

# ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA CIENKOŚCIENNYCH USTROJÓW NOŚNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZAAWANSOWANYCH STANÓW DEFORMACJI ZAKRYTYCZNYCH

Tomasz KOPECKI\*

[tkopecki@prz.edu.pl](mailto:tkopecki@prz.edu.pl)

\* Katedra Samolotów i Silników Lotniczych, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

**Streszczenie:** W opracowaniu przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych cienkościennych profili otwartych, poddanych skręcaniu nieswobodnemu. Analizowane struktury stanowiły odwzorowanie wyizolowanych fragmentów konstrukcji lotniczych, odpowiadających strefom o dużych wykrojach. Eksperyment obejmował trzy wersje modelu, o różnej liczbie podłużnic usztywniających. Określono postacie deformacji zakrytycznych analizowanych struktur oraz przedstawiono reprezentatywne ścieżki równowagi. W oparciu o wyniki eksperymentu, dla jednej ze struktur przeprowadzono analizę numeryczną w ujęciu metody elementów skończonych. Dokonano porównania uzyskanych postaci deformacji zakrytycznych oraz ścieżek równowagi otrzymanych na drodze numerycznej i w wyniku badań eksperymentalnych. Sformułowano szereg wniosków i zaleceń dotyczących zasad projektowania struktur o zbliżonym charakterze.

## 1. WPROWADZENIE

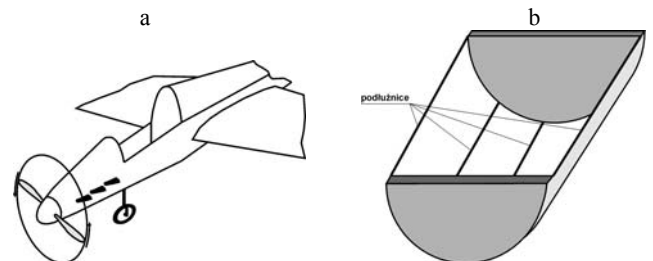
W dążeniu do zwrócenia uwagi na istotność czynnika integrującego nieliniową analizę numeryczną z szeroko rozumianym eksperymentem, w niniejszej pracy przedstawiono metodykę umożliwiającą dokonywanie oceny modelu obliczeniowego oraz jego bieżących korekt, zapewniając poprawną interpretację wyników nieliniowych analiz numerycznych ustroju. Proponowana metodyka opiera się na prowadzeniu, równoległe z nieliniową analizą numeryczną, badań doświadczalnych wybranych elementów struktur nośnych, w szczególności elementów zawierających spodziewane strefy newralgiczne. Zwrócono uwagę na możliwości oraz uwarunkowania dotyczące przeprowadzania adekwatnego eksperymentu, wskazując na rolę badań modelowych, jako szybkiego i ekonomicznie uzasadnionego narzędzia badawczego możliwego do stosowania w trakcie projektowania cienkościennych ustrojów nośnych.

Przedstawione rozważania zilustrowano na przykładzie konstrukcji o stopniu złożoności geometrycznej i zakresach deformacji, charakterystycznych dla współczesnych rozwiązań stosowanych w ustrojach nośnych płatowców. Jako reprezentatywny przykład wybrano strefę struktury nośnej zawierającą obszerny wykroj. W podobnych ustrojach najwyższe poziomy i gradienty naprężeń pojawiają się w warunkach skręcania, które w zakresie obciążeń dopuszczalnych mogą powodować stany deformacji zakrytycznej. W tych warunkach rozkład naprężeń w ustroju staje się podstawą wyznaczania trwałości zmęczeniowej konstrukcji.

## 2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Przedmiot rozważań stanowiła cienkościenna, otwarta, usztywniona podłużnicami cylindryczna powłoka (rys.1b) modelująca strefę obszernego wykroju w strukturze płatowca, (np. kokpitu). Tego rodzaju strefy połączone

są z przylegającymi obszarami struktury o przekroju zamkniętym, kształtowanymi jako powłoki walcowe lub lekko zbieżne. Wymiarujący rodzaj obciążenia struktury, doprowadzający do lokalnej utraty stateczności pokrycia w trakcie obciążania w zakresie poziomów dopuszczalnych, stanowi skręcanie. Z racji konieczności spełniania wspomnianego wymogu sztywności ma ono charakter skręcania nieswobodnego.

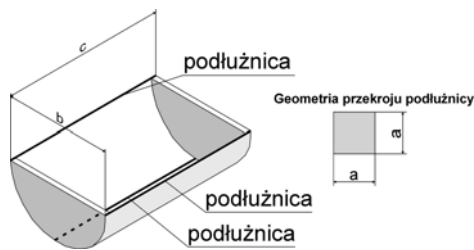


**Rys. 1.** Przedmiot rozważań

- przykład strefy rozległego wykroju w strukturze płatowca
- wyizolowany, newralgiczny fragment konstrukcji

W celu określenia wpływu usztywnień wzdłużnych na sztywność skrętną w pełnym zakresie analizowanych deformacji badaniom poddano konstrukcje z: trzema, pięcioma oraz siedmioma podłużnicami. Badania eksperymentalne obejmowały rejestrację fotograficzną kolejnych faz deformacji z jednoczesną notacją wartości kąta skręcenia, jako parametru umożliwiającego sporządzanie reprezentatywnej ścieżki równowagi, w pełnym zakresie deformacji, zarówno podkrytycznych jak i zakrytycznych.

W celu określenie stanu naprężenia w stanie deformacji zakrytycznej, dla wybranego wariantu rozwiązania konstrukcyjnego opracowano adekwatny model numeryczny w ujęciu MES. Podstawą jego budowania i korygowania stanowiła analiza porównawcza form deformacji oraz charakteru ścieżek równowagi otrzymanych na drodze eksperymentalnej i numerycznej.

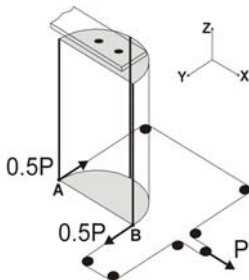


Rys. 2. Schemat geometrii struktury

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania obejmowały trzy warianty rozważanej struktury, różniące się liczbą zastosowanych podłużnic. W pierwszym wariantcie struktura posiadała trzy podłużnice, w drugim pięć, w trzecim – siedem. W celu odwzorowania sztywności skrętnej struktury zapewnionej poprzez doprowadzenie do skręcania nieswobodnego, odpowiednie warunki brzegowe zrealizowano wprowadzając obustronne zamocowanie powłoki do sztywnych płyt brzegowych o grubości 20 mm.

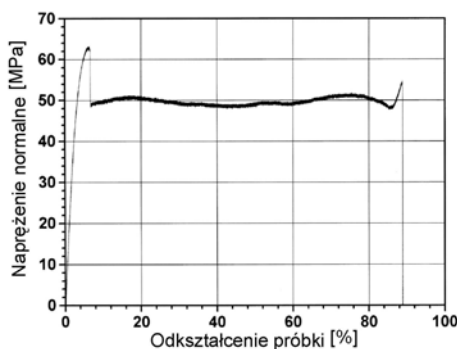
Ogólny, ideowy schemat stanowiska badawczego przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy stanowiska

Struktura wykonana została z poliwęglanu, dla którego wykonano próbę rozciągania oraz wyznaczono stałe materiałowe: moduł Younga  $E=3000$  MPa oraz współczynnik Poissona  $\nu=0.36$ .

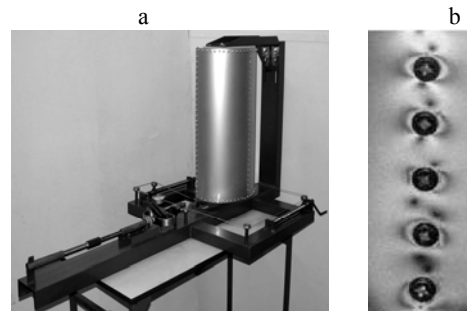
Rys.4 przedstawia charakterystykę w/w materiału odpowiadającą jednowymiarowemu rozciąganiu. Widoczne strefy deformacji sprężystej i niesprężystej sugerują możliwość przybliżania rzeczywistej charakterystyki materiału modelem idealnie sprężysto-plastycznym. Ponadto, z racji niskiej wartości modułu sprężystości (o dwa rzędy niższej w stosunku do stali) możliwe staje się prowadzenie badań eksperymentalnych operując niskimi wartościami obciążenia zewnętrznego.



Rys. 4. Wykres rozciągania dla próbki z poliwęglanu

Wybór materiału, oprócz wspomnianego kształtu charakterystyki fizycznej uzasadnia fakt, iż materiał ten wykazuje wysoką czułość optyczną, dzięki czemu możliwe staje się uzyskiwanie jakościowych informacji o rozkładzie izochrom.

Połączenia pomiędzy płaszczem i podłużnicami zrealizowano za pomocą stalowych śrub. Rozmieszczonych co 20 mm. W celu uniknięcia ewentualnych wstępnych naprężeń w miejscach połączeń śrubowych, podczas montażu modelu prowadzono ciągłą obserwację pól izochrom w otoczeniu każdej z dokręcanych śrub. Widok stanowiska z zamocowanym modelem zaprezentowano na rys. 5



Rys. 5. Widok stanowiska

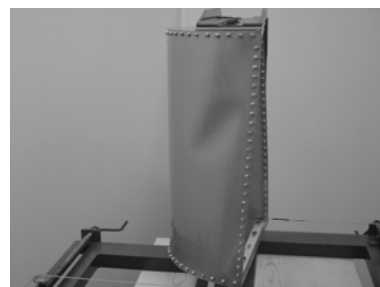
a. stanowisko z modelem przygotowanym do badań  
b. rozkład izochrom w otoczeniu śrub

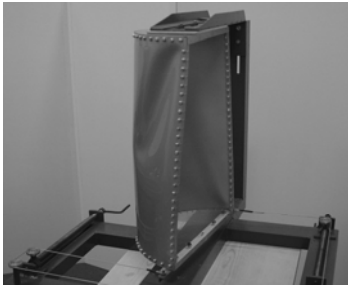
#### Struktura wzmocniona trzema podłużnicami

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania doświadczalne konstrukcji wzmocnionej trzema podłużnicami. Eksperyment przeprowadzono z zachowaniem kontroli obciążenia sposobem grawitacyjnym, co zapewniało stałość jego poziomu. Jednocześnie dokonywano pomiaru maksymalnej wartości kąta skręcenia. Na tej podstawie sporządzono zależność pomiędzy wartością momentu skręcającego a kątem skręcenia modelu, stanowiącą ścieżkę równowagi, dla wybranego reprezentatywnego stopnia swobody. Zależność tę, wraz z zależnościami sporządzonymi dla pozostałych badanych struktur, przedstawiono na rys. 13.

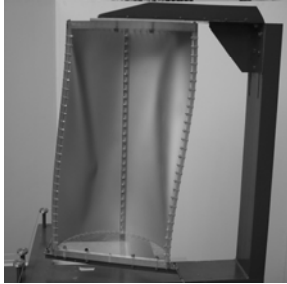
Pierwsze, dostrzegalne oznaki lokalnej utraty stateczności konstrukcji zaobserwowano w sąsiedztwie wręg oraz zewnętrznych podłużnic, przy wartości momentu skręcającego  $M_t \approx 20$  Nm, której odpowiadał kąt skręcenia:  $\Theta \approx 2^\circ$  (Rys. 6). W miarę wzrostu obciążenia efekt utraty stateczności obejmował coraz większy obszar powłoki, stopniowo osiągając charakter globalny.

Rysunki 6 i 7 prezentują początkową fazę utraty stateczności powłoki odpowiadającą wartościom momentu:  $M_t=25$  Nm oraz  $M_t=35$  Nm.

Rys. 6. Początek lokalnego wybożenia.  $M_t=25$  Nm



Rys. 7. Kolejna faza deformacji zakrytycznej.  $M_t=35$  Nm

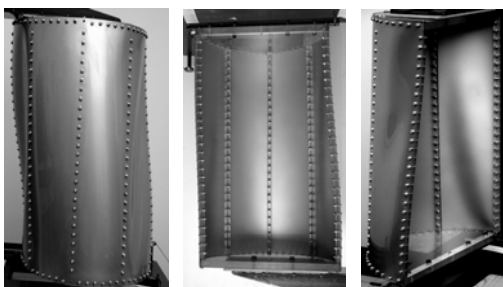


Rys. 8. Zaawansowana deformacja zakrytyczna.  $M_t=60$  Nm

Na rys.8 przedstawiono zaawansowaną postać zakrytycznej, sprężystej deformacji struktury. Podłużnice brzegowe uległy znacznemu ugięciu, natomiast podłużnica centralna nie zmieniła swojej początkowej formy. Uzyskane deformacje struktury potwierdzają jej niską sztywność skrętną w stanach zaawansowanych, co pozwala wnioskować, iż podobne rozwiązania, oparte na małej liczbie podłużnic, nie mogą mieć większego praktycznego zastosowania.

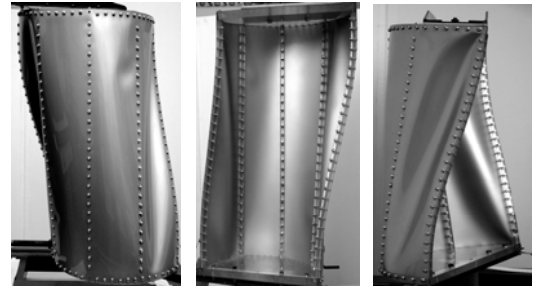
#### Struktura wzmocniona pięcioma podłużnicami

Kolejny rozpatrywany wariant stanowiła powłoka wzmocniona pięcioma podłużnicami, rozmieszczonymi w jednakowych odległościach. Zwiększenie liczby podłużnic miało na celu zwiększenie sztywności skrętnej, w szczególności w stanach zaawansowanych deformacji. W wyniku, podobnie jak w poprzednim przypadku sporządzono zależność pomiędzy momentem skręcającym a kątem skręcenia struktury (rys. 13).



Rys. 9. Początkowa faza deformacji zakrytycznej (struktura z 5 podłużnicami).  $M_t=35$  Nm

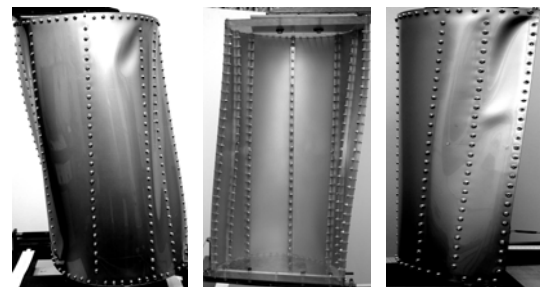
Reprezentatywna ścieżka równowagi (rys.13) potwierdza, iż utrata stateczności rozważanej struktury miała charakter identyczny jak w przypadku struktury z trzema podłużnicami. Obecność dodatkowych podłużnic, pozostających w strefie niskich poziomów naprężeń (rys. 9, 10), nie zmieniła w sposób znaczący charakterystyki badanego modelu.



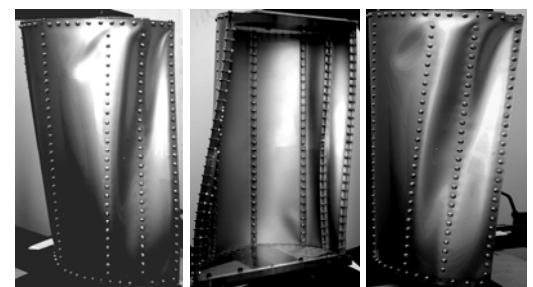
Rys. 10. Zaawansowana faza deformacji zakrytycznej (struktura z 5 podłużnicami).  $M_t=75$  Nm

#### Struktura wzmocniona siedmioma podłużnicami

Zwiększenie liczby podłużnic do siedmiu w znaczący sposób zwiększyło sztywność skrętną struktury. Zaobserwowano również dość istotną zmianę postaci utraty stateczności powłoki przejawiającą się w formie wyraźnego dociężenia czterech skrajnych podłużnic. Uzyskaną w wyniku eksperymentu zależność pomiędzy kątem skręcenia struktury a momentem skręcającym zaprezentowano na rys.13. Postaci zakrytycznej deformacji prezentują rys. 11 i 12. Proces lokalnego wybożenia zainicjowany został w sąsiedztwie brzegowych podłużnic, przy wartości momentu skręcającego  $M_t=33$ Nm. Przyrost deformacji powłoki przebiegał w sposób łagodny. Doświadczenie zakończono po osiągnięciu wartości momentu skręcającego  $M_t=110$ Nm. Stwierdzono, iż największe deformacje zachodzą w dwóch skrajnych segmentach liczonych od brzegów powłoki. Obecność dodatkowych podłużnic spowodowała zmniejszenie głębokości fałdów, co w istocie oznacza wzrost sztywności skrętnej układu. Deformacje powłoki oraz podłużnic w centralnym fragmencie ustroju pozostały nadal niewielkie.

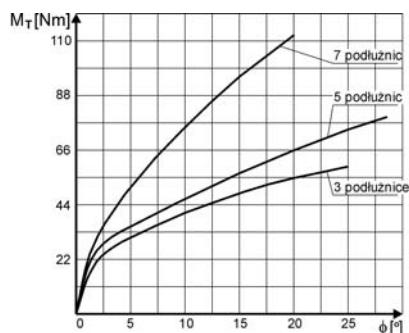


Rys. 11. Początkowa faza deformacji (struktura z 7 podłużnicami)  $M_t=55$  Nm



Rys. 12. Zaawansowana deformacji zakrytycznej (struktura z 7 podłużnicami)  $M_t=110$  Nm

Na rys. 13 przedstawiono zestawienie charakterystyk odpowiadających trzem wariantom rozwiązania konstrukcyjnego. W porównaniu z dwoma pierwszymi wersjami, struktura wzmocniona siedmioma podłużnicami wykazała znaczący przyrost sztywności skrętej. Przykładowo, dla wartości momentu skręcającego  $M_T=55\text{Nm}$ , kąt skreślenia struktury z trzema podłużnicami wyniósł  $20^\circ$ , podczas gdy w przypadku ostatniej wersji modelu tylko ok.  $6^\circ$ . Zastosowane wzmocnienie ma zatem znaczący wpływ zarówno na wzrost sztywności skrętej, jak i na poziomy i dystrybucję naprężeń w konstrukcji.



Rys. 13. Zestawienie reprezentatywnych ścieżek równowagi

Jakkolwiek krzywe na rys. 13 mają charakter bezbifurkacyjny, należy pamiętać, iż wynika to z pomiarów ustalonych, chwilowych wartości kąta skręślenia, przy sterowaniu obciążeniem. Brak wyraźnych punktów bifurkacji nie oznacza zatem bezbifurkacyjnego charakteru utraty stateczności badanych struktur i jest efektem braku możliwości pomiaru chwilowych spadków obciążenia. Możliwość taka pojawiłaby się w przypadku sterowania przemieszczeniem podczas eksperymentu, jednakże sterowanie obciążeniem jest bardziej adekwatne w przypadku modelowania struktur lotniczych, odpowiadając warunkom występującym podczas lotu.

#### 4. ANALIZA NUMERYCZNA

Rozwiązanie problemu o charakterze nieliniowym w istocie sprowadza się do wyznaczenia przebiegu ścieżki równowagi układu, który wynika z rozwiązania macierzowego równania sił rezidualnych:

$$\mathbf{r}(\mathbf{u}, \Lambda) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

w którym  $\mathbf{u}$  jest wektorem stanu, zawierającym składowe przemieszczeń węzłów struktury, odpowiadające jej aktualnej konfiguracji geometrycznej,  $\Lambda$  jest macierzą zawierającą parametry kontrolne odpowiadające aktualnemu poziomowi obciążenia, natomiast  $\mathbf{r}$  jest wektorem rezidualnym, zawierającym niezrównoważone składowe sił, związane z aktualnym stanem deformacji układu.

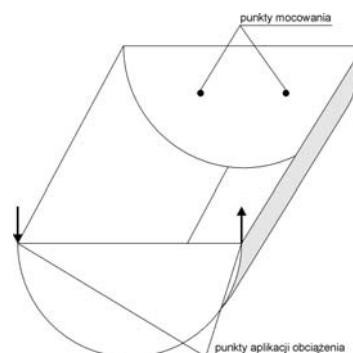
Stosowane we współczesnych programach komercyjnych algorytmy numeryczne określające przebieg ścieżki równowagi, opierają się na ogół na metodach przyrostowo-korekcyjnych, w których pierwsza faza rozwiązania jest fazą prognostyczną, określającą przybliżone położenie punktu ścieżki równowagi w hiperprzestrzeni stanu, natomiast w fazie drugiej

następuje iteracyjna korekcja rozwiązania, przebiegająca według obranej przez użytkownika strategii.

W opisywanych przypadkach, oprócz metody przyrostowej Newtona-Raphsona, przyjęta została strategia korekcyjna oparta na metodzie długości łuku, sformułowanej przez Riksa-Wempnera. Parametry liczbowe algorytmu dobrano w wyniku serii testów numerycznych. Wiarygodność otrzymywanych wyników oceniono na podstawie porównania charakteru deformacji oraz kształtu ścieżek równowagi otrzymanych na drodze numerycznej oraz badań eksperymentalnych; wyniki badań doświadczalnych stanowiły podstawę opracowania i oceny modelu numerycznego.

Uzyskanie modelu numerycznego o właściwościach odpowiadających obiektowi rzeczywistemu, w przypadku analiz nieliniowych, wymaga spełnienia szeregu warunków. Do najistotniejszych należą: przyjęcie prawidłowej koncepcji modelu, tj. użycie właściwego zestawu elementów skończonych i zastosowanie odpowiednich uproszczeń geometrii modelowanego ustroju oraz przyjęcie prawidłowego odwzorowania warunków brzegowych. Spełnienie powyższych warunków wymaga na ogół przeprowadzenia szeregu testów numerycznych.

W opisywanych rozważaniach, przyjęto ogólną koncepcję odwzorowania warunków brzegowych, przedstawioną na rys. 14. Więzy odwzorowano w postaci dwóch punktów mocowania o zablokowanych translacyjnych i rotacyjnych stopniach swobody, co odpowiadało śrubom mocującym wręgę do stanowiska. Wierne odwzorowywanie zamocowania modelu wymagałoby uwzględnienia wielu szczegółów, a zatem użycia elementów skończonych o bardzo zróżnicowanych rozmiarach, co prowadziłoby do złego uwarunkowania macierzy sztywności i powstawania „karów numerycznych”. Jak wykazują testy numeryczne, algorytmy nieliniowe wykazują ogromną wrażliwość na tego rodzaju negatywne cechy modelu i w efekcie uzyskanie rozwiązania jest niemożliwe, bądź też uzyskiwane wyniki znacząco odbiegają od wyników eksperymentu.



Rys. 14. Schemat mocowania i obciążenia modelu

Nieliniowe analizy numeryczne prowadzono przy użyciu programu MSC MARC. Analizie poddano kilka wersji modelu struktury usztywnionej trzema podłużnicami, różniących się sposobem odwzorowania podłużnic oraz ich połączeń z pokryciem. We wszystkich przypadkach wręgi oraz pokrycie modelowano przy użyciu odpowiednich rodzajów czterowęzłowych elementów powłokowych.

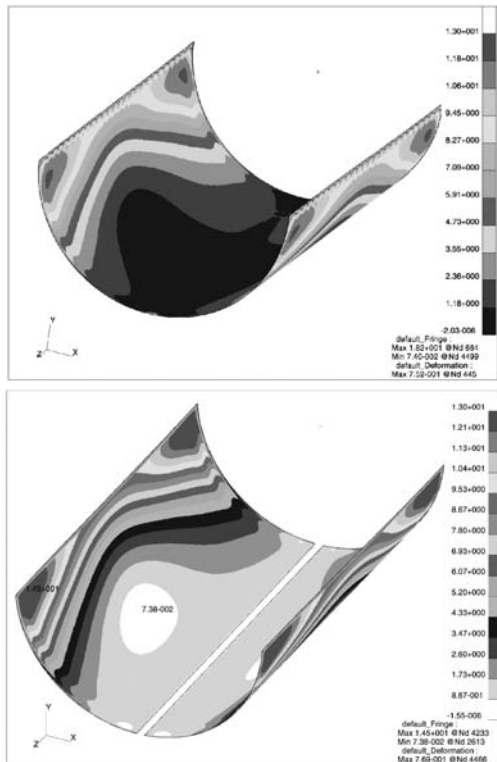
Podłużnice natomiast modelowane były kolejno za pomocą elementów belkowych, powłokowych i trójwymiarowych.

W jednym z modeli połączenia pomiędzy podłużnicami i pokryciem odwzorowano w sposób dyskretny, za pomocą szeregu elementów belkowych, przy jednoczesnym zastosowaniu kontaktu zapobiegającego przenikaniu się elementów w przypadku dużych deformacji. W pozostałych przypadkach zastosowano połączenia o charakterze ciągłym. W obliczeniach uwzględniono nieliniowość geometryczną oraz fizyczną.

Jako cel obliczeń przyjęto uzyskanie jakościowej i ilościowej zbieżności deformacji z wynikami przeprowadzonego wcześniej eksperymentu. Zbieżność taka pozwala bowiem wnioskować o adekwatności modelu numerycznego, a zatem pozwala również wnioskować, iż uzyskane na drodze numerycznej rozkłady wyężenia odpowiadają rzeczywistym.

Wyniki obliczeń dowodzą, iż wpływ sposobu modelowania połączeń nie ma znaczącego wpływu na ogólny charakter rozkładu wyężenia w pokryciu struktury. Ponadto model z połączeniami dyskretnymi charakteryzuje się wysokim stopniem złożoności, co – jak wykazały testy numeryczne - prowadzi do trudności w uzyskaniu zbieżności analiz nieliniowych oraz uzyskiwania niezgodnych z rzeczywistymi postaci deformacji w zakresie zakrytycznym.

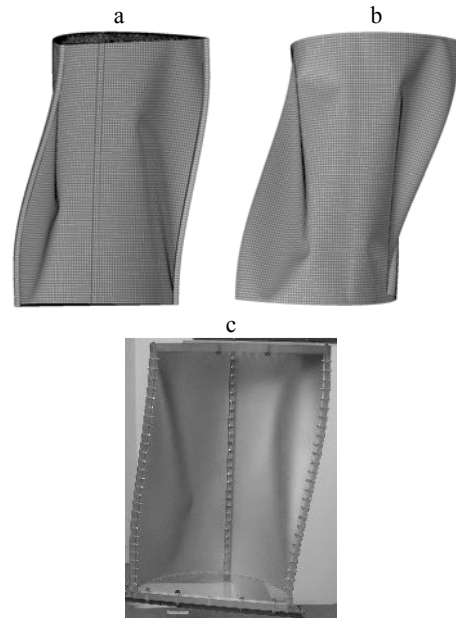
Na rys. 15 przedstawiono porównanie rozkładów wyężenia w zakresie podkrytycznym dla modeli o podłużnicach utworzonych z elementów trójwymiarowych i połączeniach realizowanych różnymi sposobami.



**Rys. 15.** Porównanie rozkładów wyężenia wg hipotezy H-M-H w warstwie środkowej, pomiędzy modelem z połączeniami dyskretnymi (po lewej) oraz modelem z połączeniami ciągłymi.

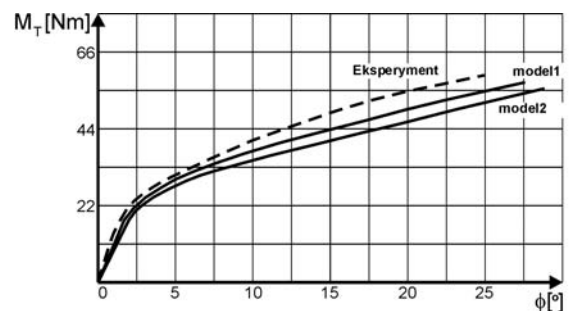
Pożądaną zbieżność deformacji uzyskano ostatecznie dla dwóch wersji modelu o połączeniach ciągłych.

W pierwszym z nich zastosowano podłużnice przestrzenne, utworzone z elementów trójwymiarowych. Należy zwrócić uwagę, iż w tym przypadku nie zachodzi pełna zgodność w liczbie stopni swobody pomiędzy elementami płaszcza i podłużnic (węzły elementów trójwymiarowych nie ulegają obrotom). W drugim zastosowano podłużnice jednowymiarowe, utworzone z elementów belkowych o sześciu stopniach swobody węzłów. Porównanie uzyskanych postaci deformacji odpowiadających maksymalnemu obciążeniu, zaprezentowano na rys. 16



**Rys. 16.** Porównanie postaci deformacji zakrytycznych: a. model z podłużnicami z elementów 3D; b. model z podłużnicami z elementów bąbelkowych; c. konstrukcja rzeczywista pod obciążeniem

Dla obydwu modeli sporządzono reprezentatywne ścieżki równowagi, obrazujące zależność momentu skręcającego od kąta skręcenia, analogiczne jak w przypadku eksperymentu. Porównanie ścieżek równowagi modeli numerycznych z wynikiem eksperymentu zaprezentowano na rys. 17.

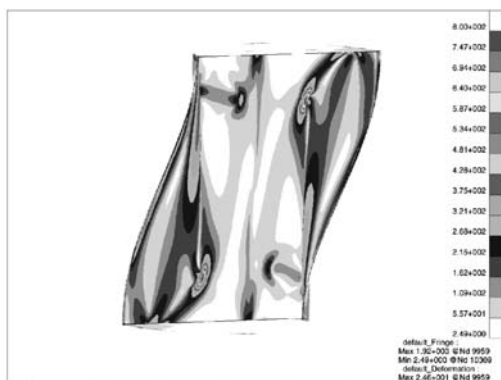


**Rys. 17.** Porównanie reprezentatywnych ścieżek równowagi: model1 – podłużnice z elementów 3D; model2 – podłużnice z elementów belkowych.

Pomimo odmiennych sposobów odwzorowania struktury, ścieżki równowagi odpowiadające obydwu modelom mają zbliżony przebieg. Ponadto, w obu przypadkach wynik można uznać za zadowalający. Porównując wielkości reprezentatywnych parametrów stanu (kąta skręcenia), przy określonej wartości parametru kontrolnego (momentu skręcającego), można stwierdzić,

iz maksymalna rozbieżność wyników otrzymanych na drodze numerycznej oraz wyników eksperymentu wynosi ok. 30%, dla największych obciążeń. Przy tego rodzaju charakterze przebiegu ścieżek równowagi (niewielki kąt pomiędzy stycznymi do wykresów a osią parametrów stanu), wynik ten uznać można za wysoce zadowalający. Jak dowodzi powyższe zestawienie charakterystyk, model zawierający elementy trójwymiarowe charakteryzuje się bardziej poprawnymi właściwościami sztywnościowymi niż model zawierający elementy belkowe, pomimo niepełnej zgodności zastosowanych elementów. Pomimo tego jednak, formułowanie wniosku o charakterze zalecenia konstrukcyjnego, preferującego ten sposób modelowania, wydaje się przedwczesne i wymaga przeprowadzenia analiz numerycznych struktur o różnych charakterystykach sztywnościowych, tj. zawierających różnego rodzaju wzmocnienia (dodatkowe podłużnice, wręgi itp.).

Uzyskana zbieżność ścieżek równowagi oraz postaci deformacji pozwala wnioskować, iż rozkłady wyężenia otrzymane w wyniku analiz numerycznych są bliskie rozkładów rzeczywistych, a zatem stanowią podstawę szacowania trwałości konstrukcji. Rys. 18 prezentuje rozkład wyężenia dla drugiej wersji modelu.



**Rys. 18.** Rozkład wyężenia wg hipotezy H-M-H w warstwie środkowej – model z podłużnicami z elementów belkowych.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzanie równoległe z obliczeniami numerycznymi badań eksperymentalnych okazuje się nadzwyczaj pomocne w procesie konstruowania newralgicznych stref ustrojów nośnych, stwarzające podstawę oceny oraz weryfikacji modeli obliczeniowych w trakcie prowadzenia nieliniowych analiz numerycznych.

Doprowadzanie do zgodności charakteru oraz wielkości deformacji otrzymywanych na drodze obliczeń numerycznych z odpowiednimi wielkościami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej pozwala wnioskować o wiarygodności uzyskiwanych numerycznie pól naprężeń w stanach deformacji zakrytycznych. Znajomość stanu naprężenia w warunkach zaawansowanych, eksploatacyjnie dopuszczalnych deformacji, determinuje możliwość określania trwałości zmęczeniowej na drodze numerycznej, przed kosztownym i czasochłonnym wykonawstwem rozwiązania prototypowego.

## LITERATURA:

1. **Aborc J.** (1985), *Post-buckling behavior of structures. Numerical techniques for more complicated structures*, Lecture Notes In Physics No 228.
2. **Bathe K.J.** (1996), *Finite element procedures*, Prentice Hall.
3. **Królak M., Mlotkowski A.** (1996), *Experimental analysis of post-buckling and collapse behaviour of thin-walled box-section beam*, Thin-Walled Structures No 26, 287-314.
4. **Lynch C.** (2000), *A finite element study of the post buckling state behaviour of a typical aircraft fuselage pane*, PhD. Thesis, Queen's University Belfast.
5. **Lynch C., Murphy A., Price M., Gibson A.** (2004), *The computational post buckling analysis of fuselage stiffened panels loaded in compression*, Thin-Walled Structures No 42, 1445-1464.
6. **Mohri F., Azrar L., Potier-Ferry M.** (2002), *Lateral post buckling analysis of thin-walled open section beams*, Thin-Walled Structures No 40, 1013-1036.
7. **Niu M.C.** (1988), *Airframe structural design*, Conmlit Press Ltd., Hong Kong, 1988.
8. **Rakowski G., Kacprzyk Z.** (2005), *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
9. **Ramm E.** (1982), *The Riks/Wempner Approach – An extension of the displacement control method in nonlinear analysis*, Pineridge Press, Swensea.
10. **Felippa C.** (2007), *Nonlinear Finite Element Methods*, University of Colorado at Boulder.

## THIN-WALLED STRUCTURES DESIGN PROBLEMS, CONSIDERING ADVANCED, POST-BUCKLING DEFORMATIONS.

Paper presents an experimental investigations of open section, cylindrical shells, reinforced by stringers, subjected to constrained torsion. Post buckling deformations of used models, were compared with results of nonlinear finite element analysis.