



Agnieszka Derewońko*, Roman Gieleta, Krzysztof Kosiuczenko

Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, ul. gen. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland

* Corresponding author. E-mail: a.derewonko@wme.wat.edu.pl

Otrzymano (Received) 30.01.2008

ANALIZA NUMERYCZNA POŁĄCZENIA ŚRUBOWEGO KOMPOZYTU WARSTWOWEGO Z METALEM

W konstrukcji połączeń śrubowych/nitowych kompozytów warstwowych z metalem są wykorzystywane siły adhezji (klejenie) oraz spójności i tarcia (połączenia gwintowe). Złącza takie, eliminując zjawiska korozji elektrochemicznej, zapewniają korzystny, z punktu widzenia jego nośności, rozkład naprężeń. Badania odkształceń w otworach na śruby lub nity jest utrudnione. Istniejące metody zmieniają warunki współpracy części lub mają zastosowanie tylko do określonych materiałów. Wykorzystanie metod numerycznych umożliwia określenie stanów odkształceń/naprężeń występujących w tych obszarach, szczególnie w przypadku takich materiałów, jak kompozyty. Jednak numeryczna analiza materiałów kompozytowych wymaga zastosowania specjalnych procedur obliczeniowych dostosowanych do ich specyfiki. Do budowy modelu kompozytu konieczne są elementy skończone o specjalnych właściwościach. W pracy została przedstawiona numeryczna analiza połączenia klejowego stali z kompozytem epoksydowo-węglowym. Zaprezentowane połączenie zostało wzmocnione śrubą. W obliczeniach uwzględniono cienką warstwę kleju epoksydowego łączącego poszczególne części. Zastosowanie specjalnych procedur do odwzorowania zagadnienia kontaktu pozwoliło zachować nieciągłość pól naprężeń na granicach łączonych części. W pracy rozważono dwa modele numeryczne: bez uwzględnienia śruby w otworze oraz ze śrubą. Otrzymane wyniki potwierdzają zjawiska obserwowane w rzeczywistych połączeniach hybrydowych metal-kompozyt.

Słowa kluczowe: MES, kompozyt warstwowy, połączenie śrubowe

NUMERICAL ANALYSIS OF THE LAMINATE-METAL BOLTED JOINT

In the construction of bolted/riveted joints of laminar composites with metal, the forces of adhesion (bonding), cohesion and friction (screw joints) are utilised. Such joints eliminate the phenomena of electrochemical corrosion, and assure the state of stress advantageous from the point of view of the joint carrying capacities. Investigations of deformations in screw holes or rivets are more difficult. The existing methods change the conditions of interaction of the pieces or are limited only to specific materials. The use of numerical methods makes possible the determination of the strains and stresses states present in these areas, particularly in the case of such materials as composites. However, the numerical analysis of composite materials requires the use of special computational procedures adapted to their specificities. The finite elements with special properties are necessary to create the composite model. The paper presents the numerical analysis of a bonded joint of steel with a carbon-epoxy composite. The introduced joint was strengthened with a screw. The thin ply of epoxy glue joining the individual pieces was considered in the calculations. The use of special procedures to represent the contact model allowed to hold the discontinuity of the stress field the interfaces of the jointed pieces. Two numerical models were considered in the paper: one without regard of the screw in the hole and the other - with the screw. The received results confirm the phenomena observed in real hybrid steel-composites joints.

Keywords: FEM, composite, bolted joint

WPROWADZENIE

Klejowe połączenia metalowo-kompozytowe odgrywają szczególną rolę w przemyśle lotniczym. Z tego względu ich efektywne projektowanie wymaga dokładnego poznania zjawisk w nich zachodzących. Pomiar odkształceń w rzeczywistych obiektach jest często niemożliwy ze względu na brak dostępu do pracujących części [1], dlatego najlepszym rozwiązaniem jest w tym przypadku użycie narzędzi numerycznych. Metody numeryczne gwarantują dokładne odwzorowanie zja-

wisk zachodzących w klejonych połączeniach metalowo-kompozytowych pod warunkiem zachowania określonej metodyki postępowania [2].

Kompozyty są materiałami, których właściwości ściśle zależą od tworzących je składników, ich konfiguracji oraz technologii ich wykonania [3, 4]. Z tego względu algorytmy numeryczne stosowane w programach do obliczeń inżynierskich, w których istnieje możliwość wprowadzenia elementów skończonych o właściwo-

ściach kompozytu, nie zawsze umożliwiają w pełni odwzorowanie ich właściwości.

Zastosowanie złącza klejowego do połączenia części o tak różnych sztywnościach, jak metal i kompozyt powoduje powstanie dodatkowych trudności wynikających z różnicy grubości łączonych elementów i warstwy kleju oraz z metody modelowania powierzchni adhezyjnych: styku łączona część-klej [5, 6].

W pracy przedstawiono metodę modelowania styku dwóch różnych materiałów z wykorzystaniem zagadnienia kontaktu. Zastosowana do obliczeń procedura iteracyjna umożliwia jednocześnie określenie obciążenia, dla którego następuje inicjacja zniszczenia [7]. Odwzorowanie zagadnienia kontaktu pozwala jednocześnie określić stan stykających się powierzchni: położenie stref kontaktu, wartości naprężeń kontaktowych oraz naprężeń w strefie styku, wskazując miejsca lokalnych koncentracji naprężeń, w których może występować inicjacja zniszczenia.

Przedmiotem analiz jest dwuzakładkowe połączenie śrubowe kompozytu warstwowego z metalem. Różne mechanizmy zniszczenia takich połączeń powodują, że analizy stanu naprężenia w pobliżu otworów są istotnym elementem procesu konstrukcji [3, 8].

MODELOWANIE POŁĄCZENIA DWUZAKŁADKOWEGO

Analizie numerycznej poddano modele dwóch próbek z otworem w obszarze połączenia metal-kompozyt. W jednej próbce z otworem umieszczono śrubę. Wszystkie próbki wykonane są z dwóch zakładek ze stali 30HGSA, między które wklejona została za pomocą żywicy Epidian 53 laminowana zakładka wykonana z dziesięciu warstw preimpregnatu CE8208 (tkanina węglowa KDK8042 przesycona żywicą epoksydową E201 charakteryzująca się jednakową zawartością i właściwościami włókien w kierunku osnowy i wątku). W modelu numerycznym przyjęto ortotropowy materiał o stałych materiałowych podanych w tabeli 1.

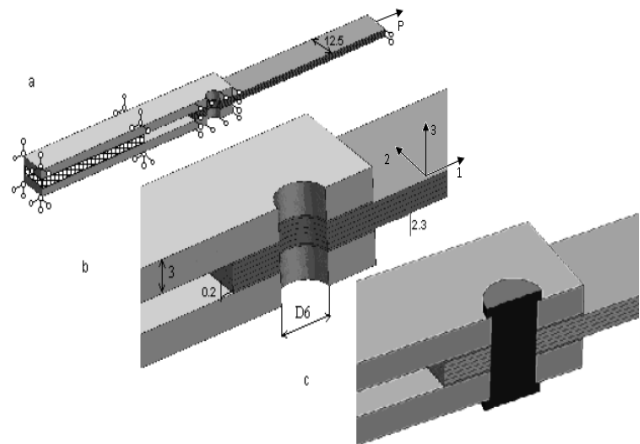
TABELA 1. Parametry ortotropowych właściwości kompozytu
TABLE 1. Orthotropic elastic constants for the composite

E_{11} MPa	E_{22} MPa	E_{33} MPa	G_{12} MPa	G_{23} MPa	G_{31} MPa	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
58 093	58 093	9759	3545	2564	2564	0,0154	0,5356	0,1575

Na rysunku 1 przedstawiono laminat między dwoma metalowymi zewnętrznymi zakładkami. Na modelu połączenia dwuzakładkowego z otworem umieszczono podstawowe wymiary i odebrane stopnie swobody. Próbkę obciążono rozciągającą siłą 39 346 N, przyłożoną do niezamocowanej części kompozytowej, równą sile niszczącej połączenie dwuzakładkowe uzyskanej w czasie badań eksperymentalnych. Spoina klejowa jest bardziej widoczna na rysunku próbki ze śrubą (rys. 1c). We wszystkich modelach symetria próbki i rodzaje ich

obciążenia umożliwiły odwzorowanie ich połówek. Oddziaływanie drugiej części zapewnione jest poprzez przyjęcie odpowiednich stopni swobody w węzłach leżących w płaszczyźnie symetrii, również przedstawionych na rysunku modelu próbki bez śruby. Między powierzchniami kleju i zakładek odwzorowano zagadnienie kontaktu. Podobnie jak między śrubą i otworem w modelu ze śrubą.

Oba modele złożone są z trójwymiarowych elementów skończonych. W modelu laminatu wykorzystano elementy o właściwościach kompozytu. W pojedynczym elemencie tego typu możliwe jest zdefiniowanie do 510 pojedynczych warstw. W modelu pojedynczy element skończony odpowiada dwóm warstwom preimpregnatu. Wartości odkształceń i naprężeń są określane w czterech punktach Gaussa położonych w połowie grubości pojedynczej warstwy. Orientacja tkaniny w warstwach laminatu definiowana jest jako kąt zawarty między kierunkiem tkaniny w warstwie a osią globalną x modelu przyjętą wzdłuż długości próbki.



Rys. 1. Modele dyskretnego połączenia dwuzakładkowego: a, b) bez śruby, c) ze śrubą

Fig. 1. Double lap joint models: a, b) without bolt, c) with bolt

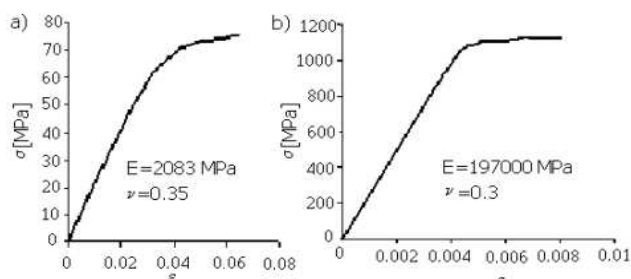
Niejednorodność laminatu odzwierciedlono przez odwzorowanie współpracy powierzchni poszczególnych warstw. Wykorzystano przy tym technikę modelowania zagadnienia kontaktu, dzięki której jest możliwe określenie normalnych i stycznych naprężeń na stykających się powierzchniach warstw laminatu w funkcji obciążenia zewnętrznego konstrukcji. Podobna technika posłużyła do modelowania styku powierzchni kleju oraz stali i laminatu.

Rozwiązanie zagadnienia kontaktu w programie MSC.Marc nie wymaga stosowania specjalnych elementów kontaktowych [7], takich jak np. elementy GAP.

Podczas realizacji procedury obliczeniowej, po wykryciu kontaktu między odpowiadającymi węzłami dwóch stykających się obiektów, między nimi automatycznie są tworzone więzy. Wprowadzenie opcji „glue” ogranicza styczne przemieszczenie względne odpowiadających sobie węzłów do zera i w trakcie analizy wyznaczane są siły reakcji w węzłach. Narzucone więzy

kontaktu traktowane są jako kinematyczne warunki brzegowe, które ciągle się zmieniają, ponieważ normalna i styczna do powierzchni kontaktu zmieniają się z iteracji na iterację.

Przyjęto, że stal i klej odkształcają się w zakresie sprężysto-plastycznym, a laminat w zakresie sprężystym. Właściwości charakterystyczne stali i kleju (rys. 2) przyjęto wg badań własnych [9, 10].



Rys. 2. Właściwości charakterystyczne stali (a) i kleju (b)
Fig. 2. True stress-strain relationship for adhesive (a) and 30HGSA (b)

We wszystkich analizach numerycznych przyjęto kryterium maksymalnych naprężeń dopuszczalnych, w którym, w każdym punkcie Gaussa, działające naprężenie porównywane jest z wytrzymałością dla każdej składowej naprężenia [7]. Matematycznie jest to przedstawione zależnością:

$$F = \max \left(\frac{\sigma_1}{X_t}, -\frac{\sigma_1}{X_c}, \frac{\sigma_2}{Y_t}, -\frac{\sigma_2}{Y_c}, \frac{\sigma_3}{Z_t}, -\frac{\sigma_3}{Z_c}, \left| \frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right|, \left| \frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right|, \left| \frac{\sigma_{31}}{S_{31}} \right| \right) \quad (1)$$

Przez F oznaczony jest indeks zniszczenia. Jego wartość równa 1 lub wyższa oznacza zniszczenie konstrukcji [7]. W tabeli 2 podano oznaczenia stosowane we wzorze (1) oraz ich wartości przyjęte wg badań własnych do obliczeń laminatu [10] i połączenia kompozytowo-metalowego. Osie 1, 2 i 3 pokazano na rysunku 1.

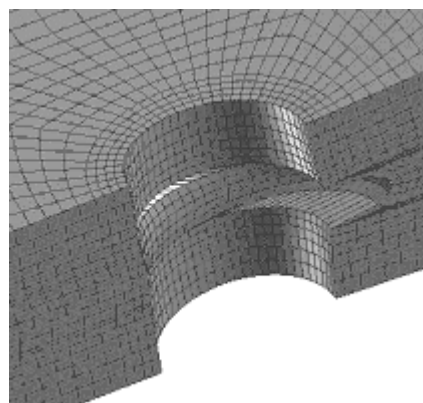
TABELA 2. Oznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych i ich wartości
TABLE 2. Failure material parameters

Nazwa parametru	Oznaczenie	Wartość, MPa
Wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku osi 1	X_t	650
Wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku osi 1	X_c	555
Wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku osi 2	Y_t	650
Wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku osi 2	Y_c	555
Wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku osi 3	Z_t	10
Wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku osi 3	Z_c	500
Wytrzymałość warstwy na ścinanie w płaszczyźnie 1-2	S_{12}	181
Wytrzymałość warstwy na ścinanie w płaszczyźnie 2-3	S_{23}	132
Wytrzymałość warstwy na ścinanie w płaszczyźnie 3-1	S_{31}	132

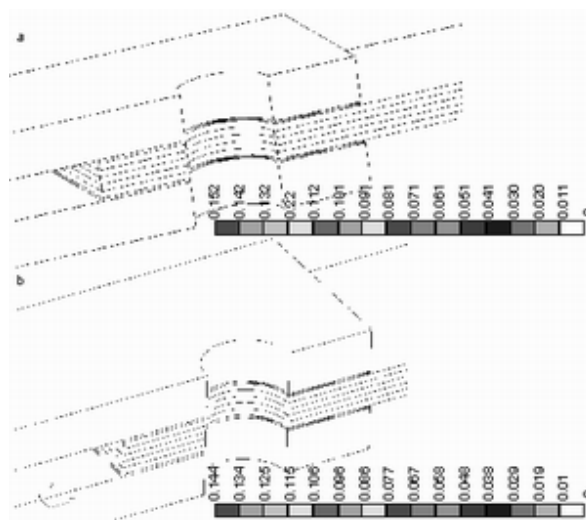
WYNIKI OBLICZEŃ I ANALIZ NUMERYCZNYCH

W modelu próbki symetrycznej deformacje są symetryczne. Deformację połączenia bez śruby w obszarze spoiny klejowej przedstawia rysunek 2. Obraz został przeskalowany, przez co uwidoczniono obszar najbardziej zdeformowany.

Warstwy odkształceń plastycznych dla obu modeli z otworem zaprezentowano na rysunku 3. Zgodnie z przewidywaniem następuje uplastycznienie warstwy kleju, najsłabszego „ogniwa” połączenia. Wartości odkształceń plastycznych w modelu bez śruby (rys. 4a) są wyższe niż w modelu ze śrubą (rys. 4b), ale występują w tym samym miejscu - otworze na śrubę. Brak wizualizacji śruby na rysunku umożliwia porównanie rozkładu odkształceń plastycznych kleju w obszarze otworu dla dwóch modeli obliczeniowych.

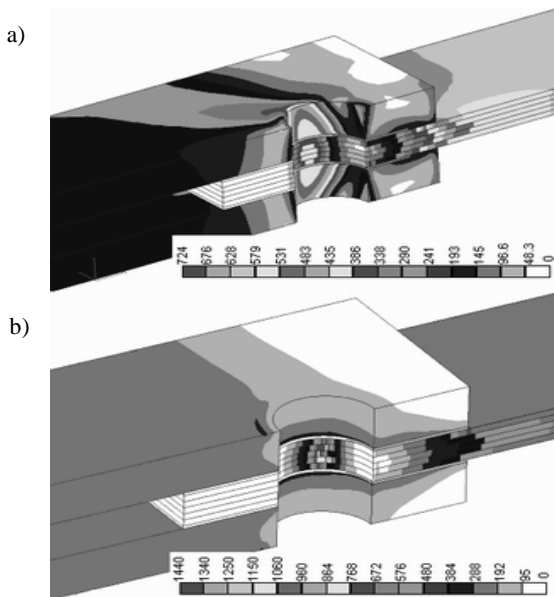


Rys. 3. Deformacja połączenia w obszarze otworu
Fig. 3. Joint deformation in the hole region



Rys. 4. Warstwy odkształceń plastycznych
Fig. 4. Plastic strain distribution

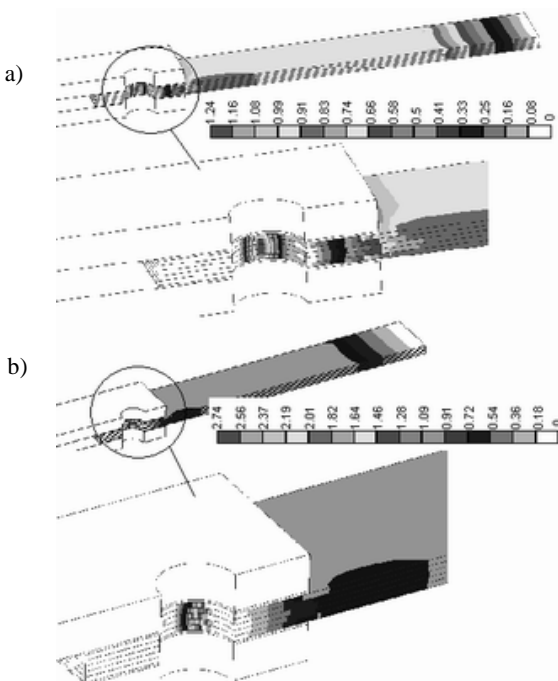
Warstwy naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego dla obu modeli z otworem zaprezentowano na rysunku 5. Dla modelu bez śruby (rys. 5a) maksymalne wartości występują w warstwie kleju, na jej swobodnym końcu od strony laminatu.



Rys. 5. Warstwy naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego

Fig. 5. Equivalent HMH stress distribution

Wstawienie śruby powoduje, że lokalnie wartości naprężeń wzrastają i występują w otworze wykonanym w laminacie (rys. 5b). W analizach nie uwzględniono zjawiska ukosowania spoiny klejowej, które zdecydowanie obniża wartości lokalnych naprężeń występujące w jej narożach [11].



Rys. 6. Warstwy współczynnika zniszczenia

Fig. 6. Failure index distribution

Wykorzystywane oprogramowanie daje możliwość przedstawienia rozkładu współczynnika zniszczenia odpowiadającego naprężeniom rozciągającym dla analizowanej konstrukcji. Współczynnik zniszczenia obli-

czany jest jako stosunek aktualnego naprężenia w kierunku osi 1 (działania obciążenia próbki) do wytrzymałości warstwy na rozciąganie w tym kierunku.

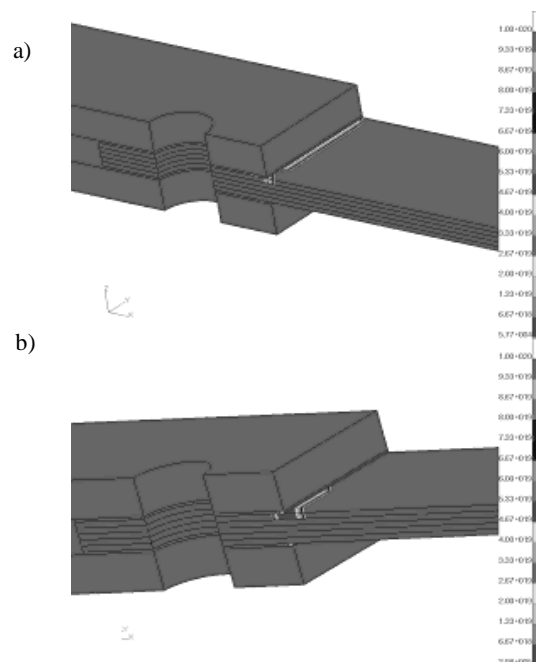
Z warstw współczynnika zniszczenia dla modelu bez śruby i pełnego obciążenia przedstawionych na rysunku 6a wynika, że zniszczeniu ulega laminat w środkowej części otworu, ale wysoki współczynnik zniszczenia występuje również w laminacie w pobliżu spoiny klejowej.

W modelu ze śrubą (rys. 6b) największe zniszczenie występuje również w otworze laminatu, ale współczynnik zniszczenia jest o 54% większy niż w modelu bez śruby. W modelu ze śrubą zniszczenie laminatu nie występuje w pobliżu spoiny.

WYZNACZENIE OBLICZENIOWEJ TRWAŁOŚCI POŁĄCZENIA DWUZAKŁADKOWEGO

W metodzie analitycznej do obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek użyte zostały krzywe S-N (naprężenie-liczba cykli) materiałów otrzymane z badań własnych [10]. Średnia trwałość zmęczeniowa określana jest na podstawie hipotezy liniowej kumulacji uszkodzeń, wg której zniszczenie następuje, gdy $\sum n/N = 1$, gdzie: n - liczba cykli realizowanych w próbce, a N - liczba cykli do zniszczenia. Określenie trwałości niezawodnej jest oparte na znalezieniu elementu o najniższej trwałości zmęczeniowej [12].

Rysunek 7a przedstawia obliczeniową trwałość próbki dla modelu bez śruby. Trwałość próbki ze śrubą (rys. 7b) jest 85,5% wyższa niż dla modelu bez śruby przy założonym poziomie obciążenia 0,5 i cyklu odzerowo-tętniącym.



Rys. 7. Trwałość próbek dwuzakładkowych

Fig. 7. Life for double lap specimens

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w pracy analizy wykazały, że dobra znajomość oprogramowania używanego do analiz numerycznych podnosi efektywność prowadzonych obliczeń, ale nie gwarantuje określenia rzeczywistej wytrzymałości i trwałości badanej konstrukcji.

Zastosowanie kleju jako łącznika jest kolejnym wyzwaniem dla projektanta. Mała, w porównaniu do grubości łączonych materiałów, grubość spoiny wymusza utworzenie modelu dyskretnego złożonego z bardzo dużej liczby elementów skończonych (stopni swobody) i konieczność wykorzystania maszyny obliczeniowej z dużą mocą obliczeniową. Ograniczenie rozmiaru modelu powoduje powstanie elementów o istotnie różniących się wymiarach w obszarach styku dwóch części i niewłaściwe określenie pól odkształceń i naprężeń w tym obszarze (lokalne koncentracje naprężeń wynikające z MES). Rozwiązaniem problemu może być użycie nieregularnych siatek podziału (bardziej gęstych w miejscach bardziej narażonych na uszkodzenia i rzadszych w obszarach mniej odpowiedzialnych), co zostało zastosowane w przedstawionych modelach.

Inną, często stosowaną, metodą ograniczenia rozmiaru modelu jest pominięcie modelowania powierzchni adhezyjnej na styku kleju i łączonych części. Takie podejście utrudnia określenie miejsca zniszczenia badanej konstrukcji oraz obciążenia je wywołującego.

Odwzorowanie zagadnienia kontaktu między warstwami laminatu wykonanego z wielu warstw tkaniny (preimpregnatu) umożliwia jednocześnie wizualizację rozwarstwienia samego laminatu oraz naprężeń adhezyjnych między jego warstwami. Natomiast wprowadzenie modelu śruby do modelu dwuzakładkowego połączenia kompozyt-metal istotnie zmienia wytrzymałość takiego połączenia (rys. 5), umożliwiając jednocześnie określenie obszarów, w których występuje możliwość największego zniszczenia konstrukcji (rys. 6).

Przedstawione w pracy analizy numeryczne umożliwiły opis lokalnych i globalnych form zniszczenia próbek metalowo-kompozytowych. Pozwalają również na ocenę poziomu obciążenia każdej z części konstrukcji, wskazując miejsca najbardziej narażone na zniszczenie.

Otrzymane wyniki potwierdzają zjawiska obserwowane w rzeczywistych połączeniach śrubowych metal-kompozyt [10].

LITERATURA

- [1] Boroński D., Doświadczalna analiza odkształceń lokalnych w badaniach zmęczeniowych, XXII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 2006.
- [2] Broughton W.R., Crocker L.E., Gower M.R.L., Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structure, National Physical Laboratory Materials Centre, UK 2002.
- [3] German J., Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, Politechnika Krakowska, Kraków 1996.
- [4] Muc A., Mechanika kompozytów włóknistych, Księgarnia Akademicka, Kraków 2003.
- [5] Godzimirski J., Tkaczuk S., Określanie właściwości mechanicznych spoin klejowych, Technologia i Automatyzacja Montażu 2004, 3, 4.
- [6] Duncan B., Crocker L., Review of tests for adhesion strength, National Physical Laboratory, UK, 2001.
- [7] MSC.Marc Volume A: Theory and User Information., Version 2005.
- [8] Kweon J-H., Jung J-W., Kim T-H, Choi J-H., Kim D-H., Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding, Composite Structures 2006, 75, 192-198.
- [9] Derewońko A., Gieleta R., Zniszczenie połączenia klejowego, IV Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów 30.05-02.06 2007.
- [10] Derewońko A., Ochelski S., Piekarski R., Szachnowski W., Kosiuczenko K., Kiczko A., Sprawozdanie z projektu badawczego nr 4 T12C 010 27, WAT, 2007.
- [11] Godzimirski J., Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych, WNT, Warszawa 2002.
- [12] Kaplan M.P., Wolff T.A., Life Extension and Damage Tolerance of Aircraft, Willis & Kaplan 2001.