

# ANALIZA STATECZNOŚCI CIENKOŚCIENNYCH DŹWIGARÓW SKRZYNKOWYCH OBCIĄŻONYCH CIEPLNIE

**T. KUBIAK**

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

**T. NIEZGODZIŃSKI**

Katedra Mechaniki Ogólnej Politechniki Łódzkiej  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

W pracy zaprezentowano rozważania dotyczące słuszności przyjmowania założenia prostych brzegów podczas analizy stateczności płyt obciążonych termicznie. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych (MES) dla dźwigarów oraz płyt jako model blach środknika pomiędzy żebrami i przeponami, obciążonych termicznie – napawanie nakładek w procesie prostowania technologicznego [1]. Analizę MES przeprowadzono przy pomocy profesjonalnego pakietu ANSYS.

## 1. WPROWADZENIE

W teorii stateczności płyt przyjmuje się zwykle założenie, że brzegi płyty są proste przed, po i w czasie wyboczenia. W blachownicach wyodrębnia się płyty elementarne pomiędzy żebrami i przeponami, a te umieszcza się w konstrukcji dla przejęcia sił poprzecznych oraz dla spełnienia założeń o prostym brzegu płyty.

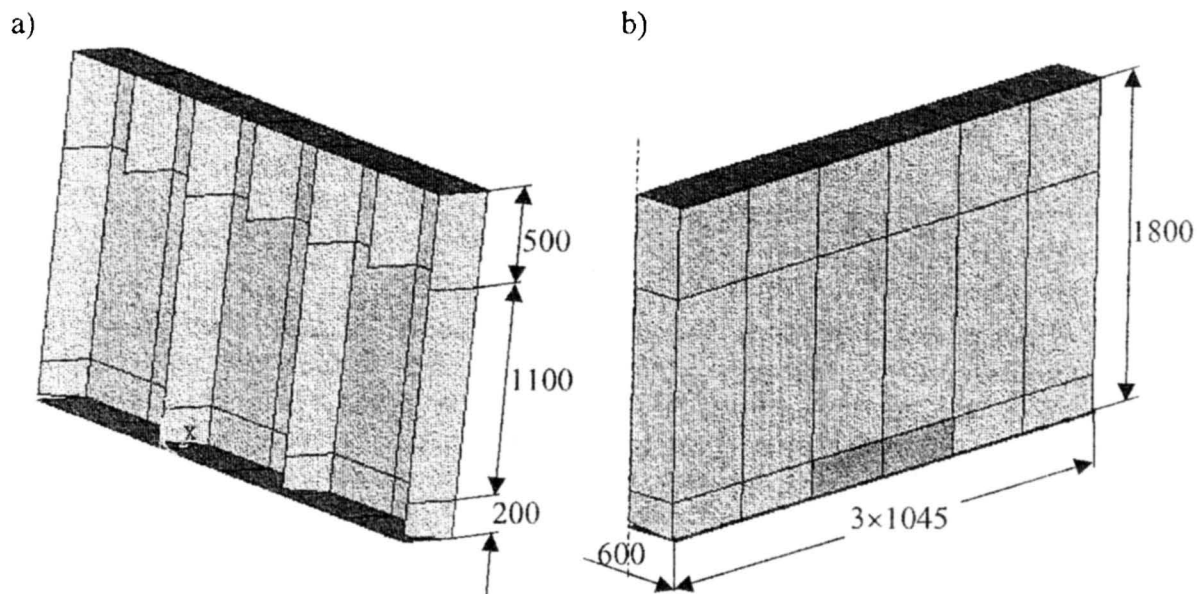
Niniejsza praca ma na celu sprawdzenie słuszności takiego założenia, w przypadku, gdy obciążeniem jest przyrost temperatury skokowo zmienny wzdłuż szerokości płyty lub wysokości środknika dźwigara. W wielu pracach dotyczących stateczności konstrukcji cienkościennych obciążonych cieplnie [2,3,4] w przypadku, gdy temperatura jest stała lub zmienna liniowo wzdłuż szerokości płyty, mówi się, że obciążenie termiczne można zastąpić odpowiednio dobraną siłą i momentem gnącym (zginanie tarczowe) i w ten sposób modelować obciążenie termiczne obciążeniem mechanicznym. W pracy [5] zauważono, że stateczność płyty podpartej przegubowo nieprzesuwnie na wszystkich brzegach i obciążonej przyrostem temperatury stałym na powierzchni i zmiennym liniowo po grubości płyty można analizować przyjmując model płyty poddanej dwuosowemu ściskaniu z ugięciem wstępnym – większy gradient temperatury odpowiada większej wartości ugięcia wstępnego.

Wątpliwości dotyczące założenia prostoliniowości brzegów płyty oraz możliwości modelowania obciążenia termicznego (skokowo zmiennego wzdłuż szerokości płyty i stałego wzdłuż jej długości) jako obciążenia mechanicznego (siła powodująca mimośrodowe ściskanie) sposobem znanym z literatury [6] pojawiły się podczas analizy stateczności dźwigarów sprężanych technologicznie [1].

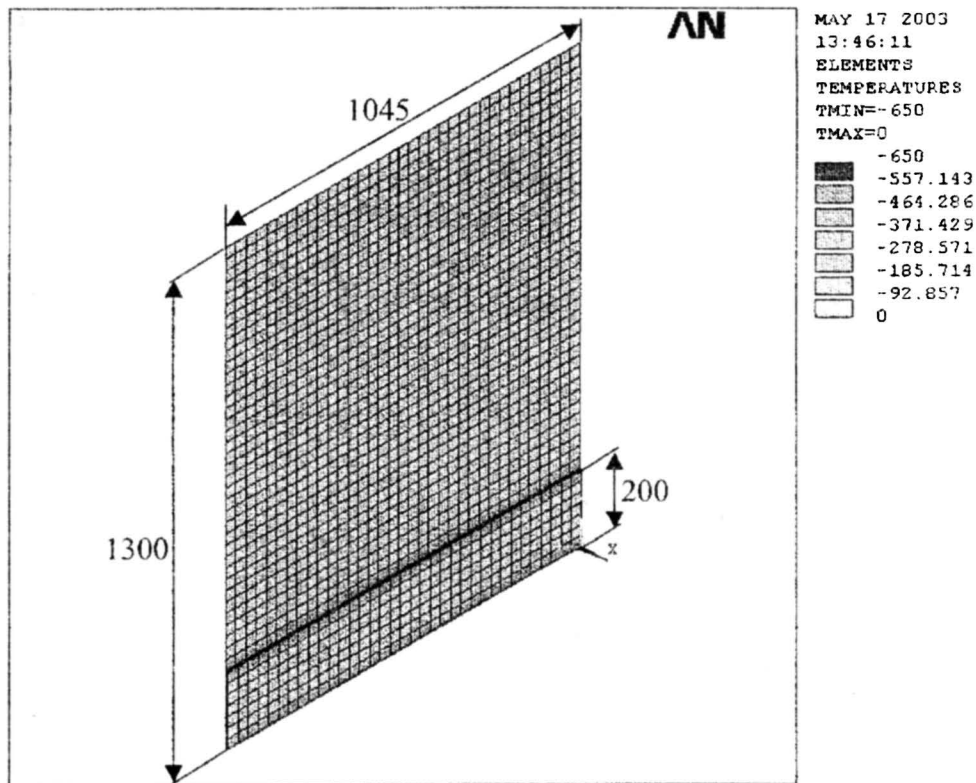
## 2. ZAŁOŻENIA

Obliczenia dotyczące pól naprężeń i odkształceń w stanie dokrytycznym oraz wartości krytycznych przeprowadzono dla dźwigarów skrzynkowych (rys.1) poddanych

obciążeniom cieplnym jakie mają miejsce podczas prostowania technologicznego [1] – napawanie nakładek dolnych bocznych o szerokości 200 mm i grubości 8mm spoiną  $\Delta 5$ . Przeprowadzono również analizę stateczności płyty (rys. 2) o wymiarach blachy  $\Delta 5$  zawartej pomiędzy przeponami i żebrami. Płytę obciążono w analogiczny sposób jak  $\Delta 5$  w dźwigarze.



Rys. 1. Model geometryczny analizowanego dźwigara w widoku od wewnątrz (a) i z zewnątrz (b)



Rys. 2. Model dyskretny płyty z nakładką z mapą rozkładu temperatur

Obliczenia przeprowadzono wykorzystując program metody elementów skończonych ANSYS 6.1. Dyskretyzacji analizowanych konstrukcji dokonano

używając elementu powłokowego czterowęzłowego o sześciu stopniach swobody w każdym węźle. Model spoin przyjęto identycznie jak we wcześniejszych pracach [7,8], natomiast sposób obciążenia odpowiada zmianie temperatury od temperatury spawania do temperatury otoczenia ( $\Delta T = -650K$ ). Taka zmiana temperatury wywołuje skurcz generujący siłę ściskającą działającą wzdłuż spoiny.

Do obliczeń przyjęto następujące dane materiałowe:

- moduł Younga  $E=2 \cdot 10^5$  MPa,
- liczba Poissona  $\nu = 0.3$ ,
- współczynnik rozszerzalności cieplnej  $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla płyt o różnych warunkach brzegowych oraz dla dźwigara skrzynkowego składającego się z trzech segmentów o wymiarach tak dobranych, że wielkość największej płyty zawartej pomiędzy żebrami i przeponami jest identyczna jak analizowana płyta. Ze względu na sposób obciążenia trudno mówić o sile, momencie czy temperaturze krytycznej powodującej wyboczenia, tak więc jako wielkość charakteryzującą stateczność przyjęto współczynnik obciążenia krytycznego  $f$ :

$$f = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma}$$

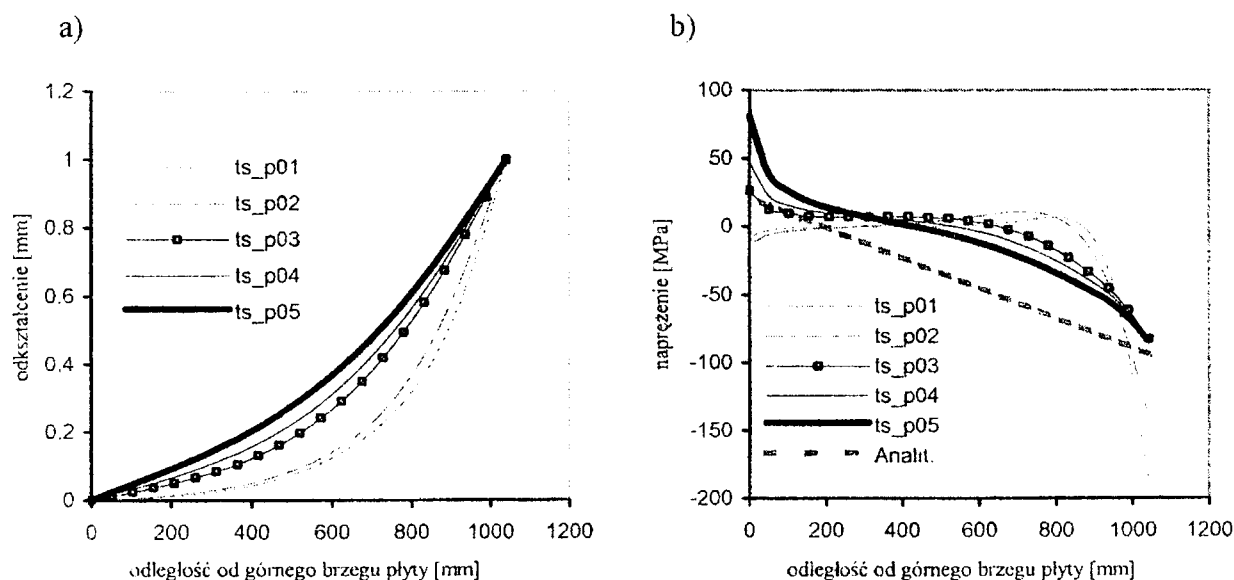
Dla współczynnika  $f = 1$  zadane obciążenie jest obciążeniem krytycznym, dla  $f > 1$  obciążenie jest mniejsze od krytycznego (konstrukcja nie traci stateczności) oraz dla  $f < 1$  – obciążenie zadane jest większe od krytycznego (następuje utrata stateczności)

W tabeli 1 zestawiono wartości współczynnika obciążenia krytycznego dla płyt obciążonych termicznie posiadających różne warunki brzegowe oraz posiadające różne wzmocnienia brzegowe (żebro) zapewniające prostoliniowość brzegów poprzecznych. Żebro wzmocniające o przekroju prostokątnym ma wymiar „a” w płaszczyźnie płyty oraz „h” w kierunku prostopadłym.

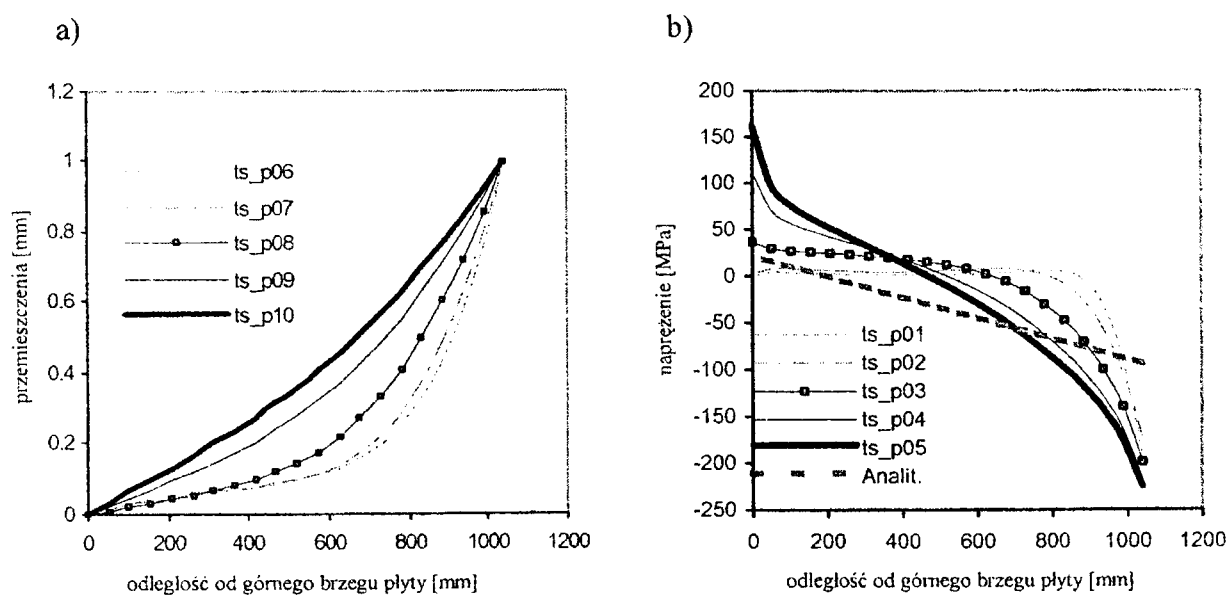
Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń stateczności płyt

ozn.	wymiary żebra wzmocniającego brzeg poprzeczny $a \times h$ [mm]	podparcie brzegów wzdłużnych	Współczynnik obciążenia krytycznego $f$	postać wyboczenia – ilość półfal $m$
p01	60 × 60	przegub. nieprzesuwne	1.929	2
p02	80 × 80	przegub. nieprzesuwne	1.858	2
p03	150 × 150	przegub. nieprzesuwne	1.655	2
p04	200 × 100	przegub. nieprzesuwne	1.584	2
p05	300 × 50	przegub. nieprzesuwne	1.509	2
p06	60 × 60	przegubowe przesuwne	1.187	1
p07	100 × 60	przegubowe przesuwne	1.207	1
p08	200 × 60	przegubowe przesuwne	1.174	1
p09	300 × 60	przegubowe przesuwne	1.052	1
p10	400 × 50	przegubowe przesuwne	0.98	1

Rysunki 3a oraz 4a przedstawiają odkształcenia poprzecznych brzegów płyty dla różnych usztywnień brzegowych. Jak widać z rysunków dla żadnego z analizowanych przypadków brzeg nie pozostaje prostoliniowy. Najbliższy prostoliniowości jest przypadek gdy brzegi wzdłużne podparte są przegubowo przesuwnie i żebro usztywniające ma wymiary  $a \times h = 400 \times 50$  mm, natomiast największe odchylenie od prostoliniowości jest w przypadkach gdy żebro usztywniające ma wymiary  $a \times h$  mniejsze od  $100 \times 100$  mm. Ten ostatni przypadek ma miejsce, gdy brzeg jest stosunkowo wiotki.



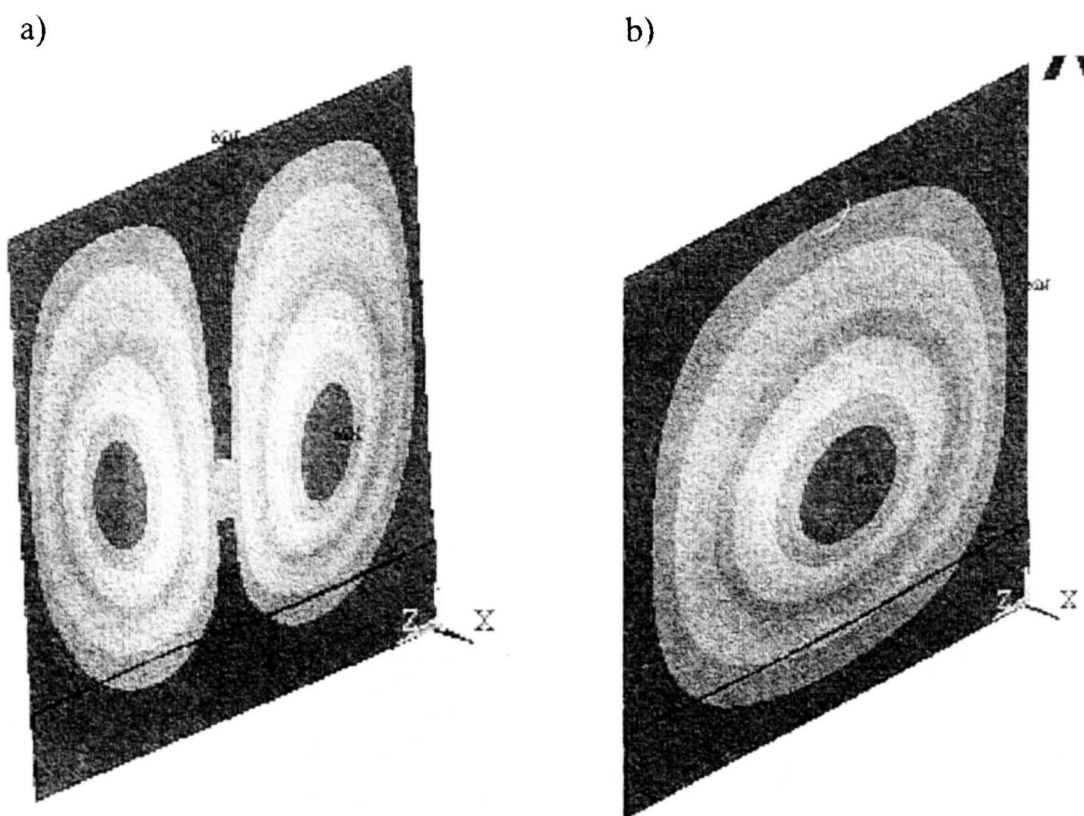
Rys. 3. Rozkład przemieszczeń (a) i naprężeń (b) wzdłuż poprzecznego brzegu płyt podpartych przegubowo nieprzesuwnie na wzdłużnych brzegach z różnymi wzmocnieniami poprzecznymi brzegów poprzecznych.



Rys. 4. Rozkład przemieszczeń (a) i naprężeń (b) wzdłuż poprzecznego brzegu płyt podpartych przegubowo przesuwnie na wzdłużnych brzegach z różnymi wzmocnieniami poprzecznymi brzegów poprzecznych.

Rysunki 3b i 4b przedstawiają rozkład naprężeń wzdłuż brzegu poprzecznego płyty oraz rozwiązanie teoretyczne przy założeniu prostoliniowości brzegów. Najbliższe rozwiązaniu teoretycznemu są przypadki z największym usztywnieniem brzegowym. W przypadku stosunkowo wiotkiego usztywnienia brzegu poprzecznego płyty naprężenia w pewnej odległości od miejsca przyłożenia obciążenia są bliskie zeru, a obciążenia przenosi tylko część płyty w pobliżu spoiny.

Rysunek 5 przedstawia postacie wybočenja dla płyty podpartej przegubowo nieprzesuwnie na wzdłużnych brzegach i z żeblem usztywniającym o wymiarach  $a \times h = 80 \times 80$  mm na brzegach poprzecznych (rys. 5a) oraz dla płyty podpartej przegubowo przesuwnie na wzdłużnych brzegach i z żeblem o wymiarach  $a \times h = 100 \times 60$  mm usztywniającym brzegi poprzeczne (rys. 5b). Oba te rysunki przedstawiają inną postać wybočenja – różnica ta wynika z różnych warunków brzegowych na wzdłużnych brzegach.



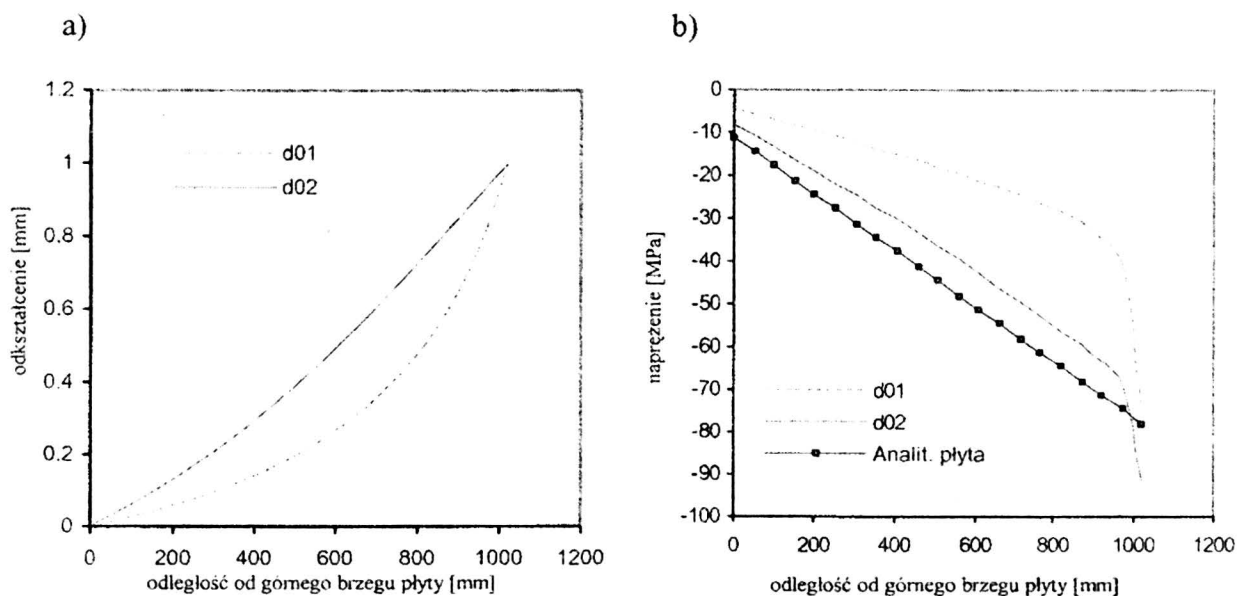
Rys. 5. Postacie wybočenja dla przypadków p02 (a) i p07(b)

Obliczenia stateczności dźwigara skrzynekowego przeprowadzono dla dwu sposobów obciążenia, wynikającego z długości napawanych nakładek. Napawanie nakładek dolnych bocznych na środkowym segmencie dźwigara oznaczono jako d01, oznaczenie d02 odpowiada obciążeniu termicznemu dla przypadku napawania nakładek dolnych bocznych wzdłuż całej długości dźwigara.

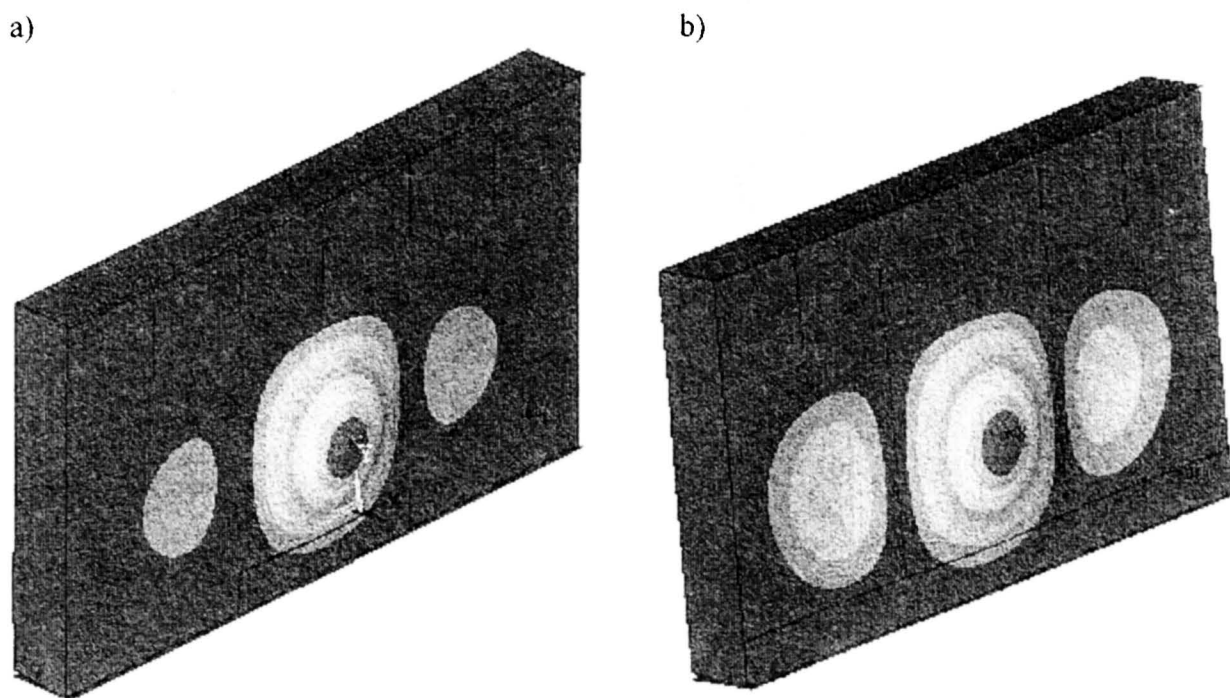
Dla obu przypadków obciążenia wyznaczono współczynnik obciążenia krytycznego i otrzymano następujące wyniki:

- dla przypadku d01 (nakładka napawana tylko na segment środkowy) współczynnik obciążenia krytycznego wyniósł  $f = 1.14$  co oznacza, że w tym wypadku nie dojdzie do wybočenja ponieważ położenie spoiny o długości równej długości jednego segmentu dźwigara wygeneruje zbyt małą siłę sprężającą;

- dla przypadku d02, gdzie spoina jest trzykrotnie dłuższa (nakładka spawana wzdłuż całego dźwigara) i generuje siłę większą od krytycznej co prowadzi do utraty stateczności – współczynnik obciążenia krytycznego dla przypadku d02 wyniósł  $f = 0.76$ .



Rys. 6. Rozkład odkształceń (a) i naprężeń (b) wzdłuż blachy środnika z środkowego segmentu zawartej pomiędzy przeponami i żebrami



Rys.7. Postacie wybożenia dla przypadków d01 (a) i d02 (b)

Rysunek 6 przedstawia rozkłady naprężeń i odkształceń wzdłuż linii będącej brzegiem fragmentu środnika ograniczonego przeponami oraz żebrami. Na wykres rozkładu naprężeń (rys. 6b) naniesiono prostą obrazującą rozkład naprężeń wyznaczony analitycznie w przypadku mimośrodowego ściskania płyty siłą pochodzącą od skurczu

spoin. Rozkłady odkształceń brzegów blachy środknika dla przypadku oznaczonego d02 jest zbliżony do prostoliniowego (zgodnie z założeniem w teorii stateczności płyt); również obciążenia nie są idealnie prostoliniowe, natomiast przypadek obciążenia oznaczony d01 daje rozkład odkształceń krzywoliniowy. Również rozkład naprężeń dla przypadku d02 jest bliższy rozkładowi wyznaczonemu dla blachy środknika z środkowego segmentu na drodze analitycznej.

Na rysunku 7a przedstawiono postać wyboczenia w przypadku napawania nakładki tylko na długości jednego środkowego segmentu środknika dźwigara. W rzeczywistości nie nastąpi wyboczenie ponieważ siła sprężająca generowana w spoinie jest mniejsza od wartości krytycznej. Rysunek 7b przedstawia postać wyboczenia dźwigara skrzynkowego z napawaną nakładką na całej długości.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza stateczności płyt wykazała, że nie w każdym przypadku poprzeczne brzegi płyty pozostają prostoliniowe jak to przyjmuje się w teorii stateczności. Wprowadzenie odpowiednich usztywnień brzegowych pozwala zapewnić, że brzegi płyty po obciążeniu są prawie prostoliniowe – dla takiego przypadku wynik rozwiązania staje się zgodny z wynikiem otrzymanym na drodze analitycznej dla przypadku ściskania mimośrodowego siłą wygenerowaną na skutek przyrostu temperatury.

Dla konstrukcji cienkościennych bardziej skomplikowanych niż płyty, np. dźwigary, przyjmuje się, że o stateczności decyduje największa płyta środknika zawarta pomiędzy przeponami i żebrami. Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych MES stanów dokrytycznych wynika, że nie we wszystkich przypadkach brzegi płyty ograniczonej przeponami i żebrami pozostają proste.

Obserwując zachowanie się konstrukcji cienkościennych analizowanych w niniejszej pracy można stwierdzić, że zapewnienie prostoliniowości brzegów płyt czy też blach środkników poszczególnych segmentów dźwigara daje niższe wartości krytyczne, powodujących utratę stateczności. W związku z powyższym założenie o prostoliniowości brzegów płyt analizowanych ze względu na stateczność wydaje się słuszne. Pewną wadą takiego założenia jest jednak fakt, że dla niektórych rodzajów obciążenia (przykład d01) konstrukcja nie będzie zaprojektowana optymalnie.

#### LITERATURA

- [1] Blum A.: Diagnostyka i regeneracja wytrzymałościowa skrzynkowych mostów suwnicowych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002
- [2] Timoshenko S.P., Gere J.M.: Teoria stateczności sprężystej. Arkady, Warszawa, 1963
- [3] Niezgodziński T., Kubiak T.: Problem stateczności blach środkników w sprężanych dźwigarach suwnic. Materiały IX Sympozjum Stateczności Konstrukcji, Zakopane 2000
- [4] Singha M.K., Ramachandra L.S., Bandyopadhyay J.N.: Thermal postbuckling analysis of laminated composite plates, Composite Structures 54 (2001)
- [5] Shukla K.K., Nath Y.: Analytical solution for buckling and post-buckling of angle-ply laminated plates under thermomechanical loading. Int. J. of Non-Linear Mechanics 36 (2001)

- [6] Dzik S., Obrzud K., Wolny S.: Wpływ sprężania na stan naprężenia i odkształcenia skrzynkowego dźwigara suwnicy. Zeszyty Naukowe AGH, Mechanika, T.13, Z. 4, Kraków 1994
- [7] Kubiak T., Niezgodziński T.: Numeryczny model efektu spawania nakładek w dźwigarach skrzynkowych Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej 9/1999
- [8] Blum A., Kubiak T., Niezgodziński T., Orłóś Z., Woliński J.: Numerical and experimental investigations of web sheets imperfection changes in the process of technological prestressing of girders, The Archive of Mechanical Engineering Vol XLVII, No 4, 2000
- [9] Structural Analysis Guide for ANSYS rev. 6.1, Ansys Inc., Houston, USA.

## **STABILITY OF THIN-WALLED GIRDERS SUBJECTED TO THERMAL LOAD**

In this paper the correctness of straight edge foundation in stability analysis of thin-walled structures has been considered. Results of numerical calculation for plate and girders subjected to thermal load have been presented. The applied thermal load was the same as in technological pre-stressing process [1] which consists in welding metal straps to the box-girder, parallel to the beam axis. To perform the computation of the stress distribution of webs, the finite element method (ANSYS software package) is applied.