstrukcji w budownictwie jako realizacji o niskich kosztach nakładu, krótkim czasie powstania oraz szybkiej amortyzacji. Konstrukcje te znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko w budownictwie, ale również w mechanice i biomechanice.

#### Literatura

- [1] Bereza W., Stanuszek M., *FEM analysis of large deformations of pneumatic shells under concentrated loads*, XII Polish Conference on Computer Methods in Mechanics, Warszawa–Zegrze, 1995.
- [2] Stanuszek M., Bereza W., *Local stability of flexible membranes under concentrated loads – FEM analysis*, Proc. of ECCOMA 96, Vol. 4, 1996, 103-107.
- [3] Bereza W., *Analiza pofałdowania wiotkich powłok – implementacja w systemie FEAP-Flex*, Raport nr 2/97/UCK, Kraków 1997.