

Streszczenie pracy w języku polskim

Kompozyty są szeroko stosowane w przemyśle lotniczym oraz innych zastosowaniach wymagających wysokiej wydajności, głównie ze względu na ich niską masę i doskonałe właściwości mechaniczne. Obecnie klejenie strukturalne stało się preferowaną alternatywą dla tradycyjnych połączeń nitowanych w konstrukcjach kompozytowych. Jednak złożoność procesów wytwórczych, w połączeniu ze zmiennymi warunkami eksploatacyjnymi, często prowadzi do powstawania wewnętrznych defektów, takich jak rozwarstwienia czy pęcherze powietrza, które istotnie zwiększają ryzyko uszkodzenia struktury. W efekcie, pomimo zalet w zakresie ciągłości przenoszenia obciążeń oraz zachowania integralności włókien, połączenia klejone nadal napotykają na trudności z akceptacją w porównaniu z konwencjonalnymi metodami mechanicznymi. Obecnie w celu inspekcji struktur kompozytowych i oceny ich pozostałego czasu eksploatacji stosuje się różne metody nieniszczące (z ang. Non-destructive Testing - NDT) oraz techniki monitorowania stanu technicznego (z ang. Structural Health Monitoring - SHM), dążąc do zwiększenia dokładności wykrywania i wydłużenia czasu użytkowania.

Jednak ze względu na wysoką czułość klasycznych metod fal sprężystych na mikrostrukturę rzeczywistej strefy klejenia oraz zakłócenia szumowe, skuteczne wykrywanie uszkodzeń pozostaje dużym wyzwaniem. W ostatnich latach pojawienie się metod hybrydowych przyczyniło się do przezwyciężenia tych ograniczeń. Modele hybrydowe oparte na technologii cyfrowych bliźniaków integrują zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów z głębokim uczeniem, eliminując problemy związane z ekstrakcją cech uszkodzeń oraz umożliwiając prognozowanie pozostałego czasu eksploatacji (z ang. Remaining Useful Life - RUL) z użyciem sieci neuronowych.

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie modelu diagnostyki uszkodzeń oraz predykcji pozostałego czasu eksploatacji dla materiałów kompozytowych łączonych klejowo. W pracy wykazano także możliwość zastosowania fal prowadzonych do pomiarów eksperymentalnych i oceny długości pęknięcia w obszarze klejenia. W odróżnieniu od pojedynczych architektur sieci neuronowych, niniejsze badania przyjmują podejście współdziałających modeli wielomodelowych w celu rozwiązania problemów klasycznych metod predykcji RUL, takich jak jednolicebny wynik predykcji czy konieczność użycia sieci Bayesa do kwantyfikacji niepewności. Zastosowanie zespołowego modelu mechaniki pęknięcia pozwala na realistyczne odwzorowanie nieliniowych właściwości propagacji pęknięć, niezależnie od ograniczeń związanych z niewielką ilością danych treningowych lub krótkim horyzontem predykcji.

Ponadto wprowadzono przybliżoną metodę bayesowską opartą na metodzie „dropout” i próbkowaniu Monte Carlo, która eliminuje konieczność przypisywania rozkładów prawdopodobieństwa do ukrytych warstw sieci neuronowej, tym samym zmniejszając złożoność modelu. Wyniki predykcji przedstawiane są w postaci przedziałów ufności, co zwiększa wiarygodność prognoz. W porównaniu do tradycyjnych sieci bayesowskich, wielokrotne testy eksperymentalne wykazały poprawę dokładności predykcji o 16,43%. Dodatkowo zaproponowano metodę augmentacji danych i segmentacji w celu redukcji błędów predykcyjnych we wczesnym etapie cyklu życia. Wyniki eksperymentalne wskazują, że wprowadzone korekty danych pozwalają skutecznie ograniczyć początkowe odchylenia predykcyjne.

W pracy przedstawiono wyniki wszystkich opracowanych modeli oraz porównanie z obecnie stosowanymi podejściami referencyjnymi. Integracja technologii cyfrowych bliźniaków z podejściem wielomodelowym pozwoliła na uniknięcie konieczności stosowania modeli bayesowskich oraz pozwoliła rozwiązać problem jednoliczbowych wyników z klasycznych predykcji RUL. Prezentowane badania dostarczają również wsparcia technicznego dla szerszego zastosowania materiałów kompozytowych łączonych klejowo w różnych gałęziach przemysłu.