

NUMERYCZNA ANALIZA ZGINANIA CIENKOŚCIENNYCH PROFILI KOMPOZYTOWYCH

Streszczenie

Praca prezentuje numeryczną analizę MES cienkościennych profili kompozytowych o przekroju ceowym poddanych czystemu zginaniu. Przedstawiona została metodyka modelowania zagadnień dotyczących stateczności i pracy w zakresie pokrytycznym cienkościennych profili o przekroju ceowym, wykonanych z kompozytu węglowo/epoksydowego o zróżnicowanym układzie warstw laminatu. Obliczenia prowadzono z wykorzystaniem komercyjnego programu ABAQUS[®], rozwiązując zagadnienie własne oraz zagadnienie nieliniowej stateczności struktury cienkościennej. Do oceny stopnia wyłączenia materiału kompozytowego zastosowano interakcyjne kryterium Tsai-Wu.

WSTĘP

Konstrukcje cienkościenne stanowią specyficzną grupę ustrojów nośnych, charakteryzującą się dobrymi wskaźnikami wytrzymałościowymi i sztywnościowymi w stosunku do ich ciężaru własnego. Te cechy decydują o zastosowaniu cienkościennych elementów nośnych w strukturach motoryzacyjnych, lotniczych czy kosmicznych, w odniesieniu do których często stawiane są rygorystyczne wymagania eksploatacyjne dotyczące pracy konstrukcji w złożonym stanie obciążenia. Zapewnienie wysokich parametrów wytrzymałościowych w nowoczesnych konstrukcjach m.in. lotniczych czy motoryzacyjnych jest możliwe dzięki wykorzystaniu nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, do których można zaliczyć przede wszystkim kompozyty o osnowie polimerowej – tzw. laminaty.

Istotnym zagadnieniem w analizie cienkościennych konstrukcji kompozytowych jest problematyka podwyższania obciążenia krytycznego oraz sztywności konstrukcji w stanach pokrytycznych, przy minimalnym wzroście masy całego układu. Jedną z metod zabezpieczania konstrukcji cienkościennej przed utratą stateczności jest stosowanie profili wzmacniających o złożonych kształtach przekroju poprzecznego. Można to zaobserwować przede wszystkim w konstrukcjach lotniczych wzmacnianych profilami o przekroju otwartym i zamkniętym. Profile wzmacniające konstrukcję należą zatem do elementów nośnych cienkościennej struktury, zapewniając wymaganą sztywność i wytrzymałość ustroju.

Eksploatacja konstrukcji cienkościennych wykazuje, że w wielu przypadkach, konstrukcje tego typu są zdolne do przenoszenia obciążeń w stanach pokrytycznych, pod warunkiem, że ich pokrytyczne ścieżki równowagi są stateczne [1]. Wymusza to na projektantach oraz naukowcach dokładne poznanie parametrów wytrzymałościowych i sztywnościowych konstrukcji w pełnym zakresie obciążenia, aż do fazy zniszczenia. Opisanie zachowania struktury cienkościennej w fazie zakrytycznej jest złożonym zagadnieniem, zwłaszcza w przypadku zastosowania nowoczesnych materiałów kompozytowych, takich jak laminaty. Nowoczesnym narzędziem w tym zakresie, umożliwiającym prowadzenie szczegółowych analiz kompozytowych struktur nośnych są programy numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych. W pracy zaprezentowano metodykę modelowania oraz analizy stanów krytycznych i pokrytycznych cienkościennych profili kompozytowych poddanych zginaniu. Do obliczeń numerycznych wykorzystano oprogramowanie ABAQUS wersja 6.14-2.

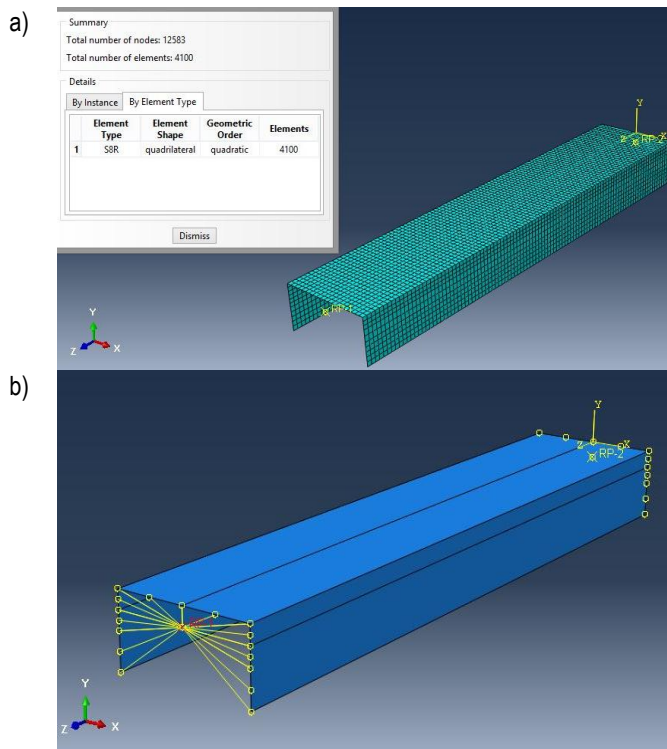
1. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Przedmiot badań stanowiły cienkościenne profile o przekroju ceowym, wykonane z kompozytu węglowo/epoksydowego. Struktura laminatu złożona była z 8 warstw o jednakowej grubości wynoszącej 0.131 mm w symetrycznym układzie warstw względem płaszczyzny środkowej pakietu. Wymiary profilu wynosiły odpowiednio: 80x40x1.048 i długości słupa wynoszącej $L=400$ mm. Badania prowadzono dla słupów wykonanych w dwóch konfiguracjach warstw kompozytu: $[0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T$ oraz $[0/90/45/45/45/-45/90/0]_T$, poddając dodatkowo analizie wpływ układu warstw kompozytu na pracę konstrukcji.

Zakres badań obejmował numeryczne obliczenia zginania profilu w pełnym zakresie obciążenia – do zniszczenia. Prowadzono obliczenia stanu krytycznego i pokrytycznego konstrukcji. Analiza stanu krytycznego obejmowała rozwiązanie zagadnienia własnego, zakres pokrytyczny wymagał rozwiązania nieliniowego zagadnienia stateczności dla konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi, odpowiadającymi pierwszej postaci wyboczenia. Wartość wprowadzonej amplitudy imperfekcji wstępnych przyjęto na poziomie 1/10 grubości ścian profilu. Rozwiązanie zagadnienia nieliniowej stateczności zrealizowano z wykorzystaniem przyrostowo-iteracyjnej metody Newtona-Raphsona [2,3].

2. MODEL DYSKRETNY PROFILU

W procesie dyskretyzacji struktury zastosowano elementy powłokowe ośmiowęgłowe, posiadające po 6 stopni swobody w każdym węźle o oznaczeniu S8R. Zastosowany rodzaj elementu stanowił element wielowarstwowy, dla którego możliwe jest niezależne definiowanie właściwości poszczególnych warstw kompozytu, jak m.in.: grubość, materiał czy kierunki głównych osi ortotropii [4,5]. Model numeryczny profilu o przekroju ceowym przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Model dyskretny słupa o przekroju ceowym: a) siatka MES, b) warunki brzegowe modelu [opracowanie własne]

Do dyskretyzacji modelu zastosowano strukturalną siatkę elementów skończonych, przyjmując wymiary boku każdego elementu o wartości 4x4 mm. W efekcie otrzymano równomierną siatkę elementów skończonych o stałej gęstości. Rezultatem zastosowanego sposobu dyskretyzacji było uzyskanie modelu numerycznego o rozmiarze 4100 elementów typu *Shell* z funkcją kształtu drugiego rzędu oraz 12583 węzłów (rys.1a). Przyjęty sposób dyskretyzacji zapewnił wystarczająco dokładną obserwację stanów odkształcenia i naprężeń występujących w analizowanej konstrukcji.

Warunki brzegowe zdefiniowano w sposób umożliwiający realizację czystego zginania profilu, poprzez zablokowanie w punktach przekrojów końcowych, położonych na osi symetrii środka belki przemieszczeń w kierunku osi *x* oraz w punktach przekrojów końcowych, znajdujących się w płaszczyźnie obojętnej zginania przemieszczeń w kierunku osi *y* i *z* (rys. 1b).

Obciążenie modelu stanowił moment gnący względem osi *x* wartości 150000 Nmm, przyłożony w punktach referencyjnych przekrojów końcowych znajdujących się w środku ciężkości profilu. Przeniesienie momentu na krawędzie przekrojów końcowych profilu zrealizowano poprzez powiązanie kinematycznych stopni swobody punktu referencyjnego ze stopniami swobody węzłów znajdujących się na krawędziach (rys. 1b).

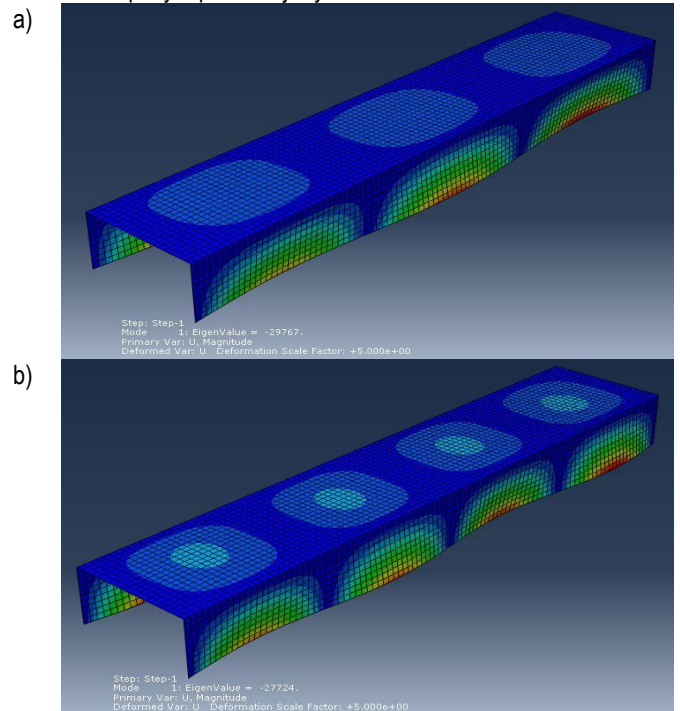
Dla materiału kompozytowego zdefiniowano model materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia. Przyjęto wyznaczone eksperymentalnie właściwości kompozytu dla głównych kierunków ortotropii związanych z kierunkiem ułożenia włókien [1]: moduły Younga $E_1=130710\text{MPa}$, $E_2=6360\text{MPa}$, liczbę Poisson'a w płaszczyźnie warstwy $\nu_{12}=0,32$ oraz moduły Kirchhoffa $G_{12}=G_{13}=G_{23}=4180\text{MPa}$, gdzie kierunek 1 oznacza kierunek ułożenia włókien, natomiast 2 – oznacza kierunek prostopadły do włókien.

W prowadzonych obliczeniach nieliniowych do oceny zniszczenia materiału kompozytowego wykorzystano kryterium zniszczenia Tsai-Hill'a [4], przyjmując następujące wartości graniczne materiału [1]: wytrzymałość kompozytu na rozciąganie – w kierunku włókien $F_{TU1}=1867\text{MPa}$ i w kierunku prostopadłym do włókien $F_{TU2}=26\text{MPa}$, wytrzymałość kompozytu na ściskanie – w kierunku włókien

$F_{CU1}=1531\text{MPa}$ i w kierunku prostopadłym do włókien $F_{CU2}=214\text{MPa}$ oraz wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie warstwy $F_{SU1}=100\text{MPa}$.

3. ANALIZA WYNIKÓW

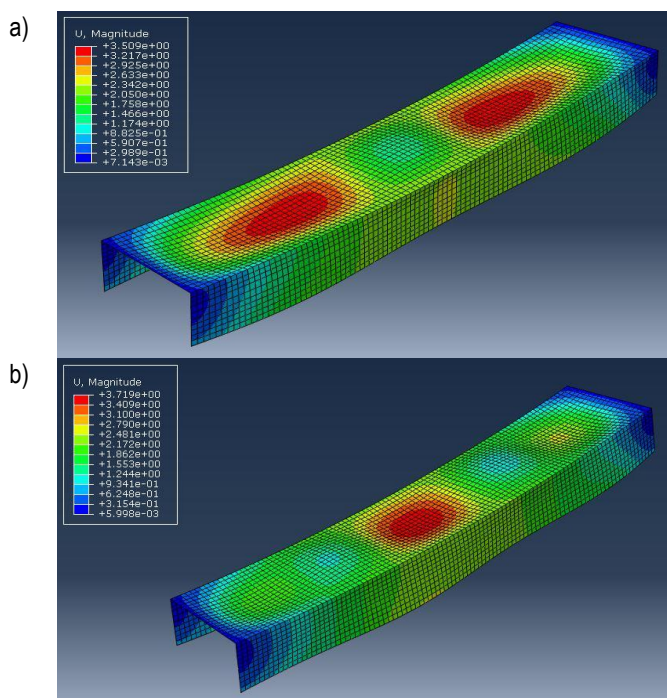
W pierwszym etapie obliczeń dotyczącym stanu krytycznego konstrukcji wyznaczono wartości obciążenia krytycznego oraz odpowiadające im najniższe postacie utraty stateczności. Wyniki obliczeń stanu krytycznego dla obydwu badanych konfiguracji warstw kompozytu prezentuje rys.2.



Rys. 2. Postacie utraty stateczności profilu: a) układ warstw $[0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T$, b) układ warstw $[0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T$ [opracowanie własne]

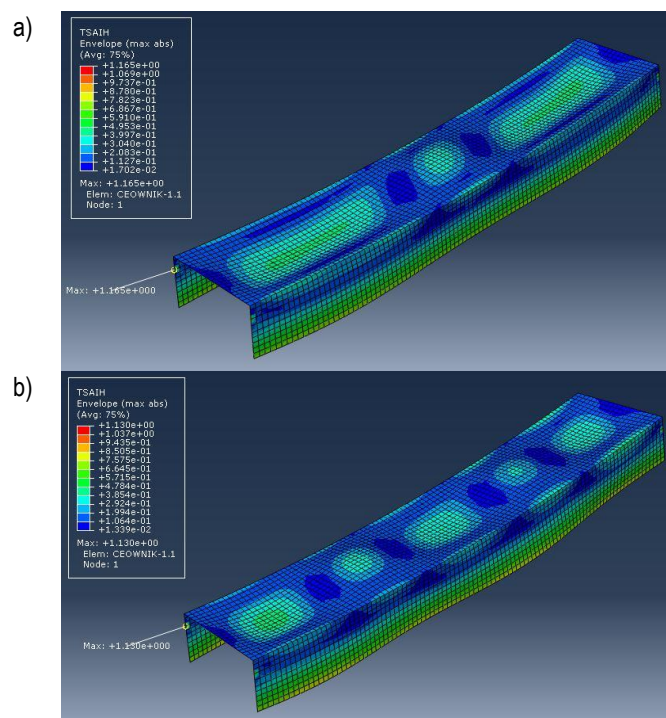
W obydwu rozważanych przypadkach utrata stateczności miała charakter lokalnego wybożenia ścian i środka profilu ceowego, charakteryzującego się określoną liczbą półfal na kierunku wzdłużnym profilu. W przypadku profilu o układzie warstw $[0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T$ otrzymana postać wybożenia charakteryzowała się występowaniem 3 półfal oraz wartością momentu krytycznego $M_{KR-1} = 29767\text{ Nmm}$ (rys.2a), natomiast w przypadku profilu $[0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T$ postać wybożenia posiadała 5 półfal, a wartość momentu krytycznego wynosiła $M_{KR-2} = 27724\text{ Nmm}$ (rys.2b).

Analiza nieliniowej stateczności umożliwiła ocenę stopnia odkształcenia konstrukcji w zakresie pokrytycznym. Na podstawie map przemieszczeń węzłowych modelu można zauważyć, że stan odkształcenia konstrukcji stanowił pogłębianie się najniższych postaci wybożenia wraz ze wzrostem obciążenia modelu – rys.3.



Rys. 3. Mapy przemieszczeń węzłowych profilu w stanie pokrywcznym: a) układ warstw [0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T, b) układ warstw [0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T [opracowanie własne]

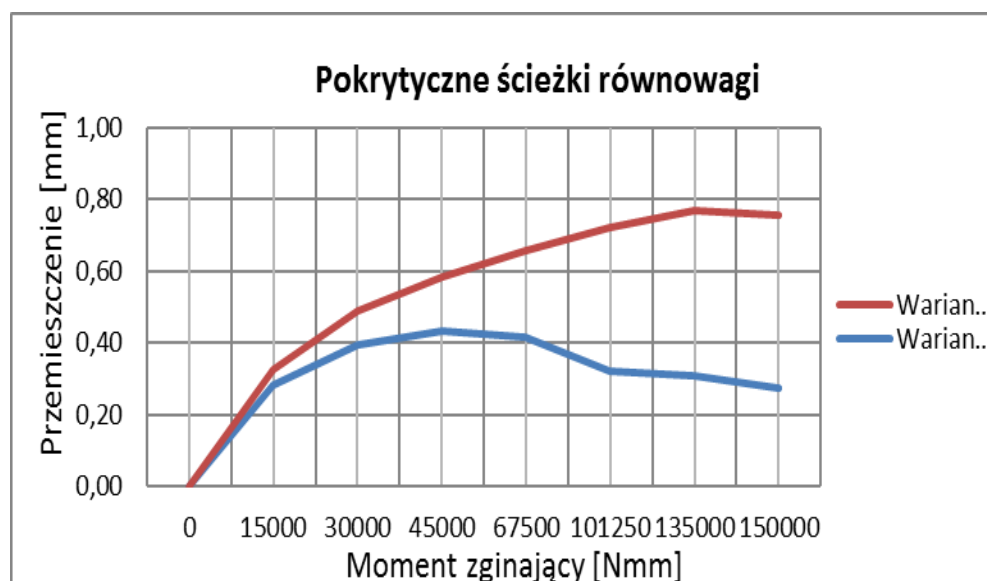
Ocenę stopnia wyczerpania konstrukcji przeprowadzono na podstawie map parametru krytycznego, określonego z wykorzystaniem kryterium zniszczenia Tsai-Hill'a. Zastosowane kryterium jest kryterium 0-1, gdzie wartość 1 oznacza parametr krytyczny, dla którego osiągnięto zniszczenie materiału kompozytowego. Mapy parametru krytycznego dla obydwu rozważanych wariantów układu warstw kompozytu przedstawiono na rys.4. Prezentowane wyniki stanowią obwiednie parametru krytycznego, tzn. przedstawiają maksymalne wartości parametru we wszystkich warstwach na tle odkształconego modelu. W obydwu rozważanych przypadkach maksymalne wartości parametru otrzymano w przekroju końcowym belki. Jest to wynikiem oddziaływania warunków brzegowych zdefiniowanych na krawędziach tych przekrojów. Prezentowane wyniki potwierdzają spełnienie kryterium zniszczenia Tsai-Hill'a, o czym świadczy osiągnięcie wartości parametru krytycznego 1.



Rys. 4. Mapy parametru krytycznego wg kryterium zniszczenia Tsai-Hill'a: a) układ warstw [0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T, b) układ warstw [0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T [opracowanie własne]

Przeprowadzone obliczenia umożliwiają szczegółową identyfikację wyczerpania warstw kompozytu w celu określenia warstwy najbardziej wyczerpanej. W przypadku układu [0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T spełnienie kryterium zniszczenia nastąpiło tylko w warstwie 2, natomiast w układzie [0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T wartość krytyczną parametru zniszczenia osiągnięto w warstwie 6. W obydwu przypadkach zniszczeniu uległy warstwy zorientowane pod kątem 45 stopni w stosunku do osi wzdłużnej profilu ceowego.

W celu porównania wpływu układu warstw kompozytu na zachowanie konstrukcji w stanie pokrywcznym opracowano pokrywczne ścieżki równowagi, określające zależność przemieszczenia węzła znajdującego się na środku środnika profilu ceowego (przemieszczenie prostopadłe do płaszczyzny środnika profilu) w funkcji obciążenia modelu – rys.5.



Rys. 5. Pokrywczne ścieżki równowagi: wariant I – układ [0/-45/45/90/90/45/-45/0]_T, wariant II - układ [0/90/-45/45/45/-45/90/0]_T [opracowanie własne]

WNIOSKI

W pracy zaprezentowano obliczenia numeryczne stanów krytycznych i pokrytycznych cienkościennych słupów kompozytowych o przekroju ceowym poddanych czystemu zginaniu. Przedstawiono metodykę badań stanów krytycznych i nieliniowej stateczności konstrukcji pracującej w zakresie pokrytycznym. Analizowane słupy o ścianach płaskich modelowano przyjmując płytowy model konstrukcji.

Ocenę stopnia odkształcenia oraz wyężenia konstrukcji przeprowadzono na podstawie wyznaczonych przemieszczeń węzłowych modelu oraz map parametru krytycznego w oparciu o kryterium zniszczenia Tsai-Hill'a. Zaobserwowano, że w stanie pokrytycznym deformacja konstrukcji stanowi pogębienie najniższych postaci wyboczenia, wyznaczonych w rozwiązaniu zagadnienia własnego.

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych wykazują wpływ układu warstw kompozytu na stan krytyczny oraz sztywność konstrukcji w stanie pokrytycznym. Zmiana usytuowania warstwy o kącie ułożenia włókien 90° względem osi wzdłużnej profilu ceowego spowodowała zmianę pierwszej postaci wyboczenia z trzech półfal na 5 półfal, powodując jednocześnie spadek wartości momentu krytycznego o ko. 7%. Istotne różnice otrzymano w stanie pokrytycznym, gdzie różnica sztywności profilu w zależności od układu warstw kompozytu była ponad 2-krotna (pokrytyczne ścieżki równowagi – rys. 5). Analiza map parametru krytycznego wykazała, że zniszczenie struktury kompozytu w obydwu rozważanych wariantach wystąpiła w warstwach ułożonych pod kątem 45° w stosunku do osi profilu, przy braku oznak zniszczenia pozostałych warstw kompozytu.

Zaprezentowane w pracy wyniki obliczeń numerycznych dostarczają informacji o znaczeniu praktycznym, niezbędnych w procesie kreowania struktury kompozytowych elementów nośnych oraz możliwości ich optymalizacji w celu zabezpieczenia konstrukcji przed utratą stateczności.

BIBLIOGRAFIA

1. Dębski H.: Badania numeryczne i doświadczalne stateczności o nośności kompozytowych słupów cienkościennych poddanych ścisłaniu. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2013.
2. Łodygowski T., Kąkol W.: Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich. Alma Mater, Poznań 2003.
3. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
4. Abaqus HTML documentation.
5. Teter A., Dębski H., Samborski S.: On buckling collapse and failure analysis of thin-walled composite lipped-channel columns subjected to uniaxial compression. Elsevier, Thin-Walled Structures, pp. 324-331, 85(2014).

walled composite profiles of channel cross-section subjected to pure bending. Presents the methodology of the modeling issues stability and work in the postbuckling states of thin-walled channel profile, made of composite carbon/epoxy system with different layers of the laminate. Calculations were performed using a commercial program ABAQUS[®] solving the problem of eigenvalue and the problem of nonlinear stability of thin-walled composite structures. To assess the degree of effort of the composite material used interactively Tsai-Wu criterion.

Autorzy:

DĘBSKI Hubert - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin h.debski@pollub.pl

SOKÓŁ Daniel - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin. Student.

NUMERICAL ANALYSIS OF BENDING THIN-WALLED COMPOSITE PROFILES

Abstract

The paper presents numerical analysis of thin-