

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Nieliniowa statyczna analiza kompozytowej belki przekładkowej z wypełnieniem kratownicowym w próbie trzypunktowego zginania

Mirosław Wesolowski¹, Mariusz Ruchwa¹, Sandris Rucevskis²

¹Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Koszalińska

²Institute of Materials and Structures, Riga Technical University, Latvia

email: miroslaw.wesolowski@tu.koszalin.pl, mariusz.ruchwa@tu.koszalin.pl, sandris.rucevskis@rtu.lv

STRESZCZENIE: Celem pracy jest statyczna analiza przekładkowej belki kompozytowej z wypełnieniem w postaci kratownicy przestrzennej. Przyjęto obciążenie belki wg schematu trzypunktowego zginania. Założono przeprowadzenie badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych MES. Do celów analizy MES opracowano szczegółowy model przestrzenny belkę rzeczywistą. Rozważana belka zbudowana jest z dwóch głównych elementów macierzystych, tj. z okładzin zewnętrznych w postaci cienkich taśm wykonanych z włókna węglowego w osnowie żywicy epoksydowej oraz warstwy wypełnienia (rdzenia) w postaci kratownicy przestrzennej wykonanej z materiału izotropowego (aluminium) lub z materiału polimerowego z domieszką krótkich włókien węglowych (CF-PA). Strukturę rdzenia (kratownicy) wytworzono poprzez wycinanie nożem wodnym oraz klejenie termoutwardzalne (dla aluminium) oraz metodą przyrostową (dla CA-PA). Elementy macierzyste połączono lokalnie aplikowaną warstwą adhezyjną tworząc przekładkową strukturę kompozytową.

SŁOWA KLUCZOWE: kompozyt przekładkowy, statyka, wypełnienie kratownicowe, technika przyrostowa

1. Wstęp

Kompozytowe struktury przekładkowe z wypełnieniem kratownicowym (typu sandwich) są wytwarzane w postaci płyt, belek, oraz powłok cylindrycznych. Kompozyty te zbudowane są głównie z dwóch materiałów macierzystych, tj. okładzin zewnętrznych w postaci cienkich płyt lub taśm oraz wypełnienia wewnętrznego o geometrii przestrzennej kratownicy. Struktury te mogą być traktowane jako elementy konstrukcyjne ze względu na ich znakomite wskaźniki sztywności i wytrzymałości w stosunku do masy. Ponadto, ich komórkowa budowa poprawia możliwości wentylacyjne oraz umożliwia prowadzenia instalacji pomiędzy poszczególnymi komórkami całej struktury. Powoduje to, że oprócz funkcji nośnych, struktury te stanowią również elementy funkcjonalne.

Zalety struktur przekładkowych przyczyniły się do zintensyfikowania badań naukowych w zakresie analiz statycznych [1-5]. Jako, że struktury te stanowią kompozyt, ich właściwości mechaniczne przyjmują różnorodne cechy w zależności od schematu obciążenia. Pociąga to za sobą dodatkowe trudności w procesie modelowania takich konstrukcji ze względu na bardzo szeroki zakres materiałów stosowanych do ich budowy oraz połączeń między nimi. Różnorodność ta przejawia się już w doborze okładzin zewnętrznych, które są wykonywane z trzech grup materiałów, tj. metali lub ich stopów (np. aluminium), laminatów warstwowych (np. laminaty włókniste), materiałów organicznych (np. sklejka). Kolejną kwestią jest materiał stosowany na budowę komórkowej warstwy wypełnienia. Ograniczając się do jednej geometrii tej warstwy, tj. do postaci przestrzennej kratownicy, materiałami stosowanymi do ich budowy, poza wyżej

wspomnianymi, są polimery do wytwarzania techniką przyrostową. Niestety zdecydowana większość opracowań naukowych pozostawia bez komentarza kwestie modelowania oraz nośności połączeń adhezyjnych w powyższych strukturach.

W bieżącej pracy założono przeprowadzenie analizy statycznej wg schematu trzypunktowego zginania. W procesie budowy modelu numerycznego uwzględniono połączenia klejone pomiędzy elementami macierzystymi belki poprzez wprowadzenie dodatkowego materiału adhezyjnego. Weryfikacja poprawności opracowanego modelu MES przeprowadzona została na podstawie porównania obliczeń numerycznych z przeprowadzonymi pomiarami laboratoryjnymi.

2. Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem pracy są przekładkowe belki kompozytowe. Belki te składają się z dwóch elementów macierzystych: (1) górnej i dolnej okładziny zewnętrznej wykonanej z jednokierunkowego laminatu) warstwowego wzmocnianego ciągłymi włóknami węglowymi (CFRP); (2) piramidalny rdzeń kratownicowy wykonany w dwóch wariantach: ze stopu aluminium PA6 (rys. 1a) oraz z polimeru wzmocnionego rozproszonymi włóknami węglowymi CF-PA (rys. 1b). Okładziny zewnętrzne wycięto z jednokierunkowej taśmy CRFP. Aluminiowy rdzeń kratownicy został złożony z oddzielnych części (podłużnych i poprzecznych), które wycięto z płyty aluminiowej PA6 za pomocą strumienia wody, po czym zespolono je termoutwardzalnym klejem epoksydowym (EA 9514), tworząc przestrzenny rdzeń kratownicy. Dla rdzenia z polimeru CF-PA, kratownica wytworzona została

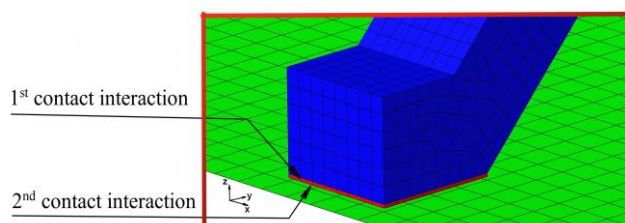
jako jednolita struktura przestrzenna. Do tego celu zastosowano technikę wytwarzania przyrostowego przy użyciu urządzenia OMNI 3D Lite. Elementy macierzyste belek zostały zespolone ze sobą klejem EA 9514 aplikowanym lokalnie w miejscach styku pomiędzy okładzinami a rdzeniem.



Rys. 1. Belka przekładkowa z wypełnieniem kratownicowym: a) aluminiowym, b) polimerowym CF-PA

3. Modelowanie numeryczne i symulacja

Opracowano model numeryczny belki przekładkowej w środowisku systemu obliczeniowego ABAQUS. W modelu uwzględniono elementy macierzyste belek – przestrzenną strukturę kratownicową (rdzeń) oraz kompozytowe okładziny zewnętrzne. Model wykonano jako trójwymiarowy, przy czym kratownica została odwzorowana jako konstrukcja bryłowa, zewnętrzne okładziny, jako powłoki, warstwy adhezyjne (klej) jako warstwy łączące w sobie cechy bryły i powłoki (kontynualne powłoki). Przyjęto model materiałowy izotropowy sprężysty dla rdzenia aluminiowego i anizotropowy nieliniowo-sprężysto-kruchy dla rdzenia z CF-PA. Dla okładzin zewnętrznych przyjęto model anizotropowy sprężysty z cechami laminatu włóknistego. Połączenie adhezyjne pomiędzy kratownicą a okładzinami zewnętrznymi zrealizowano użyciu kontynualnych elementów skończonych SC8R zakładając jednocześnie izotropowy sprężysty model materiałowy. Stałe materiałowe elementów macierzystych pozyskano z testów wytrzymałościowych (dla CF-PA), procedury techniki odwrotnej (dla okładzin zewnętrznych) [6] oraz z karty technologicznej producenta (dla EA 9514). Kompletny model belki przekładkowej powstał w wyniku powiązania ze sobą wszystkich elementów macierzystych belki za pomocą kontaktu powierzchniowego. W tym celu użyto dwóch definicji kontaktu typu "Tie" dla każdego połączenia klejonego (rys. 2). Ostatecznie opracowany model zawiera około 200 000 elementów skończonych i około 900 000 stopni swobody. Dla opracowanego modelu MES zdefiniowano warunki brzegowe wg schematu trypunktowego zginania z obciążeniem przyłożonym w środku rozpiętości belki a następnie uruchomiono analizę statyczną w zakresie umożliwiającym zlokalizowanie zniszczenia połączenia adhezyjnego.



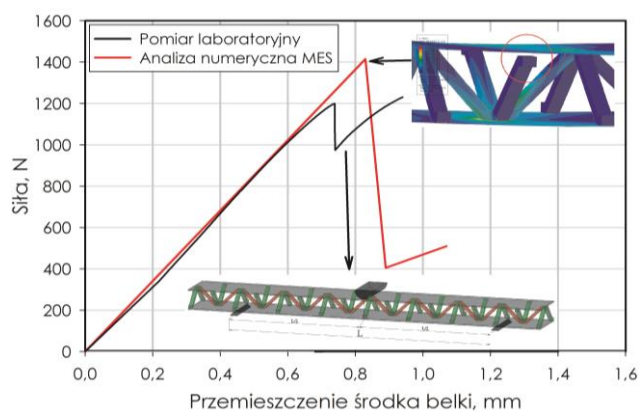
Rys. 2. Sposób modelowania połączenia adhezyjnego (elementy skończone koloru czerwonego)

4. Planowanie i warunki eksperymentu

Statyczną próbę zginania trypunktowego przeprowadzono przy zastosowaniu konwencjonalnej maszyny wytrzymałościowej INSPEKT 600 oraz optycznego systemu Aramis. Wykonano również testy rozciągania osiowego wg normy ASTM D638 w celu oszacowania stałych materiałowych dla polimeru CF-PA.

5. Wyniki symulacji i ich analiza

Uzyskane wyniki z pomiarów laboratoryjnych są zbieżne z wynikami analizy numerycznej. Z powodzeniem odwzorowano zjawisko zniszczenia połączenia klejonego (rys. 3). Jednakże, jak wskazuje rys. 3, zniszczenie to nastąpiło przy wyższej wartości naprężenia w stosunku do pomiaru laboratoryjnego. Rozbieżność ta może wynikać z błędów technologicznych lub z przyjętych wartości stałych materiałowych kleju.



Rys. 3. Porównanie wyników pomiarów laboratoryjnych z analizą numeryczną MES dla belki z rdzeniem aluminiowym

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie modelu numerycznego belki przekładkowej z uwzględnieniem warstwy adhezyjnej. Wykonany model numeryczny belki może służyć do prognozowania jej odpowiedzi statycznej. Zastosowanie kontynualnych elementów skończonych pozwoliło na znaczną redukcję ilości elementów po grubości warstwy adhezyjnej.

Literatura

- [1] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Li, J. Xu, *Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood*, Composite Structures Vol. 201, pp. 131-140, 2018.
- [2] S. Liu, Y. Li, N. Li, *A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures*, Materials and Design Vol. 137, pp. 235-244, 2018.
- [3] L.-J. Feng, J. Xiong, L.-H. Yang, G.-C. Yu, W. Yang, L.-Z. Wu, *Shear and bending performance of new type enhanced lattice truss structures*, International Journal of Mechanical Sciences Vol. 134, 2017, pp. 589-598.
- [4] G.-D. Xu, F. Yang, T. Zeng, S. Cheng, Z.-H. Wang, *Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams*, Composite Structures Vol. 138, pp. 342-351, 2016.
- [5] L. Dong, V. Deshpande, H. Wadley, *Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures*, International Journal of Solids and Structures Vol. 60-61, pp. 107-124, 2015.
- [6] M. Wesolowski, E. Barkanov, *Model errors influence on identified composite material properties*, Composite Structures, Vol. 94, pp. 2716-272, 2012.