

Symulacja trzy punktowego zginania prostej kompozytowej belki , z użyciem komercyjnego pakietu MES

Andrzej Dylewski^{1,a)} , Waldemar Łogin^{1,b)}

¹Polskie Zakłady Lotnicze Sp. Z o.o./ a Sikorsky Company, Biuro Projektów Rozwojowych

^{a)} andrzej.dylewski@lmco.com

^{b)}waldemar.login@lmco.com

Abstract. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki symulacji trójpunktowego zginania prostej belki kompozytowej z wykorzystaniem komercyjnego pakietu HyperMesh . Symulację zginania wykonano dla różnych kompozytowych modeli materiałowych dostępnych w pakiecie HyperMesh oraz sposobów modelowania (z wykorzystaniem elementów Shellowych jak również Solidowych) a następnie porównano z wynikami obliczeń analitycznych oraz z testem laboratoryjnym. Oprócz samych wyników, porównano takie właściwości jak czas obliczeń, ilość oraz typ elementów. Analizy wykonano z wykorzystaniem metody jawnej oraz niejawniej, traktując zjawisko zginania jako quasi statyczne. Obliczenia analityczne wykonano wyprowadzając relacje kinematyczne opierając się na hipotezie Love’a-Kirhoffa jak również teorii poprzecznego ścinania I rzędu. Belka została wykonana z kompozytu epoksydowego, wzmacnianego włóknem węglowym w technologii autoklawowej. Do budowy laminatu użyto tkaniny typu twill 2k z prepregów firmy GURIT.

WSTĘP

PZL Mielec w ramach projektu INOOLOT , przy współpracy z konsorcjantami, opracowuje innowacyjne metody połączeń, które w całości lub w znacznym stopniu ma zredukować ilość użytych elementów łącznikowych takich jak nity, śruby etc.

Połączenia te wykonywane są za pomocą specjalnie zaprojektowanych klipów- połączeń kształtowych. Do budowy klipów użyto materiałów takich jak aluminium, materiały hybrydowe (glare composite material) oraz kompozyty wzmacniane włóknem węglowym. Połączenia tzw. kompozyt-kompozyt przy długości połączenia 20 mm są w stanie przenieść siłę rzędu 400 N – 500 N (udowodnione eksperymentalnie podczas prób i testów w ramach projektu)

Podczas procesu projektowania tego typu połączeń posługiwano się komercyjnymi programami wykorzystującą Metodę Elementów Skończonych. Wyniki z analiz porównywano z testem laboratoryjnym. W projekcie zostały przyjęte trzy kryteria pracy połączenia: siła otwarcia, siła zamknięcia oraz stosunek tych sił nazwany *efektywnością*

W obszarze połączeń z wykorzystaniem materiałów metalowych, symulacja połączeń była zgodne z testem laboratoryjnym (rozbieżność sił otwarcia oraz zamknięcia na poziomie kilku procent), natomiast w przypadku połączeń kompozyt-kompozyt zaobserwowano dużą różnicę pomiędzy symulacjami a wynikami pochodzącymi z testu .

Następstwem tego była dogłębna analiza, która wykazała, iż główną przyczyną tego stanu są niedokładności wynikające z procesu produkcyjnego. Rozbieżność pomiędzy wynikami pochodzącymi z symulacji numerycznej a

testu laboratoryjnego wynosiły od kilkudziesięciu do około stu procent. Nawet w przypadku przybliżonej zbieżności pomiędzy testem a symulacją, poziom był niesatysfakcjonujący .

Niezadawalające wyniki z symulacji zmusiło do szukania innych przyczyn oprócz przyczyn wynikłych z błędów wytwarzania (błędów geometrycznych jak i również materiałowych).

Klipy kompozytowe charakteryzują się małymi wymiarami – maksymalna wysokość nie przekracza 34 mm (laminaty składające się z 3 do 4 warstw prepregów). Podczas procesu zamykania lub otwierania następują bardzo duże odkształcenia, w praktyce do granic wytrzymałości. Odkształcenia przekraczają znacząco 5% -a więc następują duże przemieszczenia.

Większość komercyjnych systemów, wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych wykonujących symulację struktur kompozytowych umożliwia analizę z uwzględnieniem dużych przemieszczeń traktując strukturę jako płytę . Ponadto typowymi analizami są zjawiska takie jak odkształcenia struktury kompozytowej, wyboczenia , impact etc. Natomiast nietypowymi zjawiskami (dla struktur kompozytowych) są współpracujące elementy, gdzie zachodzą zjawiska tribologiczne oraz duże przemieszczenia/ odkształcenia.

Istotną rolę odgrywa tutaj przyjęty model materiałowy jak i również warunki brzegowe czy też kryteria zniszczenia kompozytu oraz sposób samego modelowania takiego połączenia. Standardowe podejście może okazać się nie wystarczające a wyniki wysoko niesatysfakcjonujące.

Przykład połączenia kompozytowego

Na rysunku nr 1 przedstawiono model MES przykładu klipa wykonanego z kompozytu epoksydowego wzmocnianego włóknem węglowym. Elementy zamka względem siebie podczas procesu zamykania/ otwierania (ruch pionowy) w znaczny sposób odkształcają się nie przekraczając granic wytrzymałościowych.

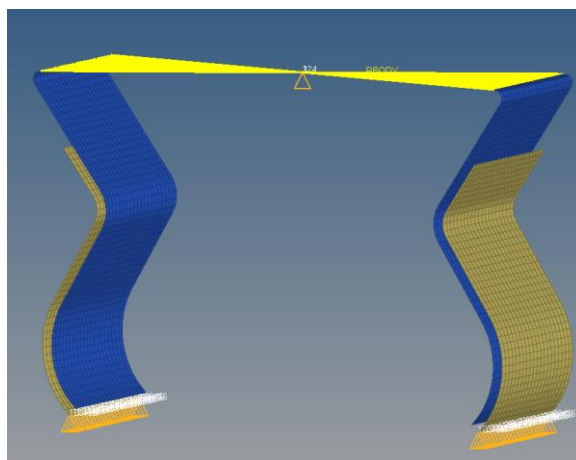


Figure 1 Klip zamknięty

Na rysunku nr 2 przedstawiono na przykładzie wybranego węzła, przemieszczenia jakie wykonuje w osi poprzecznej (y) podczas procesu zamykania lub otwierania.

W analizowanym przypadku założono, że sztywność obu elementów jest zbliżona (zbudowana z takich samych laminatów), jednakże efekt ten jest spotęgowany w przypadku gdy gniazdo jest sztywniejsze (np. poprzez zbudowanie z większej ilości warstw) i przemieszczenia są głównie na elemencie wchodzącym w gniazdo.

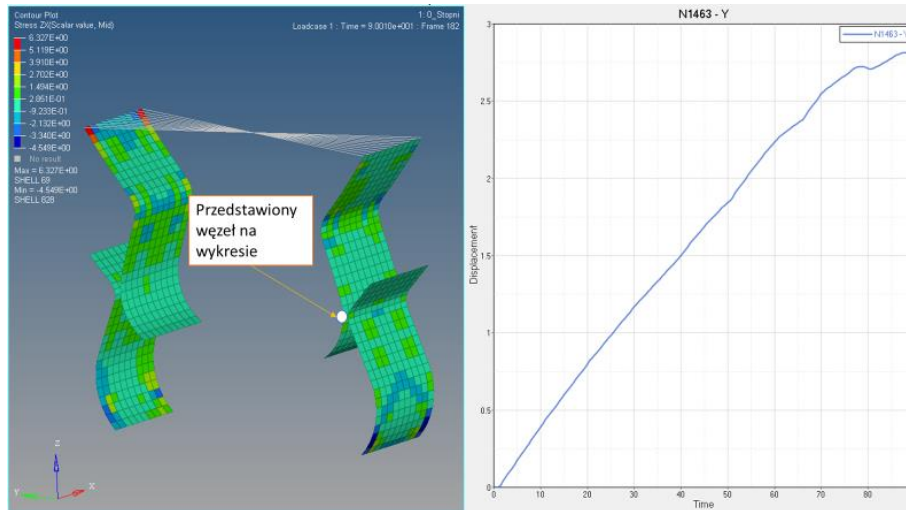


Figure 2 Przemieszczenia wybranego węzła zamka

OBLICZENIA ANALITYCZNE

Do obliczeń analitycznych wykorzystano hipotezę kinematyczną Love'a-Kirchhoffa oraz teorię poprzecznego ścinania. Obliczono przemieszczenie przy określonej sile a następnie porównano z wynikami eksperymentalnymi oraz analizą MES.

Założono, iż analizie poddano belkę kompozytowa wykonaną z laminatu symetrycznego (przypadek gdy macierz sztywności sprzężeń \mathbf{B} jest równy 0)

Równanie wykorzystująca hipotezę Love'a-Kirchhoffa opisującą moment zginający :

$$M_{11}(x) = -D_{11} \frac{d^2 w}{dx^2}$$

Gdzie D_{11} - macierz sztywności opisana wzorem:

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)} (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

k - indeks numeru warstwy

$\bar{Q}_{ij}^{(k)}$ -sztywność zredukowana do płaszczyzny warstwy indywidualnej laminatu k -tej warstwy w układzie globalnym
 z - grubość warstwy

wykorzystano do obliczenia maksymalnego ugięcia jak również teorie poprzecznego ścinania I rzędu opisana równaniem

$$M_{11}(x) = D_{11} \frac{d\psi_1}{dx}$$

Gdzie ψ_1 kąt ugięcia belki

PODSUMOWANIE

Wykorzystując komercyjny pakiet HyperMesh wykonano szereg analiz oraz porównano je z wynikami analitycznymi oraz testem laboratoryjnym. Rozbieżność pomiędzy obliczeniami a symulacją była na poziomie od kilku do kilkunastu procent w zależności od przyjętych warunków brzegowych. Zagadnienie dużych odkształceń struktur kompozytowych, zwłaszcza w procesach współpracy między poszczególnymi elementami kompozytowymi nie można traktować jako standardowa analiza i wymagana jest weryfikacja laboratoryjna określonych konstrukcji.

LITERATURA.

1. T. Sadowski, P. Golewski, The influence of geometrical parameters in socket - pin connection on the value of opening force , Archives of metallurgy and materials 2015, Pages 2743-2750
2. J. Gajewski, P. Golewski, T. Sadowski, *Geometry optimization of a thin-walled element for an air structure using hybrid system integrating artificial neural network and finite element method*, Composite Structures 2017, Pages 121–127.
3. F. Jiang, A. Deo, W. Yu *A composite beam theory for modeling nonlinear shear behavior* Engineering Structures 2018, Pages 73-90
4. J. Zhu, J. Wang, A. Ni, W. Guo, X. Li, Y. Wu *A multi-parameter model for stiffness prediction of composite laminates with out-of-plane ply waviness* ,Composites Structures 2018, Pages 327-337
5. M. Hajikazemi, W. Van Paepegem *A variational model for free-edge interlaminar stress analysis in general symmetric and thin-ply composite laminates*, Composite Structures 2018, Pages 443-451
6. P. Boisse, J. Colmars, N. Hamila, N. Naouar, Q. Steer *Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations*, Composites Part B 2018, Pages 234-249
7. I.B. Badrieva, M.V. Makarov, V.N. Paimushin *Mathematical Simulation of Nonlinear Problem of Three-Point Composite Sample Bending Test*, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016,
8. G. Rakowski, Z. Kacprzyk, *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 2016
9. A. Muc, P. Kedziora, M. Barski *Konstrukcje i materiały kompozytowe, problemy i zadania – część I*, Politechnika Krakowska, Kraków 2011
10. S. Ochelski, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004
11. HyperWorks HTML Documentation