

STRESZCZENIE

Niniejsza praca miała na celu analizę metod diagnostycznych do elementów wytwarzanych z kompozytów włóknistych wzmocnianych włóknem węglowym (z ang. *carbon fibre reinforced polymer*, CFRP) z imperfekcjami, w celu zastosowania tych materiałów w przemyśle. Analizowane elementy mają imperfekcje (niedoskonałości) rozumiane jako pustki, szczeliny pomiędzy wiązkami włókien, rozwarstwienia, otwory, itp. lub wtrącenia w postaci wbudowanych światłowodów z czujnikami światłowodowymi typu FBG (z ang. *fibre Bragg grating*). Takie niedoskonałości mogą być związane z metodą wytwarzania (np. pustki w strukturze wytwarzanej przyrostowo (z ang. *additive manufacturing*, AM)) lub celowo wprowadzonymi wtrąceniami (np. wbudowane światłowody) lub cechami geometrycznymi (np. wywiercone otwory) konstrukcji. Wszystkie te niedoskonałości powodują lokalną koncentrację naprężeń/odkształceń oraz zmiany właściwości mechanicznych i materiałowych oraz wpływają na procesy degradacji elementów.

Pierwsza część tej pracy miała na celu wyznaczenie termo-mechanicznych charakterystyk zachowania się próbek CFRP z wbudowanymi czujnikami FBG, wytworzonych ekologiczną metodą produkcji, druku 3D. Dodatkowo na podstawie wyników próby rozciągania oceniono wpływ wbudowanych czujników FBG na wytrzymałość mechaniczną materiału. W tej części znalazły się zarówno analizy numeryczne, jak i eksperymentalne. Drugą częścią było zbadanie wpływu dwóch otworów wywierconych w różnych konfiguracjach względem siebie na zachowanie mechaniczne elementów CFRP wytworzonych z tkanin plecionych. Ta część miała głównie charakter eksperymentalny, choć przeprowadzono także analizę numeryczną w celu sprawdzenia użyteczności modelu numerycznego. Ostatnia część, mająca charakter badań porównawczych, została poświęcona badaniu zastosowania algorytmów uczenia maszynowego (z ang. *machine learning*, ML) do analizy procesów degradacji elementów z CFRP wytworzonych z tkanin plecionych o różnym splocie i z dwoma oddziałującymi na siebie otworami.

Nowością w konstrukcjach AM z wbudowanymi czujnikami FBG jest sam proces wbudowywania oraz zastosowanie czujników do pomiarów odkształceń elementów poddawanych obciążeniom termicznym i mechanicznym. Symulację numeryczną przeprowadzono w oprogramowaniu ABAQUS do analiz metodą elementów skończonych (MES) w celu uzupełnienia licznych badań eksperymentalnych mających na celu weryfikację wyników obliczeń dla próbek poddawanych obciążeniu termicznemu. Wyniki prac numerycznych były dobrze zgodne z wynikami uzyskanymi z czujników FBG. Wbudowane czujniki FBG były w stanie dokładnie zidentyfikować odkształcenia termiczne w przypadku struktur kompozytowych wytwarzanych metodą addytywną. Dodatkowo próbie rozciągania poddano próbki poddane działaniu temperatur podwyższonych i ujemnych. Celem badań było określenie wpływu wbudowanych włókien optycznych na wytrzymałość mechaniczną materiału CFRP. Do pomiarów odkształceń w trakcie badania zastosowano także czujniki FBG. Uzyskane wyniki porównano z wartościami odkształceń wyznaczonymi przez maszynę rozciągającą, przy dobrej zgodności pomiędzy metodami. Tę metodę AM można zastosować do elementów produkcyjnych z wbudowanymi czujnikami FBG, również przy użyciu innego materiału wzmocniającego włókna. Dodatkowo czujniki FBG można stosować do pomiarów odkształceń zarówno podczas obciążeń termicznych, jak i mechanicznych.

Kompozyt włóknisty wykonany z tkanin plecionych to rodzaj materiału, którego właściwości są stabilne podczas użytkowania. Laminaty kompozytowe z otworami znalazły zastosowanie w różnych zastosowaniach przemysłowych, np. w płytach sterujących, płytach adapterowych i łatach naprawczych. Otwory te zmniejszają integralność strukturalną konstrukcji kompozytowych. W tkanym laminacie kompozytowym z dwoma oddziałującymi na siebie okrągłymi otworami, ich konfiguracja wpływa na wytrzymałość konstrukcji i współczynnik koncentracji naprężeń. Wiercenie jednego karbu na kierunku obciążenia poprawiło wytrzymałość mechaniczną włóknistych elementów kompozytowych. Zaobserwowano to również podczas analiz współczynnika koncentracji naprężeń z wykorzystaniem oprogramowania MES. Głównym celem analiz jest zbadanie, eksperymentalnie i numerycznie, interakcji pomiędzy dwoma otworami (ustawionymi w różnych konfiguracjach pomiędzy sobą), w laminacie kompozytowym podczas próby rozciągania. Lokalizacja obszaru, w którym zachodzi proces

degradacji (miejsce inicjacji uszkodzenia) zależy od wzajemnego położenia otworów. Dla każdej próbki określono charakterystyczną odległość i wielkość obszaru degradacji, dzięki integracji metody MES i cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation*, DIC). W celu prognozowania wytrzymałości na uszkodzenie dla każdej próbki, zastosowano podejście oparte na dwóch kryteriach: naprężenia punktowego (z ang. *point stress criterion*, PSC) oraz rozszerzone PSC (z ang. *extended-PSC*, EPSC). Inicjację i rozwój uszkodzenia powstałego w wyniku interakcji pomiędzy dwoma otworami badano za pomocą termografii w podczerwieni (z ang. *infrared thermography*, IRT). Ponadto wyniki IRT uzupełniono analizą fraktograficzną i szczegółowo omówiono proces degradacji (pękania) zachodzący w każdym rodzaju.

Kompozyty z otworami są szeroko stosowane w przemyśle, chociaż mają słabe właściwości wytrzymałościowe, a procesy ich projektowania są złożone. Do projektowania kompozytów z otworami wykorzystywanych jest wiele parametrów geometrycznych/materiałowych. W związku z powyższym do przewidywania czasu pracy konstrukcji niezbędne jest wydajne narzędzie obliczeniowe. Opracowano różne podejścia z wykorzystaniem ML, aby uzyskać model charakteryzujący się największą dokładnością, uwzględniając maksymalne naprężenia rozciągające w laminatach kompozytowych z dwoma oddziałującymi na siebie otworami. Omówiono także skuteczność poszczególnych metod numerycznych. Symulacje MES przeprowadzono za pomocą oprogramowania ABAQUS powiązanym z kodami napisanymi w języku Python w celu zapewnienia bogatej struktury danych (8960 przypadków). Przewidywania uzyskane metodami ML porównano z przewidywaniami uzyskanymi za pomocą symulacji MES. Do przewidywania rozkładu naprężeń rozciągających występujących w pobliżu otworów wykorzystano algorytm ewolucyjny (TPOT) i oraz metodę do automatyzacji uczenia maszynowego z wykorzystaniem sieci neuronowych (AutoKeras). Zastosowano metodę automatycznego przeszukiwania siatki, aby wybrać najbardziej efektywną metodę zdolną do przewidzenia docelowych wartości maksymalnego naprężenia dla różnych testów. Zaproponowany model zapewnił najdokładniejsze przewidywania spośród innych technik. Omówiono możliwość zastosowania tego algorytmu w innych materiałach kompozytowych.

Po rozdziale wprowadzającym i przeglądzie aktualnego stanu wiedzy (rozdziały 1-2) w rozdziałach 3-5 omawiam mój wkład w tę dziedzinę, na który składają się:

- określenie możliwości wbudowywania czujników FBG w próbki CFRP wytworzone techniką wytwarzania przyrostowego – FDM
- określenie metody diagnostyki próbek CFRP w oparciu o wbudowane czujniki FBG wraz z analizą wpływu wbudowanych światłowodów na wytrzymałość mechaniczną próbek
- opracowanie modelu numerycznego konstrukcji FRP z otworami pod obciążeniem
- zastosowanie modeli teoretycznych do przewidywania wytrzymałości kompozytów włóknistych o wzmocnieniu w postaci tkanin z otworami
- analiza procesów degradacji struktur FRP (AM z wbudowanymi czujnikami FBG i kompozytów włóknistych o wzmocnieniu w postaci tkanin z otworami) i określenie jego dominującego typu (pękanie osnowy, pękanie włókien wzmocnienia, itp.)
- opracowanie nowatorskiej metody przewidywania rozkładu maksymalnych naprężeń rozciągających w kompozytach z oddziałującymi otworami pod obciążeniem rozciągającym

Podsumowanie, wnioski i planowane prace zostały szczegółowo omówione w Rozdziale 6.

Wyniki przeprowadzonych analiz można rozszerzyć także na inne rodzaje wzmocnień włóknistych stosowanych w elementach FRP.