Gliwice, 15 września 2026 r.

mgr inż. Marcin Knutelski

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Kompozytowe elementy pomiarowe ze zintegrowanymi SHM wytwarzane w procesach ciągłych

Rozprawa dotyczy możliwości wytwarzania prętów polimerowych zbrojonych włóknami szklanymi (GFRP), które oprócz przenoszenia obciążeń pełnią funkcję rozproszonych czujników odkształceń. Funkcję pomiarową uzyskano przez umieszczenie światłowodu w osi pręta już podczas formowania kompozytu. Spośród rozpatrywanych metod integracji wybrano pultruzję, ponieważ pozwala ona prowadzić proces w sposób ciągły. Głównym celem pracy było przygotowanie powtarzalnej technologii wytwarzania takich elementów oraz sprawdzenie, czy światłowód zachowa zdolność pomiarową bez istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych pręta. Ważnym zagadnieniem było również przekazywanie odkształceń z kompozytu do włókna optycznego.

Przegląd literatury objął podstawy światłowodowego pomiaru odkształceń z uwzględnieniem rozpraszania Rayleigha, oraz zagadnienia związane z integracją światłowodu podczas pultruzji. Omówiono sposoby jego wprowadzania, wpływ położenia i oddziaływań cieplno-mechanicznych na pomiar, a także mechanizm przekazywania odkształceń w układzie światłowód–osnowa, opisany na podstawie teorii adhezji i trójfazowego modelu opóźnienia ścinania.

Pierwszym etapem prac był dobór światłowodu do integracji z prętem GFRP. Przy jego wyborze uwzględniono parametry pomiarowe oraz warunki cieplne i mechaniczne procesu pultruzji. Określono sposób przygotowania i łączenia światłowodu, a ciągłość toru optycznego kontrolowano na kolejnych etapach. Badania reologiczne i różnicowa kalorymetria skaningowa dostarczyły informacji o zmianach lepkości mieszanki żywicznej i przebiegu jej utwardzania, które wykorzystano przy doborze parametrów procesu. Linię technologiczną wyposażono w niezależny tor podawania światłowodu, układ regulacji naciągu oraz prowadzenie utrzymujące go w osi wiązki rovingów szklanych. Przygotowano również sposób odsłaniania zakończeń zatopionych w utwardzonej osnowie.

Położenie światłowodu wewnątrz gotowych prętów sprawdzono za pomocą mikroskopii optycznej, skaningowej mikroskopii elektronowej i tomografii komputerowej. W analizowanym tomograficznie fragmencie światłowód znajdował się blisko osi pręta. Włókna szklane zachowały dominującą orientację zgodną z kierunkiem pultruzji. Przy granicy światłowód–osnowa występowały miejscowe szczeliny i nieregularności, jednak część z nich mogła powstać podczas przygotowywania próbek do obserwacji.

Wpływ światłowodu na właściwości prętów oceniono w próbach rozciągania, trójpunktowego zginania, krótkiej belki oraz udarności. Wyniki zależały od rodzaju obciążenia. W próbach zginania i udarności wyższe wartości uzyskano dla prętów ze światłowodem. Podczas rozciągania oraz w próbie krótkiej belki lepsze wyniki osiągnęły pręty referencyjne. Różnice między seriami były niewielkie i nie wskazywały, aby umieszczenie światłowodu powodowało systematyczne osłabienie pręta. Największą różnicę stwierdzono dla modułu sprężystości przy rozciąganiu. Obecność światłowodu

wpłynęła zatem na sztywność osiową, ale nie spowodowała ogólnego pogorszenia badanych właściwości mechanicznych.

Kolejną część pracy stanowiły badania belek betonowych w układzie czteropunktowego zginania. Wszystkie elementy miały zasadnicze zbrojenie stalowe. W belkach serii badawczej umieszczono dodatkowo do trzech prętów GFRP ze światłowodem, przy czym znajdowały się one w różnych miejscach wewnątrz przekroju. Każdy pręt działał jako oddzielny czujnik rozproszony. Pomiar prowadzono metodą optycznej reflektometrii w dziedzinie częstotliwości, wykorzystującą rozproszenie wsteczne Rayleigha. W odróżnieniu od czujników punktowych metoda ta pozwoliła wyznaczyć profil odkształceń wzdłuż całego badanego odcinka pręta.

Profile rejestrowano przy kolejnych poziomach obciążenia. Wraz ze wzrostem siły rosły odkształcenia w strefie zginania. Na długości prętów pojawiały się również lokalne maksima i gwałtowne zmiany wartości. Ich położenie porównano z rysami widocznymi na powierzchni betonu. Zmiany w profilach występowały w obszarach, w których obserwowano powstawanie i dalszy rozwój zarysowania. Zastosowanie kilku prętów w jednej belce pozwoliło porównać odpowiedź czujników umieszczonych w różnych położeniach oraz śledzić redystrybucję odkształceń podczas obciążania.

Do analizy danych światłowodowych przygotowano autorski program. Służył on do synchronizacji wyników optycznych z przebiegiem obciążenia, wyboru analizowanych stanów oraz porównywania przestrzennych profili odkształceń.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że możliwe jest ciągłe wytwarzanie prętów GFRP ze światłowodem prowadzonym w ich osi. Pręty zachowały właściwości mechaniczne zbliżone do elementów referencyjnych, a umieszczony w nich światłowód rejestrował rozkład odkształceń w obciążanych belkach betonowych. Zarejestrowane zmiany pozwoliły wskazać obszary związane z powstawaniem i rozwojem rys.