



**Werner Hufenbach, Maik Gude, Andreas Freund, Andrzej Czulak\***

*Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), 01062 Dresden, Germany*

*\*Corresponding author. E-mail: a.czulak@ilk.mw.tu-dresden.de*

Otrzymano (Received) 27.02.2008

## ANALIZA NUMERYCZNA ZAKŁADKOWEGO POŁĄCZENIA NITOWEGO PŁYT CFRP I ALUMINIUM WYSTĘPUJĄCEGO W STRUKTURZE KAROSERII POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Coraz częściej w nowoczesnych strukturach lekkich, np. w budowie pojazdów, wykorzystuje się konstrukcje hybrydowe. Konstrukcje te, składające się z materiałów metalowych oraz anizotropowych materiałów kompozytowych, wymagają nowej koncepcji metody łączenia. W tym kontekście wyjątkowe znaczenie ma odpowiednie zaprojektowanie dopasowanego do obciążenia obszaru połączenia. Projektowanie zakładkowego połączenia nitowego zostało przedstawione za pomocą elementu konstrukcji karoserii samochodu osobowego. Projektowanie dopasowane do występujących obciążeń zostało pokazane z wykorzystaniem modelu symulacyjnego hybrydowego połączenia elementów CFRP i aluminium, który został opracowany i zweryfikowany praktycznie w Instytucie Konstrukcji Lekkich i Tworzyw Sztucznych (ILK) Technische Universität Dresden. Model ten bierze pod uwagę ekstremalne obciążenia termiczno-mechaniczne występujące w procesie wytwarzania, powstające ze względu na dużą różnicę we współczynnikach rozszerzalności cieplnej materiałów składowych. Wyniki obliczeń, jak również opracowany model cząstkowy MES mogły zostać zweryfikowane dzięki przeprowadzonym badaniom eksperymentalnym na specjalnie do tego celu przygotowanym demonstratorze CFRP/Al i pozwoliły na zaprojektowanie termicznie dopasowanych komponentów z CFRP. Ponadto, model cząstkowy jest możliwy do wykorzystania w realistycznej analizie wytrzymałościowej połączenia nitowego pomiędzy materiałem izotropowym a dowolnym materiałem anizotropowym uwzględniającym występujące obciążenia termiczno-mechaniczne. Jest również praktycznym narzędziem inżynierskim pozwalającym zaoszczędzić czas na modelowanie, obliczenia oraz przeprowadzenie większej ilości badań eksperymentalnych. Dodatkowo, opisana metoda może być w przyszłości wykorzystana do przyspieszenia obliczeń innych rodzajów połączeń hybrydowych materiałów w konstrukcjach lekkich.

**Słowa kluczowe:** kompozyty, połączenie nitowe, materiał izotropowy, struktury hybrydowe

## SIMULATION OF FAILURE BEHAVIOUR OF BLIND RIVET CONNECTION IN HYBRID CFRP/Al - CAR BODY STRUCTURES

Novel lightweight developments in automobile industry are increasingly completed as hybrid constructions. Modern hybrid concepts, including metallic materials and anisotropic composites require material adapted joining concepts. In this context a special importance is given to the load-adapted design of joining areas. The overlapping area design of blind rivet connections has been presented upon an example of a constructed element car body. This load adapted connection has been designed due to elaborated and practically validated simulation model. Load adapted design such as overlapping areas has been presented due to its own development, practically proofed simulation model of hybrid CFRP/Al shear-field, which are subjected to extreme thermo-mechanical loads for different thermal expansion coefficients during the painting process. Calculation results, and so that developed FE-submodel could have been verified on the basis of carried out experimental research on CFRP/Al-shear field and laid foundations for a design of CFRP-shear field components. This FE-submodel is applicable in realistic deformation and failure analysis of blind rivet connection with any anisotropic join partner under thermo-mechanical loads. It is also a practical engineering-tool which reduces modeling efforts, computing methods and necessary experimental research. Additionally, described methodology can be applied in other join types (rivet, thread, press), offering the acceleration of calculation process in different material adapted connection methods in multimaterial lightweight structures.

**Keywords:** composites, blind rivet connection, isotropic material, ceramic stirrer, hybrid structures

## WPROWADZENIE

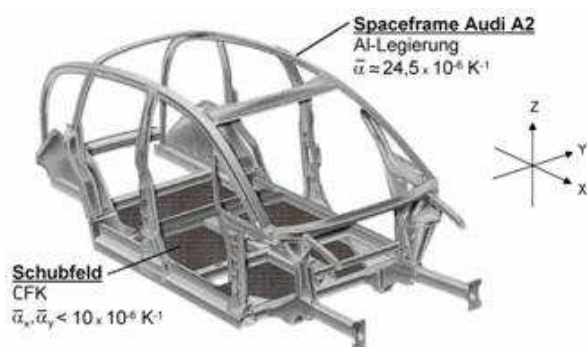
Obecnie karoseria średniej klasy samochodu osobowego to 34% masy całości pojazdu. Wskutek mocno zaostzonych przepisów bezpieczeństwa oraz wzrastających wymagań w zakresie komfortu jazdy udział ten

wzrasta do poziomu 52% [1]. Zatrzymanie tej samo nakręcającej się spirali możliwe jest jedynie poprzez

zastosowanie właściwych koncepcji nowych i lekkich struktur przeznaczonych na elementy karoserii. Ogromny potencjał posiadają odpowiednie, inteligentne, połączenia materiałów, takich jak: wysokowytrzymała stal (St), aluminium (Al), magnez (Mg) wraz z materiałami kompozytowymi (polimery wzmocnione włóknem węglowym).

Połączenie różnorodnych materiałów wymaga jednak przemyślanych i odpowiednio dobranych technik łączenia. Z tego względu takie metody, jak nitowanie oraz klejenie skutecznie zastępują spawanie. Problem związany z różnymi współczynnikami rozszerzalności cieplnej stosowanych materiałów jest szczególnie widoczny w procesie wytwarzania, np. kataforetyczne lakierowanie zanurzeniowe elementów karoserii, bądź w czasie późniejszego użytkowania elementów.

Analiza całej struktury, a w szczególności strefy łączenia materiałów, wymaga ogromnego nakładu na przygotowanie modelu dyskretnego oraz przeprowadzenia obliczeń obszarów znajdujących się w okolicy karbu. W celu redukcji tych nakładów oraz przeprowadzenia niezbędnych badań w Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (Dresden, Germany) przy współpracy z Volkswagen AG został opracowany cząstkowy model dyskretny zakładkowego połączenia nitowego płyty aluminiowej z płytą polimerową wzmocnioną włóknem węglowym (rys. 1).



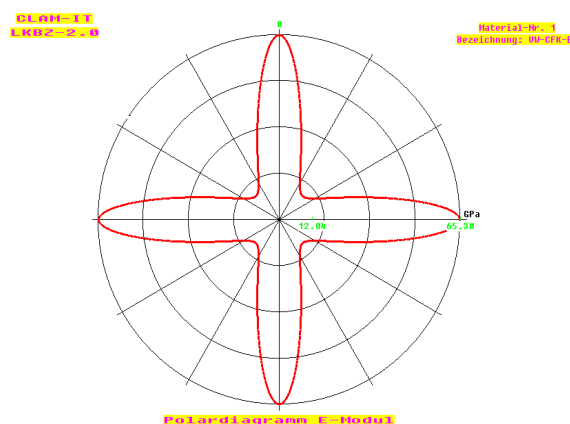
Rys. 1. Potencjalne umiejscowienie kompozytowych płyt zbrojonych włóknem węglowym w strukturze karoserii samochodu osobowego

Fig. 1. Potential positioning of carbon fiber reinforced plates in body car structure

## BADANIA EKSPERYMENTALNE ZAKŁADKOWEGO POŁĄCZENIA NITOWEGO

Materiał badawczy został przygotowany w postaci zbrojonych dwukierunkowo płyt kompozytowych o oznaczeniach  $[0/90]_S$  oraz  $[+60/-60]_S$ , z których zostały wycięte próbki do określenia charakterystyk w quasi-statycznych jednoosiowych obciążeniach. Przeprowadzono niezbędne testy wytrzymałości na rozciąganie, ścisnienie oraz ścinanie, których wyniki posłużyły jako dane materiałowe w późniejszej symulacji komputerowej. Współczynniki sprężystości badanego materiału

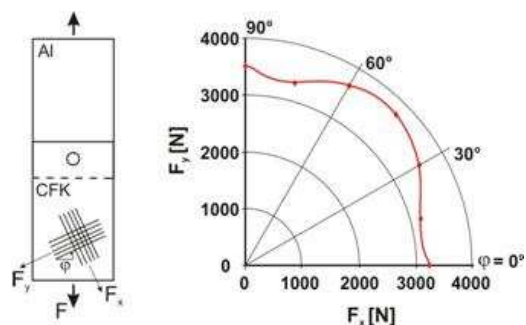
w zależności od kąta przyłożonego obciążenia zostały przedstawione w postaci wykresu biegunowego (rys. 2). Widoczna jest znaczna różnica w wartościach modułu Younga dla kątów  $0^\circ$  i  $90^\circ$  z kątem  $45^\circ$ .



Rys. 2. Wykres biegunowy współczynników sprężystości płyty kompozytowej  $[0/90]$

Fig. 2. Pole diagram of elasticity coefficient CFRP plate  $[0/90]$

Badania wytrzymałościowe zakładkowego połączenia nitowego zostały przeprowadzone na próbkach składających się z dwóch rodzajów płyt: aluminiowej oraz kompozytowej, połączonych ze sobą nitem jednostronnie zamkniętym o komercyjnej nazwie RIVQUICK, charakteryzującym się dużą powierzchnią główki nitu. Testy jednoosiowego obciążenia wykonano na maszynie wytrzymałościowej marki ZWICK. Przeprowadzono również quasi-statyczne badania wytrzymałościowe, obciążając próbki pod różnym kątem w stosunku do ułożenia zbrojenia głównego, dzięki czemu udało się sformułować funkcję opisującą granicę wytrzymałości na rozciąganie w zależności od kąta obciążania (rys. 3).

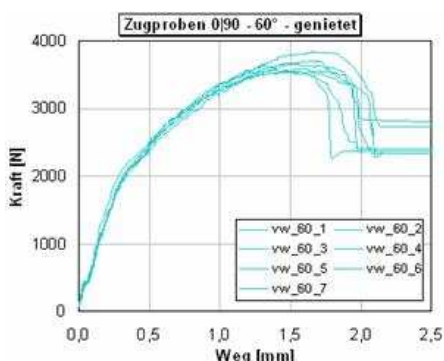


Rys. 3. Funkcja graniczna wytrzymałości na rozciąganie próbek CFRP/Al połączonych nitem. Płyty CFRP zbrojone w dwóch kierunkach  $[0/90]$

Fig. 3. Dependent on load direction a strength function of rivet connected CFRP/AL plates with bi-directional reinforcement  $[0/90]$

Jak oczekiwano, potwierdził się istotny wpływ kierunku obciążenia, działającego na próbkę, na wytrzymałość połączenia nitowego. Dodatkowo wyznaczone zostały krzywe przedstawiające cały proces niszczenia próbki, na których widoczna jest nieliniowość powstała

w wyniku występującego ścinania w okolicy połączenia nitowego (rys. 4). W obrębie tym powstały pierwsze uszkodzenia materiału kompozytowego, natomiast nieuszkodzone fragmenty próbki odkształcały się nadal w sposób liniowo-elastyczny.



Rys. 4. Nieliniowa charakterystyka próbek rozciąganych pod kątem  $\varphi = 60^\circ$  w stosunku do głównego kierunku wzmocnienia materiału

Fig. 4. Non-linear characteristics of composite specimens under off-axis load  $\varphi = 60^\circ$

### OPRACOWANIE CZĄSTKOWEGO MODELU MES POŁĄCZENIA NITOWEGO

Wytrzymałość na pęknięcie strefy nitowania jest określona przez uszkodzenie materiału. Miejscowe nieciągłości - wybrzuszenia po delaminacji - nie występują lub są niewykrywalne. Przyjmując, że podatność próbki zależy wyłącznie od odkształcenia miejsca nitowanego, natomiast pozostałe obszary płyt aluminiowej i kompozytowej zachowują się idealnie elastycznie, można wyznaczyć podatność nitu dzięki szeregowemu połączeniu pojedynczych wartości sztywności, wykorzystując zależną od kierunku i obciążenia funkcję podatności. Stąd odkształcenie połączenia nitowego można opisać niezależnie od geometrii elementu. Dzięki temu sformułowano regułę niezależną od kształtu, którą można rozumieć jako prawo bazujące na własnościach materiałowych wyabstrahowanego połączenia nitowego, opartą na równaniu Ramberga-Osgooda

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left( \frac{\sigma}{R_{p0,2}} \right)^n \quad (1)$$

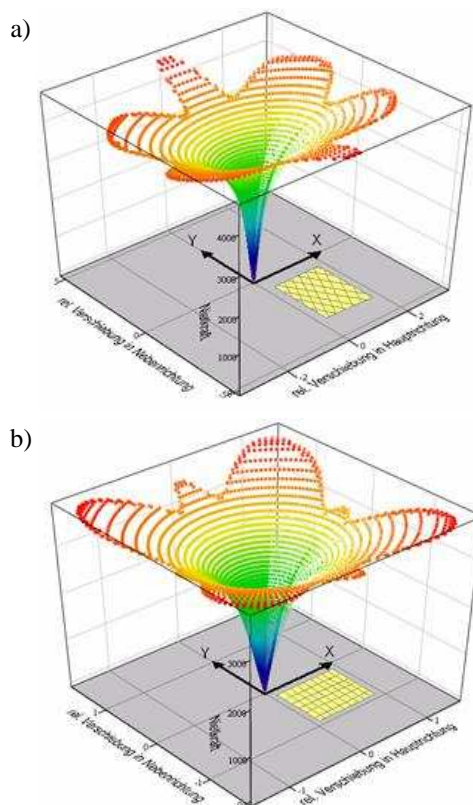
zmodyfikowanym do

$$u_{rel}(F) = \frac{F}{C_{Nit}} + 0,1 \cdot \left( \frac{F}{F_{p0,2}} \right)^n \quad (2)$$

gdzie:

- $u_{rel}$  - przesunięcie względne
- $C_{Nit}$  - wyabstrahowana podatność nitu
- $F_{p0,2}$  - siła przy odkształceniu 0,2%
- $R_{p0,2}$  - 0,2% granicy plastyczności materiałów izotropowych.

Za pomocą funkcji opisującej granicę wytrzymałości na rozciąganie oraz funkcji podatności Ramberga-Osgooda można stworzyć wieloparametryczny model pęknięcia połączenia nitowego, pozwalający opisać zachowanie się struktury tego połączenia w zależności od kierunku obciążenia, aż do wystąpienia uszkodzenia (rys. 5). Osie „x” i „y” przedstawiają przesunięcie względne powierzchni połączenia w stosunku do głównego kierunku wzmocnienia materiału kompozytowego, podczas gdy na osi „z” przedstawiona została siła przenoszona przez nit.



Rys. 5. Wykresy wytrzymałości połączenia nitowego materiałów kompozytowych [+60/-60]s (a) i [0/90]s (b) w zależności od kierunku i przyłożonego obciążenia

Fig. 5. Tension strength blind rivet connection diagrams of composite plates [+60/-60]s (a) and [0/90]s (b) dependent on direction and applied load

Dzięki temu modelowi możliwe jest opisanie własności połączenia nitowego jako tzw. "black box" i przypisanie ich do pojedynczego elementu łączącego płytę aluminiową z płytą kompozytową. W modelu przygotowanym na potrzeby metody elementów skończonych element ten został zastąpiony przez kombinację belek z nieliniowymi elementami kontaktowymi. Element kontaktowy jest sterowany poprzez podprogram, w którym zawarty jest wieloparametryczny model pęknięcia i podatności, określający zachowanie się nitu w zależności od kierunku działania siły i wielkości obciążenia.

## OPRACOWANIE MODELU KALIBRUJĄCEGO

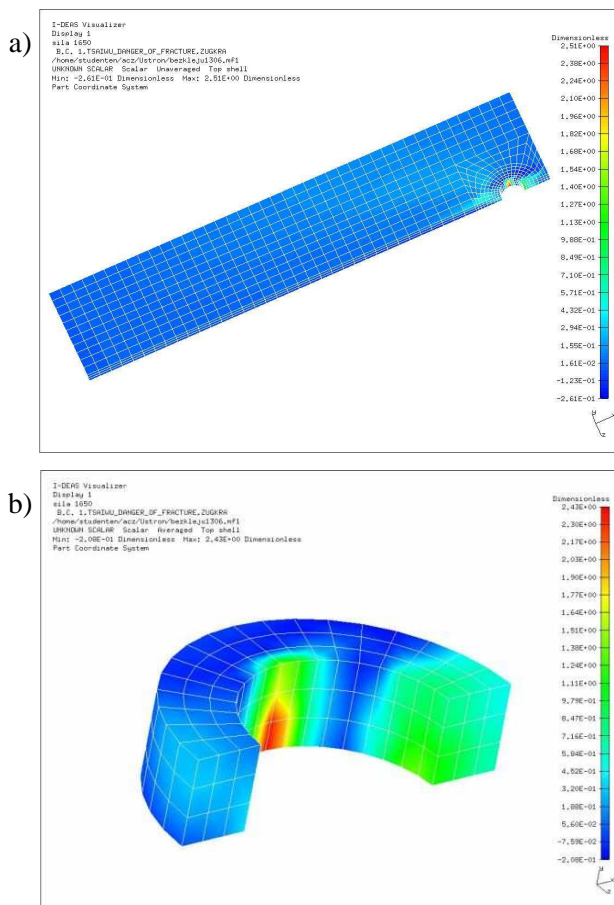
Model ten może zostać zastosowany w projektowaniu połączeń nitowych struktur mieszanych o dowolnym ułożeniu warstw materiału kompozytowego, odpowiednio dopasowanych do występującego obciążenia, bez przeprowadzenia dużej ilości badań eksperymentalnych potencjalnej grupy laminatów. W tym celu został opracowany podprogram kalibrujący, bazujący na własnościach materiałowych jednokierunkowo zbrojonych pojedynczych warstw kompozytu. Ponieważ dotychczasowe programy wykorzystujące metodę elementów skończonych nie dostarczyły odpowiednich modeli odwzorowujących nieliniowość powstałą w wyniku pęknięcia włókien bądź osnowy, wymusiło to napisanie podprogramu zawierającego zdefiniowany przez użytkownika model materiałowy, w którym zastosowano hipotezy wyciężeniowe Cuntze [2] oraz Azzi-Tsai-Hill [3]. W równaniu Azzi-Tsai-Hilla można wyróżnić wyraz opisujący pęknięcie włókien oraz osnowy. I tak w przypadku spełnienia warunku pęknięcia osnowy zostają obniżone wartości sztywności elementów charakteryzujących osnowę i zapamiętane w miejsce wartości początkowych. Podobnie zachowuje się podprogram w przypadku spełnienia warunku dotyczącego pęknięcia włókien. Redukcja wartości modułów sztywności powoduje w modelu dyskretnym powstanie nieliniowości związku siły i przemieszczenia, które w sposób automatyczny rozpoznawane są przez skrypt.

W ramach obszernych badań eksperymentalnych ujawniono, że, niezależnie od budowy laminatu, sztywność styczna po wystąpieniu pierwszych uszkodzeń wynosi około 1/5 początkowej wartości sztywności. Dzięki tym empirycznym założeniom do obliczeń konieczna jest jedynie znajomość sztywności początkowej materiału kompozytowego z uwzględnieniem kontaktu, współczynnika tarcia oraz naprężenia wstępnego (rys. 6). Niezbędne funkcje opisujące podatność materiału oraz granicę wytrzymałości na rozciąganie dla modelu MES mogą być obliczone numerycznie za pomocą modelu kalibrującego dla dowolnego ułożenia warstw oraz materiału kompozytowego przy zastosowaniu podstawowych parametrów wytrzymałościowych warstwy UD. Natomiast krytyczne stany naprężeń w okolicach karbu rozpoznano dzięki wykonanemu modelowi 3D układu płyt połączonych nitami w programie I-DEAS (rys. 7). Zastosowano elementy siatki typu SOLID, które w okolicy karbu, dla płyty kompozytowej oraz aluminiowej, zostały rozmieszczone promieniście i połączone z elementami siatki nitu za pomocą elementów kontaktowych. Model został utwierdzony od strony płyty aluminiowej, a obciążenie przyłożono do przeciwległej krawędzi płyty kompozytowej. Dzięki zastosowaniu symetrii możliwe było ograniczenie ilości elementów w modelu.



Rys. 6. Model 3D zakładkowego połączenia nitowego płyt kompozytowej i aluminiowej

Fig. 6. 3D model of blind rivet connection of composite and aluminium plates

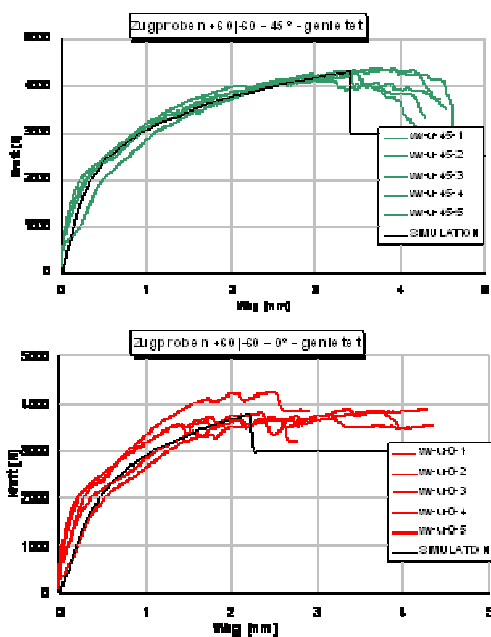


Rys. 7. Model 3D płyty kompozytowej zweryfikowany za pomocą hipotezy wyciężeniowej (a) oraz wycinek strefy otaczającej karb (b)

Fig. 7. 3D model of composite plate verified due to failure criteria (a) and a notch zone (b)

Przeprowadzając analizę wytrzymałościową, skorzystano z hipotezy wytrzymałościowej TSAI-WU, przygotowanej specjalnie dla elementów 3D w Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (Dresden, Germany). W otrzymanych wynikach można zaobserwować nieregularne rozmieszczenie, na grubości płyty kompozytowej miejsc krytycznych w obszarze połączenia nitowego. Pozwala to również na rozpoznanie miejsca inicjacji uszkodzenia, co odpowiada wynikom otrzymanym z przeprowadzanych badań eksperymentalnych.

Opracowany model MES został zweryfikowany przez porównanie wyników analizy numerycznej i badań eksperymentalnych. Rysunek 8 pokazuje przykładową zgodność uzyskanych wyników symulacji z charakterystykami wytrzymałościowymi próbek CFRP/Al obciążonych pod kątem  $\varphi = 45^\circ$  bądź  $\varphi = 90^\circ$ , w których płyty CFRP posiadały dwukierunkowe zbrojenie włóknem węglowym ([0/90] ewentualnie [+60/-60]). Praktyczne zastosowanie modelu MES zostało zweryfikowane podczas wykonywania elementu demonstracyjnego w postaci cienkościennej płyty prostokątnej zamocowanej do aluminiowej ramy przy użyciu połączenia nitowego (rys. 9), odpowiadającego wymiarami elementom podłogi w pojazdach osobowych. W procesie kateforetycznego suszenia elementy te są narażone na działanie wysokiej temperatury do  $180^\circ\text{C}$  przez ponad 30 min, gdzie ze względu na problem związany z różnymi współczynnikami rozszerzalności cieplnej powstają naprężenia krytyczne w obrębie strefy połączenia, mogące prowadzić do uszkodzeń. Podczas badania demonstratora CFRP/AL powstają odkształcenia względne w strefie połączenia nitowego rzędu kilku milimetrów, co przy termicznym niedopasowaniu ramy aluminiowej oraz płyty CFRP prowadzi do powstania pierwszych uszkodzeń bądź nawet do całkowitego zniszczenia wytężonego obszaru.

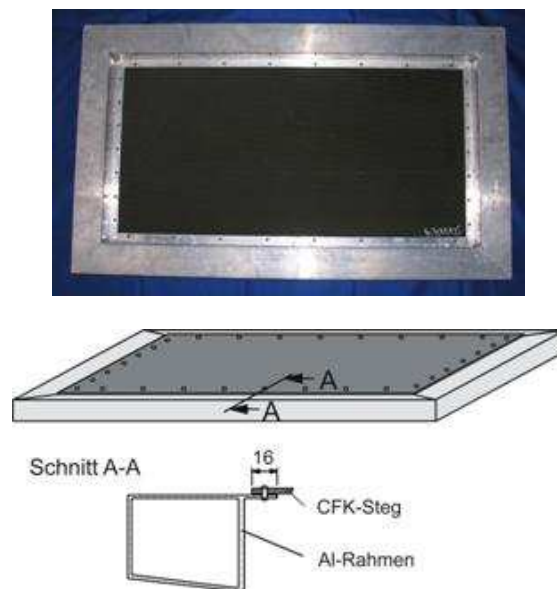


Rys. 8. Porównanie wyników symulacji komputerowej oraz badań eksperymentalnych próbek CRFP/Al

Fig. 8. Comparison of experimental and calculation results of CFRP/Al specimens

Rzeczywista symulacja struktury całego modelu wraz z 30 nitami oraz numeryczne rozpoznanie ewentualnych uszkodzeń w każdym z tych połączeń wymaga nieproporcjonalnie większego nakładu pracy w zakresie modelowania i obliczeń. Za pomocą opracowanego

modelu MES możliwa jest skuteczna symulacja zachowania struktur rama-Al/prostokątna płyta cienka – CFRP oraz dokładna analiza wytrzymałościowa strefy nitowania. Wyniki obliczeń umożliwiły optymalizację ułożenia warstw zbrojących w materiale kompozytowym i stanowią podstawę do zaprojektowania i wykonania termicznie współpracujących komponentów CFRP/Al.



Rys. 9. Element demonstracyjny cienkościennej płyty prostokątnej zamocowanej do aluminiowej ramy za pomocą połączenia nitowego

Fig. 9. Display element of thin walled rectangle plate, fixed to aluminum frame due to rivet connection

## PODSUMOWANIE

W rozwoju nowoczesnych struktur lekkich w elementach złożonych z różnych materiałów, a w szczególności materiałów anizotropowych ogromne znaczenie ma kształt połączenia. Na przykładzie wykonanego elementu konstrukcji przedstawiono projektowanie obszaru zakładkowego połączenia nitowego dopasowanego odpowiednio do występujących obciążeń za pomocą opracowanego i sprawdzonego praktycznie modelu symulacyjnego. Uwzględniono również ekstremalne, termiczno-mechaniczne obciążenia występujące w procesie lakierowania, a powstające w wyniku różnic we współczynnikach rozszerzalności cieplnej materiałów składowych. Wyniki z obliczeń, a tym samym opracowane cząstkowe modele MES mogły zostać zweryfikowane dzięki przeprowadzonym badaniom eksperymentalnym na wykonanych demonstratorach CFRP/Al oraz posłużyły do projektowania termicznie dopasowanych elementów konstrukcji.

Opracowany cząstkowy model MES nadaje się do wykorzystania w rzeczywistej analizie wytrzymałości

ściowej termiczno-mechanicznie obciążonych zakładkowych połączeń nitowych materiałów izotropowych z anizotropowymi jako fragment złożonych modeli MES. Jest to również praktycznie zorientowane narzędzie inżynierskie pozwalające w znacznym stopniu zredukować nakłady na modelowanie, obliczenia, a także niezbędne badania eksperymentalne. Ponadto opisana metoda możliwa jest do wykorzystania w innych rodzajach połączeń (nitowe, gwintowe, wciskowe), oferując przy tym możliwość przyśpieszenia procesu obliczeniowego, materiałowo dopasowanych, różnorodnych systemów łączenia struktur lekkich.

## LITERATURA

- [1] Haldenwanger H.-G., Moderne Bauweisen und Werkstoffe für fertigungsoptimale Karosseriekonzepte; 1. Braunschweiger Symposium Faszination Karosserie DLR, 28.01.2003.
- [2] Cuntze R.G., Freund A., The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates, Composites Science and Technology 2004, 64, 343-377.
- [3] Handbook of FE-Software ABAQUS 6.4-1.
- [4] Hahn O., Hufenbach W., Gude M., Kläger O., Entwicklung eines Auslegungskonzepts für geklebte und genietete CFK/Al-Karosseriestrukturen auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen, 11. Paderborner Symposium Fügetechnik, 24.-25.11.2004.