

# METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Grzegorz  
Krzesiński ▶

Tomasz  
Zagrajek ▶

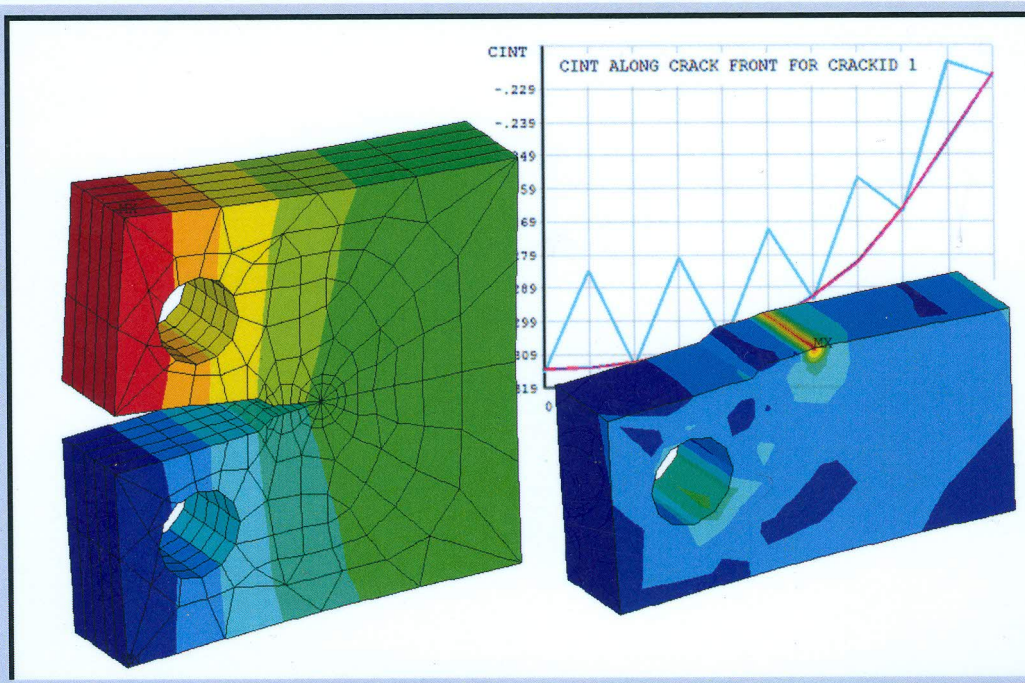
Piotr  
Marek ▶

Paweł  
Borkowski ▶

w mechanice  
materiałów i konstrukcji

Rozwiązywanie  
wybranych zagadnień  
za pomocą systemu

ANSYS



Istnieje możliwość prezentacji stanów naprężeń i odkształceń w wybranej warstwie. W tym celu w grupie komend *Options for Output* należy określić *Specified Layer number* oraz *Local system*.

#### 6.14.4. INTERPRETACJA WYNIKÓW. ZADANIA DO WYKONANIA

1. Przeprowadzić obliczenia w celu sprawdzenia wyników zamieszczonych w tabelicy 6.14.1 dla wybranego kąta.
2. Wykonać obliczenia dla rozciągania kwadratowej płytki  $100 \times 100$  mm z centralnym otworem kołowym  $r = 25$  mm dla kąta  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 45^\circ$ . Przedstawić indeksy wytrzymałości według dostępnych 4 hipotez (rys. 6.14.8).
3. Przedstawić analogiczne wyniki dla laminatu z symetrycznym ułożeniem warstw.

## 6.15

### MODELOWANIE KONSTRUKCJI KOMPOZYTOWYCH. ANALIZA NAPRĘŻEŃ I DEFORMACJI BELKI OGONOWEJ MODELU SAMOLOTU

#### 6.15.1. WPROWADZENIE

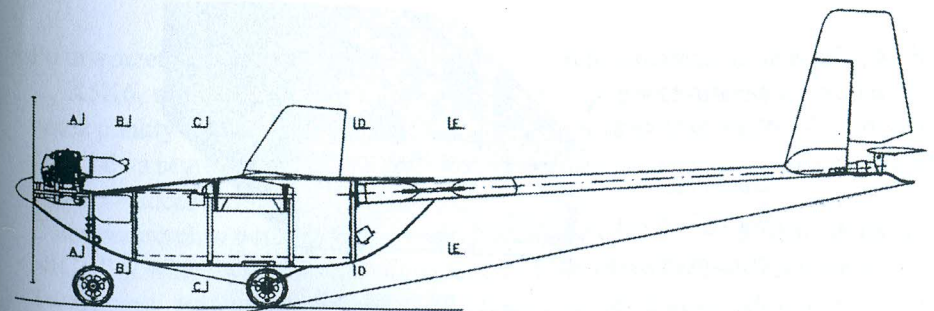
Podstawowe informacje o modelowaniu materiałów ortotropowych i kompozytowych zamieszczono w ćwiczeniu *Modelowanie materiałów ortotropowych i kompozytowych* (rozd. 6.14).

W zadaniach dotyczących rzeczywistych struktur kompozytowych mamy do wyboru następujące możliwości modelowania:

- wprowadzenie jednorodnej, zastępczej warstwy o właściwościach ortotropowych, wynikających z homogenizacji materiału,
- zastosowanie elementów skończonych warstwowych (np. *SHELL281*),
- budowa trójwymiarowych, bryłowych modeli kompozytu.

#### 6.15.2. ROZWIĄZYWANE ZAGADNIENIE

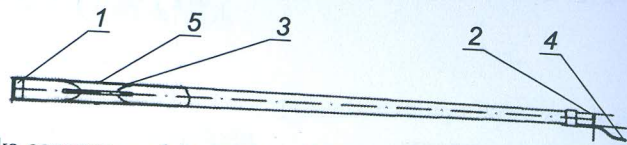
Celem ćwiczenia jest określenie stanu przemieszczeń i naprężeń belki ogonowej modelu Melenger 2001 (rys. 6.15.1) zbudowanego na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, przeznaczonego do udziału w zawodach Aero Design.



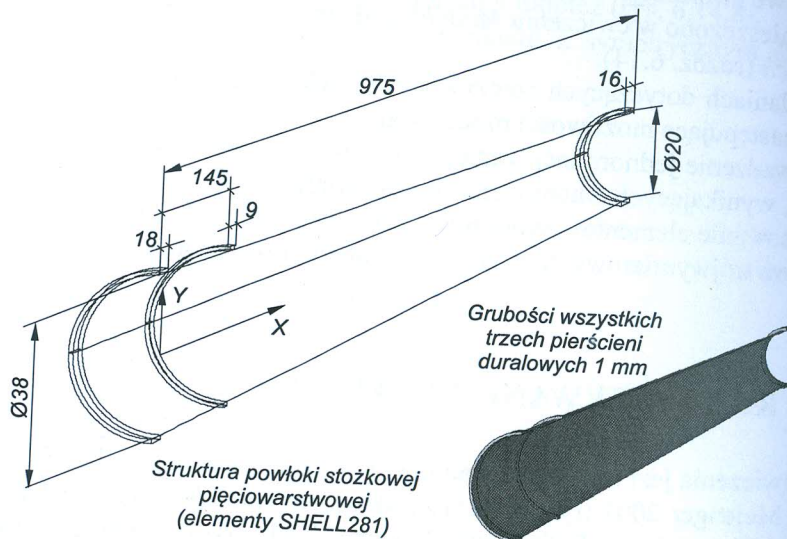
Rys. 6.15.1. Rysunek modelu samolotu Melenger

### Struktura belki

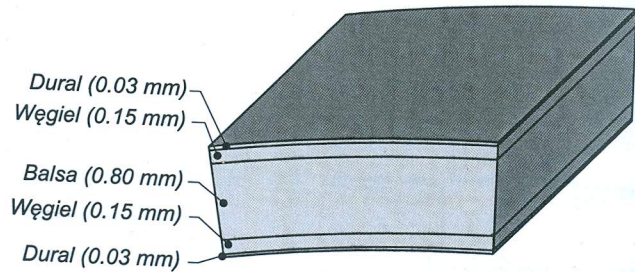
Analizowana belka ogonowa jest rurą stożkową o konstrukcji przekładkowej, zakończoną duralowymi wręgami (rys. 6.15.2–6.15.4, tablica 6.15.1). Belka jest osadzona w kadłubie w dwóch okrągłych gniazdach: na wrędze (D-D) oraz na końcu kadłuba. W miejscu wyprowadzenia belki z kadłuba osadzony jest na niej



Rys. 6.15.2. Belka ogonowa modelu samolotu Meleager; 1 i 2 – wręgi zamykające, 3 – balsa, 4 – płoza ogonowa, 5 – pierścień duralowy



Rys. 6.15.3. Wymiary geometryczne belki ogonowej modelu samolotu Meleager



Rys. 6.15.4 Schemat pięciowarstwowej struktury płaszczka

### Dane materiałowe dla poszczególnych warstw

| Warstwa | Materiał | Grubość (mm) | $E_x$ (MPa) | $E_y$ (MPa) | $G_{xy}$ (MPa) | $\nu_{xy}$ | Kąt ortotropii |
|---------|----------|--------------|-------------|-------------|----------------|------------|----------------|
| 1 i 5   | dural    | 0,03         | 72000       | –           | –              | 0,32       | –              |
| 2 i 4   | carbon   | 0,15         | 96300       | 8500        | 6000           | 0,295      | 90°            |
| 3       | balsa    | 0,80         | 3000        | 80          | 166            | 0,28       | 90°            |

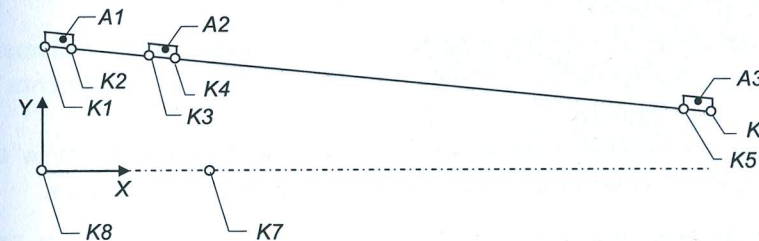
duralowy pierścień (5) przyklejony do zewnętrznej powłoki masą silikonową. Wręga zamykająca belkę (1), jest przykręcona do wręgi kadłuba. Do wręgi końcowej belki (2) mocowany jest statecznik poziomy. Statecznik pionowy jest przyklejony do zewnętrznej powłoki belki i dodatkowo zabezpieczony dwoma kołkami.

### 6.15.3. PRZEBIEG ANALIZY NUMERYCZNEJ

#### PREPROCESSOR

##### A. Budowa modelu geometrycznego.

Geometrię modelu wygodnie jest uzyskać, obracając linie i pola przekroju wzdłużnego względem osi x (rys. 6.15.5).



Rys. 6.15.5. Schemat budowy modelu solid

Po utworzeniu punktów geometrii K1, K2, ..., K8 tworzymy linie K1K2, K2K3, ..., K5K6, a następnie dokonujemy ich przeciągnięcia wokół osi wyznaczonej przez punkty K7 i K8, wykorzystując polecenie *Sweep Lines about Axis*, tworząc 180° i dwa segmenty po obwodzie (**Preprocessor** > **Modeling** > **Operate** > **Extrude** > **Lines** > **About Axis**).

Z utworzonych w ten sposób pól tworzymy, dla wygody, komponent „POBOCZNICA” (**Utility Menu** > **Select** > **Component/Assembly** > **Create Component**).

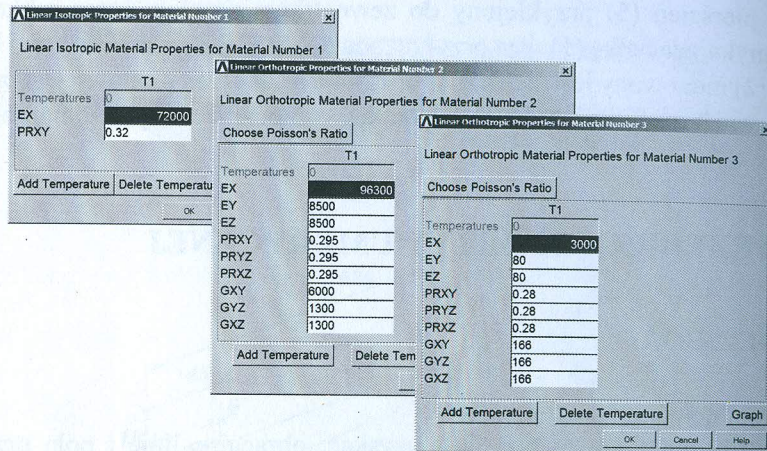
Tworzymy powierzchnie A1, A2 i A3, a następnie dokonujemy ich przeciągnięcia wokół osi wyznaczonej przez punkty K7 i K8 poleceniem

*Sweep Areas about Axis*, tworząc 180° i dwa segmenty po obwodzie (*Preprocessor*>*Modeling*>*Operate*>*Extrude*>*Areas*>*About Axis*).

Scalamy części modelu komendą: *NUMMRG,Keyponts* (*Preprocessor*>*NumberingCtrls*>*Merge Items*).

## B. Wprowadzenie danych dla materiałów.

Wprowadzamy dane zgodnie z tablicą 6.15.1, stosując model izotropowy dla duralu i modele ortotropowe dla kompozytu węglowego i balsy (rys. 6.15.6).



Rys. 6.15.6. Wprowadzenie danych materiałowych dla: duralu, kompozytu węglowego i balsy

## C. Wybór typu elementu.

Proponuje się, aby w części stożkowej użyć wielowarstwowego elementu powłokowego *SHELL281*, a pierścienie zbudować z bryłowego elementu 20-węzłowego *SOLID186* (rys. 6.15.7c, d).

Aby mieć dostęp do wyników we wszystkich warstwach, należy w opcjach elementu powłokowego wskazać: *Storage of layer data*>*All layers*.

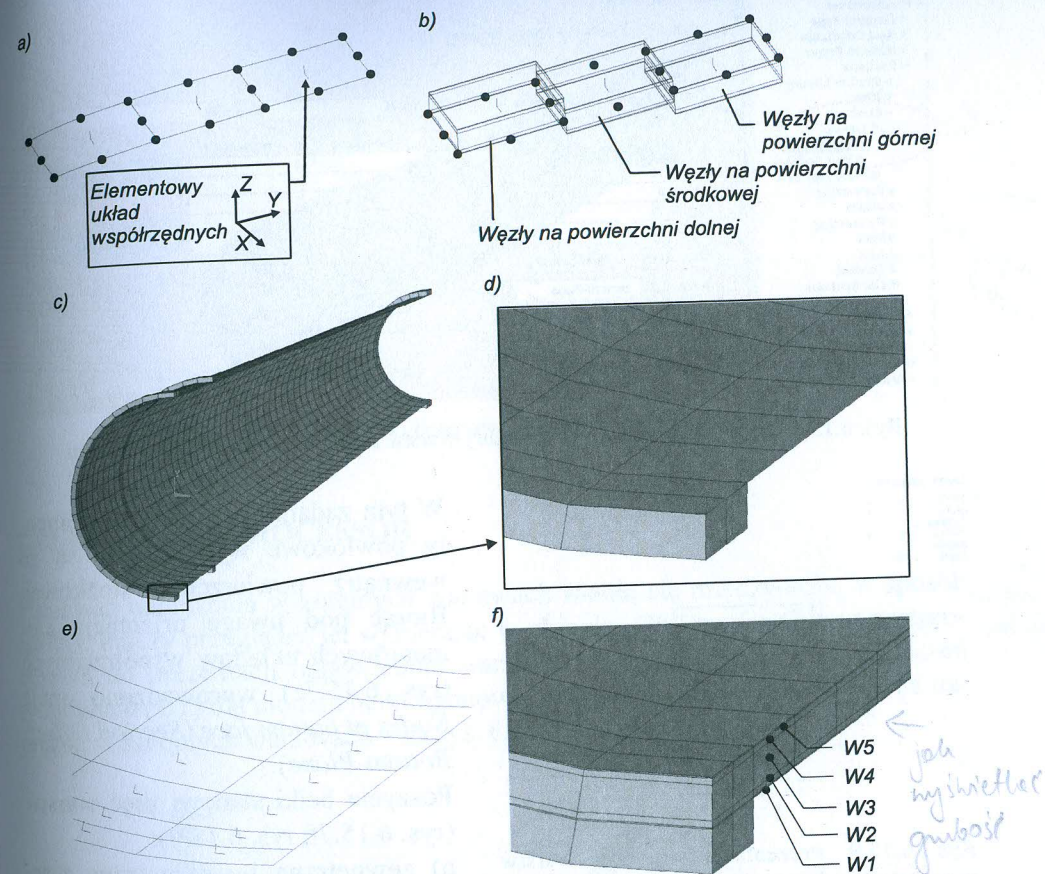
## D. Generacja siatki regularnej.

Należy wygenerować siatkę elementów powłokowych na powierzchniach stożka i elementów bryłowych w bryłach pierścieni. Tworząc siatkę na powierzchni stożkowej, można skorzystać z wcześniej utworzonego komponentu „POBOCZNICA”, selekcyjując go w panelu Component Manager (*Utility Menu*>*Select*>*Component Manager*). Należy zwrócić uwagę na orientacje elementowych układów współrzędnych (rys. 6.15.7e) przy włączonej opcji prezentacji układów elementowych (*Utility Menu*>*PlotCtrls*>*Symbols*>*Esys*>*On*).

## E. Wprowadzenie danych dotyczących warstw.

Podczas wyboru opcji elementu powłokowego warto ustalić, na jakim poziomie znajdują się węzły elementu (rys. 6.15.7a, b). Ma to znaczenie dla odpo-

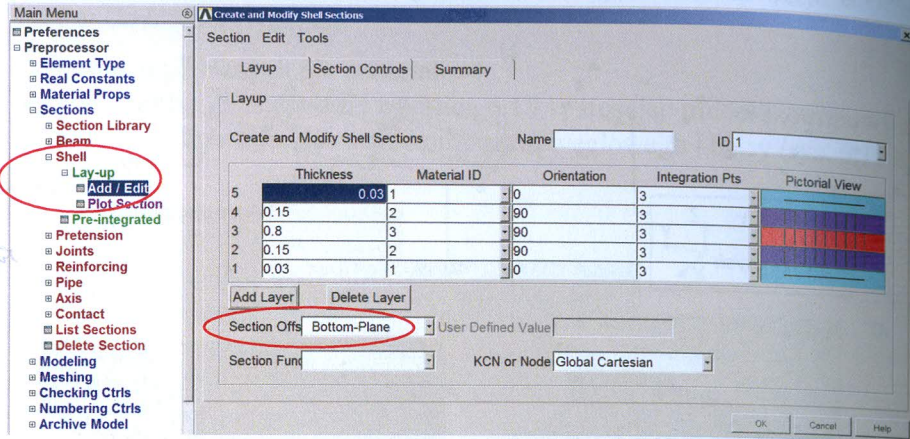
wiedniej współpracy elementów powłokowych z bryłowymi (rys. 6.15.7f). Program domyślnie przyjmuje, że węzły leżą w warstwie środkowej (w połowie grubości – *Nodes at midsurf*).



Rys. 6.15.7. Szczegóły struktury modelu belki ogonowej modelu samolotu Melenger: a) przykład trzech kolejnych elementów powłokowych wygenerowanych na jednej powierzchni (oś normalna z skierowana jest ku górze), b) trzy kolejne elementy powłokowe z różniące się opcją położenia węzłów (*Section Offset*), c) siatka elementów, d) elementy powłokowe i bryłowe w okolicy połączenia płaszcza z pierścieniem, e) układy lokalne elementów powłokowych w okolicy połączenia płaszcza z pierścieniem, f) prezentacja rozkładu warstw elementów powłokowych w okolicy połączenia płaszcza z pierścieniem (*Section Offset: Bottom-Plane*)

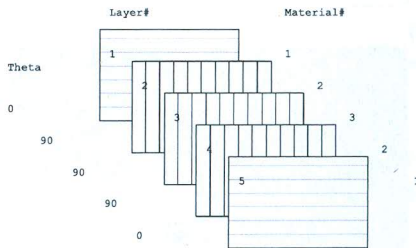
Układy elementów powłokowych uzyskane na powierzchni stożkowej ustawione są tak (rys. 6.15.7e), że: oś *x* elementu jest styczna do okręgu, oś *y* elementu ma kierunek tworzącej, oś *z* elementu jest normalna do powierzchni. Względem takiego układu należy definiować kierunki ortotropii dla warstw.

Grubości kolejnych warstw, rodzaj materiałów i kierunki ortotropii wprowadza się za pomocą panelu *Shell Section* (rys. 6.15.8) na podstawie danych z tablicy 6.15.1.



Rys. 6.15.8. Wprowadzenie danych struktury warstw za pomocą modułu *Shell Section*

LAYER STACKING  
 TYPE = 1  
 REAL = 1  
 LAYERS = 5  
 TOTAL SHOWN FROM 1 TO 5



Rys. 6.15.9. Prezentacja struktury warstw w wybranym elemencie powłokowym (Utility Menu>Plot>Layered\_Elements)

W tym zadaniu przyjęto, że elementy powłokowe wybudowane są do wewnątrz powierzchni stożkowej. Biorąc pod uwagę orientacje elementowych układów współrzędnych (rys. 6.15.7e), wprowadzono opcję *Nodes at bottom face (Section Offset: Bottom-Plane)*.

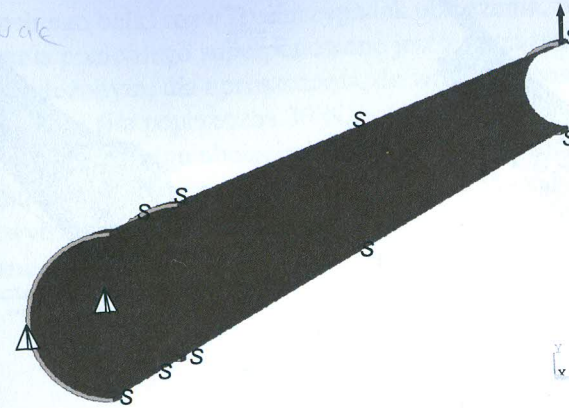
Poszycie belki stanowi pięć warstw (rys. 6.15.7f; rys. 6.15.9):

- zewnętrzna i wewnętrzna warstwa folii aluminiowej (W1 i W5),
- warstwy kompozytu węglowo-epoksydowego zbrojonego tkaniną modułową o kierunku zbrojenia w przybliżeniu zgodnym z tworzącą stożka (W2 i W4),
- przekładka balsowa o kierunku włókien w przybliżeniu zgodnym z tworzącymi stożka (W3).

## SOLUTION – MODUŁ ROZWIĄZUJĄCY

Rozważmy przypadek obciążenia symetrycznego (wystarczy 1/2 modelu). Aby rozwiązać zadanie, konieczne jest:

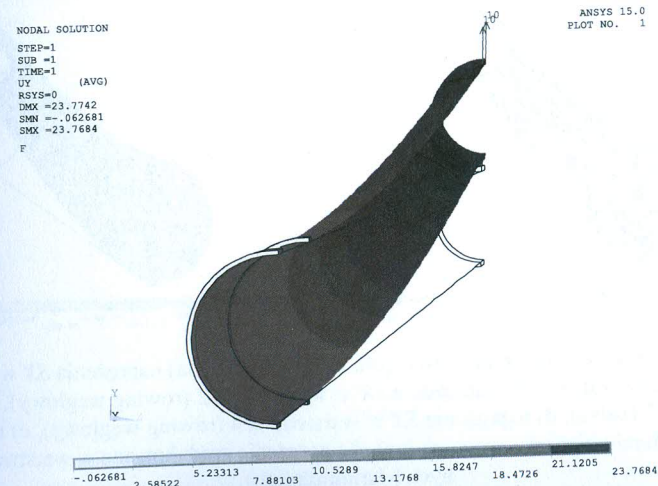
- wprowadzenie warunków symetrii na liniach i powierzchniach symetrii belki i dodatkowe mocowania w punktach pierścieni (rys. 6.15.10),
- wprowadzenie obciążenia od statecznika poziomego (połowa siły 40 N).



Rys. 6.15.10. Warunki brzegowe w zadaniu belki ogonowej

## GENERAL POSTPROCESSOR

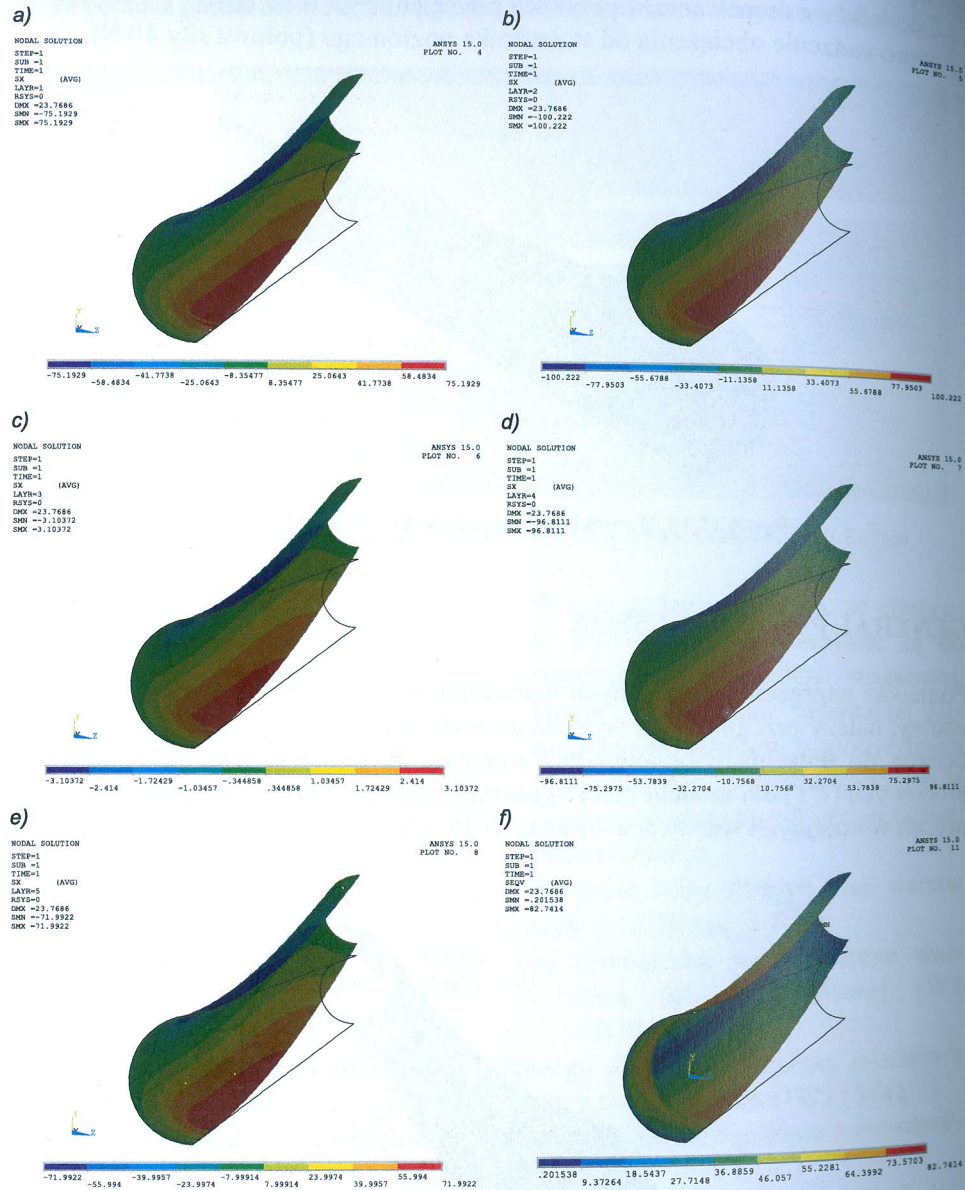
Ponieważ naprężenia w kolejnych warstwach różnią się między sobą w sposób istotny, należy przeglądać je, wybierając w okienku *Options for Output* postprocessora do prezentacji odpowiednią warstwę. Wybrane wyniki przemieszczeń pionowych (*UY*) dla modelu belki ogonowej przedstawiono na rys. 6.15.11, a naprężenia w kolejnych warstwach – na rys. 6.15.12.



Rys. 6.15.11. Przemieszczenia na kierunku y belki ogonowej ( $F_y/2 = 20$  N)

## 6.15.4. INTERPRETACJA WYNIKÓW. ZADANIA DO WYKONANIA

1. Dla modelu pełnego belki rozważyć przypadek obciążenia, w którym obciążenie od usterzenia poziomego superponowane jest z obciążeniem od usterzenia pionowego przyłożonym, dla uproszczenia, do wręgi końcowej; moment skrawający 5000 Nmm i siła poprzeczna 30 N.
2. Dla wariantu podstawowego obciążenia rozważyć zamianę kompozytu węglowego na szklany o tej samej grubości:  $E_x = E_y = 22555 \text{ MPa}$ ,  $G_{xy} = 2675 \text{ MPa}$ .
3. Oszacować wytrzymałość kompozytowych fragmentów struktury, wykorzystując wybrane kryterium wyciężenia dla materiałów ortotropowych.



Rys. 6.15.12. Naprężenia w belce ogonowej (dla  $F_y/2 = 40/2 \text{ N}$ ): a) naprężenia  $SX$  w warstwie W1 (duraluminium – zewnętrzna), b) naprężenia  $SX$  w warstwie W2 (rowing węglowy), c) naprężenia  $SX$  w warstwie W3 (balsa), d) naprężenia  $SX$  w warstwie W4 (rowing węglowy), e) naprężenia  $SX$  w warstwie W5 (duraluminium – wewnętrzna), f) naprężenie zredukowane w warstwach zewnętrznych (duraluminium)