

Politechnika Śląska

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marcin Knutelski

Kompozytowe elementy pomiarowe ze zintegrowanym SHM wytwarzane w procesach ciągłych

Promotor:
dr hab. inż. Zbigniew Brytan, prof. PŚ

Promotor pomocniczy:
dr inż. Łukasz Krzemiński

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych – RMT1
Wydział Mechaniczny Technologiczny

Gliwice, 2026 r.

Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi,
dr. hab. inż. Zbigniewowi Brytanowi, prof. PŚ,
za opiekę naukową i życzliwość.
Dziękuję również prof. dr. hab. inż. Januszowi Mazurkiewiczowi
za wsparcie administracyjne oraz zaangażowanie.
Promotorowi pomocniczemu, dr. inż. Łukaszowi Krzemińskiemu,
dziękuję za pomoc w badaniach tomograficznych.

Dziękuję dr. inż. Wojciechowi Pakiele
za wsparcie podczas badań mechanicznych i badań SEM.
Dr. hab. inż. Erwinowi Maciakowi, prof. PŚ,
oraz dr. hab. inż. Kamilowi Barczakowi
z Katedry Optoelektroniki dziękuję za wsparcie badawcze.
Dr. inż. Adamowi Szatkowskiemu dziękuję
za umożliwienie mi rozpoczęcia doktoratu,
a dr. inż. Andrzejowi Czulakowi - za inspirację
do podjęcia tematyki kompozytów oraz współtworzenie koncepcji pracy.

Firmie Reinbar Sp. z o.o. dziękuję za stworzenie warunków
do realizacji doktoratu wdrożeniowego,
jej partnerom biznesowym za okazane wsparcie,
a firmie Interlab za udostępnienie systemu LUNA ODiSI 7100
do badań światłowodowych.

Dziękuję za wsparcie finansowe otrzymane
w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”,
które umożliwiło realizację badań przedstawionych w rozprawie.

Szczególne podziękowania składam mojej żonie Magdzie,
za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie
w czasie przygotowywania rozprawy.

WYKAZ SKRÓTÓW STOSOWANYCH W PRACY

AFRP	kompozyt polimerowy wzmacniany włóknami aramidowymi (ang. *Aramid Fiber-Reinforced Polymer*)
APC	złącze światłowodowe o czole polerowanym pod kątem (ang. *Angled Physical Contact*)
BMC	tłoczywo objętościowe do formowania (ang. *Bulk Molding Compound*)
BPA	bisfenol A (ang. *bisphenol A*)
C-OTDR	koherentna optyczna reflektometria w dziedzinie czasu (ang. *Coherent Optical Time-Domain Reflectometry*)
CAGR	skumulowany roczny wskaźnik wzrostu (ang. *Compound Annual Growth Rate*)
CF	włókno węglowe (ang. *carbon fiber*)
CFRP	kompozyt polimerowy wzmacniany włóknami węglowymi (ang. *Carbon Fiber-Reinforced Polymer*)
CMC	kompozyt o osnowie ceramicznej (ang. *Ceramic Matrix Composite*)
CTE	współczynnik rozszerzalności cieplnej (ang. *Coefficient of Thermal Expansion*)
DAS	rozłożone pomiary akustyczne (ang. *Distributed Acoustic Sensing*)
DFOS	rozłożone pomiary światłowodowe (ang. *Distributed Fiber Optic Sensing*)
DGEBA	diglicydylowy eter bisfenolu A (ang. *diglycidyl ether of bisphenol A*)
DMA	dynamiczna analiza mechaniczna (ang. *Dynamic Mechanical Analysis*)
DSC	różnicowa kalorymetria skaningowa (ang. *Differential Scanning Calorimetry*)
ECH	epichlorohydryna (ang. *epichlorohydrin*)
ECPE	włókna polietylenowe o wydłużonych łańcuchach (ang. *extended-chain polyethylene fibers*)
EDS	mikroanaliza rentgenowska z dyspersją energii (ang. *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*)
EEW	równoważnik epoksydowy (ang. *epoxy equivalent weight*)
FBG	światłowodowa siatka Bragga (ang. *Fiber Bragg Grating*)
FFP3	maska filtrująca klasy FFP3 (ang. *Filtering Face Piece Class 3*)
FOS	czujniki światłowodowe (ang. *Fiber Optic Sensors*)
FRP	kompozyt polimerowy wzmacniany włóknami (ang. *Fiber-Reinforced Polymer*)
GFRP	kompozyt polimerowy wzmacniany włóknami szklanymi (ang. *Glass Fiber-Reinforced Polymer*)
HD	High-Definition
ILSS	wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (ang. *Interlaminar Shear Strength*)
IPN	przenikająca się sieć polimerowa (ang. *Interpenetrating Polymer Network*)
LP	mod liniowo spolaryzowany (ang. *linearly polarized*)
MES	metoda elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*)
MFD	średnica pola modowego (ang. *Mode Field Diameter*)
MMC	kompozyt o osnowie metalowej (ang. *Metal Matrix Composite*)
MTHPA	bezwodnik metylotetrahydroftalowy (ang. *methyltetrahydrophthalic anhydride*)
NDT	badania nieniszczące (ang. *Non-Destructive Testing*)
OBR	optyczna reflektometria rozproszenia wstecznego (ang. *Optical Backscatter Reflectometry*)
OFDR	optyczna reflektometria w dziedzinie częstotliwości (ang. *Optical Frequency Domain Reflectometry*)
OVL	wskaźnik pokrycia rozkładów (ang. *overlapping coefficient*)
PAN	poliakrylonitryl (ang. *polyacrylonitrile*)
PBT	poli(tereftalan butylenu) (ang. *polybutylene terephthalate*)
PC	poliwęglan (ang. *polycarbonate*)
PET	poli(tereftalan etylenu) (ang. *polyethylene terephthalate*)
PMC	kompozyt o osnowie polimerowej (ang. *Polymer Matrix Composite*)
PMIA	poli(m-fenylenoizoftalamid), meta-aramid (ang. *poly(m-phenylene isophthalamide)*)
PPGDGE	diglicydylowy eter poli(propylenoglikolu) (ang. *poly(propylene glycol) diglycidyl ether*)
PPTA	poli(p-fenylenotereftalamid), para-aramid (ang. *poly(p-phenylene terephthalamide)*)
RFI	infuzja z użyciem folii (ang. *Resin Film Infusion*)
RIM	reaktywne formowanie wtryskowe (ang. *Reaction Injection Molding*)
RTM	formowanie metodą transferu żywicy (ang. *Resin Transfer Molding*)
SBS	metoda krótkiej belki (ang. *Short-Beam Shear*)
SC/APC	złącze światłowodowe typu SC/APC (ang. *SC/APC Fibre-Optic Connector*)
SE2	detektor elektronów wtórnych typu 2 (ang. *Secondary Electron Detector 2*)

SEM	skaningowa mikroskopia elektronowa (ang. *Scanning Electron Microscopy*)
SHM	monitorowanie stanu konstrukcji (ang. *Structural Health Monitoring*)
SM	światłowód jednomodowy (ang. *Single-Mode*)
THPA	bezwodnik tetrahydroftalowy (ang. *tetrahydrophthalic anhydride*)
UHMWPE	polietylen o ultrawysokiej masie cząsteczkowej (ang. *ultra-high-molecular-weight polyethylene*)
UV	promieniowanie ultrafioletowe (ang. *ultraviolet*)
UVA	promieniowanie ultrafioletowe typu A (ang. *Ultraviolet A*)
VARTM	formowanie metodą transferu żywicy wspomagane próżniowo (ang. *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding*)

Spis treści

Wykaz oznaczeń

1 Wstęp 8

1.1 Wstęp i motywacja podjęcia tematyki badawczej 8

1.2 Przedmiot, cel, hipotezy badawcze i zakres rozprawy 16

2 Analiza literatury przedmiotu 20

2.1 Podstawy światłowodowego pomiaru odkształceń 20

2.1.1 Budowa światłowodu pomiarowego 20

2.1.2 Propagacja światła i straty transmisyjne 25

2.1.3 Pomiar wykorzystujący rozpraszanie Rayleigha 33

2.2 Integracja światłowodu w procesie pultruzji 48

2.2.1 Specyfika integracji w procesie ciągłym 50

2.2.2 Sposoby wprowadzania światłowodu 53

2.2.3 Wpływ położenia i przebiegu światłowodu na pomiar 60

2.2.4 Oddziaływania cieplne i chemiczne na osadzony sensor 62

2.3 Fizykochemiczne aspekty integracji włókien w kompozytach polimerowych 66

2.3.1 Teorie adhezji w układzie szkło–polimer 68

2.3.2 Trójfazowy model opóźnienia ścinania dla prętów kompozytowych GFRP zintegrowanych z czujnikiem światłowodowym 71

3 Matodyka Badawcza 74

3.1 Materiały i aparatura badawcza 74

3.1.1 Komponenty prętów GFRP 74

3.1.2 Aparatura badawcza 77

3.1.3 Linia technologiczna do pultruzji 79

3.1.4 Wytwarzanie płaskich próbek metodą infuzji próżniowej 84

3.2 Metody Badawcze Prętów GFRP i kompozycji żywicznej 86

3.2.1 Mikroskopia optyczna 86

3.2.2 Skaningowa mikroskopia elektronowa 86

3.2.3 Tomografia komputerowa 87

3.2.4 Badania Reologiczne Systemu Epoksydowego 88

3.2.5 Różnicowa kalorymetria skaningowa 88

3.2.6 Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu . . . 92
3.2.7 Wytrzymałość na zginanie . . . 95
3.2.8 Pozorna wytrzymałość na ścinanie . . . 98
3.2.9 Porównawcze badanie udarowe . . . 100
3.3 Przygotowanie i walidacja interfejsu pomiarowego . . . 102
3.3.1 Technologia odsłaniania światłowodu z osnowy GFRP . . . 102
3.3.2 Spawanie włókien i montaż pigtaili pomiarowych. . . . 103
3.3.3 Weryfikacja drożności i tłumienności toru optycznego (pomiar laserowy) . . . 105
3.3.4 Teoretyczna analiza transferu odkształceń do światłowodu pomiarowego . . . 105
3.4 Badania w układzie kompozyt-beton . . . 109
3.4.1 Projekt i przygotowanie betonowych bloków badawczych . . . 109
3.4.2 Metodyka testów wytrzymałościowych konstrukcji żelbetowej z monitoringiem SHM . . . 111
3.4.3 Opracowanie danych mechanicznych i światłowodowych . . . 115
3.4.4 Oprogramowanie do integracji i wizualizacji danych pomiarowych . . . 116

4 Wyniki badań . . . 123
4.1 Analiza strukturalna . . . 123
4.1.1 Mikroskopia optyczna . . . 123
4.1.2 Skaningowa mikroskopia elektronowa . . . 126
4.1.3 Tomografia komputerowa . . . 133
4.2 Analiza reologiczna osnowy . . . 139
4.2.1 Wyniki badań reologicznych systemu epoksydowego . . . 139
4.3 Analiza DSC . . . 141
4.3.1 Dynamiczne sieciowanie nieutwardzonej kompozycji żywicznej . . . 141
4.3.2 Pomiary izotermiczne . . . 145
4.3.3 Charakterystyka utwardzonych prętów kompozytowych . . . 146
4.4 Porównawcze wyniki badań mechanicznych prętów GFRP . . . 147
4.4.1 Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu . . . 147
4.4.2 Trójpunktowe zginanie . . . 152
4.4.3 Wyniki badań pozornej wytrzymałości na ścinanie . . . 155
4.4.4 Udarność . . . 159
4.5 Wyniki badań w układzie beton-kompozyt . . . 161
4.5.1 Porównanie odpowiedzi mechanicznej belek z czujnikami GFRP-OS i belek referencyjnych . . . 161
4.5.2 Rozkład odształceń w betonowych belkach . . . 164

5 Podsumowanie i wnioski . . . 179
5.1 Ocena realizacji celów naukowych . . . 180
5.2 Ocena realizacji celów technologicznych i wdrożeniowych . . . 183
5.3 Weryfikacja hipotez badawczych . . . 184

5.4 Realizacja zadań indywidualnego planu badawczego 185
5.5 Najważniejsze osiągnięcia i ograniczenia pracy 187
5.6 Wnioski końcowe 189
5.7 Kierunki dalszych badań 191

6 Bibliografia 193

1. WSTĘP

1.1. Wstęp i motywacja podjęcia tematyki badawczej

Bezpieczna eksploatacja konstrukcji inżynierskich wymaga wiarygodnej informacji o zmianach zachodzących w ich strukturze pod wpływem obciążeń roboczych, warunków środowiskowych oraz postępującego zużycia materiału. Okresowe kontrole dostarczają jedynie obrazu stanu obiektu w chwili wykonywania badania, przez co rozwój uszkodzeń pomiędzy kolejnymi inspekcjami może pozostać niezarejestrowany. Ograniczenie to stało się podstawą rozwoju systemów monitorowania stanu konstrukcji SHM (ang. *Structural Health Monitoring*), których zadaniem jest pozyskiwanie i analiza danych bezpośrednio podczas eksploatacji obiektu. Zintegrowane z konstrukcją czujniki umożliwiają obserwację jej odpowiedzi mechanicznej w czasie oraz identyfikację zmian mogących świadczyć o rozwoju uszkodzenia. System SHM nie zastępuje przy tym wiedzy inżynierskiej, lecz dostarcza danych pozwalających podejmować decyzje diagnostyczne na podstawie rzeczywistego zachowania monitorowanej struktury.

Wraz z opracowywaniem i rozwojem nowych rodzajów czujników i systemów SHM, dotychczasowe procedury weryfikacji stanu technicznego obiektów ulegają systematycznej redefinicji [1–5]. W nowoczesnym modelu utrzymania infrastruktury tradycyjne badania nieniszczące (NDT) są sukcesywnie zastępowane przez ciągłą diagnostykę uszkodzeń [6, 7]. Zmiana ta eliminuje ograniczenia wynikające z dyskretnego charakteru dotychczasowych procedur weryfikacyjnych [7–9]. Fundamentem tego procesu pozostaje trwałe zespolenie sieci sensorów z materiałem konstrukcyjnym, co umożliwia ciągłą akwizycję sygnałów obrazujących wpływ obciążeń eksploatacyjnych oraz warunków środowiskowych na strukturę. Dzięki zaawansowanemu przetwarzaniu tak pozyskanych danych możliwa staje się obiektywna ocena stanu technicznego obiektu, a w dalszej perspektywie precyzyjne prognozowanie czasu jego bezpiecznego użytkowania [10, 11].

Współczesne podejście do eksploatacji konstrukcji inżynierskich nakłada na zarządców konieczność jednoczesnej redukcji kosztów serwisowych oraz utrzymania ścisłych reżimów bezpieczeństwa technicznego [6, 12]. Obecnie ocena stanu istniejącej infrastruktury opiera się głównie na subiektywnych inspekcjach wizualnych. Metoda ta, ze względu na swą niedokładność oraz zależność od opinii eksperta, często nie pozwala na rzetelną kwantyfikację stanu technicznego, co w obliczu starzenia się infrastruktury lądowej staje się wyzwaniem o krytycznym znaczeniu [13]. Poleganie wyłącznie na tym sposobie sprawia, że ukryte wady często umykają uwadze aż do momentu wystąpienia defektów konstrukcji i awarii. W najgorszych przypadkach kończy się to tragicznie, doprowadzając do zawalenia się konstrukcji [7].Przykładem jest katastrofa budowlana wiaduktu Polcevera w Genui (Most Morandiego) w 2018 r., do której przyczynił się niedostateczny nadzór nad korozją cięgien. Zdarzenie to stało się impulsem do re-

wizji systemów utrzymania mostów w Europie [186] (patrz rysunek 1-1a). Również na gruncie krajowym nagła katastrofa wiaduktu w Koszalinie w 2021 r. pokazała, jak nieprzewidywalne w skutkach mogą być błędy w ocenie konstrukcji [187, 188] (patrz rysunek 1-1b). W obliczu tych zagrożeń, implementacja systemów SHM pozwala na przejście w stronę paradygmatu utrzymania opartego na rzeczywistym stanie technicznym [7, 13, 14]. Pozwala to na podejmowanie celowych działań naprawczych, zanim degradacja osiągnie stan krytyczny. Jest to niezbędne w diagnostyce starzejącej się infrastruktury betonowej, w której korozja zbrojenia i zmęczenie materiału mają charakter wewnętrzny i ukryty [15, 16]. Równie istotną rolę systemy te pełnią w przypadku nowoczesnych konstrukcji z kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami (FRP). Mechanizmy degradacji kompozytów FRP, takie jak delaminacja czy mikropęknięcia matrycy, rozwijają się wewnątrz objętości materiału, poza zasięgiem metod inspekcji wizualnej [6, 10, 17]. Rozproszone systemy SHM mogą eliminować ten problem poprzez ciągłą akwizycję danych z wbudowanych sensorów. Pozwalają na ilościową ocenę stanu technicznego struktury [12, 18]. Identyfikację uszkodzeń w ramach systemów SHM prowadzi się zgodnie z hierarchicznym modelem Ryttera [17, 19].



(a) *Katastrofa wiaduktu Polcevera w Genui w 2018 r. Fot. Luca Zennaro / PAP / EPA.*



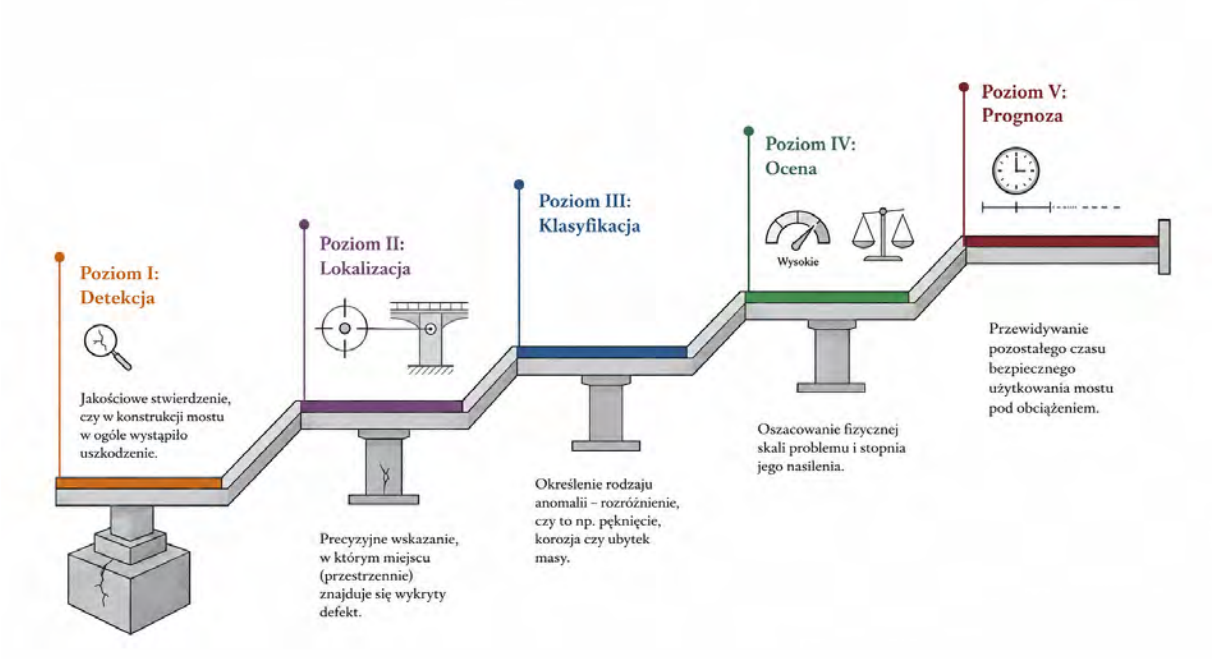
(b) *Katastrofa wiaduktu w Koszalinie w 2021 r. Fot. Aneta Wirwicka / Onet.*

Rys. 1-1. Przykłady awarii konstrukcji infrastrukturalnych.

Model ten porządkuje proces diagnostyczny według rosnącego stopnia złożoności pozyskiwanej informacji (patrz rysunek 1-2), gdzie każdy następny etap rozszerza zakres wnioskowania. Poziom pierwszy, służy jakościowemu potwierdzeniu obecności wady w strukturze. Kolejne etapy obejmują lokalizację (Poziom II) oraz klasyfikację (Poziom III) natury uszkodzenia. Pełna ocena stanu wymaga kwantyfikacji (Poziom IV), czyli określenia fizycznego rozmiaru i nasilenia zmian. Najwyższy stopień (Poziom V) odpowiada za prognozowanie pozostałego czasu bezawaryjnej pracy konstrukcji. Metoda ta umożliwia wyznaczenie prognozowanego czasu dalszej eksploatacji obiektu, bazując na modelach kinetyki degradacji oraz predykcji przyszłych obciążeń roboczych [7, 10].

Obecnie diagnostyka inżynierska traktuje monitoring stanu konstrukcji jako zagadnienie z zakresu statystycznego rozpoznawania wzorców. Zgodnie z modelem Farrara C.R. i Wordena K., proces ten opiera się na czterech zintegrowanych etapach [20]. Pierwszym jest ocena operacyjna, wyznaczająca cele badania i granice pracy obiektu. Kolejne kroki to pozyskiwanie danych senso-

rycznych oraz ekstrakcja cech wrażliwych na uszkodzenia. Ostatni etap stanowi modelowanie statystyczne, w którym implementacja algorytmów uczenia maszynowego pozwala na klasyfikację stanu technicznego systemu. W tym łańcuchu krytyczną operacją jest normalizacja danych. Umożliwia ona odfiltrowanie szumów pomiarowych oraz odróżnienie symptomów degradacji od tzw. wpływów maskujących, wywołanych zmianami temperatury, wilgotności czy obciążeń użytkowych [20, 21].



Rys. 1-2. *Hierarchiczny model oceny identyfikacji uszkodzeń konstrukcji w ramach systemu SHM zaproponowany przez Ryttera.*

Niedostateczna separacja czynników środowiskowych w procesie przetwarzania sygnału prowadzi do powstawania błędów decyzyjnych oraz fałszywych alarmów w systemach SHM [22, 23]. Odmienna specyfika systemów SHM wymaga zdefiniowania czytelnych kryteriów ich podziału. Umożliwia to właściwe zakwalifikowanie metodologii własnej. W tym zakresie, za główny wyróżnik przyjęto skalę przestrzenną pomiaru w podziale na metody globalne oraz lokalne [7].

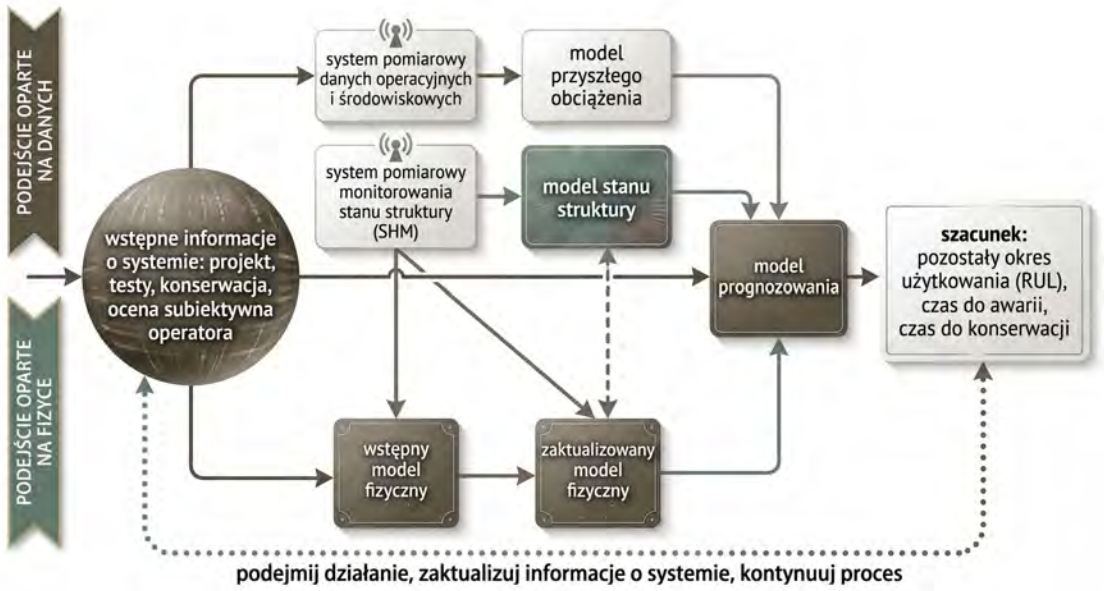
Podejście globalne pozwala ocenić ogólny stan całego obiektu [24]. Bazuje ono zazwyczaj na pomiarach odpowiedzi dynamicznej pod wpływem wzbudzeń operacyjnych [13, 25]. Zmiany parametrów modalnych, takich jak częstotliwości drgań własnych, pozwalają na identyfikację faktu wystąpienia uszkodzenia w dowolnym obszarze konstrukcji [7, 26]. Mimo wysokiej skuteczności w systemach wczesnego ostrzegania, metody te wykazują ograniczoną czułość na defekty o charakterze lokalnym [20, 25]. Z kolei podejście lokalne koncentruje się na precyzyjnej detekcji i uszkodzeń w wybranych, krytycznych komponentach struktury [24, 27]. W tym podejściu stosuje się m.in. emisję akustyczną oraz metody ultradźwiękowe, które pozwalają wykrywać zmiany zachodzące lokalnie [10, 28]. W nowoczesnej praktyce inżynierskiej dąży się do integracji obu paradygmatów: system globalny sygnalizuje anomalię, natomiast metody lokalne służą do szczegółowej diagnozy wskazanego obszaru [29, 30].

Kolejnym kryterium jest charakter interakcji systemu pomiarowego ze strukturą, co pozwala wyróżnić systemy pasywne [31, 32] oraz aktywne [33–36]. Od wyboru podejścia zależy, na jakie rodzaje uszkodzeń układ będzie reagował z największą czułością. W przypadku monitorowania pasywnego zapisuje się sygnały, które obiekt generuje w czasie swojej pracy. Czujniki, takie jak tensometry, czujniki temperatury czy emisji akustycznej, rejestrują odpowiedź konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne i środowiskowe, w tym obciążenia wywołane ruchem kołowym, oddziaływanie wiatru oraz zmiany temperatury [24, 37]. Takie podejście pozwala śledzić globalną kondycję budowli, jednak jego efektywność zależy od obecności wystarczająco silnych wymuszeń zewnętrznych. Z kolei systemy aktywne wprowadzają do materiału dodatkową energię za pomocą zintegrowanych aktuatorów [34]. W praktyce rolę źródła fal sondujących pełnią zwykle przetworniki piezoelektryczne [38, 39]. Badanie ich propagacji, odbić i rozproszenia pozwala zidentyfikować defekty wewnętrzne na bardzo wczesnym etapie, często niewykrywalnym dla metod pasywnych. W tym przypadku sieć pomiarowa nie tylko obserwuje, ale aktywnie weryfikuje ciągłość materiału [39].

Podział metod monitorowanie stanu konstrukcji (SHM) uwzględnia również naturę mierzonej odpowiedzi, wyróżniając podejście statyczne (odkształcenia lub naprężenia) [40] i dynamiczne (częstotliwości, postacie drgań lub tłumienie modalne) [24]. Wybór między nimi zależy od przewidywanego mechanizmu niszczenia oraz dostępnej infrastruktury pomiarowej. Diagnostyka statyczna obejmuje rejestrację przemieszczeń i odkształceń w warunkach obciążenia zmieniającego się na tyle wolno, że wpływ efektów dynamicznych można pominąć. Pomiary te uchodzą za wysoce wiarygodne i łatwe w interpretacji inżynierskiej, jednak często cechują się niską czułością na początkowe stadia degradacji. W wielu przypadkach lokalne uszkodzenie musi być znaczące, aby wywołać mierzalną zmianę w globalnym polu odkształceń [14, 30]. Podejście dynamiczne wykorzystuje analizę drgań, parametrów modalnych lub propagacji fal do śledzenia zmian w układzie [41–43]. Metody te pozwalają skuteczniej wykrywać pęknięcia czy delaminacje, zanim staną się one widoczne metodami obserwacji wizualnej. Skuteczność tych badań wymaga jednak odfiltrowania wpływów zewnętrznych. Wahania temperatury czy zmiany obciążeń wywołują fluktuacje sygnału, które łatwo pomylić z uszkodzeniem. Bez precyzyjnej korekty danych sygnał związany z uszkodzeniem może zostać zamaskowany przez zmienność eksploatacyjną [6].

Ta konieczność oddzielenia sygnału od zakłóceń narzuca wybór konkretnej ścieżki analitycznej. Podział zaproponowany przez Farrar i Lieven [44] (Rysunek fig. 1-3) opiera metody oceny uszkodzeń na danych (ang. *data-driven*) oraz modelach fizycznych (ang. *model-based*) [24]. Podejście *data-driven* skupia się na statystycznym rozpoznawaniu wzorców bezpośrednio w strumieniu pomiarowym [28]. Algorytmy uczenia maszynowego szukają anomalii, zestawiając bieżące odczyty z modelem referencyjnym [45]. Metody te są szybkie i wydajne obliczeniowo, ale zazwyczaj pozwalają jedynie na podstawową detekcję i lokalizację wady. Odrębną ścieżkę stanowi podejście modelowe, oparte między innymi na metodzie elementów skończonych (MES), w którym odpowiedź konstrukcji interpretuje się z wykorzystaniem modelu numerycznego kalibrowanego na podstawie danych pomiarowych [14]. Jego zastosowanie jest szczególnie uzasadnione, gdy

celem analizy jest ilościowe określenie położenia i rozmiaru uszkodzenia lub przewidywanie odpowiedzi konstrukcji w warunkach nieobjętych bezpośrednim pomiarem. Wymaga ono jednak przyjęcia założeń dotyczących właściwości materiałowych, warunków brzegowych oraz sposobu odwzorowania uszkodzeń. Rozwiązania hybrydowe, łączące modele fizyczne z analizą statystyczną, mogą stanowić rozwinięcie przyjętego podejścia [28, 46].



Rys. 1-3. Techniki oceny uszkodzeń oparte na danych i modelach w strategiach monitorowania stanu konstrukcji [44].

Ostatni z omawianych podziałów, przedstawiony m.in w normie SAE ARP6461A [175] [1], wyróżnia monitorowanie uszkodzeń (ang. *damage monitoring*) oraz monitorowanie eksploatacyjne (ang. *operation monitoring*). Pierwsze podejście koncentruje się na identyfikacji uszkodzeń strukturalnych, natomiast drugie umożliwia ocenę stopnia zużycia materiału na podstawie historii obciążeń i modeli zmęczeniowych. Skuteczność systemu zależy od właściwego doboru i rozmieszczenia czujników, metod akwizycji danych oraz algorytmów ich przetwarzania i interpretacji. Spójność tych elementów ma istotne znaczenie dla wiarygodnej identyfikacji uszkodzeń w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych [47].

Wdrażanie tych strategii w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych wymaga zastosowania systemów pomiarowych dostosowanych do specyfiki monitorowanych konstrukcji oraz oddziaływań środowiskowych. Konwencjonalne rozwiązania, wykorzystujące m.in. tensometry oporowe i akcelerometry, mogą wykazywać ograniczenia związane z koniecznością prowadzenia rozbudowanego okablowania, podatnością elektrycznych torów pomiarowych na zakłócenia elektromagnetyczne oraz wymaganiami dotyczącymi ich długotrwałej eksploatacji [48, 49].

Alternatywę stanowią światłowodowe systemy pomiarowe FOS (ang. *Fiber Optic Sensors*) [12]. Ich zastosowanie w systemach SHM wynika przede wszystkim z niewielkich wymiarów

[1] Klasyfikacja ta wywodzi się z zastosowań w przemyśle lotniczym.

i masy włókien optycznych, odporności światłowodowego toru pomiarowego na zakłócenia elektromagnetyczne oraz możliwości prowadzenia pomiarów na znacznych odległościach [48, 50]. Dielektryczny charakter włókien szklanych eliminuje ryzyko iskrzenia w samym elemencie światłowodowym, co ma szczególne znaczenie w środowiskach zagrożonych wybuchem. Dodatkową zaletą jest odporność chemiczna szkła krzemionkowego, choć trwałość całego czujnika zależy również od zastosowanych powłok ochronnych i warunków jego zabudowy.

Niewielka średnica światłowodu, wynosząca standardowo 125 µm bez powłoki ochronnej, umożliwia jego integrację z laminatami kompozytowymi już na etapie wytwarzania. Pozwala to na umieszczenie elementu pomiarowego wewnątrz struktury materiału, przy czym wpływ takiej integracji na właściwości mechaniczne kompozytu zależy m.in. od orientacji światłowodu, sposobu jego prowadzenia oraz parametrów procesu technologicznego [51].

W sensoryce światłowodowej stosowanej w systemach SHM wyróżnia się czujniki punktowe oraz układy dyskretnie rozmieszczonych czujników wykorzystujących światłowodowe siatki Bragga (ang. *Fiber Bragg Gratings*) [52–54]. Odrębną grupę tworzą systemy w pełni rozproszone DFOS (ang. *Distributed Fiber Optic Sensing*), do których zalicza się m.in. technologię akustyczną DAS (ang. *Distributed Acoustic Sensing*). Różnica między nimi polega na sposobie zagospodarowania potencjału włókna. Podczas gdy siatki FBG umożliwiają szybki pomiar w ściśle wybranych punktach, systemy rozproszone przekształcają cały światłowód w ciągły sensor. Pozwala to na monitorowanie obiektu na całej jego długości, eliminując ryzyko pominięcia uszkodzeń występujących między czujnikami punktowymi.

Fizycznie siatka Bragga to odcinek światłowodu z okresowo zmienionym współczynnikiem załamania rdzenia [50]. Taka struktura odbija tylko konkretną długość fali, działając jak selektywne lustro. Gdy konstrukcja pracuje, geometria siatki ulega zmianie, co natychmiast widać jako przesunięcie widma odbitego [55, 56]. Ten mechanizm pozwala z dużą precyzją śledzić lokalne odkształcenia materiału.

W praktyce czujniki FBG znajdują zastosowanie przede wszystkim w układach pomiarowych obejmujących wiele dyskretnie rozmieszczonych punktów. Na jednym włóknie można umieścić wiele siatek Bragga, co pozwala ograniczyć rozbudowę okablowania pomiarowego. Cechą tej technologii jest kodowanie informacji pomiarowej w długości fali światła odbitego, a nie w jego natężeniu. Dzięki temu wyznaczana długość fali Bragga jest w znacznie mniejszym stopniu zależna od wahań mocy źródła światła oraz strat optycznych występujących na złączach, o ile zachowany zostaje odpowiedni stosunek sygnału do szumu. Stanowi to istotną zaletę w warunkach eksploatacyjnych.

Technologia wykazuje również ograniczenia, z których najpoważniejszą jest czułość krzyżowa. Siatka nie odróżnia, czy zmiana jej parametrów wynika z naprężeń mechanicznych, czy z temperatury [57]. Wymusza to stosowanie dodatkowych czujników służących wyłącznie do kompensacji termicznej. Największym ryzykiem pozostaje jednak punktowość pomiaru. System rejestruje dane tylko tam, gdzie fizycznie znajduje się siatka. Jeśli defekt pojawi się pomiędzy sensorami, uszkodzenie może pozostać niewykryte. Taka punktowa luka w pokryciu pomiarowym bywa krytyczna przy monitorowaniu dużych obiektów, gdzie trudno przewidzieć

dokładną lokalizację przyszłego pęknięcia.

Alternatywę dla pomiarów punktowych stanowią rozproszone systemy światłowodowe DFOS, umożliwiające rejestrację zmian mierzonych wielkości fizycznych wzdłuż włókna optycznego. W odróżnieniu od konwencjonalnych czujników punktowych pozwalają one wyznaczać przestrzenny rozkład odkształceń, a także identyfikować ich lokalne koncentracje, występujące m.in. w obszarach powstawania i rozwoju zarysowań elementów betonowych. Przykładem zastosowania jest rejestracja profili odkształceń podczas kolejnych etapów obciążania konstrukcji, umożliwiająca analizę zjawisk związanych ze skurczem betonu oraz usztywnieniem przy rozciąganiu (*tension stiffening*) w elementach żelbetowych [58].

Zasada działania systemów DFOS wykorzystuje zjawiska rozpraszania światła zachodzące wewnątrz włókna optycznego. Wyróżnia się rozpraszanie Rayleigha [59], Ramana [60] oraz Brillouina [61], różniące się mechanizmem fizycznym i możliwościami pomiarowymi. Rozpraszanie Rayleigha ma charakter sprężysty, natomiast rozpraszanie Ramana i Brillouina wiąże się z wymianą energii między światłem a ośrodkiem. Wykorzystanie tych zjawisk, w połączeniu z odpowiednimi technikami interrogacji, pozwala traktować światłowód jako rozproszony element pomiarowy.

Dobór technologii pomiarowej zależy przede wszystkim od rodzaju monitorowanej wielkości fizycznej, wymaganej rozdzielczości przestrzennej oraz długości odcinka pomiarowego. Systemy wykorzystujące rozpraszanie Ramana stosuje się głównie do wyznaczania rozkładu temperatury. Techniki oparte na rozpraszaniu Brillouina umożliwiają natomiast pomiary temperatury i odkształceń, również na odcinkach o długości wielu kilometrów [62]. Znajdują one zastosowanie m.in. w monitorowaniu infrastruktury liniowej i rozległych obiektów inżynierskich [63, 64].

W badaniach materiałów kompozytowych szczególne znaczenie mają systemy wykorzystujące rozpraszanie Rayleigha w połączeniu z reflektometrią w dziedzinie częstotliwości OFDR. Technika ta umożliwia uzyskanie wysokiej, w odpowiednich konfiguracjach nawet milimetrowej, rozdzielczości przestrzennej pomiaru odkształceń. Dzięki temu możliwe jest wyznaczanie szczegółowych profili odkształceń wzdłuż światłowodu zintegrowanego z materiałem kompozytowym. Analiza zmian tych profili może dostarczać informacji o lokalnych koncentracjach odkształceń oraz procesach inicjacji i rozwoju uszkodzeń. Skuteczność takiego podejścia zależy jednak od przenoszenia odkształceń pomiędzy materiałem a światłowodem, sposobu jego integracji oraz parametrów systemu pomiarowego.

Odrębną grupę rozwiązań wykorzystujących rozpraszanie Rayleigha stanowią systemy rozproszonej detekcji akustycznej DAS. W odróżnieniu od technik ukierunkowanych na pomiary quasi-statyczne, systemy DAS umożliwiają rejestrację dynamicznych zmian odkształceń wzdłuż światłowodu. W wielu rozwiązaniach stosuje się w tym celu fazoczułe odmiany reflektometrii w dziedzinie czasu, w tym koherentną reflektometrię C-OTDR (ang. *Coherent Optical Time-Domain Reflectometry*) [65]. W zależności od konfiguracji aparatury możliwa jest rejestracja sygnałów dynamicznych o częstotliwościach sięgających zakresu kilohercowego [62].

W kontekście monitorowania kompozytów technologie te mogą być wykorzystywane do rejestracji zaburzeń mechanicznych towarzyszących procesom uszkodzeniowym, takim jak

pękanie włókien wzmacniających czy delaminacja. Interpretacja zarejestrowanych sygnałów wymaga jednak uwzględnienia sposobu sprzężenia światłowodu z materiałem, rozdzielczości przestrzennej i czasowej systemu oraz charakterystyki propagacji fal sprężystych w badanym elemencie. Systemy DAS mogą zatem stanowić uzupełnienie konwencjonalnych metod diagnostycznych, szczególnie w monitorowaniu rozległych konstrukcji. Ich zastosowanie stwarza możliwości wykrywania i lokalizacji zdarzeń dynamicznych, przy czym dokładność identyfikacji uszkodzeń zależy od konfiguracji układu pomiarowego oraz zastosowanych metod analizy danych [66].

Zestawienie siatek Bragga z systemami rozproszonymi potwierdza ich uzupełniający się charakter. Rozwiązania FBG sprawdzają się najlepiej w monitorowaniu znanych punktów krytycznych, gdzie liczy się stabilność sygnału i niższy koszt wdrożenia przy małej liczbie sensorów. Systemy rozproszone eliminują natomiast ryzyko przeoczenia wad w nieznanych lokalizacjach, a technologia DAS rozszerza ten nadzór o wymiar dynamiczny i aktywny „nasłuch" struktury. Należy jednak liczyć się ze znaczną ilością danych pomiarowych, których przetworzenie wymaga zaawansowanej analityki *Big Data* i algorytmów uczenia maszynowego. Ostatecznie przy projektowaniu sieci SHM trzeba więc uwzględnić zarówno wymaganą gęstość pomiarów, jak i koszt oraz możliwości aparatury odczytowej [6].

Potencjał technologii FBG i DFOS jest obiecujący, lecz ich bezpośrednie użycie w betonie zbrojonym blokują bariery materiałowe. Włókno o średnicy 125 μm ulegnie zniszczeniu w warunkach występujących podczas wykonywania elementów betonowych. Pozbawiony osłony rdzeń szklany niemal na pewno pęknie już przy wylewaniu betonu lub pracy wibratorów wgłębnych. Problemem jest jednak nie tylko mechanika, ale i agresywna chemia. Środowisko betonu, o pH przekraczającym $12{,}8$, wywołuje degradację nieosłoniętego szkła krzemionkowego [67]. Jony wodorotlenkowe aktywnie trawią sieć krzemionkową, wywołując procesy hydroksylacji i korozji. Prowadzi to do degradacji sensora znacznie szybciej, niż następuje utrata trwałości projektowej samej konstrukcji. Ten brak odporności wyznacza lukę badawczą, która stała się impulsem do podjęcia tematu niniejszej rozprawy. Jednym z rozwiązań tego problemu jest integracja światłowodu z kompozytowym zbrojeniem FRP. Polimerowa matryca tworzy wówczas barierę ochronną, pozwalając jednocześnie na wykorzystanie włókna jako integralnego elementu szkieletu nośnego.

Integracja włókna optycznego w profilu FRP ma jednak ogromne wyzwanie w skali mikrostrukturalnej. Średnica sensora 242 μm z powłoką ochronną jest porównywalna z grubością kilku elementarnych nici ciągłego rovingu szklanego (13–23 μm). Oznacza to, że średnica sensora odpowiada w przybliżeniu średnicy 11–19 elementarnych włókien rovingu szklanego. Wprowadzenie sensora do gęstego, jednokierunkowego zbrojenia podczas zautomatyzowanego procesu pultruzji powoduje lokalne zaburzenie ciągłości materiału. Szczególne znaczenie ma przy tym jego orientacja względem włókien wzmacniających, ponieważ odchylenie od osiowego kierunku zbrojenia sprzyja powstawaniu w otoczeniu sensora tzw. „oczek żywicznych" (ang. *resin eyes*) oraz soczewkowatych obszarów bogatych w matrycę. Te geometryczne niedoskonałości mogą powodować lokalną koncentrację naprężeń, inicjując rozwój mikropęknięć i delaminację,

która postępuje gwałtownie, gdy tylko kąt ułożenia włókna względem zbrojenia przekroczy $45°$.

Z perspektywy systemów SHM najbardziej korzystne jest równoległe ułożenie sensora w osi obojętnej pręta, ponieważ ogranicza ono zaburzenia pola naprężeń na interfejsie czujnik–matryca. Taka konfiguracja sprzyja liniowemu transferowi odkształceń i zmniejsza ryzyko zakłóceń pomiarowych wynikających z lokalnej relaksacji materiału. Wykazano, że włókna optyczne osadzone równolegle do włókien wzmacniających nie obniżają wytrzymałości laminatu na rozciąganie osiowe [68–70]. Odchylenie sensora od kierunku zbrojenia prowadzi natomiast do powstawania obszarów bogatych w żywicę, których kształt staje się coraz bardziej niekorzystny wraz ze wzrostem kąta względnego. Wyraźny spadek wytrzymałości na rozciąganie osiowe pojawia się po przekroczeniu kąta około $45°$, a następnie pogłębia się wraz z dalszym wzrostem odchylenia [71–73]. Jednocześnie obecność sensora może prowadzić do obniżenia wytrzymałości laminatu na rozciąganie poprzeczne oraz ściskanie osiowe o 20–70%. Oznacza to, że przy braku odpowiedniej kontroli nad procesem integracji światłowodu z materiałem polimerowym sensor, zamiast pełnić funkcję diagnostyczną, może stać się wadą technologiczną obniżającą właściwości całego elementu. Dlatego opracowanie technologii pozwalającej na utrzymanie wymaganej osiowości w warunkach przemysłowych jest jednym z problemów podejmowanych w niniejszej rozprawie. Nie jest to jednak jedyne zagadnienie wymagające rozwiązania. Samo umieszczenie światłowodu wewnątrz kompozytu nie gwarantuje jeszcze prawidłowego działania czujnika, podobnie jak uzyskanie poprawnego sygnału pomiarowego nie przesądza o zachowaniu właściwości mechanicznych gotowego elementu. Oba te aspekty muszą być rozpatrywane łącznie, zwłaszcza w procesach ciągłych, gdzie możliwości ingerencji w położenie sensora po jego wprowadzeniu do zbrojenia są ograniczone. Znaczenie ma również sposób połączenia światłowodu z matrycą polimerową, ponieważ to za jej pośrednictwem odkształcenia materiału są przenoszone na element pomiarowy.

W niniejszej pracy podjęto próbę rozwiązania tych problemów poprzez opracowanie sposobu integracji światłowodu z kompozytem już podczas jego wytwarzania, a następnie ocenę otrzymanych elementów pod względem właściwości mechanicznych i możliwości prowadzenia pomiarów. Istotne było przy tym określenie, na ile warunki procesu technologicznego wpływają na zachowanie sensora oraz czy jego obecność zmienia odpowiedź mechaniczną kompozytu. Nie chodzi bowiem wyłącznie o wytworzenie pręta z umieszczonym wewnątrz światłowodem. Celem jest uzyskanie elementu, który zachowuje funkcję konstrukcyjną, a jednocześnie pozwala na rejestrowanie odkształceń powstających podczas obciążania i późniejszej eksploatacji. Dopiero połączenie tych właściwości daje podstawy do wykorzystania takiego rozwiązania w systemach SHM.

1.2. Przedmiot, cel, hipotezy badawcze i zakres rozprawy

Przedmiotem rozprawy są pultrudowane pręty zbrojeniowe kompozyt polimerowy wzmacniany włóknami szklanymi (GFRP) ze światłowodem pomiarowym wprowadzonym osiowo do ich struktury. Integracja następowała bezpośrednio podczas ciągłego procesu pultruzji. Otrzymany w ten sposób pręt miał pełnić funkcję konstrukcyjną, a jednocześnie umożliwiać przestrzennie

rozłożony pomiar odkształceń na podstawie analizy rozproszenia wstecznego Rayleigha.

Podstawowym założeniem technologicznym było takie zintegrowanie światłowodu z prętem, aby przebiegał on wzdłuż jego osi podłużnej, przechodzącej przez środek przekroju. Przyjęte rozwiązanie miało zapewniać zachowanie właściwości mechanicznych kompozytu oraz ciągłości toru optycznego podczas wytwarzania i późniejszego obciążania elementu. Równie ważne było uzyskanie trwałego połączenia światłowodu z osnową, umożliwiającego skuteczne przenoszenie odkształceń. Na przebieg integracji wpływały właściwości materiałów składowych, proces utwardzania osnowy oraz warunki panujące w poszczególnych częściach linii technologicznej. Jednym z warunków prawidłowego przebiegu procesu było stabilne prowadzenie światłowodu i utrzymanie go w zadanym położeniu osiowym na całej długości pręta.

Wdrożeniowy charakter rozprawy wynika z bezpośredniego powiązania prowadzonych badań z opracowaniem technologii ciągłego wytwarzania prętów GFRP ze zintegrowanym światłowodem. Zakres prac objął kolejne etapy rozwoju rozwiązania: od doboru materiałów i dostosowania procesu pultruzji, przez wytworzenie prętów, aż po weryfikację ich właściwości mechanicznych i funkcji pomiarowej.

Cel rozprawy

Głównym celem rozprawy było opracowanie i eksperymentalna weryfikacja powtarzalnej technologii osiowej integracji światłowodu pomiarowego z pultrudowanymi prętami zbrojeniowymi GFRP. Opracowane rozwiązanie miało umożliwiać prowadzenie przestrzennie rozłożonych pomiarów odkształceń przy zachowaniu właściwości mechanicznych prętów na poziomie porównywalnym z prętami referencyjnymi bez zintegrowanego światłowodu.

Realizacja celu głównego obejmowała cele naukowe oraz technologiczne. Do celów naukowych zaliczono:

- określenie wpływu osiowo zintegrowanego światłowodu na właściwości mechaniczne pultrudowanego pręta GFRP na podstawie porównania z elementami referencyjnymi;
- ocenę położenia światłowodu w przekroju, jego integralności oraz wpływu na strukturę wewnętrzną kompozytu;
- charakterystykę obszaru połączenia światłowód–osnowa i ocenę warunków niezbędnych do przenoszenia odkształceń pomiędzy składnikami układu;
- określenie właściwości termicznych i reologicznych matrycy żywicznej istotnych dla optymalizacji i przebiegu procesu pultruzji;
- ocenę możliwości wykorzystania światłowodu zintegrowanego z prętem GFRP do przestrzennie rozłożonego pomiaru odkształceń pręta pracującego jako zbrojenie elementu betonowego;
- porównanie wyników eksperymentalnych belek betonowych zbrojonych prętami ze zintegrowanym światłowodem z wynikami belek referencyjnych bez czujników, w celu oceny wpływu integracji na nośność i zachowanie konstrukcji pod obciążeniem.

Cele technologiczne i praktyczne obejmowały:

- opracowanie sposobu ciągłego podawania światłowodu i utrzymania jego osiowego położenia podczas procesu pultruzji;
- dostosowanie linii technologicznej do integracji światłowodu z prętamiGFRP;
- dobór parametrów procesu pultruzji umożliwiających prawidłowe formowanie i utwardzanie kompozytu przy zachowaniu integralności światłowodu;
- opracowanie sposobu mechanicznego odsłaniania zakończeń światłowodu z utwardzonej osnowy kompozytowej;
- opracowanie autorskiego oprogramowania wspomagającego przetwarzanie, analizę i wizualizację danych pochodzących z rozproszonych pomiarów światłowodowych.

Na podstawie zdefiniowanego problemu badawczego i przyjętego celu sformułowano dwie hipotezy badawcze:

Hipoteza 1: Integracja kompozytowych prętów zbrojeniowych z wbudowanym czujnikiem światłowodowym w strukturę konstrukcji betonowej / kompozytowej pozwala na ciągłe monitorowanie zmian odkształceń elementów wielkogabarytowych.

Hipoteza 2: Integracja czujników światłowodowych w wybranych strukturach kompozytowych nie wpływa na obniżenie ich wytrzymałości.

Zakres prac badawczych i technologicznych

Zakres rozprawy uporządkowano w postaci jedenastu zadań wynikających z założeń indywidualnego planu badawczego i odpowiadających kolejnym etapom realizacji pracy. Przyjęte oznaczenia zachowano również w rozdziale zawierającym wnioski końcowe, co pozwala jednoznacznie powiązać założony zakres pracy z uzyskanymi wynikami.

Z1. Przeprowadzenie analizy stanu wiedzy dotyczącego systemów monitorowania stanu konstrukcji, rozproszonych czujników światłowodowych oraz metod ich integracji z materiałami kompozytowymi.

Z2. Analiza właściwości światłowodów dostępnych na rynku, wybór rozwiązania przeznaczonego do integracji z kompozytem oraz opracowanie procedur przygotowania, łączenia i kontroli ciągłości toru optycznego.

Z3. Charakterystyka termiczna i reologiczna matrycy żywicznej oraz określenie warunków procesu istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa światłowodu i prawidłowego formowania kompozytu.

Z4. Wybór technologii ciągłego wytwarzania elementów kompozytowych, opracowanie koncepcji osiowej integracji światłowodu oraz wykonanie niezbędnych modyfikacji linii technologicznej.

Z5. Opracowanie sposobu ciągłego podawania i stabilnego pozycjonowania światłowodu, a także metody mechanicznego odsłaniania jego zakończeń z utwardzonej osnowy kompozytowej.

Z6. Wytworzenie prętów i profili GFRP ze zintegrowanym światłowodem, obejmujących elementy o przekroju okrągłym i prostokątnym, oraz przygotowanie odpowiednich serii referencyjnych bez światłowodu.

Z7. Ocena geometrii i jakości wytworzonych elementów, położenia oraz integralności światłowodu, struktury wewnętrznej kompozytu i obszaru połączenia światłowód–osnowa z wykorzystaniem tomografii komputerowej, mikroskopii optycznej i skaningowej mikroskopii elektronowej.

Z8. Przeprowadzenie porównawczych badań właściwości mechanicznych elementów GFRP ze zintegrowanym światłowodem oraz elementów referencyjnych. Program badań obejmował próby rozciągania, ścinania, zginania i udarności.

Z9. Opracowanie modelu analitycznego pręta kompozytowego uwzględniającego obecność osiowo umieszczonego światłowodu oraz przygotowanie modelu numerycznego wraz z jego dyskretyzacją siatką elementów skończonych.

Z10. Zastosowanie oprzyrządowanych prętów GFRP jako zbrojenia elementów betonowych, przeprowadzenie prób obciążeniowych oraz ocena możliwości rejestracji przestrzennego rozkładu odkształceń metodą optyczna reflektometria rozproszenia wstecznego (OBR).

Z11. Walidacja wyników pomiarów rozłożonych na podstawie niezależnego pomiaru referencyjnego oraz opracowanie oprogramowania służącego do przetwarzania, analizy i wizualizacji danych pomiarowych.

Zadania Z1–Z7 obejmowały dobór materiałów, rozwój technologii wytwarzania oraz ocenę jakości otrzymanych elementów. Zadanie Z8 stanowiło zasadniczą podstawę weryfikacji hipotezy 2. Z kolei zadania Z10 i Z11 odnosiły się bezpośrednio do funkcji pomiarowej opracowanych prętów i służyły weryfikacji hipotezy 1.

2. ANALIZA LITERATURY PRZEDMIOTU

2.1. Podstawy światłowodowego pomiaru odkształceń

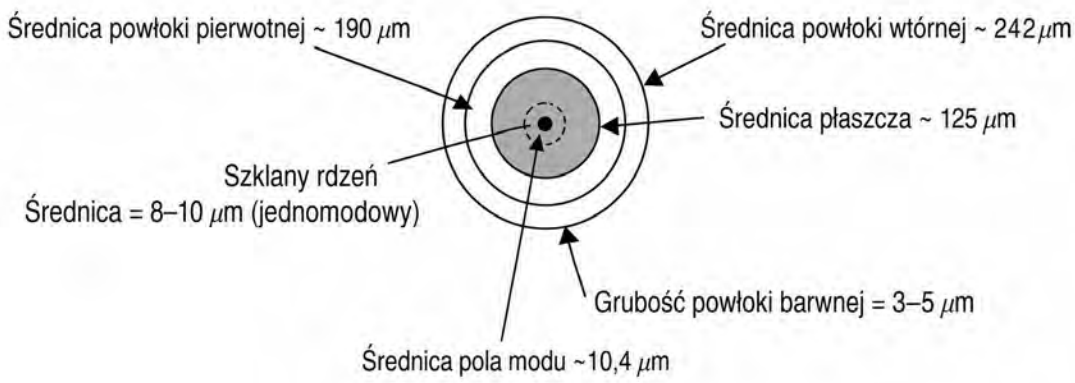
2.1.1. Budowa światłowodu pomiarowego

Przy doborze światłowodu do pomiaru odkształceń należy uwzględnić zarówno jego właściwości optyczne, jak i mechaniczne. Podstawowymi elementami odpowiedzialnymi za prowadzenie promieniowania są rdzeń oraz otaczający go płaszcz [74–76]. Oba obszary są zwykle wykonane na bazie szkła krzemionkowego, a wymaganą różnicę współczynników załamania uzyskuje się przez odpowiednie domieszkowanie rdzenia lub płaszcza. Współczynnik załamania rdzenia jest nieco wyższy niż płaszcza, co umożliwia prowadzenie promieniowania wzdłuż włókna [74–76]. W światłowodzie jednomodowym zasadnicza część pola elektromagnetycznego modu podstawowego koncentruje się w rdzeniu, jednak część tego pola przenika również do płaszcza. Geometryczna średnica rdzenia nie jest zatem tożsama ze średnicą pola modu.

Dobrze zilustrowano to w pracy Wana i współautorów dla włókna Corning SMF-28, w którym geometryczna średnica rdzenia wynosiła 8,3 μm, podczas gdy średnica pola modu przy długości fali 1550 nm była równa $10{,}4 \pm 0{,}8$ μm (Rys. 2-1) [77]. Dlatego w opisie światłowodu pomiarowego warto rozdzielać oba parametry. Przy takim podziale średnica rdzenia określa geometryczny wymiar obszaru rdzenia, natomiast średnica pola modu charakteryzuje poprzeczny rozkład pola elektromagnetycznego modu podstawowego.

Rdzeń otacza płaszcz szklany, którego typowa średnica w standardowych włóknach jednomodowych wynosi 125 μm [74, 75, 77] i razem tworzą właściwe włókno szklane. Rdzeń zajmuje niewielką część jego przekroju, dlatego o sztywności osiowej i nośności mechanicznej nie decyduje sam obszar prowadzący światło, lecz niemal cały przekrój szklany. W modelach transferu odkształceń rdzeń i płaszcz są dlatego często traktowane jako jeden jednorodny element, nazywany po prostu włóknem optycznym. Takie uproszczenie zastosowali między innymi Falcetelli i współautorzy [78]. Rdzeń nadal pełni swoją funkcję optyczną, jednak różnice domieszkowania odpowiedzialne za prowadzenie światła nie mają pierwszoplanowego znaczenia dla mechanicznej odpowiedzi całego przekroju szklanego.

Przekrój szklany decyduje również o granicach mechanicznej pracy czujnika. Wytrzymałość włókna kwarcowego może przekraczać $4{,}8$ GPa, co odpowiada odkształceniu rzędu 7%, jednak praktyczny poziom naprężeń roboczych jest znacznie niższy z powodu obecności mikroskopijnych defektów powierzchni [74]. Producenci poddają włókna próbie kontrolnej przy naprężeniu około $0{,}35$ GPa, odpowiadającym odkształceniu około [74], natomiast dla zastosowanego w badaniach włókna SMF-28 Ultra producent deklaruje co najmniej $0{,}69$ GPa [189]. W większości zastosowań pomiarowych wytrzymałość włókna przewyższa zatem wytrzymałość



Rys. 2-1. *Przekrój poprzeczny jednomodowego światłowodu pomiarowego z dwuwarstwową powłoką akrylanową. Wymiary podano dla włókna Corning SMF-28; linią przerywaną zaznaczono średnicę pola modu, wykraczającą poza geometryczną granicę rdzenia. Opracowanie własne na podstawie [74, 77, 79, 80].*

monitorowanego elementu konstrukcyjnego.

Szkło kwarcowe bez dodatkowego zabezpieczenia jest podatne na uszkodzenia powierzchniowe. Nawet bardzo niewielkie rysy i mikropęknięcia mogą obniżać jego rzeczywistą wytrzymałość [74], dlatego bezpośrednio po wyciągnięciu włókna nanosi się na nie powłokę polimerową [75, 80, 81]. Powłoka ogranicza kontakt powierzchni szkła z otoczeniem, zabezpiecza przed ścieraniem i zmniejsza prawdopodobieństwo rozwoju defektów prowadzących do zerwania włókna [80, 81]. Dobra adhezja na granicy szkło–polimer jest jednym z warunków trwałości światłowodu [80, 81]. Połączenie to można scharakteryzować ilościowo. Dla komercyjnego światłowodu z dwuwarstwową powłoką wyznaczona wytrzymałość na ścinanie połączenia między szkłem a powłoką pierwotną wzrosła z 1,07 MPa przy prędkości usuwania powłoki 0,5 mm/min do 43,4 MPa przy 500 mm/min [81]. Adhezję między szkłem a powłoką pierwotną dobiera się kompromisowo i powinna być wystarczająca do ochrony włókna przed delaminacją podczas użytkowania, a jednocześnie umożliwiać usunięcie powłoki przed dalszym montażem [80, 81].

Zalecenie ITU-T[1] G.650.1 definiuje powłokę pierwotną jako jedną lub kilka warstw materiału ochronnego nanoszonych na płaszcz światłowodu podczas wyciągania albo bezpośrednio po nim. Jej zadaniem jest zachowanie integralności powierzchni płaszcza i zapewnienie podstawowego poziomu ochrony. Jako przykład podano światłowód o zewnętrznej średnicy powłoki około 250 μm [176]. Powłoka wtórna jest natomiast dodatkowym zabezpieczeniem nakładanym na włókno posiadające już powłokę pierwotną. Może przyjmować postać bufora o średnicy około 900 μm, ciasnej tuby lub powłoki łączącej kilka włókien w taśmę [176].

W standardowym dwuwarstwowym systemie akrylanowym bezpośrednio na szkle znaj-

[1]ITU-T – Sektor Normalizacji Telekomunikacji Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (ang. *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*).

duje się miękka warstwa wewnętrzna, natomiast na niej sztywniejsza warstwa zewnętrzna [79, 80]. W nomenklaturze producentów i poszczególnych publikacji warstwy te bywają określane jako powłoka pierwotna i wtórna. W dalszej części pracy układ dwóch warstw akrylanowych nanoszonych bezpośrednio podczas wytwarzania włókna będzie określany jako powłoka akrylanowa, obejmująca miękką warstwę wewnętrzną i sztywniejszą warstwę zewnętrzną. Jej średnica zewnętrzna zależy od konkretnego typu światłowodu i w analizowanych przypadkach wynosi około 240–250 µm.

Wewnętrzna warstwa typowej powłoki akrylanowej jest miękka i lepko-sprężysta. Pozwala ograniczać przenoszenie lokalnych nacisków na szkło oraz zmniejszać podatność światłowodu na straty wywoływane mikrozgięciami. Zewnętrzna warstwa ma znacznie większą sztywność i odpowiada przede wszystkim za odporność na uszkodzenia podczas dalszego przetwarzania i użytkowania włókna [79, 80]. Różnica między właściwościami obu warstw może być znaczna. Dla włókna Corning SMF-28 moduł warstwy wewnętrznej jest równy 4 MPa, a warstwy zewnętrznej równy 1000 MPa [77]. Nominalna średnica zewnętrzna włókna z powłoką wynosiła 245 ± 5 µm. W zastosowanym przez autorów opisie geometrycznym każdej z dwóch warstw przypisano natomiast grubość 31,25 µm, mierzoną w kierunku promieniowym. Przy średnicy płaszcza 125 µm odpowiada to idealizowanej średnicy zewnętrznej 250 µm, mieszczącej się w podanym zakresie 245 ± 5 µm. Zestawienie parametrów przyjmowanych w literaturze dla podobnych układów przedstawiono w tabeli 2-1. Rozrzut wartości wynika zarówno z różnic materiałowych między produktami, jak i z metod wyznaczania sztywności cienkich warstw polimerowych.

Tablica 2-1. Parametry materiałowe i geometryczne powłok światłowodów jednomodowych przyjmowane w wybranych pracach dotyczących transferu odkształceń

Źródło	**Wan i in. [77]**	**Falcetelli i in. [78]**	**Her i Huang [82]**	**Lu i in. [79]** **Schmid i in. [80][c]**
Włókno	Corning SMF-28	Corning SMF-28e+ LL	niespecyfikowane[a]	standardowe SMF
E warstwy wewnętrznej	4 MPa	1,3 MPa	6,7 MPa[a]	∼1 MPa (295 K) ∼2,6 GPa (220 K)
E warstwy zewnętrznej	1000 MPa	1550 MPa	28 MPa[b]	1 GPa
Promień rdzenia szklanego	62,5 µm	62,5 µm	62,5 µm	62,5 µm

Ciąg dalszy na następnej stronie...

Tablica 2-1. Parametry materiałowe i geometryczne powłok światłowodów (cd.)

Źródło	**Wan i in.**	**Falcetelli i in.**	**Her i Huang**	**Lu / Schmid**
Promień zewn. warstwy wewnętrznej	93,75 µm	95 µm	–[a]	95 µm
Promień zewn. warstwy zewnętrznej	125 µm[d]	125 µm	125 µm	125 µm
Nominalna średnica włókna z powłoką	245 ± 5 µm[d]	–	–	–

[a] W pracy [82] powłokę modelowano jako pojedynczą warstwę o grubości 62,5 µm; wartość 6,7 MPa dotyczy oryginalnej powłoki polimerowej włókna.
[b] Wartość 28 MPa dotyczy powłoki akrylanowej nałożonej powtórnie (*recoating*), badanej w [82] jako wariant sztywniejszy.
[c] Wartości modułów i promieni warstw dla standardowej powłoki przyjęto za [79] (Tab. I); dane dotyczące temperaturowej zmiany modułu warstwy wewnętrznej ($\sim$1 MPa przy 295 K oraz $\sim$2,6 GPa przy 220 K) [79, 80].
[d] Wan i współautorzy [77] podają dla włókna Corning SMF-28 nominalną średnicę zewnętrzną z powłoką równą 245 ± 5 µm. Jednocześnie w opisie właściwości mechanicznych przyjęto grubość warstwy wewnętrznej i zewnętrznej równą po 31,25 µm. Przy średnicy płaszcza 125 µm odpowiada to idealizowanemu promieniowi zewnętrznemu 125 µm, czyli średnicy 250 µm. Wartość ta mieści się w zakresie tolerancji podanym dla nominalnej średnicy włókna z powłoką.

Poszczególne źródła podają różne wartości modułów, ale różnice te są subtelne. W pracach dotyczących powłok dwuwarstwowych moduł warstwy wewnętrznej w temperaturze pokojowej jest zwykle o dwa lub trzy rzędy wielkości niższy niż moduł warstwy zewnętrznej. Obie warstwy polimerowe charakteryzują się jednocześnie znacznie mniejszą sztywnością niż szkło kwarcowe.

Warstwa wewnętrzna ma właściwości lepko-sprężyste, a jej zachowanie zależy między innymi od szybkości obciążania [80]. Było to widoczne w badaniach zdejmowania powłoki. Wraz ze wzrostem prędkości procesu rosła siła potrzebna do zerwania połączenia, a także parametr odpowiadający efektywnej długości ścinania [81].

Lu i współautorzy przyjęli dla miękkiej warstwy wewnętrznej moduł wynoszący około 1 MPa w temperaturze pokojowej. W pobliżu 220 K jego wartość wzrastała do około 2,6 GPa [79]. Wynik ten pokazuje, jak silnie właściwości powłoki mogą zależeć od temperatury, szczególnie w pobliżu temperatury zeszklenia [80]. Tak duży wzrost sztywności zmienia sposób współpracy powłoki ze szkłem.

W temperaturze pokojowej miękka warstwa ogranicza część odkształceń termicznych przekazywanych z warstwy zewnętrznej. Gdy jej sztywność rośnie, większe obciążenie może zostać przeniesione na samo włókno. Skutki te wzmacnia duża różnica rozszerzalności cieplnej obu materiałów. Współczynnik rozszerzalności warstwy wewnętrznej wynosi około $2{,}11 \cdot 10^{-4}$ K^{-1}, natomiast dla szkła kwarcowego około $0{,}45 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} [79]. Różnica wynosi więc prawie trzy rzędy wielkości. Odkształcenie wymuszone przez powłokę zależy zarówno od jej sztywności,

jak i od tej rozbieżności, dlatego parametry powłoki powinny być odnoszone do rzeczywistego zakresu temperatury pracy czujnika.

Na przekazywanie odkształceń wpływają również średnice kolejnych warstw. Włókno szklane o średnicy 125 µm może być pokryte powłoką o średnicy około 245–250 µm, a następnie otoczone buforem lub dalszymi warstwami kabla [77, 78, 80, 176]. Odkształcenie badanego materiału przechodzi przez kilka obszarów, zanim dotrze do szkła. Odbywa się to głównie przez naprężenia styczne [74]. Promienie zewnętrzne powłoki pierwotnej i wtórnej oraz ich moduły ścinania występują bezpośrednio w parametrze opisującym opóźnienie narastania odkształcenia we włóknie względem badanego elementu [77]. Parametry te decydują więc o różnicy przemieszczeń między włóknem a otaczającą konstrukcją.

W innych badaniach sztywniejsza powłoka, przy takim samym sposobie zamocowania, pozwalała przekazać do światłowodu większą część odkształcenia podłoża [82]. Wynika stąd, że o skuteczności transferu odkształceń nie decyduje sama grubość powłoki. Większa średnica zwykle poprawia ochronę szkła, jednak istotna pozostaje również sztywność zastosowanego materiału. Cienka i bardzo miękka warstwa może przekazywać odkształcenia słabiej niż warstwa grubsza wykonana z materiału o większym module ścinania [74, 78, 80].

Wymiary rdzenia, płaszcza i powłok należy więc traktować jako część układu mechanicznego, a nie wyłącznie jako opis budowy światłowodu. Jest to istotne również podczas pultruzji, gdzie włókno z powłoką akrylanową jest poddawane podwyższonej temperaturze.

Wymiary rdzenia, płaszcza i powłok należy więc traktować jako parametry układu mechanicznego, a nie wyłącznie jako opis budowy światłowodu. Nabiera to szczególnego znaczenia podczas pultruzji. Włókno jest wówczas poddawane naciągowi, lokalnym przegięciom i podwyższonej temperaturze, a jego powłoka styka się bezpośrednio z mieszanką żywiczną. Takie warunki uwzględniono przy wyborze światłowodu przeznaczonego do integracji z prętem GFRP.

Rozpatrywano standardowe światłowody jednomodowe należące do kategorii G.652.C, G.652.D, G.655 i G.657.A1. Porównano ich budowę, parametry geometryczne i odporność mechaniczną. Sprawdzono także zgodność z jednostką interrogacyjną oraz możliwość dostarczenia włókna na szpuli, bez dodatkowego bufora i osłony kablowej. Przyjęte kryteria zestawiono w tabeli 2-2.

Różnice pomiędzy rozpatrywanymi kategoriami dotyczyły przede wszystkim właściwości transmisyjnych oraz wrażliwości na straty wywołane makrozgięciami [177–179]. W prowadzonych badaniach długość toru optycznego była niewielka w porównaniu z trasami telekomunikacyjnymi, dlatego wartości dyspersji chromatycznej i tłumienności jednostkowej nie stanowiły kryteriów rozstrzygających. Właściwości dyspersyjne włókien G.655 nie zapewniały w tym zastosowaniu istotnej korzyści [178]. Zwiększona odporność włókien G.657.A1 na straty wywołane zginaniem mogła natomiast ułatwiać ich prowadzenie przez linię technologiczną, chociaż po integracji światłowód przebiegał prostoliniowo wzdłuż osi pręta [179].

Do prób wybrano światłowód Corning SMF-28 Ultra, zgodny z wymaganiami kategorii ITU-T G.652.D i charakteryzujący się odpornością na makrozgięcia przewyższającą wymagania G.657.A1 [190]. Średnica jego płaszcza wynosiła $125{,}0 \pm 0{,}7$ µm, a standardowa średnica

Tablica 2-2. Kryteria wyboru światłowodu przeznaczonego do integracji z prętem GFRP

Kryterium	**Znaczenie podczas wyboru**	**Przyjęte wymaganie**
Tryb pracy	Zgodność z jednostką interrogacyjną i metodą pomiarową	Standardowe włókno jednomodowe pracujące w zakresie długości fali wykorzystywanym podczas pomiarów
Wymiary	Ograniczenie wpływu światłowodu na rozmieszczenie rovingów i strukturę pręta	Średnica płaszcza 125 µm oraz możliwie mała średnica włókna z powłoką
Rodzaj powłoki	Ochrona szkła podczas procesu oraz przenoszenie odkształceń po utwardzeniu osnowy	Dwuwarstwowa powłoka akrylanowa bez dodatkowego bufora i osłony kablowej
Odporność mechaniczna	Narażenie na naciąg, tarcie i lokalne przegięcia podczas podawania włókna	Poziom próby kontrolnej deklarowany przez producenta wynoszący co najmniej 0,60 GPa
Postać handlowa	Możliwość nieprzerwanego podawania światłowodu podczas ciągłego procesu	Włókno dostępne na szpuli, w odcinkach niewymagających łączenia w obrębie wytwarzanego pręta
Możliwość łączenia	Przygotowanie zakończeń pręta i podłączenie do zewnętrznego toru pomiarowego	Zgodność ze standardowymi metodami spawania i zakańczania włókien jednomodowych

zewnętrzna powłoki 242 ± 5 µm. Włókno było dostępne w odcinkach o długości do 50,4 km na szpuli, co umożliwiało jego ciągłe podawanie. Całą długość włókna poddawano podczas produkcji próbie kontrolnej przy naprężeniu wynoszącym co najmniej 0,69 GPa [190]. Badania producenta potwierdziły również możliwość spawania SMF-28 Ultra z innymi standardowymi włóknami jednomodowymi przy użyciu standardowego programu spawarki [191]. Cechy te zdecydowały o zastosowaniu tego włókna w dalszych próbach technologicznych.

2.1.2. Propagacja światła i straty transmisyjne

Rdzeń i płaszcz tworzą wspólnie strukturę falowodową. Rozkład pola elektromagnetycznego obejmuje oba te obszary. Większa część mocy modu podstawowego pozostaje skupiona w rdzeniu, jednak pole nie zanika na granicy rdzeń–płaszcz. Jego część przenika do płaszcza, gdzie występuje w postaci pola zanikającego. Zjawisko to wynika z falowego charakteru prowadzenia światła. Uproszczony model wielokrotnego całkowitego wewnętrznego odbicia nie oddaje go w pełni [75].

W zakresie pracy jednomodowej we włóknie występuje podstawowy mod przestrzenny

(mod liniowo spolaryzowany $(LP)_{01}$)[2]. Jego natężenie jest największe w pobliżu osi włókna i maleje wraz z odległością od środka przekroju. W typowych włóknach krzemionkowych różnica współczynników załamania rdzenia i płaszcza jest niewielka. Pozwala to zastosować przybliżenie słabego prowadzenia. Rozkład pola opisuje się wtedy za pomocą modów liniowo spolaryzowanych (LP_{lm}). Określenie „światłowód jednomodowy" dotyczy struktury przestrzennej pola. Mod podstawowy może występować w dwóch ortogonalnych stanach polaryzacji [75, 76].

Dla idealnego włókna skokowego w przybliżeniu słabego prowadzenia granicę pracy jednomodowej wyznacza znormalizowana częstotliwość (V). Przy wartości mniejszej od $2{,}405$ mod wyższego rzędu (LP_{11}) nie jest modem związanym. Propagować może się wówczas jedynie mod podstawowy:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{\mathrm{co}}^2 - n_{\mathrm{cl}}^2} < 2{,}405, \tag{2-1}$$

gdzie a oznacza promień rdzenia, λ jest długością fali promieniowania w próżni, natomiast n_{co} i n_{cl} są współczynnikami załamania odpowiednio rdzenia i płaszcza [75, 76]. Równanie to nie będzie dalej rozwijane, ponieważ w niniejszej pracy służy ono jedynie wskazaniu, że charakter propagacji zależy równocześnie od geometrii światłowodu, kontrastu współczynników załamania i długości fali.

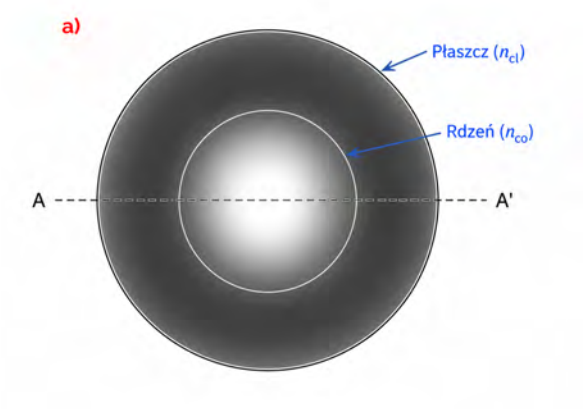
Po przekroczeniu długości fali odcięcia włókno prowadzi mod LP_{01}, natomiast mody wyższych rzędów są odcięte. Sam profil pola LP_{01} nadal zależy jednak od długości fali. Przy jej wzroście pole słabiej koncentruje się w rdzeniu, zwiększa się natomiast średnica pola modu i udział energii znajdującej się w płaszczu. Ma to wpływ na straty wywołane zgięciem włókna. Lokalna zmiana geometrii może być więc bardziej odczuwalna przy długości fali zbliżonej do 1550 nm niż przy krótszych falach, mimo że budowa materiałowa światłowodu pozostaje taka sama [75].

Sposób przestrzennego rozmieszczenia pola modu podstawowego, jego zasięg poprzeczny oraz zmianę stopnia ograniczenia pola przedstawiono na rysunku 2-2. Rysunek zestawia widok przekroju poprzecznego, jednowymiarowy profil amplitudy, zachowanie pola podczas propagacji oraz wpływ częstotliwości znormalizowanej V na kształt modu.

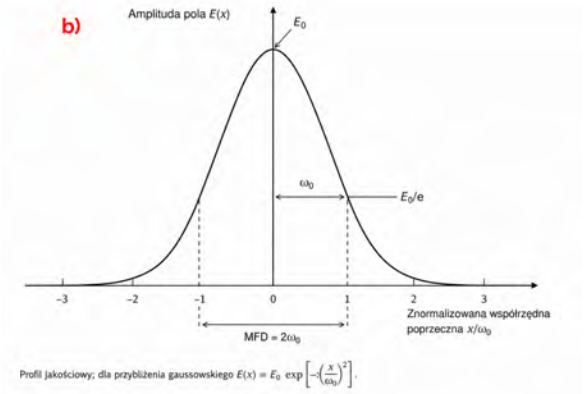
Na rysunku 2-2a przedstawiono jakościowy rozkład intensywności modu podstawowego LP_{01} w przekroju poprzecznym światłowodu. Najjaśniejszy obszar znajduje się na osi włókna i odpowiada największej względnej intensywności pola. Wraz ze wzrostem odległości od osi intensywność stopniowo maleje.

Biała linia okrężna wyznacza geometryczną granicę między rdzeniem a płaszczem. Nie stanowi ona dodatkowej warstwy materiałowej oraz obszaru o zwiększonej intensywności. Część pola wykracza poza tę granicę i znajduje się w płaszczu, gdzie stopniowo zanika w kierunku radialnym. Zewnętrzna czarna obwódka oznacza jedynie umowną granicę przedstawionego obszaru płaszcza i nie odpowiada powłoce polimerowej światłowodu. Linia $A - A'$ wyznacza

[2]Skrót LP oznacza mod liniowo spolaryzowany (ang. *linearly polarized*). Dolne wskaźniki określają liczby modowe: pierwszy – azymutalną, drugi – promieniową. Mod podstawowy LP_{01} odpowiada zatem wartościom $l = 0$ oraz $m = 1$.



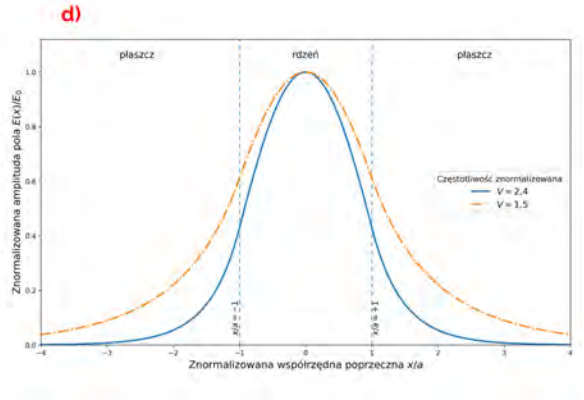
(a) *Jakościowy rozkład intensywności modu* LP_{01} *w przekroju poprzecznym.*



(b) *Profil amplitudy pola oraz definicja* ω_0 *i MFD.*



(c) *Propagacja modu oraz pole zanikające w płaszczu.*



(d) *Wpływ częstotliwości znormalizowanej* V *na rozkład pola.*

Rys. 2-2. *Charakterystyka przestrzennego rozkładu pola modu podstawowego* LP_{01}*: (a) jakościowy rozkład intensywności w przekroju poprzecznym światłowodu, (b) profil amplitudy pola oraz definicja promienia pola modowego* ω_0 *i średnicy pola modowego (MFD, ang.* mode field diameter*)* $\mathrm{MFD} = 2\omega_0$*, (c) zachowanie pola podczas propagacji w idealnym, jednorodnym światłowodzie oraz (d) porównanie profili amplitudy dla częstotliwości znormalizowanych* $V = 1{,}5$ *i* $V = 2{,}4$*. Opracowanie własne na podstawie [75, 76, 83].*

średnicowy przekrój, wzdłuż którego można przedstawić jednowymiarowy profil pola.

Profil ten przedstawiono na rysunku 2-2b. W tym przypadku pokazano amplitudę pola elektrycznego E jako funkcję współrzędnej poprzecznej x, zapisywaną w postaci $E(x)$, a nie intensywność pola. Symbol E_0 oznacza maksymalną wartość amplitudy, występującą na osi światłowodu.

W gaussowskim przybliżeniu rozkładu pola promień pola modu ω_0 jest odległością od osi światłowodu do punktu, w którym amplituda maleje do wartości E_0/e, gdzie e oznacza podstawę logarytmu naturalnego. Ze względu na symetrię analogiczny punkt występuje po przeciwnej stronie osi, a odległość między tymi punktami określa średnica pola modowego (MFD) (ang. *mode field diameter*):

$$\mathrm{MFD} = 2\omega_0. \tag{2-2}$$

Ponieważ intensywność jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy,

$$I(x) \propto |E(x)|^2, \tag{2-3}$$

w punktach $x = \pm\omega_0$ zachodzi:

$$I(\pm\omega_0) = \frac{I_0}{e^2}. \tag{2-4}$$

Poziom $1/e$ odnosi się zatem do amplitudy pola, natomiast $1/e^2$ do jego intensywności. Przedstawiona zależność $MFD = 2\omega_0$ odpowiada gaussowskiemu przybliżeniu profilu. W przypadku rzeczywistych profili, które nie są dokładnie gaussowskie, MFD może być definiowany w sposób bardziej ogólny, między innymi za pomocą definicji Petermanna [84].

MFD nie jest przy tym tożsamy z geometryczną średnicą rdzenia. Opisuje rzeczywisty poprzeczny zasięg pola i uwzględnia również jego część znajdującą się w płaszczu.

Rysunek 2-2c przedstawia podłużny przekrój idealnego, prostego i jednorodnego światłowodu. Niebieskie linie $x = \pm a$, gdzie x oznacza współrzędną poprzeczną, a a promień rdzenia, wyznaczają geometryczne granice rdzeń–płaszcz. Strzałka wzdłuż osi z wskazuje natomiast kierunek propagacji promieniowania.

W takich warunkach znormalizowany profil poprzeczny modu zachowuje swój kształt wzdłuż osi światłowodu. Zmienia się faza pola, natomiast jego poprzeczna postać modalna pozostaje niezmienna. Określenie *pole zanikające w płaszczu* odnosi się do zmniejszania amplitudy i intensywności w kierunku poprzecznym, wraz ze wzrostem odległości od rdzenia. Nie oznacza ono zanikania pola wzdłuż kierunku propagacji z.

Wpływ częstotliwości znormalizowanej V na poprzeczny rozkład pola pokazano na rysunku 2-2d. Oś pozioma przedstawia znormalizowaną współrzędną poprzeczną x/a, dlatego wartości $x/a = \pm 1$ odpowiadają geometrycznym granicom rdzenia. Rysunek służy porównaniu kształtu obu profili. W tym celu przyjęto dla nich jednakową wartość maksymalną w osi światłowodu, $E(0) = E_0$.

Dla $V = 1{,}5$ profil jest szerszy, a pole zachowuje większą wartość poza granicami rdzenia. Dla $V = 2{,}4$ jest ono silniej ograniczone w rdzeniu i szybciej zanika w płaszczu. Wartości $V = 1{,}5$ i $V = 2{,}4$ nie odpowiadają automatycznie długościom fali 1550 nm i 1310 nm, gdyż takie przypisanie wymagałoby znajomości parametrów konkretnego światłowodu.

Profile przedstawione na rysunku obliczono w przybliżeniu skalarnym dla idealnego światłowodu skokowego. W rdzeniu rozkład amplitudy opisuje funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu zerowego J_0, natomiast w płaszczu zmodyfikowana funkcja Bessela drugiego

rodzaju rzędu zerowego K_0:

$$\frac{E(r)}{E_0} = \begin{cases} J_0\left(u\frac{r}{a}\right), & 0 \leq r \leq a, \\ J_0(u)\frac{K_0\left(w\frac{r}{a}\right)}{K_0(w)}, & r > a, \end{cases} \tag{2-5}$$

gdzie parametry u i w spełniają zależność

$$u^2 + w^2 = V^2 \tag{2-6}$$

oraz równanie charakterystyczne modu LP_{01}:

$$u\frac{J_1(u)}{J_0(u)} = w\frac{K_1(w)}{K_0(w)}. \tag{2-7}$$

gdzie:

- $E(r)$ – amplituda pola modu w odległości r od osi światłowodu;
- E_0 – amplituda pola na osi ($r = 0$), przyjęta jako wartość odniesienia;
- r – współrzędna radialna liczona od osi rdzenia;
- a – promień rdzenia;
- $J_0,\ J_1$ – funkcje Bessela pierwszego rodzaju odpowiednio rzędu zerowego i pierwszego;
- $K_0,\ K_1$ – zmodyfikowane funkcje Bessela drugiego rodzaju odpowiednio rzędu zerowego i pierwszego;
- u – bezwymiarowy poprzeczny parametr pola w rdzeniu;
- w – bezwymiarowy parametr zaniku pola w płaszczu;
- V – częstotliwość znormalizowana zdefiniowana równaniem (2-1).

Przedstawione zależności mają znaczenie również dla światłowodu integrowanego z prętem pultrudowanym. Światłowód pozostaje prowadnicą optyczną, której właściwości zależą od zachowania geometrii rdzenia i płaszcza. Podczas procesu może być on poddawany naciskowi wiązek rovingu, zagęszczaniu przekroju, lokalnym zmianom toru prowadzenia oraz naprężeniom powstającym podczas utwardzania żywicy. Oddziaływania te mogą powodować mikrozgięcia i lokalne deformacje, a w konsekwencji zwiększać straty optyczne. Badania światłowodów osadzanych w materiałach polimerowych wskazują, że jego położenie względem włókien wzmacniających może mieć wpływ na powstawanie takich strat [85].

Rysunek 2-2 pokazuje, że prowadzone promieniowanie należy traktować jako przestrzennie rozłożone pole. Zachowanie możliwie niezakłóconych warunków prowadzenia jest ważne dla jakości sygnału w systemie pomiaru rozłożonego, ponieważ lokalne straty mogą zmniejszać moc sygnału docierającego do dalszych odcinków światłowodu.

Nawet przy zachowaniu niezmienionej geometrii włókna moc prowadzonego promieniowania maleje w miarę propagacji. Spadek ten określa się jako tłumienie lub stratę transmisyjną.

Dla odcinka światłowodu o długości L współczynnik tłumienia można zapisać w postaci:

$$\alpha_{\mathrm{dB}} = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{\mathrm{in}}}{P_{\mathrm{out}}} \right), \tag{2-8}$$

gdzie P_{in} oznacza moc wprowadzoną do światłowodu, natomiast P_{out} moc zmierzoną po przejściu odcinka o długości L. Dla długości wyrażonej w kilometrach współczynnik α_{dB} podaje się w $\mathrm{dB/km}$ [76]. Sama wartość straty całkowitej nie określa jednak miejsca jej powstania. Taki sam wynik może odpowiadać stopniowemu tłumieniu na długim odcinku lub pojedynczej, silnej nieciągłości. W systemach pomiarowych analizuje się dlatego również rozkład strat wzdłuż włókna.

Tłumienie we włóknach krzemionkowych występuje z dwóch głównych powodów: światło jest pochłaniane przez sam materiał albo ulega rozproszeniu. Jeśli chodzi o absorpcję, sprawa sprowadza się do fizyki szkła. Winne są temu przejścia elektronowe i drgania samych wiązań w amorficznej strukturze szkła. Dodatkowe piki występujace w widmie tłumienia to efekt zanieczyszczeń, między innymi z obecności grup hydroksylowych. W nowoczesnych włóknach telekomunikacyjnych ten problem ma marginalny wpływ, jednak zależność strat od długości fali to wciąż nieodłączna cecha materiału i geometrii światłowodu [75, 76].

Przy krótszych długościach fali udział strat Rayleigha jest większy. Ich wartość maleje w przybliżeniu zgodnie z zależnością $1/\lambda^4$ [75, 76]. Źródłem tego rozpraszania są mikroskopowe zmiany gęstości i składu szkła powstające podczas chłodzenia w procesie produkcji. Chociaż niejednorodności te są mniejsze od długości fali, to nadal rozpraszają część promieniowania biegnącego przez włókno.

Rozpraszanie Rayleigha w naszym przypadku nie jest rozpatrywane wyłącznie jako niekorzystna utrata mocy. Część rozproszonego promieniowania propaguje się w kierunku przeciwnym do kierunku sygnału wejściowego i może zostać zarejestrowana przez układ pomiarowy. W czujnikach rozłożonych światło rozproszone wstecznie służy do obserwowania zmian zachodzących lokalnie wzdłuż włókna. W przypadku metod koherentnych wykorzystywany jest charakterystyczny wzór interferencyjny powstający w wyniku nakładania się promieniowania pochodzącego od wielu przypadkowo rozmieszczonych centrów rozpraszania [79, 86]. Rozpraszanie stanowi zatem jednocześnie składnik tłumienia i fizyczną podstawę uzyskania informacji pomiarowej.

Oprócz strat materiałowych występują również straty związane ze zmianą geometrii światłowodu. Ich źródłem może być wyraźne zakrzywienie całego włókna, określane jako makrozgięcie, albo niewielkie, lokalne odchylenia jego osi, nazywane mikrozgięciami. Oba zjawiska prowadzą do utraty części mocy modu prowadzonego, różnią się jednak skalą przestrzenną, mechanizmem powstawania i sposobem opisu.

Zawinięcie światłowodu w pętle, nawinięcie go na element o małej średnicy lub wymuszone przeprowadzenie po łuku może prowadzić do powstania makrozgięcia. Promień takiego zakrzywienia jest wprawdzie znacznie większy od średnicy rdzenia, ale może już zmienić warunki prowadzenia promieniowania. Część straty pojawia się na granicy odcinka prostego i wygiętego, gdzie rozkłady pola nie są ze sobą w pełni zgodne. Na dalszej części łuku dochodzi natomiast do stopniowego przechodzenia energii z modu prowadzonego do modów przeciekowych i radia-

cyjnych [75].

Zakrzywienie włókna zmienia warunki prowadzenia modu podstawowego i może powodować dodatkowe straty promieniowania. W modelu włókna zgiętego mod prowadzony staje się modem nieszczelnym, sprzężonym z modami radiacyjnymi. Im mniejszy jest promień zgięcia włókna, tym bliżej rdzenia znajduje się granica, poza którą część prowadzonego promieniowania wydostaje się z włókna. Wielkość tych strat zależy nie tylko od promienia zgięcia, lecz również od długości fali, średnicy pola modu oraz profilu współczynnika załamania. Włókna, w których pole modu podstawowego jest silniej ograniczone do rdzenia, a jego składowa zanikająca szybciej maleje w płaszczu, wykazują na ogół mniejszą wrażliwość na makrozgięcia [75].

Mikrozgięcia mają znacznie mniejszą skalę. Są to drobne, lokalne odchylenia osi włókna, których amplituda oraz rozmieszczenie mogą zmieniać się w sposób przypadkowy wzdłuż jego długości. Światłowód może pozostać w przybliżeniu prosty w skali makroskopowej, a jednocześnie zawierać liczne niewielkie deformacje wystarczające do zaburzenia propagacji. Marcuse określił szerszą grupę takich zjawisk mianemnmikrodeformacji. Termin ten obejmuje zarówno mikrozgięcia osi, jak i przypadkowe zmiany geometrii przekroju włókna [87].

Lokalna zmiana przebiegu osi zaburza rozkład pola modu podstawowego. Część jego mocy może zostać sprzężona z modami, które nie są skutecznie prowadzone wzdłuż rdzenia. Energia przeniesiona do tych modów jest następnie rozpraszana lub pochłaniana w zewnętrznych obszarach światłowodu. Wielkość powstających strat zależy zarówno od amplitudy i skali przestrzennej mikrodeformacji, jak i od właściwości falowodowych światłowodu, w tym profilu współczynnika załamania, rozmiaru pola modu oraz długości fali. Ważne jest również przestrzenne rozmieszczenie zaburzeń. Z tego względu deformacje o podobnej amplitudzie mogą prowadzić do różnych strat, jeżeli różnią się charakterystyczną skalą przestrzenną [75, 87].

Powstawanie mikrozgięć jest ściśle powiązane z mechanicznym otoczeniem włókna. Siły zewnętrzne nie oddziałują zazwyczaj bezpośrednio na szkło, lecz są przekazywane przez powłokę polimerową. Znaczenie mają jej grubość, moduł sprężystości, jednorodność oraz lokalne różnice wymiarów. Dodatkowe zaburzenia mogą wynikać z obecności cząstek zanieczyszczeń w powłoce, nierówności powierzchni otaczającej światłowód albo niejednorodnego nacisku [75, 80]. W przypadku włókna zintegrowanego z kompozytem analogiczny mechanizm może wystąpić wtedy, gdy materiał otaczający wywiera na powłokę nierównomierny nacisk wzdłuż osi sensora. Nie wymaga to trwałego uszkodzenia szkła; sama lokalna zmiana przebiegu prowadnicy może już zwiększyć tłumienie [85]. Podatność światłowodu na mikrozgięcia rzadko jest cechą samego szkła kwarcowego. Transfer sił z otoczenia przebiega przez powłokę polimerową, a parametry takie jak moduł Younga, grubość czy jednorodność kształtują ostateczne odkształcenie osi rdzenia. Zdolność tej warstwy do mechanicznego odsprzęgania włókna nie musi przy tym pozostawać stała. Lu i współautorzy wykazali, że spadek temperatury usztywnia wewnętrzną powłokę akrylanową i ułatwia transfer odkształceń do szkła [79]. Mechaniczna rola powłoki, a wraz z nią warunki powstawania mikrozgięć, może zmieniać się w całym zakresie pracy czujnika [80].

Dla systemów pomiaru rozłożonego zaburzenia te nie sprowadzają się do spadku całkowitej mocy na końcu toru. Na każdym mikrozgięciu część energii modu podstawowego sprzęga się

z modami płaszczowymi, przeciekowymi lub radiacyjnymi i zostaje utracona [75, 87]. Zmniejsza to poziom sygnału rozproszonego wstecznie, a stosunek sygnału do szumu może pogarszać się w odcinkach położonych za miejscem zaburzenia [86].

W układach kompozytowych degradacja sygnału może przebiegać bez makroskopowo widocznego zakrzywienia. Włókno zintegrowane z matrycą bywa w dużym przybliżeniu prostoliniowe względem osi laminatu, a mimo to podlega stratom mikrozgięciowym. Przyczyną jest mikrostruktura materiału wzmacnianego. Podczas produkcji może dochodzić do miejscowych różnic w ułożeniu rovingu, nierównomiernego zagęszczenia przekroju oraz kontaktu z elementami prowadzącymi, co tworzy niejednorodne pole nacisków [85, 87]. Lokalny nacisk wywierany na powłokę może prowadzić do niewielkich odchyleń osi włókna. Jeżeli ich amplituda i skala przestrzenna sprzyjają sprzęganiu mocy z modu podstawowego, mogą one powodować lokalny wzrost tłumienia i w konsekwencji ograniczać zdolność pomiarową układu.

Osobnym źródłem lokalnych strat w torze pomiarowym są połączenia spawane. Choć stapianie włókien łukiem elektrycznym tworzy ciągłą strukturę szkła, w której zanika warstwa powietrza odpowiedzialna za odbicie Fresnela [76, 88], transfer mocy rzadko pozostaje całkowicie bezstratny. Fizyka tego zjawiska sprowadza się do warunku sprzężenia, w którym moc opuszczająca pierwsze włókno musi wpasować się w rozkład pola modu włókna odbierającego. Każde niedopasowanie tych rozkładów, wymuszone poprzecznym przesunięciem rdzeni, ich kątowym odchyleniem, lokalnym wygięciem osi czy różnicą średnic pola modu, wyprowadza część mocy poza układ prowadzący [76]. Problem ten jest znaczny w światłowodach jednomodowych, w których średnica pola modu jest rzędu kilku do kilkunastu mikrometrów. W praktyce oznacza to, że zrównanie zewnętrznych płaszczy obu włókien w spawarce nie gwarantuje geometrycznej pokrywalności ich rdzeni, a co za tym idzie - bezstratnej propagacji sygnału.

Na wynik połączenia wpływa również precyzja wykonania podczas procesu spawania. Z tego względu spawy wykonywane przy pozornie jednakowych ustawieniach mogą różnić się wartością tłumienia. Kawata wykazał, że końcowe przesunięcie osi rdzeni jest wypadkową błędu ustawienia przed rozpoczęciem spawania oraz ruchu poprzecznego występującego już podczas topienia szkła. Ruch ten jest związany z napięciem powierzchniowym, parametrami łuku elektrycznego oraz stanem powierzchni czołowych. Niedokładne przygotowanie końców włókien, obejmujące między innymi ich nachylenie, zagłębienia lub mikrofałdy, wprowadzało dodatkową, losową składową przemieszczenia [88]. Pojedynczy spaw o niewielkiej stracie zazwyczaj nie uniemożliwia prowadzenia pomiaru. Powoduje jednak obniżenie mocy docierającej do dalszej części sensora oraz w równym stopniu osłabia sygnał powracający do interrogatora. W metodach reflektometrycznych strata uwidacznia się więc w obu kierunkach propagacji. Wraz ze wzrostem liczby połączeń zmniejsza się dostępna rezerwa dynamiczna układu, a sygnał z odległych odcinków może zbliżać się do poziomu szumu [76, 86].

W przypadku pomiaru prowadzonego na krótkim odcinku kompozytu sama wartość straty pojedynczego spawu może nie mieć znaczenia. Znaczenie ma jednak jego położenie. Spaw znajdujący się przed właściwym odcinkiem pomiarowym obniży poziom sygnału na całej dalszej długości światłowodu. Jeżeli jest umieszczony wewnątrz badanego elementu, stanowi

dodatkowo lokalną niejednorodność geometryczną i mechaniczną. Włączenie spawu w obszar osadzany w kompozycie wymaga więc nie tylko oceny tłumienia, ale także zabezpieczenia miejsca, z którego wcześniej usunięto powłokę.

Wpływ uszkodzenia światłowodu należy rozpatrywać oddzielnie w aspekcie mechanicznym i optycznym. Szkło krzemionkowe zachowuje się sprężyście aż do momentu kruchego zerwania. Jego rzeczywista wytrzymałość jest ograniczana przez mikroskopijne wady powierzchniowe, które działają jak koncentratory naprężeń. Obecność zarysowania lub mikropęknięcia nie oznacza utraty ciągłości optycznej, ale z dużym prawdopodobieństwem obniża bezpieczny poziom obciążenia i zwiększa podatność włókna na późniejsze zerwanie [74]. Lokalna deformacja może powodować dodatkowe tłumienie analogiczne do strat mikrozgięciowych [87]. Nieciągłość współczynnika załamania może natomiast wprowadzać odbicie, a silny defekt może skutkować jednoczesnym wzrostem straty i reflektancji. W przebiegu reflektometrycznym takie zdarzenie jest widoczne jako lokalny skok poziomu sygnału, impuls odbiciowy albo połączenie obu efektów [76].

Całkowite zerwanie światłowodu wyznacza fizyczny koniec toru pomiarowego. Sygnał może zostać odbity od powstałej powierzchni czołowej, natomiast informacje z odcinka znajdującego się za miejscem przerwania nie są już dostępne [76]. W czujniku osadzonym w kompozycie taki stan nie musi jednak wystąpić bez wcześniejszych oznak. Wzrost lokalnego tłumienia i pojawiające się pogorszenie stosunku sygnału do szumu mogą pojawić się wcześniej, jeżeli rozwijającemu się uszkodzeniu towarzyszą zgięcia albo zmiana stanu naprężenia włókna [78, 86, 87].

Uwzględniając powyższe, w interpretacji danych pomiarowych konieczne jest rozdzielenie dwóch grup zjawisk:

- spawy, zgięcia i uszkodzenia, które powodują przede wszystkim zmianę amplitudy, dodatkowe odbicia lub ograniczenie zakresu światłowodu,
- temperatura i odkształcenie, które wywołują przesunięcie fazowe albo widmowe, stanowiące właściwy sygnał pomiarowy.

Silne lub niejednorodne odkształcenie może równocześnie powodować pożądaną zmianę widma i niepożądane mikrozgięcie. Z tego względu zachowanie ciągłości transmisji nie jest jedynym kryterium poprawnej integracji światłowodu z kompozytem. W miarę możliwości powinno się kontrolować lokalne straty czy też wpływ temperatury na mechaniczne sprzężenie sensora z materiałem otaczającym [76, 78, 79, 86, 87].

2.1.3. Pomiar wykorzystujący rozpraszanie Rayleigha

Rozpraszanie Rayleigha w światłowodzie wynika z drobnych, przypadkowo rozmieszczonych niejednorodności szkła. W materiale krzemionkowym występują lokalne fluktuacje gęstości i właściwości optycznych, którym towarzyszą niewielkie zmiany przenikalności elektrycznej, a tym samym współczynnika załamania. Obszary te są znacznie mniejsze od długości fali propagowanego promieniowania i można je traktować jako liczne, słabe centra rozpraszające

rozmieszczone wzdłuż włókna [76, 86, 89].

Cechą tego zjawiska jest jego sprężysty charakter. Energia fotonu, a tym samym częstotliwość optyczna rozproszonego promieniowania, pozostaje niezmieniona. Pod tym względem mechanizm Rayleigha różni się od rozpraszania Ramana i Brillouina, w których dochodzi do przesunięcia częstotliwości [86].

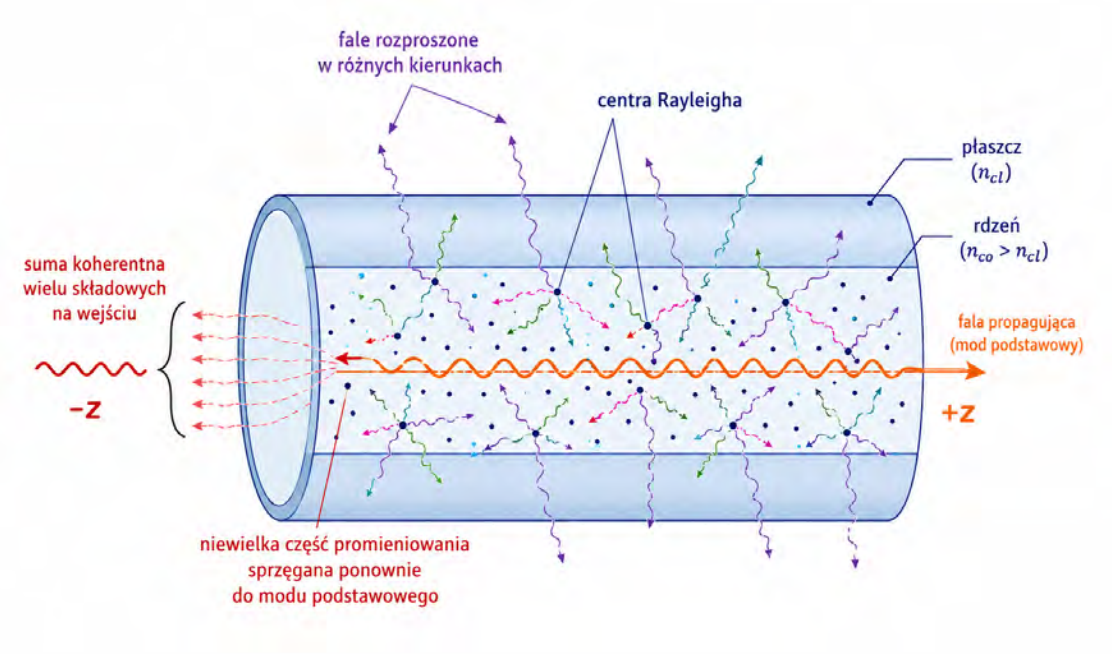
Niewielka część rozproszonego promieniowania sprzęga się z modem prowadzonym w kierunku wstecznym i propaguje ku wejściu światłowodu. Zjawisko to określa się jako wsteczne rozpraszanie Rayleigha (*Rayleigh backscattering*) i to właśnie ono stanowi sygnał wykorzystywany przez reflektometryczne systemy DFOS [89–91]. Brinkmeyer wykazał, że mikroskopowe niejednorodności można traktować jako indukowane oscylatory dipolowe, których promieniowanie częściowo wzbudza podstawowy mod światłowodu w kierunku wstecznym [90]. Nakazawa rozwinął ten opis, wiążąc poziom sygnału wstecznego z przestrzenną funkcją korelacji fluktuacji współczynnika załamania oraz ze sprzężeniem pola rozproszonego z modem prowadzonym [89]. Schemat powstawania i przechwytywania wstecznego sygnału Rayleigha przedstawiono na rys. 2-3.

Sygnał powracający z określonego odcinka włókna nie pochodzi przy tym od jednego centrum rozpraszania. W obrębie każdego fragmentu znajduje się bardzo duża liczba słabych, przypadkowo rozmieszczonych niejednorodności. Fale pochodzące od tych centrów docierają do wejścia światłowodu z różnymi fazami i sumują się koherentnie. Healey modelował włókno jako zbiór bardzo wielu krótkich segmentów. W obrębie każdego z nich fale rozproszone przez znajdujące się tam niejednorodności sumują się koherentnie, tworząc wypadkową amplitudę sygnału wstecznego dla danego segmentu [91]. Z punktu widzenia pomiaru istotny jest zatem nie sygnał generowany przez pojedynczą niejednorodność, lecz wynik interferencji bardzo dużej liczby słabych składowych.

W pomiarach koherentnych to relacje fazowe poszczególnych składowych pola rozproszonego wpływają na charakter rejestrowanego sygnału. Zależą one od położenia centrów rozpraszających oraz od drogi optycznej pomiędzy źródłem, danym fragmentem włókna i detektorem. Fale powracające z wielu niejednorodności nakładają się na siebie. Dla krótkiego odcinka światłowodu tworzą charakterystyczną i nieregularną odpowiedź amplitudowo-fazową o szumopodobnym przebiegu. Jej przebieg nie jest wprowadzany do włókna celowo. Powstaje w sposób naturalny wskutek mikroskopowych fluktuacji właściwości szkła [92, 93].

Choć rozmieszczenie centrów ma charakter przypadkowy, odpowiedź nie zmienia się losowo pomiędzy kolejnymi pomiarami. Po wytworzeniu włókna przestrzenny układ jego niejednorodności pozostaje zasadniczo stały, dlatego ten sam odcinek daje w niezmienionych warunkach powtarzalny przebieg rozproszenia. Froggatt i Gifford potwierdzili trwałość tej charakterystyki, porównując pomiary tego samego włókna wykonane po kilku latach oraz przy użyciu różnych urządzeń [93].

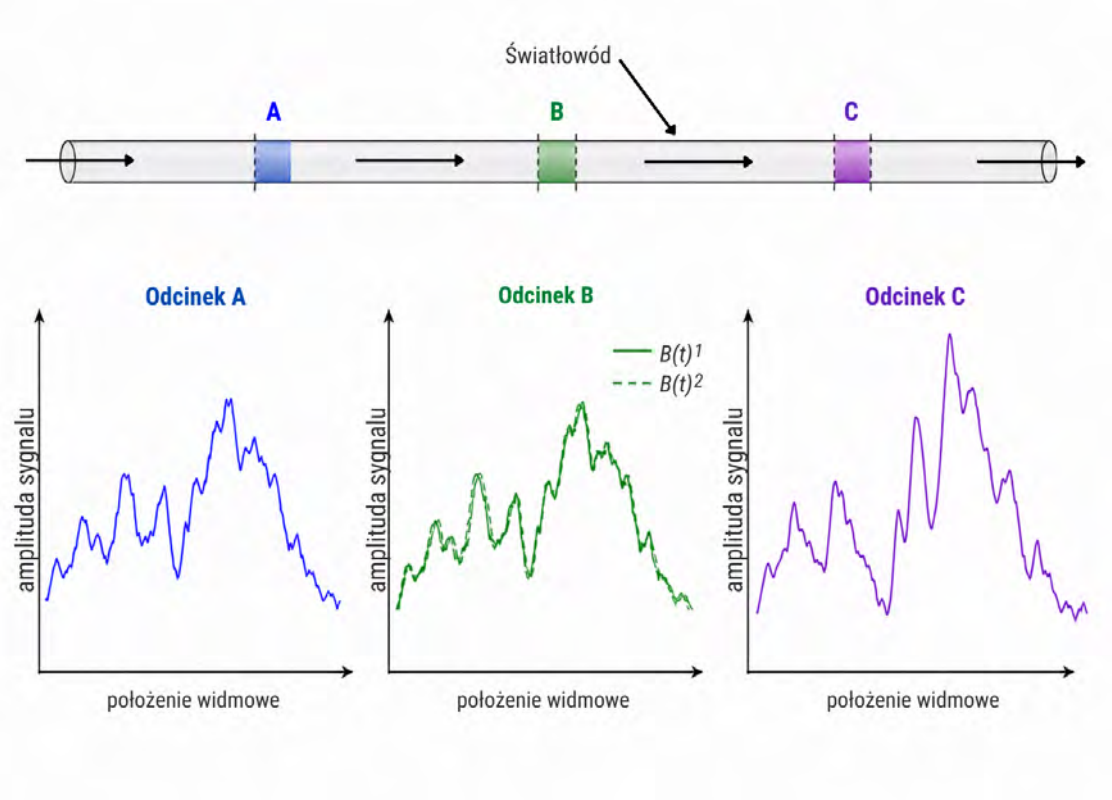
Poszczególne rejestracje różnią się na skutek szumu i właściwości aparatury, jednak zasadnicza struktura sygnału pozostaje zachowana i może pełnić funkcję lokalnego wzorca odniesienia. Taki charakter odpowiedzi pozwala opisywać krótki odcinek zwykłego światłowodu analogicznie



Rys. 2-3. *Schemat powstawania wstecznego sygnału Rayleigha w światłowodzie jednomodowym. Promieniowanie pochodzące od losowo rozmieszczonych niejednorodności materiału częściowo sprzęga się z modem prowadzonym i propaguje w kierunku wejścia włókna. Opracowanie własne na podstawie [86, 89–91].*

do bardzo słabej, losowej siatki Bragga (nie oznacza to obecności fizycznie zapisanej siatki FBG). Froggatt i Moore przedstawili model, w którym losowe zmiany współczynnika załamania wzdłuż osi włókna odpowiadają siatce o przypadkowej amplitudzie i fazie [92]. Jest to matematyczny sposób opisu odpowiedzi wynikającej z interferencji fal rozpraszanych na naturalnych niejednorodnościach szkła. Podobne ujęcie przedstawiają Palmieri i Schenato, traktując krótkie fragmenty włókna jako słabe, losowe reflektory o własnej odpowiedzi widmowej [86].

Charakterystyczny przebieg przypisany do danego fragmentu włókna określa się jako sygnaturę Rayleigha lub, bardziej obrazowo, jako jego „odcisk palca". Sąsiednie odcinki mają inne rozmieszczenie niejednorodności, dlatego różnią się również przebiegiem odpowiedzi. Dla wybranego fragmentu jego cechy charakterystyczne pozostają powtarzalne w niezmienionych warunkach optycznych i mechanicznych [93]. Schematyczne porównanie lokalnych sygnatur różnych odcinków włókna oraz powtarzalności odpowiedzi tego samego odcinka przedstawiono na rys. 2-4. Dzięki temu pomiar rozłożony nie wymaga wykonywania osobnych struktur czujnikowych w kolejnych punktach włókna. Funkcję lokalnego znacznika pełni jego naturalna struktura.



Rys. 2-4. *Schematyczne przedstawienie lokalnej sygnatury rozproszenia Rayleigha. Odcinki A, B i C tego samego światłowodu wykazują różne przebiegi odpowiedzi wynikające z losowego rozkładu niejednorodności materiału. Dla tego samego odcinka B charakterystyki zarejestrowane w dwóch pomiarach, $B(t_1)$ i $B(t_2)$, pozostają zbliżone w niezmienionych warunkach. Opracowanie własne na podstawie [92, 93].*

Punktem wyjścia jest odpowiedź zarejestrowana dla przyjętego stanu odniesienia, na przykład przed rozpoczęciem obciążania próbki. Kolejne pomiary wykonuje się już po zmianie warunków, a sygnał z danego fragmentu włókna porównuje z jego wcześniejszą charakterystyką. Taką zasadę zastosowali Froggatt i Moore w eksperymencie z 1998 r. Najpierw zarejestrowali odpowiedź nieobciążonego włókna, a następnie powtórzyli pomiar po jego odkształceniu [92].

Rozciągnięcie włókna zmienia odległości pomiędzy niejednorodnościami odpowiedzialnymi za rozpraszanie, natomiast efekt fotoelastyczny powoduje zmianę efektywnego współczynnika załamania. W lokalnej odpowiedzi Rayleigha obserwuje się to przede wszystkim jako przesunięcie widmowe. Zmiana temperatury wpływa natomiast zarówno na długość optyczną analizowanego fragmentu wskutek rozszerzalności cieplnej, jak i na jego współczynnik załamania poprzez efekt termooptyczny [79, 86, 94]. Przy niewielkich zmianach oraz dostatecznie jednorodnych warunkach w analizowanym odcinku zależność tę można zapisać w uproszczonej postaci:

$$\frac{\Delta\lambda_{\mathrm{R}}}{\lambda_{\mathrm{R}}} = -\frac{\Delta\nu_{\mathrm{R}}}{\nu_{\mathrm{R}}} = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon. \tag{2-9}$$

gdzie:

$\Delta\lambda_{\mathrm{R}}$ – zmiana długości fali odpowiadająca przesunięciu lokalnej charakterystyki Rayleigha;

λ_{R} – długość fali odpowiadająca analizowanej lokalnej charakterystyce Rayleigha;

$\Delta\nu_{\mathrm{R}}$ – zmiana częstotliwości optycznej odpowiadająca przesunięciu lokalnej charakterystyki Rayleigha;

ν_{R} – częstotliwość optyczna odpowiadająca analizowanej lokalnej charakterystyce Rayleigha;

K_T – współczynnik względnej czułości temperaturowej;

ΔT – zmiana temperatury;

K_ε – współczynnik względnej czułości odkształceniowej;

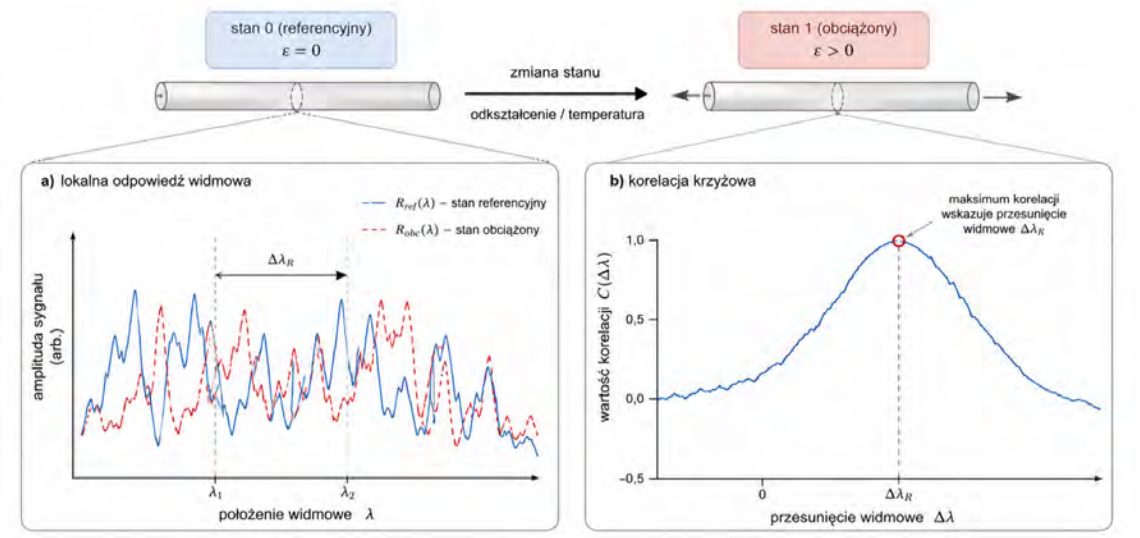
ε – odkształcenie wzdłużne światłowodu [86, 94].

Równanie to wskazuje na współczułość temperaturowo-odkształceniową. Jeżeli temperatura nie jest znana albo kontrolowana niezależnie, samo przesunięcie widma nie pozwala jednoznacznie określić, jaka część zmiany wynika z odkształcenia [79, 94].

Przesunięcia dwóch nieregularnych charakterystyk nie wyznacza się przez śledzenie pojedynczego maksimum widma. W sygnaturze Rayleigha nie występuje jeden wyróżniony pik analogiczny do maksimum klasycznej siatki FBG. Porównuje się zamiast tego całe lokalne przebiegi. Froggatt i Moore zastosowali korelację krzyżową widma odcinka obciążonego z widmem tego samego odcinka zarejestrowanym bez przyłożonego odkształcenia. Położenie maksimum funkcji korelacji wskazywało wielkość przesunięcia widmowego [92]. Schemat tej procedury przedstawiono na rys. 2-5. Pokazano na nim lokalną odpowiedź widmową w stanie referencyjnym i obciążonym oraz odpowiadającą im funkcję korelacji krzyżowej. Tę samą zasadę porównywania lokalnej charakterystyki Rayleigha ze stanem odniesienia wykorzystują współczesne wysokorozdzielcze systemy pomiaru rozłożonego oparte na reflektometrii OFDR [79, 86, 93].

Na rys. 2-5a przez $R_{\mathrm{ref}}(\lambda)$ oznaczono lokalną odpowiedź widmową wybranego fragmentu światłowodu, która symuluje rejestracje w stanie referencyjnym, natomiast $R_{\mathrm{obc}}(\lambda)$ odpowiada charakterystyce tego samego fragmentu po zmianie jego stanu. W przedstawionym schemacie stan referencyjny przyjęto jako $\varepsilon = 0$, a stan obciążony jako $\varepsilon > 0$. Symbol λ oznacza długość fali, natomiast $\Delta\lambda_{\mathrm{R}}$ określa przesunięcie lokalnej sygnatury Rayleigha pomiędzy obydwoma stanami. Wartość tego przesunięcia wyznacza się za pomocą funkcji korelacji krzyżowej $C(\Delta\lambda)$, obliczanej dla kolejnych wartości względnego przesunięcia widmowego $\Delta\lambda$. Maksimum funkcji korelacji odpowiada wartości $\Delta\lambda_{\mathrm{R}}$, dla której charakterystyki $R_{\mathrm{ref}}(\lambda)$ i $R_{\mathrm{obc}}(\lambda)$ wykazują najlepsze dopasowanie.

Samo wyznaczenie przesunięcia lokalnej sygnatury Rayleigha nie jest jeszcze równoznaczne z pomiarem rozłożonym. Aby otrzymać profil odkształcenia w funkcji położenia, każdą analizowaną odpowiedź trzeba przypisać do określonego fragmentu światłowodu. W układach optycznej reflektometrii w dziedzinie częstotliwości (OFDR, ang. *optical frequency domain reflectometry*) informacja ta wynika z pomiaru interferometrycznego prowadzonego podczas przestrajania częstotliwości źródła. Promieniowanie emitowane przez przestrajany laser jest roz-



Rys. 2-5. *Zasada określania zmiany stanu światłowodu na podstawie lokalnej sygnatury Rayleigha: a) przesunięcie charakterystyki względem stanu odniesienia, b) wyznaczenie przesunięcia na podstawie maksimum funkcji korelacji krzyżowej. Opracowanie własne na podstawie [86, 92].*

dzielane pomiędzy tor referencyjny i pomiarowy, natomiast fala powracająca z włókna interferuje z falą odniesienia. Ponieważ składowe rozproszone w różnych miejscach przebywają różne drogi optyczne, docierają do detektora z różnymi opóźnieniami [86, 94].

W przypadku gdy przestrajanie źródła rozpatruje się w dziedzinie częstotliwości optycznej i w analizowanym zakresie można je przybliżyć przebiegiem liniowym, gdzie chwilową częstotliwość promieniowania można zapisać jako:

$$\nu(t) = \nu_0 + \gamma t, \tag{2-10}$$

gdzie:

- $\nu(t)$ – chwilowa częstotliwość optyczna promieniowania emitowanego przez laser w chwili t;
- ν_0 – częstotliwość optyczna przyjęta jako początek analizowanego skanu;
- γ – szybkość przestrajania częstotliwości optycznej źródła;
- t – czas liczony od początku przestrajania.

Szybkość przestrajania częstotliwości optycznej określa zależność:

$$\gamma = \frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}t}, \tag{2-11}$$

gdzie:

- ν – częstotliwość optyczna promieniowania;
- t – czas.

Wielkość γ jest wyrażana w $\mathrm{Hz/s}$.

Promieniowanie rozproszone w punkcie położonym w odległości z wzdłuż światłowodu dociera do detektora z opóźnieniem względem promieniowania propagującego w torze referencyjnym. Opóźnienie to oznaczono przez τ_z. Można je ogólnie zapisać jako:

$$\tau_z = \frac{\Delta L_{\mathrm{opt}}(z)}{c}, \tag{2-12}$$

gdzie:

- τ_z – różnica czasu propagacji pomiędzy sygnałem pochodzącym z położenia z a sygnałem referencyjnym;
- $\Delta L_{\mathrm{opt}}(z)$ – różnica dróg optycznych odpowiadająca różnicy opóźnień grupowych pomiędzy torem pomiarowym i referencyjnym dla położenia z;
- z – położenie analizowanego miejsca wzdłuż światłowodu;
- c – prędkość światła w próżni.

W przypadku pomiaru wstecznego światło musi dotrzeć do analizowanego fragmentu włókna, a następnie powrócić do układu detekcyjnego. Jeżeli stałą różnicę długości ramienia referencyjnego uwzględni się w położeniu początku układu współrzędnych, opóźnienie związane z odległością z można w uproszczeniu przedstawić jako:

$$\tau_z \approx \frac{2 n_{\mathrm{g}} z}{c}, \tag{2-13}$$

gdzie:

- τ_z – opóźnienie optyczne sygnału pochodzącego z położenia z względem toru referencyjnego;
- n_{g} – grupowy współczynnik załamania światłowodu;
- z – położenie analizowanego miejsca wzdłuż światłowodu;
- c – prędkość światła w próżni.

Czynnik 2 w równaniu (2-13) wynika z dwukrotnego przejścia promieniowania przez analizowaną drogę, czyli od wejścia włókna do miejsca rozpraszania oraz z powrotem. W czasie potrzebnym na pokonanie różnicy dróg optycznych częstotliwość przestrajanego lasera zmienia się o wartość zależną od τ_z. Po interferencji pola powracającego z włókna z polem referencyjnym na fotodetektorze powstaje więc sygnał dudnieniowy. Dla liniowego przestrajania jego częstotliwość można zapisać jako:

$$f_{\mathrm{b}}(z) = \gamma \tau_z, \tag{2-14}$$

gdzie:

$f_{\mathrm{b}}(z)$ – częstotliwość dudnień odpowiadająca promieniowaniu rozproszonemu w położeniu z;

γ – szybkość przestrajania częstotliwości optycznej lasera;

τ_z – opóźnienie optyczne sygnału pochodzącego z tego położenia względ-

dem toru referencyjnego.

Po podstawieniu zależności (2-13) otrzymuje się bezpośredni związek pomiędzy częstotliwością dudnień, a położeniem wzdłuż światłowodu:

$$f_{\mathrm{b}}(z) \approx \frac{2n_{\mathrm{g}}\gamma}{c} z, \tag{2-15}$$

gdzie:

- $f_{\mathrm{b}}(z)$ – częstotliwość dudnień odpowiadająca promieniowaniu rozproszonemu w położeniu z;
- n_{g} – grupowy współczynnik załamania światłowodu;
- γ – szybkość przestrajania częstotliwości optycznej źródła;
- c – prędkość światła w próżni;
- z – położenie analizowanego miejsca wzdłuż światłowodu.

Po przekształceniu można natomiast zapisać:

$$z \approx \frac{c}{2n_{\mathrm{g}}\gamma} f_{\mathrm{b}}, \tag{2-16}$$

gdzie:

- z – położenie analizowanego miejsca wzdłuż światłowodu;
- c – prędkość światła w próżni;
- f_{b} – częstotliwość dudnień odpowiadająca analizowanej składowej sygnału;
- n_{g} – grupowy współczynnik załamania światłowodu;
- γ – szybkość przestrajania częstotliwości optycznej źródła.

Zależność (2-16) pokazuje sens lokalizacji przestrzennej w OFDR. Poszczególne miejsca światłowodu nie są identyfikowane bezpośrednio na podstawie czasu powrotu krótkiego impulsu, lecz poprzez częstotliwości składowych obecnych w sygnale interferencyjnym. Rozpraszanie pochodzące z dalszego położenia wiąże się z większą różnicą drogi optycznej, a więc z większym opóźnieniem τ_z. Przy ustalonej szybkości przestrajania γ odpowiada mu w konsekwencji inna częstotliwość dudnień. Analiza częstotliwościowa interferogramu pozwala zatem przekształcić informację zawartą w sygnale detektora na położenie wzdłuż włókna [95].

Interferogram rejestrowany przez układ pomiarowy zawiera jednocześnie składowe pochodzące z wielu miejsc światłowodu. Każdej z nich odpowiada inna częstotliwość dudnień, a tym samym inne opóźnienie optyczne. Składowe te są rozdzielane dzięki zastosowaniu transformacji Fouriera. Jeżeli sygnał detektora zapisany podczas przestrajania źródła oznaczy się przez $I(\nu)$, pierwszy etap przetwarzania można przedstawić w postaci:

$$\widetilde{I}(\tau) = \mathcal{F}_{\nu\to\tau}\left\{I(\nu)\right\}, \tag{2-17}$$

gdzie:

- $I(\nu)$ – sygnał interferometryczny zarejestrowany przez fotodetektor w funkcji częstotliwości optycznej źródła;
- $\mathcal{F}_{\nu\to\tau}$ – transformacja Fouriera przeprowadzająca sygnał z dziedziny częstotliwości optycznej do dziedziny opóźnienia;
- $\widetilde{I}(\tau)$ – odpowiedź układu uporządkowana względem opóźnienia optycznego τ.

Po wykonaniu transformacji otrzymana odpowiedź jest uporządkowana względem opóźnienia optycznego τ. W celu przypisania jej poszczególnych fragmentów do określonych miejsc światłowodu opóźnienie przelicza się na odległość z wykorzystaniem grupowego współczynnika załamania. Dla wcześniej przyjętego początku układu współrzędnych zależność ta przyjmuje postać:

$$z \approx \frac{c\tau}{2n_{\mathrm{g}}}, \tag{2-18}$$

gdzie:

- z – położenie analizowanego miejsca wzdłuż światłowodu, liczone od przyjętego początku układu współrzędnych;
- c – prędkość światła w próżni;
- τ – opóźnienie optyczne odpowiadające analizowanej składowej sygnału względem toru referencyjnego;
- n_{g} – grupowy współczynnik załamania światłowodu.

W wyniku transformacji otrzymuje się przestrzennie rozdzieloną odpowiedź wstecznego rozpraszania Rayleigha, którą można zapisać jako $R(z)$. Kreger i współautorzy opisują ten etap jako wyznaczenie odpowiedzi Rayleigha w funkcji długości światłowodu na podstawie transformacji Fouriera danych rejestrowanych podczas przestrajania źródła [94].

Przetwarzanie danych obejmuje również kalibrację skanu częstotliwościowego oraz kompensację jego nieliniowości. Nieliniowe przestrajanie źródła powoduje odchylenia częstotliwości dudnień od wartości odpowiadających idealnemu przebiegowi liniowemu, co prowadzi do pogorszenia rozdzielczości przestrzennej układu [95].

Profil $R(z)$ nie jest jeszcze profilem odkształcenia. Do dalszej analizy wybiera się określony odcinek włókna i odtwarza odpowiadającą mu lokalną charakterystykę w dziedzinie częstotliwości optycznej. Operację wykonuje się zarówno dla stanu odniesienia, jak i dla pomiaru po zmianie warunków. Procedura ta jest opisywana zarówno w pracach stanowiących podstawę metody, jak i w jej późniejszych rozwinięciach [92, 94, 96].

Na tym etapie należy rozróżnić dwie odrębne wielkości przestrzenne. Pierwsza opisuje zdolność układu OFDR do rozróżniania odpowiedzi pochodzących z blisko położonych miejsc włókna. Druga jest związana z długością odcinka wykorzystywanego do wyznaczenia pojedynczej wartości przesunięcia widmowego, a w konsekwencji odkształcenia. Wielkości te nie są równoważne, pomimo że obie odnoszą się do przestrzennego charakteru pomiaru.

Teoretyczna rozdzielczość przestrzenna OFDR określa, jak blisko siebie mogą znajdować

się dwie składowe odpowiedzi optycznej, aby układ pozostawał zdolny do ich przestrzennego rozróżnienia. Jej podstawowe ograniczenie wynika ze skończonego zakresu przestrajania źródła. W przybliżeniu można ją zapisać jako:

$$\delta z_{\mathrm{OFDR}} \approx \frac{c}{2 n_{\mathrm{g}} \Delta \nu_{\mathrm{scan}}}, \tag{2-19}$$

gdzie:

δz_{OFDR} – teoretyczna rozdzielczość przestrzenna pomiaru OFDR;
c – prędkość światła w próżni;
n_{g} – grupowy współczynnik załamania włókna;
$\Delta \nu_{\mathrm{scan}}$ – całkowity zakres przestrajania częstotliwości optycznej źródła.

Zakres ten jest równy różnicy pomiędzy częstotliwością końcową i początkową skanu:

$$\Delta \nu_{\mathrm{scan}} = \left| \nu_{\mathrm{max}} - \nu_{\mathrm{min}} \right|, \tag{2-20}$$

gdzie:

$\Delta \nu_{\mathrm{scan}}$ – całkowity zakres przestrajania częstotliwości optycznej źródła;
ν_{max} – maksymalna częstotliwość optyczna osiągana podczas skanu;
ν_{min} – minimalna częstotliwość optyczna osiągana podczas skanu.

Zakres przestrajania źródła jest często podawany w jednostkach długości fali. Korzystając z zależności $\nu = c/\lambda$, można przeliczyć go na odpowiadający zakres częstotliwości:

$$\Delta \nu_{\mathrm{scan}} = c \left| \frac{1}{\lambda_{\mathrm{min}}} - \frac{1}{\lambda_{\mathrm{max}}} \right|, \tag{2-21}$$

gdzie:

$\Delta \nu_{\mathrm{scan}}$ – całkowity zakres przestrajania częstotliwości optycznej źródła;
c – prędkość światła w próżni;
λ_{min} – minimalna długość fali osiągana podczas skanu;
λ_{max} – maksymalna długość fali osiągana podczas skanu.

Zależność (2-21) odnosi się do całkowitego zakresu skanu i nie wymaga założenia liniowej zależności pomiędzy częstotliwością a długością fali.

Z równania (2-19) wynika, że zwiększanie zakresu przestrajania prowadzi do zmniejszenia δz_{OFDR}, a więc poprawia zdolność przestrzennego rozdzielania odpowiedzi. Zależność ta jest opisywana jako teoretyczne ograniczenie rozdzielczości OFDR [95]. W układzie rzeczywistym sama szerokość skanu nie przesądza jednak o osiągnięciu wartości teoretycznej. Nieliniowość przestrajania, szum fazowy źródła oraz błędy kalibracji powodują poszerzenie odpowiedzi w dziedzinie przestrzennej i mogą pogorszyć efektywną rozdzielczość.

Wysoka wartość rozdzielczości optycznej nie oznacza, że odkształcenie jest wyznaczane niezależnie z fragmentów włókna o długości δz_{OFDR}. Do określenia przesunięcia lokalnej sygnatury potrzebna jest odpowiednio długa część przestrzennego wzorca Rayleigha [94].

Długość fragmentu włókna uczestniczącego w wyznaczeniu pojedynczej wartości przesunięcia określa się jako długość bazową pomiaru (*gauge length*). W dalszej części oznaczono ją przez L_g. Wynik przypisany do określonego położenia z_0 powstaje więc na podstawie sygnału znajdującego się w pewnym otoczeniu tego punktu, przykładowo:

$$z \in \left[z_0 - \frac{L_\mathrm{g}}{2}, z_0 + \frac{L_\mathrm{g}}{2} \right], \tag{2-22}$$

gdzie:

- z – współrzędna położenia wzdłuż światłowodu;
- z_0 – położenie środka analizowanego okna;
- L_g – długość bazowa pomiaru (*gauge length*).

Wartość $\varepsilon(z_0)$ nie odnosi się więc do pojedynczego punktu włókna, lecz do sygnału pochodzącego ze skończonego odcinka skupionego wokół z_0. Taką interpretację parametru *gage length* przyjęto również w dokumentacji ODiSI-B, gdzie określa on długość włókna wykorzystywaną do wyznaczenia jednej wartości odkształcenia lub temperatury [192].

Kolejne okna analizy mogą częściowo na siebie zachodzić. Odległość pomiędzy ich środkami wyznacza krok próbkowania przestrzennego, określany w dokumentacji ODiSI jako *gage pitch*. W dalszym zapisie wielkość tę oznaczono symbolem p_g. Położenia kolejnych okien można zapisać jako:

$$z_k = z_0 + k\, p_\mathrm{g}, \qquad k = 0, 1, 2, \ldots, \tag{2-23}$$

gdzie:

- z_k – położenie środka k-tego okna analizy;
- z_0 – położenie środka pierwszego analizowanego okna;
- k – numer kolejnego wyniku, przyjmujący wartości $0, 1, 2, \ldots$;
- p_g – krok próbkowania przestrzennego, czyli odległość pomiędzy środkami dwóch kolejnych okien.

Jeżeli

$$p_\mathrm{g} < L_\mathrm{g}, \tag{2-24}$$

sąsiednie okna częściowo wykorzystują ten sam fragment włókna. Stopień ich nakładania można opisać zależnością:

$$\eta = 1 - \frac{p_\mathrm{g}}{L_\mathrm{g}}, \tag{2-25}$$

gdzie:

η – względna część długości wspólna dla dwóch kolejnych okien analizy;

p_{g} – krok próbkowania przestrzennego, określający odległość pomiędzy środkami kolejnych okien;

L_{g} – długość bazowa pomiaru.

Zależność ta obowiązuje dla $p_{\mathrm{g}} \leq L_{\mathrm{g}}$. Dla $p_{\mathrm{g}} = L_{\mathrm{g}}/2$ otrzymuje się $\eta = 0{,}5$, czyli nakładanie wynoszące 50%.

Taka sytuacja występuje przykładowo w systemie ODiSI-B. W trybie wysokiej rozdzielczości dokumentacja podaje $L_{\mathrm{g}} = 1{,}30$ mm oraz $p_{\mathrm{g}} = 0{,}65$ mm. Dla konfiguracji wykorzystującej długość bazową $5{,}22$ mm odstęp pomiędzy sąsiednimi wynikami wynosi natomiast $2{,}61$ mm [192]. Sąsiednie okna wykorzystują więc częściowo te same dane.

Rozróżnienie to ma znaczenie podczas oceny wyników. Gęsta siatka punktów nie jest równoznaczna z równie wysoką zdolnością rozróżniania niezależnych zmian pola odkształcenia. Jeżeli wynik jest raportowany co $0{,}65$ mm, ale powstaje z okna o długości $1{,}30$ mm, sąsiednie wartości nie reprezentują dwóch całkowicie niezależnych fragmentów światłowodu. Z tego powodu odstęp próbkowania, długość bazowa oraz rozdzielczość przestrzenna reflektometru powinny być podawane i interpretowane oddzielnie.

Długość bazowa wpływa nie tylko na przestrzenny charakter wyniku, ale również na jakość korelacji. Zwiększenie L_{g} powoduje, że w analizie uczestniczy większa część losowego wzorca Rayleigha. Przy stałej gęstości danych oznacza to większą liczbę punktów N dostępnych do porównania lokalnych charakterystyk. Froggatt i Moore wykazali, że stosunek sygnału do szumu funkcji korelacji zwiększa się wraz z liczbą wykorzystanych punktów, w przybliżeniu proporcjonalnie do $\sqrt{N}$ [92]:

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{corr}} \propto \sqrt{N}, \tag{2-26}$$

gdzie:

$\mathrm{SNR}_{\mathrm{corr}}$ – stosunek sygnału do szumu funkcji korelacji krzyżowej wykorzystywanej do określenia przesunięcia lokalnej sygnatury Rayleigha;

N – liczba punktów danych zawartych w analizowanym fragmencie i wykorzystywanych podczas obliczania korelacji;

$\propto$ – symbol proporcjonalności wskazujący, że $\mathrm{SNR}_{\mathrm{corr}}$ rośnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z liczby punktów N.

Zwiększenie L_{g} daje zatem większą liczbę punktów wykorzystywanych podczas korelacji. Łatwiej wtedy jednoznacznie określić położenie jej maksimum, ale wynik odnosi się jednocześnie do dłuższego fragmentu włókna. Jeżeli odkształcenie zmienia się na tej długości, lokalne różnice zostają częściowo uśrednione. Poprawa jakości korelacji odbywa się więc kosztem możliwości odwzorowania zmian zachodzących na krótkich odcinkach światłowodu [92].

Przy krótszej wartości L_{g} zależność jest odwrotna. Lokalność pomiaru rośnie, lecz do wy-

znaczenia przesunięcia pozostaje mniej danych. Kreger i współautorzy zauważyli wyraźny wzrost poziomu szumu po zmniejszeniu długości analizowanych odcinków poniżej około 5 mm i wiązali go ze spadkiem liczby punktów dostępnych podczas przetwarzania [94].

Zależność tę pokazują również wyniki Guo i współautorów. Przy zakresie przestrajania równym 130 nm teoretyczny krok przestrzenny wynosił 6,3 μm. Okno filtracji odpowiadające rozdzielczości przestrzennej 5 mm obejmowało zatem 793 próbki przestrzenne, natomiast przy rozdzielczości 2 mm ich liczba zmniejszała się do 317. Mniejsza liczba próbek powodowała pogorszenie stosunku sygnału do szumu korelacji wzajemnej oraz zwiększenie losowego rozrzutu wyznaczanego przesunięcia częstotliwości optycznej [95]. Skrócenie okna poprawia więc rozdzielczość przestrzenną pomiaru, ale może jednocześnie pogarszać powtarzalność wyznaczania przesunięcia.

Znaczenie ma jeszcze jedna kwestia, a mianowicie wybór długości bazowej wiąże się dodatkowo z charakterem pola odkształceń. Metoda korelacyjna działa najlepiej wtedy, gdy na długości L_g można przyjąć w przybliżeniu jednorodne pole odkształceń. Założenie to można zapisać jako:

$$\varepsilon(x) \approx \varepsilon_0, \qquad x \in \left[x_0 - \frac{L_\mathrm{g}}{2}, x_0 + \frac{L_\mathrm{g}}{2}\right], \tag{2-27}$$

gdzie:

- $\varepsilon(x)$ – lokalne odkształcenie osiowe włókna w położeniu x;
- ε_0 – reprezentatywna wartość odkształcenia przyjęta dla analizowanego fragmentu;
- x – współrzędna przestrzenna wzdłuż światłowodu;
- x_0 – położenie środka analizowanego okna;
- L_g – długość bazowa pomiaru.

Przy odkształceniu jednorodnym w przybliżeniu lokalna sygnatura nie ulega wyraźnej deformacji, a względem przebiegu referencyjnego obserwuje się głównie jej przesunięcie widmowe. Można je opisać zależnością:

$$R_\mathrm{obc}(\nu) \approx R_\mathrm{ref}\left(\nu - \Delta\nu\right), \tag{2-28}$$

gdzie:

- $R_\mathrm{obc}(\nu)$ – lokalna charakterystyka widmowa analizowanego fragmentu światłowodu po zmianie jego stanu;
- $R_\mathrm{ref}(\nu)$ – lokalna charakterystyka widmowa tego samego fragmentu w stanie referencyjnym;
- ν – częstotliwość optyczna;
- $\Delta\nu$ – przesunięcie częstotliwościowe lokalnej sygnatury pomiędzy stanem referencyjnym i aktualnym.

Równanie (2-28) należy traktować jako przybliżenie. Zakłada ono, że cały fragment

objęty długością bazową można opisać jedną wartością przesunięcia $\Delta\nu$. Warunek ten staje się coraz trudniejszy do spełnienia, gdy w analizowanym obszarze pojawia się znaczący gradient odkształcenia. Pole odkształcenia przyjmuje wówczas charakter przestrzennie zmienny:

$$\varepsilon = \varepsilon(x), \tag{2-29}$$

gdzie:

ε – odkształcenie osiowe włókna;
x – współrzędna przestrzenna wzdłuż światłowodu;
$\varepsilon(x)$ – wartość odkształcenia zależna od położenia x.

Występowanie gradientu oznacza natomiast, że:

$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x} \neq 0, \tag{2-30}$$

gdzie:

ε – odkształcenie osiowe włókna;
x – współrzędna przestrzenna wzdłuż światłowodu;
$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x}$ – gradient odkształcenia określający szybkość jego zmiany wraz z położeniem.

Przy niewielkiej zmianie gradientu na długości pojedynczego okna różnicę odkształcenia pomiędzy jego końcami można przybliżyć jako:

$$\Delta\varepsilon_{\mathrm{g}} \approx \left|\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x}\right| L_{\mathrm{g}}, \tag{2-31}$$

gdzie:

$\Delta\varepsilon_{\mathrm{g}}$ – przybliżona różnica odkształcenia pomiędzy skrajnymi częściami analizowanego odcinka;
$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x}$ – gradient odkształcenia wzdłuż włókna;
L_{g} – długość bazowa pomiaru.

W obrębie jednego okna przesunięcie częstotliwościowe $\Delta\nu(x)$ może więc przyjmować różne wartości. Dla dwóch wybranych położeń można zapisać:

$$\Delta\nu(x_1) \neq \Delta\nu(x_2), \tag{2-32}$$

gdzie:

$\Delta\nu(x_1)$ – lokalne przesunięcie częstotliwościowe sygnatury w położeniu x_1;
$\Delta\nu(x_2)$ – lokalne przesunięcie częstotliwościowe sygnatury w położeniu x_2;
$x_1,\ x_2$ – dwa różne położenia należące do tego samego analizowanego odcinka włókna.

Nie istnieje wtedy jedna wartość $\Delta\nu$, która pozwalałaby przesunąć całą charakterystykę

aktualną i dokładnie nałożyć ją na charakterystykę referencyjną. Sygnatura przestaje zachowywać się jak sztywno przesuwany wzorzec i zaczyna ulegać deformacji.

Skutki tej deformacji są widoczne w funkcji korelacji. Jej maksimum może ulegać poszerzeniu, a jego położenie staje się mniej jednoznaczne. Znaczna zmiana przesunięcia widmowego w obrębie jednego analizowanego fragmentu prowadzi do rozszerzenia maksimum korelacji i wzrostu poziomu szumu. Zmniejszenie długości okna może w takich warunkach poprawić stabilność wyniku, ponieważ ogranicza zakres zmian odkształcenia zawartych w jednym obliczeniu [94].

Podobne ograniczenie występuje w praktycznych implementacjach systemów Rayleighowskich. Algorytm stosowany w wysokorozdzielczych systemach DFOS wykorzystujących koherentne rozpraszanie Rayleigha, określanych w niektórych rozwiązaniach komercyjnych jako High-Definition (HD)[3], np. w systemie Luna ODiSI-B, zakłada w przybliżeniu jednorodne odkształcenie na długości analizowanego fragmentu. Gradient występujący wewnątrz *gage length* powoduje poszerzenie maksimum korelacji i zmniejszenie stosunku sygnału do szumu [192].

Nie istnieje przy tym jedna uniwersalna wartość L_{g}. Dłuższa baza jest korzystna w obszarach, gdzie odkształcenie zmienia się powoli, ponieważ umożliwia wykorzystanie większej części lokalnego wzorca Rayleigha. W pobliżu koncentracji naprężeń, stref kontaktowych, pęknięć lub innych gwałtownych zmian pola mechanicznego ta sama długość może obejmować fragmenty znajdujące się już w wyraźnie odmiennych stanach. Skrócenie bazy pozwala bardziej lokalnie odwzorować zmiany odkształcenia wzdłuż światłowodu, lecz przy zbyt małej liczbie danych zaczyna pogarszać się jakość korelacji.

Przy dalszym wzroście różnicy pomiędzy stanem referencyjnym i aktualnym problem może wykroczyć poza samo poszerzenie maksimum. Podobieństwo lokalnych charakterystyk maleje, a funkcja korelacji może zawierać kilka konkurencyjnych maksimów lub nie wykazywać jednego wyraźnie dominującego piku. Wyznaczenie przesunięcia staje się wtedy niepewne. Zjawisko to można określić jako dekorelację lokalnej sygnatury. Nie oznacza ono zaniku samego rozpraszania Rayleigha, lecz utratę wystarczającego podobieństwa pomiędzy aktualnym i referencyjnym wzorcem, potrzebnego do ich jednoznacznego dopasowania [97].

Jedną z przyczyn utraty podobieństwa może być również przestrzenne niedopasowanie odpowiadających sobie fragmentów. Po odkształceniu materiał, który w stanie referencyjnym znajdował się w określonym przedziale współrzędnych, zajmuje nieco inne położenie. Przy niewielkich deformacjach różnica ta jest mała, lecz wraz ze wzrostem odkształcenia może prowadzić do porównywania fragmentów włókna, które nie odpowiadają już dokładnie temu samemu fizycznemu odcinkowi. Taki mechanizm może powodować powstawanie wartości odstających oraz fałszywych maksimów korelacji [96]. Z tego względu położenie maksimum korelacji nie powinno być jedyną informacją wykorzystywaną przy ocenie wiarygodności wyniku. Znaczenie ma również siła i jednoznaczność samego dopasowania. W systemie ODiSI-B stosowany jest w tym celu parametr *Quality Factor*, którego wartość odzwierciedla siłę korelacji pomiędzy

[3]Określenie *High-Definition* jest stosowane m.in. przez firmę Luna Innovations w odniesieniu do czujników wykorzystujących lokalną sygnaturę rozpraszania Rayleigha do rozłożonego pomiaru odkształcenia lub temperatury.

charakterystyką referencyjną i aktualną. Wartości zbliżone do jedności odpowiadają silnemu dopasowaniu, natomiast niska wartość wskazuje na sytuację, w której wyznaczone przesunięcie może być niewiarygodne [192]. Parametr ten jest właściwy dla konkretnej implementacji systemu i nie powinien być traktowany jako uniwersalna miara jakości obowiązująca dla wszystkich układów OFDR.

Odrębnym źródłem niejednoznaczności pozostaje temperatura. Jak wskazano wcześniej, zarówno odkształcenie, jak i zmiana temperatury prowadzą do przesunięcia lokalnej sygnatury Rayleigha. Pojedyncza wartość przesunięcia widmowego nie zawiera informacji pozwalającej samodzielnie określić udział obu wielkości. Ta sama zmiana sygnatury może być wynikiem odkształcenia włókna, zmiany jego temperatury lub jednoczesnego występowania obu zjawisk [79, 86].

W badaniach prowadzonych w warunkach laboratoryjnych wpływ temperatury można ograniczyć przez utrzymywanie możliwie stabilnych warunków termicznych. Jeżeli temperatura zmienia się podczas pomiaru, potrzebna jest dodatkowa informacja umożliwiająca ocenę jej udziału. Może ona pochodzić między innymi z niezależnego pomiaru temperatury lub nieobciążonego odcinka światłowodu znajdującego się w tym samym środowisku termicznym. Szczegółowy sposób realizacji zależy od zastosowanego układu pomiarowego. Trzeba przy tym uwzględnić, że temperatura wpływa na odpowiedź światłowodu nie tylko poprzez zmianę współczynnika załamania i rozszerzalność szkła. Powłoka włókna może również wprowadzać dodatkowe odkształcenie termiczne wynikające z różnicy właściwości termomechanicznych obu materiałów [79].

Przedstawione ograniczenia nie zmieniają podstawowej zasady pomiaru. W metodzie wykorzystującej koherentne rozpraszanie Rayleigha informacja o odkształceniu nie wynika bezpośrednio z bezwzględnego poziomu mocy rozproszonego promieniowania. Jest odtwarzana na podstawie zmiany lokalnej, powtarzalnej charakterystyki względem zapisanego wcześniej stanu odniesienia. Dokładność tej operacji zależy zarówno od właściwości układu optycznego, jak i od długości analizowanego odcinka oraz od tego, w jakim stopniu aktualna sygnatura zachowuje podobieństwo do sygnatury referencyjnej.

Pozostaje przy tym jeszcze jedno rozróżnienie, istotne z punktu widzenia dalszej części pracy. Wielkość uzyskana z przesunięcia sygnatury opisuje odkształcenie włókna optycznego. Nie jest to automatycznie równoznaczne z odkształceniem materiału, w którym światłowód został umieszczony. Jeżeli włókno jest przyklejone do powierzchni elementu lub zatopione w kompozycie, obciążenie musi zostać przeniesione poprzez kolejne warstwy pośrednie na szkło światłowodu. Właściwości powłoki, materiału otaczającego oraz ich wzajemnego połączenia mogą zatem wpływać na relację pomiędzy odkształceniem konstrukcji i wartością rejestrowaną przez czujnik [78].

2.2. Integracja światłowodu w procesie pultruzji

Wprowadzanie światłowodu do pręta kompozytowego podczas pultruzji przebiega inaczej niż w przypadku procesów wsadowych, takich jak laminowanie, infuzja czy prasowanie.

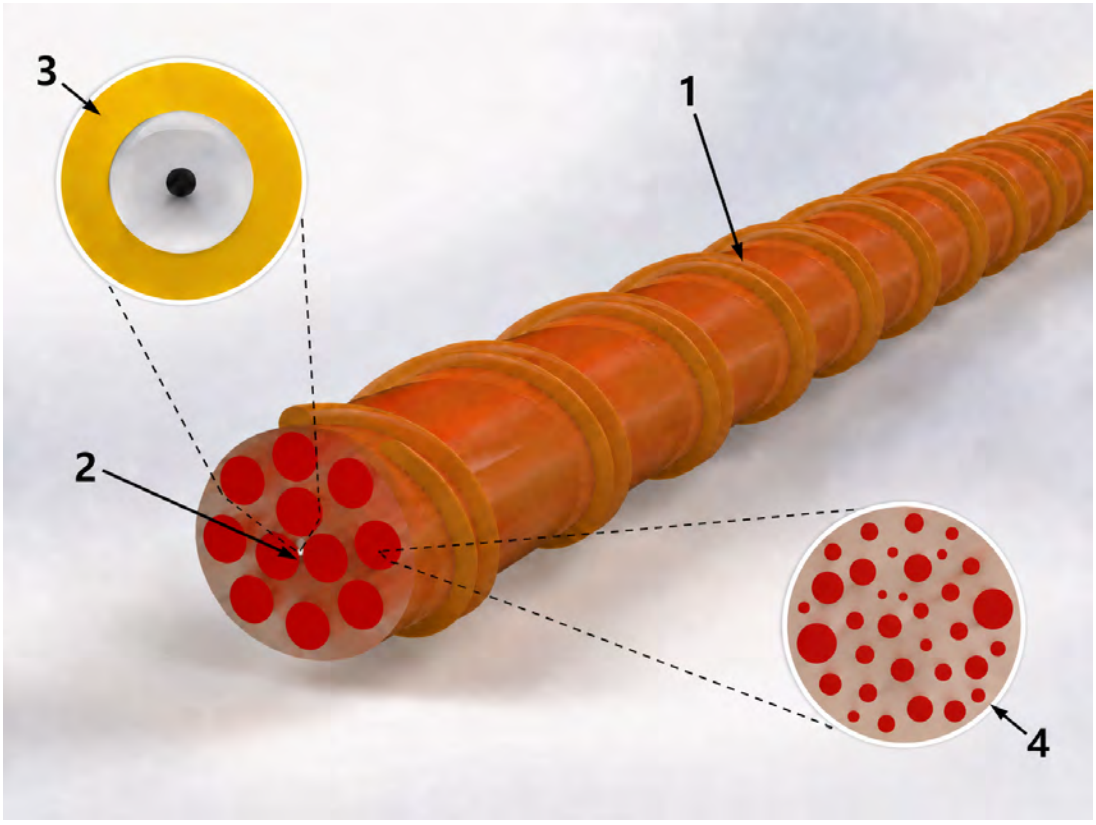
W procesach wsadowych położenie włókna może być kontrolowane pomiędzy kolejnymi etapami układania materiału, a przed zamknięciem formy możliwa jest jeszcze ręczna korekta. Pultruzja jest natomiast procesem ciągłym i dynamicznym [98]. Po wejściu światłowodu do zamkniętej strefy głowicy nie ma już możliwości bezpośredniej obserwacji oraz korekty jego przebiegu. O końcowym położeniu czujnika decydują zatem warunki zadane przed wejściem do matrycy, przede wszystkim sposób rozwijania, prowadzenia i wprowadzenia włókna do wiązki rovingów [99–102].

Nie należy również traktować wprowadzanego światłowodu tak samo jak klasycznego rovingu szklanego. Szkło krzemionkowe charakteryzuje się modułem sprężystości na poziomie 72 GPa [103], jednak niewielka średnica włókna oznacza znikomą sztywność na zginanie. Czyni to włókno wrażliwym na lokalne zakrzywienia oraz uszkodzenia powierzchniowe, które mogą obniżać jego wytrzymałość na rozciąganie [104]. W stosowanym w pracy włóknie SMF-28 Ultra średnica płaszcza wynosi 125 μm, natomiast średnica zewnętrzna włókna z powłoką wynosi 242 μm [189]. Pojedyncze pasmo rovingu stanowi wiązkę obejmującą zwykle setki lub tysiące ciągłych filamentów, zależnie od liniowej masy rovingu i średnicy pojedynczego filamentu [98, 105, 106]. Przekrój poprzeczny takiej wiązki jest wielokrotnie większy od przekroju pojedynczego światłowodu. Przykładowo, w pręcie o średnicy 3,15 mm udział powierzchniowy światłowodu z powłoką ochronną w przekroju poprzecznym stanowi zaledwie 0,59%. Relacje wymiarowe pomiędzy sensorem, pojedynczym pasmem rovingu a przekrojem pręta przedstawiono na rysunku 2-6.

Mimo niewielkiego udziału powierzchniowego światłowód może lokalnie zaburzać układ zbrojenia, a wielkość tego zaburzenia zależy między innymi od jego orientacji względem włókien wzmacniających [73, 106]. Interfejs między światłowodem a osnową powinien skutecznie pośredniczyć w przekazywaniu odkształceń [107]. Badania pultrudowanych profili GFRP wskazują jednak, że o jakości tego połączenia decyduje nie tylko adhezja powłoki do żywicy, lecz również przyczepność między powłoką a szkłem światłowodu. W przeprowadzonych przez Franka i współpracowników próbach wypychania światłowodu odspojenie rozpoczynało się na granicy między szklaną częścią włókna a jego powłoką ochronną, a nie na styku powłoki z osnową kompozytu [99, 100].

W analizie integracji czujnika można wyróżnić między innymi trzy powiązane płaszczyzny: technologiczną, mechaniczną oraz metrologiczną. Światłowód powinien bezawaryjnie przejść przez linię produkcyjną bez znaczącego wzrostu tłumienia, zostać prawidłowo umieszczony w przekroju poprzecznym, a po zżelowaniu żywicy skutecznie współpracować z kompozytem [101, 102, 108]. Spełnienie tylko pierwszego z tych warunków nie oznacza jeszcze wytworzenia prawidłowo działającego pręta pomiarowego.

Praktyczną część badań zrealizowano z wykorzystaniem zmodyfikowanej linii pultruzyjnej. Maszynę zoptymalizowano pod kątem wytwarzania prętów o średnicy 3,15 mm, wyposażonych w osiowo prowadzony światłowód SMF-28 Ultra. Kolejne części pracy omawiają metody integracji zaczerpnięte z dostępnej literatury oraz doniesień dotyczących innych systemów. Stanowią one podstawę teoretyczną opracowanej technologii autorskiej.

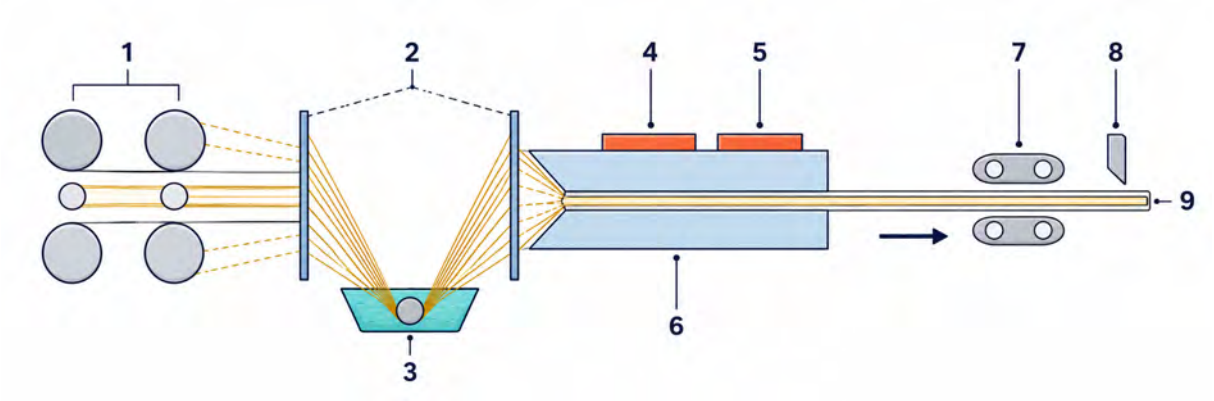


Rys. 2-6. *Porównanie skali elementów w przekroju poprzecznym pręta o średnicy 3,15 mm: 1 – pręt kompozytowy GFRP, 2 – światłowód z powłoką ochronną (średnica 242 µm), 3 – powiększenie struktury światłowodu: rdzeń, płaszcz krzemionkowy (125 µm) oraz dwuwarstwowa powłoka akrylanowa (242 µm), 4 – włókna elementarne (filamenty) rovingu o średnicy 5–24 µm.*

2.2.1. Specyfika integracji w procesie ciągłym

W tradycyjnej pultruzji włókna zbrojenia są w sposób ciągły odwijane, impregnowane i wprowadzane do głowicy formującej, a ruch materiału wymusza jednostka odciągowa (rysunek 2-7) [98, 102]. Wprowadzenie czujnika optycznego tworzy w linii dodatkową, niezależną oś podawania, której prędkość liniowa musi być skorelowana z prędkością głównego zbrojenia. Nellen i współautorzy [100] podają, że światłowód podawano ze szpuli umieszczonej obok linii pultruzyjnej i że prawidłowe prowadzenie jest konieczne do zapewnienia jego centrowania w przekroju pręta. Zbyt duży naciąg sensora skutkuje narastaniem odkształcenia wstępnego w rdzeniu optycznym. Zbyt swobodne podawanie prowadzi do luzów, falowania włókna oraz jego lokalnego wyboczenia lub zaklinowania między sąsiednimi wiązkami rovingu w niekontrolowanym położeniu. Kalamkarov i współautorzy [101, 109] wskazywali w tym kontekście na uszkodzenia czujników przy przejściu przez prowadnice oraz na problemy z równowagą i symetrią rozmieszczenia włókien w matrycy.

Znaczenie stabilnego podawania światłowodu pokazują badania pultrudowanych kotew i prętów pomiarowych GFRP z wbudowanymi światłowodowymi siatkami Bragga [100]. Dla elementów o średnicach 8 i 22 mm uzyskano nieregularne rozkłady wartości odkształceń resztkowych zmierzonych przez poszczególne siatki. Autorzy powiązali je ze skokowym rozwijaniem



Rys. 2-7. *Schemat tradycyjnego procesu pultruzji: 1 – włókna zbrojące (roving, mata, tkanina), 2 – prowadnice włókien, 3 – wanna z żywicą (kąpiel impregnacyjna), 4, 5 i 6 – ogrzewana matryca kształtująca, 7 – jednostka ciągnąca, 8 – piła odcinająca, 9 – produkt końcowy (profil).*

światłowodu ze szpuli podczas produkcji. Po usprawnieniu sposobu rozwijania włókna w pręcie pomiarowym o średnicy 3 mm uzyskano w przybliżeniu symetryczny rozkład wartości od około -100 do $+250$ $\mu\varepsilon$, przy średniej równej 76 $\mu\varepsilon$ [99].

Chociaż przywołane badania dotyczyły punktowych czujników FBG, wymagania związane z mechanicznym wprowadzaniem światłowodu do kompozytu, w tym stabilność jego podawania, właściwe prowadzenie i pozycjonowanie w przekroju, dotyczą również włókien wykorzystywanych w pomiarach rozproszonych. Rodzaj zjawiska optycznego wykorzystywanego podczas odczytu wpływa na sposób lokalizacji i interpretacji pomiaru, lecz nie eliminuje wymagań dotyczących prawidłowej integracji mechanicznej światłowodu z materiałem kompozytowym [110, 111].

Niestabilne rozwijanie światłowodu podczas pultruzji może prowadzić do lokalnie zmiennego odkształcenia włókna przed utwardzeniem osnowy. Po usieciowaniu żywicy część tego stanu może zostać zachowana jako odkształcenie resztkowe czujnika [99, 100]. W systemach opartych na rozpraszaniu Rayleigha odkształcenia wyznaczane są względem zarejestrowanego stanu referencyjnego [110]. Niejednorodny stan początkowy włókna nie musi więc bezpośrednio zaburzać pomiarów względnych, lecz może mieć znaczenie dla interpretacji wartości bezwzględnych, oceny rezerwy zakresu pomiarowego i porównywania odcinków pręta wytworzonych w różnych warunkach procesowych.

Na tej podstawie układ rozwijania światłowodu powinien zapewniać jego płynne podawanie oraz kontrolowany, możliwie stały naciąg. Jego wartość powinna być wystarczająca do eliminacji luzu i utrzymania prostoliniowego przebiegu włókna, lecz nie może powodować istotnego wstępnego odkształcenia sensora.

Z technicznego punktu widzenia kontrolę naciągu można realizować za pomocą hamowanego odwijaka, napinacza rolkowego lub układu aktywnie sterującego prędkością obrotową szpuli. W przypadku układu o stałym momencie hamującym siła naciągu jest odwrotnie proporcjonalna do aktualnego promienia nawoju:

$$F = \frac{M_{\mathrm{h}}}{r_{\mathrm{s}}}, \tag{2-33}$$

gdzie:

F – siła naciągu światłowodu [N];
M_{h} – moment hamujący szpuli [N·m];
r_{s} – aktualny promień nawoju [m].

Zależność ta opisuje uproszczony przypadek ustalonego odwijania przy stałym momencie hamującym, z pominięciem bezwładności nawoju, oporów łożyskowania oraz oddziaływania pozostałych elementów prowadzących. Wraz ze zmniejszaniem się promienia szpuli siła naciągu rośnie, dlatego układ bez kompensacji promienia nie zapewnia stałych warunków podawania w całym cyklu produkcyjnym. Może to prowadzić do wzrostu wstępnego odkształcenia światłowodu, zaburzenia jego położenia lub, w skrajnym przypadku, do zerwania włókna przed wejściem do matrycy. Z tego względu przy wytwarzaniu długich profili korzystne jest stosowanie układu kompensującego zmianę średnicy nawoju albo bezpośredniego pomiaru i regulacji siły naciągu.

Światłowód powinien być wprowadzany do układu z kontrolowanym naciągiem, wystarczającym do usunięcia luzu i stabilizacji jego przebiegu przed wejściem do matrycy. Nie ma jednak podstaw do przyjęcia uniwersalnej wartości wstępnego odkształcenia, ponieważ dopuszczalny poziom zależy między innymi od rodzaju światłowodu, jego powłoki, geometrii prowadzenia oraz warunków procesu. Nadmierny naciąg może powodować uszkodzenie powłoki, trwałe wstępne odkształcenie sensora, a w skrajnym przypadku pęknięcie światłowodu. Niezależnie od wartości naciągu jakość późniejszego połączenia z osnową zależy również od kompatybilności powłoki światłowodu z żywicą [102, 109].

Warunki kontaktu światłowodu z prowadnicami różnią się od warunków prowadzenia rovingów. W przypadku rovingu obciążenie kontaktowe jest rozdzielane pomiędzy dużą liczbę filamentów, natomiast pojedynczy światłowód przenosi je na niewielkiej powierzchni zależnej od średnicy włókna, rodzaju powłoki, promienia prowadnicy i wartości naciągu. Małe promienie prowadzenia oraz lokalne nierówności mogą wywoływać zginanie i mikrozgięcia światłowodu, prowadząc do wzrostu tłumienia optycznego, a w niekorzystnych warunkach również do uszkodzenia jego powłoki [103, 112].

Z tego względu układ prowadzenia powinien wykorzystywać gładkie elementy o odpowiednio dużych promieniach krzywizny, pozbawione ostrych krawędzi i szczelin. Należy również ograniczyć możliwość zakleszczenia lub poprzecznego przemieszczania światłowodu przez poruszające się wiązki rovingów. Liczba punktów kontaktu powinna być ograniczona do niezbędnego minimum, o ile nie pogarsza to kontroli położenia włókna przed wejściem do matrycy.

Po wejściu do zamkniętej strefy głowicy formującej światłowód przestaje być bezpośrednio widoczny i dostępny. Na tym etapie nie ma już możliwości usunięcia jego lokalnego luzu, skorygowania położenia w przekroju czy też poprawienia sposobu kontaktu z otaczającymi rovingami. Parametry prowadzenia i pozycjonowania sensora muszą być ustalone przed wejściem materiału do zamkniętej części układu formującego.

Znaczenia nabiera stabilizacja ostatniego swobodnego odcinka światłowodu, znajdującego się pomiędzy końcową prowadnicą a wejściem do głowicy. Wraz ze wzrostem tej odległości może zwiększać się podatność włókna na poprzeczne przemieszczenia wywołane ruchem i przegrupowywaniem rovingów, drganiami układu oraz oddziaływaniem ciekłej żywicy. Z drugiej strony prowadnica umieszczona bezpośrednio przy głowicy może być bardziej narażona na kontakt z żywicą, jej odkładanie oraz związany z tym wzrost oporów prowadzenia. Położenie ostatniego elementu prowadzącego powinno być zatem dobrane tak, aby ograniczyć długość niekontrolowanego odcinka włókna, a jednocześnie zachować możliwość stabilnej i czystej pracy układu.

W jednej z prac badawczych opisano ciągłą produkcję prętów GFRP o średnicy 3 mm, w których osadzono 16 siatek Bragga [99]. Nie były to jednak oddzielne czujniki łączone mechanicznie ze światłowodem. Siatki FBG są lokalnymi strukturami zapisywanymi w jego rdzeniu, między innymi za pomocą promieniowania ultrafioletowego (UV). W zależności od zastosowanej technologii zapis może być wykonywany przez istniejącą powłokę, podczas wyciągania włókna albo po jej miejscowym usunięciu [113]. Ten ostatni wariant zwiększa podatność włókna na uszkodzenia, ponieważ odsłonięta powierzchnia szkła jest bardziej wrażliwa na zarysowania i inne defekty powstające podczas dalszej obróbki.

W innyej pracy stwierdzono, że usunięcie powłoki może zmniejszyć wytrzymałość mechaniczną światłowodu do około połowy wartości początkowej, a wykonanie siatki w odsłoniętym odcinku dodatkowo zwiększa rozrzut jego wytrzymałości [113]. Odcinek pomiarowy może zostać ponownie pokryty materiałem polimerowym lub osłonięty kapilarą szklaną, jednak zabezpieczenie nie powinno powodować gwałtownej zmiany średnicy oraz sztywności włókna. W pultruzji mogłoby to utrudniać jego przejście przez prowadnice i strefę formowania. Jednocześnie osłona powinna chronić powierzchnię szkła, nie ograniczając skutecznego przekazywania odkształceń z kompozytu do sensora.

Przedstawione zagadnienia pokazują, że stabilizacja naciągu jest jednym z podstawowych warunków prawidłowego podawania światłowodu, nie wyczerpuje jednak wszystkich problemów związanych z jego integracją z linią pultruzyjną. Równie istotne jest miejsce włączenia sensora do strumienia materiału, ponieważ wpływa ono na długość jego drogi przez układ, liczbę kontaktów z prowadnicami, warunki impregnacji oraz możliwość kontrolowania położenia w przekroju. Z perspektywy procesu technologicznego można wyróżnić prowadzenie światłowodu od strefy odwijania wraz z suchymi rovingami, wprowadzenie go bezpośrednio przed impregnacją, dołączenie do już zaimpregnowanej wiązki oraz podanie bezpośrednio przed strefą formowania lub głowicą.

2.2.2. Sposoby wprowadzania światłowodu

Jednym z analizowanych wariantów jest wprowadzanie światłowodu bezpośrednio pomiędzy suche pasma zbrojenia, jeszcze przed wejściem do wanny impregnacyjnej. Światłowód i rovingi mają wtedy długi wspólny odcinek prowadzenia, a sensor jest stopniowo włączany do formowanej wiązki.

Przez znaczną część procesu pultruzji światłowód porusza się tym samym torem co zbro-

jenie główne. Ułatwia to utrzymanie zbliżonej prędkości podawania i położenia względem rovingów. Dłuższa droga prowadzenia oznacza większą liczbę punktów kontaktu światłowodu z elementami linii pultruzyjnej. W badaniach Kalamkarova kontakt z elementami prowadzącymi lub strefą wejścia do matrycy wskazano jako jedną z prawdopodobnych przyczyn uszkodzenia sensora [101].

Ważny jest przy tym promień prowadnic, na których światłowód zmienia kierunek, ponieważ zbyt gwałtowne zmiany mogą powodować lokalne zginanie światłowodu oraz wzrost naprężeń mechanicznych. Naprężone włókno ociera się o powierzchnie elementów prowadzących, co może miejscowo uszkodzić jego powłokę ochronną. Mikro- i makrozgięcia powstające w takich warunkach mogą prowadzić do wzrostu tłumienia optycznego [85, 102, 103].

Wprowadzenie światłowodu przed kąpielą żywiczną ma potencjalną zaletę technologiczną. Cała jego powierzchnia, wraz z powłoką ochronną, zostaje poddana impregnacji w tej samej strefie co zbrojenie. Stwarza to warunki do otoczenia światłowodu żywicą na całym obwodzie i może ograniczać występowanie niezwilżonych fragmentów oraz pęcherzy powietrza [98, 114]. Nie oznacza to jednak automatycznie pełnego zwilżenia, które nadal zależy od przepuszczalności wiązki, lepkości osnowy i parametrów procesu.

Z drugiej strony światłowód musi przejść przez wannę, elementy usuwające nadmiar żywicy oraz kolejne strefy formujące. Wydłuża to czas jego kontaktu z ciekłą osnową i zwiększa narażenie elementów prowadzących na odkładanie się żywicy. Trudniej jest też na bieżąco kontrolować położenie sensora. Po nasyceniu rovingów żywicą światłowód jest słabo widoczny, dlatego jego odchylenie od założonego toru może pozostać niezauważone do chwili wejścia materiału do zamkniętej części głowicy.

Innym rozwiązaniem jest wprowadzenie światłowodu po impregnacji rovingów. Sensor nie przechodzi wtedy przez wannę impregnacyjną, a żywica obecna na zbrojeniu może ograniczać jego przemieszczanie względem wiązki. Rozwiązanie takie zastosowano przy wytwarzaniu prętów GFRP z czujnikami FBG [99, 100].

Pomiędzy rolką a dyszą pozostaje krótki odcinek, dlatego włókno nie ma już dużej swobody ruchu. Wymaga to jednak precyzyjnego ustawienia rolki, ponieważ po wejściu włókna do wiązki nasyconej żywicą możliwość korekty jego toru przed strefą formowania jest już bardzo ograniczona.

Bardziej rozbudowany układ technologiczny zastosowali w swojej pracy Corvaglia i współautorzy [12]. Bezpośrednio za wanną żywiczną umieszczono układ elementów kalibrujących, który usuwał nadmiar żywicy oraz pozycjonował światłowód w środku wiązki węglowych rovingów. Następnie wiązka przechodziła przez stację płuczącą, zaprojektowaną w celu odzyskiwania wyprowadzeń światłowodowych potrzebnych do późniejszego wykonania połączeń optycznych. Proces miał charakter quasi-ciągły, ponieważ po wykonaniu każdego pręta odciąganie zatrzymywano na czas cyklu płukania [12].

Położenie sensora i przygotowanie jego końcówek kontrolowano na dwóch oddzielnych etapach linii. Końcowego położenia światłowodu nie pozostawiono zatem wyłącznie oddziaływaniu poruszających się rovingów i ciekłej żywicy.

Znaczenie miał również skład zastosowanego systemu żywicznego. W pierwszych próbach zastosowano przemysłową formulację żywicy zawierającą węglan wapnia. Obserwacje wykonane metodą skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) wykazały jego nagromadzenie wokół włókna optycznego, co mogło pogarszać adhezję na granicy światłowód–osnowa. W kolejnych próbach zrezygnowano z tego dodatku, uzyskując bardziej jednorodny i gładki interfejs między powłoką akrylanową a żywicą [12].

Podanie sensora bezpośrednio przed głowicą skraca drogę, którą światłowód pokonuje wewnątrz linii. Zmniejsza się liczba kontaktów z elementami prowadzącymi, a tym samym ryzyko jego mechanicznego uszkodzenia. Warunkiem zastosowania takiego rozwiązania jest jednak zapewnienie odpowiedniego zwilżenia oraz skutecznego połączenia powłoki światłowodu z osnową. Zależy to między innymi od ich chemicznej zgodności. Kalamkarov i współautorzy uzyskali dobre połączenie z osnową w przypadku włókien z powłoką poliimidową, podczas gdy zastosowanie powłoki akrylanowej prowadziło do wyraźnego odspojenia na granicy faz [102, 109].

Wprowadzenie światłwodou na późniejszym etapie skraca drogę i czas jego kontaktu z systemem żywicznym. Z ogólnych modeli przepływu przez zagęszczane zbrojenie wynika, że w zwartej wiązce dopływ żywicy do świeżo wprowadzonego włókna może być utrudniony [115, 116]. Należy to traktować jako wskazanie ryzyka niedostatecznej impregnacji w sąsiedztwie sensora, a nie jako bezpośrednio wykazany skutek późnego wprowadzania światłowodu w opisanej konfiguracji pultruzji [98, 115]. Wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien zmniejsza się udział przestrzeni dostępnej dla przepływu żywicy, a przepuszczalność poprzeczna zagęszczanej wiązki maleje [98, 115, 117].

Zjawiska zachodzące podczas impregnacji można analizować ilościowo, traktując wiązkę zbrojenia jako ośrodek porowaty wypełniany ciekłą żywicą. Takie podejście jest powszechnie stosowane w modelowaniu przepływu żywicy przez zbrojenie, a zależność pomiędzy gradientem ciśnienia, lepkością osnowy i przepuszczalnością ośrodka opisuje się za pomocą prawa Darcy'ego [98, 118]. Ponieważ w procesie pultruzji rovingi przemieszczają się wraz z odciąganym profilem, w równaniu należy uwzględnić zarówno ruch żywicy, jak i prędkość włókien. Odpowiednie składowe mają postać [98]:

$$u = U - \frac{K_{xx}}{\eta\varphi}\frac{\partial P}{\partial x}, \qquad v = V - \frac{K_{yy}}{\eta\varphi}\frac{\partial P}{\partial y}, \qquad w = W - \frac{K_{zz}}{\eta\varphi}\frac{\partial P}{\partial z}, \tag{2-34}$$

gdzie:

- u, v, w – składowe prędkości żywicy [m/s];
- U, V, W – składowe prędkości włókien [m/s], przy czym U odpowiada prędkości odciągania;
- P – ciśnienie żywicy [Pa];
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – składowe tensora przepuszczalności wiązki włókien w poszczególnych kierunkach [m^2];
- η – lepkość dynamiczna żywicy [Pa·s];

φ – porowatość ośrodka;
x, y, z – współrzędne przestrzenne [m].

Gradient ciśnienia wymusza ruch żywicy względem włókien, ale sam wzrost ciśnienia nie przesądza jeszcze o skuteczności impregnacji. Znaczenie ma także to, jak łatwo osnowa może przepływać przez zbrojenie. Zależy to od przepuszczalności wiązki oraz lepkości żywicy.

W przypadku światłowodu wprowadzonego do wnętrza rovingów najważniejszy jest przepływ poprzeczny. Żywica musi dotrzeć do sensora z boków, opłynąć jego powierzchnię i wypełnić niewielkie przestrzenie pomiędzy powłoką a sąsiednimi pasmami zbrojenia. Warunki tego przepływu opisują poprzeczne składowe tensora przepuszczalności, oznaczone w przyjętym układzie współrzędnych jako K_{yy} i K_{zz}. Przepuszczalność zbrojenia ma na ogół charakter anizotropowy, dlatego jej pełny opis obejmuje trzy główne składowe tensora przepuszczalności [119]. Wartości przepuszczalności zmieniają się w trakcie formowania przekroju. Porowatość wiązki, rozumiana jako udział przestrzeni dostępnej dla przepływu żywicy, jest związana z lokalnym udziałem objętościowym włókien zależnością [98, 118]:

$$\varphi(x) = 1 - V_f(x). \tag{2-35}$$

gdzie:

φ – lokalna porowatość wiązki;
V_f – lokalny udział objętościowy włókien;
x – współrzędna położenia wzdłuż strefy formowania [m].

W strefie zbieżnej kanał stopniowo się zwęża. Ta sama ilość zbrojenia zajmuje wówczas coraz mniejszy przekrój, dlatego lokalna wartość V_f rośnie. Dla profilu kołowego zmianę tę można przedstawić geometrycznie jako [98]:

$$V_f(x) = V_{f0} \left(\frac{h_0}{h(x)} \right)^2, \tag{2-36}$$

gdzie:

V_f – lokalny udział objętościowy włókien;
V_{f0} – udział objętościowy włókien w prostej części matrycy;
h_0 – wymiar poprzeczny prostej części matrycy [m];
$h(x)$ – lokalny wymiar poprzeczny strefy zbieżnej [m];
x – współrzędna położenia wzdłuż strefy formowania [m].

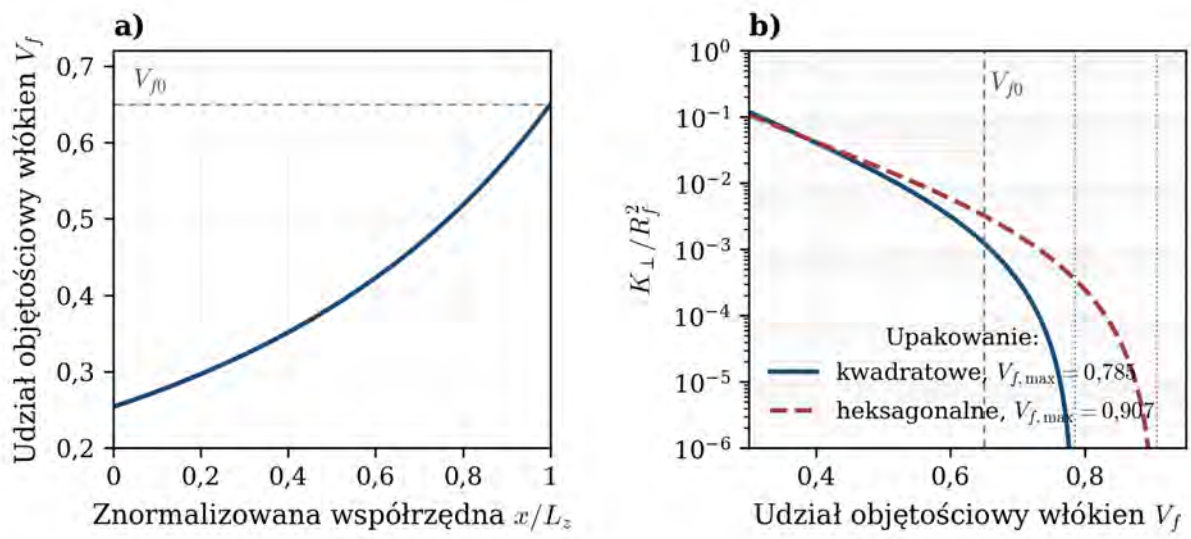
Zagęszczanie rovingów nie sprowadza się więc wyłącznie do ograniczenia wolnej przestrzeni. Wraz ze wzrostem V_f zmienia się układ kanałów, którymi żywica może przemieszczać się w poprzek wiązki. Dla idealizowanej, regularnie upakowanej wiązki jednokierunkowej, przy założeniu poprzecznej izotropii, można przyjąć $K_{yy} = K_{zz} = K_{\perp}$. Zależność przepuszczalności poprzecznej od udziału objętościowego włókien opisuje wówczas model Gebarta [98, 120]:

$$K_{yy} = K_{zz} = C_1 \left(\sqrt{\frac{V_{f,\max}}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} R_f^2, \tag{2-37}$$

gdzie:

- $K_{yy},\ K_{zz}$ – składowe poprzeczne tensora przepuszczalności [m^2];
- C_1 – stała zależna od układu włókien w przekroju;
- $V_{f,\max}$ – maksymalny udział objętościowy włókien możliwy do uzyskania dla danego sposobu upakowania;
- V_f – lokalny udział objętościowy włókien;
- R_f – promień pojedynczego włókna [m].

Gdy udział włókien zbliża się do wartości $V_{f,\max}$, przepuszczalność poprzeczna gwałtownie maleje. Szczeliny pomiędzy filamentami stają się coraz węższe, a część z nich przestaje tworzyć ciągłe drogi przepływu. Żywica może nadal znajdować się pod odpowiednim ciśnieniem, lecz nie ma już warunków, aby swobodnie przemieszczać się w głąb zwartej wiązki [120]. Eksperymentalny spadek przepuszczalności poprzecznej wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien obserwowano również w zagęszczanych preformach włóknistych, przy czym wyniki Ouagne'a i Bréarda dotyczą procesu i materiałów tekstylnych, a nie bezpośrednio pultruzji prętów jednokierunkowych [117].



Rys. 2-8. *Wpływ zagęszczania wiązki na warunki impregnacji: a – wzrost lokalnego udziału objętościowego włókien $V_f(x)$ w strefie zbieżnej według równania* (2-36) *(przyjęto $V_{f0} = 0{,}65$ i stopień zbieżności $H_0/h_0 = 1{,}6$), b – zależność znormalizowanej przepuszczalności poprzecznej $K_\perp/R_f^2$ od V_f według modelu Gebarta* (2-37) *dla upakowania kwadratowego i heksagonalnego; skala logarytmiczna. Linią przerywaną oznaczono V_{f0}. Opracowanie własne na podstawie [98, 120].*

Moment wprowadzenia światłowodu może zatem mieć praktyczne znaczenie. Sensor podany przed silnym zagęszczeniem pozostaje dłużej w obszarze, w którym osnowa może jeszcze dopływać do jego powierzchni. Z przedstawionego modelu wynika, że późniejsze wprowadzenie

może zwiększać ryzyko pozostawienia fragmentów niedostatecznie zwilżonych, nie stanowi ono jednak samo w sobie dowodu powstania podłużnych pustek w gotowym pręcie.

Przepływ ogranicza również lepkość żywicy. Jej wartość zmienia się wraz z temperaturą i postępem utwardzania [98, 118]. Jedną z zależności reologicznych stosowanych w modelowaniu procesu pultruzji jest:

$$\eta = \eta_\infty \exp\left(\frac{E_a}{RT} + K\alpha\right), \tag{2-38}$$

gdzie:

η_∞ – stała lepkościowa;
E_a – energia aktywacji przepływu lepkiego;
R – uniwersalna stała gazowa;
T – temperatura bezwzględna;
K – stała modelu;
α – stopień utwardzenia.

Przed wejściem materiału do ogrzewanej części matrycy stopień utwardzenia pozostaje niewielki. W tym obszarze lepkość można w pierwszym przybliżeniu traktować jako stałą [98]. Po rozpoczęciu ogrzewania jej przebieg nie jest już monotoniczny. Początkowo żywica staje się bardziej płynna, ponieważ wzrost temperatury obniża lepkość. Ułatwia to przemieszczanie osnowy pomiędzy włóknami i może poprawiać zwilżenie sensora.

Efekt ten jest jednak przejściowy. Wraz z postępem reakcji sieciowania rośnie udział członu zależnego od α, a lepkość zaczyna szybko wzrastać, osiągając w pobliżu punktu żelowania wartości praktycznie uniemożliwiające przepływ [98]. Po jego przekroczeniu osnowa nie może już swobodnie wypełniać pustych przestrzeni wokół światłowodu. O warunkach jego impregnacji decydują zatem dwa równocześnie zachodzące procesy. Zwężanie kanału zwiększa udział objętościowy włókien i ogranicza przepuszczalność poprzeczną zbrojenia, natomiast ogrzewanie uruchamia sieciowanie, które po początkowym obniżeniu lepkości prowadzi do jej szybkiego wzrostu. Pełne otoczenie światłowodu żywicą musi więc nastąpić, zanim zmniejszenie przepuszczalności i wzrost lepkości skutecznie ograniczą dostępne drogi przepływu. Równania (2-34)–(2-38) opisują ogólny kierunek tych zmian, lecz nie pozwalają wyznaczyć jednej uniwersalnej odległości od głowicy, w której światłowód powinien zostać wprowadzony do wiązki, aby żywica mogła całkowicie wypełnić przestrzeń wokół niego przed utratą zdolności do przepływu. Położenie tego punktu zależy od geometrii strefy zbieżnej, prędkości odciągania, temperatury, kinetyki utwardzania oraz początkowej lepkości układu.

Na jakość impregnacji wpływają również prędkość procesu, lepkość żywicy, geometria strefy zwężającej oraz stopień zagęszczenia zbrojenia [115, 116, 121]. Parametry te należy dobrać tak, aby zapewnić pełne zwilżenie zbrojenia przed osiągnięciem punktu żelowania żywicy [98, 118]. Odpowiedni dobór wyżej wymienionych czynników powinien jednocześnie ograniczać powstawanie suchych obszarów, pustek oraz pęcherzy, szczególnie wewnątrz przekroju [98,

115, 121]. W przypadku pręta ze światłowodem oznacza to także konieczność zapewnienia dopływu żywicy do jego bezpośredniego otoczenia. Niepełna impregnacja może powodować przerwy w kontakcie pomiędzy powłoką światłowodu a osnową, a w konsekwencji osłabiać przekazywanie odkształceń do szklanej części sensora [122]. Niezależnie od tego badania włókien optycznych osadzonych w kompozytach wykazały, że zaburzenie układu zbrojenia i powstawanie stref bogatych w żywicę może prowadzić do lokalnych koncentracji naprężeń [73, 106].

Miejsce wprowadzenia sensora nie musi odpowiadać jego końcowemu położeniu w gotowym pręcie, ponieważ na przebieg włókna wpływają również prowadzenie i zagęszczanie wiązki zbrojenia. W elementach przeznaczonych do pomiaru odkształceń osiowych można zastosować centralne położenie światłowodu. Zeng i współautorzy wykorzystali w rozproszonym systemie pomiarowym pojedynczy światłowód z powłoką poliimidową, umieszczony w osi pultrudowanego pręta GFRP o średnicy 9,4 mm [123].

Centralne ułożenie światłowodu w przekroju pultrudowanego profilu ma kilka zalet. Sensor znajduje się wtedy blisko osi obojętnej przekroju, dzięki czemu wpływ zginania na wynik pomiaru jest mniejszy. Taka lokalizacja sprzyja również uzyskaniu bardziej symetrycznego otoczenia materiałowego i ogranicza ryzyko bezpośredniego kontaktu światłowodu ze ścianką głowicy. Gdy światłowód znajduje się poza osią obojętną przekroju, ugięcie pręta wprowadza do jego wskazań dodatkową składową odkształcenia wynikającą ze zginania. Utrzymanie takiego położenia podczas pultruzji może być trudniejsze, ponieważ w trakcie zagęszczania rovingów sensor może być lokalnie odchylany lub wciskany pomiędzy pasma zbrojenia. Jego końcowe położenie zależy więc również od ustawienia prowadnicy, a także od lokalnego układu wiązek włókien [85, 101]. Przy pozycjonowaniu niewspółśrodkowym kontrola położenia światłowodu powinna być utrzymywana co najmniej do strefy zbieżnej matrycy, w której następuje stopniowe zagęszczanie wiązki i wzrost udziału objętościowego włókien [98].

Integracja światłowodu z linią pultruzyjną wymaga zastosowania kontrolowanego toru podawania, jednak literatura nie wskazuje jednej obligatoryjnej konfiguracji tego układu. W klasycznej pultruzji pozycję materiału wchodzącego do procesu ustala się za pomocą stojaków, oczek i prowadnic, a kontrola wyrównania oraz naciągu ogranicza skręcanie, splątanie i niestabilność podawania [124]. W jednym z opisanych rozwiązań światłowód rozwijano ze szpuli umieszczonej z boku maszyny i kierowano za pomocą niewielkiej rolki do pakietu rovingów przesyconych żywicą. Właściwe prowadzenie włókna uznano za konieczne do utrzymania jego projektowanego położenia w przekroju [99, 100].

Zastosowanie odrębnej szpuli i indywidualnego układu prowadzącego może zatem stanowić korzystne rozwiązanie konstrukcyjne, zwłaszcza gdy światłowód ma zostać umieszczony poza osią profilu lub gdy konieczne jest ograniczenie jego kontaktu z elementami prowadzącymi rovingi. Układ taki może obejmować szpulę rozwijającą, element stabilizujący naciąg oraz końcową prowadnicę odpowiedzialną za pozycjonowanie włókna [124]. Odniesienie tego rozwiązania bezpośrednio do światłowodu stanowi jednak propozycję konstrukcyjną, a nie konfigurację jednoznacznie wymaganą przez dotychczasową literaturę.

Sposób odwijania światłowodu powinien zapewniać możliwie płynne podawanie. Ogólne

zalecenia dotyczące prowadzenia przewodów światłowodowych wskazują, że gwałtowne szarpnięcia oraz nieregularny obrót szpuli mogą powodować chwilowe przekroczenie dopuszczalnego naciągu, szczególnie wskutek bezwładności nawoju [104]. Powierzchnie prowadzące nie powinny mieć ostrych krawędzi i nie powinny wymuszać małych promieni zgięcia, ponieważ takie warunki zwiększają ryzyko uszkodzenia włókna i powstawania strat zgięciowych lub mikrozgięciowych [104, 114].

Przy nawoju warstwowym punkt zejścia włókna przemieszcza się wzdłuż szerokości szpuli, powodując okresową zmianę kąta nabiegania na pierwszą prowadnicę. Może to wywoływać poprzeczne przemieszczenia swobodnego odcinka włókna oraz zmiany warunków jego kontaktu z prowadnicą. Skala tego zjawiska zależy między innymi od szerokości nawoju, odległości prowadnicy, prędkości odwijania i wartości naciągu. Odsunięcie prowadnicy wydłuża swobodny odcinek włókna i łagodzi zmiany kąta. Podobnie działa stabilizacja naciągu oraz zastosowanie elementu nadążnego, który prowadzi punkt zejścia za przesuwającym się włóknem.

Dla utrzymania prostoliniowego przebiegu światłowodu konieczne jest zapewnienie niewielkiego i możliwie stabilnego naciągu. W pultruzji, ze względu na ciągły ruch materiału, jego wartość powinna być kontrolowana przez układ rozwijania nawoju i elementy prowadzące [124]. Naciąg musi ograniczać powstawanie luzu i miejscowych zwisów na odcinku pomiędzy ostatnią prowadnicą a wejściem do matrycy. Nie powinien jednak wprowadzać nadmiernego odkształcenia wstępnego sensora, które po utwardzeniu osnowy zostaje częściowo zachowane jako odkształcenie resztkowe.

Na końcowe położenie światłowodu wpływa nie tylko ustawienie prowadnic i wartość naciągu, lecz także lokalny przebieg sąsiednich rovingów. Reorganizację pasm zbrojenia w strefie zbieżnej komory iniekcyjnej opisali Tucci i współautorzy w badaniach pultruzji iniekcyjnej [116]. Autorzy zastosowali metodę przecinania rovingów przed wejściem do matrycy i na podstawie zmian siły ciągnącej wyznaczyli rozkład lokalnego oporu wzdłuż kanału. Jego wyraźne maksimum w strefie zbieżnej przypisano ściskaniu włókien i przesuwaniu zbrojenia ku coraz węższemu przekrojowi. Badania te nie obejmowały integracji światłowodu, wskazują jednak, że wiązka rovingów nie przechodzi przez strefę zbieżną jako układ o niezmiennym rozmieszczeniu. Gdy sąsiednie pasma zmieniają położenie, mogą również przesunąć prowadzony między nimi światłowód. Samo centralne wprowadzenie sensora nie przesądza więc o zachowaniu jego położenia w gotowym profilu.

W badaniach Kalamkarova położenie światłowodu stabilizowano przez prowadzenie go wraz z wybranym rovingiem biegnącym prostoliniowo przez układ prowadzący do osi pręta [102]. Końcowa trajektoria sensora zależy zatem zarówno od punktu jego wprowadzenia, jak i od zachowania rovingu prowadzącego oraz sąsiednich pasm podczas zagęszczania.

2.2.3. Wpływ położenia i przebiegu światłowodu na pomiar

Odchylenie światłowodu od projektowanego położenia wpływa na interpretację jego wskazań. Przy jednorodnym rozciąganiu osiowym prostoliniowo osadzony sensor może nadal rejestrować odkształcenie zbliżone do odkształcenia osiowego pręta, o ile pozostaje prawidłowo

sprzężony mechanicznie z osnową. Przy próbie zginania ważnym jest jego położenie względem osi obojętnej przekroju. Lokalną wartość odkształcenia można wówczas przedstawić jako:

$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_0(x) - \kappa(x)\, y \tag{2-39}$$

gdzie:

ε_0 – odkształcenie osiowe;
κ – krzywizna pręta;
y – odległość sensora od osi obojętnej.

Światłowód osadzony ekscentrycznie rejestruje zatem zarówno składową osiową, jak i odkształcenie wynikające ze zginania. Wraz ze wzrostem odległości od osi obojętnej zwiększa się udział składowej zginającej w wyniku pomiaru [125].

Nieprawidłowe położenie światłowodu może zmieniać lokalną strukturę materiału w jego bezpośrednim otoczeniu. Dotyczy to między innymi niesymetrycznego ułożenia zbrojenia, powstawania stref o zwiększonej zawartości żywicy oraz obecności pustek. Badania laminatów wykazały, że charakter tych zaburzeń zależy między innymi od wzajemnej orientacji światłowodu i włókien wzmacniających. Tworzące się w takich miejscach kieszenie żywiczne mogą stanowić lokalne osłabienie struktury [73, 106]. Wyników uzyskanych dla laminatów nie można jednak bezpośrednio przenosić na pultrudowane pręty, zwłaszcza w ujęciu ilościowym. Inny jest sposób formowania materiału, stopień zagęszczenia zbrojenia oraz geometria przekroju. Rzeczywiste otoczenie sensora należy więc oceniać na podstawie badań gotowego profilu, na przykład z wykorzystaniem tomografii komputerowej lub obserwacji mikroskopowej przekrojów poprzecznych.

Bardziej problematyczne od prostoliniowego, lecz ekscentrycznego ułożenia są miejscowe odchylenia i zakrzywienia światłowodu. Gdy jego oś nie jest lokalnie równoległa do osi pręta, odkształcenie mierzone wzdłuż włókna nie odpowiada bezpośrednio podłużnemu odkształceniu profilu. Kontakt z sąsiednimi pasmami zbrojenia może dodatkowo wywoływać mikrozgięcia oraz miejscowe odkształcenia powłoki. Badania światłowodów osadzonych pomiędzy warstwami zbrojenia szklanego wykazały, że sposób kontaktu z pasmami wpływa na deformację włókna i może prowadzić do zwiększonych strat mocy optycznej [85].

W pomiarach opartych na rozproszeniu Rayleigha poszczególnym odcinkom światłowodu odpowiadają charakterystyczne sygnatury widmowe. Odkształcenie wyznacza się przez porównanie widma zarejestrowanego w stanie pomiarowym z widmem odniesienia i określenie przesunięcia na podstawie korelacji wzajemnej [110]. Analiza obejmuje jednak odcinek o skończonej długości, wynikającej z przyjętej bazy pomiarowej. Jeżeli odkształcenie zmienia się na tym odcinku w sposób gwałtowny, jego poszczególne fragmenty nie wykazują jednakowego przesunięcia widmowego. Widmo nie jest wtedy prostym przesunięciem widma odniesienia, a maksimum funkcji korelacji może stać się mniej wyraźne. Uzyskana wartość ma wówczas obniżoną wiarygodność i nie musi jednoznacznie odpowiadać lokalnemu odkształceniu osiowemu pręta.

Położenie światłowodu na wejściu do matrycy określa wyłącznie warunki początkowe.

Nie rozstrzyga, czy sensor nie przesunął się lub nie uległ miejscowemu zakrzywieniu podczas zagęszczania wiązki. Jego rzeczywisty przebieg w gotowym profilu można ocenić nieniszcząco za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej lub mikro-CT [126]. Warunkiem jest uzyskanie wystarczającej rozdzielczości i kontrastu materiałowego pomiędzy światłowodem a otaczającym zbrojeniem. W prętach GFRP rozróżnienie światłowodu krzemionkowego i włókien szklanych może być utrudnione, dlatego badanie tomograficzne warto uzupełnić analizą kolejnych przekrojów poprzecznych. Pozwala ona określić odległość sensora od osi, jego relację względem sąsiednich rovingów oraz obecność pustek lub stref bogatych w żywicę.

2.2.4. Oddziaływania cieplne i chemiczne na osadzony sensor

Opisane dotąd oddziaływania dotyczą przede wszystkim mechanicznego prowadzenia światłowodu i formowania wiązki przed utwardzeniem osnowy. Obejmują naciąg podczas podawania, zginanie na prowadnicach, mikrozgięcia oraz nacisk zagęszczanych rovingów. Po wejściu materiału do ogrzewanej części matrycy znaczenia nabierają również czynniki cieplne i chemiczne związane z utwardzaniem żywicy.

Szklana część światłowodu, obejmująca rdzeń i płaszcz, zachowuje stabilność w temperaturach typowych dla pultruzji. Bardziej wrażliwym elementem jest polimerowa powłoka chroniąca szklaną część światłowodu. W przypadku standardowych powłok akrylanowych temperatura procesu może przekraczać ich deklarowany zakres pracy. Może to prowadzić m.in. do degradacji powierzchni, a w konsekwencji do osłabienia adhezji na granicy faz. W badaniach pultruzji wskazywano na ograniczoną odporność termiczną powłok akrylanowych i większą stabilność powłok poliimidowych w temperaturze dochodzącej do 150 °C [109, 127]. Stopień zmian zależy jednak od rodzaju powłoki, czasu ekspozycji i rzeczywistego profilu temperatury.

Do oszacowania historii cieplnej sensora można wykorzystać termochemiczne modele pultruzji. Ich wiarygodność zależy jednak od poprawnego wyznaczenia właściwości materiałowych, warunków brzegowych i późniejszej walidacji. Modele tej klasy rozwijane są od lat osiemdziesiątych XX wieku. Łączą parametry procesu, zwłaszcza prędkość przeciągania i temperaturę poszczególnych stref grzewczych, z rozkładem temperatury oraz stopnia utwardzenia w formowanym profilu [98]. Pręt o przekroju kołowym opisuje się często modelem dwuwymiarowym, osiowosymetrycznym, zapisanym we współrzędnych cylindrycznych. Uproszczenie to jest zasadne, gdy geometrię układu i warunki wymiany ciepła można w przybliżeniu uznać za symetryczne względem osi [98]. Bilans energii dla przemieszczającego się kompozytu ma wówczas postać [98]:

$$\rho_c C_{p,c}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial z}\right)=k_{z,c}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{k_{r,c}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+q, \tag{2-40}$$

natomiast dla nieruchomej matrycy formującej:

$$\rho_d C_{p,d}\frac{\partial T}{\partial t}=k_{z,d}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{k_{r,d}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right). \tag{2-41}$$

gdzie:

T	– temperatura [K];
u	– prędkość przeciągania w kierunku osiowym z [m/s];
ρ, C_p	– odpowiednio gęstość [kg/m^3] i ciepło właściwe [J/(kg·K)];
k_z, k_r	– przewodność cieplna kolejno w kierunku osiowym i promieniowym [W/(m·K)];
q	– objętościowe źródło ciepła reakcji egzotermicznej [W/m^3];
indeksy c i d	– dla kompozytu i matrycy formującej.

Równania bilansu energii należy uzupełnić o warunki początkowe i brzegowe, w tym opis wymiany ciepła na styku przemieszczającego się kompozytu z matrycą formującą.

W równaniu dla kompozytu występuje człon źródłowy q, odpowiadający za ciepło wydzielane podczas egzotermicznej reakcji sieciowania. Można go zapisać w postaci [98]:

$$q = (1 - V_f)\, \rho_r H_{tr} R_r(\alpha, T), \tag{2-42}$$

gdzie:

V_f	– udział objętościowy włókien;
ρ_r	– gęstość żywicy;
H_{tr}	– całkowite ciepło reakcji;
$R_r(\alpha, T)$	– szybkość reakcji zależna od temperatury i stopnia utwardzenia α.

Jednym z podstawowych modeli kinetyki utwardzania jest model reakcji n-tego rzędu, w którym wpływ temperatury na szybkość reakcji opisuje zależność Arrheniusa [98]:

$$R_r(\alpha, T) = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)(1 - \alpha)^n, \tag{2-43}$$

gdzie:

$R_r(\alpha, T)$	– szybkość reakcji utwardzania;
α	– stopień utwardzenia;
T	– temperatura bezwzględna;
K_0	– stała przedwykładnicza;
E_a	– energia aktywacji;
R	– uniwersalna stała gazowa;
n	– rząd reakcji.

Równanie (2-43) stanowi uproszczony opis kinetyki utwardzania i służy tutaj do przedstawienia ogólnej zależności szybkości utwardzania od temperatury i stopnia utwardzenia. W analizie DSC przedstawionej w sekcji 4.3 wyznaczono pozorną energię aktywacji metodą Kissingera, nie identyfikowano natomiast pełnego modelu kinetycznego. W modelach procesu pultruzji zmiana stopnia utwardzenia wynika zarówno z lokalnego postępu reakcji, jak i z przemieszczania materiału wzdłuż linii technologicznej. Zależność tę opisuje równanie transportu stopnia

utwardzenia [98]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u\frac{\partial \alpha}{\partial z} = R_r(\alpha, T), \tag{2-44}$$

gdzie:

u – prędkość odciągania;
z – współrzędna mierzona wzdłuż osi linii;
t – czas.

Sprzężone równania bilansu energii i transportu stopnia utwardzenia rozwiązuje się numerycznie, między innymi metodą różnic skończonych w ujęciu objętości kontrolnych lub metodą elementów skończonych [98]. Wynikiem obliczeń są rozkłady temperatury i stopnia utwardzenia w formowanym profilu. W odniesieniu do osadzonego światłowodu rozkład temperatury, rozpatrywany łącznie z prędkością przeciągania, pozwala określić historię jego obciążenia cieplnego. Ze względu na ciepło wydzielane podczas reakcji temperatura w osi profilu może lokalnie przekroczyć temperaturę ustawioną w strefach grzewczych [98].

Pole stopnia utwardzenia opisuje postęp sieciowania osnowy w otoczeniu światłowodu. Pozwala również oszacować położenie strefy żelowania, jeżeli znana jest krytyczna wartość α_{gel}. Położenie strefy żelowania ma znaczenie dla rozwoju naprężeń w materiale. Przed żelowaniem żywica może jeszcze płynąć, dzięki czemu skutki skurczu chemicznego ulegają w znacznej części relaksacji. Po żelowaniu osnowa uzyskuje zdolność przenoszenia naprężeń, a dalszy skurcz chemiczny, ograniczany przez zbrojenie i osadzony światłowód, przyczynia się do powstawania naprężeń resztkowych [98].

Zmiany stanu mechanicznego osnowy można powiązać ze wzrostem temperatury zeszklenia. W tym celu wykorzystuje się równanie Di Benedetto [98]:

$$\frac{T_g - T_{g0}}{T_{g\infty} - T_{g0}} = \frac{\lambda \alpha}{1 - (1 - \lambda)\,\alpha}, \tag{2-45}$$

gdzie:

T_g – temperatura zeszklenia odpowiadająca aktualnemu stopniowi utwardzenia;
T_{g0}, $T_{g\infty}$ – temperatura zeszklenia odpowiednio nieutwardzonej i całkowicie utwardzonej żywicy;
λ – bezwymiarowy parametr dopasowania.

Witryfikacja następuje wtedy, gdy lokalna wartość $T_g(\alpha)$ osiąga lub przekracza bieżącą temperaturę materiału. Nie jest to jednak początek rozwoju naprężeń resztkowych. Te mogą narastać wcześniej, już po żelowaniu, kiedy osnowa uzyskuje zdolność przenoszenia obciążeń, a swobodna relaksacja skurczu staje się ograniczona. Witryfikacja dodatkowo zmniejsza tę zdolność i prowadzi do przejścia osnowy w stan szklisty. Dlatego w uproszczonym modelu analitycznym przedstawionym w podrozdziale 2.3.1 temperaturę materiału w chwili witryfikacji przyjęto jako efektywną temperaturę odniesienia dla trwałej składowej termicznej.

W sprzężonym modelu termochemiczno-mechanicznym pola T i α mogą następnie stanowić dane wejściowe do analizy mechanicznej obszaru międzyfazowego. Analiza taka może uwzględniać niedopasowanie swobodnych odkształceń światłowodu i kompozytu, naprężenia promieniowe oraz sposób przekazywania odkształceń przez powłokę światłowodu.

Podczas sieciowania osnowa epoksydowa ulega skurczowi chemicznemu, lecz znaczenie mechaniczne tego zjawiska zmienia się w trakcie procesu. Przed żelowaniem mała sztywność i możliwość przepływu ograniczają poziom powstających naprężeń. Po żelowaniu dalszy skurcz zachodzi w coraz sztywniejszej osnowie i, jeżeli możliwość swobodnej zmiany objętości jest ograniczona, prowadzi do powstawania naprężeń oraz odkształceń resztkowych [98]. Rozwój odkształceń podczas sieciowania rejestrowano również za pomocą czujników światłowodowych osadzonych bezpośrednio w kompozycie [128].

Wyniki obliczeń sprzężonego modelu termochemiczno-mechanicznego dla jednokierunkowego pręta o średnicy $9{,}5\ \mathrm{mm}$ pokazały poprzeczne naprężenia rozciągające w wewnętrznej części przekroju oraz naprężenia ściskające bliżej powierzchni. Nie przekraczały one $1\ \mathrm{MPa}$, co autorzy wiązali ze stosunkowo równomiernym przebiegiem nagrzewania i utwardzania w pręcie. Wyniku tego nie można jednak bezpośrednio przenieść na otoczenie światłowodu, ponieważ model nie uwzględniał obecności światłowodu. Te same analizy wskazały również, że skurcz chemiczny może doprowadzić do oddzielenia powierzchni profilu od ścianki matrycy jeszcze przed jego wyjściem z matrycy formującej [98].

Po wyjściu pręta z matrycy proces kształtowania się naprężeń trwa nadal. Podczas chłodzenia powstaje różnica rozszerzalności cieplnej pomiędzy światłowodem a otaczającym go kompozytem. W połączeniu ze skurczem chemicznym osnowy daje ona dodatkową składową naprężeń resztkowych w sąsiedztwie sensora. Jej opis ilościowy oraz wynikające z niej oddziaływania w strefie międzyfazowej przedstawiono w podrozdziale 2.3.1. W pultrudowanych prętach wyposażonych w czujniki FBG rejestrowano odkształcenia ściskające dochodzące do około $-250\ \mu\varepsilon$. Powiązano je zarówno ze skurczem żywicy, jak i z różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej światłowodu i kompozytu [99].

Światłowód rozpoczyna więc pracę w gotowym profilu ze stanem odkształcenia ukształtowanym przez kilka następujących po sobie etapów. Najpierw działa naciąg podawania. Później dochodzą skutki sieciowania, skurczu chemicznego i chłodzenia. W modelach naprężeń resztkowych pultruzji całkowite odkształcenie kompozytu rozdziela się na część mechaniczną, termiczną i chemiczną [98]. Naciąg światłowodu powinien być natomiast opisany jako jego początkowe odkształcenie lub naprężenie, istniejące jeszcze przed powstaniem trwałego połączenia z osnową. Końcowy stan sensora zależy od całej historii procesu, a nie od jednego parametru: znaczenie mają temperatura, stopień utwardzenia, warunki podawania oraz jakość połączenia z kompozytem.

Pomiar referencyjny wykonany po zakończeniu utwardzania i po ustabilizowaniu temperatury obejmuje istniejące już odkształcenie resztkowe. Jeżeli składowa ta jest jednorodna i stabilna, nie musi zaburzać późniejszych pomiarów względnych. Warunkiem jest jednak zachowanie odpowiedniego zakresu pomiarowego i jakości sygnału. Znacznie bardziej problematyczne są różnice występujące wzdłuż pręta. Ich źródłem mogą być wahania naciągu podczas odwijania, lokalnie

odmienny przebieg temperatury, różny stopień utwardzenia albo zmienna jakość sprzężenia światłowodu z osnową.

W przejściowym modelu termochemicznym taka niejednorodność odpowiada zmianom pól $T(r, z, t)$ i $\alpha(r, z, t)$, wywołanym na przykład wahaniami prędkości przeciągania lub temperatury stref grzewczych. Po osiągnięciu ustalonego przebiegu procesu pola te można opisywać jako funkcje położenia $T(r, z)$ i $\alpha(r, z)$. Z punktu widzenia pomiaru oznacza to, że stabilność parametrów produkcji bezpośrednio wpływa na powtarzalność stanu początkowego światłowodu na długości profilu.

Skurcz osnowy może wywoływać nacisk promieniowy na powierzchnię światłowodu i w ten sposób sprzyjać utrzymaniu kontaktu. Nie wystarcza to jednak do zapewnienia prawidłowego transferu odkształceń. O jego jakości decydują ciągłość połączenia w obszarze międzyfazowym, właściwości mechaniczne powłoki i jej zgodność chemiczna z żywicą [101, 106]. Poślizg lub odspojenie na granicy szkło–powłoka albo powłoka–osnowa, a także relaksacja materiału powłoki, mogą powodować różnicę pomiędzy odkształceniem kompozytu a odkształceniem rejestrowanym przez światłowód [125].

Do pełnej oceny integracji światłwodu potrzebna jest kontrola przebiegu włókna w gotowym profilu, ocena materiału bezpośrednio je otaczającego oraz porównanie odczytu światłowodu z niezależnym pomiarem odkształcenia.

2.3. Fizykochemiczne aspekty integracji włókien w kompozytach polimerowych

Wraz z rozwojem inżynierii materiałów kompozytowych nastąpiła zmiana paradygmatu definiowania granicy faz, od koncepcji dwuwymiarowego, płaskiego interfejsu do trójwymiarowego obszaru zwanego interfazą [129]. Zgodnie z definicjami sformułowanymi przez L.H. Sharpe'a oraz L.T. Drzala, interfaza stanowi wyodrębniony rejon, którego właściwości fizykochemiczne zmieniają się w sposób gradientowy od parametrów charakterystycznych dla włókna do tych właściwych dla fazy objętościowej osnowy [130, 131]. Interfaza charakteryzuje się zmodyfikowaną ruchliwością łańcuchów polimerowych oraz innym stopniem usieciowania w porównaniu z objętościową fazą matrycy [132].

Właściwości strefy międzyfazowej w znacznym stopniu wpływają na reologiczne zachowanie układu kompozytowego. W jej obrębie zachodzą złożone, uwarunkowane termodynamicznie i kinetycznie procesy adsorpcji i interdyfuzji. Często prowadzą do powstawania wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (IPN[4]) na granicy faz [133–135]. Właściwości te sprawiają, że obszar międzyfazowy nie tylko wpływa na jakość adhezji, ale funkcjonuje jako faza warunkująca spójność mikrostrukturalną materiału [129, 136].

Z punktu widzenia mikromechaniki uszkodzeń, struktura i jakość powiązania w obszarze międzyfazowym w sposób bezpośredni kontrolują efektywność transferu naprężeń pomiędzy osnową, a zbrojeniem [133, 137, 138]. Celowe projektowanie tej strefy pozwala na optymaliza-

[4]IPN – Interpenetrating Polymer Nerworks – strefa sieci wzajemnie przenikających się.

cję właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe oraz odporność na delaminację [139, 140]. Interfaza pełni ponadto rolę warstwy przejściowej, która umożliwia redystrybucję naprężeń termicznych i mechanicznych oraz ogranicza ich lokalne koncentracje. Odpowiednio ukształtowane właściwości interfazy mogą również sprzyjać mechanizmom dysypacji energii pękania, takim jak odspajanie i wyciąganie włókien z osnowy oraz odchylanie toru propagacji pęknięcia [141]. Co równie istotne, jej stabilność chemiczna przekłada się bezpośrednio na trwałość eksploatacyjną kompozytu. Odpowiednio ukształtowana warstwa międzyfazowa stanowi barierę zabezpieczającą włókna przed degradacją chemiczną oraz destrukcyjnym starzeniem higrotermicznym [142–144].

W przypadku prętów kompozytowych GFRP zjawiska te nabierają znaczenia ze względu na specyfikę procesu pultruzji. Prawidłowy przebieg impregnacji wymaga równomiernego zwilżenia ciągłych pasm rovingu ciekłą żywicą oraz wypełnienia przestrzeni pomiędzy włóknami [145]. Sprzyja to ograniczeniu porowatości, której powstawanie zależy również od lepkości żywicy, warunków przepływu, stopnia zagęszczenia zbrojenia i parametrów prowadzenia procesu [98]. Utwardzanie kompozytu w ogrzewanej matrycy formującej prowadzi do ukształtowania się interfazy, będącej wypadkową fizykochemicznych interakcji pomiędzy krzemionkową strukturą szkła, nałożoną warstwą preparacji (sizingu) na roving a makrocząsteczkami żywicy epoksydowej [133].

Skuteczność transferu naprężeń w tym układzie jest bezpośrednio powiązana z energią adhezji, modyfikowaną przez preparację powierzchniową włókien. Aplikowany na włókna sizing zawiera m.in. silany organofunkcyjne pełniące rolę czynników sprzęgających [133, 146]. Związki te wykazują podwójną funkcjonalność: z jednej strony formują silne mostki siloksanowe z powierzchnią szkła, a z drugiej kowalencyjnie (lub poprzez dyfuzję w sieć IPN) wiążą się z polimerową osnową [142, 147]. Sizing pełni równolegle funkcję ochronną włókien przed inicjacją defektów i uszkodzeniami mechanicznymi podczas formowania.

Analiza zjawisk na granicy faz w prętach pultrudowanych wymaga uwzględnienia wielu mechanizmów fizykochemicznych. Obejmuje nie tylko statyczne parametry adhezji (takie jak termodynamiczna praca adhezji czy interakcje kwasowo-zasadowe) [135, 148] oraz złożoną chemię silanów (tworzenie mostków siloksanowych i sieci przenikających się) [142, 146, 149] ale również kinetykę zwilżania [150]. Pełna infiltracja gęstych pasm włókien przez osnowę polimerową jest determinowana przez relację sił kapilarnych oraz lepkości dynamicznej żywicy. Odpowiednie zbilansowanie tych parametrów w procesie pultruzji jest kluczowe dla skutecznej eliminacji pustek powietrznych, które stanowią krytyczną wadę strukturalną kompozytu [98, 151]. Istotnym czynnikiem wpływającym na ostateczną strukturę kompozytu jest frakcja objętościowa zbrojenia. W jednokierunkowych pultrudowanych profilach może osiągać udział 65% [149]. Zgodnie z analitycznymi modelami upakowania, przy wysokiej zawartości zbrojenia odległości międzywłóknowe ulegają drastycznej redukcji, osiągając często wartości niższe od średnicy pojedynczego włókna [152]. W takich warunkach zmodyfikowane fizykochemicznie obszary interfazy sąsiadujących włókien wzajemnie się przenikają, co prowadzi do ich perkolacji i utworzenia ciągłego ośrodka. W efekcie właściwości kompozytu mogą być w dużym stopniu determinowane przez parametry strefy międzyfazowej [129]. Bliskość powierzchni zbrojenia generuje

silne ograniczenia przestrzenne, co indukuje złożone, trójosiowe stany naprężeń termicznych i skurczowych [133, 149, 153]. W rezultacie właściwości fizykochemiczne oraz termomechaniczne uwięzionego polimeru – w tym ruchliwość łańcuchów, lokalny moduł sprężystości oraz temperatura zeszklenia ulegają istotnym zmianom i mogą różnić się od właściwości polimeru w wolnej fazie objętościowej [135, 142, 154].

2.3.1. Teorie adhezji w układzie szkło–polimer

Opis oddziaływań zachodzących w obszarze międzyfazowym wymaga zastosowania modeli teoretycznych, które porządkują mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie i trwałość połączenia [151]. W literaturze wyodrębnia się kilka komplementarnych teorii adhezji, z których każda akcentuje inny aspekt oddziaływań międzyfazowych [135, 155]. W praktyce inżynierskiej żadna z nich nie funkcjonuje samodzielnie – stanowią raczej uzupełniające się ramy interpretacyjne. W odniesieniu do układu szkło–epoksyd szczególne znaczenie mają: teoria adsorpcyjna (termodynamiczna), chemiczna, dyfuzyjna, elektrostatyczna oraz mechaniczna [135, 155]. Ich zestawienie przedstawiono w Tabeli 2-5.

Tablica 2-5. Zestawienie teorii adhezji i dominujących mechanizmów występujących w układzie szkło–epoksyd.

Teoria adhezji	Mechanizm dominujący	Znaczenie w układzie szkło–epoksyd
Adsorpcyjna (termodynamiczna)	Oddziaływania międzycząsteczkowe rozwijane po uzyskaniu bliskiego kontaktu pomiędzy powierzchniami, obejmujące przede wszystkim siły dyspersyjne van der Waalsa, wiązania wodorowe oraz oddziaływania donorowo–akceptorowe, w tym oddziaływania kwasowo–zasadowe Lewisa [151, 155].	Warunkuje powstanie bliskiego kontaktu molekularnego pomiędzy ciekłą żywicą a powierzchnią włókna. Skuteczne zwilżanie ogranicza obecność pustek i nieciągłości na granicy faz oraz umożliwia rozwinięcie oddziaływań międzycząsteczkowych [133, 145, 151].
Chemiczna	Powstawanie pierwotnych wiązań międzyfazowych, przede wszystkim kowalencyjnych i jonowych. W układach zawierających promotory adhezji silan łączy część zdolną do oddziaływania z powierzchnią nieorganiczną z grupą organofunkcyjną reaktywną lub kompatybilną z osnową polimerową [133, 151, 156].	Ma szczególne znaczenie w przypadku włókien szklanych modyfikowanych silanami. Powstawanie trwałych wiązań pomiędzy warstwą silanową, szkłem i osnową polimerową zwiększa stabilność strefy międzyfazowej, szczególnie w obecności wilgoci, ograniczając proces wypierania polimeru z powierzchni szkła przez wodę [133, 151, 157].

Ciąg dalszy na następnej stronie...

Tablica 2-5. Zestawienie teorii adhezji i dominujących mechanizmów występujących w układzie szkło–epoksyd (cd.)

Teoria adhezji	**Mechanizm dominujący**	**Znaczenie w układzie szkło–epoksyd**
Dyfuzyjna	Wzajemne przenikanie cząsteczek lub segmentów łańcuchów polimerowych przez granicę faz, prowadzące do powstania strefy międzyfazowej o stopniowo zmieniających się właściwościach [133, 151, 155].	W układach zawierających warstwę silanową możliwe jest powstanie rozszerzonej strefy międzyfazowej, w której składniki osnowy wnikają w warstwę promotora adhezji, a procesom dyfuzyjnym mogą towarzyszyć reakcje chemiczne. Mechanizm ten uzupełnia bezpośrednie wiązanie chemiczne pomiędzy fazą nieorganiczną i organiczną [151, 157, 158].
Elektrostatyczna	Przeniesienie ładunku pomiędzy powierzchniami o odmiennym charakterze elektronowym oraz wynikające z niego oddziaływanie elektrostatyczne po obu stronach granicy faz [151, 155].	W układzie szkło–epoksyd nie jest uznawana za dominujący mechanizm trwałej adhezji. Efekty elektrokinetyczne mogą jednak wpływać na orientację i sposób osadzania jonowych lub aminofunkcyjnych silanów na powierzchni szkła podczas nanoszenia ich z roztworów wodnych, a tym samym pośrednio wpływać na właściwości powstającej strefy międzyfazowej [133, 157, 159].
Mechaniczna	Mechaniczne zazębienie utwardzonej osnowy w nierównościach i porach powierzchni oraz zwiększenie rzeczywistej powierzchni kontaktu i złożoności drogi propagacji pęknięcia [133, 151, 155].	Może zwiększać odporność granicy faz na rozdzielenie i poślizg, szczególnie przy obciążeniu ścinającym. Niezależnie od mikrozazębienia, podczas utwardzania i chłodzenia mogą powstawać ściskające naprężenia resztkowe wynikające ze skurczu osnowy i różnic rozszerzalności cieplnej, które utrzymują włókno i osnowę w kontakcie oraz zwiększają opór wobec poślizgu międzyfazowego [133, 160].

Podczas pultruzji warunki w obszarze międzyfazowym zmieniają się wraz z kolejnymi etapami procesu. Najpierw ciekła osnowa musi zwilżyć powierzchnię włókien i wniknąć pomiędzy nie [135, 145]. W dalszej kolejności, podczas utwardzania, rozwijają się oddziaływania chemiczne. Ich przebieg może być dodatkowo modyfikowany przez obecność silanowych promotorów adhezji [98, 157]. Utwardzanie i późniejsze chłodzenie prowadzą do powstawania naprężeń resztkowych, które wpływają na mechaniczne warunki kontaktu włókna z osnową [133, 160]. W praktyce trudno więc przypisać jakość połączenia jednemu mechanizmowi. Właściwości strefy międzyfazowej są efektem kilku zjawisk zachodzących równocześnie lub kolejno po sobie [155].

Efektywny transfer obciążeń w kompozytach polimerowych wynika ze współdziałania oddziaływań chemicznych na granicy faz oraz mechanicznych warunków kontaktu włókna z osnową, na które wpływają m.in. naprężenia resztkowe powstające wskutek skurczu osnowy [133, 135,

155, 160].

W układach szkło–epoksyd zwiększenie adhezji chemicznej uzyskuje się między innymi przez zastosowanie organofunkcyjnych silanów o ogólnym wzorze $R\text{-}SiX_3$ [142, 149, 156], gdzie X oznacza grupę hydrolizującą, natomiast R zawiera grupę organofunkcyjną zdolną do oddziaływania z osnową polimerową. Związki te wykazują dwojaką reaktywność. Podczas przygotowania warstwy silanowej grupy X ulegają hydrolizie, w wyniku której powstają grupy silanolowe $\mathrm{Si\text{-}OH}$. Silanole mogą następnie kondensować między sobą oraz z grupami hydroksylowymi obecnymi na powierzchni szkła, tworząc wiązania siloksanowe $\mathrm{Si\text{-}O\text{-}Si}$ [142, 149, 156, 157]. Odpowiednio dobrana grupa organofunkcyjna może natomiast uczestniczyć w reakcjach zachodzących podczas sieciowania osnowy epoksydowej [142, 157].

Zgodnie z koncepcją Plueddemanna wiązania siloksanowe w obszarze szkło–silan mogą w obecności wody ulegać częściowej hydrolizie, co może sprzyjać lokalnej relaksacji naprężeń. Po usunięciu wody, w sprzyjających warunkach, możliwa jest ponowna kondensacja grup silanolowych [133, 157]. Mechanizmu tego nie należy jednak utożsamiać z pełnym odtworzeniem pierwotnych właściwości połączenia, ponieważ obecność wilgoci może również prowadzić do degradacji obszaru międzyfazowego. Dodatkowo w strefie międzyfazowej może zachodzić wzajemne przenikanie składników warstwy powierzchniowej i osnowy, prowadzące w określonych układach do powstania struktury o charakterze przenikającej się sieci polimerów [135].

Oprócz oddziaływań chemicznych na przenoszenie obciążeń przez granicę faz może wpływać docisk promieniowy. Zwiększa on opór tarcia podczas poślizgu włókna względem osnowy, na przykład po częściowym odspojeniu granicy faz lub podczas próby wyciągania włókna [135, 149]. Docisk ten może powstawać wskutek niedopasowania odkształceń cieplnych włókna i osnowy podczas chłodzenia, a także wskutek skurczu chemicznego osnowy podczas utwardzania.

Docisk promieniowy może zwiększać opór tarcia w częściowo odspojonej strefie międzyfazowej, o ile zostaje zachowany kontakt pomiędzy jej powierzchniami [161, 162]. Nie opisuje on jednak samodzielnie transferu odkształceń w nienaruszonej strefie międzyfazowej. W takim przypadku obciążenie osiowe jest przekazywane za pośrednictwem naprężeń stycznych w osnowie i powłoce światłowodu oraz na granicach pomiędzy tymi warstwami [82, 163]. Z tego względu analizę przenoszenia odkształceń na szklaną część światłowodu przeprowadzono w dalszej części pracy z wykorzystaniem trójfazowego modelu opóźnienia ścinania [163].

Poprawna identyfikacja naprężeń resztkowych oraz sprawności interfejsu jest niezbędna do późniejszej, poprawnej interpretacji zmian lokalnego profilu widmowego sygnału rozproszonego wykorzystującego zjawisko Rayleigha wzdłuż osi pręta. Fizyczne powiązanie wyznaczonych analitycznie odkształceń z lokalnym przesunięciem częstotliwości widmowej, przy uwzględnieniu efektów fotoelastycznych oraz specyfiki pomiarów rozłożonych, zostanie szczegółowo omówione w kolejnych rozdziałach.

2.3.2. Trójfazowy model opóźnienia ścinania dla prętów kompozytowych GFRP zintegrowanych z czujnikiem światłowodowym

Dwufazowy układ włókno szklane–osnowa epoksydowa stanowi podstawowe przybliżenie obszaru międzyfazowego w kompozycie GFRP. Obecność powłoki ochronnej światłowodu wymaga jednak rozszerzenia tego opisu do układu trójwarstwowego. W modelu takim wyróżnia się: warstwę wewnętrzną, którą stanowi szklana część światłowodu obejmująca rdzeń i płaszcz o zewnętrznej średnicy około 125 μm; warstwę pośrednią w postaci polimerowej powłoki ochronnej, na przykład akrylanowej lub poliimidowej; oraz ośrodek zewnętrzny, reprezentujący otaczający kompozyt GFRP [82, 163–165]. W takim ujęciu obciążenie jest przekazywane z kompozytu do szklanej części światłowodu za pośrednictwem naprężeń stycznych rozwijających się w powłoce oraz na granicach pomiędzy poszczególnymi warstwami.

Analityczny model opóźnienia ścinania[5] opisuje przenoszenie odkształceń osiowych z otaczającego kompozytu na szklaną część światłowodu za pośrednictwem naprężeń stycznych rozwijających się w powłoce polimerowej oraz na granicach szkło–powłoka i powłoka–kompozyt [163, 165, 166].

W ujęciu mikromechanicznym, przy założeniu osiowosymetrycznego rozkładu naprężenia stycznego na obwodzie światłowodu, równanie równowagi sił dla nieskończenie małego wycinka jego szklanej części o długości dx przyjmuje postać:

$$\frac{dP_\mathrm{f}}{dx} = -2\pi r_\mathrm{f}\tau_\mathrm{i}, \tag{2-46}$$

gdzie P_f oznacza siłę osiową przenoszoną przez szklaną część światłowodu, r_f jest zewnętrznym promieniem jego płaszcza, natomiast τ_i oznacza naprężenie styczne na granicy pomiędzy płaszczem a powłoką polimerową [82, 163]. Znak ujemny wynika z przyjętej konwencji kierunku działania naprężenia stycznego.

Ponieważ $P_\mathrm{f} = \sigma_\mathrm{f} A_\mathrm{f}$, przy czym $A_\mathrm{f} = \pi r_\mathrm{f}^2$, równanie równowagi można zapisać w postaci:

$$\frac{d\sigma_\mathrm{f}}{dx} = -\frac{2\tau_\mathrm{i}}{r_\mathrm{f}}, \tag{2-47}$$

Przyjmując liniowo-sprężysty model materiałowy $\sigma_\mathrm{f} = E_\mathrm{f}\varepsilon_\mathrm{f}$, otrzymuje się zależność pomiędzy naprężeniem stycznym na granicy warstw a gradientem odkształcenia osiowego szklanej części światłowodu:

$$\tau_\mathrm{i} = -\frac{E_\mathrm{f} r_\mathrm{f}}{2}\frac{d\varepsilon_\mathrm{f}}{dx}, \tag{2-48}$$

Zależność ta stanowi podstawę modeli opóźnienia ścinania stosowanych do opisu transferu odkształceń w czujnikach światłowodowych [163–165].

Analiza równowagi warstwy powłoki $(r_\mathrm{f} \leq r \leq r_\mathrm{p})$ prowadzi, przy założeniach modelu opóźnienia ścinania, do rozkładu naprężenia stycznego odwrotnie proporcjonalnego do promienia r. W otaczającym ośrodku kompozytowym $(r_\mathrm{p} \leq r \leq r_\mathrm{m})$ rozkład ten uwzględnia

[5] ang. *shear-lag*

dodatkowo warunek zaniku naprężenia stycznego na zewnętrznej granicy analizowanego obszaru, $\tau_{\mathrm{m}}(r_{\mathrm{m}}) = 0$. Przyjmując ciągłość przemieszczeń na granicach warstw, otrzymuje się następujące zależności [163, 164]:

$$u_{\mathrm{p}} - u_{\mathrm{f}} = \int_{r_{\mathrm{f}}}^{r_{\mathrm{p}}} \gamma_{\mathrm{p}}\, dr = \int_{r_{\mathrm{f}}}^{r_{\mathrm{p}}} \frac{\tau_{\mathrm{i}} r_{\mathrm{f}}}{G_{\mathrm{p}} r}\, dr = \frac{\tau_{\mathrm{i}} r_{\mathrm{f}}}{G_{\mathrm{p}}} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{p}}}{r_{\mathrm{f}}}\right), \tag{2-49}$$

$$\begin{aligned} u_{\mathrm{m}} - u_{\mathrm{p}} &= \int_{r_{\mathrm{p}}}^{r_{\mathrm{m}}} \gamma_{\mathrm{m}}\, dr \\ &= \int_{r_{\mathrm{p}}}^{r_{\mathrm{m}}} \frac{\tau_{\mathrm{i}} r_{\mathrm{f}}}{G_{\mathrm{m}} r} \left(1 - \frac{r^2 - r_{\mathrm{p}}^2}{r_{\mathrm{m}}^2 - r_{\mathrm{p}}^2}\right) dr \\ &= \frac{\tau_{\mathrm{i}} r_{\mathrm{f}}}{G_{\mathrm{m}}} \left[\frac{r_{\mathrm{m}}^2}{r_{\mathrm{m}}^2 - r_{\mathrm{p}}^2} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{m}}}{r_{\mathrm{p}}}\right) - \frac{1}{2}\right]. \end{aligned} \tag{2-50}$$

gdzie G_{p} oznacza moduł ścinania powłoki, natomiast G_{m} jest efektywnym modułem ścinania otaczającego ośrodka kompozytowego. Promień r_{m} wyznacza zewnętrzną granicę obszaru materiału, w którym model uwzględnia zaburzenie pola odkształcenia wywołane obecnością światłowodu. Po zsumowaniu przyrostów przemieszczeń i wykorzystaniu zależności $\varepsilon = du/dx$ otrzymuje się równanie opisujące transfer odkształcenia pomiędzy kompozytem a szklaną częścią światłowodu [163, 164]:

$$\frac{d^2 \varepsilon_{\mathrm{f}}}{dx^2} - \beta^2 \left(\varepsilon_{\mathrm{f}} - \varepsilon_{\mathrm{m}}\right) = 0. \tag{2-51}$$

Występujący w równaniu współczynnik β jest parametrem opóźnienia ścinania. Uwzględnia on właściwości mechaniczne i geometrię poszczególnych warstw oraz określa charakterystyczną długość, na której odkształcenie otaczającego kompozytu jest przekazywane do szklanej części światłowodu. Na podstawie wcześniejszych zależności parametr ten przyjmuje postać [163, 164]:

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{E_{\mathrm{f}} r_{\mathrm{f}}^2 \left[\frac{1}{G_{\mathrm{p}}} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{p}}}{r_{\mathrm{f}}}\right) + \frac{1}{G_{\mathrm{m}}} \left(\frac{r_{\mathrm{m}}^2}{r_{\mathrm{m}}^2 - r_{\mathrm{p}}^2} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{m}}}{r_{\mathrm{p}}}\right) - \frac{1}{2}\right)\right]}}. \tag{2-52}$$

gdzie:

- r_{f} – zewnętrzny promień szklanej części światłowodu, obejmującej rdzeń i płaszcz [m];
- r_{p} – zewnętrzny promień powłoki polimerowej [m];
- r_{m} – zewnętrzny promień obszaru otaczającego kompozytu, w którym model uwzględnia zaburzenie pola odkształcenia wywołane obecnością światłowodu [m];
- E_{f} – moduł Younga szklanej części światłowodu [Pa];
- G_{p} – moduł ścinania powłoki polimerowej [Pa];

G_{m} – efektywny moduł ścinania otaczającego ośrodka kompozytowego [Pa].

Dla stałego odkształcenia otaczającego materiału ε_{m} oraz skończonego odcinka o długości $2L$, którego końce nie przenoszą siły osiowej,

$$\sigma_{\mathrm{f}}(-L) = \sigma_{\mathrm{f}}(L) = 0,$$

rozwiązanie równania różniczkowego ma postać [163, 164]:

$$\varepsilon_{\mathrm{f}}(x) = \varepsilon_{\mathrm{m}}\left[1 - \frac{\cosh(\beta x)}{\cosh(\beta L)}\right]. \tag{2-53}$$

Rozwiązanie pokazuje, że odkształcenie szklanej części światłowodu osiąga wartość odkształcenia otaczającego materiału stopniowo, wraz ze wzrostem odległości od końców odcinka przenoszącego obciążenie. Charakterystyczna długość transferu jest odwrotnie proporcjonalna do parametru β. Obniżenie modułu ścinania powłoki G_{p} zwiększa jej podatność, zmniejsza wartość β i wydłuża drogę potrzebną do przekazania odkształcenia do szklanej części światłowodu [163, 164].

3. MATODYKA BADAWCZA

3.1. Materiały i aparatura badawcza

3.1.1. Komponenty prętów GFRP

W badaniach zastosowano hybrydowe pręty kompozytowe (rys. 3-1), w których rdzeń stanowiły włókna szklane z helikalnym oplotem na powierzchni z włókien bazaltowych. W osi geometrycznej pręta zintegrowano jednomodowy czujnik światłowodowy w powłoce akrylanowej.



Rys. 3-1. *Widok wyprodukowanych prętów GFRP zwiniętych w kręgi po 50–70 mb.*

Dobór materiałów przeprowadzono zgodnie z wymaganiami technologicznymi procesu pultruzji oraz koniecznością zapewnienia przekazywania odkształceń pomiędzy kompozytem a światłowodem. W szczególności uwzględniono właściwości osnowy epoksydowej oraz jej modyfikację, ukierunkowaną na ograniczenie kruchości materiału i zapewnienie odpowiednich warunków współpracy międzyfazowej w układzie światłowód–matryca–zbrojenie. Szczegółową charakterystykę fizykochemiczną komponentów zestawiono w Tabeli 3-1.

Tablica 3-1. *Zestawienie materiałów i półproduktów zastosowanych w badaniach prętów kompozytowych zintegrowanych z czujnikiem światłowodowym.*

Komponent / funkcja	***Nazwa chemiczna / parametr***	***Właściwość***	***Udział***
Żywica epoksydowa	Diglicydylowy eter bisfenolu A (DGEBA)	EEW: 187 g/eq Lepkość (25 °C): 12800 mPa·s Zawartość części lotnych: 0,08%	100 cz.wag.
Utwardzacz	Bezwodnik metylotetrahydroftalowy (MTHPA)	Skład: 95% MTHPA, 5% THPA Liczba kwasowa: ≥ 660 mg KOH/g Wolne kwasy: $\leq 0{,}5\%$	75 cz.wag.
Akcelerator	2,4,6-tris(dimetyloaminometylo)fenol	Całkowita liczba aminowa: 610–635 mg KOH/g Lepkość (25 °C): 120–250 mPa·s	5 cz.wag.
Modyfikator	Eter diglicydylowy poli(propylenoglikolu) (PPGDGE)	Gęstość: 1,02–1,06 g/cm^3 Lepkość (25 °C): 40–90 mPa·s	7 cz.wag.
Zbrojenie kierunkowe	Roving szklany	—	—
Zbrojenie oplotu	Roving bazaltowy	—	—
Czujnik światłowodowy	Światłowód jednomodowy	Powłoka: akrylan	

Osnowę prętów stanowi czteroskładnikowy system epoksydowy, w skład którego wchodzi żywica bazowa, utwardzacz bezwodnikowy, akcelerator aminowy oraz reaktywny modyfikator udarności.

Jako komponent bazowy zastosowano eter diglicydylowy bisfenolu A (DGEBA) o równoważniku epoksydowym EEW $= 187$ g/eq oraz lepkości 12800 mPa·s (w temp. 25 °C). Niska zawartość frakcji lotnych (ok. 0,08% mas.) ogranicza ryzyko powstawania porowatości w strukturze kompozytu.

Proces sieciowania realizowano z wykorzystaniem bezwodnika metylotetrahydroftalowego (MTHPA). Utwardzacz zawierał ok. 95% MTHPA oraz ok. 5% bezwodnika tetrahydroftalowego (THPA), co jest typowe dla przemysłowych systemów bezwodnikowych. Liczba kwasowa (≥ 660 mg KOH/g), będąca miarą zawartości grup reaktywnych, wskazuje na wysoki potencjał reakcyjny układu, natomiast niska zawartość wolnych kwasów ($\leq 0{,}5\%$) sprzyja stabilności właściwości końcowych kompozytu. Niska lepkość utwardzacza (20–80 mPa·s w 25 °C) umożliwiła efektywne zwilżanie włókien szklanych i bazaltowych w procesie ciągłym.

Funkcję katalizatora reakcji pełnił 2,4,6-tris(dimetyloaminometylo)fenol, należący do grupy amin trzeciorzędowych. Związek ten charakteryzuje się wysoką całkowitą liczbą aminową (610–635 mg KOH/g), co wskazuje na dużą zawartość grup aktywnych zdolnych do inicjacji reakcji otwarcia pierścienia epoksydowego. Lepkość akceleratora w temperaturze 25 °C (120–250 mPa·s) nie powodowała istotnych zmian właściwości reologicznych mieszaniny reakcyjnej.

W celu modyfikacji właściwości mechanicznych osnowy zastosowano diglicydylowy eter poli(propylenoglikolu) (PPGDGE), pełniący funkcję reaktywnego modyfikatora epoksydowego. Związek ten charakteryzuje się niską lepkością w temperaturze 25 °C (40–90 mPa·s), co umożliwia jego jednorodne wprowadzenie do układu reakcyjnego bez istotnego zwiększenia lepkości

mieszaniny. Gęstość w zakresie 1,02–1,06 g/cm^3 jest zbliżona do gęstości żywicy epoksydowej, co sprzyja utrzymaniu jednorodności układu. PPGDGE uczestniczy w procesie sieciowania, wprowadzając do struktury polimerowej segmenty o charakterze elastycznym. Obecność tych segmentów prowadzi do obniżenia kruchości materiału oraz zwiększenia zdolności do odkształceń bez inicjacji pęknięć.

Główne wzmocnienie strukturalne prętów stanowił roving bezpośredni [193]. Zastosowane włókna należą do grupy szkła bezborowego, określanego jako szkło o podwyższonej odporności korozyjnej. Wybór tego typu zbrojenia wynika z konieczności zapewnienia trwałości prętów w środowisku alkalicznym.

Włókna elementarne rovingu pokryto preparacją powierzchniową (sizingiem) na bazie silanów, kompatybilną z żywicami epoksydowymi. Preparacja ta została zaprojektowana z uwzględnieniem procesów ciągłego formowania, takich jak pultruzja, umożliwiając uzyskanie wysokiego stopnia impregnacji wiązek włókien w strefie przesycania.

Odpowiednia jakość impregnacji ogranicza powstawanie nieciągłości strukturalnych na granicy faz włókno–matryca, co ma istotne znaczenie dla poprawnego przekazywania odkształceń w kompozycie oraz ich dalszego transferu do zintegrowanego światłowodu.

W badaniach zastosowano jednomodowy światłowód telekomunikacyjny typu SMF-28e+, zgodny z rekomendacją ITU-T G.652.D [176]. Światłowód ten charakteryzuje się standardową geometrią, w której rdzeń o średnicy ok. 8,2 µm otoczony jest płaszczem o średnicy 125 µm i pokryty powłoką akrylanową o średnicy ok. 242 µm.

Elementy badawcze stanowiły belki betonowe zbrojone prętami stalowymi oraz prętami kompozytowymi, wśród których wyróżniono pręty zintegrowane ze światłowodem oraz pręty referencyjne bez światłowodów. Zbrojenie podłużne wykonano z żebrowanych prętów stalowych o średnicy 8 mm (stal typu B500SP) [180] oraz prętów GFRP o średnicy 3,15 mm, natomiast zbrojenie poprzeczne stanowiły stalowe strzemiona z prętów gładkich o średnicy 3 mm jako elementy pomocnicze stabilizujące układ zbrojenia.

Tablica 3-2. *Skład mieszanki betonowej zastosowanej w badaniach.*

Komponent / Funkcja	***Nazwa chemiczna / Parametr***	***Właściwość***	***Udział***
Cement portlandzki	CEM II/A-LL 42,5 R	Klinkier: 80–94%, wapień: 6–20%	450 kg/m^3
Kruszywo 1	0–2 mm	—	657 kg/m^3
Kruszywo 2	2–8 mm	—	597 kg/m^3
Kruszywo 3	8–16 mm	—	608 kg/m^3
Pręt żebrowany	∅ 8 mm	Stal B500SP [180]	—
Woda	H_2O	—	175 l/m^3
Domieszka	—	Stabilizacja / regulacja lepkości	1%

Do wykonania próbek zastosowano beton o projektowanej klasie wytrzymałości C35/40,

oparty na cemencie portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL 42,5 R. Skład mieszanki betonowej dobrano w sposób zapewniający odpowiednią urabialność oraz jednorodność struktury, istotną z punktu widzenia współpracy zbrojenia kompozytowego z betonem.

Materiały pomocnicze

W procesie przygotowania próbek oraz realizacji badań wykorzystano materiały pomocnicze i eksploatacyjne (tabela 3-3), które nie stanowiły elementów konstrukcyjnych analizowanego układu, lecz były niezbędne z punktu widzenia integracji światłowodu, przygotowania toru pomiarowego oraz zabezpieczenia połączeń.

Materiały te obejmowały elementy stosowane w procesie łączenia światłowodów, zabezpieczania spawów oraz przygotowania światłowodu do pomiaru. Ich dobór wynikał z wymagań technologicznych oraz konieczności zapewnienia stabilnych warunków prowadzenia pomiarów metodą DFOS.

Tablica 3-3. *Materiały pomocnicze i eksploatacyjne zastosowane w badaniach.*

Element	*Materiał / oznaczenie*	*Funkcja*
Światłowodowe elementy przyłączeniowe	Pigtail SC/APC, SM 9/125, G.652.D, 0,9 mm, 1 m	Zapewnienie połączenia światłowodu z systemem pomiarowym
Osłony spawów	Osłony termiczne spawów, długość 50 mm	Ochrona mechaniczna miejsca spawu
Powłoka zabezpieczająca	Żywica UV (ATK UV RESIN 55A)	Stabilizacja i zabezpieczenie połączeń
Osłony dodatkowe	Koszulki termokurczliwe z klejem (średnica 4 mm i 8 mm)	Uszczelnienie i ochrona odcinka światłowodu między spawem a prętem
Środki czyszczące	Alkohol izopropylowy	Oczyszczanie powierzchni światłowodu
Materiały do przygotowania powierzchni	Papier ścierny	Przygotowanie próbek do obserwacji mikroskopowych
Środki ochrony indywidualnej	Maski ochronne klasy FFP3	Ochrona podczas pracy z chemikaliami i oparami
Rozpuszczalnik	Woda dejonizowana	Przygotowanie roztworów chemicznych

3.1.2. Aparatura badawcza

Do realizacji programu badań wykorzystano aparaturę umożliwiającą charakterystykę właściwości materiałowych, ocenę struktury oraz przeprowadzenie pomiarów mechanicznych i światłowodowych. Zastosowane urządzenia wraz z ich przeznaczeniem przedstawiono poniżej:

- reometr rotacyjny *Anton Paar MCR 302* z układem pomiarowym płytka–płytka oraz systemem termostatowania, wykorzystany do charakterystyki reologicznej kompozycji

epoksydowej i wyznaczenia zmian jej lepkości w warunkach odpowiadających kolejnym etapom procesu technologicznego;

- różnicowy kalorymetr skaningowy *Mettler Toledo DSC 1* z systemem chłodzenia typu *intracooler*, wykorzystany do badań termicznych i kinetycznych kompozycji żywicznej oraz oceny stopnia utwardzenia osnowy w gotowym kompozycie;
- maszyna wytrzymałościowa *Zwick/Roell Z2000*, wyposażona w osiowy ekstensometr stykowy, wykorzystana do badań właściwości mechanicznych prętów GFRP przy rozciąganiu;
- maszyna wytrzymałościowa *Zwick/Roell 1445 RetroLine*, wykorzystywana w badaniach prowadzonych w układzie trójpunktowego obciążenia, w tym do wyznaczania pozornej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki;
- młot wahadłowy do badań udarności metodą Charpy'ego, o maksymalnej energii uderzenia 56,4 J, wykorzystany do porównawczej oceny odporności prętów GFRP na obciążenie dynamiczne;
- cyfrowy mikroskop optyczny *KEYENCE VHX-900F*, wykorzystany do obserwacji mikrostruktury prętów, przebiegu zbrojenia oraz obszaru otaczającego zintegrowany światłowód;
- skaningowy mikroskop elektronowy *Zeiss EVO MA 15*, wyposażony w detektor elektronów wtórnych SE2 oraz system mikroanalizy rentgenowskiej EDS, wykorzystany do szczegółowej obserwacji mikrostruktury przekroju pręta oraz obszaru światłowód–osnowa;
- przemysłowy mikrotomograf rentgenowski *Nikon XT H 225*, wykorzystany do nieniszczącej analizy wewnętrznej struktury prętów;
- analizator światłowodowy *LUNA ODiSI 7100*, wykorzystany do przestrzennie rozłożonego pomiaru odkształceń na podstawie zmian sygnatury rozpraszania wstecznego Rayleigha w światłowodzie zintegrowanym z prętem GFRP;
- system cyfrowej korelacji obrazu *ARAMIS*, wykorzystany do niezależnego, pełnopolowego pomiaru odkształceń powierzchni elementów betonowych podczas prób obciążeniowych;
- stanowisko wytrzymałościowe *Zwick/Roell* z siłownikiem hydraulicznym o zakresie 600 kN, wykorzystane do czteropunktowego zginania elementów betonowych zawierających pręty GFRP ze zintegrowanymi światłowodami;
- młotek Schmidta, wykorzystany do uzupełniającej, nieniszczącej oceny wytrzymałości betonu w wykonanych elementach badawczych;
- spawarka łukowa do światłowodów wraz z oprzyrządowanie do przygotowania zakończeń włókien, wykorzystane do wykonywania połączeń światłowodów zintegrowanych z prętami z pigtailami pomiarowymi;
- przenośny tester światłowodowy ze złączem APC, wykorzystany do kontroli ciągłości toru optycznego na kolejnych etapach przygotowania i badania elementów.

3.1.3. Linia technologiczna do pultruzji

Pręty kompozytowe będące przedmiotem badań wyprodukowano na stanowisku pultruzyjnym przeznaczonym do ciągłej produkcji wyrobów o stałym przekroju. Przed rozpoczęciem prac możliwe było na nim wytwarzanie prętów kompozytowych, jednak stanowisko wymagało ponownego uruchomienia oraz dostosowania do zastosowanego układu materiałowego i założonej geometrii wyrobu.

W ramach realizowanych prac zaprojektowano i wykonano modyfikacje umożliwiające wytwarzanie prętów GFRP ze światłowodem prowadzonym wzdłuż osi wyrobu. Przygotowano wannę impregnacyjną z mechanicznym układem odsączania nadmiaru żywicy z rovingów, niezależny tor podawania i impregnacji światłowodu oraz przystawkę służącą do jego wprowadzania i wstępnego pozycjonowania w formowanej wiązce. Rovingi i światłowód podawano z wykorzystaniem mechanicznych układów utrzymujących ich naciąg. Po połączeniu nowych elementów z istniejącym stanowiskiem przeprowadzono jego uruchomienie i dobrano parametry procesu.

Stanowisko miało budowę modułową. Kolejne sekcje odpowiadały następującym po sobie operacjom: podawaniu rovingów, impregnacji, odsączaniu nadmiaru żywicy, prowadzeniu i złączeniu zbrojenia w jedną wiązkę, integracji światłowodu, wykonywaniu owijki bazaltowej, formowaniu przekroju, utwardzaniu, chłodzeniu i odbiorowi gotowego pręta. Ruch materiału wymuszał gąsienicowy układ ciągnący umieszczony za sekcją chłodzenia. Widok całej linii wraz z oznaczeniem jej głównych modułów przedstawiono na rys. 3-2 (oznaczenia od 1 do 6) oraz rys. 3-9 (oznaczenia od 7 do 9).



Rys. 3-2. *Widok stanowiska wykorzystanego do ciągłego wytwarzania prętów GFRP ze zintegrowanym światłowodem. Oznaczenia: 1 – regał ze szpulami rovingu, 2 – sekcja impregnacji i odsączania, 3 – niezależny tor światłowodu, 4 – układ kolimujący, 5 – głowica wykonująca owijkę bazaltową, 6 – odcinek grzewczy.*

Zbrojenie podłużne pręta tworzyły rovingi szklane rozwijane z oddzielnych szpul umieszczonych na regale. Każdy roving prowadzono niezależnie do wanny impregnacyjnej, co ograniczało splątywanie pasm przed ich połączeniem w jedną wiązkę. Przejście rovingów przez kąpiel żywiczną pokazano na rys. 3-3.

Po wyjściu z wanny rovingi kierowano do mechanicznego układu odsączania, przedstawionego na rys. 3-4. Nadmiar osnowy usuwano wskutek tarcia i docisku występujących podczas przejścia pasm przez wałki oraz prowadnice wyposażone w pióra wykonane z tworzywa polimerowego. Układ ograniczał ilość żywicy przenoszonej do dalszej części linii.



Rys. 3-3. *Przejście rovingów szklanych przez wannę impregnacyjną zawierającą układ żywiczny.*



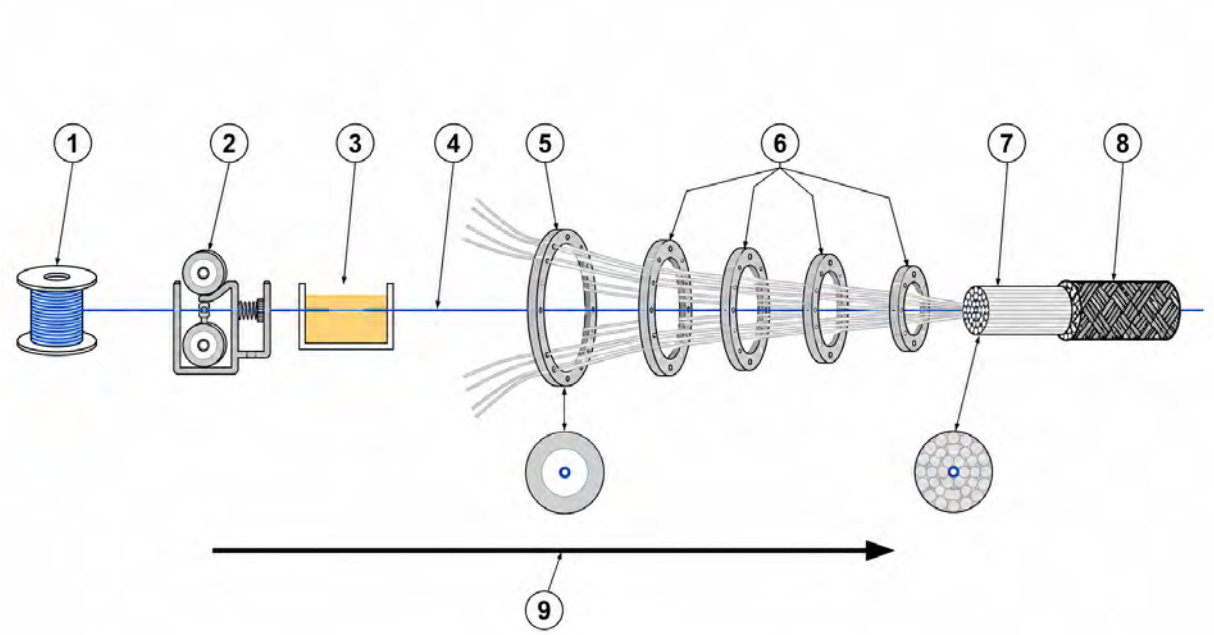
Rys. 3-4. *Mechaniczny układ odsączania nadmiaru żywicy z zaimpregnowanych rovingów szklanych.*

Po odsączeniu poszczególne rovingi prowadzono oddzielnie do strefy ich stopniowego skupiania. Elementy prowadzące utrzymywały uporządkowany przebieg pasm i przygotowywały je do pierścieniowego rozmieszczenia wokół osi pręta. Sposób prowadzenia zbrojenia przed układem kolimującym przedstawiono na rys. 3-7.

Integracja światłowodu wymagała utworzenia toru niezależnego od torów rovingów szklanych. Zastosowano światłowód jednomodowy Corning SMF28e bez zewnętrznego płaszcza kablowego, z zachowaną fabryczną powłoką akrylanową o średnicy zewnętrznej 242 μm. Światłowód rozwijano z oddzielnej szpuli i prowadzono z wykorzystaniem mechanicznego układu utrzymującego naciąg. Rozwiązanie to ograniczało powstawanie luzu oraz pozwalało zachować prostoliniowy przebieg włókna przed jego połączeniem z głównym strumieniem materiału. Znaczenie stabilnego podawania i prowadzenia światłowodu w procesie pultruzji wskazywano również w pracach [99, 100, 102].

Przed wprowadzeniem do struktury pręta światłowód przechodził przez oddzielną wannę zawierającą układ żywiczny. Dzięki temu jego impregnacja przebiegała niezależnie od impregnacji zbrojenia głównego. Oba tory łączyły się bezpośrednio przed układem kolimującym: światłowód wprowadzano w osi, natomiast zaimpregnowane rovingi szklane rozmieszczano wokół niego pierścieniowo. Kolejne elementy prowadzące stopniowo skupiały rovingi wokół sensora, tworząc zwartą wiązkę. Układ ustalał początkowe położenie światłowodu względem zbrojenia podłużnego. Zasadę połączenia obu torów przedstawiono schematycznie na rys. 3-5.

Po opuszczeniu układu kolimującego światłowód był utrzymywany przez otaczające go rovingi szklane. Na powierzchnię nieutwardzonej wiązki nanoszono następnie ciągłą owijkę



Rys. 3-5. *Schemat ideowy integracji światłowodu z wiązką rovingów podczas formowania pręta: 1 – szpula światłowodu, 2 – mechaniczny układ utrzymujący naciąg, 3 – oddzielna wanna impregnacyjna, 4 – światłowód prowadzony osiowo, 5 – rovingi szklane rozmieszczone pierścieniowo, 6 – strefa stopniowego skupiania rovingów, 7 – zwarta wiązka ze światłowodem w osi, 8 – owijka bazaltowa, 9 – kierunek ruchu materiału.*

helikalną z dwóch rovingów bazaltowych. Szpule umieszczono po przeciwnych stronach obrotowej głowicy, a oba rovingi podawano jednocześnie. Symetryczne rozmieszczenie punktów podawania ograniczało poprzeczne przemieszczanie składników wiązki i pomagało zachować położenie światłowodu do czasu utwardzenia osnowy. Owijka stabilizowała zbliżony do kołowego przekrój oraz tworzyła na powierzchni pręta regularne użebrowanie, przewidziane do zwiększenia mechanicznego zakotwienia pręta w betonie. Sposób wykonywania owijki przedstawiono na rys. 3-6.



Rys. 3-6. *Obrotowa głowica nanosząca na formowany pręt owijkę helikalną z dwóch rovingów bazaltowych podawanych z przeciwnych stron.*

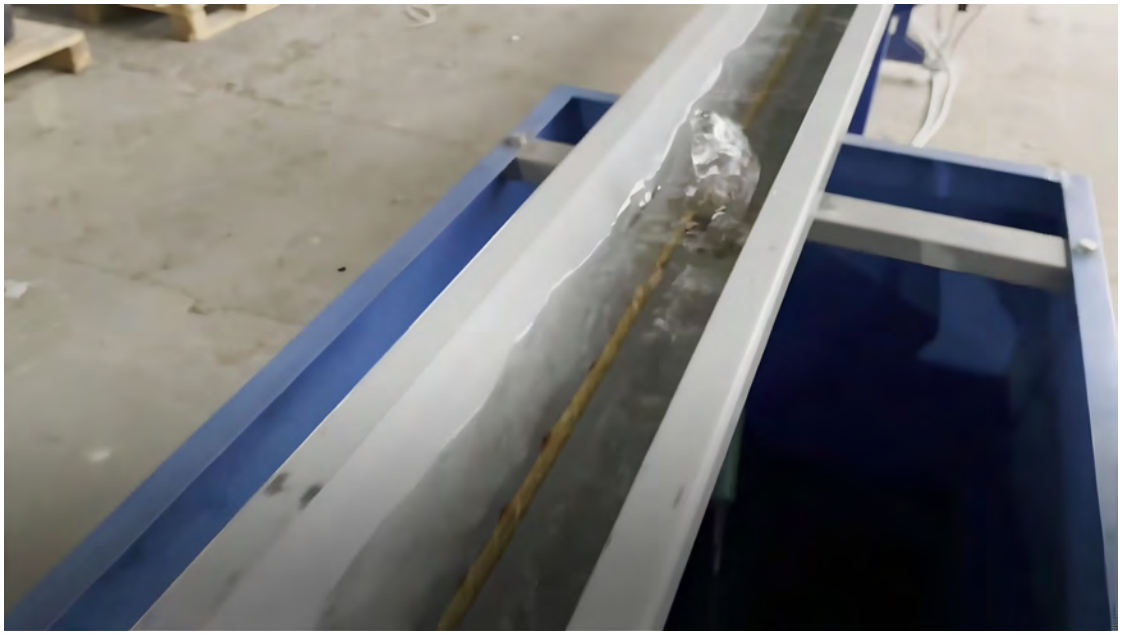


Rys. 3-7. *Prowadzenie zaimpregnowanych rovingów szklanych przed ich skupieniem w formowaną wiązkę.*

Utwardzanie prowadzono w pięciu kolejno ustawionych komorach o długości 2 m każda.

Łączna długość odcinka grzewczego wynosiła 10 m. Komory wyposażono w grzałki oporowe i zestawiono w trzy strefy temperaturowe, dla których przyjęto wartości w przedziale 95 – 145 °C. Stopniowe zwiększanie temperatury umożliwiało prowadzenie sieciowania osnowy wzdłuż drogi przemieszczania materiału. Wartości temperatur dobrano na podstawie prac optymalizacyjnych linii oraz wyników różnicowej kalorymetrii skaningowej, obejmujących badania dynamiczne i izotermiczne układu żywicznego oraz wyznaczenie temperatury przejścia szklistego. Wyniki analizy termicznej wyznaczyły wstępne warunki utwardzania, które następnie zweryfikowano podczas prób technologicznych. Szczegółową charakterystykę termiczną układu żywicznego przedstawiono w podrozdziale 4.3.

Prędkość przeciągania podczas wytwarzania prętów wynosiła ok. 0,5 m/min. Przyjęta kombinacja prędkości przeciągania i temperatur umożliwiała uzyskanie na wyjściu pręta zachowującego uformowany przekrój. Następnie pręt kierowano do sekcji chłodzenia wodnego. Przebieg tej operacji podczas wytwarzania pręta w pracach optymalizacji linii przedstawiono na rys. 3-8.



Rys. 3-8. *Pręt referencyjny GFRP bez zintegrowanego światłowodu podczas przejścia przez sekcję chłodzenia wodnego – optymalizacja parametrów procesu.*

Za sekcją chłodzenia pręt trafiał do gąsienicowego układu ciągnącego, przedstawionego na rys. 3-9. Gotowy wyrób mógł być następnie cięty na odcinki albo nawijany.

Uruchomienie stanowiska prowadzono etapowo. Najpierw wykonywano pręty referencyjne bez owijki bazaltowej oraz bez zintegrowanego światłowodu. Próby te służyły sprawdzeniu współpracy poszczególnych sekcji oraz ustaleniu warunków impregnacji, odsączania, formowania, ogrzewania, chłodzenia i odciągania.

Podczas prób technologicznych obserwowano nadmierną ilość żywicy w formowanej wiązce, pęcherze żywiczne na powierzchni pręta oraz oznaki nadmiernego nagrzewania osnowy polimerowej. Zbyt duże opory w sekcji odsączania prowadziły do zrywania rovingów, a po urucho-



Rys. 3-9. *Gąsienicowy układ ciągnący wymuszający ciągły ruch formowanego pręta przez kolejne sekcje stanowiska. Oznaczenia: 7 – sekcja chłodzenia, 8 – gąsienicowy układ ciągnący, 9 – sekcja odbiorcza.*

mieniu niezależnego toru światłowodu także do przerywania włókna. Ograniczenie tych zjawisk wymagało zmniejszenia tarcia podczas odsączania, korekty sposobu prowadzenia materiałów oraz dostosowania warunków ogrzewania i odciągania.

W trakcie opracowywania niezależnego toru światłowodu sprawdzono trzy warianty wanny impregnacyjnej. Do dalszej produkcji wybrano wariant wymagający najmniejszej objętości roboczej, który zapewniał zarazem ciągłe zanurzenie i równomierne zwilżanie światłowodu. Ograniczało to zużycie mieszanki żywicznej i straty materiałowe związane z napełnianiem wanny, bez pogorszenia warunków impregnacji sensora.

Stabilność procesu oceniano na podstawie ciągłości wytwarzania oraz powtarzalności cech otrzymywanego wyrobu. Powierzchnię pręta kontrolowano organoleptycznie. Wymiary przekroju sprawdzano suwmiarką w kolejnych punktach na długości pręta.

Uzyskanie ciągłego pręta o długości przekraczającej 70 m, bez zerwania rovingów i zatrzymania linii, przyjęto jako potwierdzenie stabilnego przebiegu procesu. Drożność zintegrowanego toru optycznego sprawdzano po wytworzeniu zarówno przygotowanych odcinków pręta, jak i ciągłego odcinka o długości przekraczającej 30 m. Metodę przygotowania zakończeń światłowodu oraz procedurę kontroli jego ciągłości opisano w podrozdziałach 3.3.1, 3.3.2 oraz 3.3.3.

Ustawienie światłowodu w osi układu kolimującego określało warunki jego wprowadzenia, nie przesądzało jednak o rzeczywistym przebiegu sensora po zagęszczeniu rovingów i utwardzeniu osnowy. Końcowe położenie światłowodu w przekroju oraz jego przebieg wzdłuż pręta zweryfikowano za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej. Wyniki tej oceny przedstawiono w podrozdziale 4.1.3.

3.1.4. Wytwarzanie płaskich próbek metodą infuzji próżniowej

Jedną z metod rozpatrywanych na wstępnym etapie pracy była infuzja próżniowa VARTM (ang. *Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding*). Próby miały sprawdzić możliwość wytworzenia płaskich elementów kompozytowych o przekroju prostokątnym, ze światłowodem umieszczonym wewnątrz zbrojenia. Badania miały na tym etapie charakter technologiczny. Oceniano przede wszystkim przebieg infuzji oraz możliwość przesycenia zbrojenia żywicą.

Stanowisko przygotowano na płaskiej płycie szklanej pełniącej funkcję jednostronnej formy. Przed każdą próbą powierzchnię szkła pokrywano środkiem rozdzielającym PVA. Następnie przyklejano taśmę butylową, która wyznaczała obrys pola roboczego i tworzyła linię późniejszego uszczelnienia worka próżniowego.

Wewnątrz przygotowanego pola układano od dwóch do pięciu warstw taśmy z włókna węglowego. W obszarze zbrojenia prowadzono światłowód pomiarowy, ustalając jego przebieg i mocując go do podłoża. Osobnego przygotowania wymagały miejsca, w których światłowód przechodził przez uszczelnienie i był wyprowadzany poza worek próżniowy. Rozmieszczenie zbrojenia i światłowodu na powierzchni formy przedstawiono na rys. 3-10.



(a) Płyta szklana z polem roboczym wyznaczonym taśmą butylową.

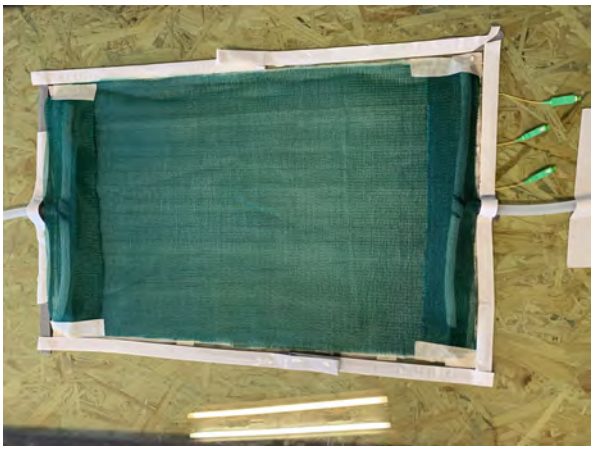
(b) Ułożenie zbrojenia oraz światłowodu pomiarowego.

Rys. 3-10. *Przygotowanie formy i rozmieszczenie materiałów przeznaczonych do wytworzenia płaskich próbek metodą VARTM.*

Na pakiecie zbrojenia układano warstwę delaminacyjną PA80, a następnie siatkę OM70 służącą do rozprowadzania żywicy. Doprowadzenie i odprowadzenie medium wykonano z użyciem przewodów oraz spiralnych rurek rozprowadzających. Tak przygotowany układ przykrywano workiem próżniowym. Jego krawędzie dociskano do taśmy butylowej na całym obwodzie formy(rys. 3-11).



(a) Warstwa delaminacyjna ułożona na pakiecie zbrojenia.



(b) Siatka rozprowadzająca oraz przewody układu infuzyjnego.

Rys. 3-11. *Materiały pomocnicze wykorzystane podczas przygotowania pakietu do infuzji próżniowej.*

Jeden z przewodów podłączano do pompy próżniowej, natomiast przewód zasilający umieszczano w pojemniku z przygotowaną mieszanką żywiczną. Po wytworzeniu podciśnienia żywica była zasysana do układu i przemieszczała się wzdłuż próbki za pośrednictwem siatki rozprowadzającej. Przez przezroczysty worek obserwowano położenie frontu żywicy oraz stopień przesycenia zbrojenia.

Po wypełnieniu obszaru próbki żywicą zamknięty układ umieszczano w komorze termicznej. Utwardzanie prowadzono w temperaturze $80\,^{\circ}\mathrm{C}$. Po zakończeniu procesu usuwano worek i materiały pomocnicze, a laminat oddzielano od szklanej formy. Przebieg infuzji oraz przykładowe płaskie próbki otrzymane po utwardzeniu przedstawiono na rys. 3-12.



(a) Przesycanie zbrojenia żywicą pod wpływem wytworzonego podciśnienia.



(b) Przykładowe próbki po utwardzeniu i oddzieleniu od formy.

Rys. 3-12. *Przebieg infuzji próżniowej i otrzymane płaskie próbki kompozytowe.*

Próbki wytworzone metodą VARTM poddano obserwacjom w mikroskopie optycznym. Badanie miało charakter jakościowy i służyło ocenie powierzchni laminatów oraz identyfikacji widocznych nieciągłości.

3.2. Metody Badawcze Prętów GFRP i kompozycji żywicznej

3.2.1. Mikroskopia optyczna

Analizę mikrostruktury prętów kompozytowych przeprowadzono przy użyciu cyfrowego mikroskopu optycznego KEYENCE VHX-900F, wyposażonego w układ optyczny umożliwiający płynną zmianę powiększenia. Obserwacje prowadzono przy powiększeniach od $30\times$ do $200\times$. Zastosowany system umożliwiał uzyskiwanie obrazów o rozszerzonej głębi ostrości przez łączenie ujęć rejestrowanych przy różnych położeniach płaszczyzny ostrości.

Badania obejmowały dwa rodzaje próbek:

- OS — pręt z osiowo zintegrowanym światłowodem jednomodowym w powłoce akrylanowej oraz zewnętrzną owijką bazaltową;
- NoOS — pręt referencyjny bez zintegrowanego światłowodu, wykonany z zastosowaniem takiej samej owijki bazaltowej jak w serii OS.

Obserwacje prowadzono w celu porównania ogólnej mikrostruktury obu serii, w szczególności rozmieszczenia zbrojenia szklanego, obszarów osnowy oraz ułożenia owijki bazaltowej. W próbkach OS oceniano dodatkowo położenie światłowodu względem pozostałych składników pręta i stan otaczającej go osnowy.

Próbki przygotowano w postaci przekrojów ukośnych względem osi podłużnej pręta. Taka orientacja płaszczyzny zgładu pozwalała obserwować wydłużone przekroje włókien oraz śledzić ich ułożenie na większym obszarze niż w przypadku przekroju poprzecznego. Ułatwiała również ocenę wzajemnego położenia rovingów szklanych, osnowy, owijki bazaltowej oraz światłowodu w próbkach OS.

Po przecięciu powierzchnie zgładów poddano szlifowaniu i polerowaniu mechanicznemu. Celem przygotowania powierzchni było ograniczenie nierówności i artefaktów powstałych podczas cięcia oraz uzyskanie płaszczyzny odpowiedniej do obserwacji mikroskopowych.

3.2.2. Skaningowa mikroskopia elektronowa

Mikrostrukturę przekroju poprzecznego pręta OS analizowano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego ZEISS EVO MA 15. Obserwacje obejmowały rozmieszczenie włókien szklanych i osnowy oraz strefę integracji światłowodu z otaczającym materiałem kompozytowym.

Obrazy rejestrowano z wykorzystaniem detektora elektronów wtórnych. Większość obserwacji prowadzono przy napięciu przyspieszającym 15 kV. Dla obrazu strefy światłowodu zastosowano napięcie 8 kV w celu ograniczenia objętości oddziaływania wiązki elektronów z materiałem i uzyskania czytelniejszego odwzorowania granic pomiędzy obserwowanymi warstwami. Stosowane powiększenia mieściły się w zakresie od $25\times$ do $2000\times$.

3.2.3. Tomografia komputerowa

Tomografię komputerową zastosowano do przestrzennej oceny wewnętrznej struktury pręta kompozytowego ze zintegrowanym światłowodem. Badanie obejmowało jeden odcinek pręta OS i miało na celu:

- ocenę położenia i ciągłości światłowodu względem geometrycznej osi pręta;
- ocenę lokalnego rozmieszczenia zbrojenia szklanego, osnowy i owijki bazaltowej;
- identyfikację pustek i innych nieciągłości możliwych do wykrycia przy zastosowanej wielkości woksela i uzyskanym kontraście obrazu;
- określenie przestrzennej orientacji zbrojenia względem osi podłużnej pręta.

Badanie wykonano za pomocą przemysłowego mikrotomografu rentgenowskiego Nikon XT H 225, wyposażonego w mikroogniskowe źródło promieniowania rentgenowskiego oraz płaski detektor panelowy. Maksymalne napięcie i moc zastosowanego źródła wynosiły odpowiednio 225 kV i 225 W. Do badania wykorzystano odcinek o długości 30 mm, wycięty z pręta OS. Próbkę zamocowano pionowo w uchwycie skanera, ustawiając jej oś podłużną możliwie blisko osi obrotu manipulatora.

Do dalszego opracowania wykorzystano zrekonstruowany wolumen danych tomograficznych. Zbiór zaimportowano do oprogramowania VGStudio MAX, w którym przygotowano przekroje, przeprowadzono segmentację światłowodu, wykonano wizualizacje trójwymiarowe oraz analizę orientacji zbrojenia. Wartości szarości wokseli odzwierciedlały lokalne różnice tłumienia promieniowania rentgenowskiego wynikające z budowy i składu badanego materiału.

Przed rozpoczęciem analizy wolumen zorientowano w układzie współrzędnych sceny w taki sposób, aby oś y była zgodna z osią podłużną pręta. Światłowód wyodrębniono na podstawie różnic wartości szarości względem otaczającego kompozytu. Jego położenie i ciągłość oceniano na kolejnych przekrojach poprzecznych i podłużnych oraz na wizualizacji trójwymiarowej.

Obszar próbki oddzielono od otaczającego powietrza na podstawie rozkładu wartości szarości. Następnie zdefiniowano obszar zainteresowania obejmujący wewnętrzną część kompozytu, z wyłączeniem zewnętrznej owijki bazaltowej oraz światłowodu. Tak wyznaczony obszar wykorzystano do oceny kierunkowości rovingów szklanych, natomiast ułożenie owijki analizowano oddzielnie.

Orientację zbrojenia analizowano w oprogramowaniu VGStudio MAX za pomocą modułu *Fiber Composite Material Analysis*. Analizę przeprowadzono dla obszaru obejmującego wewnętrzną część kompozytu, a lokalne kierunki włókien przedstawiono za pomocą palety barw.

Lokalne kierunki zbrojenia przedstawiono za pomocą palety barw zgodnej ze sferyczną legendą kierunków automatycznie generowaną przez oprogramowanie. Zrekonstruowany obraz przestrzenny ustawiono tak, aby oś y przebiegała wzdłuż osi podłużnej pręta. Zróżnicowanie barw umożliwiało jakościowe rozróżnienie rovingów przebiegających wzdłuż pręta od włókien zewnętrznej owijki, ułożonych pod kątem względem jego osi. Kąt ułożenia pasm owijki bazaltowej wyznaczano na widoku podłużnym. Określono kąt pomiędzy osią pręta a lokalnym kierunkiem widocznego pasma.

Wyniki analizy przedstawiono w postaci przekrojów poprzecznych i podłużnych, wizualizacji trójwymiarowych z wyodrębnionym światłowodem oraz barwnych map orientacji zbrojenia. Analiza obejmowała jeden odcinek pręta o długości 30 mm, dlatego otrzymane wyniki opisują lokalną strukturę badanego fragmentu.

3.2.4. Badania Reologiczne Systemu Epoksydowego

Badania reologiczne przeprowadzono na etapie doboru warunków przygotowania i przetwarzania systemu epoksydowego. Ich celem było określenie zależności lepkości od szybkości ścinania oraz ocena zmian lepkości kompozycji żywicznej podczas przetrzymywania jej w podwyższonej temperaturze. Uzyskane wyniki wykorzystano do oceny warunków przepływu i impregnacji zbrojenia oraz czasu, przez jaki przygotowana kompozycja zachowywała właściwości umożliwiające jej podawanie do układu pultruzyjnego.

Pomiary wykonano za pomocą reometru rotacyjnego *Anton Paar MCR 302*, wyposażonego w układ dwóch równoległych stalowych płytek o średnicy 20 mm. Temperaturę układu pomiarowego kontrolowano za pomocą płaszcza grzewczego współpracującego z cyrkulatorem cieczowym. Sterowanie aparaturą oraz rejestrację danych prowadzono w oprogramowaniu *RheoCompass*.

Próbki przygotowywano zgodnie z przyjętą procedurą dwuetapowej homogenizacji. Składniki systemu mieszano przez 3 min przy prędkości 300 obr.·min^{-1}. Następnie kompozycję przenoszono do czystego naczynia i kontynuowano mieszanie przez 1 min. Tak przygotowany materiał umieszczano w układzie pomiarowym reometru.

W pierwszym etapie wyznaczono zależność lepkości pozornej η od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$. Pomiar prowadzono w temperaturze 25 °C, zwiększając szybkość ścinania w zakresie od 0,1 do 1000 s^{-1}. Na podstawie otrzymanej krzywej lepkości oceniano charakter płynięcia badanej kompozycji oraz wybierano warunki prowadzenia kolejnego pomiaru. Jako referencyjną szybkość ścinania przyjęto $\dot{\gamma} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$.

W drugim etapie rejestrowano zmianę lepkości pozornej w funkcji czasu. Pomiar prowadzono w stałej temperaturze 40 °C i przy stałej szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$. Czas pomiaru wynosił 40 min, a wartości lepkości rejestrowano co 60 s. Badanie wykonano dla dwóch próbek przygotowanych według tej samej procedury. Uzyskane przebiegi wykorzystano do oceny zmian lepkości systemu podczas przebywania w podwyższonej temperaturze i w warunkach łagodnego ścinania.

3.2.5. Różnicowa kalorymetria skaningowa

Badania metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej przeprowadzono w celu scharakteryzowania reakcji sieciowania nieutwardzonej kompozycji żywicznej, określenia wpływu temperatury na czas jej przebiegu oraz oceny stanu utwardzenia osnowy w gotowych prętach kompozytowych. Program badań obejmował pomiary dynamiczne kompozycji żywicznej przy trzech szybkościach ogrzewania, pomiary izotermiczne w temperaturach odpowiadających zakresowi

pracy układu pultruzyjnego oraz analizę próbek pobranych z utwardzonych prętów.

Pomiary wykonano za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego *Mettler Toledo DSC 1*, wyposażonego w układ chłodzenia typu *intracooler*. Podczas wszystkich pomiarów komorę pomiarową przepłukiwano azotem przy przepływie 30 mL·min^{-1}. Rejestrację i podstawowe opracowanie wyników prowadzono w oprogramowaniu STAR^{e} w wersji 16.30.

Pomiary dynamiczne i analiza kinetyczna

Nieutwardzoną kompozycję żywiczną przygotowywano zgodnie z przyjętą procedurą dwuetapowej homogenizacji. Próbki umieszczano w kalorymetrze bezpośrednio po przygotowaniu, ograniczając czas ich przebywania w warunkach otoczenia przed rozpoczęciem pomiaru. Badania prowadzono w zakresie temperatur od 0 do 210 °C, stosując szybkości ogrzewania β wynoszące 5, 10 i 20 °C·min^{-1}. Masy próbek wynosiły odpowiednio 6,6, 3,6 i 2,6 mg.

Dla każdej krzywej wyznaczono temperaturę ekstrapolowanego początku reakcji T_{onset}, temperaturę maksimum egzotermy T_{p}, temperaturę ekstrapolowanego końca reakcji T_{endset}, szerokość piku w połowie jego wysokości oraz całkowitą entalpię reakcji ΔH. Pik egzotermiczny całkowano po odjęciu liniowej linii bazowej łączącej granice obszaru całkowania. Wartość entalpii normalizowano względem masy próbki i wyrażano w J·g^{-1}.

Na podstawie strumienia cieplnego skorygowanego względem linii bazowej i znormalizowanego na masę próbki wyznaczano względny stopień przereagowania:

$$\alpha(t) = \frac{\displaystyle\int_{t_0}^{t} \dot{q}_{\mathrm{corr}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau}{\displaystyle\int_{t_0}^{t_f} \dot{q}_{\mathrm{corr}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau}, \tag{3-1}$$

gdzie:

- α – względny stopień przereagowania;
- $\dot{q}_{\mathrm{corr}}$ – strumień cieplny skorygowany względem linii bazowej i znormalizowany na masę próbki [W·g^{-1}];
- t_0 – czas odpowiadający początkowi całkowanego efektu egzotermicznego;
- t_{f} – czas odpowiadający końcowi całkowanego efektu egzotermicznego.

Wartość całki w mianowniku odpowiada całkowitej entalpii reakcji zarejestrowanej podczas danego pomiaru. Zależność $\alpha(T)$ otrzymano przez przyporządkowanie wartości czasu odpowiadającej jej temperatury, rejestrowanej podczas ogrzewania ze stałą szybkością β.

Temperatury odpowiadające stopniom przereagowania $\alpha = 0{,}1$, $0{,}5$ i $0{,}9$ wyznaczano przez interpolację liniową krzywych $\alpha(T)$. Dodatkowo określano względny stopień przereagowania α_{p} osiągnięty w temperaturze maksimum egzotermy T_{p}. Parametry te wykorzystano do porównania położenia i przebiegu reakcji zarejestrowanej przy poszczególnych szybkościach ogrzewania.

Do orientacyjnej oceny kinetyki reakcji sieciowania zastosowano metodę Kissingera, wykorzystując przesunięcie temperatury maksimum egzotermy T_{p} wraz ze zmianą szybkości

ogrzewania. Zależność Kissingera opisano równaniem:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = C - \frac{E_{a,\mathrm{poz}}}{RT_p}, \tag{3-2}$$

gdzie:

β – szybkość ogrzewania;
T_p – temperatura maksimum egzotermy wyrażona w kelwinach;
R – uniwersalna stała gazowa;
C – stała odpowiadająca wyrazowi wolnemu zależności liniowej;
$E_{a,\mathrm{poz}}$ – pozorna energia aktywacji reakcji.

Wartość $E_{a,\mathrm{poz}}$ wyznaczono z nachylenia prostej otrzymanej przez regresję liniową zależności $\ln(\beta/T_p^2)$ od $1/T_p$ [167].

W obliczeniach wykorzystano temperatury maksimum egzotermy zarejestrowane przy szybkościach ogrzewania 5, 10 i 20 °C·min^{-1}. Ze względu na wyznaczenie prostej na podstawie trzech punktów pomiarowych otrzymaną wartość traktowano jako pozorny, uśredniony parametr charakteryzujący badaną reakcję, bez przypisywania jej szczegółowego mechanizmu.

Pomiary izotermiczne

Uzupełnieniem pomiarów dynamicznych były badania prowadzone w warunkach izotermicznych w temperaturach 140, 160 i 180 °C. Masa analizowanych próbek kompozycji żywicznej wynosiła 5,0 mg. Podczas każdego pomiaru rejestrowano zmianę strumienia cieplnego w funkcji czasu od rozpoczęcia etapu izotermicznego.

Efekt egzotermiczny traktowano jako obraz przebiegu reakcji sieciowania. Na podstawie zarejestrowanych krzywych określano orientacyjny czas trwania egzotermy, rozumiany jako czas od rozpoczęcia etapu izotermicznego do zaniku wyraźnego efektu cieplnego i ustabilizowania się sygnału w pobliżu linii bazowej. Ze względu na szybki przebieg reakcji w najwyższych temperaturach wyznaczonych wartości nie utożsamiano z dokładnym czasem osiągnięcia pełnego stopnia przereagowania.

Charakterystyka utwardzonych prętów kompozytowych

Charakterystykę osnowy w gotowych prętach przeprowadzono na próbkach pobranych z serii OS i NoOS. Próbki przygotowano w postaci cienkich plastrów obejmujących pełny przekrój poprzeczny pręta. Miejsce pobrania fragmentu wzdłuż osi pręta wybierano losowo. Masa próbek mieściła się w zakresie od 6 do 9 mg. Ze względu na osiowe położenie światłowodu każdy analizowany przekrój próbki OS obejmował również jego fragment.

Pomiary prowadzono podczas pierwszego ogrzewania w zakresie temperatur od 0 do 340 °C, z szybkością 10 °C·min^{-1}. Pierwsze ogrzewanie zastosowano w celu scharakteryzowania osnowy w stanie odpowiadającym materiałowi po procesie pultruzji, z uwzględnieniem jego historii cieplnej i ewentualnej reaktywności resztkowej.

Temperaturę zeszklenia T_g wyznaczano jako temperaturę punktu środkowego zmiany skokowej pojemności cieplnej, zgodnie z procedurą *Midpoint ISO* dostępną w oprogramowaniu. Dodatkowo oceniano występowanie resztkowego efektu egzotermicznego powyżej zakresu przemiany szklistej. Jeżeli efekt taki był obecny, wyznaczano temperaturę jego początku, temperaturę maksimum oraz resztkową entalpię reakcji ΔH_{res}. Pole efektu egzotermicznego całkowano po odjęciu liniowej linii bazowej, a wartość entalpii normalizowano względem całkowitej masy próbki kompozytowej i wyrażano w J·g^{-1} kompozytu.

Wartości ΔH_{res} nie przeliczano bezpośrednio na procentowy stopień przereagowania osnowy. Entalpia reakcji nieutwardzonej kompozycji żywicznej była odniesiona do masy samej kompozycji żywicznej, natomiast entalpia resztkowa próbek prętów – do całkowitej masy kompozytu zawierającego osnowę i zbrojenie. Bez niezależnego wyznaczenia udziału masowego osnowy bezpośrednie porównanie tych wartości prowadziłoby do błędnego oszacowania stopnia utwardzenia. Stan osnowy w gotowych prętach oceniano zatem na podstawie wartości T_g oraz obecności i wielkości resztkowego efektu egzotermicznego wyrażonego względem masy kompozytu.Charakterystykę osnowy w gotowych prętach przeprowadzono na próbkach pobranych z serii OS i NoOS. Próbki przygotowano w postaci cienkich plastrów obejmujących pełny przekrój poprzeczny pręta. Miejsce pobrania fragmentu wzdłuż osi pręta wybierano losowo. Masa próbek mieściła się w zakresie od 6 do 9 mg. Ze względu na osiowe położenie światłowodu każdy analizowany przekrój próbki OS obejmował również jego fragment.

Pomiary prowadzono podczas pierwszego ogrzewania w zakresie temperatur od 0 do 340 °C, z szybkością 10 °C·min^{-1}. Pierwsze ogrzewanie zastosowano w celu scharakteryzowania osnowy w stanie odpowiadającym materiałowi po procesie pultruzji, z uwzględnieniem jego historii cieplnej i ewentualnej reaktywności resztkowej.

Temperaturę zeszklenia T_{g} wyznaczano jako temperaturę punktu środkowego zmiany skokowej pojemności cieplnej, zgodnie z procedurą *Midpoint ISO* dostępną w oprogramowaniu. Dodatkowo oceniano występowanie resztkowego efektu egzotermicznego powyżej zakresu przemiany szklistej. Jeżeli efekt taki był obecny, wyznaczano temperaturę jego początku, temperaturę maksimum oraz resztkową entalpię reakcji ΔH_{res}. Pole efektu egzotermicznego całkowano po odjęciu liniowej linii bazowej, a wartość entalpii normalizowano względem całkowitej masy próbki kompozytowej i wyrażano w J·g^{-1} kompozytu.

Wartości ΔH_{res} nie przeliczano bezpośrednio na procentowy stopień przereagowania osnowy. Entalpia reakcji nieutwardzonej kompozycji żywicznej była odniesiona do masy samej kompozycji żywicznej, natomiast entalpia resztkowa próbek prętów – do całkowitej masy kompozytu zawierającego osnowę i zbrojenie. Bez niezależnego wyznaczenia udziału masowego osnowy bezpośrednie porównanie tych wartości prowadziłoby do błędnego oszacowania stopnia utwardzenia. Stan osnowy w gotowych prętach oceniano zatem na podstawie wartości T_{g} oraz obecności i wielkości resztkowego efektu egzotermicznego wyrażonego względem masy kompozytu.

3.2.6. Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu

Celem badania było porównanie zachowania podczas rozciągania dwóch serii prętów GFRP: prętów ze zintegrowanym osiowo światłowodem (OS) oraz prętów referencyjnych bez światłowodu (NoOS). Wszystkie próbki badano według tej samej procedury, przy jednakowych parametrach pracy stanowiska.

Podstawą opracowania procedury była norma PN-EN ISO 10406-1:2015 [181], opisująca metody badań prętów FRP przeznaczonych do zbrojenia konstrukcji betonowych. Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej *Zwick/Roell Z2000*. Odkształcenie w kierunku osiowym mierzono za pomocą ekstensometru stykowego.

Badaniu poddano 13 prętów OS oraz 12 prętów NoOS. Do obliczeń przyjęto wyznaczoną średnicę pręta $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$, której odpowiada nominalne pole przekroju poprzecznego:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 7{,}79\ \mathrm{mm}^2, \tag{3-3}$$

gdzie:

A_0 – nominalne pole zastępczego przekroju kołowego [mm^2];
d – wyznaczona średnica pręta [mm].

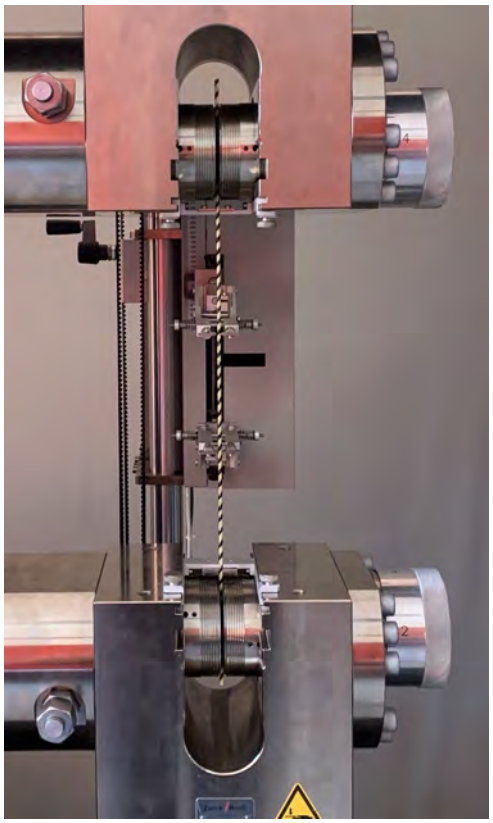
Ze względu na żebrowaną powierzchnię prętów wartość A_0 odnosi się do zastępczego pełnego przekroju kołowego. Przyjęto ją jako wspólną podstawę obliczania naprężeń i modułu sprężystości dla obu porównywanych serii.

Całkowita długość każdej próbki wynosiła 500 mm. Odcinek swobodny pomiędzy szczękami miał długość 300 mm, natomiast obustronne strefy chwytowe – po 100 mm. Długość odcinka swobodnego spełniała wymagania PN-EN ISO 10406-1:2015, zgodnie z którymi dla prętów powinna wynosić co najmniej 300 mm i nie mniej niż $40d$. W badanym przypadku $40d = 126\ \mathrm{mm}$.

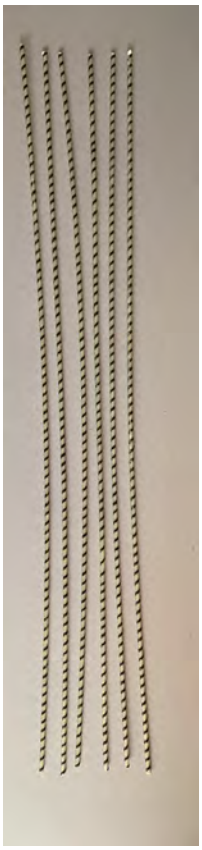
Odkształcenie rejestrowano za pomocą ekstensometru o bazie pomiarowej $L_0 = 100\ \mathrm{mm}$, umieszczonego symetrycznie w środkowej części odcinka swobodnego. Zastosowana baza spełniała wymaganie $L_0 \geq 100\ \mathrm{mm}$ oraz $L_0 \geq 8d$. Układ zamocowania próbki przedstawiono na rys. 3-13, natomiast widok przygotowanych próbek na rys. 3-14.

Próby prowadzono w temperaturze 23 °C i przy wilgotności względnej $\mathrm{RH} = 51\ \%$. Przed rozpoczęciem zasadniczej części badania przykładano obciążenie wstępne odpowiadające nominalnemu naprężeniu $0{,}1\ \mathrm{MPa}$.

Zadaną szybkość narastania odkształcenia ustalono na $1{,}5\ \% \cdot \mathrm{min}^{-1}$. Wartość ta odpowiada górnej granicy zakresu $0{,}5$–$1{,}5\ \% \cdot \mathrm{min}^{-1}$ podanego w PN-EN ISO 10406-1:2015. Podczas próby w sposób ciągły rejestrowano siłę rozciągającą oraz odkształcenie osiowe mierzone ekstensometrem. Wszystkie próbki OS i NoOS badano przy tych samych ustawieniach stanowiska.



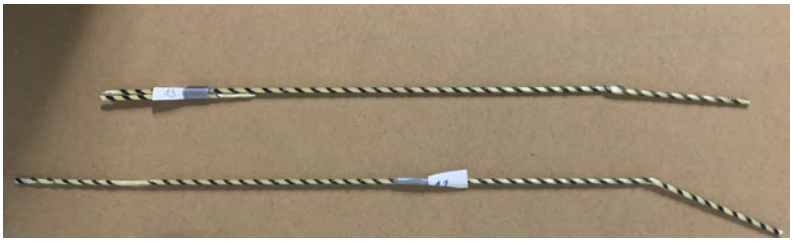
Rys. 3-13. Zamocowany pręt GFRP z sensorem optycznym w szczękach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 3-14. Próbki GFRP o długości 500 mm.

Końce próbek mocowano bezpośrednio w mechanicznych szczękach maszyny. Każdą ze stref chwytowych owinięto dwiema warstwami papieru ściernego o gradacji P180. Papier obejmował całą długość strefy chwytowej wynoszącą $100\ \mathrm{mm}$. Rozwiązanie to zastosowano w celu zwiększenia tarcia pomiędzy prętem a szczękami oraz ograniczenia ich bezpośredniego oddziaływania na powierzchnię kompozytu. Dla wszystkich próbek zachowano jednakowy sposób przygotowania stref chwytowych i takie samo ustawienie mechanizmu dociskowego.

W trakcie badań nie obserwowano osiowego poślizgu prętów w szczękach. Zniszczenia występowały poza strefami chwytowymi, chociaż w części prób były zlokalizowane w niewielkiej odległości od krawędzi szczęk. Nie stwierdzono przypadków zerwania pręta wewnątrz uchwytu. Z tego względu żadnego wyniku nie wyłączono z analizy wyłącznie na podstawie lokalizacji zniszczenia. Przykładową lokalizację zniszczenia pręta przedstawiono na rys. 3-15.



Rys. 3-15. Przykładowa lokalizacja zniszczenia prętów GFRP po próbie rozciągania.

Zastosowane mocowanie nie eliminowało całkowicie wpływu naprężeń poprzecznych wywołanych dociskiem szczęk. Wyniki maksymalnego naprężenia rozciągającego traktowano zatem przede wszystkim jako parametry porównawcze, uzyskane dla obu serii w jednakowej konfiguracji badawczej.

Podczas badania rejestrowano siłę rozciągającą F oraz zmianę długości bazy pomiarowej ekstensometru ΔL. Odkształcenie osiowe obliczano z zależności:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \tag{3-4}$$

gdzie:

ε – odkształcenie osiowe pręta;
ΔL – zmiana długości bazy pomiarowej ekstensometru [mm];
L_0 – baza pomiarowa ekstensometru, wynosząca 100 mm.

Dla każdej próbki wyznaczono maksymalną zarejestrowaną siłę:

$$F_M = F_{\max}, \tag{3-5}$$

gdzie:

F_M – maksymalna siła rozciągająca zarejestrowana podczas badania [N].

Oraz odpowiadające jej maksymalne nominalne naprężenie rozciągające:

$$\sigma_{t,M} = \frac{F_M}{A_0}, \tag{3-6}$$

gdzie:

$\sigma_{t,M}$ – maksymalne nominalne naprężenie rozciągające [MPa];
F_M – maksymalna zarejestrowana siła rozciągająca [N];
A_0 – nominalne pole zastępczego przekroju kołowego, wynoszące $7{,}79\ \mathrm{mm}^2$.

Wartość $\sigma_{t,M}$ przyjęto jako podstawowy parametr służący do porównania serii OS i NoOS.

Moduł sprężystości przy rozciąganiu E_t wyznaczono jako nachylenie siecznej przebiegu naprężenie–odkształcenie pomiędzy poziomami obciążenia odpowiadającymi 20 % i 50 % maksymalnej siły F_M:

$$E_t = \frac{\sigma_{t,50} - \sigma_{t,20}}{\varepsilon_{50} - \varepsilon_{20}}, \tag{3-7}$$

gdzie:

E_t – moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa];
$\sigma_{t,20}$ – nominalne naprężenie odpowiadające 20 % wartości maksymalnej siły [MPa];
$\sigma_{t,50}$ – nominalne naprężenie odpowiadające 50 % wartości maksymalnej siły [MPa];
ε_{20} – odkształcenie odpowiadające 20 % wartości maksymalnej siły;
ε_{50} – odkształcenie odpowiadające 50 % wartości maksymalnej siły.

Zakres ten przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 10406-1:2015 [181].

Dla maksymalnego nominalnego naprężenia rozciągającego $\sigma_{t,M}$ oraz modułu sprężystości E_t wyznaczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, 95 % przedział ufności dla średniej oraz wartości minimalne i maksymalne.

Podstawowym parametrem porównania serii OS i NoOS było maksymalne nominalne naprężenie rozciągające $\sigma_{t,M}$. Różnicę średnich oceniono za pomocą testu t Welcha, niewymagającego założenia jednakowych wariancji w porównywanych grupach. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$. Oprócz wartości p podano różnicę średnich OS–NoOS, jej wartość względną odniesioną do średniej serii NoOS oraz 95 % przedział ufności.

Skalę różnicy pomiędzy seriami opisano dodatkowo za pomocą współczynnika g Hedgesa, uwzględniającego korektę dla małych prób. Znak współczynnika zachowano zgodnie z kolejnością OS–NoOS. Analogiczną analizę modułu E_t potraktowano jako uzupełniającą. Braku istotności statystycznej nie interpretowano jako dowodu równoważności obu serii.

3.2.7. Wytrzymałość na zginanie

Właściwości mechaniczne prętów GFRP przy zginaniu wyznaczono w trójpunktowym układzie obciążenia. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej *Zwick/Roell 1445 RetroLine* (nr seryjny: 736695). Konfigurację stanowiska i przebieg próby przyjęto na podstawie procedury laboratoryjnej opracowanej z wykorzystaniem PN-EN ISO 14125 [182]. Z uwagi na kołowy i żebrowany przekrój prętów normę wykorzystano jako odniesienie metodyczne.

Badaniu poddano dwie serie po $n = 12$ próbek. Serię OS stanowiły pręty z osiowo zintegrowanym światłowodem, natomiast serię NoOS – pręty referencyjne bez światłowodu. Rozpiętość między podporami wynosiła $L = 48\ \mathrm{mm}$. Przy nominalnej średnicy pręta $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$ stosunek L/d był równy $15{,}24$. Przy takiej geometrii na rejestrowane przemieszczenie mogą wpływać zarówno ugięcie wywołane zginaniem, jak i odkształcenia postaciowe związane ze ścinaniem. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunkach 3-16 i 3-17.

Obciążenie wstępne zadano jako wartość odpowiadającą naprężeniu $0{,}1\ \mathrm{MPa}$. Badanie przeprowadzono z prędkością trawersy $2\ \mathrm{mm} \cdot \mathrm{min}^{-1}$. Testy prowadzono w temperaturze 23 °C i przy wilgotności względnej RH$= 51\ \%$. Wszystkie próbki badano przy takich samych ustawieniach stanowiska.

Podczas próby rejestrowano siłę F oraz przemieszczenie trawersy s. Dla każdej próbki wyznaczono maksymalną zarejestrowaną wartość siły:

$$F_M = \max F(s), \tag{3-8}$$

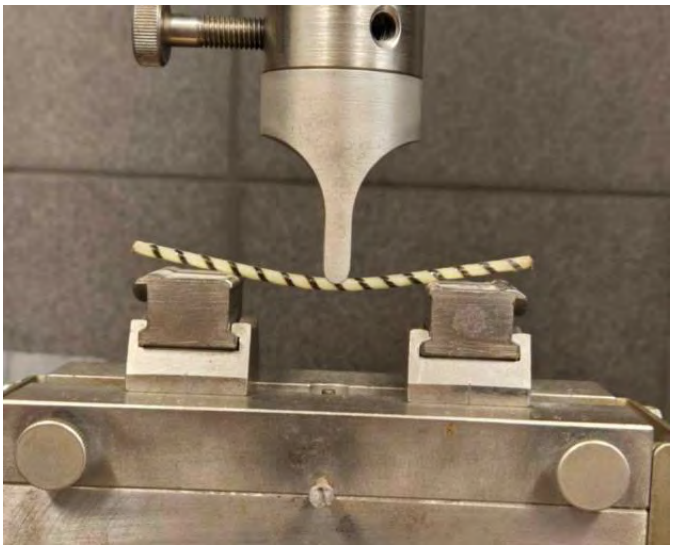
gdzie:

- F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby [N];
- F – siła zarejestrowana podczas próby [N];
- s – przemieszczenie trawersy [mm].

Żebrowanie powierzchni powodowało lokalne zmiany przekroju prętów wzdłuż ich osi.



Rys. 3-16. Widok na próbkę kompozytowego pręta na początku testu statycznego zginania.



Rys. 3-17. Widok na próbkę kompozytowego pręta pod koniec trwania testu statycznego zginania.

W obliczeniach przyjęto zastępczy model pełnego przekroju kołowego o średnicy nominalnej d. Wyznaczone na tej podstawie naprężenie ma charakter nominalny i nie uwzględnia lokalnych zmian geometrii i koncentracji naprężeń w obszarze żeber. Ten sam sposób obliczeń zastosowano dla wszystkich próbek, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy porównawczej serii OS i NoOS.

W układzie trójpunktowego zginania maksymalny moment zginający występował w połowie rozpiętości między podporami i wynosił:

$$M_{\max} = \frac{F_M L}{4}, \tag{3-9}$$

Dla zastępczego pełnego przekroju kołowego wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie określono z zależności:

$$W_b = \frac{\pi d^3}{32}, \tag{3-10}$$

Maksymalne nominalne naprężenie zginające wyznaczono następnie jako:

$$\sigma_{f,M} = \frac{M_{\max}}{W_b} = \frac{8 F_M L}{\pi d^3}, \tag{3-11}$$

gdzie:

- $M_{\max}$ – maksymalny moment zginający [N·mm];
- W_b – wskaźnik wytrzymałości zastępczego przekroju kołowego na zginanie [mm^3];
- $\sigma_{f,M}$ – maksymalne nominalne naprężenie zginające [MPa];
- F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby [N];
- L – rozpiętość między podporami [mm];
- d – nominalna średnica pręta [mm].

Wartości $\sigma_{f,M}$ odnoszą się do przyjętego zastępczego przekroju kołowego. Nie opisują

lokalnego stanu naprężenia w obszarze żeber, lecz stanowią wspólną miarę służącą do porównania prętów ze zintegrowanym światłowodem z prętami referencyjnymi.

W pierwotnej konfiguracji oprogramowania *testXpert* ustawiono średnicę pręta $d_0 = 3{,}00\ \mathrm{mm}$ zamiast nominalnej wartości $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$. Korekta tego parametru nie zmieniła zarejestrowanych przebiegów siły F i przemieszczenia trawersy s, wymagała jednak ponownego obliczenia wielkości zależnych od geometrii przekroju. Maksymalne nominalne naprężenie zginające $\sigma_{f,M}$ wyznaczono bezpośrednio z wartości F_M, zgodnie z równaniem (3-11), natomiast pozorny moduł sprężystości przy zginaniu E_f obliczono w sposób opisany w dalszej części rozdziału. Wpływ zmiany przyjętej średnicy na wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3-4.

Tablica 3-4. Wpływ zmiany średnicy przyjętej do obliczeń parametrów zginania.

Parametr	**Zależność od** d	**Współczynnik korekcyjny**	**Wartość współczynnika**
$\sigma_{f,M}$	d^{-3}	$\left(\frac{d_0}{d}\right)^3$	0,8638
E_f	d^{-4}	$\left(\frac{d_0}{d}\right)^4$	0,8227

Oznaczenia: $d_0 = 3{,}00\ \mathrm{mm}$ – średnica przyjęta w pierwotnej konfiguracji oprogramowania *testXpert*; $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$ – średnica przyjęta w końcowej analizie. Współczynnik korekcyjny oznacza stosunek wartości obliczonej dla średnicy d do wartości wyznaczonej dla średnicy d_0.

Pozorny moduł sprężystości przy zginaniu E_f wyznaczano z rosnącego odcinka przebiegu siły w funkcji przemieszczenia trawersy. Współczynnik nachylenia $k_{F,s}$ określano metodą regresji liniowej w zakresie obciążenia od 100 do 200 N. Dla belki swobodnie podpartej i obciążonej siłą skupioną w połowie rozpiętości pozorny moduł sprężystości przy zginaniu wyznaczono z zależności:

$$E_f = \frac{L^3}{48I} k_{F,s}, \tag{3-12}$$

gdzie geometryczny moment bezwładności zastępczego pełnego przekroju kołowego wynosi:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}, \tag{3-13}$$

Po uwzględnieniu geometrii przekroju kołowego otrzymano:

$$E_f = \frac{4L^3}{3\pi d^4} k_{F,s}, \tag{3-14}$$

gdzie:

- E_f – pozorny moduł sprężystości przy zginaniu [MPa];
- I – geometryczny moment bezwładności przekroju poprzecznego [mm^4];
- $k_{F,s}$ – współczynnik kierunkowy prostej regresji dopasowanej do przebiegu $F(s)$ w zakresie obciążenia od 100 do 200 N [N/mm].

Sposób wyznaczania nachylenia sprawdzono kontrolnie, wykonując obliczenia dla średnicy $d_0 = 3{,}00\ \mathrm{mm}$. Uzyskane wartości odtworzyły wyniki modułu raportowane wcześniej przez oprogramowanie *testXpert*. Wskazuje to, że przyjęty zakres obciążenia i regresja liniowa pozwalają odtworzyć pierwotne wyniki obliczeń. Ostateczne wartości E_f obliczono dla średnicy $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$.

Rejestrowane podczas próby przemieszczenie s odpowiadało ruchowi trawersy maszyny, a nie niezależnie mierzonemu ugięciu próbki w połowie rozpiętości. Obejmowało to zatem również podatność układu badawczego, przemieszczenia występujące w strefach kontaktu oraz udział odkształceń postaciowych związanych ze ścinaniem. Z tego względu E_f traktowano jako parametr porównawczy, a nie bezwzględną charakterystykę sprężystości materiału.

Oprócz maksymalnej siły F_M, odpowiadającego jej nominalnego naprężenia zginającego $\sigma_{f,M}$ oraz pozornego modułu E_f analizowano przemieszczenie trawersy przy maksymalnej sile $s(F_M)$ i pracę zewnętrzną wykonaną do chwili osiągnięcia F_M. Pracę wyznaczono jako pole pod zarejestrowanym przebiegiem siły w funkcji przemieszczenia:

$$W_M = \int_{s_0}^{s(F_M)} F(s)\,\mathrm{d}s, \tag{3-15}$$

gdzie:

- W_M – praca zewnętrzna wyznaczona do chwili osiągnięcia maksymalnej siły [N·mm];
- s_0 – przemieszczenie trawersy odpowiadające początkowi analizowanego przebiegu [mm];
- $s(F_M)$ – przemieszczenie trawersy odpowiadające maksymalnej sile [mm].

Ponieważ całkowanie prowadzono względem przemieszczenia trawersy, wartość W_M obejmowała również pracę związaną z odkształceniem układu badawczego i przemieszczeniami w strefach kontaktu. Parametr ten wykorzystano do porównania próbek badanych w takich samych warunkach. Nie utożsamiano go z energią pochłoniętą wyłącznie przez materiał pręta.

Dla analizowanych parametrów obliczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz 95 % przedział ufności dla średniej. Podstawowym parametrem służącym do oceny wpływu zintegrowanego światłowodu na właściwości prętów przy zginaniu było maksymalne nominalne naprężenie zginające $\sigma_{f,M}$. Różnicę średnich wartości $\sigma_{f,M}$ pomiędzy seriami OS i NoOS oceniono testem t Welcha przy poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Oprócz wartości p wyznaczono różnicę średnich wraz z jej 95 % przedziałem ufności oraz wartość współczynnika g Hedgesa.

3.2.8. Pozorna wytrzymałość na ścinanie

Pozorną wytrzymałość na ścinanie prętów GFRP wyznaczono metodą krótkiej belki (SBS, ang. *Short-Beam Shear*) w trójpunktowym układzie obciążenia. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej *Zwick/Roell 1445 RetroLine* (nr seryjny: 736695). Na etapie planowa-

nia badań zastosowano funkcjonującą w laboratorium procedurę SBS opartą na PN-EN ISO 14130:2001 [183]. Norma ta opisuje zasadę badania krótkiej belki kompozytowej i stanowiła podstawę konfiguracji stanowiska oraz przebiegu próby.

Badaniu poddano dwie serie po $n = 12$ próbek. Serię OS stanowiły pręty z osiowo zintegrowanym światłowodem, natomiast serię NoOS – pręty referencyjne bez światłowodu. Średnica badanych prętów wynosiła $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$. Odpowiadające jej pole przekroju poprzecznego wyznaczono z zależności:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 7{,}79\ \mathrm{mm}^2, \tag{3-16}$$

gdzie:

A – pole przekroju poprzecznego pręta [mm^2];
d – średnica pręta [mm].

Próbki obciążano w układzie trójpunktowym przy rozstawie podpór $L = 19\ \mathrm{mm}$. Rozstaw dobrano do długości przygotowanych próbek oraz geometrii zastosowanego układu obciążającego, tak aby możliwe było ich prawidłowe podparcie podczas próby. Stosunek rozstawu podpór do średnicy pręta wynosił:

$$\frac{L}{d} = \frac{19}{3{,}15} = 6{,}03, \tag{3-17}$$

gdzie:

L – rozstaw podpór [mm];
d – średnica pręta [mm].

Zasadniczą część testu prowadzono z prędkością przesuwu trawersy $v = 2\ \mathrm{mm} \cdot \mathrm{min}^{-1}$. W fazie wstępnej stosowano prędkość $1\ \mathrm{mm} \cdot \mathrm{min}^{-1}$, a wstępne obciążenie ustawiono na wartość odpowiadającą naprężeniu $0{,}1\ \mathrm{MPa}$. Badania prowadzono w temperaturze 23 °C i przy wilgotności względnej RH$= 51\ \%$. Wszystkie próbki obu serii badano przy jednakowych ustawieniach stanowiska.

Dalszą analizę przeprowadzono na podstawie zarejestrowanych dla każdej próbki przebiegów siły w funkcji przemieszczenia $F(s)$. Z każdego przebiegu wyznaczono największą zarejestrowaną wartość siły:

gdzie:

F_M – maksymalna wartość siły podczas próby [N];
F – siła zarejestrowana dla danego przemieszczenia [N];
s – przemieszczenie trawersy [mm].

Podczas opracowania wyników zweryfikowano sposób przeliczenia maksymalnej siły na pozorną wytrzymałość na ścinanie. W pierwotnej konfiguracji oprogramowania *testXpert* do obliczeń geometrycznych wprowadzona była nominalna średnica $d_0 = 3{,}00\ \mathrm{mm}$, odpowiadająca polu przekroju $A_0 = 7{,}07\ \mathrm{mm}^2$. Ponadto parametry naprężeniowe generowane przez

program odnosiły się do odpowiedzi próbki w trójpunktowym zginaniu, a nie do rozkładu naprężeń stycznych w pełnym przekroju kołowym. Z tego względu wartości te nie zostały wykorzystane w końcowej analizie.

Pozorną wytrzymałość na ścinanie wyznaczono ponownie bezpośrednio z zarejestrowanych wartości F_M, przyjmując rzeczywistą średnicę prętów $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$. Zastosowano zależność dla pultrudowanych prętów o pełnym przekroju kołowym:

$$S = 0{,}849\frac{F_M}{d^2}, \tag{3-18}$$

gdzie:

S – pozorna wytrzymałość na ścinanie [MPa];
F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby [N];
d – średnica pręta [mm].

Zależność ta jest równoważna formule stosowanej w ASTM D4475-21 dla pultrudowanych prętów kompozytowych o przekroju kołowym [184]. Można ją również zapisać w postaci:

$$S = \frac{2F_M}{3A}, \tag{3-19}$$

gdzie:

S – pozorna wytrzymałość na ścinanie [MPa];
F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby [N];
A – pole przekroju poprzecznego pręta [mm^2].

Oprogramowanie *testXpert*, oprócz rejestracji siły i przemieszczenia, automatycznie wyznaczało również parametry właściwe dla analizy próbki w trójpunktowym zginaniu, obejmujące między innymi moduł sprężystości oraz wartości naprężenia i odkształcenia odpowiadające maksymalnemu obciążeniu i końcowej fazie próby. Parametrów tych nie wykorzystywano do oceny pozornej wytrzymałości na ścinanie. Podstawowym parametrem porównawczym obu serii była wartość S wyznaczona zgodnie z równaniem (3-18). Uzupełniająco analizowano maksymalną siłę F_M, przemieszczenie odpowiadające jej osiągnięciu oraz pracę wykonaną do momentu wystąpienia maksimum obciążenia.

Dla obu serii wyznaczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz 95 % przedział ufności dla wartości średniej. Różnicę pomiędzy seriami OS i NoOS oceniano testem t Studenta z korektą Welcha przy poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Oprócz wartości p określono różnicę średnich wraz z jej 95 % przedziałem ufności oraz wielkość efektu Hedgesa g.

3.2.9. Porównawcze badanie udarowe

Celem badania było porównanie zachowania podczas udarowego zginania dwóch wariantów prętów GFRP. Próby przeprowadzono w układzie trójpunktowym, opartym na zasadzie metody Charpy'ego. Ze względu na cylindryczną geometrię prętów oraz zastosowany rozstaw

podpór procedura miała charakter niestandardowego badania porównawczego i nie odpowiadała bezpośrednio konfiguracji próbek określonej w ISO 179-1.

Badaniu poddano dwie serie liczące po $n = 12$ próbek. Serię OS stanowiły pręty ze zintegrowanym osiowo światłowodem, natomiast serię NoOS – pręty referencyjne bez światłowodu. Średnica prętów wynosiła $d = 3{,}15\ \mathrm{mm}$, a całkowita długość próbek około 80 mm.

Badania przeprowadzono za pomocą młota wahadłowego. Kąt wychylenia młota w położeniu początkowym wynosił $\alpha = 160°$. Rozstaw podpór ustalono na $l = 22\ \mathrm{mm}$, co odpowiada stosunkowi:

$$\frac{l}{d} = \frac{22}{3{,}15} = 6{,}98, \tag{3-20}$$

gdzie:

l – rozstaw podpór [mm];
d – średnica pręta [mm].

Próbkę układano swobodnie na dwóch podporach, a uderzenie następowało w środku rozpiętości, prostopadle do osi podłużnej pręta. Pomiary wykonywano w temperaturze 22 °C i przy wilgotności względnej 52 % RH. Wszystkie próbki obu serii badano przy jednakowych ustawieniach stanowiska.

Do dalszych obliczeń przyjmowano wartość W wskazaną przez urządzenie jako energię pochłoniętą przez próbkę podczas uderzenia. Wartość ta posłużyła następnie do wyznaczenia nominalnego wskaźnika energii pochłoniętej odniesionej do pola przekroju pręta. Do normalizacji energii przyjęto pole zastępczego pełnego przekroju kołowego:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi\,(3{,}15\ \mathrm{mm})^2}{4} = 7{,}79\ \mathrm{mm}^2, \tag{3-21}$$

gdzie:

A_0 – nominalne pole pełnego przekroju kołowego [mm^2];
d – średnica pręta [mm].

Dla każdej próbki wyznaczono nominalny wskaźnik energii pochłoniętej odniesionej do pola przekroju:

$$a_{c,\mathrm{nom}} = \frac{W}{A_0} \cdot 10^3, \tag{3-22}$$

gdzie:

$a_{c,\mathrm{nom}}$ – nominalny wskaźnik energii pochłoniętej odniesionej do pola przekroju [kJ/m^2];
W – energia pochłonięta wskazana przez urządzenie [J];
A_0 – pole zastępczego przekroju kołowego [mm^2].

Zastosowany współczynnik 10^3 umożliwia przedstawienie wyniku w kJ/m^2.

Wartość $a_{c,\mathrm{nom}}$ wykorzystano wyłącznie do porównania serii OS i NoOS w przyjętej

konfiguracji badawczej. Dla każdej serii wyznaczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, 95 % przedział ufności dla średniej oraz wartości minimalne i maksymalne. Normalność rozkładów oceniono pomocniczo testem Shapiro–Wilka przy poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Ze względu na ograniczoną liczebność prób i dyskretyzację wskazań urządzenia wyniki tego testu traktowano jako diagnostyczne.

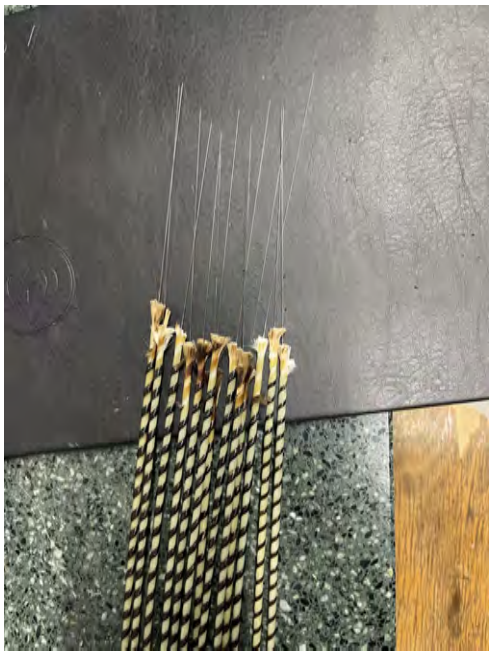
Różnicę średnich pomiędzy seriami OS i NoOS oceniono testem t Welcha, niewymagającym założenia jednakowych wariancji. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$. Oprócz wartości p wyznaczono różnicę średnich OS–NoOS, jej wartość względną odniesioną do średniej serii NoOS oraz 95 % przedział ufności dla różnicy. Skalę różnicy opisano za pomocą współczynnika g Hedgesa, obliczonego z wykorzystaniem połączonego odchylenia standardowego i korekty dla małych prób. Braku istotności statystycznej nie interpretowano jako dowodu równoważności porównywanych wariantów. Równość wariancji oceniono testem Levene'a. Ze względu na dyskretny charakter wskazań urządzenia wynik porównania sprawdzono dodatkowo za pomocą testu permutacyjnego opartego na statystyce t Welcha. Analiza permutacyjna miała charakter pomocniczy i została przeprowadzona *post hoc*. Ze względu na cylindryczną geometrię próbek, niestandardowy rozstaw podpór oraz parametry zastosowanego wahadła wartość $a_{c,\mathrm{nom}}$ nie stanowi udarności Charpy'ego wyznaczonej zgodnie z ISO 179-1. Jest to nominalny wskaźnik porównawczy odnoszący się wyłącznie do serii OS i NoOS badanych przy jednakowych ustawieniach stanowiska.

3.3. Przygotowanie i walidacja interfejsu pomiarowego

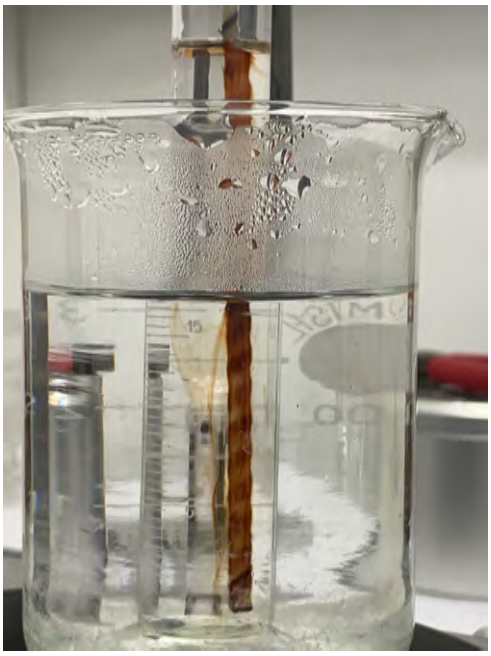
3.3.1. Technologia odsłaniania światłowodu z osnowy GFRP

W celu podłączenia światłowodu do jednostki interrogacyjnej konieczne było odsłonięcie światłowodu na końcach pręta z matrycy kompozytu. To pozornie proste zadanie okazało się jednym z bardziej wymagających etapów. Włókno szklane o średnicy 125 µm jest kruche i podatne na uszkodzenia. Każde mikrouszkodzenie powierzchni podczas odsłaniania kończyło się jego kruszeniem, zerwaniem lub złamaniem i dyskwalifikacją próbki. Wymagana długość odsłoniętego odcinka wynosiła 10–15 cm. Wynikało to z wymogów technicznych procesu spawania. Po przycięciu końca pręta na równo konieczne było zapewnienie odpowiedniej długości wolnego włókna do zamocowania w uchwytach spawarki światłowodowej oraz wykonania spawu z pigtailem.

Opracowano i zweryfikowano dwie główne metody odsłaniania światłowodu zintegrowanego z utwardzonym prętem GFRP. Poprzedzone to było znaczną liczbą prób nieudanych. Systematyczna analiza niepowodzeń pozwoliła zidentyfikować krytyczne czynniki procesu i opracować powtarzalną procedurę. Stanowi to oryginalny dorobek technologiczny.



Rys. 3-18. Odsłonięte włókna światłowodowe z prętów GFRP metodą termiczno-mechaniczną.



Rys. 3-19. Metoda chemiczna odsłaniania światłowodu z pręta GFRP – rozpuszczanie osnowy w roztworze kwasu.

A) Metoda termiczno-mechaniczna – pręt podgrzewano do odpowiedniej temperatury punktu zeszklenia żywicy epoksydowej i mechanicznie usuwano osnowę z odsłoniętego odcinka. Po oczyszczeniu za pomocą nożyc usuwano roving szklany, pozostawiając gołe włókno światłowodowe gotowe do spawania. Z uwagi na szybkość oraz minimalną ilość odpadów przyjęto ją jako podstawową w przygotowaniu próbek do dalszych badań (rys. 3-18).

B) Metoda chemiczna – koniec pręta zanurzano w podgrzewanym roztworze kwasu. Kwas selektywnie rozpuszczał osnowę epoksydową. Po zakończeniu reakcji w roztworze pozostawał roving szklany i światłowód. Całość przemywano wodą, osuszano, a następnie odcinano roving – pozostawiając odsłonięte włókno światłowodowe (rys. 3-19).

Za kryterium powodzenia przyjęto brak kruszenia się włókna podczas organoleptycznej próby przeciągnięcia palcami po oczyszczeniu powierzchni z pozostałości pyłu, żywicy i powłoki akrylanowej. Włókno spełniające to kryterium dopuszczano do spawania.

3.3.2. Spawanie włókien i montaż pigtaili pomiarowych.

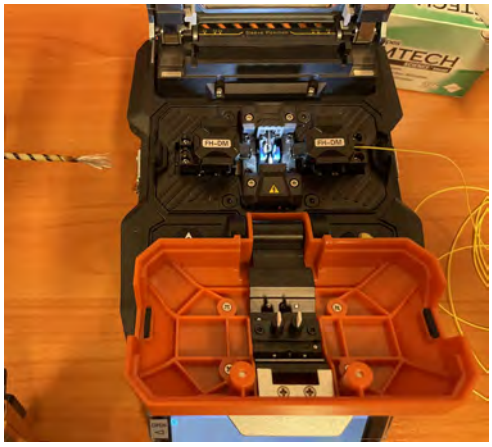
Odsłonięte końce światłowodów łączono spawem łukowym z pigtailami złącze światłowodowe o czole polerowanym pod kątem (APC) lub światłowodem jednomodowym Corning SMF-28e (rys. 3-23). Przed spawaniem ściągano powłokę akrylanową przy użyciu precyzyjnych szczypiec do światłowodów. Następnie odsłonięty odcinek włókna odtłuszczano izopropanolem w celu usunięcia pozostałości zanieczyszczeń powierzchniowych. Włókno przycinano na równo precyzyjnym cleaverem, zapewniając prostopadłą płaszczyznę cięcia warunkującą niską tłumien-

ność spawu. Spawanie wykonywano spawarką łukową (rys. 3-20).

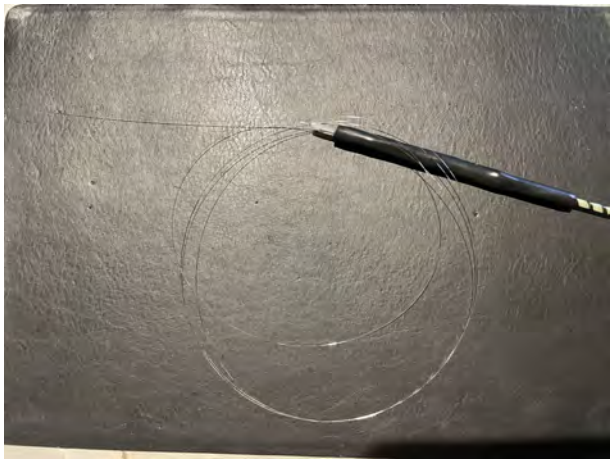
Kryterium akceptacji spawu stanowiła tłumienność $\leq 0{,}1$ dB, odczytywana bezpośrednio ze spawarki po wykonaniu spawu. Spawy niespełniające tego kryterium były powtarzane. Po wykonaniu spawu zakładano termokurczliwą osłonkę spawu.

Strefa przejścia między prętem kompozytowym a osłonką spawu wymagała zastosowania dodatkowego wzmocnienia mechanicznego. Miejsce to stanowi newralgiczny punkt konstrukcji, szczególnie narażony na zginanie podczas zalewania prętów w belkach betonowych oraz w trakcie późniejszej eksploatacji. W tym celu przygotowano formę z osłonki termokurczliwej, którą wypełniano żywicą utwardzaną promieniowaniem promieniowanie ultrafioletowe typu A (UVA) (rys. 3-22). Elastomeryczny charakter utwardzonej żywicy zapewniał absorpcję naprężeń mechanicznych w strefie przejścia i chronił kruche włókno szklane przed zginaniem. Po utwardzeniu żywicy w newralgicznym punkcie nakładano zewnętrzną koszulkę termokurczliwą, stanowiącą ostateczną ochronę mechaniczną i uszczelnienie strefy spawu (rys. 3-21).

Zastosowane wielowarstwowe zabezpieczenie spawu było podyktowane warunkami aplikacji – pręty zatapiano w belkach betonowych, co wykluczało możliwość naprawy spawu po zabetonowaniu.



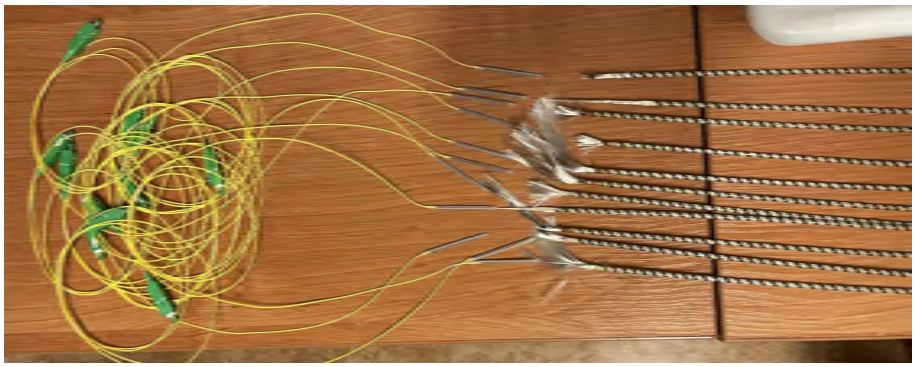
Rys. 3-20. Proces spawania odsłoniętego włókna światłowodowego z pręta GFRP z pigtailem APC.



Rys. 3-21. Dospawany światłowód do pręta zabezpieczony koszulką termokurczliwą.



Rys. 3-22. Zabezpieczony obszar pomiędzy prętem a spawem żywicą RTV.



Rys. 3-23. Zintegrowane czujniki światłowodowe w prętach GFRP po procesie spawania pigtaili APC.

3.3.3. Weryfikacja drożności i tłumienności toru optycznego (pomiar laserowy)

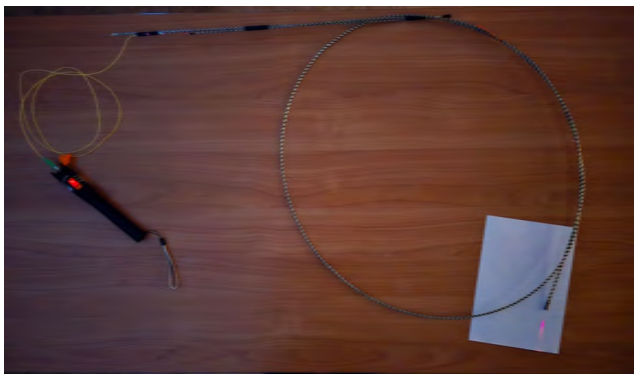
Weryfikację ciągłości toru optycznego przeprowadzano po wykonaniu i zabezpieczeniu połączeń spawanych. Łącznie przygotowano 30 prętów kompozytowych OS z odsłoniętymi i zespawanymi światłowodami.

Weryfikację wykonywano w 3 etapach, a mianowicie bezpośrednio po wykonaniu spawu, następnie po zabezpieczeniu strefy spawu i po zatopieniu czujników GFRP w belkach betonowych (przed badaniem). Takie podejście umożliwiało wczesną identyfikację uszkodzeń toru i eliminację lub naprawę wadliwych próbek przed dalszym procesowaniem. Kryterium zaliczenia stanowiła obecność widzialnej plamki świetlnej na wyjściu światłowodu (rys. 3-24).

Badanie miało charakter jakościowy. Pozwalało wykryć całkowite przerwanie ciągłości włókna, lecz nie umożliwiało wyznaczenia tłumienia toru, oceny strat lokalnych jak i jakości poszczególnych połączeń spawanych.



Rys. 3-24. Wiązka lasera widoczna na końcu czujnika GFRP - test drożności toru optycznego.



Rys. 3-25. Układ testowy pomiaru drożności toru optycznego. Czujnik GFRP z dospawanym pigitalem APC podłączony do źródła lasera.

3.3.4. Teoretyczna analiza transferu odkształceń do światłowodu pomiarowego

Pomiar odkształceń metodą rozproszenia Rayleigha za pomocą interrogatora Luna ODiSI 7100 działa w oparciu o rejestrację lokalnych zmian w widmie wstecznym światła. Zmiany te są

monitorowane wzdłuż osi czujnika światłowodowego. Lokalne przesunięcie spektralne $\Delta\nu$ jest bezpośrednio proporcjonalne do odkształcenia osiowego rdzenia krzemionkowego czujnika (ε_f). Zależność tę opisuje równanie:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta\nu}{\nu_0 \cdot K_\varepsilon}, \tag{3-23}$$

gdzie:

ν_0 – częstość nośna układu pomiarowego;

K_ε – bezwymiarowy fotosprężysty współczynnik czułości na odkształcenie.

Współczynnik ten wynika ze zmian gęstości ośrodka pod wpływem deformacji i przyjmuje postać:

$$K_\varepsilon = 1 - p_e, \tag{3-24}$$

Gdzie:

p_e – efektywny współczynnik fotosprężysty krzemionki.

Dla typowych światłowodów jednomodowych standardu SMF-28e przyjmuje się $p_e \approx 0{,}213$, co odpowiada $K_\varepsilon \approx 0{,}787$. Wartość ta jest zgodna z typowo przyjmowanymi w literaturze i w dokumentacji systemów Luna ODiSI wartościami $K_\varepsilon \approx 0{,}780$–$0{,}785$. Zakres ten wynika z przelicznika $6{,}58\ \mu\varepsilon/\mathrm{GHz}$, który jest stosowany do konwersji przesunięcia spektralnego na odkształcenie. Dokładna wartość $K_{\varepsilon,\mathrm{fab}}$ zastosowana w jednostce interrogacyjnej wykorzystanej w niniejszych badaniach nie została niezależnie potwierdzona. Z tego względu dalsze obliczenia traktowano jako analizę rozpoznawczą, służącą do oszacowania możliwej skali wpływu warstw pośrednich na transfer odkształceń, a nie jako kalibrację metrologiczną układu pomiarowego.

Odkształcenie rejestrowane przez rdzeń czujnika (ε_f) różni się od odkształcenia osnowy kompozytu ($\varepsilon_{\mathrm{host}}$). Wynika to z ograniczonej efektywności transferu naprężeń przez warstwy pośrednie. Mechanizm ten opisuje trójfazowy model opóźnienia ścinania (*shear-lag*), wyprowadzony w podrozdziale 2.3.2. Dla czujnika o długości $2L$ osadzonego w jednorodnym polu odkształceń, jego rozwiązanie przyjmuje postać funkcji hiperbolicznej:

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_{\mathrm{host}} \cdot \left[1 - \frac{\cosh(\beta \cdot x)}{\cosh(\beta \cdot L)}\right], \tag{3-25}$$

W równaniu 1.1 zmienna x stanowi współrzędną wzdłuż osi pręta, mierzoną bezpośrednio od jego środka. Z kolei β to parametr opóźnienia ścinania. Dla pełnego układu trójfazowego przyjmuje postać:

$$\beta^2 = \frac{2}{r_f^2 \cdot E_f} \cdot \frac{1}{\dfrac{\ln(r_c/r_f)}{G_c} + \dfrac{\ln(r_m/r_c)}{G_m}}, \tag{3-26}$$

Parametr r_m określa zasięg sztywności otaczającej matrycy kompozytowej. Oszacowanie $r_m = r_f/\sqrt{V_f}$ nie znajduje tu jednak zastosowania ze względu na geometrię osadzenia

czujnika. Powłoka akrylanowa o promieniu $r_c = 121\ \mu\mathrm{m}$ jest grubsza niż typowa odległość między włóknami elementarnymi w strukturze pręta GFRP. Przyjmując rozsądny przedział $r_m \in (200\ \mu\mathrm{m},\ 1{,}5\ \mathrm{mm})$ od lokalnej strefy żywicy do promienia całego pręta wkład członu matrycowego jest w zasadzie pomijalny. W badanym układzie występuje duża dysproporcja podatności na ścinanie faz pośrednich. Podatność miękkiej powłoki akrylanowej ($G_c \approx 0{,}2\ \mathrm{MPa}$ [43, 44]), wyraża się relacją $\ln(r_c/r_f)/G_c$ i wynosi około $3{,}3 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Pa}^{-1}$. Z kolei dla zhomogenizowanej matrycy kompozytowej ($G_m \approx 1{,}5\ \mathrm{GPa}$ [5], przy $r_m \approx 1{,}5\ \mathrm{mm}$), analogiczna wartość $\ln(r_m/r_c)/G_m$ to zaledwie $1{,}7 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{Pa}^{-1}$. Wpływ osnowy na całkowitą podatność układu okazuje się marginalny. Człon matrycowy kształtuje wartość parametru β^2 w niespełna $0{,}1\ \%$. W całym rozpatrywanym przedziale zmienności r_m można go więc uznać za całkowicie pomijalny. W konsekwencji pierwotny model trójfazowy redukuje się do postaci dwufazowej. O dynamice przekazywania odkształceń decyduje w nim podatność powłoki akrylanowej na ścinanie, co prowadzi do uproszczonej zależności:

$$\beta^2 \approx \frac{2G_c}{E_f \cdot r_f^2 \cdot \ln(r_c/r_f)}, \tag{3-27}$$

W obliczeniach uwzględniono specyfikację techniczną światłowodu SMF-28e [43, 44]. Promień części krzemionkowej (rdzeń wraz z płaszczem) wynosi $r_f = 62{,}5\ \mu\mathrm{m}$, a promień zewnętrzny dwuwarstwowej powłoki akrylanowej to $r_c = 121\ \mu\mathrm{m}$. Z kolei parametry materiałowe przyjęto jako $E_f = 72\ \mathrm{GPa}$ dla modułu Younga włókna oraz $G_c = 0{,}2\ \mathrm{MPa}$ dla modułu ścinania powłoki. Podstawienie tych wartości do zredukowanego modelu dało następujące wyniki:

$$\beta \approx 0{,}046\ \mathrm{mm}^{-1}, \qquad L_t = \frac{1}{\beta} \approx 21{,}6\ \mathrm{mm}, \tag{3-28}$$

Wyznaczona wartość $L_t \approx 21{,}6\ \mathrm{mm}$ określa charakterystyczną skalę przestrzenną transferu odkształceń w granicach przyjętego modelu. Nie stanowi ona bezpośrednio zmierzonej długości transferu. Model wskazuje jednak, że lokalne zmiany odkształcenia zachodzące na odcinkach wyraźnie krótszych od L_t mogą być częściowo wygładzane wskutek podatności powłoki światłowodu.

Wyznaczona wartość $L_t \approx 21{,}6\ \mathrm{mm}$ określa charakterystyczną skalę przestrzenną transferu odkształceń w granicach przyjętego modelu. Nie stanowi ona bezpośrednio zmierzonej długości transferu. Model wskazuje jednak, że lokalne zmiany odkształcenia zachodzące na odcinkach wyraźnie krótszych od L_t mogą być częściowo wygładzane wskutek podatności powłoki światłowodu. Czujnik z powłoką zachowuje się w tym przypadku jak mechaniczny filtr dolnoprzepustowy, zgodnie z mechanizmem wyjaśnionym w podrozdziale 2.3.2

Dla przyjętej w modelu strefy pomiarowej o długości $2L = 300\ \mathrm{mm}$ współczynnik transferu odkształceń ($\eta = \varepsilon_f/\varepsilon_{\mathrm{host}}$), wyznaczony w geometrycznym środku rozpatrywanego odcinka ($x = 0$), przyjmuje postać:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\cosh(\beta \cdot L)} = 1 - \frac{1}{\cosh(6{,}96)} \approx 1 - \frac{1}{527} \approx 0{,}9981, \tag{3-29}$$

W granicach przyjętego modelu różnica między odkształceniem światłowodu i otaczającego materiału w środku rozpatrywanego odcinka wynosi około $0{,}2\ \%$. Wynik ten dotyczy jednorodnego pola odkształceń, idealnego połączenia między warstwami oraz przyjętych parametrów materiałowych. Nie należy odnosić go bezpośrednio do stref rys, a także obszarów o dużym gradiencie odkształcenia.

Zgodnie z założeniami projektowymi światłowód zintegrowano w pobliżu osi geometrycznej pręta. Mimo możliwych zmian jego położenia podczas procesu produkcji na potrzeby modelu analitycznego przyjęto idealnie centralny przebieg światłowodu. Przy takim założeniu jego położenie odpowiada osi obojętnej przekroju pręta, a składowa odkształcenia osiowego wywołana lokalnym zginaniem pręta zanika. Rejestrowane odkształcenie można zatem w modelu utożsamiać przede wszystkim z osiowym rozciąganiem lub ściskaniem pręta. W rzeczywistym układzie ewentualne odchylenie światłowodu od osi może jednak powodować udział składowej pochodzącej od zginania.

W obszarach oddalonych od rys, końców połączenia oraz innych lokalnych zaburzeń przestrzenna skala zmian odkształcenia jest większa od wyznaczonej długości charakterystycznej L_t. W tych strefach założenia modelu *shear-lag* można uznać za spełnione w przybliżeniu. W przyjętym modelu wpływ efektów brzegowych maleje wraz z odległości od granicy transferu. Za orientacyjny zasięg tego wpływu można przyjąć odcinek około $3L_t \approx 65\ \mathrm{mm}$. Wartość ta wynika z modelu i nie musi odpowiadać rzeczywistej strefie zakotwienia pręta w betonie. Ze względu na położenie centralnej strefy pomiarowej w znacznej odległości od końców pręta wpływ tych efektów powinien być w tym obszarze ograniczony.

Łączny teoretyczny współczynnik korekcyjny można zdefiniować jako stosunek odczytu systemu ODiSI do odkształcenia otaczającego materiału w strefie jednorodnego pola odkształceń:

$$k_{\text{teor}} = \eta \cdot \left(\frac{K_{\varepsilon,\text{rzecz}}}{K_{\varepsilon,\text{fab}}} \right), \tag{3-30}$$

gdzie $K_{\varepsilon,\text{rzecz}}$ oznacza rzeczywistą czułość zastosowanego światłowodu, natomiast $K_{\varepsilon,\text{fab}}$ jest wartością przyjętą w oprogramowaniu interrogatora. Ponieważ parametrów tych nie wyznaczono niezależnie dla wykorzystanego układu pomiarowego, nie określano jednej liczbowej wartości k_{teor}. Uzyskana wartość $\eta \approx 0{,}998$ wskazuje jednak, że w granicach przyjętego modelu wpływ transferu odkształceń na odczyt w centralnej części jednorodnie odkształconego odcinka jest niewielki.

Największą niepewnością modelu transferu obarczona jest wartość modułu ścinania powłoki akrylanowej G_c. Zgodnie z danymi literaturowymi dla miękkich powłok utwardzanych promieniowaniem UV parametr ten może przyjmować wartości od $0{,}15$ do $0{,}7\ \mathrm{MPa}$. W rozpatrywanym układzie zmienność G_c ma niewielki wpływ na wartość η wyznaczoną w środku odcinka, lecz wyraźnie wpływa na charakterystyczną długość transferu. Dla podanego zakresu modułu ścinania otrzymano:

$$L_t \approx 12\text{–}25\ \mathrm{mm}. \tag{3-31}$$

Obliczoną wcześniej wartość $L_t \approx 22\,\mathrm{mm}$ należy zatem traktować jako wynik odpowiadający przyjętemu wariantowi parametrów, a nie jako eksperymentalnie potwierdzoną właściwość czujnika. Odrębnym źródłem niepewności pozostaje wartość $K_{\varepsilon,\mathrm{fab}}$ zastosowana w oprogramowaniu interrogatora.

Ze względu na brak niezależnego wyznaczenia właściwości mechanicznych powłoki oraz współczynnika czułości zastosowanego w oprogramowaniu interrogatora nie stosowano dodatkowego współczynnika korekcyjnego do wartości odkształcenia wyznaczanych przez system ODiSI. Odpowiadało to roboczemu przyjęciu $k = 1{,}0$, które należy traktować jako założenie przyjęte podczas opracowania danych, a nie jako wynik eksperymentalnej kalibracji czujnika. Model wykorzystano do oszacowania charakterystycznej skali transferu odkształceń oraz możliwego wygładzania lokalnych zmian sygnału.

3.4. Badania w układzie kompozyt-beton

3.4.1. Projekt i przygotowanie betonowych bloków badawczych

Elementy badawcze zaprojektowano jako belki żelbetowe o przekroju prostokątnym $100 \times 150\,\mathrm{mm}$ i długości $1000\,\mathrm{mm}$. Projekt zbrojenia opracowano na podstawie schematu przedstawionego na Rysunku 3-26, obejmującego przekrój poprzeczny i podłużny. Otulina betonowa wynosiła $20\,\mathrm{mm}$ ze wszystkich stron. Zbrojenie główne stanowiły dwa pręty żebrowane ze stali $\varnothing 8\,\mathrm{mm}$ rozmieszczone w dolnej strefie rozciąganej. Strzemiona wykonano z prętów $\varnothing 3\,\mathrm{mm}$ w rozstawie $50\,\mathrm{mm}$, rozmieszczone na długości $300\,\mathrm{mm}$ od obu końców belki w celu wymuszenia w strefie środkowej czystego zginania z pominięciem sił ścinających. Wzdłuż górnej krawędzi, na całej długości strefy strzemionowanej, zastosowano pręty montażowe $\varnothing 3\,\mathrm{mm}$ zabezpieczające geometrię szkieletu. Szkielety zbrojeniowe wykonano ręcznie. Strzemiona mocowano do prętów głównych za pomocą opasek zaciskowych.



Rys. 3-26. Widok części szkieletu zbrojenia z zamontowanymi czujnikami GFRP-OS – widoczne opaski zaciskowe mocujące czujniki do strzemion

Pręty czujnikowe GFRP-OS mocowano do strzemion również za pomocą opasek zaciskowych w odstępach co $50\ \mathrm{mm}$, co dało 14 punktów podparcia na każdy pręt, zapewniając stabilność geometryczną i zapobiegając ugięciu podczas zalewania betonem. Pozycjonowanie czujników w kierunku poprzecznym belki zapewniały dystansery wykonane z pręta $\varnothing 3\ \mathrm{mm}$, montowane od strony spodniej formy. Czujniki wyprowadzono na zewnątrz przez otwory w czołowych ściankach formy stalowej, przechodząc przez nią na wylot. Formy stalowe rozbieralne natłuszczano środkiem antyadhezyjnym przed każdym zalewaniem, co umożliwiało łatwe rozformowanie bez uszkodzenia powierzchni belki. Widok formy z zamontowanym zbrojeniem i czujnikami przed zalewaniem przedstawiono na Rysunku 3-27, a gotowe belki po rozformowaniu na Rysunku 3-28.

Pręty czujnikowe GFRP-OS mocowano do strzemion również za pomocą opasek zaciskowych w odstępach co $50\ \mathrm{mm}$, co dało 14 punktów podparcia na każdy pręt, zapewniając stabilność geometryczną i zapobiegając ugięciu podczas zalewania betonem. Pozycjonowanie czujników w kierunku poprzecznym belki zapewniały dystansery wykonane z pręta $\varnothing 3\ \mathrm{mm}$, montowane od strony spodniej formy. Czujniki wyprowadzono na zewnątrz przez otwory w czołowych ściankach formy stalowej, przechodząc przez nią na wylot. Formy stalowe rozbieralne natłuszczano środkiem antyadhezyjnym przed każdym zalewaniem, co umożliwiało łatwe rozformowanie bez uszkodzenia powierzchni belki. Widok formy z zamontowanym zbrojeniem i czujnikami przed zalewaniem przedstawiono na Rysunku 3-27, a gotowe belki po rozformowaniu na Rysunku 3-28.



Rys. 3-27. Forma stalowa z kompletnym zbrojeniem i wyprowadzonymi końcami światłowodów



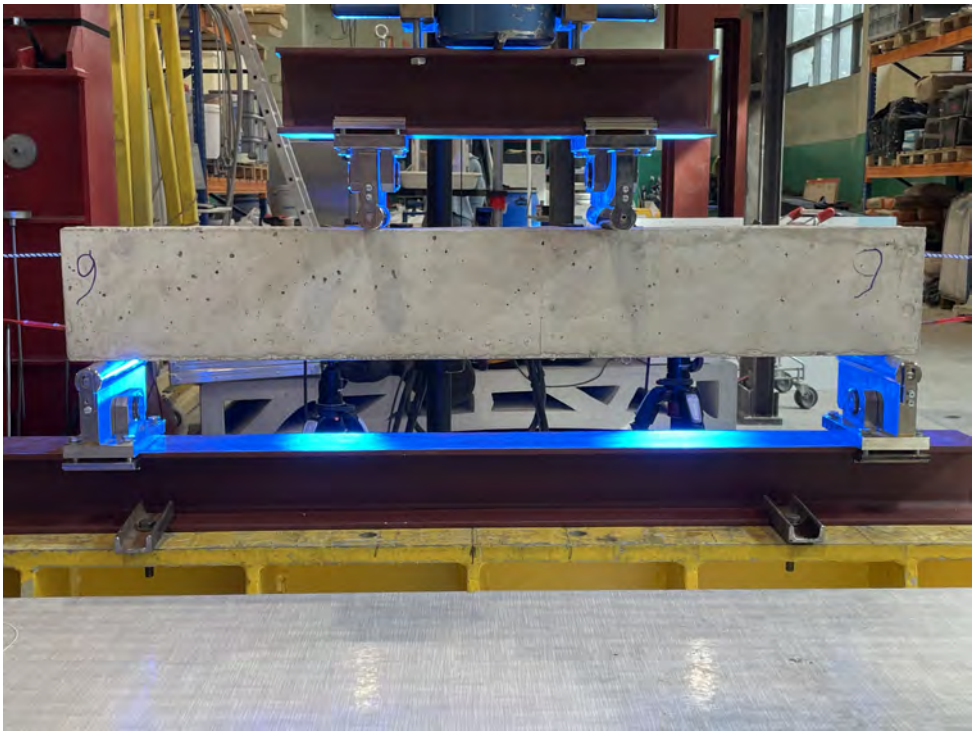
Rys. 3-28. Belki żelbetowe z czujnikami po rozformowaniu i sezonowaniu.

Beton dostarczano z węzła betoniarskiego firmy Vibrobet sp.jw. w klasie C40/45. Parametry i recepturę mieszanki betonowej zamieszczono w tabeli 3-2. Zastosowano beton samozagęszczalny, co wyeliminowało konieczność mechanicznego zagęszczania wibratorami i ograniczyło ryzyko przemieszczenia czujników podczas wypełniania formy. Belki odlewano indywidualnie,

po jednej dziennie, w ciągu 14 dni roboczych. Wszystkie elementy wykonano z tej samej receptury mieszanki. Bezpośrednio po zalewaniu belki przykrywano folią polietylenową w celu ograniczenia odparowania wody. Po 24 godzinach przeprowadzano rozformowanie, a następnie belki pozostawiano do dojrzewania przez 28 dni przed przystąpieniem do badań. Kontrolę wytrzymałości betonu przeprowadzono dwutorowo. Podczas betonowania wykonano również próbki sześcienne przeznaczone do badań wytrzymałości na ściskanie. Uzupełniająco wykonano badania nieniszczące młotkiem Schmidta bezpośrednio na gotowych belkach, uzyskując wartość wytrzymałości na poziomie $44\ \mathrm{MPa}$, co potwierdza osiągnięcie założonej klasy C40/45.

3.4.2. Metodyka testów wytrzymałościowych konstrukcji żelbetowej z monitoringiem SHM

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono przy użyciu maszyny Zwick/Roell (nr seryjny: 08261), wyposażonej w siłownik hydrauliczny o zakresie $600\ \mathrm{kN}$ (typ Serie RF, nr seryjny: 54121, czułość $2\ \mathrm{mV/V}$, ciśnienie robocze $280\ \mathrm{bar}$). Belki poddano czteropunktowemu zginaniu na podporach rolkowych o rozstawie $900\ \mathrm{mm}$. Obciążenie przykładano symetrycznie w dwóch punktach oddalonych od siebie o $300\ \mathrm{mm}$, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3-29. Pomiędzy punktami przyłożenia siły uzyskano strefę stałego momentu zginającego, w której teoretyczna wartość siły tnącej była równa zeru.



Rys. 3-29. Schemat czteropunktowego zginania belki wraz z podstawowymi wymiarami układu obciążenia.

Próbą sterowano na podstawie przemieszczenia tłoka siłownika, którego zakres skoku wynosił $400\ \mathrm{mm}$. Zastosowano schodkowy program obciążenia. Przemieszczenie tłoka zwiększano

o $0{,}25\ \mathrm{mm}$ z prędkością $0{,}05\ \mathrm{mm/s}$, po czym następował 10-sekundowy etap przetrzymania przy stałym położeniu tłoka. Przetrzymania umożliwiały stabilizację wskazań układów pomiarowych oraz późniejsze precyzyjne dopasowanie pomiarów z maszyny wytrzymałościowej oraz jednostki interrogacyjnej. Cykle powtarzano do osiągnięcia przemieszczenia tłoka wynoszącego około $20\ \mathrm{mm}$ i rozwinięcia zniszczenia elementu. Pojedyncza próba trwała około 10 minut. Maszyna rejestrowała siłę oraz przemieszczenie tłoka. Wartości tego przemieszczenia nie traktowano jako bezpośredniego pomiaru ugięcia w środku rozpiętości belki.

Badaniom poddano łącznie 14 belek żelbetowych. Seria badawcza obejmowała 10 belek zawierających dodatkowe pręty GFRP ze zintegrowanym światłowodem (belki 1–10). Serię referencyjną stanowiły 4 belki wykonane bez prętów pomiarowych. Wszystkie elementy wykonano według tej samej procedury technologicznej. Porównanie obu serii służyło ocenie wpływu dodatkowych prętów GFRP na globalną odpowiedź mechaniczną belek. Nie stanowiło natomiast bezpośredniej oceny wpływu samego światłowodu, ponieważ pręty pomiarowe różniły obie serie również pod względem udziału zbrojenia kompozytowego.

Jedną z czterech belek referencyjnych, oznaczoną jako Referencja A, wyłączono z analizy mechanicznej z powodu nieprawidłowego ustawienia na stanowisku. Belkę ułożono na podporach w orientacji odwróconej względem pozostałych elementów. W konsekwencji główne zbrojenie podłużne, wykonane z dwóch prętów stalowych o średnicy $8\ \mathrm{mm}$, znalazło się przy górnej powierzchni belki, czyli w strefie ściskanej, zamiast w dolnej strefie rozciąganej. Uzyskany przebieg siła–przemieszczenie nie był porównywalny z wynikami pozostałych elementów. Analiza mechaniczna objęła zatem 10 belek z dodatkowymi prętami GFRP oraz 3 belki referencyjne.

Spośród 10 belek serii badawczej dla 9 uzyskano zapis umożliwiający analizę rozłożonych odkształceń. Belkę 6 wyłączono wyłącznie z analizy DFOS, ponieważ nieprawidłowy zapis pliku pomiarowego systemu ODiSI uniemożliwił odtworzenie pełnych danych optycznych. Wyłączenie to nie dotyczyło wyników mechanicznych zarejestrowanych przez maszynę Zwick/Roell, dlatego Belkę 6 uwzględniono w analizie siły i przemieszczenia tłoka.

Przed rozpoczęciem prób sprawdzono ciągłość torów optycznych. W dziewięciu belkach zakwalifikowanych do analizy DFOS dwie miały po 3 aktywne czujniki, cztery po 2 aktywne czujniki, a trzy po 1 aktywnym czujniku. Analiza objęła zatem łącznie 17 czynnych czujników. Czujnik OS1 był umieszczony w górnej części przekroju, natomiast czujniki OS2 i OS3 znajdowały się w dolnej strefie rozciąganej. Rzeczywiste rozmieszczenie czynnych czujników w poszczególnych belkach przedstawiono na rys. 3-30.

Aktywne czujniki w danej belce łączono na stanowisku szeregowo, tworząc jeden ciągły tor optyczny. Pierwszy czujnik w szeregu łączono z modułem przejściowym STD za pomocą zakończenia ze złączem SC. Wolny koniec światłowodu zanurzano w olejku imersyjnym, aby ograniczyć odbicie Fresnela od końca włókna.

Badania laboratoryjne prowadzono przez dwa kolejne dni. Pierwszego dnia temperatura w laboratorium wynosiła $23\ C$, a wilgotność względna $35\ \%$. Drugiego dnia wartości te wynosiły odpowiednio $24\ C$ i $32\ \%$.

Akwizycję odkształceń rozłożonych prowadzono analizatorem LUNA ODiSI 7100 w try-



(a) Belka 1
Projektowana liczba czujników: 3
Liczba czynnych czujników: 3



(b) Belka 3
Projektowana liczba czujników: 3
Liczba czynnych czujników: 2



(c) Belka 4
Projektowana liczba czujników: 2
Liczba czynnych czujników: 1



(d) Belka 5
Projektowana liczba czujników: 2
Liczba czynnych czujników: 2



(e) Belka 2
Projektowana liczba czujników: 3
Liczba czynnych czujników: 1



(f) Belka 7
Projektowana liczba czujników: 3
Liczba czynnych czujników: 3



(g) Belka 8
Projektowana liczba czujników: 2
Liczba czynnych czujników: 1



(h) Belka 9
Projektowana liczba czujników: 3
Liczba czynnych czujników: 2



(i) Belka 10
Projektowana liczba czujników: 2
Liczba czynnych czujników: 2

Rys. 3-30. Rzeczywiste rozmieszczenie czynnych czujników DFOS w dziewięciu belkach zakwalifikowanych do analizy optycznej.

bie jednokanałowym z modułem STD. Częstotliwość próbkowania wynosiła od 25 Hz do 50 Hz , a rozdzielczość przestrzenna 2,6 mm. Przed każdą próbą kontrolowano ciągłość toru optycznego na podstawie przebiegu sygnału reflektometrycznego oraz położenia charakterystycznych zmian odpowiadających kolejnym połączeniom. Granice 1-metrowych odcinków pomiarowych znajdujących się wewnątrz belek definiowano w oprogramowaniu bezpośrednio przed rozpoczęciem próby co przedstawiono na rys. 3-31.



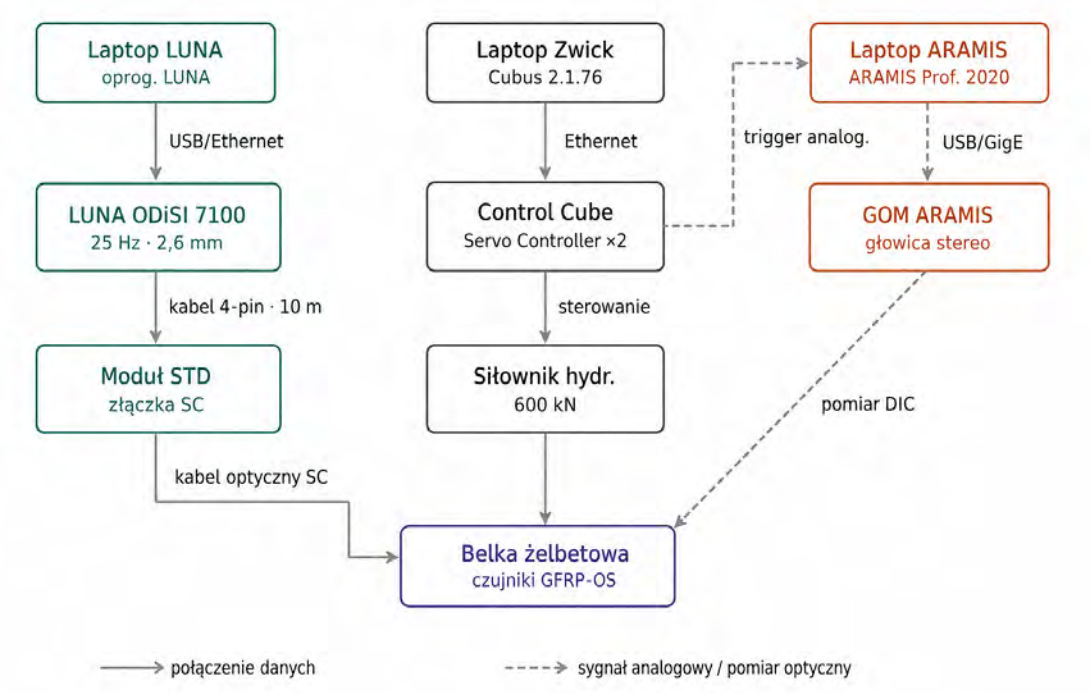
Rys. 3-31. Zdefiniowane granice 1-metrowych odcinków pomiarowych dla czujników OS1, OS2, OS3 dla belki nr. 7. Widoczne punkty odpowiadają kolejno początkom i końcom poszczególnych czujników.

Punkty wejścia i wyjścia światłowodu z betonu lokalizowano metodą kontrolowanego, punktowego wymuszenia mechanicznego przy krawędziach belki. Wywołana w ten sposób lokalna zmiana odkształcenia była widoczna w sygnale światłowodowym i umożliwiała przypisanie współrzędnych systemu ODiSI do geometrii badanego elementu.

Zapis systemu ODiSI i maszyny Zwick/Roell uruchamiano ręcznie, odnosząc oba przebiegi do wspólnego czasu systemowego. System ARAMIS był wyzwalany sygnałem analogowym z maszyny wytrzymałościowej. Dokładne przypisanie profili DFOS do wartości siły wykonywano po zakończeniu próby na podstawie przebiegu obciążenia oraz charakterystycznej sekwencji przyrostów i 10-sekundowych etapów przetrzymania.

Pełnopolowy pomiar odkształceń bocznej powierzchni belek prowadzono dodatkowo metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC) z wykorzystaniem systemu ARAMIS. Rejestrację wykonywano z rozdzielczością 4K i częstotliwością 2 Hz. Kamerę ustawiano prostopadle do bocznej powierzchni belki, w odległości około 1 m, tak aby pole widzenia obejmowało całą analizowaną strefę. Ustawienie kamery kontrolowano za pomocą poziomicy laserowej, a scenę oświetlano dwiema lampami LED rozmieszczonymi po obu stronach stanowiska. Powierzchnię belki pokrywano matową białą warstwą, na którą nanoszono czarny, nieregularny wzorzec. W polu pomiarowym umieszczano również znaczniki referencyjne.

Kompletny schemat stanowiska badawczego wraz z rozmieszczeniem systemów pomiarowych przedstawiono na rys. 3-32.



Rys. 3-32. Schemat stanowiska do czteropunktowego zginania belek z rozmieszczeniem systemów Zwick/Roell, ODiSI i ARAMIS.

System ARAMIS wykorzystano jako dodatkowy tor rejestracji pełnopolowych odkształceń powierzchni belek. Analizy przedstawione w niniejszej pracy oparto na wynikach maszyny Zwick/Roell, rozłożonych pomiarach światłowodowych systemu ODiSI oraz dokumentacji fotograficznej zarysowania. Dane te bezpośrednio odpowiadały przyjętym celom badań, obejmującym ocenę odpowiedzi mechanicznej belek oraz weryfikację funkcji pomiarowej prętów GFRP. Dane zarejestrowane systemem ARAMIS zachowano jako materiał uzupełniający i nie włączono ich do analiz przedstawionych w rozprawie.

3.4.3. Opracowanie danych mechanicznych i światłowodowych

Dla każdej belki na podstawie przebiegu siła–przemieszczenie wyznaczono maksymalną siłę $F_{\max}$ oraz odpowiadające jej przemieszczenie tłoka. W analizie mechanicznej uwzględniono 10 belek zawierających dodatkowe pręty GFRP oraz 3 belki referencyjne. Dla obu serii zestawiono indywidualne przebiegi siła–przemieszczenie, wartości $F_{\max}$ i przemieszczenia tłoka przy $F_{\max}$, a także wartości średnie i odchylenia standardowe tych parametrów.

Indywidualną wartość $F_{\max}$ każdej belki wykorzystano do wyznaczenia względnych poziomów obciążenia analizowanych w pomiarach światłowodowych. Pozwoliło to porównywać odpowiadające sobie etapy pracy elementów pomimo różnic ich maksymalnej nośności. Analizowano profile zarejestrowane na rosnącej gałęzi obciążenia. Podstawę porównań stanowiły

poziomy 30, 50, 60 i 70 % indywidualnej wartości $F_{\max}$. W wybranych przypadkach analizę rozszerzano o poziom 10 % $F_{\max}$, umożliwiający ocenę początkowej odpowiedzi czujnika, albo o poziom 80 % $F_{\max}$, jeżeli sygnał pozostawał kompletny i mieścił się w zakresie pomiarowym urządzenia. Zestaw poziomów wykorzystany dla każdej belki podano przy odpowiednim wykresie w rozdziale wynikowym 4.5.1.

Każdemu poziomowi obciążenia przypisywano profil z ustabilizowanej części etapu przetrzymania, występującego najbliżej zadanej wartości siły. Zgodność osi czasu sprawdzano przez porównanie początku obciążania oraz kolejnych przyrostów siły i etapów przetrzymania widocznych w zapisach obu systemów. Stwierdzone przesunięcie czasowe korygowano przed przypisaniem profili odkształcenia do wartości siły.

Współrzędną x prowadzono wzdłuż osi podłużnej belki. Jej początek i zwrot zachowywano jednakowo na wykresach odkształcenia, schematach rozmieszczenia czujników oraz fotografiach zarysowania. Dodatnie wartości oznaczały odkształcenia rozciągające, natomiast wartości ujemne – odkształcenia ściskające.

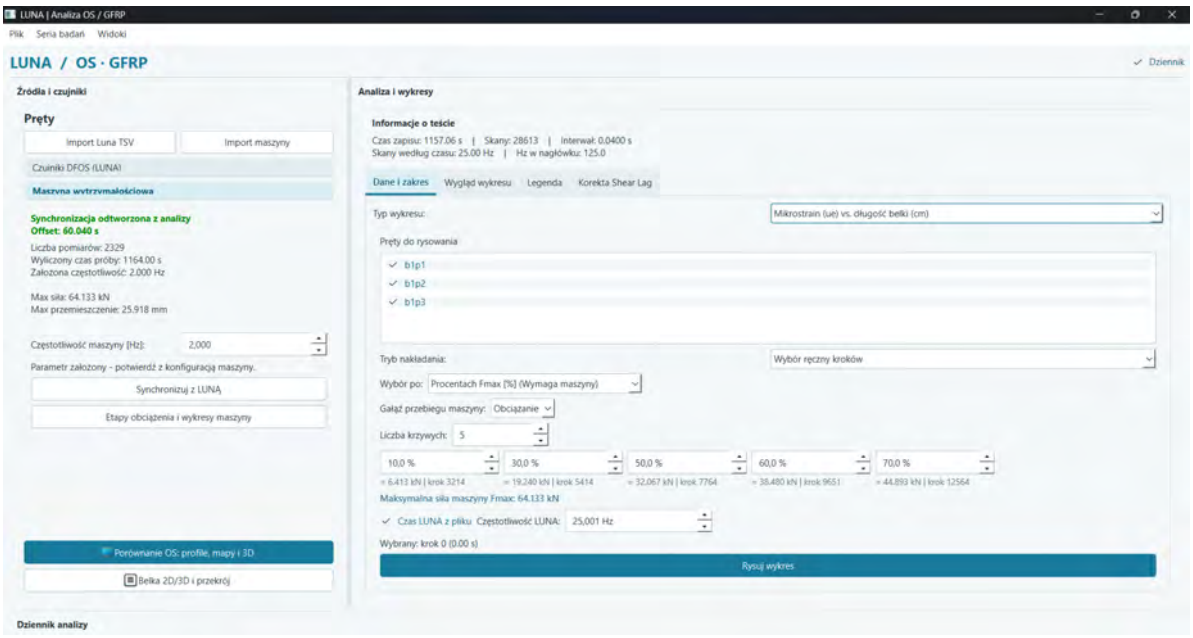
Zakres porównania zależał od liczby aktywnych czujników. W belkach z trzema czynnymi czujnikami zestawiano odpowiedź górnej strefy ściskanej z wynikami dwóch czujników znajdujących się w dolnej strefie rozciąganej. Umożliwiało to również porównanie odpowiedzi obu stron dolnej części belki. W belkach z dwoma czujnikami analizowano jednocześnie odpowiedź górnej i dolnej części przekroju. Dla belek z jednym aktywnym czujnikiem oceniano przestrzenny rozkład odkształceń wyłącznie w położeniu odpowiadającym temu czujnikowi. W przypadku czujników znajdujących się w dolnej części przekroju wyznaczano położenia głównych lokalnych maksimów odkształcenia. Oceniano zmiany ich amplitudy i położenia wraz ze wzrostem obciążenia, zwracając uwagę na powstawanie nowych obszarów lokalizacji oraz redystrybucję odkształceń pomiędzy istniejącymi obszarami. W przypadku czujników umieszczonych w górnej części przekroju analizowano także lokalne zmiany wartości odkształcenia oraz przejścia od ściskania do rozciągania.

Położenia maksimów odkształcenia zestawiano z końcowym obrazem zarysowania widocznym na fotografiach wykonanych po zakończeniu próby. Jeżeli fotografia przedstawiała powierzchnię po stronie aktywnego czujnika, porównanie prowadzono bezpośrednio w układzie współrzędnej (x). Fotografie wykonane od strony przeciwnej odwracano lustrzanie w poziomie, aby ujednolicić kierunek osi podłużnej belki z kierunkiem przyjętym na profilach DFOS. Następnie porównywano współrzędne lokalnych maksimów odkształcenia z położeniem widocznych rys i stref zarysowania.

3.4.4. Oprogramowanie do integracji i wizualizacji danych pomiarowych

W ramach realizacji indywidualnego planu badawczego opracowano dedykowaną aplikację do wspólnej analizy danych z systemu ODiSI oraz maszyny wytrzymałościowej. Narzędzie przygotowano z uwzględnieniem odmiennej struktury zapisów, różnych częstotliwości próbkowania oraz znacznej objętości plików pomiarowych, sięgającej kilkuset megabajtów. Program umożliwiał identyfikację odcinków pomiarowych, uporządkowanie ich orientacji przestrzen-

nej, synchronizację przebiegów, wybór poziomów obciążenia oraz przygotowanie wykresów rozłożonych odkształceń. Widok głównego okna aplikacji przedstawiono na rys. 3-33.



Rys. 3-33. Główne okno autorskiej aplikacji do analizy danych DFOS i wyników maszyny wytrzymałościowej.

Aplikację opracowano w języku Python. Interfejs użytkownika wykonano z wykorzystaniem biblioteki PySide6, natomiast obliczenia i przetwarzanie danych oparto na bibliotekach NumPy i pandas. Wykresy generowano przy użyciu Matplotlib. Podstawowymi danymi wejściowymi były pliki TSV eksportowane z systemu ODiSI oraz pliki XLSX, XLS lub CSV zawierające wyniki maszyny wytrzymałościowej. Podczas importu pliku ODiSI program odczytywał metadane pomiaru, znaczniki czasu, współrzędne kolejnych punktów pomiarowych oraz wartości mikroodkształcenia. Nazwane granice odcinków zapisane w nagłówku pliku wykorzystywano do wydzielenia poszczególnych czujników OS. Zachowywano przy tym pierwotne wartości oraz informację o brakach danych.

Każdemu czujnikowi przypisywano kierunek zgodny z rzeczywistym przebiegiem światłowodu w belce. Jeżeli sygnał przechodził przez dany pręt od prawej do lewej strony, kolejność współrzędnych odwracano wyłącznie na osi przestrzennej. Operacja ta nie zmieniała kolejności skanów i znaku zarejestrowanych odkształceń. Program umożliwiał ponadto wprowadzenie niezależnego przesunięcia położenia każdego OS. Funkcję tę stosowano do kompensacji niewielkich różnic wynikających z ręcznego wyznaczania punktów wejścia i wyjścia światłowodu z betonu.

Czas pomiaru DFOS wyznaczano w pierwszej kolejności na podstawie znaczników zapisanych w pliku TSV. Jeżeli dany eksport nie zawierał użytecznej osi czasu, program pozwalał zdefiniować częstotliwość zapisu ręcznie. Rozwiązanie to było celowe, ponieważ nominalna częstotliwość akwizycji podana w nagłówku nie zawsze odpowiadała liczbie skanów zapisanych w jednostce czasu. Dla danych maszyny, w których nie rejestrowano bezpośrednio czasu, oś czasu odtwarzano na podstawie przyjętej częstotliwości próbkowania.

Do synchronizacji obu układów służył osobny panel (rys. 3-34). W jednym układzie współrzędnych czasowych zestawiano przebieg siły oraz odkształcenie w wybranym punkcie OS. Aplikacja pozwala analizować początek, środkową część i koniec zapisu, zmieniać położenie punktu kontrolnego oraz wskazywać odpowiadające sobie przejścia między kolejnymi stopniami obciążenia. Na podstawie co najmniej trzech par punktów program wyznaczał przesunięcie czasu, a w razie potrzeby również skorygowaną częstotliwość zapisu maszyny. Wynik dopasowania podlegał ocenie użytkownika i musiał zostać jawnie zatwierdzony. Pozwalało to uniknąć automatycznego przypisania sąsiednich, lecz różnych cykli powtarzalnego programu obciążenia.

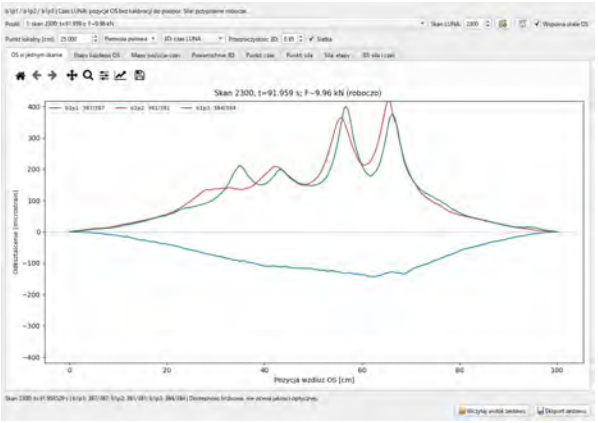


Rys. 3-34. Panel wizualnej synchronizacji przebiegu siły maszyny wytrzymałościowej z odkształceniem zarejestrowanym w wybranym punkcie OS.

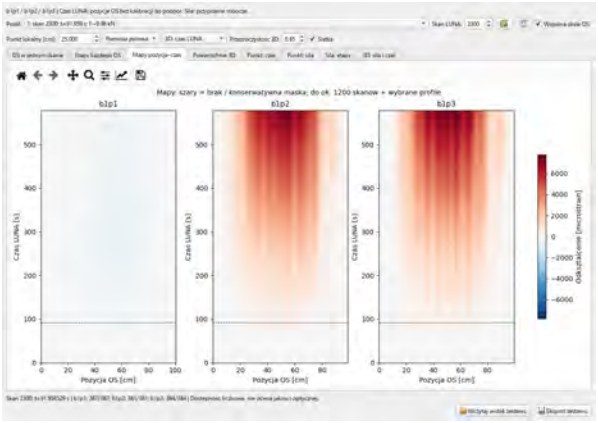
Po zsynchronizowaniu zapisów możliwe było przypisanie każdemu skanowi DFOS odpowiadającej wartości siły i przemieszczenia tłoka. Profile wybierano według numeru skanu, czasu, siły, przemieszczenia albo względnego poziomu obciążenia odniesionego do indywidualnej wartości $F_{\max}$ badanej belki. Oddzielnie wskazywano gałąź obciążania lub odciążania. Program pokazywał również rzeczywistą wartość siły najbliższej dostępnej próbki, dzięki czemu wartość zadana nie była utożsamiana z wartością rzeczywiście zarejestrowaną. Wybór profili mógł obejmować pojedynczy skan, stały interwał albo zestaw wartości wprowadzonych ręcznie.

Podstawową formą prezentacji wyników był wykres profili odkształcenia wzdłuż osi belki. Profile wszystkich aktywnych OS przedstawiano we wspólnym układzie współrzędnych, zachowując znak mikroodkształcenia. Dodatnie wartości odpowiadały rozciąganiu, a ujemne ściskaniu.

Kolor identyfikował położenie czujnika w przekroju, natomiast jasność lub przezroczystość linii mogła rozróżniać kolejne poziomy obciążenia. Drugą formą prezentacji były mapy pozycja–czas. Pozwalały one obserwować rozwój lokalnych koncentracji odkształcenia i okresy braku danych w całym czasie trwania badania. Przykłady obu widoków zestawiono na rys. 3-35.



(a) Profile mikroodkształcenia OS1, OS2 i OS3 dla wybranego skanu.

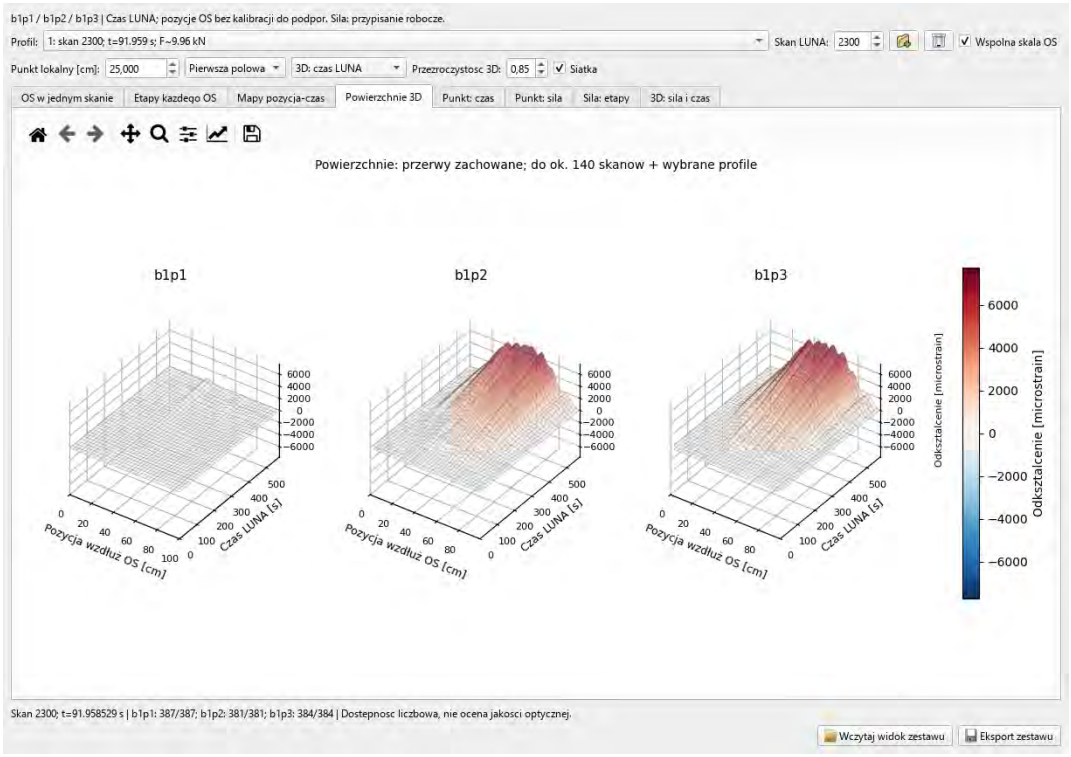


(b) Mapy mikroodkształcenia w dziedzinie położenia i czasu.

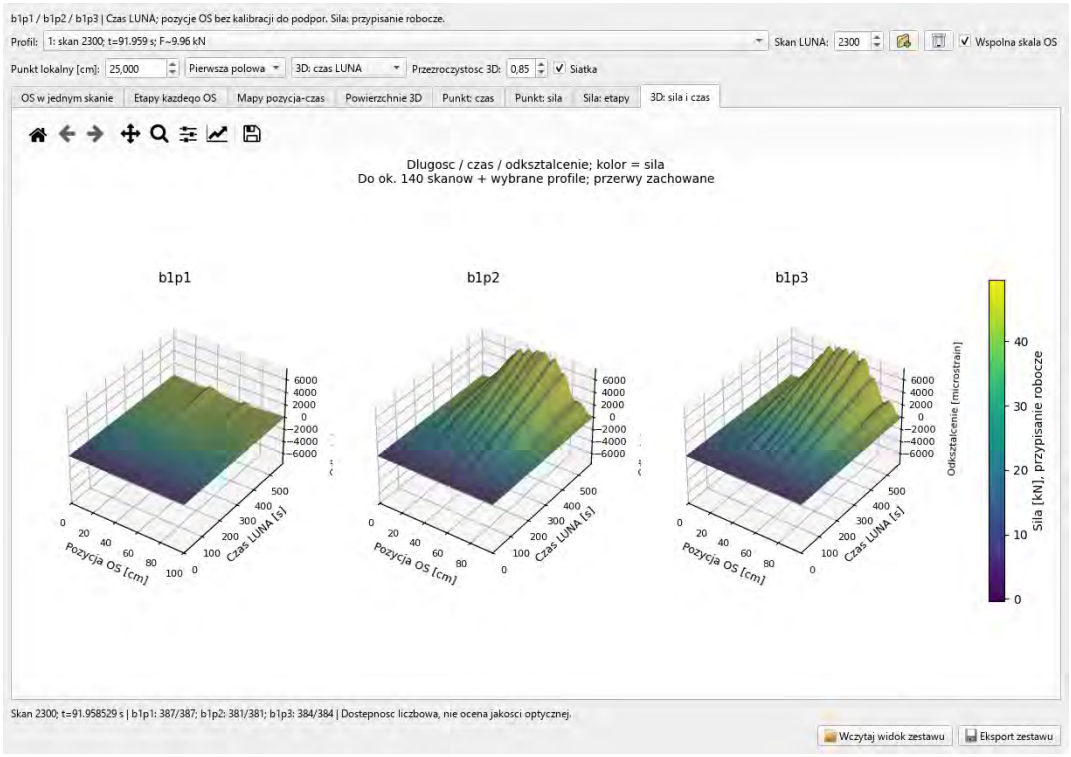
Rys. 3-35. Przykładowe dwuwymiarowe sposoby prezentacji rozłożonych pomiarów odkształcenia. Szary kolor na mapach oznacza brak danych lub punkt odrzucony przez przyjętą maskę dostępności.

Do oceny zmian profilu odkształceń opracowano również wykresy powierzchniowe 3D. Na pierwszej osi poziomej przedstawiano położenie wzdłuż odcinka pomiarowego światłowodu, natomiast na drugiej – czas, numer wybranego etapu lub odpowiadającą mu wartość siły. Wysokość powierzchni przedstawiała wartość mikroodkształcenia. W widoku czasowym barwa powierzchni również odpowiadała wartości odkształcenia. W widoku łączącym położenie, czas i obciążenie wartość odkształcenia przedstawiano jako wysokość powierzchni, natomiast jej kolor oznaczał siłę przypisaną do danego skanu.

Zachowanie czasu jako niezależnej osi umożliwiało rozróżnienie stanów, w których taka sama wartość siły występowała w różnych etapach schodkowego programu obciążenia. Dane zachowywano w kolejności czasowej, bez ich sortowania wyłącznie według siły. Przykładowe widoki 3D przedstawiono na rys. 3-36 oraz rys. 3-37.

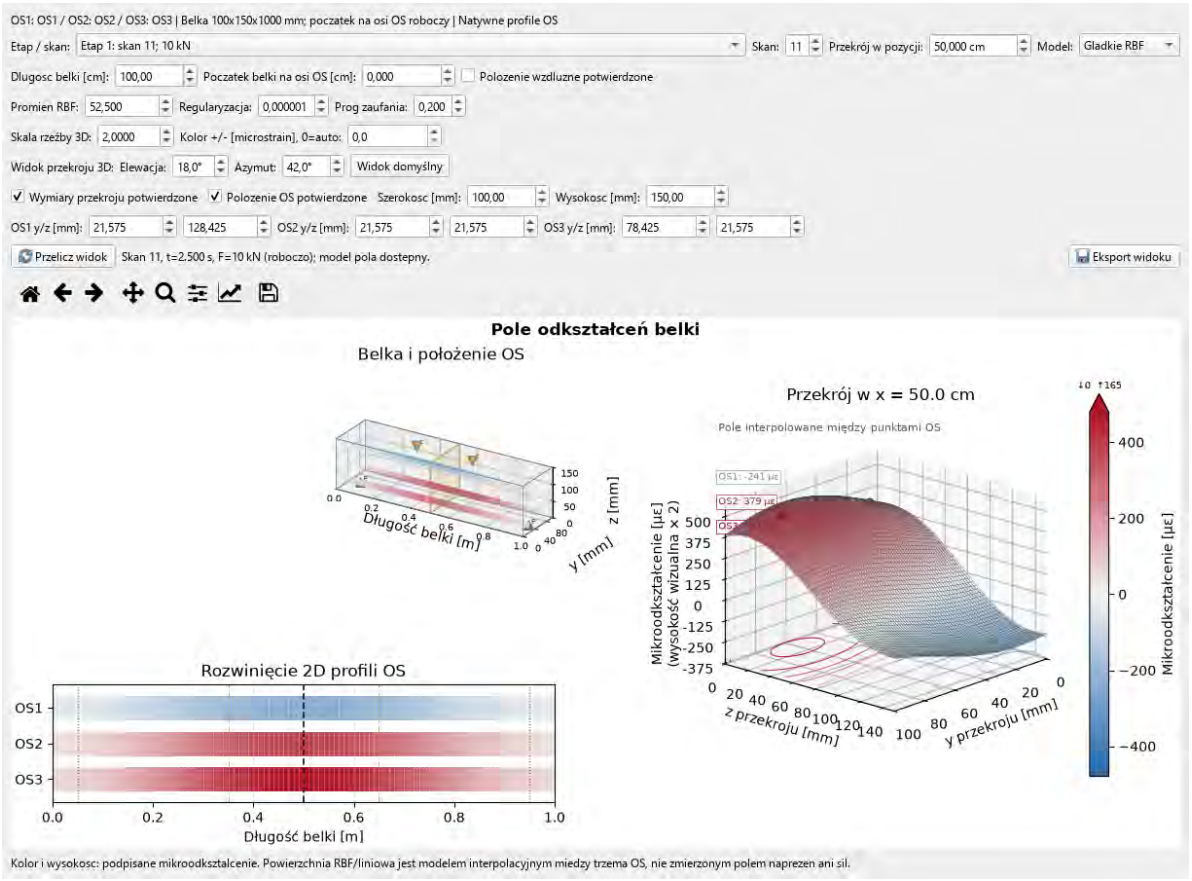


Rys. 3-36. Powierzchnie mikroodkształcenia w dziedzinie położenia i czasu dla belki 1. Oznaczenia b1p1, b1p2, b1p3 umieszczone nad wykresami 3D odpowiadają czujnikom światłowodowym w belce kolejno OS1, OS2, OS3.



Rys. 3-37. Powierzchnie odkształcenia z kolorem odpowiadającym zsynchronizowanej wartości siły dla belki 1. Oznaczenia b1p1, b1p2, b1p3 umieszczone nad wykresami 3D odpowiadają czujnikom światłowodowym w belce kolejno OS1, OS2, OS3.

Dla belek z trzema aktywnymi czujnikami przygotowano dodatkowy widok pola odkształcenia w przekroju poprzecznym. W modelu uwzględniono przekrój belki o wymiarach 100×150 mm oraz rzeczywiste współrzędne osi prętów wynikające z otuliny i ich średnicy. Jednocześnie przedstawiano model całej belki, rozwinięcie podłużnych profili OS oraz powierzchnię w wybranym przekroju, co pokazano na rys. 3-38.



Rys. 3-38. Panel analizy belki i wybranego przekroju: położenie czujników, profile podłużne oraz model powierzchni odkształcenia.

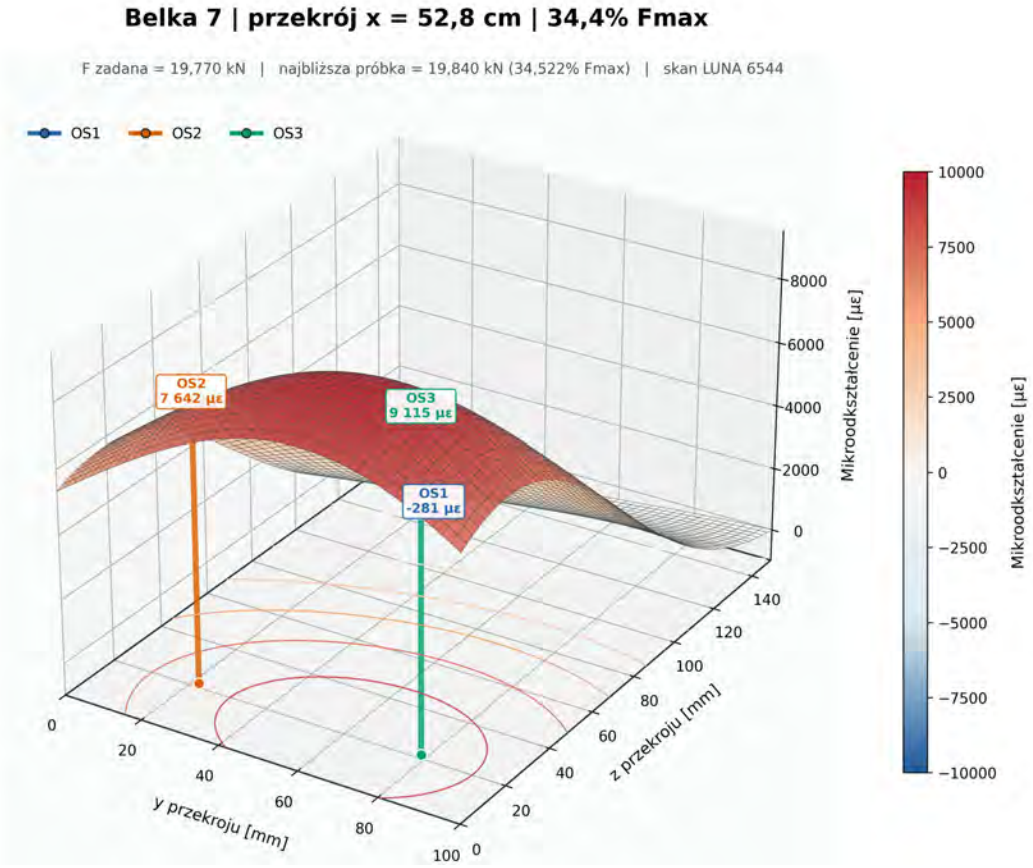
W widoku przekroju dostępne są trzy sposoby prezentacji. Tryb punktowy który pokazuje wyłącznie trzy zmierzone wartości. Tryb liniowy wyznaczał płaszczyznę przechodzącą przez punkty pomiarowe, natomiast tryb RBF tworzy gładką powierzchnię opisową z wykorzystaniem radialnych funkcji bazowych. Promień oddziaływania, regularyzacja i próg zaufania pozostawały parametrami jawnymi. Wzmocnienie wysokości powierzchni służyło wyłącznie poprawie czytelności ukształtowania i nie zmieniało wartości mikroodkształcenia oraz skali kolorów.Przykładowy wynik dla wybranego przekroju Belki 7 przedstawiono na rys.3-39.

Powierzchnia przekroju była interpolacją opartą na maksymalnie trzech wartościach zarejestrowanych przez pręty OS w wyznaczonym miejscu. Z tego względu nie wykorzystywano jej bezpośrednio do wyznaczania naprężeń, położenia osi obojętnej i szerokości rys.

Oprócz podstawowych wykresów program umożliwiał analizę odpowiedzi w stałych punktach belki, porównanie początku, środka i końca etapów testu, wyznaczenie przyrostów

odkształcenia między zatwierdzonymi etapami oraz porównanie odpowiedzi dolnych czujników OS2 i OS3. Dostępna była również procedura wskazywania lokalnych maksimów lub minimów profilu. Wygląd wykresów można było dostosować bez zmiany danych źródłowych. Program umożliwiał określenie tytułu, podpisów osi, treści legendy, kolorów, grubości i przezroczystości poszczególnych linii, zakresów osi oraz parametrów siatki. Na wykresie można było również umieścić prostokątną strefę opisową, na przykład zaznaczającą obszar stałego momentu zginającego. Ustawienia analizy zapisywano w pliku JSON razem z identyfikacją plików źródłowych, orientacją i przesunięciem czujników oraz parametrami synchronizacji.

Wyniki eksportowano do plików PNG i PDF, a wartości użyte do budowy wykresów do plików CSV. Dla bardziej złożonych widoków tworzono również plik `manifest.json`, zawierający numery skanów, czasy, przypisane wartości siły, geometrię, parametry modelu i informację o dostępności danych. Pozwalało to odtworzyć wykres i sprawdzić użyte próbki oraz ustawienia.



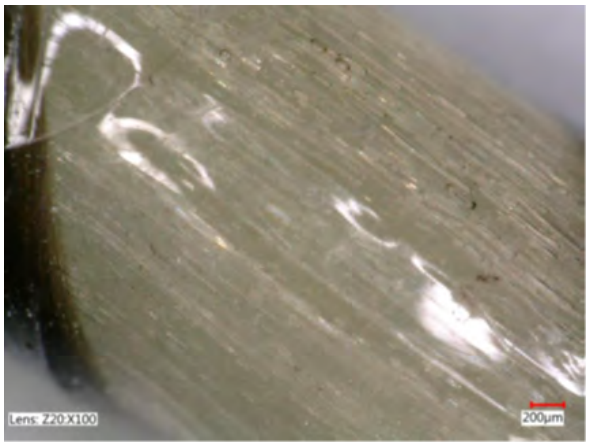
Rys. 3-39. Przykład powierzchni interpolowanej w przekroju Belki 7 przy obciążeniu zbliżonym do $34{,}4\,\%\,F_{\max}$. Oznaczone wartości OS1, OS2 i OS3 są wynikami pomiaru, natomiast powierzchnia pomiędzy nimi stanowi model opisowy RBF.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Analiza strukturalna

4.1.1. Mikroskopia optyczna

Na powierzchni zewnętrznej pręta referencyjnego NoOS (rys. 4-1) oraz pręta z czujnikiem OS (rys. 4-2) widoczna jest charakterystyczna równoległa tekstura. Przy powiększeniu $100\times$ wyraźnie widać osiowy układ rovingu szklanego zatopionego w osnowie epoksydowej. Taka struktura jest typowa dla technologii pultruzji [168, 169]. Owijka bazaltowa widoczna jest jako ciemna strefa włóknista na krawędzi pola obserwacji.



Rys. 4-1. Widok na powierzchnię zewnętrzną pręta kompozytowego bez OS w powiększeniu $100\times$.

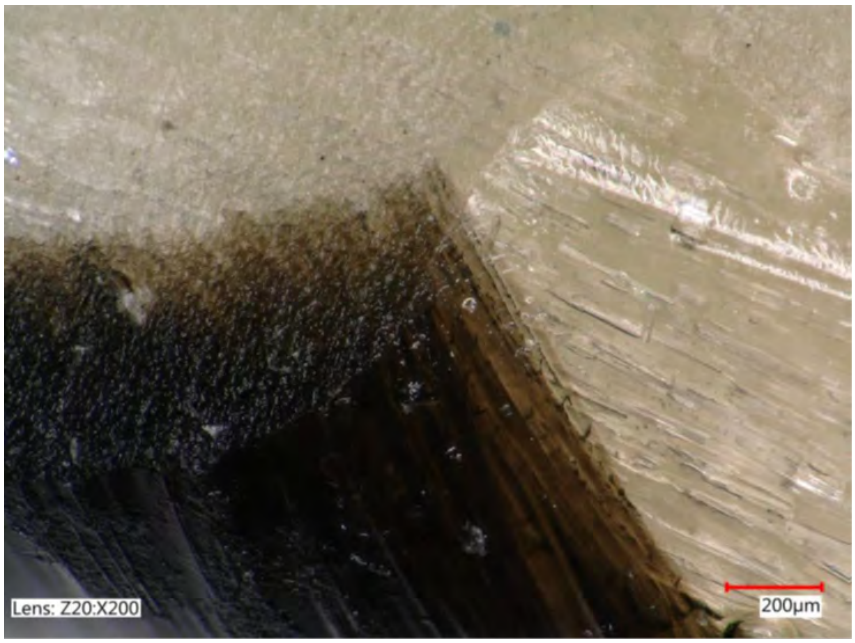


Rys. 4-2. Widok na powierzchnię zewnętrzną pręta kompozytowego z OS w powiększeniu $100\times$.

Na powierzchni obu typów prętów nie stwierdzono defektów materiałowych. Osnowa epoksydowa wykazuje jednorodną strukturę bez widocznych pęknięć i pustek. Jasne refleksy łukowe i liniowe widoczne na powierzchni stanowią artefakty optyczne wynikające z krzywizny cylindrycznej próbki w warunkach oświetlenia mikroskopu i nie odzwierciedlają nieciągłości materiałowych. Porównanie obu typów prętów nie ujawnia jakościowych różnic w strukturze powierzchni rdzenia szklanego. Wskazuje, że obecność światłowodu wewnątrz pręta OS nie zaburza struktury zewnętrznej kompozytu w toku procesu pultruzji.

Na prawej części obrazu (rys. 4-3) wyraźnie widoczna jest struktura rdzenia szklanego wykazująca uporządkowany, równoległy układ roving w osnowie epoksydowej. Taka struktura jest charakterystyczna dla technologii pultruzji, w której ciągłe pasma włókien są przeciągane przez matrycę żywiczną w sposób osiowy, co zapewnia wysoką wytrzymałość w kierunku podłużnym [169]. Osnowa epoksydowa widoczna wokół włókien wykazuje jednorodną strukturę

bez widocznych pęknięć i znaczących defektów. Świadczy to o właściwej impregnacji zbrojenia.



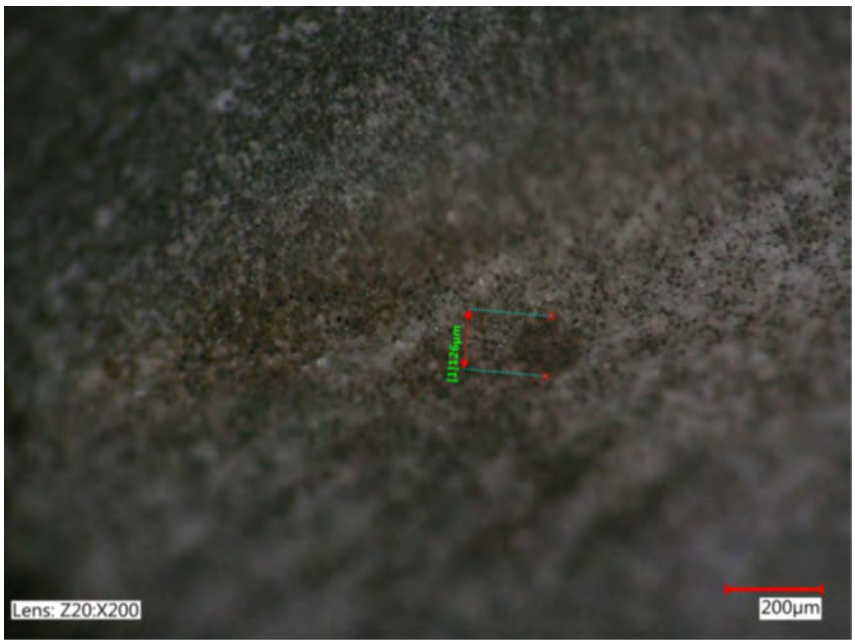
Rys. 4-3. Obraz przedstawiający widok na ułożenie włókien budujących pręt z grubym oplotem w obrąbie przekroju poprzecznego próbki – powiększenie $200\times$.

Ciemniejsza lewa część obrazu reprezentuje owijkę bazaltową. Widoczna ziarnista i nieregularnej ale kierunkowa struktura przejawia chaotyczny układ włókien co jest zgodne z oczekiwaniami dla materiału nawijanego. Owijka bazaltowa pełni w pręcie funkcję polepszenia adhezji do betonu oraz zwiększa odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz czynniki środowiskowe [170]. Na zdjęciu widoczna jest wyraźna granica między jasnym rdzeniem szklanym a owijką bazaltową, z obecną strefą przejściową. Brak szczelin i delaminacji na tej granicy potwierdza dobrą adhezję międzywarstwową będącą efektem właściwie przeprowadzonego procesu produkcji.

Rysunek 4-4 przedstawia przekrój pręta kompozytowego OS z widocznym czujnikiem światłowodowym. Przy powiększeniu $200\times$ zmierzono średnicę światłowodu wynoszącą $126\ \mu\mathrm{m}$. Wartość ta jest zgodna z nominalną średnicą zewnętrzną jednomodowego światłowodu standardowego wynoszącą $125\ \mu\mathrm{m} \pm 1\ \mu\mathrm{m}$ [185]. Różnica $1\ \mu\mathrm{m}$ między wartością zmierzoną a nominalną mieści się w granicach błędu pomiarowego mikroskopu optycznego przy tym powiększeniu i nie stanowi odchylenia od specyfikacji.

Rysunek 4-6 przedstawia przekrój podłużny pręta OS przy powiększeniu $30\times$ oraz $100\times$. W centralnej strefie rdzenia widoczny jest wąski, liniowy rowek biegnący równolegle do osi pręta. Jest to częściowo negatyw po światłowodzie usuniętym mechanicznie podczas preparatyki przekroju. Wyrywanie włókna podczas szlifowania i polerowania wynika z dużej różnicy twardości między miękką powłoką akrylanową a osnową epoksydową i zbrojeniem szklanym. Prowadzi to do preferencyjnego usuwania fazy polimerowej podczas obróbki mechanicznej zgładu. Położenie rowka w centralnej strefie przekroju rdzenia jest zgodne z wynikami badań tomografii komputerowej potwierdzającymi centryczne osadzenie światłowodu względem osi

pręta.



Rys. 4-4. Widok na przekrój poprzeczny pręta kompozytowego z obserwowalnym światłowodem.

Przy powiększeniu $200\times$ dokonano pomiaru szerokości rowka uzyskując wartość $223\ \mu\mathrm{m}$ (4-5). Jest ona zgodna z nominalną średnicą całkowitą światłowodu z powłoką akrylanową wynoszącą $242\ \mu\mathrm{m} \pm 6\ \mu\mathrm{m}$. Krawędzie rowka są regularne i ciągłe. Brak delaminacji czy pęknięć w osnowie dowodzi właściwej adhezji między powłoką akrylanową a żywicą przed usunięciem włókna podczas preparatyki. Poza rowkiem po światłowodzie rdzeń szklany pozbawiony jest pustek i stref sugerujących na niepełną impregnację. Obserwacja ta potwierdza jednorodność kompozytu.



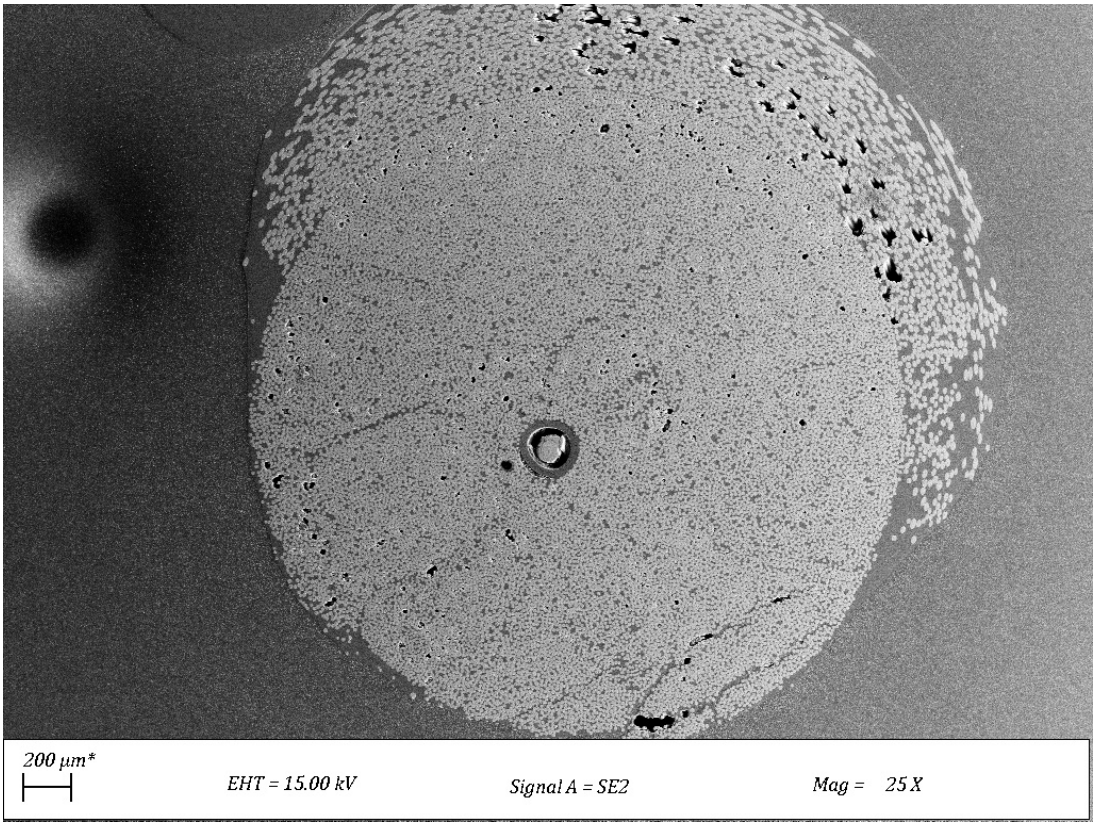
Rys. 4-5. Widok na powierzchnię zewnętrzną pręta kompozytowego bez OS w powiększeniu $100\times$.



Rys. 4-6. Widok na powierzchnię zewnętrzną pręta kompozytowego z OS w powiększeniu $100\times$.

4.1.2. Skaningowa mikroskopia elektronowa

Na rysunku 4-7 przedstawiono pełny przekrój poprzeczny pręta OS przy powiększeniu 25-cio krotnym. W centrum przekroju zaobserwowano zintegrowany światłowód. Jego położenie zbliżone jest do środka geometrycznego pręta, co pozostaje spójne z wynikami tomografii komputerowej omówionymi w podrozdziale 4.1.3. Rdzeń pręta tworzą jednokierunkowe włókna szklane zatopione w osnowie epoksydowej. Widoczne są pasma bogate w żywicę, charakterystyczne dla technologii pultruzji. Na obwodzie pręta rozpoznać można strefę helikalnej owijki bazaltowej. Eliptyczny kształt przekrojów włókien w tym obszarze wynika z ukośnego kąta nawijania względem osi pręta. Wokół światłowodu widoczna jest ciemna strefa pierścieniowa, którą omówiono w dalszej części. Uwagę zwraca skupisko rozsianych czarnych plamek w prawym górnym sektorze przekroju, które są zlokalizowane blisko granicy rdzenia szklanego i owijki bazaltowej. Wskazuje to na lokalny niedosyt impregnacji włókien żywicą w tej strefie. Jest to raczej defekt technologiczny, a nie artefakt preparatyki. W pozostałej objętości rdzenia nie stwierdzono makroskopowej porowatości.

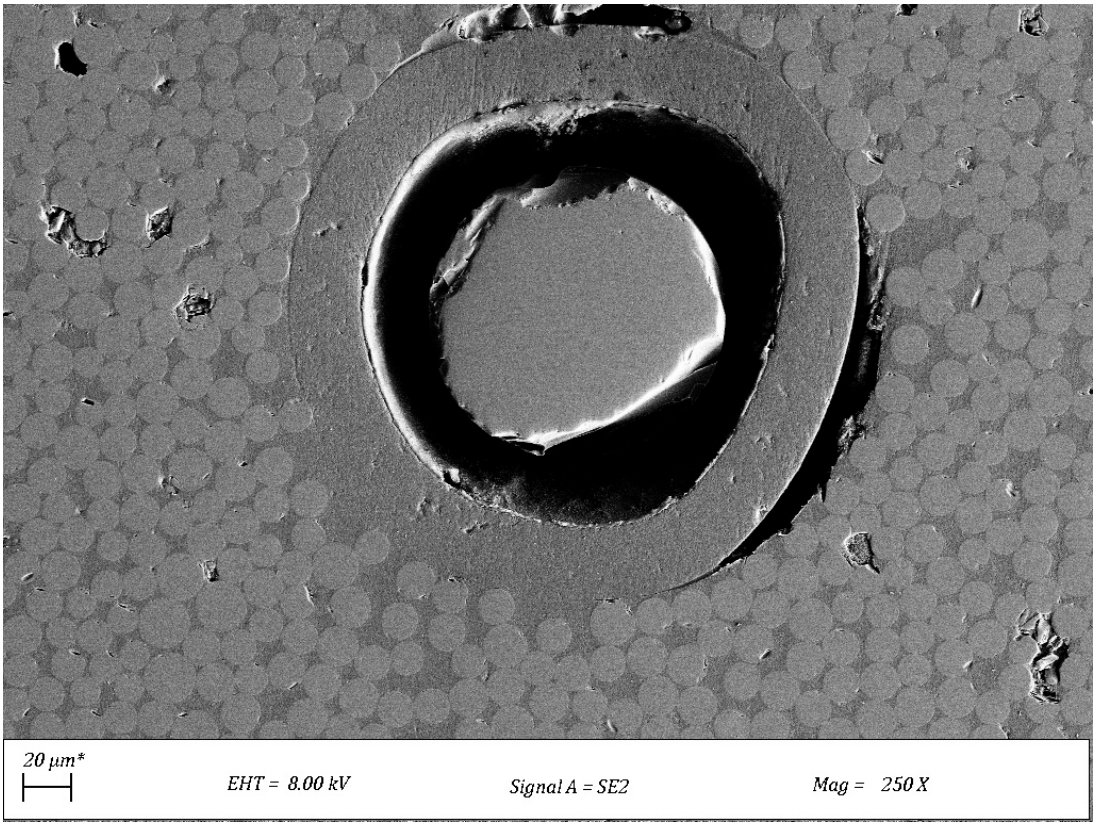


Rys. 4-7. Obraz SEM (przybliżenie 25-krotne) przekroju poprzecznego pręta kompozytowego ze zintegrowanym światłowodem. Widoczny jednokierunkowy rdzeń GFRP, zewnętrzna owijka bazaltowa oraz strefa zwiększonej porowatości blisko granicy faz rdzeń–owijka.

Na rysunku 4-8 przedstawiono światłowód wbudowany w pręt kompozytowy przy powiększeniu $250\times$. Obraz zarejestrowano przy obniżonym napięciu przyspieszającym wynoszącym $8\ \mathrm{kV}$, co w porównaniu z pozostałymi ujęciami zapewnia lepszy kontrast warstw powierzchniowych i wyraźniejsze odwzorowanie granicy faz. W centrum widoczny jest płaszcz kwarcowy

światłowodu. Otacza go ciemny pierścień o wyraźnym kontraście topograficznym. Pierścień ten nie jest to defekt technologicznym. Powstał w wyniku preparatyki. Zdjęcia SEM ujawniły, że światłowód zbudowany jest z dwóch powłok, które można nazwać pierwotną i wtórną. Miękka powłoka pierwotna, która charakteryzuje się znacznie niższą twardością niż otaczające ją fazy, uległa głębszemu spolerowaniu podczas szlifowania zgładu. Efekt ten jest prawdopodobnym artefaktem preparatyki metalograficznej przy dużym zróżnicowaniu twardości faz.

Zewnętrzną warstwę czujnika stanowi twarda powłoka akrylanowa wtórna. Zachowuje ona na dużej części swojego obwodu ciągłość z osnową epoksydową co świadczy o dobrej kompatybilności chemicznej obu polimerów. Na godzinie czwartej widoczna jest czarna pustka pomiędzy powłoką akrylanową, a osnową. Może to świadczyć o delaminacji, który mógł powstać w produkcji na etapie chłodzenia i towarzyszącego mu gwałtownego skurczu. Otaczające czujnik włókna szklane rovingu wykazują jednorodne upakowanie i pełną impregnację osnową. Pojedyncze jasne fragmenty widoczne w strefie ciemnego pierścienia mają ostrokrawędzisty charakter wskazujący na mechaniczne pochodzenie – są to odłamki powstałe podczas polerowania zgładu.

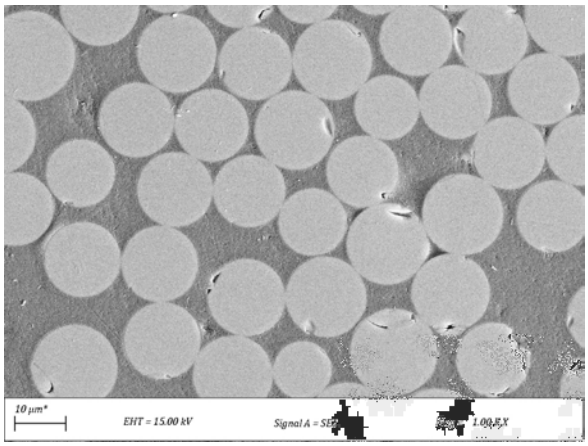


Rys. 4-8. Obraz SEM zintegrowanego czujnika optycznego przy powiększeniu $250\times$. Widoczny płaszcz kwarcowy, twarda powłoka wtórna spójna z osnową oraz silny kontrast topograficzny w postaci zagłębienia, stanowiący artefakt preparatyczny po spolerowanej miękkiej powłoce pierwotnej.

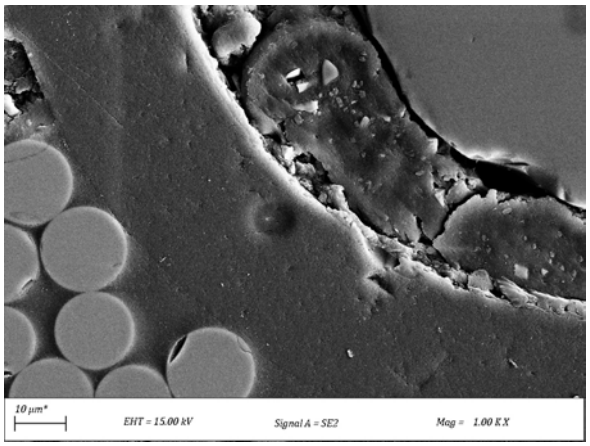
Rysunek 4-9 przedstawia strefę interfejsu czujnik–kompozyt przy powiększeniu $1000\times$. W dolnej lewej części kadru widoczne są przekroje poprzeczne włókien szklanych rovingu. Są one okrągłe, gładkie i jednorodne. Przestrzenie między włóknami są równomiernie wypełnione osnową epoksydową. W prawej górnej części obrazu widoczna jest strefa powłoki pierwotnej.

Jej morfologia różni się zasadniczo od otaczających faz. Powłoka jest silnie zdeformowana. Zaobserwowano na tejże powłoce pęknięcia, rozwarstwiania oraz liczne jasne, ostrokrawędziste cząstki uwięzione w jej strukturze. Granica między twardą powłoką akrylanową, a osnową epoksydową kompozytu wykazuje pełną ciągłość fazową. Nie stwierdzono szczelin, mikropęknięć oraz stref delaminacji. Potwierdza to dobrą adhezję obu polimerów uzyskaną w procesie pultruzji oraz właściwy transfer odkształceń z kompozytu na czujnik.

Rysunek 4-10 przedstawia strefę przejściową między kompozytem GFRP a powłoką czujnika przy powiększeniu $500\times$. Jest to ujęcie pośrednie między widokiem przeglądowym a szczegółowym, które dobrze oddaje wzajemne relacje przestrzenne obu stref. Po lewej stronie kadru widoczne są włókna szklane rovingu w osnowie epoksydowej. Włókna są równomiernie rozmieszczone i w pełni otoczone matrycą polimerową. Nie stwierdzono pustek oraz stref niedompregnowania w tej części przekroju. Po prawej stronie widoczna jest gładka powierzchnia twardej powłoki akrylanowej wtórnej. Granica między powłoką a osnową epoksydową jest wyraźna i ciągła na całej widocznej długości. Również przy tym przybliżeniu nie doszukano się powstania szczelin i rozwarstwień co jest kolejnym potwierdzeniem dobrej adhezji obu faz polimerowych. Pomiędzy powłoką wtórną a płaszczem kwarcowym widoczny jest ciemny pierścień. Analogicznie jak na Rysunku 4-8, jest to prawdopodobnie efekt niecelowego usunięcia powłoki pierwotnej podczas preparatyki.



Rys. 4-9. Obraz SEM (powiększenie $1000\times$) szczegółu interfejsu czujnik–kompozyt. Obserwuje się pełną ciągłość pomiędzy matrycą epoksydową a twardą powłoką akrylanową światłowodu. Widoczna po lewej stronie powłoka pierwotna uległa zniszczeniu mechanicznemu w procesie polerowania, co potwierdzają liczne inkluzje drobin ściernych.

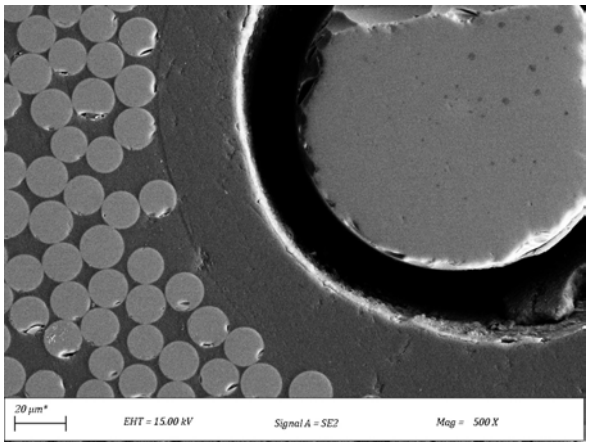


Rys. 4-10. Obraz SEM (powiększenie $500\times$) strefy przejściowej między strukturą kompozytu GFRP a powłoką akrylanową wbudowanego światłowodu, wykazujący prawidłową adhezję na całej długości widocznej granicy faz osnowa–sensor.

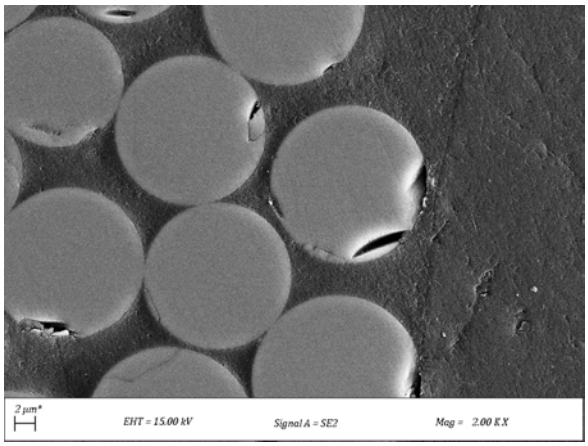
Rysunek 4-11 przedstawia detal granicy faz włókno szklane–osnowa epoksydowa przy powiększeniu $2000\times$. Pozwala ono na bezpośrednią ocenę jakości kontaktu na poziomie pojedynczego filamentu. Włókna szklane mają okrągły przekrój o jednorodnej średnicy. Przy skali $2\ \mu\mathrm{m}$ ich wymiar odpowiada wartościom charakterystycznym dla rovingu E-glass. Powierzchnia włó-

kien jest gładka i regularna. Przestrzenie między filamentami są całkowicie wypełnione osnową epoksydową bez widocznych pustek. Na granicy kilku włókien z osnową widoczne są wąskie, ostrokrawędziste odspojenia w kształcie ciemnych sierpów. Ich morfologia jest charakterystyczna dla powstających naprężeń ścinających podczas końcowego polerowania zgładu. Etap ten powoduje lokalne oderwanie osnowy od szkła w miejscach o największym zróżnicowaniu twardości. Nie należy ich interpretować jako wad adhezyjnych technologii pultruzji.

W prawej części kadru widoczna jest powierzchnia twardej powłoki akrylanowej wtórnej. Wyraźnie różni się od powierzchni włókien – jest ciemniejsza i wykazuje większą chropowatość. Granica między rovingiem a powłoką jest ostra i czytelna.



Rys. 4-11. Obraz SEM (powiększenie $2000\times$) detalu granicy faz osnowa–powłoka wtórna. Potwierdzenie braku mikroszczelin na interfejsie polimerowym przy jednoczesnej obecności lokalnych, ostrokrawędzistych odspojeń wokół włókien szklanych, klasyfikowanych jako artefakty preparatyczne.



Rys. 4-12. Obraz SEM (powiększenie $1000\times$) mikrostruktury rdzenia kompozytu GFRP. Całkowite wypełnienie przestrzeni międzypasmowych osnową epoksydową świadczy o optymalnym zwilżeniu i infiltracji rovingu szklanego. Lokalne wykruszenia na obwodach włókien mają charakter mechaniczny (po polerowaniu).

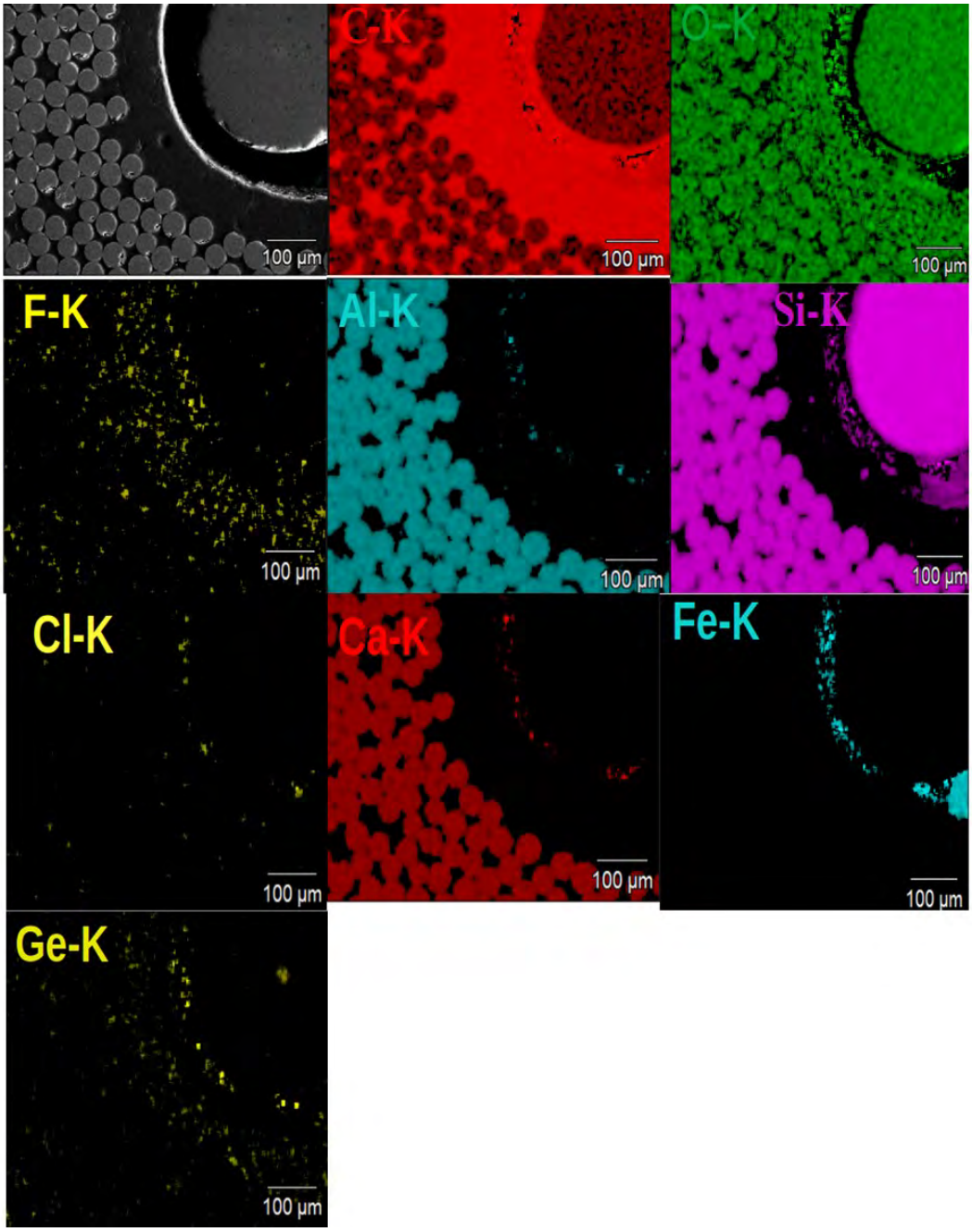
Rysunek 4-12 przedstawia mikrostrukturę rdzenia kompozytu GFRP przy powiększeniu $1000\times$. Obraz pochodzi ze strefy rdzenia, z dala od czujnika i stanowi odniesienie dla oceny jakości samego kompozytu. Włókna szklane tworzą gęstą i regularnie upakowaną strukturę. Przestrzenie między filamentami są całkowicie wypełnione osnową epoksydową. Brak jest pustek, które świadczyłyby o niedompregnowaniu rovingu. Jest to bezpośrednie potwierdzenie wysokiej jakości impregnacji rovingu w procesie pultruzji. Podobnie jak na rysunku 4-11 na obwodach niektórych włókien widoczne są drobne, ostrokrawędziste odspojenia w kształcie ciemnych sierpów.

Zestawienie tego obrazu z Rysunkiem 4-7 pokazuje wyraźny kontrast między jednorodną strefą centralną rdzenia a skupiskiem pustek zlokalizowanym na granicy rdzenia i owijki bazaltowej. Jakość impregnacji w centrum pręta jest wysoka. Lokalne niedobory pojawiają się wyłącznie w strefie przejściowej.

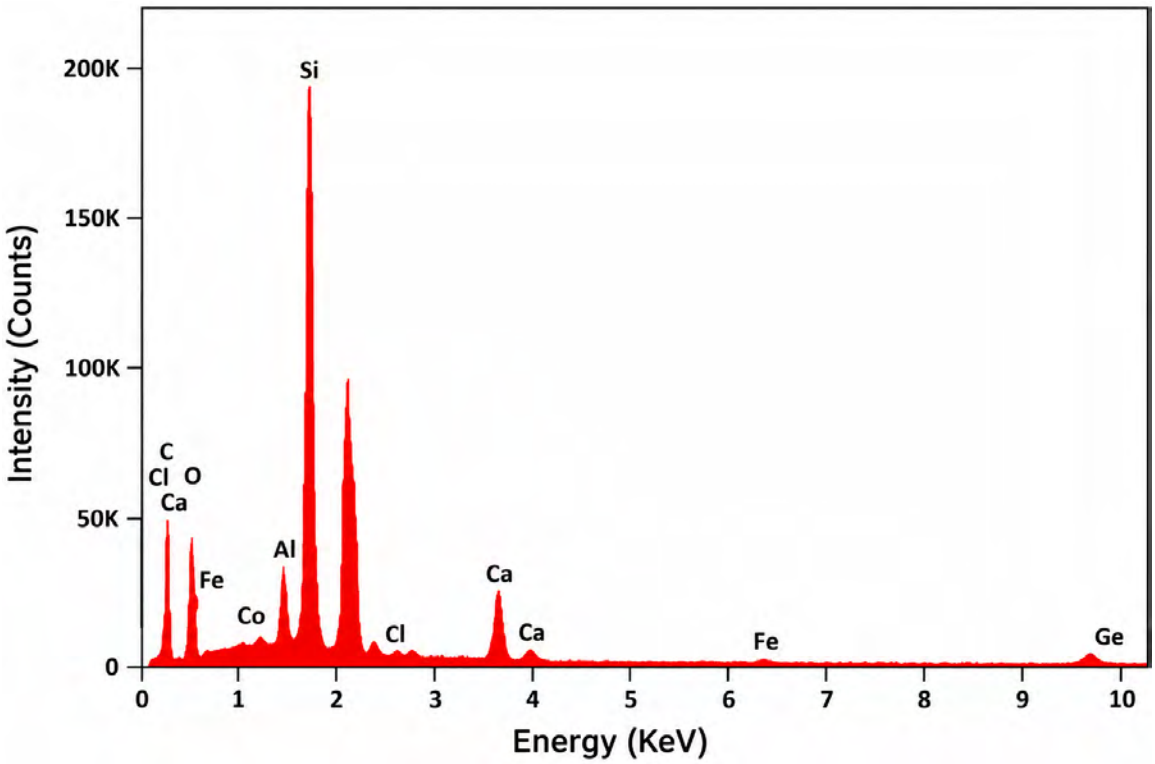
Zarejestrowane mapy rozmieszczenia pierwiastków oraz widmo EDS przedstawiono

na rys. 4-13 i 4-14. Wyniki analizy wskazują na zróżnicowanie składu pierwiastkowego poszczególnych obszarów badanego przekroju. Zestawienie zidentyfikowanych pierwiastków zamieszczono w tab. 4-1.

W obszarze odpowiadającym szklanej części światłowodu dominowały sygnały krzemu i tlenu. Nie stwierdzono w nim wyraźnego wzbogacenia w glin i wapń, widocznego w otaczających włóknach zbrojenia. Taki rozkład pierwiastków jest zgodny z budową światłowodu opartego na szkle krzemionkowym.



Rys. 4-13. Obraz SEM analizowanego obszaru oraz odpowiadające mu mapy rozmieszczenia pierwiastków uzyskane metodą EDS. Litera K występująca po symbolu pierwiastka w oznaczeniach wygenerowanych przez oprogramowanie wskazuje serię linii promieniowania charakterystycznego wykorzystaną do utworzenia mapy.



Rys. 4-14. Mapy rozkładu pierwiastków oraz widmo EDS dla analizowanego obszaru przekroju pręta kompozytowego ze zintegrowanym światłowodem.

W przekrojach włókien rovingu szklanego oprócz glinu i wapnia zarejestrowano współwystępowanie tlenu i krzemu. Skład ten jest zgodny z deklarowanym zastosowaniem włókien szklanych typu E. Analiza EDS pozwala przy tym zidentyfikować obecność poszczególnych pierwiastków, lecz nie określa bezpośrednio ich postaci chemicznej. Z tego względu sygnałów Al i Ca nie przypisywano jednoznacznie określonym związkom lub tlenkom.

Sygnały węgla i tlenu występowały na całym analizowanym obszarze próbki. Tlen jest składnikiem zarówno materiałów polimerowych, jak i faz krzemianowych.

Na mapie rozmieszczenia germanu stwierdzono koncentrację sygnału w centralnej części przekroju światłowodu, w obszarze o wymiarze rzędu kilku mikrometrów. Położenie tego obszaru odpowiada położeniu rdzenia światłowodu i było zgodne z budową światłowodu jednomodowego typu SMF-28, w którym zwiększenie współczynnika załamania światła w rdzeniu uzyskuje się przez domieszkowanie krzemionki germanem. Obecności Ge odpowiadał również niewielki pik przy energii około $9{,}9\ \mathrm{keV}$, przypisany do linii $Ge\,K_\alpha$. Łączne uwzględnienie położenia sygnału na mapie oraz odpowiadającego mu piku w widmie przemawia za jego związkiem z domieszkowanym rdzeniem światłowodu.

Sygnał chloru miał niewielką intensywność i występował lokalnie. Jedną z możliwych przyczyn jego obecności jest preparacja powierzchniowa włókien szklanych. W literaturze opisano chlorofunkcyjne silany oraz chlorosilany stosowane jako środki sprzęgające lub półprodukty do ich otrzymywania [156]. Związki te mogą uczestniczyć w modyfikacji powierzchni szkła i sugerować na możliwe pochodzenie sygnału. Ze względu na brak informacji producenta o szczegółowym

składzie preparacji zastosowanego rovingu oraz lokalny charakter sygnału nie można potwierdzić, że chlor był składnikiem warstwy powierzchniowej włókien.

Rozmieszczenie sygnału Fe częściowo pokrywało się z obszarem wewnętrznej warstwy powłoki akrylanowej światłowodu. Obecność żelaza w widmie potwierdzał słaby pik odpowiadający linii $Fe\,K_\alpha$ przy energii około $6{,}4\ \mathrm{keV}$. Nie można jednak potwierdzić, czy żelazo stanowi składnik tej warstwy, ponieważ producent nie podaje jej szczegółowego składu chemicznego.

Tablica 4-1. Rozmieszczenie sygnałów pierwiastków zarejestrowanych na mapach EDS oraz ich odniesienie do budowy analizowanych materiałów.

Pierwiastek	Główna lokalizacja sygnału	Interpretacja
Si	Roving szklany oraz szklana część światłowodu	Sygnał odpowiada materiałom krzemianowym. W typowym szkle typu E krzemionka stanowi około 52–56 % masowych i jest głównym składnikiem struktury szkła.
Al	Roving szklany	Sygnał jest zgodny ze składem szkła typu E, które zawiera zwykle około 12–16 % masowych Al_2O_3.
Ca	Roving szklany	Obecność Ca jest zgodna ze składem szkła typu E.
Ge	Centralna część przekroju światłowodu	Lokalizacja sygnału odpowiada położeniu rdzenia światłowodu. W widmie zarejestrowano również pik przy energii około $9{,}9\ \mathrm{keV}$, przypisany do linii $Ge\,K_\alpha$.
C	Cały analizowany obszar	Rozmieszczenie sygnału nie pozwalało na jednoznaczne rozróżnienie poszczególnych składników próbki.
O	Cały analizowany obszar	Rozmieszczenie sygnału nie pozwalało na jednoznaczne rozróżnienie poszczególnych składników próbki.
Cl	Lokalne obszary, w tym w pobliżu powłoki światłowodu	Zarejestrowano słaby, lokalnie rozmieszczony sygnał; może pochodzić z warstwy sizingu na rovingu[156]
Fe	Lokalnie w obszarze pokrywającym się z wewnętrzną warstwą powłoki światłowodu	W widmie zarejestrowano pik odpowiadający linii $Fe\,K_\alpha$ przy energii około $6{,}4\ \mathrm{keV}$.
F	Słaby sygnał częściowo występujący w obszarze osnowy lub powłoki	Sygnał został przypisany do F przez oprogramowanie EDS, lecz nie wykorzystano go do identyfikacji składników próbki.

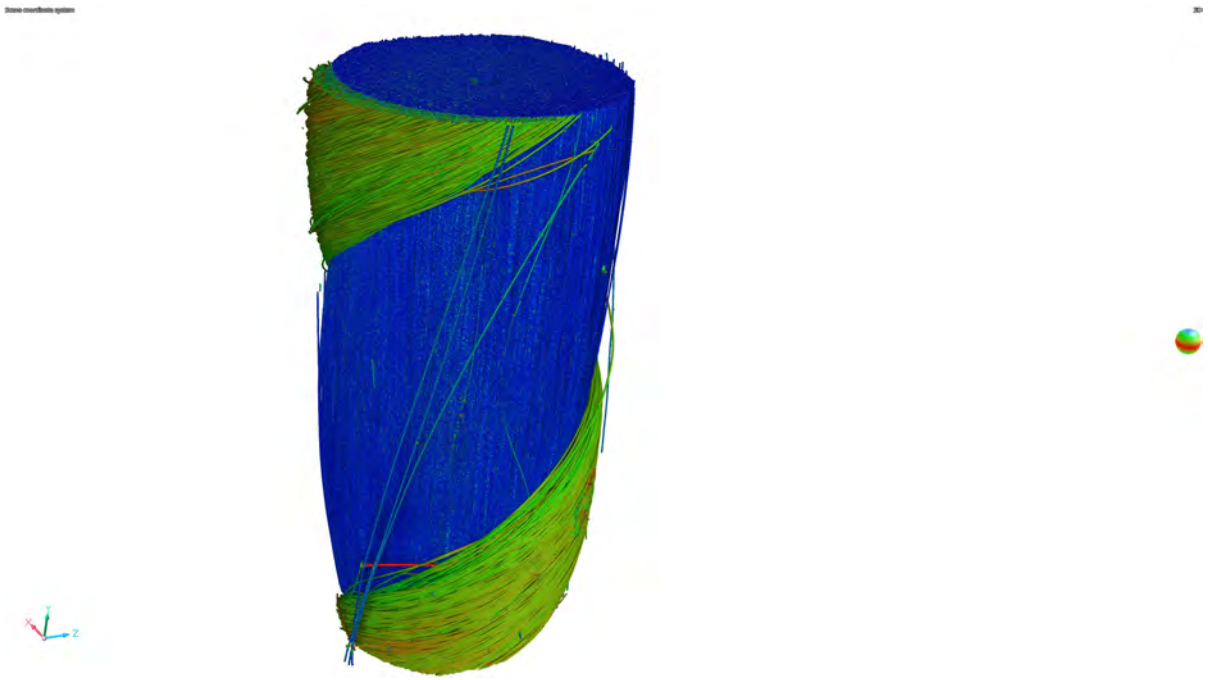
Podane udziały tlenków są typowymi zakresami literaturowymi dla szkła typu E i nie stanowią wyników ilościowej analizy składu badanego rovingu.

Identyfikację fluoru uznano za niejednoznaczną. Linia $F\,K_\alpha$, położona przy energii około $0{,}68\ \mathrm{keV}$, znajduje się bardzo blisko linii $Fe\,L_\alpha$, występującej przy energii około $0{,}70\ \mathrm{keV}$. Rozdzielenie tych sygnałów mogło przekraczać zdolność rozdzielczą zastosowanego detektora EDS. Ponieważ obecność Fe była niezależnie wskazywana przez linię $Fe\,K_\alpha$, natomiast w znanym składzie osnowy nie występował komponent zawierający fluor, sygnału w zakresie około $0{,}7\ \mathrm{keV}$ nie uznano za wystarczające potwierdzenie obecności F.

4.1.3. Tomografia komputerowa

Rekonstrukcja trójwymiarowa wykazała dwufazową budowę kompozytu. Główną fazę objętościową stanowi rdzeń pręta z osiowo ułożonym rovingiem szklanym (kolor niebieski na mapie kierunkowości). Taka orientacja włókien wzdłuż osi podłużnej wynika bezpośrednio z geometrii procesu pultruzji, w którym pasma są ciągnięte pod stałym naciągiem wzdłuż osi maszyny [98, 169]. Wyraźna i ostra granica kolorystyczna między rdzeniem a oplotem dowodzi, że w procesie technologicznym oba typy włókien nie ulegają przemieszaniu (Rysunek 4-15).

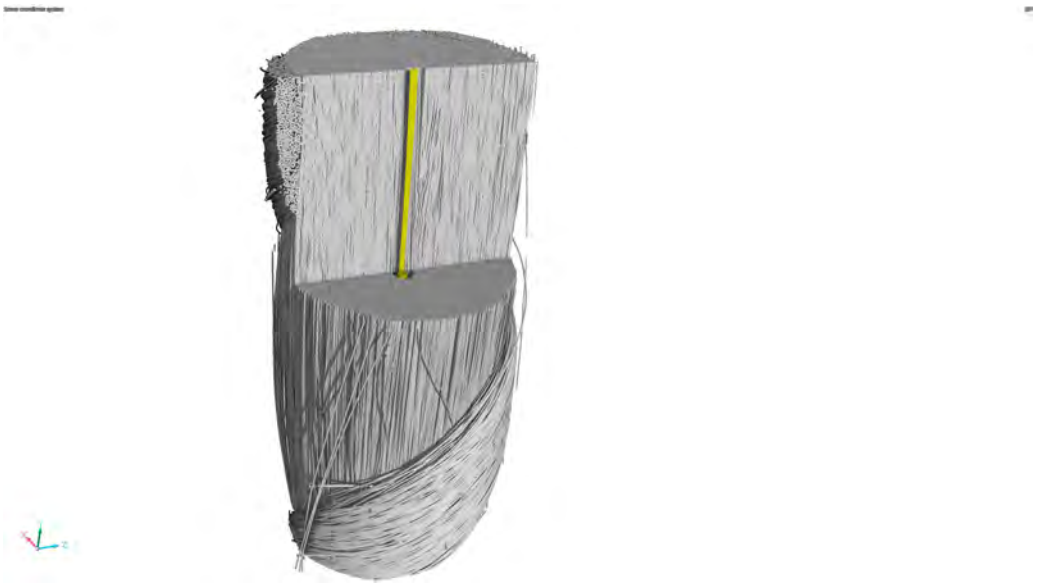
Na rekonstrukcji z wyodrębnionym światłowodem (Rysunek 4-16) widoczny jest liniowy element w kolorze żółtym (światłowód) biegnący wzdłuż osi pręta, w obszarze zbliżonym do jego geometrycznego środka. Czujnik zachowuje prostoliniowość na całej długości odcinka, bez widocznych wygięć czy lokalnych odchyleń od osi. Ponadto w obrębie wzmocnienia podłużnego – rovingu szklanego nie stwierdzono istotnych zaburzeń orientacji włókien.



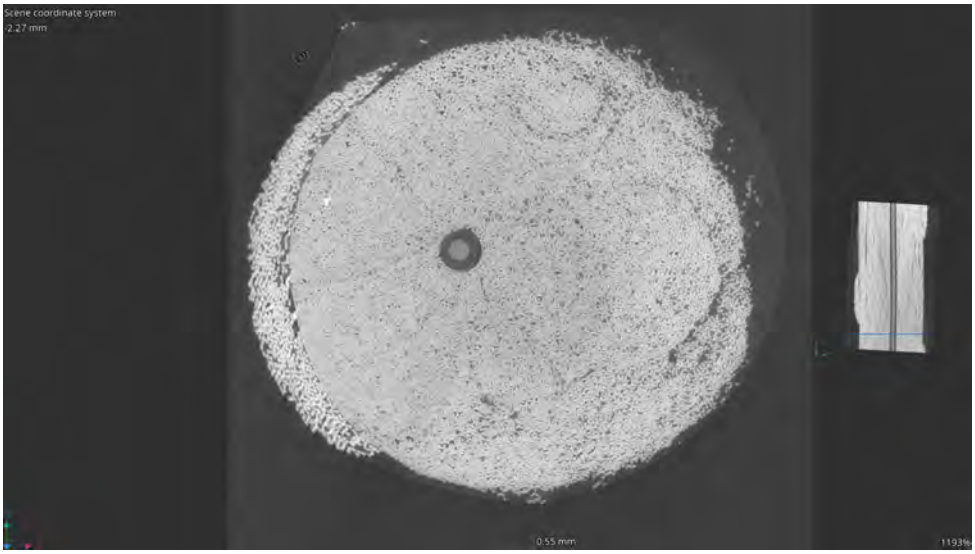
Rys. 4-15. Rekonstrukcja 3D pręta OS z mapą orientacji włókien.

Przekrój poprzeczny wskazuje na kolisty obrys rdzenia GFRP z gęsto upakowanymi elementarnymi włóknami szklanymi (Rysunek 4-17). Rdzeń ten otoczony jest pierścieniem oplotu bazaltowego o nieciągłej charakterystyce obwodowej. Brak zaobserwowanej nieciągłości wynika z okresowego nawinięcia helisowego owijki. W obszarze zbliżonym do geometrycznego środka przekroju widoczna jest koncentryczna struktura światłowodu jednomodowego. Składa się ona z dwóch wyraźnie kontrastujących stref: zewnętrznego, ciemniejszego pierścienia powłoki akrylanowej (średnica nominalna $245\ \mu\mathrm{m}$) oraz wewnętrznego, jaśniejszego pierścienia płaszcza kwarcowego o średnicy $125\ \mu\mathrm{m}$. Rdzeń optyczny włókna pozostaje poniżej rozdzielczości zastosowanej rekonstrukcji. Wizualnie środek światłowodu pozostaje w bliskim sąsiedztwie geometrycznego środka przekroju pręta jednak dokładna wartość przesunięcia wymaga pomiaru

ilościowego. Z punktu widzenia badanego materiału jako czujnika, pożądane jest osadzenie światłowodu w pobliżu osi obojętnej pręta. Takie ułożenie ogranicza wpływ naprężeń gnących na sygnał pomiarowy i poprawia liniowość odpowiedzi przy obciążeniach osiowych.



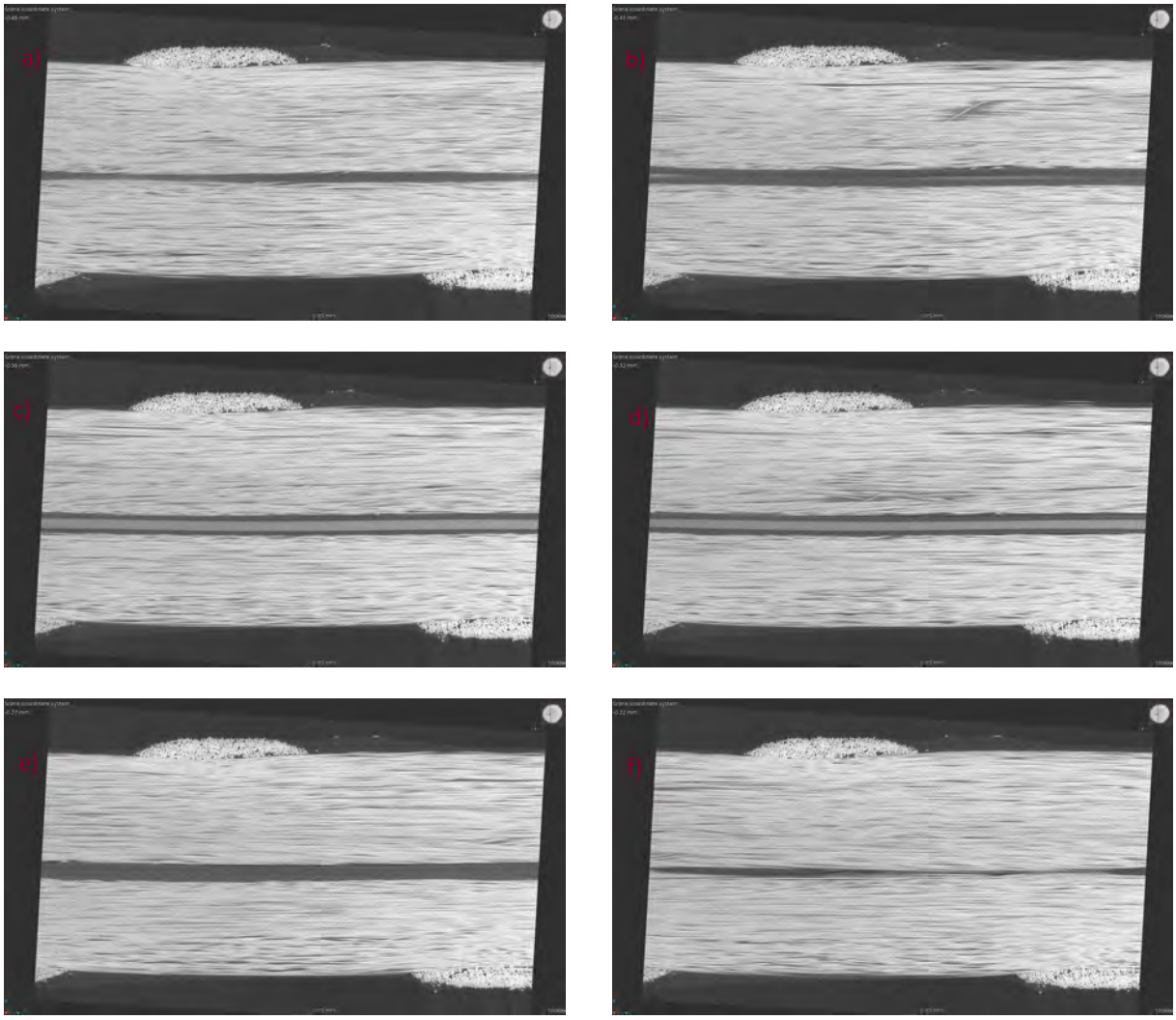
Rys. 4-16. Rekonstrukcja 3D pręta OS z wyróżnionym światłowodem (kolor żółty) w obszarze przy osi pręta.



Rys. 4-17. Przekrój poprzeczny (top view, pozycja $Y = -2{,}27\ \mathrm{mm}$). Skala $0{,}55\ \mathrm{mm}$. Widoczne: część kwarcowa (jaśniejszy pierścień) i powłoka akrylanowa (ciemniejszy pierścień zewnętrzny) światłowodu w obszarze przy osi pręta.

Na zdjęciach 4-18 zaprezentowano serię sześciu przekrojów podłużnych w równych odstępach co około $0{,}05\ \mathrm{mm}$ w zakresie $X = -0{,}46$ do $-0{,}22\ \mathrm{mm}$. Pozycje przekrojów dobrano tak, aby uzyskać sekwencyjny obraz dwuwarstwowej struktury światłowodu – od cięcia stycznego, poprzez przejściowe, aż do cięcia bliskiego płaszczyźnie środkowej włókna.

Na przekrojach skrajnych (Rys. 4-18a, Rys. 4-18b; odpowiednio $-0{,}46$ i $-0{,}22$ mm) pasmo światłowodu widoczne jest jako pojedyncza, wąska linia o obniżonej intensywności. Odpowiada ona cięciu przez zewnętrzną strefę powłoki akrylanowej. Wraz z przesuwaniem płaszczyzny przekroju w głąb światłowodu (Rys. 4-18b, Rys. 4-18e) ujawnia się charakterystyczna dwustrefowość. Widoczne szersze pasmo o niższej intensywności odpowiadające powłoce akrylanowej oraz wewnątrz niego węższe pasmo o wyższej intensywności tzw. cladding kwarcowy. Na przekrojach najbliższych płaszczyźnie środkowej włókna (Rys. 4-18c, Rys. 4-18d) obie warstwy są w pełni rozróżnialne, a ich szerokości pozostają stałe wzdłuż osi pręta.



Rys. 4-18. Przekrój podłużny: (a) pozycja $X = -0{,}46$ mm; (b) pozycja $X = -0{,}41$ mm; (c) pozycja $X = -0{,}36$ mm; (d) pozycja $X = -0{,}32$ mm; (e) pozycja $X = -0{,}27$ mm; (f) pozycja $X = -0{,}22$ mm.

Kontrast pomiędzy claddingiem kwarcowym a powłoką akrylanową wynika z różnicy gęstości i liczb atomowych obu materiałów. Cladding to czysta krzemionka – SiO_2 ($\rho \approx 2{,}20\ \mathrm{g/cm^3}$, $Z_{\text{efektywne}} \sim 10$), powłoka akrylanowa to polimer akrylanowy ($\rho \approx 1{,}20\ \mathrm{g/cm^3}$, $Z_{\text{efektywne}} \sim 6$). W obrazie tomografii skutkuje to wyraźnie wyższą absorpcją krzemionki względem powłoki.

Ponadto na wszystkich sześciu przekrojach obrysy obu warstw światłowodu pozostają prostoliniowe i równoległe do osi pręta, bez widocznych lokalnych odchyleń i zaburzeń ciągłości. Świadczy to o prostoliniowym ułożeniu czujnika wzdłuż badanego odcinka i o zachowaniu integralności obu warstw światłowodu w procesie pultruzji.

Średni tensor orientacji drugiego rzędu, zdefiniowany zgodnie z literaturą [171], wyznaczony dla całej zrekonstruowanej objętości przedstawiono w tabeli 4-2.

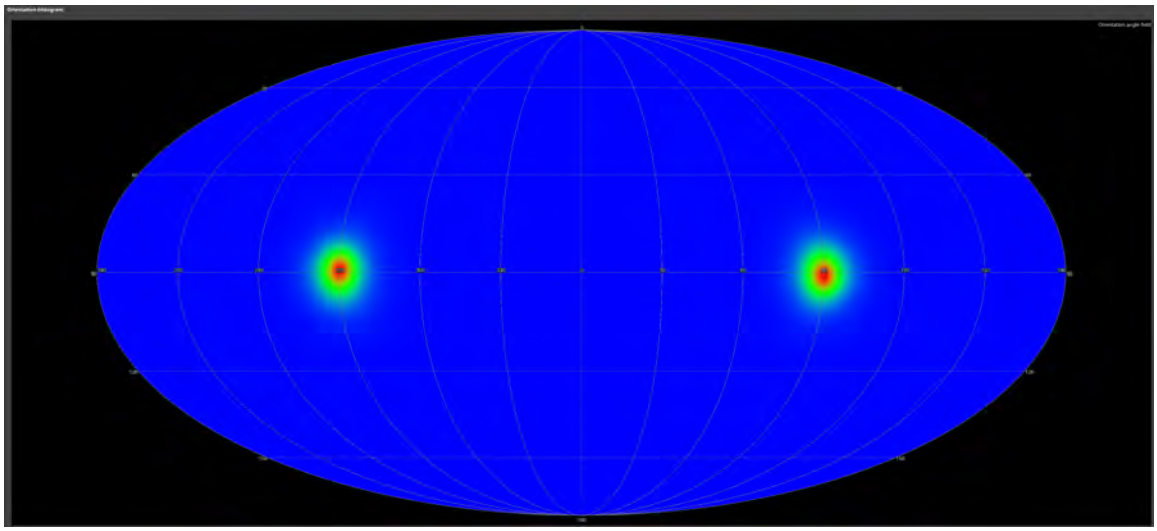
Tablica 4-2. Średni tensor orientacji drugiego rzędu.

	x	y	z
x	0,08	0,00	0,01
y	0,00	0,86	−0,01
z	0,01	−0,01	0,07

Dominująca wartość elementu diagonalnego $a_{yy} = 0{,}86$ wskazuje na silną preferencyjną orientację włókien wzdłuż osi Y, odpowiadającej osi pręta. Znacznie mniejsze wartości $a_{xx} = 0{,}08$ i $a_{zz} = 0{,}07$ świadczą o niewielkim udziale orientacji w kierunkach poprzecznych. Elementy pozadiagonalne, których wartości są bliskie zeru, wskazują, że przyjęte osie układu współrzędnych są zbliżone do głównych kierunków orientacji. Uzyskany tensor opisuje zatem silnie anizotropowy, w przybliżeniu jednoosiowy rozkład orientacji włókien [172].

Histogram sferyczny (Rysunek 4-19) wykazuje dwa wąskie, antypodalne maksima w pozycjach $(\varphi \approx 90°, \theta \approx 90°)$ oraz $(\varphi \approx 270°, \theta \approx 90°)$.

Pojawienie się dwóch maksimów wynika bezpośrednio z reprezentacji kierunku jako osi, a nie wektora. Z tego względu tej samej orientacji przestrzennej odpowiadają na sferze dwa punkty antypodalne. Niewielkie rozmycie kątowe obu pików potwierdza wysoką jednorodność ułożenia włókien w całej objętości próbki.



Rys. 4-19. Sferyczny histogram orientacji zbrojenia szklanego w analizowanym obszarze pręta OS, przedstawiony w odwzorowaniu Mollweidego. Dwa antypodalne maksima odpowiadają tej samej dominującej orientacji zbrojenia, zgodnej z osią podłużną pręta.

Udział objętościowy fazy włóknistej w pręcie kompozytowym wynosi $64{,}33\ \%$, przy udziale osnowy epoksydowej $35{,}67\ \%$. Teoretyczna gęstość kompozytu obliczona z reguły mieszanin wynosi $\rho = 0{,}6433 \cdot 2{,}55 + 0{,}3567 \cdot 1{,}20 \approx 2{,}07\ \mathrm{g/cm^3}$, co jest spójne z gęstością zmierzoną doświadczalnie dla badanego pręta w zakresie $1{,}9$–$2{,}1\ \mathrm{g/cm^3}$.

Kąt nawijania owijki bazaltowej zmierzono w trzech niezależnych lokalizacjach wzdłuż badanego odcinka pręta. Wartości pomiarów oraz statystyki zestawiono w Tabeli 4-3:

Tablica 4-3. Zestawienie kątu nawijania owijki bazaltowej wraz z obliczonym odchyleniem standardowym.

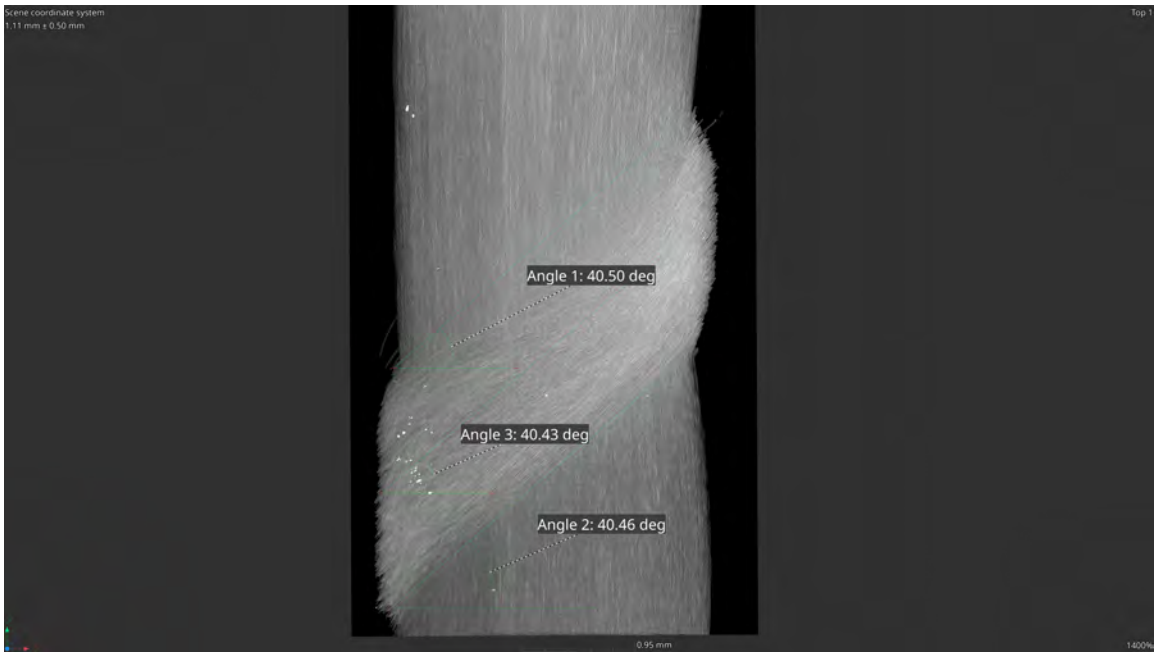
Pomiar	**Wartość**
Angle 1	$40{,}50°$
Angle 2	$40{,}46°$
Angle 3	$40{,}43°$
Średnia arytmetyczna	$40{,}46°$
Odchylenie standardowe ($n-1$)	$0{,}035°$
Rozstęp	$0{,}07°$

Średnia arytmetyczna z trzech pomiarów wynosi $40{,}46°$, odchylenie standardowe (estymator $n-1$) – $0{,}035°$, rozstęp – $0{,}07°$. Tak niewielka wariancja w trzech lokalizacjach wskazuje na wysoką lokalną powtarzalność procesu nawijania w obrębie badanego odcinka. Stwierdzenie o stałości kąta na całej długości pręta wymagałoby pomiaru w większej liczbie reprezentatywnych lokalizacji.

Średni kąt nawijania owijki wynosi $40{,}46°$ względem osi podłużnej pręta, co w oprogramowaniu VGStudio pozwala na bezpośrednie oszacowanie skoku helisy. Przy średnicy zewnętrznej profilu $D \approx 3\ \mathrm{mm}$ i kącie α skok ten wyznacza się z zależności:

$$p = \frac{\pi \cdot D}{\tan(\alpha)} \approx \frac{9{,}42}{\tan(40{,}46°)} \approx 11{,}0\ \mathrm{mm} \tag{4-1}$$

Regularny skok helisy zapewnia jednorodność właściwości poprzecznych pręta. Przekłada się to również na wyższą odporność powierzchniową kompozytu na uszkodzenia kontaktowe [173].



Rys. 4-20. Pomiar kąta nawijania owijki bazaltowej w trzech niezależnych lokalizacjach wzdłuż pręta.

W badanych przekrojach i rekonstrukcjach 3D analizowanego odcinka pręta stwierdzono zachowanie podstawowej architektury rdzenia GFRP. Nie zaobserwowano rozległych pęknięć, delaminacji oraz dużych obszarów nieprzesyconego zbrojenia. Obraz tomograficzny wskazywał na zasadniczo ciągły rozkład osnowy, jednak zastosowana rozdzielczość nie pozwalała na ocenę otoczenia każdego pojedynczego włókna oraz na wykluczenie lokalnej porowatości. Wyniki były zasadniczo zgodne z wcześniejszymi obserwacjami wykonanymi za pomocą mikroskopii optycznej, a jednocześnie ujawniły lokalne nieregularności opisane w dalszej części.

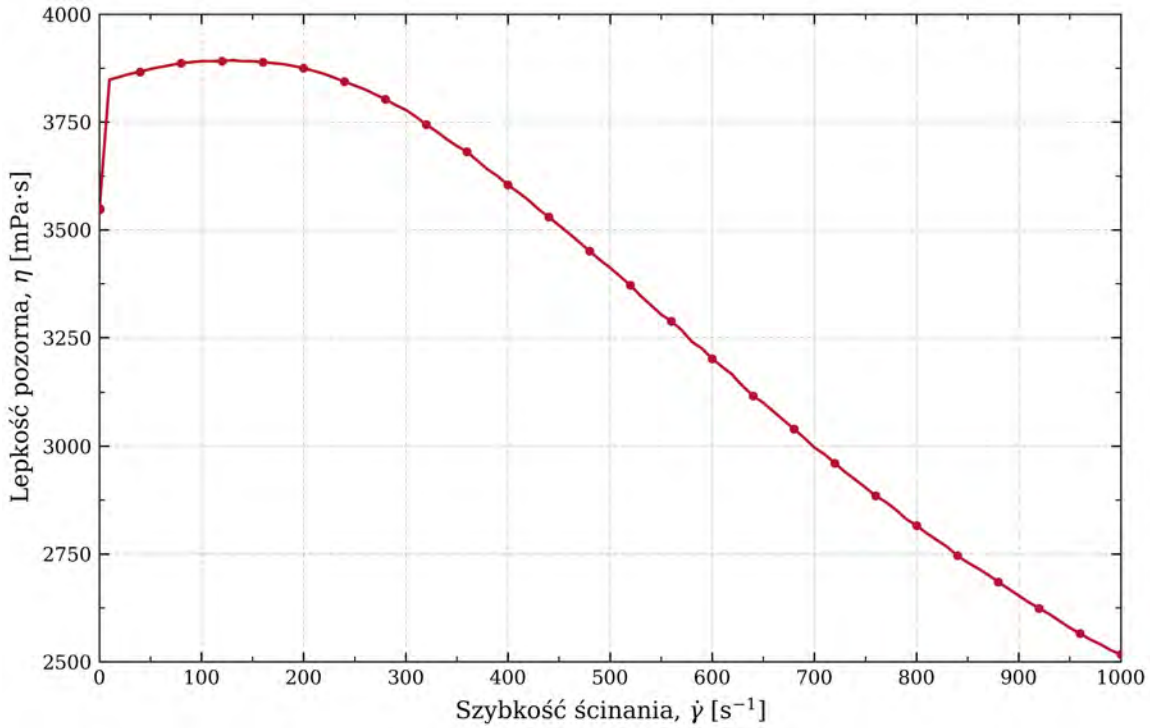
Mimo ogólnej spójności matrycy, w skanach tomografem zaobserwowano kilka lokalnych anomalii, których jednoznaczna interpretacja wymaga dalszych badań. Pierwszą z nich jest punktowe zaburzenie orientacji w obrębie oplotu bazaltowego, widoczne na mapie kierunkowości jako skupisko włókien odbiegających od głównego nurtu helisy. Może to świadczyć o miejscowym zerwaniu lub skrzyżowaniu się sąsiednich wiązek oplotu. Kolejny niuans to rozproszone, ciemne punkty w strukturze samego rdzenia GFRP (widoczne m.in. na przekroju (Rysunek 4-17)). Na tym etapie trudno jednoznacznie rozstrzygnąć, czy mamy do czynienia z rzeczywistymi mikroporami osnowy, czy jedynie z szumem i artefaktami rekonstrukcji obrazu.

W analizowanym odcinku żadna z zaobserwowanych anomalii nie tworzyła rozległej i ciągłej strefy nieciągłości. Cechy te odnotowano jednak w dokumentacji jakościowej próbki. Jednoznaczna ocena ich charakteru, w szczególności potwierdzenie występowania mikroporowatości, wymagałaby przeprowadzenia dodatkowej analizy ilościowej.

4.2. Analiza reologiczna osnowy

4.2.1. Wyniki badań reologicznych systemu epoksydowego

Zależność lepkości pozornej badanej kompozycji żywicznej od szybkości ścinania w temperaturze $25\ C$ przedstawiono na rys. 4-21.



Rys. 4-21. Lepkość pozorna kompozycji żywicznej w funkcji szybkości ścinania w temperaturze $25\ C$.

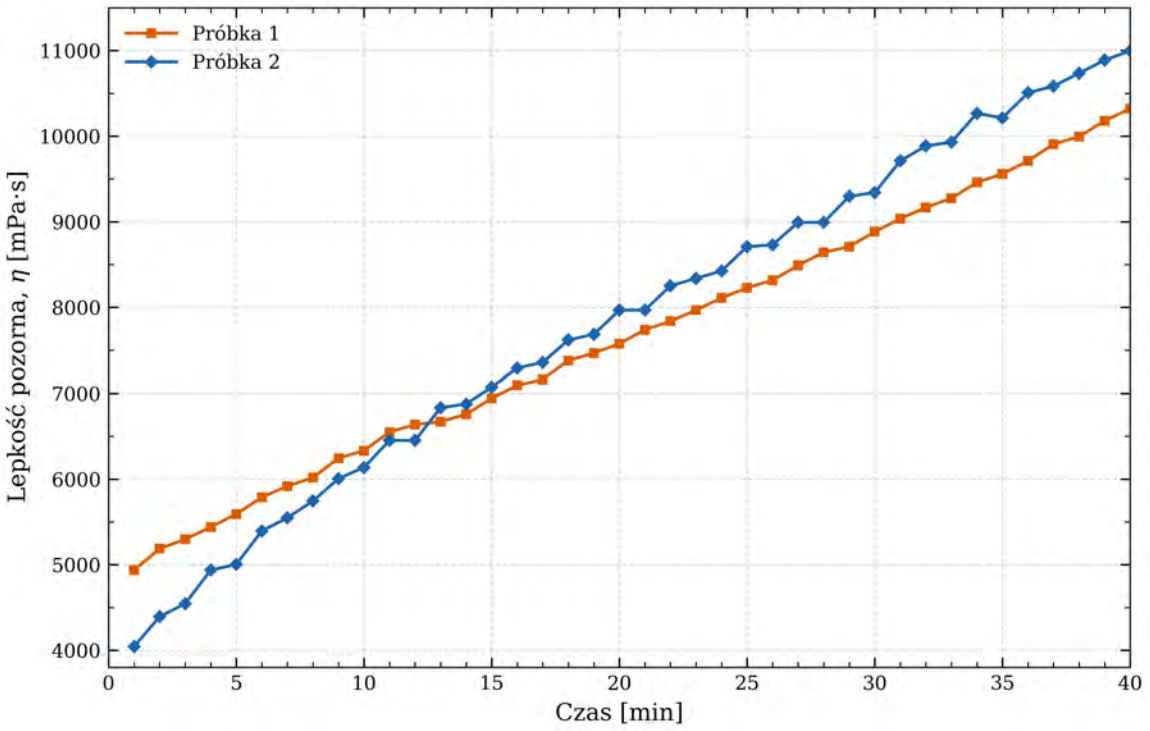
W początkowej części badanego zakresu lepkość pozorna wzrosła z około $3550\ \mathrm{mPa \cdot s}$ do wartości maksymalnej wynoszącej około $3890\ \mathrm{mPa \cdot s}$. Maksimum wystąpiło przy szybkości ścinania wynoszącej około $130\ \mathrm{s^{-1}}$. Dalszemu zwiększaniu szybkości ścinania towarzyszył systematyczny spadek lepkości. Przy $\dot{\gamma} = 1000\ \mathrm{s^{-1}}$ wynosiła ona około $2520\ \mathrm{mPa \cdot s}$, czyli była o około $35\ \%$ mniejsza od wartości maksymalnej.

Przebieg nie był zatem monotoniczny w całym badanym zakresie. Wyraźne rozrzedzanie ścinaniem obserwowano po przekroczeniu szybkości odpowiadającej maksimum lepkości. Początkowego wzrostu nie interpretowano jako jednoznacznego potwierdzenia zagęszczania ścinaniem. Pomiaru nie powtarzano, a w początkowej części krzywej na wynik mogły wpływać warunki stabilizacji próbki i układu pomiarowego.

Spadek lepkości w zakresie większych szybkości ścinania wskazuje, że intensywniejszemu ścinaniu kompozycji towarzyszyło zmniejszenie jej oporu przepływu. Zjawisko to może ułatwiać przepływ żywicy pomiędzy włóknami, jednak pomiar reometryczny nie odwzorowywał bezpośrednio warunków impregnacji rovingów w układzie pultruzyjnym. Ze względu na pojedynczy przebieg nie dopasowywano modelu reologicznego oraz nie wyznaczano parametrów równania potęgowego.

Do dalszych pomiarów przyjęto szybkość ścinania równą $1\ \mathrm{s}^{-1}$. Wartość ta znajdowała się w dolnej części badanego zakresu i odpowiadała warunkom łagodnego ścinania kompozycji. Pozwalało to obserwować zmiany lepkości zachodzące w czasie bez dodatkowego, znacznego zmniejszania jej wartości wskutek intensywnego ścinania.

Zmianę lepkości pozornej podczas przetrzymywania kompozycji w temperaturze $40\ C$ przedstawiono na rys. 4-22. Pomiar wykonano dla dwóch próbek przy stałej szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$.



Rys. 4-22. Zmiana lepkości pozornej dwóch próbek kompozycji żywicznej w czasie 40 min w temperaturze $40\ C$, przy stałej szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$. Punkty pomiarowe rejestrowano co 60 s.

W obu próbkach lepkość wzrastała przez cały czas pomiaru. Dla próbki 1 wartość początkowa wynosiła około $4900\ \mathrm{mPa \cdot s}$, a po 40 min osiągnęła około $10\,300\ \mathrm{mPa \cdot s}$. Oznacza to ponad dwukrotny wzrost lepkości. W przypadku próbki 2 lepkość zwiększyła się z około 4000 do $11\,000\ \mathrm{mPa \cdot s}$, czyli wzrosła około 2,7-krotnie.

Próbki różniły się początkową wartością lepkości. W pierwszych minutach większą wartość uzyskano dla próbki 1, natomiast po około 12–14 min przebiegi zbliżyły się do siebie i przecięły. W dalszej części pomiaru lepkość próbki 2 była nieco większa. Pomimo tej różnicy obie krzywe wykazywały podobny, monotoniczny kierunek zmian. Potwierdza to, że wzrost lepkości w czasie był cechą wspólną obu pomiarów, chociaż jego szybkość nie była jednakowa.

W czasie 40 min nie zarejestrowano gwałtownego wzrostu lepkości ani utraty możliwości dalszego prowadzenia pomiaru. Na podstawie zastosowanej procedury nie można było jednak określić, czy i w którym momencie osiągnięty został punkt żelowania. Jednocześnie lepkość nie ustabilizowała się i pod koniec pomiaru nadal wzrastała. Na podstawie uzyskanych krzywych nie wyznaczano zatem czasu żelowania oraz jednoznacznego czasu przydatności technologicznej

kompozycji.

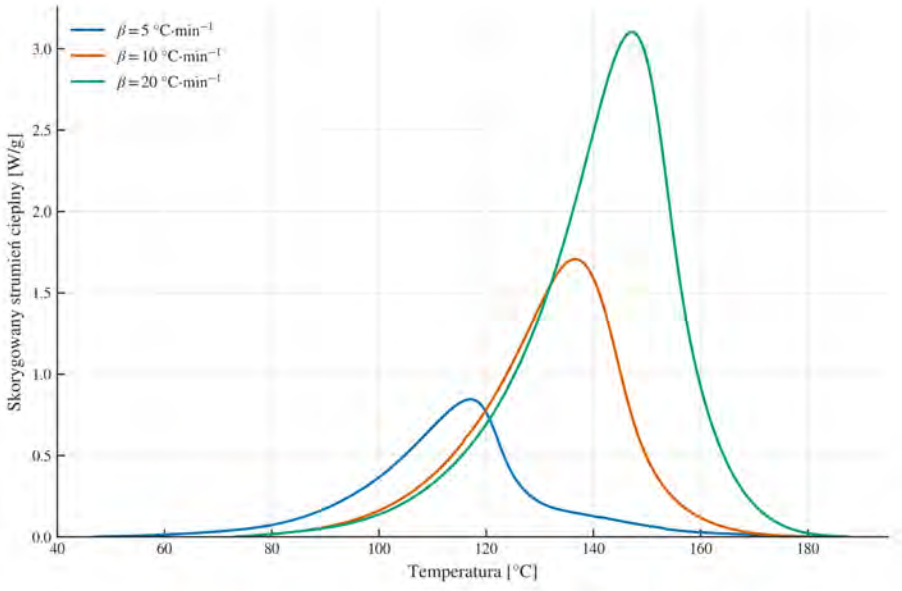
Wyniki pokazują, że w temperaturze $40\ C$ kompozycja nie zachowywała stałej lepkości podczas przetrzymywania. Postępujący wzrost lepkości mógł utrudniać jej podawanie oraz impregnację zbrojenia, jeżeli czas pomiędzy przygotowaniem mieszaniny i wprowadzeniem jej do układu pultruzyjnego był zbyt długi. Z punktu widzenia prowadzenia procesu korzystne było zatem ograniczenie czasu przetrzymywania przygotowanej kompozycji oraz zachowanie możliwie stałego czasu jej podawania w kolejnych cyklach produkcyjnych.

Badanie prowadzono tylko w jednej temperaturze i przy jednej stałej szybkości ścinania, dlatego nie pozwala ono określić wpływu temperatury na tempo wzrostu lepkości oraz wyznaczenie uniwersalnego czasu przetwarzania. Nie przyjęto również granicznej wartości lepkości, powyżej której impregnację należałoby uznać za niewystarczającą. Wyniki stanowią zatem charakterystykę zachowania kompozycji w przyjętych warunkach pomiarowych, a nie bezpośrednie wyznaczenie dopuszczalnego czasu jej przebywania w układzie produkcyjnym.

4.3. Analiza DSC

4.3.1. Dynamiczne sieciowanie nieutwardzonej kompozycji żywicznej

Na rys. 4-23 przedstawiono krzywe strumienia cieplnego skorygowane względem linii bazowej i znormalizowane względem masy próbki. Dla wszystkich zastosowanych szybkości ogrzewania zarejestrowano pojedynczy, szeroki efekt egzotermiczny związany z reakcją sieciowania kompozycji żywicznej. W zakresie rozdzielczości przeprowadzonych pomiarów nie obserwowano rozdzielenia egzotermy na odrębne maksima. Obserwacja ta nie przesądza jednak o przebiegu reakcji według pojedynczego mechanizmu chemicznego.



Rys. 4-23. Strumień cieplny nieutwardzonej kompozycji żywicznej, skorygowany względem linii bazowej i znormalizowany względem masy próbki, podczas ogrzewania z szybkościami 5, 10 i 20 °C·min^{-1}. Przebiegów nie wygładzano oraz nie uśredniano.

Parametry charakterystyczne zarejestrowanych efektów egzotermicznych zestawiono w tab. 4-4.

Tablica 4-4. Parametry dynamicznej reakcji sieciowania nieutwardzonej kompozycji żywicznej.

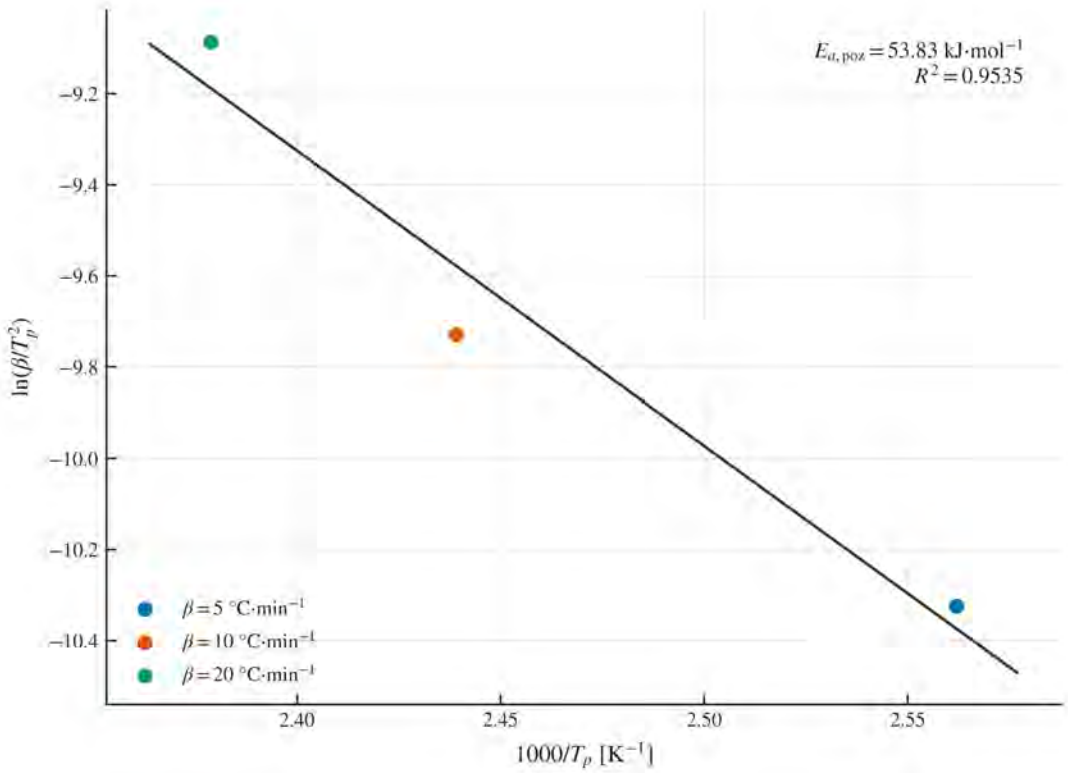
β [°C · min^{-1}]	m [mg]	ΔH [J·g^{-1}]	T_{onset} [°C]	T_p [°C]	T_{endset} [°C]	FWHM [°C]
5	6,6	301,51	90,19	117,17	128,89	22,18
10	3,6	301,45	109,72	136,84	152,43	24,91
20	2,6	272,94	120,53	147,23	162,16	24,21

Wraz ze zwiększeniem szybkości ogrzewania wszystkie temperatury charakterystyczne przesuwały się w kierunku wyższych wartości. Pomiędzy pomiarami wykonanymi przy 5 i 20 °C·min^{-1} temperatura ekstrapolowanego początku reakcji wzrosła o 30,34 °C, temperatura maksimum egzotermy o 30,06 °C, natomiast temperatura ekstrapolowanego końca reakcji o 33,27 °C. Wynika to z krótszego czasu przebywania próbki w kolejnych przedziałach temperatury podczas szybszego ogrzewania, wskutek czego porównywalne zaawansowanie reakcji osiągane było przy wyższej temperaturze.

Szerokość połówkowa piku mieściła się w zakresie od 22,18 do 24,91 °C i nie wykazywała monotonicznej zależności od szybkości ogrzewania. Zwiększeniu β towarzyszyło zatem przede wszystkim przesunięcie efektu egzotermicznego, bez jednoznacznego trendu zmiany jego szerokości.

Wartości entalpii uzyskane przy szybkościach 5 i 10 °C·min^{-1} były praktycznie jednakowe i wyniosły odpowiednio 301,51 i 301,45 J·g^{-1}. Dla szybkości 20 °C·min^{-1} otrzymano 272,94 J·g^{-1}, czyli o 9,47 % mniej niż średnia z dwóch pozostałych pomiarów. Końcowa część przebiegu powróciła do linii bazowej przed osiągnięciem prawej granicy całkowania, dlatego nie stwierdzono bezpośrednich oznak obcięcia egzotermy. Przy dostępnej liczbie pomiarów nie można jednak jednoznacznie wskazać przyczyny niższej wartości ΔH uzyskanej przy największej szybkości ogrzewania.

Zależność Kissingera wyznaczoną na podstawie temperatur maksimum egzotermy zarejestrowanych przy szybkościach ogrzewania 5, 10 i 20 °C·min^{-1} przedstawiono na rys. 4-24. Na wykresie zastosowano temperaturę T_p wyrażoną w kelwinach.



Rys. 4-24. Zależność Kissingera wyznaczona na podstawie temperatur maksimum egzotermy T_p zarejestrowanych przy szybkościach ogrzewania 5, 10 i 20 °C·min^{-1}. Punkty oznaczają wartości doświadczalne, natomiast linia przedstawia wynik regresji liniowej.

Otrzymaną zależność liniową opisuje równanie:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = 6{,}2143 - \frac{6474{,}84}{T_p}. \tag{4-2}$$

Współczynnik determinacji regresji wyniósł $R^2 = 0{,}9535$. Na podstawie nachylenia prostej wyznaczono pozorną energię aktywacji reakcji:

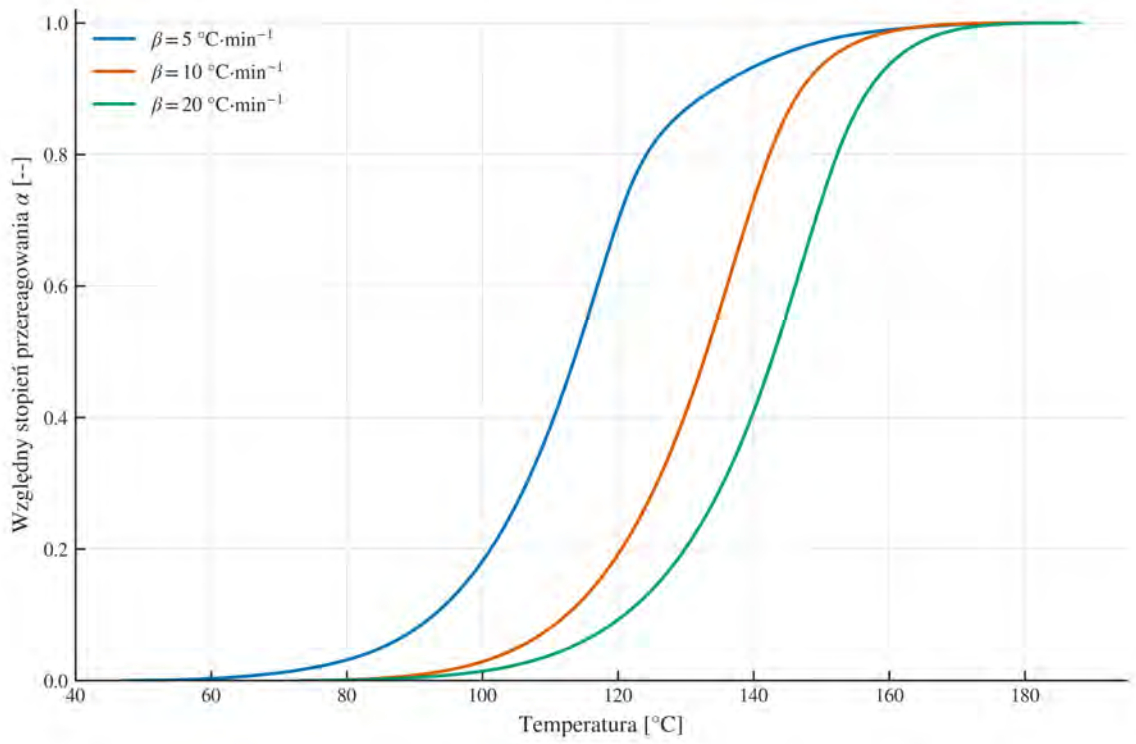
$$E_{a,\mathrm{poz}} = 53{,}83\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1}. \tag{4-3}$$

Otrzymana wartość opisuje uśrednioną zależność położenia maksimum egzotermy od szybkości ogrzewania. Regresję wyznaczono na podstawie trzech punktów pomiarowych, a punkt odpowiadający szybkości 10 °C·min^{-1} wykazywał widoczne odchylenie od prostej. Z tego względu wartość $E_{a,\mathrm{poz}}$ traktowano jako orientacyjny parametr charakteryzujący badaną reakcję, a nie jako dokładnie wyznaczoną energię aktywacji pojedynczego etapu chemicznego.

Analiza Kissingera nie pozwala w tym przypadku określić szczegółowego mechanizmu sieciowania, rzędu reakcji i zmian energii aktywacji wraz ze stopniem przereagowania. Uzyskany parametr może natomiast służyć do ogólnej oceny wrażliwości położenia egzotermy na zmianę szybkości ogrzewania oraz do porównania badanego układu w ramach zastosowanej procedury pomiarowej.

Krzywe względnego stopnia przereagowania $\alpha(T)$, wyznaczone przez całkowanie sko-

rygowanego strumienia cieplnego, przedstawiono na rys. 4-25. Każdą krzywą znormalizowano względem całkowitej entalpii zarejestrowanej podczas odpowiadającego jej pomiaru dynamicznego.



Rys. 4-25. Względny stopień przereagowania α nieutwardzonej kompozycji żywicznej w funkcji temperatury podczas ogrzewania z szybkościami 5, 10 i 20 °C·min^{-1}. Każdą krzywą znormalizowano względem całkowitej entalpii reakcji zarejestrowanej podczas danego pomiaru.

Temperatury odpowiadające wybranym wartościom względnego stopnia przereagowania oraz wartości α_p osiągnięte w temperaturze maksimum egzotermy zestawiono w tab. 4-5.

Tablica 4-5. Temperatury odpowiadające wybranym wartościom względnego stopnia przereagowania oraz wartości α_p osiągnięte w temperaturze maksimum egzotermy.

β [°C · min^{-1}]	$T_{\alpha=0,1}$ [°C]	$T_{\alpha=0,5}$ [°C]	$T_{\alpha=0,9}$ [°C]	α_p [-]
5	92,89	113,92	134,26	0,607
10	112,44	133,07	147,11	0,626
20	120,97	143,09	157,09	0,637

Wzrostowi szybkości ogrzewania towarzyszyło przesunięcie całych krzywych $\alpha(T)$ w kierunku wyższych temperatur. Pomiędzy pomiarami wykonanymi przy 5 i 20 °C·min^{-1} temperatura odpowiadająca $\alpha = 0,1$ wzrosła o 28,08 °C, dla $\alpha = 0,5$ różnica wyniosła 29,17 °C, natomiast dla $\alpha = 0,9$ osiągnęła 22,82 °C. Oznacza to, że przy większej szybkości ogrzewania porównywalny względny stopień zaawansowania reakcji był osiągany przy wyższej temperaturze.

Wartość α_p wzrosła od 0,607 przy szybkości 5 °C·min^{-1} do 0,637 przy 20 °C·min^{-1}. Zmiana była niewielka, a maksimum egzotermy występowało we wszystkich pomiarach po przekroczeniu około 60 % całkowitego efektu cieplnego zarejestrowanego podczas danego przebiegu. Parametr ten opisuje położenie maksimum na krzywej względnego postępu reakcji, lecz samodzielnie nie stanowi podstawy do określenia mechanizmu kinetycznego sieciowania.

Ponieważ każdą krzywą $\alpha(T)$ normalizowano względem jej własnej wartości ΔH, przedstawione zależności opisują względny przebieg reakcji w poszczególnych pomiarach. Nie służą natomiast do bezpośredniego porównania bezwzględnej ilości ciepła wydzielonego przy różnych szybkościach ogrzewania.

4.3.2. Pomiary izotermiczne

Wyniki pomiarów izotermicznych wskazywały na wyraźne skrócenie czasu trwania rejestrowanego efektu egzotermicznego wraz ze wzrostem temperatury. Orientacyjne czasy zaniku egzotermy zestawiono w tab. 4-6.

Tablica 4-6. Orientacyjny czas zaniku efektu egzotermicznego podczas izotermicznego sieciowania kompozycji żywicznej.

Temperatura izotermy (C)	Orientacyjny czas zaniku egzotermy (min)
140	około 4,0
160	około 1,0
180	około 0,8

W temperaturze 140 C efekt egzotermiczny zanikał po około 4 min. Zwiększenie temperatury do 160 C skróciło ten czas do około 1 min, natomiast w temperaturze 180 C zanik egzotermy obserwowano po około 0,8 min. W badanym zakresie temperatur czas trwania rejestrowanego efektu cieplnego zmniejszył się zatem około pięciokrotnie.

Największą zmianę zaobserwowano pomiędzy 140 i 160 C. Różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi przy 160 i 180 C wynosiła natomiast około 0,2 min, czyli 12 s. Ze względu na szybki przebieg reakcji oraz możliwość nakładania się jej początkowej części na stan nieustalony układu pomiarowego różnicy tej nie należy interpretować jako dokładnie wyznaczonej zmiany czasu pełnego sieciowania. Wyniki wskazują przede wszystkim, że w temperaturach 160 i 180 C efekt egzotermiczny zanikał znacznie szybciej niż w temperaturze 140 C.

Wyznaczone wartości stanowiły orientacyjny punkt odniesienia przy ocenie cieplnych warunków prowadzenia procesu pultruzji. Nie były one jednak bezpośrednio utożsamiane z wymaganym czasem przebywania materiału w dyszy, ponieważ pomiar DSC nie odwzorowywał przepływu kompozycji, gradientu temperatury w przekroju pręta oraz wymiany ciepła pomiędzy materiałem i ścianami układu formującego.

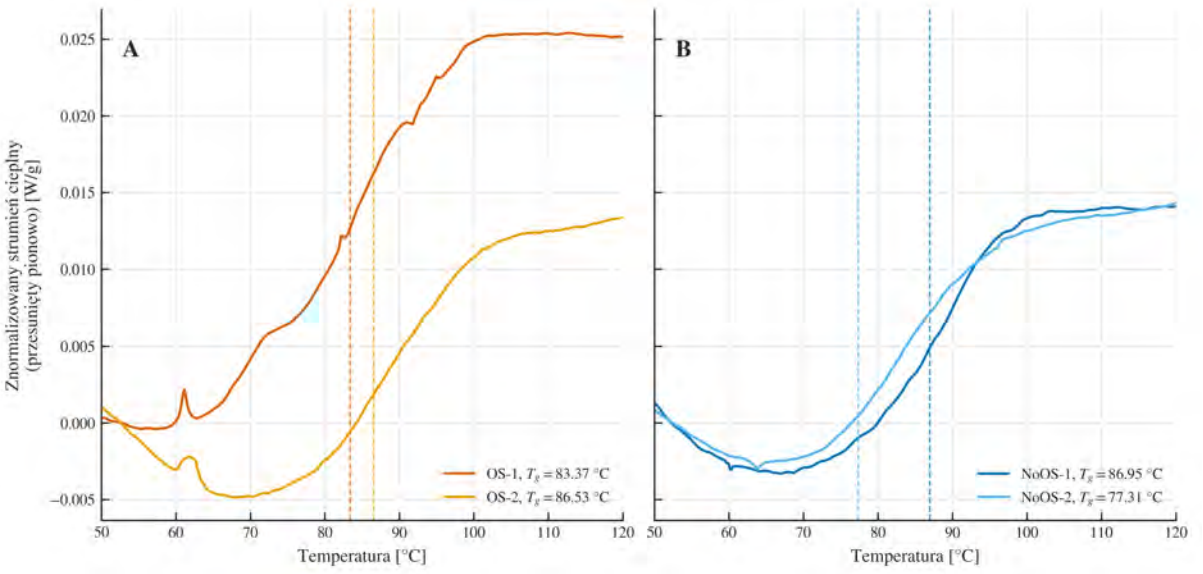
4.3.3. Charakterystyka utwardzonych prętów kompozytowych

Dla wszystkich próbek pobranych z utwardzonych prętów zarejestrowano zmianę skokową strumienia cieplnego odpowiadającą przemianie szklistej osnowy. Indywidualne wartości temperatury zeszklenia, wyznaczono zgodnie z procedurą *Midpoint ISO* i zestawiono w tab. 4-7.

Tablica 4-7. Temperatury charakterystyczne przemiany szklistej osnowy w próbkach prętów OS i NoOS.

Seria	Próbka	Masa [mg]	T_{onset} [C]	T_g *Midpoint ISO* [C]	T_{endpoint} [C]
OS	OS-1	9,0	60,30	83,37	97,50
OS	OS-2	6,0	77,66	86,53	97,26
NoOS	NoOS-1	7,0	79,33	86,95	96,01
NoOS	NoOS-2	8,0	69,81	77,31	89,37

Krzywe DSC w zakresie przemiany szklistej przedstawiono na rys. 4-26. W celu porównania kształtu przemiany strumień cieplny znormalizowano względem masy próbki, a każdą krzywą przesunięto pionowo o stałą wartość, przyjmując średni poziom sygnału w zakresie 50–55 C jako poziom odniesienia. Operacja ta nie zmieniała temperatury i kształtu zarejestrowanych przemian.



Rys. 4-26. Krzywe DSC próbek utwardzonych prętów w zakresie przemiany szklistej: A – próbki OS, B – próbki NoOS. Linie przerywane oznaczają wartości T_g wyznaczone metodą *Midpoint ISO*. Krzywe znormalizowano względem masy i przesunięto pionowo do wspólnego poziomu odniesienia; nie stosowano wygładzania.

Wartości T_g próbek OS wynosiły $83{,}37$ i $86{,}53$ C. Ich średnia opisowa była równa $84{,}95$ C, a zakres wyników wynosił $3{,}16$ C. Dla próbek NoOS uzyskano wartości $86{,}95$ i $77{,}31$ C, co odpowiadało średniej $82{,}13$ C i zakresowi $9{,}64$ C. Różnica średnich obliczona w kolejności OS–NoOS wyniosła $2{,}82$ C.

Zakresy wartości uzyskanych dla obu serii częściowo się pokrywały. Najwyższą wartość T_g odnotowano dla próbki NoOS-1, natomiast najniższą dla NoOS-2. Ze względu na dwa pomiary w każdej serii porównanie miało charakter opisowy i nie stanowiło podstawy do wnioskowania statystycznego o różnicy wartości T_g pomiędzy OS i NoOS.

W części próbek powyżej zakresu przemiany szklistej zarejestrowano niewielkie efekty egzotermiczne, interpretowane jako resztkowa reakcja osnowy. Ich parametry przedstawiono w tab. 4-8.

Tablica 4-8. Parametry resztkowych efektów egzotermicznych zarejestrowanych w próbkach utwardzonych prętów.

Seria	Próbka	$T_{\mathrm{onset,res}}$ [C]	$T_{p,\mathrm{res}}$ [C]	$T_{\mathrm{endset,res}}$ [C]	ΔH_{res} [J · g^{-1} kompozytu]
OS	OS-1	150,89	174,58	205,06	0,63
OS	OS-2	–	–	–	–
NoOS	NoOS-1	171,04	172,43	172,68	0,20
NoOS	NoOS-2	155,95	175,08	191,15	0,23

Dla próbki OS-1 resztkowa entalpia reakcji wyniosła $0{,}63\ \mathrm{J \cdot g^{-1}}$ kompozytu. W przypadku próbki OS-2 nie wyodrębniono resztkowego efektu egzotermicznego umożliwiającego jego ilościowe całkowanie. Dla próbek NoOS-1 i NoOS-2 uzyskano odpowiednio $0{,}20$ i $0{,}23\ \mathrm{J \cdot g^{-1}}$ kompozytu.

Wartości ΔH_{res} były niewielkie, lecz ich rozkład nie wykazywał jednoznacznego układu zależnego od serii. Największą wartość uzyskano dla próbki OS-1, podczas gdy w drugiej próbce OS nie wyodrębniono efektu resztkowego. W obu próbkach NoOS zarejestrowano efekty o zbliżonej, mniejszej entalpii. Przy dostępnej liczbie pomiarów nie można rozstrzygnąć, czy różnice te odzwierciedlały zmienność lokalnego stanu osnowy, czy były związane z obecnością światłowodu.

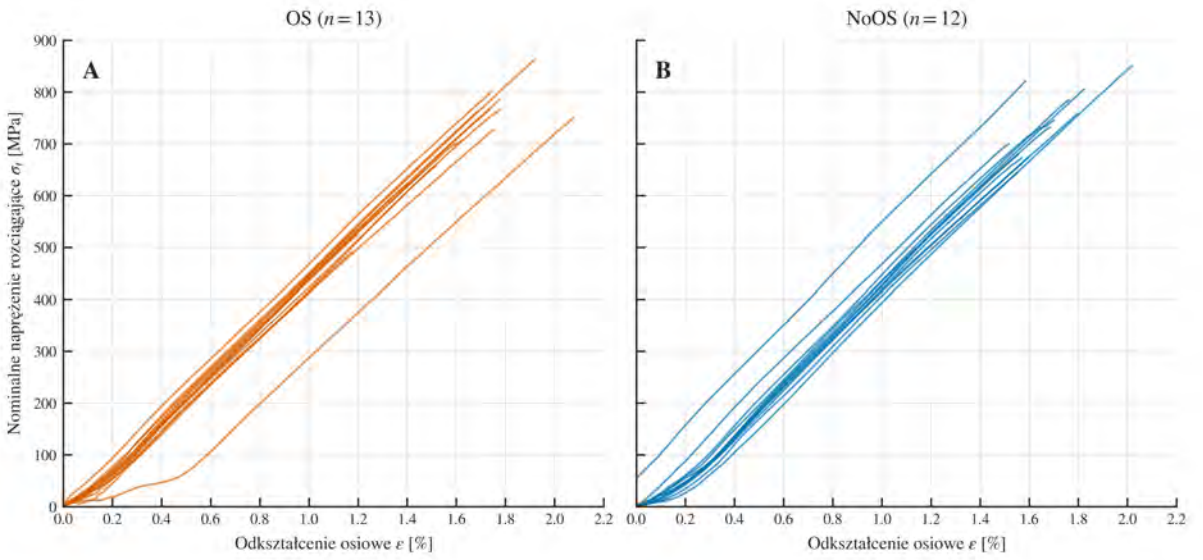
Wartości ΔH_{res} odnosiły się do całkowitej masy próbek kompozytowych, dlatego nie przeliczano ich na procentowy stopień przereagowania osnowy. Zarejestrowane efekty powyżej około $320\ \mathrm{C}$ nie były interpretowane jako temperatura degradacji, ponieważ pomiary DSC nie dostarczały informacji o zmianie masy próbek.

4.4. Porównawcze wyniki badań mechanicznych prętów GFRP

4.4.1. Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu

Na rys. 4-27 przedstawiono przebiegi nominalnego naprężenia rozciągającego w funkcji odkształcenia osiowego dla prętów OS i NoOS. W celu zachowania czytelności każdą krzywą ograniczono do pierwszego osiągnięcia maksymalnego naprężenia $\sigma_{t,M}$. Nie stosowano wygładzania oraz uśredniania przebiegów.

W obu seriach, po początkowym odcinku o zmiennej krzywiźnie, obserwowano przebieg



Rys. 4-27. Przebiegi nominalnego naprężenia rozciągającego w funkcji odkształcenia osiowego: A – pręty ze zintegrowanym światłowodem OS ($n = 13$), B – pręty referencyjne NoOS ($n = 12$). Krzywe ograniczono do pierwszego osiągnięcia maksymalnego naprężenia $\sigma_{t,M}$.

zbliżony do liniowego aż do osiągnięcia maksymalnego naprężenia. Nie występował wyraźny zakres uplastycznienia poprzedzający zniszczenie. Taki charakter odpowiedzi jest zgodny z dominującym udziałem jednokierunkowego zbrojenia szklanego w przenoszeniu obciążenia osiowego.

W serii OS maksymalne nominalne naprężenie rozciągające mieściło się w zakresie od $491{,}63$ do $862{,}85\ \mathrm{MPa}$. W serii NoOS zakres ten był węższy i wynosił od $643{,}47$ do $850{,}07\ \mathrm{MPa}$. Krzywe próbek OS wykazywały większe zróżnicowanie położenia punktu maksymalnego. Szczególnie widoczne są dwa przebiegi OS zakończone przy naprężeniu około $500\ \mathrm{MPa}$. Sama obserwacja krzywych nie pozwala jednak rozstrzygnąć, czy niższe wartości były związane z obecnością światłowodu, lokalną niejednorodnością pręta czy warunkami zniszczenia próbki.

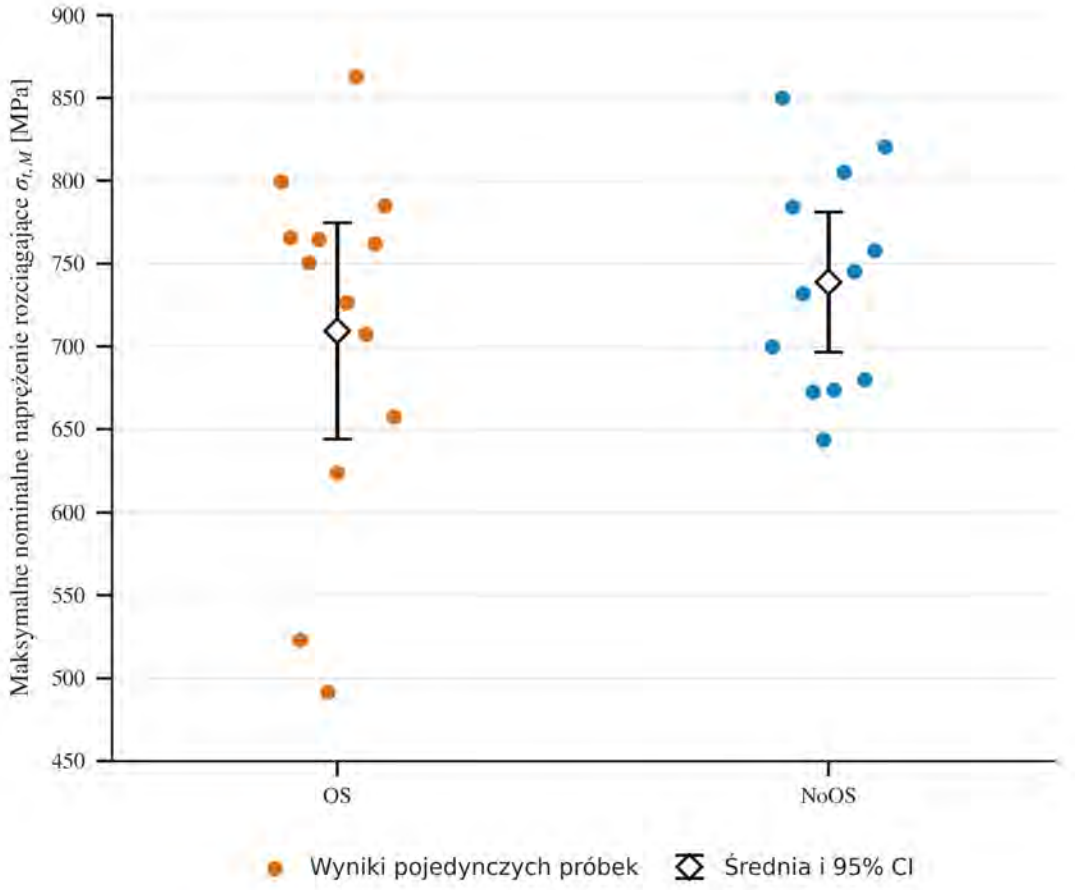
Zakresy przebiegów obu serii w znacznym stopniu się pokrywały. Na podstawie jakościowej oceny krzywych nie można wskazać odrębnego mechanizmu odpowiedzi prętów OS. Nie jest również możliwe przypisanie obecności światłowodu jednoznacznej zmiany zachowania podczas rozciągania. Ocena różnic wymaga porównania wartości $\sigma_{t,M}$ oraz E_t.

Parametrem przyjętym do porównania serii OS i NoOS było maksymalne nominalne naprężenie rozciągające $\sigma_{t,M}$. Zestawienie statystyk opisowych przedstawiono w tab. 4-9.

Tablica 4-9. Statystyki opisowe maksymalnego nominalnego naprężenia rozciągającego $\sigma_{t,M}$ prętów OS i NoOS.

Seria	n	Średnia [MPa]	s [MPa]	CV [%]	95 % CI [MPa]	Min.–maks. [MPa]
OS	13	709,24	108,20	15,26	643,86–774,62	491,63–862,85
NoOS	12	738,66	66,51	9,00	696,40–780,92	643,47–850,07

Rozkład indywidualnych wartości $\sigma_{t,M}$ wraz ze średnimi i 95 % przedziałami ufności przedstawiono na rys. 4-28.



Rys. 4-28. Porównanie maksymalnego nominalnego naprężenia rozciągającego $\sigma_{t,M}$ prętów OS i NoOS. Punkty oznaczają wyniki pojedynczych próbek, romby – średnie arytmetyczne, a pionowe odcinki – 95 % przedziały ufności dla średnich.

Średnia wartość $\sigma_{t,M}$ wyniosła $709{,}24\ \mathrm{MPa}$ dla prętów OS oraz $738{,}66\ \mathrm{MPa}$ dla NoOS, co odpowiada wartości niższej o $3{,}98\ \%$ względem średniej serii referencyjnej.

Test t Welcha nie wykazał istotnej statystycznie różnicy pomiędzy seriami ($t = -0{,}826$, $df = 20{,}15$, $p = 0{,}4186$). Wyznaczony dla różnicy średnich 95 % przedział ufności rozciągał się od $-103{,}69$ do $44{,}86\ \mathrm{MPa}$ i obejmował zero. Współczynnik g Hedgesa wyniósł $-0{,}31$.

Większe zróżnicowanie wyników występowało w serii OS. Współczynnik zmienności osiągnął w tej serii $15{,}26\ \%$, wobec $9{,}00\ \%$ dla NoOS. Zakres wartości $\sigma_{t,M}$ wynosił odpowiednio $491{,}63$–$862{,}85\ \mathrm{MPa}$ oraz $643{,}47$–$850{,}07\ \mathrm{MPa}$. Dwie najniższe wartości w grupie OS uzyskano dla próbek nr 19 i 1; wynosiły one odpowiednio $491{,}63$ i $523{,}09\ \mathrm{MPa}$.

W celu sprawdzenia wpływu obu skrajnie najniższych wyników na porównanie, wykonano pomocniczą analizę wrażliwości. Po ich pominięciu seria OS liczyła 11 próbek, jej średnia wzrosła do $745{,}95\ \mathrm{MPa}$, a współczynnik zmienności zmniejszył się do $8{,}86\ \%$. W niezmienionej serii NoOS wartości te wynosiły odpowiednio $738{,}66\ \mathrm{MPa}$ i $9{,}00\ \%$.

Różnica OS–NoOS zmieniła wówczas znak i wyniosła $7{,}29$ MPa, czyli $0{,}99$ % średniej serii NoOS. Wynik testu nadal nie był istotny statystycznie ($t = 0{,}263$, $df = 20{,}85$, $p = 0{,}7948$). Przedział ufności dla różnicy średnich obejmował wartości od $-50{,}27$ do $64{,}85$ MPa, a współczynnik g Hedgesa był równy $0{,}11$.

Analiza wrażliwości pokazała, że dwa najniższe wyniki wpływały na średnią i rozrzut serii OS oraz na kierunek oszacowanej różnicy pomiędzy grupami. Nie zmienił się natomiast wynik wnioskowania statystycznego. Analiza wrażliwości nie była planowana przed badaniem. Przeprowadzono ją pomocniczo po stwierdzeniu dwóch wyraźnie niższych wyników w serii OS.

Moduł sprężystości przy rozciąganiu E_t wyznaczono dla każdej próbki jako nachylenie siecznej pomiędzy poziomami odpowiadającymi 20 % i 50 % maksymalnej siły F_M. Do analizy wykorzystano wartości przeliczone z surowych przebiegów zgodnie z procedurą opisaną w metodyce. Statystyki opisowe zestawiono w tabeli 4-10.

Tablica 4-10. Statystyki opisowe modułu sprężystości przy rozciąganiu E_t prętów OS i NoOS.

Seria	n	Średnia [GPa]	s [GPa]	CV [%]	95 % CI [GPa]	Min.–maks. [GPa]
OS	13	46,32	1,34	2,89	45,51–47,13	44,44–48,36
NoOS	12	48,32	0,62	1,28	47,93–48,71	47,21–49,56

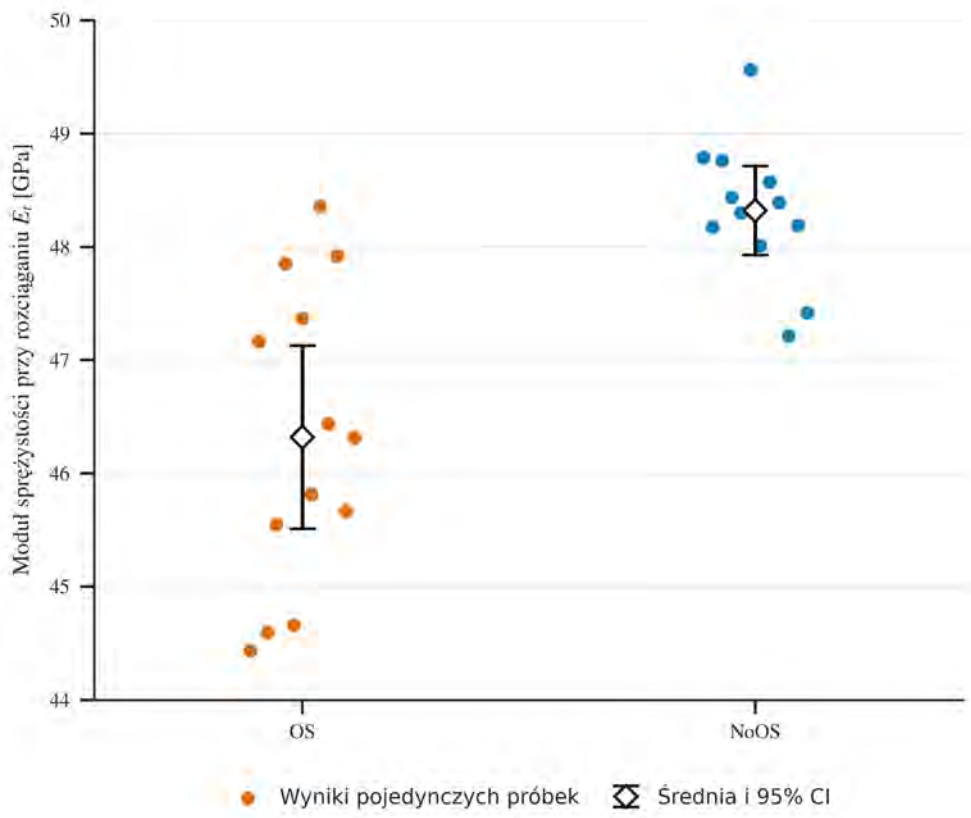
Rozkład indywidualnych wartości E_t wraz ze średnimi i 95 % przedziałami ufności przedstawiono na rys. 4-29.

Średnia wartość E_t wyniosła $46{,}32$ GPa dla prętów OS oraz $48{,}32$ GPa dla NoOS. Różnica OS–NoOS wynosiła $2{,}00$ GPa, co oznacza, że średni moduł serii OS był o $4{,}14$ % niższy od średniego modułu serii referencyjnej.

Test t Welcha wykazał istotną statystycznie różnicę pomiędzy seriami ($t = -4{,}861$, $df = 17{,}21$, $p = 0{,}00014$). Wyznaczony dla różnicy średnich 95 % przedział ufności wyniósł od $-2{,}87$ do $-1{,}13$ GPa i w całości znajdował się poniżej zera. Współczynnik g Hedgesa był równy $-1{,}83$, co wskazuje, że różnica pomiędzy średnimi była duża w odniesieniu do zmienności wyników wewnątrz serii.

Wyniki serii OS charakteryzowały się również większym rozrzutem. Współczynnik zmienności wyniósł $2{,}89$ %, wobec $1{,}28$ % dla NoOS. Wartości E_t mieściły się w zakresie $44{,}44$–$48{,}36$ GPa w serii OS oraz $47{,}21$–$49{,}56$ GPa w serii NoOS. Zakresy wyników częściowo się pokrywały, jednak większość wartości uzyskanych dla prętów OS znajdowała się poniżej wyników serii referencyjnej.

Próbki nr 1 i 19, dla których wcześniej uzyskano dwie najniższe wartości $\sigma_{t,M}$ w serii OS, osiągnęły moduły odpowiednio $48{,}36$ i $47{,}37$ GPa. Nie były to zatem wyniki obniżające średnią wartość E_t. Różnica modułów pomiędzy seriami nie była związana z tymi samymi dwiema próbkami, które odpowiadały za zwiększony rozrzut maksymalnego naprężenia rozciągającego.



Rys. 4-29. Porównanie modułu sprężystości przy rozciąganiu E_t, wyznaczonego w zakresie 20–50 % maksymalnej siły F_M, dla prętów OS i NoOS. Punkty oznaczają wyniki pojedynczych próbek, romby – średnie arytmetyczne, a pionowe odcinki – 95 % przedziały ufności dla średnich.

W badanej próbie seria OS charakteryzowała się mniejszą sztywnością osiową w zakresie obciążenia wykorzystanym do wyznaczenia E_t. Wyniku tego nie należy utożsamiać z obniżeniem maksymalnego naprężenia rozciągającego, dla którego nie stwierdzono istotnej statystycznie różnicy pomiędzy seriami. Uzyskane dane nie rozstrzygają również mechanizmu odpowiedzialnego za różnicę wartości modułu.

Zniszczenia próbek występowały poza strefami objętymi szczękami maszyny, jednak w wielu przypadkach były zlokalizowane w niewielkiej odległości od krawędzi uchwytu. Nie odnotowano przypadków zerwania pręta wewnątrz szczęk oraz jego osiowego poślizgu podczas obciążania. Zbliżoną lokalizację zniszczeń obserwowano w obu porównywanych seriach.

Położenie miejsca zerwania w pobliżu uchwytu nie stanowiło samo w sobie podstawy do odrzucenia wyniku. Wszystkie próbki osiągnęły maksimum obciążenia przed zniszczeniem, a w surowych przebiegach nie stwierdzono artefaktów wskazujących na utratę prawidłowego zamocowania. Na podstawie samej lokalizacji zerwania nie można jednak rozstrzygnąć, czy inicjacja zniszczenia była związana wyłącznie z osiowym rozciąganiem pręta, czy częściowo z lokalną koncentracją naprężeń w pobliżu krawędzi szczęk.

Podstawowym ograniczeniem przeprowadzonych prób był sposób zamocowania próbek. Końce prętów mocowano bezpośrednio w mechanicznych szczękach maszyny, bez zastosowania tulejek kotwiących lub elementów kompensujących naprężenia poprzeczne. Bezpośredni docisk

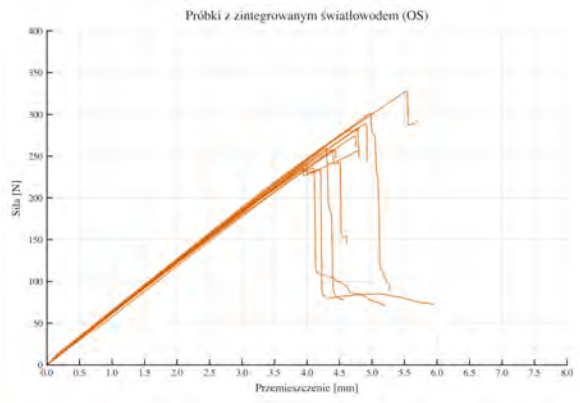
mógł powodować powstawanie lokalnych naprężeń poprzecznych oraz koncentrację naprężeń przy krawędzi uchwytu. Zjawisko to należy uwzględnić szczególnie podczas interpretacji maksymalnego nominalnego naprężenia rozciągającego $\sigma_{t,M}$, ponieważ zniszczenie części próbek następowało w pobliżu szczęk.

Dla wszystkich próbek zachowano jednakową długość stref chwytowych, liczbę warstw papieru ściernego oraz ustawienie mechanizmu dociskowego. Zapewniało to porównywalne warunki badania serii OS i NoOS, lecz nie usuwało potencjalnego wpływu uchwytów na obie grupy. Wpływ sposobu zamocowania na moduł E_t powinien być mniejszy niż na $\sigma_{t,M}$, ponieważ moduł wyznaczano przed zniszczeniem, w zakresie 20–50 % F_M, na podstawie odkształcenia mierzonego w środkowej części odcinka swobodnego. Brak obserwowanego poślizgu wspiera wiarygodność tego pomiaru. Nie eliminuje to jednak konieczności zachowania ostrożności przy bezpośrednim porównywaniu uzyskanych wartości. Z tych względów $\sigma_{t,M}$ i E_t należy interpretować przede wszystkim jako parametry porównawcze uzyskane dla prętów OS i NoOS w tej samej konfiguracji badawczej. Zastosowana procedura umożliwia ocenę różnic pomiędzy seriami, natomiast nie pozwala całkowicie oddzielić właściwości materiału od wpływu sposobu zamocowania próbek.

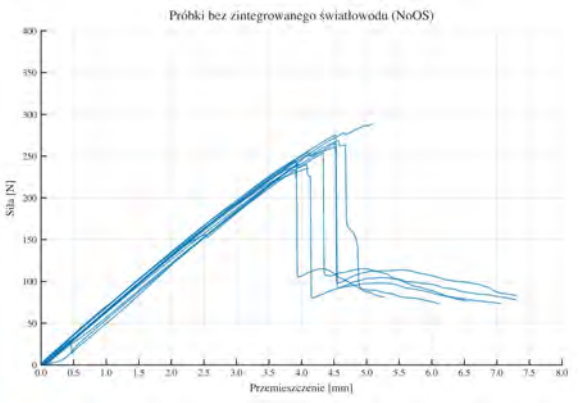
4.4.2. Trójpunktowe zginanie

Krzywe siły w funkcji przemieszczenia trawersy zarejestrowane podczas trójpunktowego zginania prętów OS i NoOS przedstawiono na rys. 4-30 oraz 4-31. W obu seriach początkowa część krzywych miała zbliżony i niemal liniowy charakter. Wraz ze wzrostem przemieszczenia siła rosła do osiągnięcia wartości maksymalnej, po czym następował wyraźny spadek obciążenia.

W serii OS maksymalne siły poszczególnych próbek zarejestrowano przy przemieszczeniu około $4{,}0$–$5{,}6\ \mathrm{mm}$ i obejmowały szerszy zakres wartości siły niż w serii NoOS. W dwóch próbach maksymalna siła przekroczyła $300\ \mathrm{N}$, przy czym najwyższa zarejestrowana wartość wyniosła około $328\ \mathrm{N}$. Dla prętów NoOS maksymalne wartości siły były skupione w węższym zakresie siły i występowały przeważnie przy przemieszczeniu około $4{,}0$–$4{,}6\ \mathrm{mm}$.



Rys. 4-30. Krzywe siły w funkcji przemieszczenia zarejestrowane podczas próby zginania prętów ze zintegrowanym światłowodem (OS).



Rys. 4-31. Krzywe siły w funkcji przemieszczenia zarejestrowane podczas próby zginania prętów bez zintegrowanego światłowodu (NoOS).

Po osiągnięciu maksymalnej wartości siły następował gwałtowny spadek siły. W części prób poprzedzały go mniejsze, lokalne spadki obciążenia. Po spadku próbki nadal przenosiły obciążenie, najczęściej na poziomie około 80–120 N, po czym jego wartość stopniowo malała wraz z dalszym przemieszczeniem trawersy. Na podstawie samych przebiegów siły w funkcji przemieszczenia nie ma możliwości przypisania poszczególnych zmian konkretnym mechanizmom uszkodzenia prętów.

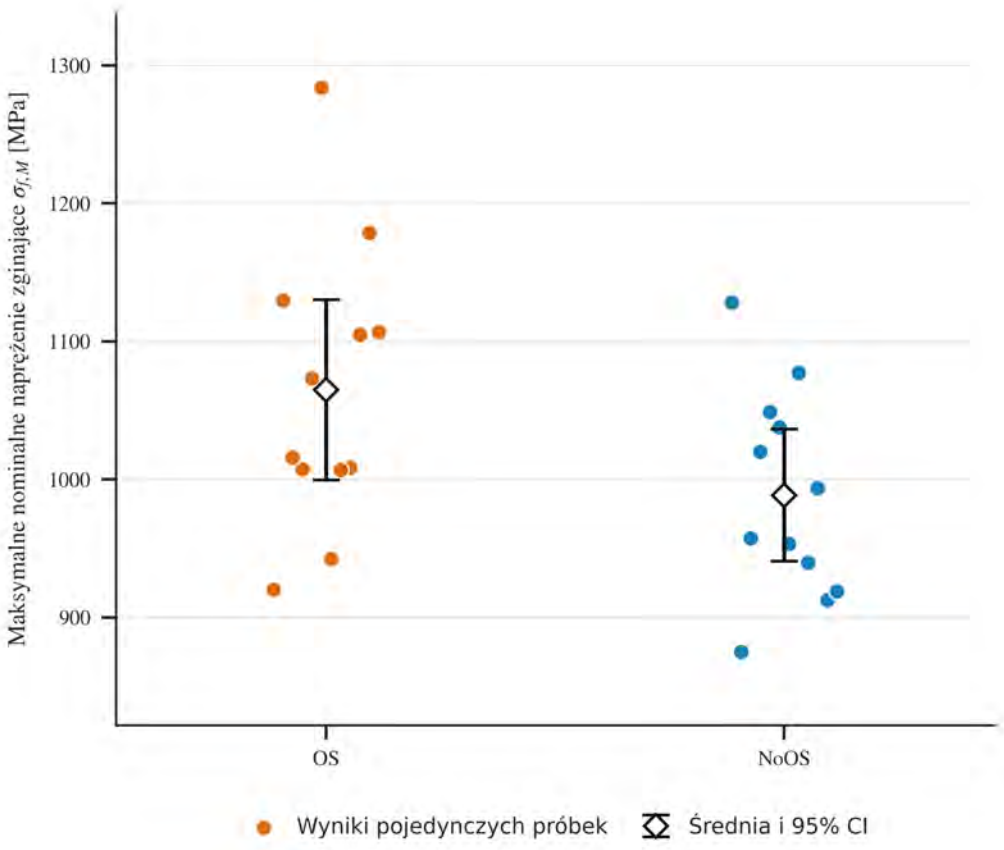
Dla każdej próbki wyznaczono maksymalną siłę F_M, odpowiadające jej maksymalne nominalne naprężenie zginające $\sigma_{f,M}$, pozorny moduł sprężystości przy zginaniu E_f, przemieszczenie trawersy $s(F_M)$ oraz pracę W_M. Wyniki zestawiono w tabeli 4-11. Wartości $\sigma_{f,M}$ i E_f obliczono dla średnicy pręta $d = 3{,}15$ mm.

Tablica 4-11. Wyniki uzyskane dla poszczególnych próbek OS i NoOS w próbie trójpunktowego zginania.

Próbka	$\boldsymbol{F_M}$ [N]	$\boldsymbol{\sigma_{f,M}}$ [MPa]	$\boldsymbol{E_f}$ [GPa]	$\boldsymbol{s(F_M)}$ [mm]	$\boldsymbol{W_M}$ [N · mm]
Pręty OS					
OS-1	282,57	1105,05	28,47	4,778	692,21
OS-2	328,32	1283,93	28,98	5,542	946,76
OS-3	240,99	942,43	28,55	3,990	489,31
OS-4	274,46	1073,31	28,38	4,747	662,72
OS-5	235,30	920,18	28,01	4,073	506,05
OS-6	301,38	1178,60	29,14	4,977	760,60
OS-7	257,60	1007,37	27,68	4,442	588,78
OS-8	283,04	1106,87	28,53	4,803	700,06
OS-9	288,85	1129,61	29,58	4,900	746,05
OS-10	259,78	1015,93	28,78	4,296	571,09
OS-11	257,90	1008,56	29,03	4,395	587,15
OS-12	257,47	1006,87	28,48	4,812	681,52
Pręty NoOS					
NoOS-1	254,08	993,62	29,03	4,333	561,17
NoOS-2	265,34	1037,65	30,61	4,528	608,27
NoOS-3	243,78	953,35	30,21	3,921	490,65
NoOS-4	268,22	1048,90	30,11	4,569	660,30
NoOS-5	288,44	1128,01	25,53	5,094	792,27
NoOS-6	233,34	912,52	28,99	3,897	470,91
NoOS-7	260,86	1020,12	29,56	4,514	638,15
NoOS-8	234,97	918,88	30,94	4,095	495,54
NoOS-9	223,77	875,07	28,83	3,655	439,21
NoOS-10	244,84	957,48	30,45	3,920	496,34
NoOS-11	240,27	939,60	28,74	3,971	513,88
NoOS-12	275,46	1077,22	29,97	4,525	666,61

Oznaczenia: F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby; $\sigma_{f,M}$ – maksymalne nominalne naprężenie zginające; E_f – pozorny moduł sprężystości przy zginaniu; $s(F_M)$ – przemieszczenie trawersy odpowiadające maksymalnej sile; W_M – praca zewnętrzna wyznaczona do chwili osiągnięcia maksymalnej siły.

Bezpośrednie porównanie maksymalnego nominalnego naprężenia zginającego $\sigma_{f,M}$ dla obu serii przedstawiono na rys. 4-32. Na wykresie zaznaczono wyniki poszczególnych próbek oraz wartości średnie wraz z 95 % przedziałami ufności.



Rys. 4-32. Porównanie maksymalnego nominalnego naprężenia zginającego $\sigma_{f,M}$ dla prętów OS i NoOS. Punkty przedstawiają wyniki poszczególnych próbek, natomiast romby i pionowe odcinki oznaczają wartości średnie oraz ich 95 % przedziały ufności.

Wartości $\sigma_{f,M}$ uzyskane dla serii OS były na ogół wyższe niż dla NoOS. Zakresy wyników obu grup częściowo się jednak pokrywały, podobnie jak 95 % przedziały ufności dla średnich.

Podstawowe statystyki opisowe maksymalnego nominalnego naprężenia zginającego $\sigma_{f,M}$ dla obu serii zestawiono w tabeli 4-12. Obejmują one wartość średnią, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, 95 % przedział ufności dla średniej oraz wartości skrajne.

Tablica 4-12. Statystyki opisowe maksymalnego nominalnego naprężenia zginającego $\sigma_{f,M}$ dla serii OS i NoOS.

Parametr	**OS**	**NoOS**
Średnia $\sigma_{f,M}$ [MPa]	1064,89	988,53
Odchylenie standardowe [MPa]	103,01	75,38
Współczynnik zmienności CV [%]	9,67	7,63
95 % CI [MPa]	999,44–1130,34	940,64–1036,43
Minimum [MPa]	920,18	875,07
Maksimum [MPa]	1283,93	1128,01

Oznaczenia: $\sigma_{f,M}$ – maksymalne nominalne naprężenie zginające; CV – współczynnik zmienności; CI – przedział ufności.

Średnia wartość $\sigma_{f,M}$ dla prętów OS wyniosła $1064{,}89\ \mathrm{MPa}$, natomiast dla NoOS $988{,}53\ \mathrm{MPa}$. Różnica pomiędzy średnimi wynosiła $76{,}36\ \mathrm{MPa}$, co odpowiada około $7{,}72\ \%$ wartości uzyskanej dla serii referencyjnej. Seria OS charakteryzowała się większym rozrzutem wyników. Współczynnik zmienności wyniósł $9{,}67\ \%$ dla OS oraz $7{,}63\ \%$ dla NoOS.

Różnicę średnich wartości $\sigma_{f,M}$ pomiędzy seriami oceniono testem t Welcha. Uzyskano $p = 0{,}0513$. Przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ różnica nie osiągnęła poziomu istotności statystycznej. Przedział ufności 95 % dla różnicy średnich OS–NoOS wynosił od $-0{,}47$ do $153{,}18\ \mathrm{MPa}$ i obejmował zero.

Wartość współczynnika g Hedgesa wyniosła $0{,}82$. Dodatni znak wynika z przyjętej kolejności porównania OS–NoOS i oznacza, że średnia wartość $\sigma_{f,M}$ była wyższa w serii OS. Bezwzględna wartość współczynnika odpowiada standaryzowanej różnicy średnich wynoszącej około $0{,}8$.

Brak istotności statystycznej nie oznacza równoważności obu serii. W badanej próbie średnia wartość $\sigma_{f,M}$ była o około $7{,}72\ \%$ wyższa dla prętów OS, jednak przy liczebności $n = 12$ w każdej grupie nie można jednoznacznie przypisać tej różnicy obecności zintegrowanego światłowodu.

Uzupełniająco porównano pozorny moduł sprężystości przy zginaniu E_f, przemieszczenie trawersy odpowiadające maksymalnej sile $s(F_M)$ oraz pracę W_M. Statystyki opisowe tych parametrów zestawiono w tabeli 4-13.

Tablica 4-13. Parametry uzupełniające wyznaczone podczas próby trójpunktowego zginania dla serii OS i NoOS.

Parametr	**OS**	**NoOS**	**CV OS [%]**	**CV NoOS [%]**
E_f [GPa]	$28{,}63 \pm 0{,}51$	$29{,}41 \pm 1{,}43$	1,79	4,86
$s(F_M)$ [mm]	$4{,}646 \pm 0{,}431$	$4{,}252 \pm 0{,}409$	9,27	9,62
W_M [N · mm]	$661{,}03 \pm 125{,}76$	$569{,}44 \pm 104{,}63$	19,03	18,37

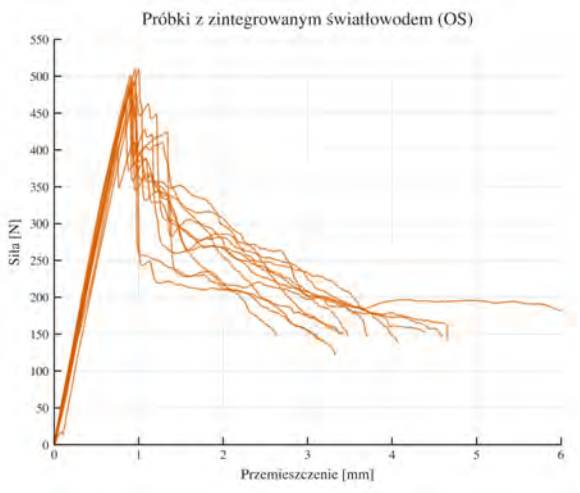
Oznaczenia: E_f – pozorny moduł sprężystości przy zginaniu; $s(F_M)$ – przemieszczenie trawersy odpowiadające maksymalnej sile; W_M – praca zewnętrzna wyznaczona do chwili osiągnięcia maksymalnej siły; CV – współczynnik zmienności. Wartości podano jako średnia $\pm$ odchylenie standardowe.

Pozorny moduł E_f był zbliżony w obu seriach, przy czym w serii OS uzyskano mniejszy rozrzut wyników. Pręty OS osiągały maksymalną siłę przy większym średnim przemieszczeniu trawersy. Wyższa była również średnia wartość W_M. Parametry te mają jednak charakter uzupełniający i ze względu na sposób pomiaru przemieszczenia służą przede wszystkim do porównania obu serii badanych w takich samych warunkach.

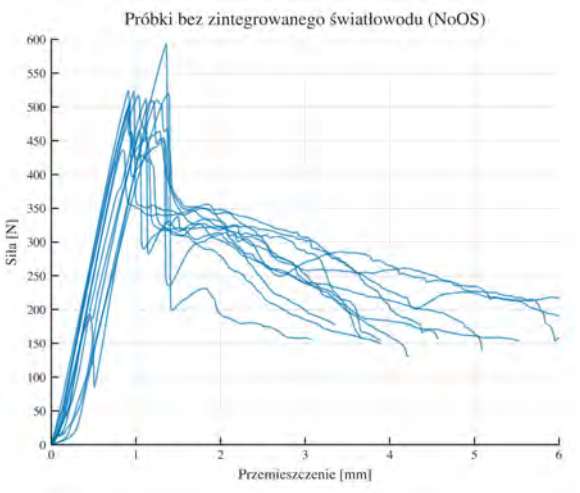
4.4.3. Wyniki badań pozornej wytrzymałości na ścinanie

Wykresy siły w funkcji przemieszczenia zarejestrowane podczas badań prętów OS i NoOS przedstawiono na rys. 4-33 oraz rys. 4-34. Różnice pomiędzy seriami dotyczyły przede wszystkim położenia maksimum oraz przebiegu krzywych po jego osiągnięciu.

Krzywe zarejestrowane dla prętów NoOS były bardziej zróżnicowane niż dla OS, zarówno pod względem maksymalnej siły, jak i odpowiadającego jej przemieszczenia. W kilku próbach NoOS maksimum siły pojawiało się dopiero przy przemieszczeniu około $1{,}3$–$1{,}4$ mm. W jednej próbie maksymalna siła zbliżyła się do 600 N, podczas gdy dla większości próbek mieściła się w zakresie około 470–525 N.



Rys. 4-33. Krzywe siły w funkcji przemieszczenia zarejestrowane podczas próby krótkiej belki dla prętów ze zintegrowanym światłowodem (OS).



Rys. 4-34. Krzywe siły w funkcji przemieszczenia zarejestrowane podczas próby krótkiej belki dla prętów bez zintegrowanego światłowodu (NoOS).

Dla prętów OS maksymalna siła występowała średnio przy $0{,}930$ mm, a dla NoOS przy $1{,}079$ mm. Współczynnik zmienności tego parametru wyniósł $4{,}38\%$ dla OS i $16{,}98\%$ dla NoOS. Pręty ze zintegrowanym światłowodem osiągały maksymalne obciążenie przy mniejszym przemieszczeniu, a wyniki poszczególnych prób były pod tym względem bardziej zbliżone.

Po osiągnięciu maksymalnej siły w obu seriach następował jej spadek, ale próbki nadal przenosiły obciążenie. W dalszej części próby siła utrzymywała się najczęściej w zakresie około 200–350 N. W tej części próby krzywe były mniej regularne i tym samym pojawiały się lokalne spadki siły i zmiany nachylenia, a różnice pomiędzy próbkami stawały się większe. Na podstawie samych krzywych siły w funkcji przemieszczenia nie można przypisać tych zmian konkretnym mechanizmom uszkodzenia. Wymagałoby to ich zestawienia z obserwacjami sposobu niszczenia próbek.

Wpływ obecności światłowodu na pozorną wytrzymałość na ścinanie oceniono na podstawie wartości S wyznaczonych dla poszczególnych próbek. W tab. 4-14 zestawiono wartości maksymalnej siły F_M, pozornej wytrzymałości na ścinanie S wyznaczonej na podstawie F_M oraz przemieszczenia $s(F_M)$ odpowiadającego maksymalnej sile. W tabeli zamieszczono także pracę W_M wykonaną do momentu osiągnięcia maksymalnego obciążenia.

Tablica 4-14. Wyniki uzyskane dla poszczególnych próbek OS i NoOS w próbie krótkiej belki.

Próbka	F_M **[N]**	S **[MPa]**	$s(F_M)$ **[mm]**	W_M **[N mm]**
Pręty OS				
OS-1	509,44	43,59	0,963	252,21
OS-2	488,08	41,76	0,915	229,47
OS-3	490,62	41,98	0,953	252,21
OS-4	508,91	43,54	1,001	265,09
OS-5	409,87	35,07	0,942	231,95
OS-6	495,06	42,36	0,927	239,94
OS-7	501,40	42,90	0,908	238,29
OS-8	476,39	40,76	0,965	238,51
OS-9	465,95	39,87	0,938	209,76
OS-10	462,19	39,55	0,843	205,53
OS-11	480,56	41,12	0,898	235,36
OS-12	491,58	42,06	0,902	223,91
Pręty NoOS				
NoOS-1	509,63	43,61	1,248	269,87
NoOS-2	519,87	44,48	1,387	333,17
NoOS-3	522,35	44,69	0,975	234,75
NoOS-4	592,78	50,72	1,359	355,89
NoOS-5	510,67	43,69	1,120	277,38
NoOS-6	436,06	37,31	0,847	173,07
NoOS-7	504,37	43,16	0,926	242,28
NoOS-8	523,08	44,76	0,911	235,06
NoOS-9	509,01	43,55	1,197	306,14
NoOS-10	516,73	44,21	1,032	283,47
NoOS-11	496,76	42,50	0,901	217,88
NoOS-12	465,24	39,81	1,042	200,59

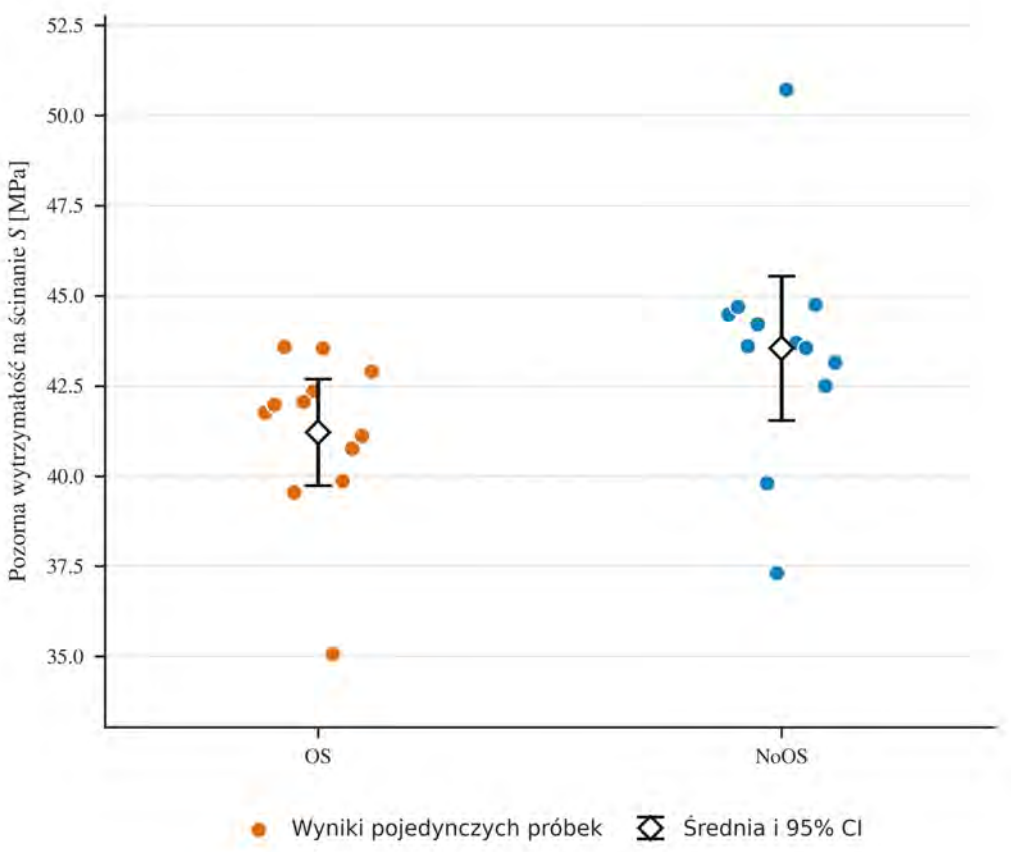
Oznaczenia: F_M – maksymalna siła zarejestrowana podczas próby; S – pozorna wytrzymałość na ścinanie; $s(F_M)$ – przemieszczenie trawersy odpowiadające osiągnięciu maksymalnej siły; W_M – praca wykonana do momentu osiągnięcia maksymalnej siły; OS – pręty z osiowo zintegrowanym światłowodem; NoOS – pręty referencyjne bez zintegrowanego światłowodu.

W serii OS wartości S dla większości próbek mieszczą się w stosunkowo wąskim zakresie od około $39{,}5$ do $43{,}6$ MPa. Wyraźnie niższą wartość uzyskano dla próbki OS-5 ($35{,}07$ MPa).

Większy zakres wartości wystąpił dla serii NoOS. Najniższą wartość S uzyskano dla próbki NoOS-6 ($37{,}31$ MPa), natomiast najwyższą dla NoOS-4 ($50{,}72$ MPa). W pozostałych próbach wyniki skupiały się głównie w zakresie około 40–45 MPa. Podobna różnica dotyczy przemieszczenia odpowiadającego maksymalnej sile. Dla OS wartości $s(F_M)$ zawierały się w zakresie $0{,}843$–$1{,}001$ mm, podczas gdy dla NoOS zakres był znacznie szerszy i wynosił od $0{,}847$ do $1{,}387$ mm.

Bezpośrednie porównanie wartości pozornej wytrzymałości na ścinanie uzyskanych dla

poszczególnych próbek przedstawiono na rys. 4-35. Na wykresie zaznaczono również wartości średnie wraz z 95% przedziałami ufności.



Rys. 4-35. Porównanie pozornej wytrzymałości na ścinanie S dla prętów OS i NoOS. Punkty przedstawiają wyniki poszczególnych próbek. Romby oznaczają wartości średnie, a pionowe odcinki przedstawiają ich 95% przedziały ufności.

Na wykresie wartości S dla serii NoOS są na ogół wyższe. Zakresy wyników obu serii w znacznym stopniu się pokrywają i częściowo nakładają się także 95% przedziały ufności dla średnich.

Różnicę pomiędzy średnimi obu serii oceniono następnie za pomocą analizy statystycznej. Podstawowe statystyki opisowe pozornej wytrzymałości na ścinanie S dla obu serii zestawiono w tab. 4-15. Oprócz wartości średniej podano odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, 95% przedział ufności dla średniej oraz zakres uzyskanych wyników.

Średnia wartość S dla prętów OS wyniosła $41{,}21$ MPa i była niższa niż dla serii NoOS, dla której uzyskano $43{,}54$ MPa. Różnica pomiędzy średnimi wynosiła $2{,}33$ MPa, co odpowiada około $5{,}35\%$ wartości uzyskanej dla prętów referencyjnych.

Seria OS charakteryzowała się mniejszym rozrzutem wyników. Odchylenie standardowe wyniosło $2{,}32$ MPa, a współczynnik zmienności $5{,}64\%$. Dla NoOS wartości te były wyższe i wynosiły odpowiednio $3{,}16$ MPa oraz $7{,}25\%$.

W teście t Welcha uzyskano $p = 0{,}0528$. Przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ różnica pomiędzy średnimi nie była istotna statystycznie. 95% przedział ufności dla różnicy

Tablica 4-15. Statystyki opisowe pozornej wytrzymałości na ścinanie S dla serii OS i NoOS.

Parametr	**OS**	**NoOS**
Średnia S [MPa]	41,21	43,54
Odchylenie standardowe s [MPa]	2,32	3,16
Współczynnik zmienności CV [%]	5,64	7,25
95% CI [MPa]	39,74–42,69	41,53–45,55
Minimum [MPa]	35,07	37,31
Maksimum [MPa]	43,59	50,72

Oznaczenia: S – pozorna wytrzymałość na ścinanie; s – odchylenie standardowe; CV – współczynnik zmienności; CI – przedział ufności.

średnich OS–NoOS wynosił od $-4{,}69$ do $0{,}03$ MPa i obejmował zero.

Wartość współczynnika g Hedgesa wyniosła $-0{,}81$. Ujemny znak wynika z przyjętej kolejności porównania OS–NoOS i oznacza, że średnia wartość S była niższa w serii OS. Bezwzględna wartość współczynnika wskazuje na standaryzowaną różnicę średnich wynoszącą około $0{,}8$.

Brak istotności statystycznej nie jest dowodem braku różnicy pomiędzy seriami. W badanej próbie średnia wartość S była niższa dla prętów ze zintegrowanym światłowodem, jednak przy liczebności $n = 12$ w każdej serii oszacowanie tej różnicy pozostaje niepewne.

Ze względu na niższy wynik próbki OS-5 sprawdzono odpowiadający jej przebieg siły w funkcji przemieszczenia. Jego kształt nie odbiegał od pozostałych krzywych OS i nie wskazywał na przerwanie rejestracji. Nie stwierdzono więc podstaw eksperymentalnych do odrzucenia tego wyniku i próbkę OS-5 uwzględniono w dalszych obliczeniach.

4.4.4. Udarność

W badaniu udarności przeanalizowano łącznie 24 próbki: 12 prętów ze zintegrowanym światłowodem (OS) oraz 12 prętów referencyjnych (NoOS). Uzyskano wynik nominalnej udarności $a_{c,\mathrm{nom}}$, a wyniki zestawiono w w tab. 4-16. Dla każdej serii wyznaczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, 95 % przedział ufności dla średniej oraz zakres uzyskanych wartości.

Tablica 4-16. Statystyki opisowe nominalnej udarności $a_{c,\mathrm{nom}}$ prętów OS i NoOS.

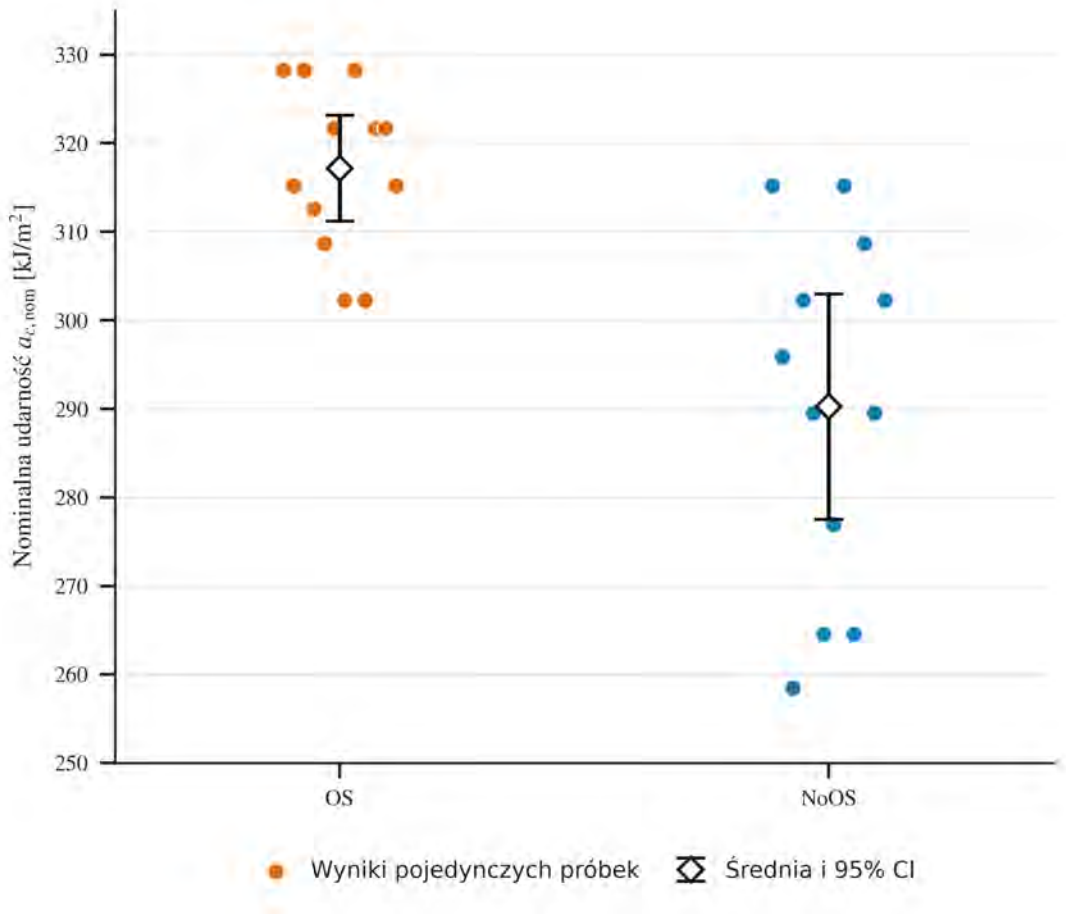
Seria	n	Średnia [kJ/m^2]	s [kJ/m^2]	CV [%]	95 % CI [kJ/m^2]	Min.–maks. [kJ/m^2]
OS	12	317,16	9,42	2,97	311,17–323,14	302,25–328,25
NoOS	12	290,24	20,02	6,90	277,52–302,96	258,45–315,17

Średnia wartość $a_{c,\mathrm{nom}}$ wyniosła $317{,}16$ kJ/m^2 dla prętów OS oraz $290{,}24$ kJ/m^2 dla prętów NoOS. Różnica obliczona w kolejności OS–NoOS była równa $26{,}92$ kJ/m^2, co oznacza, że średnia serii OS była o $9{,}27$ % wyższa od średniej serii referencyjnej.

Wyniki serii OS mieściły się w zakresie od $302{,}25$ do $328{,}25$ kJ/m^2. W serii NoOS

zakres był szerszy i wynosił od $258{,}45$ do $315{,}17$ kJ/m^2. Większe zróżnicowanie wyników NoOS potwierdza również współczynnik zmienności, który osiągnął $6{,}90$ %, wobec $2{,}97$ % w serii OS. Na poziomie statystyk opisowych seria OS charakteryzowała się wyższą średnią nominalną udarnością oraz mniejszym rozrzutem wyników.

Rozkład indywidualnych wartości nominalnej udarności wraz ze średnimi i 95 % przedziałami ufności przedstawiono na rys. 4-36. Wyniki serii OS były skupione w węższym zakresie i przesunięte w kierunku wyższych wartości. Zakresy wyników pojedynczych próbek częściowo się pokrywały, natomiast 95 % przedziały ufności dla średnich nie nakładały się.



Rys. 4-36. Porównanie nominalnej udarności $a_{c,\mathrm{nom}}$ prętów OS i NoOS. Punkty oznaczają wyniki pojedynczych próbek, romby – średnie arytmetyczne, a pionowe odcinki – 95 % przedziały ufności dla średnich.

Test Shapiro–Wilka nie wykazał podstaw do odrzucenia założenia o normalności rozkładu w serii OS ($p = 0{,}1837$) oraz NoOS ($p = 0{,}2676$). Ze względu na małą liczebność prób oraz powtarzające się wartości wyników ocenę tę traktowano pomocniczo. Test Levene'a wykazał różnicę wariancji pomiędzy seriami ($p = 0{,}0211$), dlatego do porównania średnich zastosowano test t Welcha.

Różnica pomiędzy seriami była istotna statystycznie ($t = 4{,}214$, $df = 15{,}64$, $p = 0{,}00069$). Różnica średnich obliczona w kolejności OS–NoOS wyniosła $26{,}92$ kJ/m^2, co odpowiadało wartości wyższej o $9{,}27$ % względem średniej serii NoOS. Wyznaczony dla tej

różnicy 95 % przedział ufności obejmował wartości od $13{,}35$ do $40{,}48$ kJ/m^2 i nie zawierał zera. Standaryzowana różnica średnich, opisana współczynnikiem g Hedgesa, wyniosła $1{,}66$.

W danych występowały powtarzające się wartości, co wskazuje na dyskretny charakter odczytu. W celu sprawdzenia, czy wynik porównania zależał od zastosowania testu parametrycznego, przeprowadzono pomocniczy dokładny test permutacyjny oparty na statystyce t Welcha. Test ten również wykazał różnicę pomiędzy seriami ($p_{\mathrm{perm}} = 0{,}00026$). Zgodność wyników obu metod wskazuje, że stwierdzona różnica nie wynikała wyłącznie z doboru parametrycznej procedury statystycznej. Analiza permutacyjna nie zastępuje jednak oceny niepewności aparatury i bez informacji o rozdzielczości układu odczytowego nie można ilościowo określić wpływu zaokrąglenia poszczególnych wyników. Wszystkie próbki obu serii uległy całkowitemu przełamaniu, klasyfikowanemu jako typ C. Nie stwierdzono zatem różnicy w ogólnym typie zniszczenia pomiędzy prętami OS i NoOS.

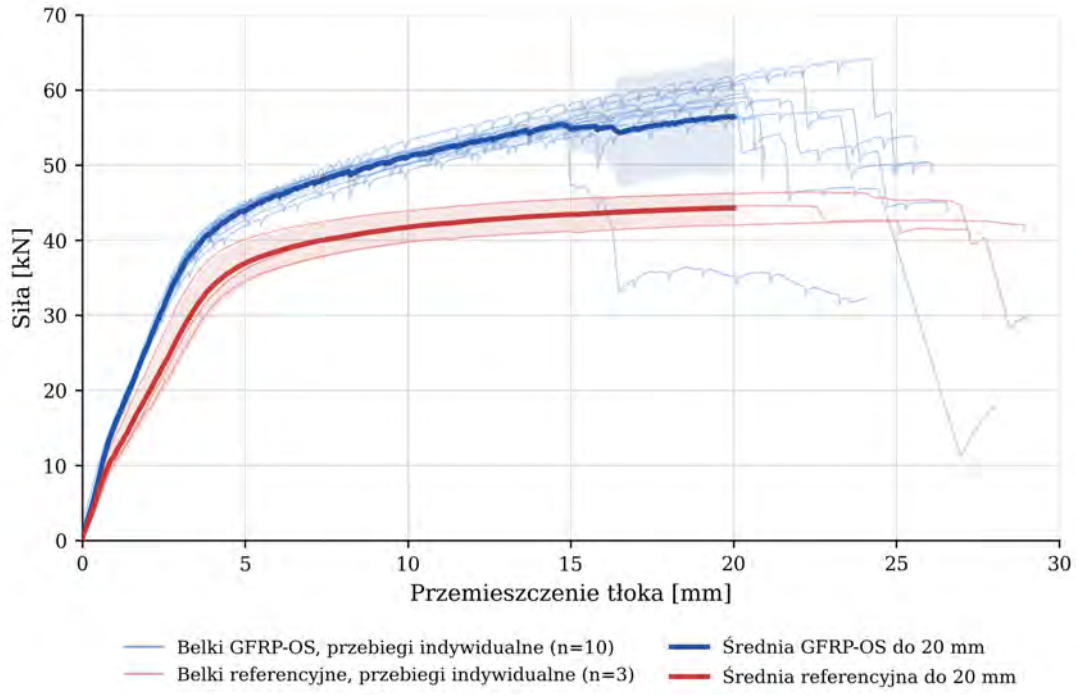
4.5. Wyniki badań w układzie beton-kompozyt

4.5.1. Porównanie odpowiedzi mechanicznej belek z czujnikami GFRP-OS i belek referencyjnych

Na rysunku 4-37 zestawiono zależności siły od przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej dla dziesięciu belek z czujnikami GFRP-OS oraz trzech belek referencyjnych. Cienkimi liniami przedstawiono wyniki poszczególnych prób, natomiast liniami pogrubionymi – przebiegi średnie. Ze względu na różną długość rejestracji poszczególnych prób krzywe średnie wyznaczono we wspólnym zakresie przemieszczenia od 0 do 20 mm. Obszary zacienione odpowiadają średniej $\pm$ jedno odchylenie standardowe. Krzywe indywidualne pozostawiono w pełnym zarejestrowanym zakresie, dzięki czemu widoczne są również fragmenty odpowiedzi po osiągnięciu siły maksymalnej.

W całym wspólnym zakresie przemieszczenia średnia siła rejestrowana dla belek z czujnikami GFRP-OS była większa niż dla belek referencyjnych. Już podczas zwiększania obciążenia średnia siła rejestrowana dla belek z GFRP-OS była większa niż dla belek referencyjnych. Różnica ta utrzymywała się w całym analizowanym zakresie przemieszczenia tłoka, tj. od 0 do 20 mm. Krótkotrwałe spadki siły widoczne na części krzywych mogą odpowiadać zmianom zachodzącym w próbce albo etapom utrzymania i redystrybucji obciążenia.

Wartości siły maksymalnej oraz przemieszczenia tłoka w chwili jej osiągnięcia przedstawiono w tabeli 4-17, natomiast zbiorcze statystyki opisowe i porównanie serii w tabeli 4-18.



Rys. 4-37. *Zależność siły od przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej podczas czteropunktowego zginania belek z czujnikami GFRP-OS ($n = 10$) i belek referencyjnych ($n = 3$). Cienkie linie przedstawiają przebiegi poszczególnych prób, linie pogrubione – średnie grupowe w zakresie wspólnym 0–20 mm, a obszary zacienione – średnią ± jedno odchylenie standardowe.*

Tablica 4-17. Siła maksymalna i odpowiadające jej przemieszczenie tłoka dla poszczególnych belek.

Próbka	**Siła maksymalna $F_{\max}$ [kN]**	**Przemieszczenie przy $F_{\max}$ [mm]**
Belki z GFRP-OS		
Belka 1	64,13	24,08
Belka 2	60,93	20,31
Belka 3	59,64	20,39
Belka 4	55,01	14,73
Belka 5	58,78	21,38
Belka 6	62,43	22,10
Belka 7	57,47	23,65
Belka 8	58,01	20,07
Belka 9	59,09	20,48
Belka 10	56,30	20,75
Średnia – GFRP-OS	**59,18**	**20,79**
Odchylenie standardowe – GFRP-OS	**2,76**	**2,56**
Belki referencyjne		
Referencja B	46,40	22,08
Referencja C	44,61	20,29
Referencja D	42,53	24,89
Średnia – referencyjne	**44,51**	**22,42**
Odchylenie standardowe – referencyjne	**1,94**	**2,32**

Średnia siła maksymalna belek z czujnikiem GFRP-OS wyniosła 59,18 kN, natomiast w grupie referencyjnej 44,51 kN. Różnica średnich była równa 14,66 kN, co odpowiada wartości większej o 32,9 % w grupie z GFRP-OS. Zakresy wyników nie nakładały się w pomiędzy badanymi seriami. Najmniejsza wartość w grupie GFRP-OS wyniosła 55,01 kN i była większa od największej wartości uzyskanej w grupie referencyjnej, równej 46,40 kN.

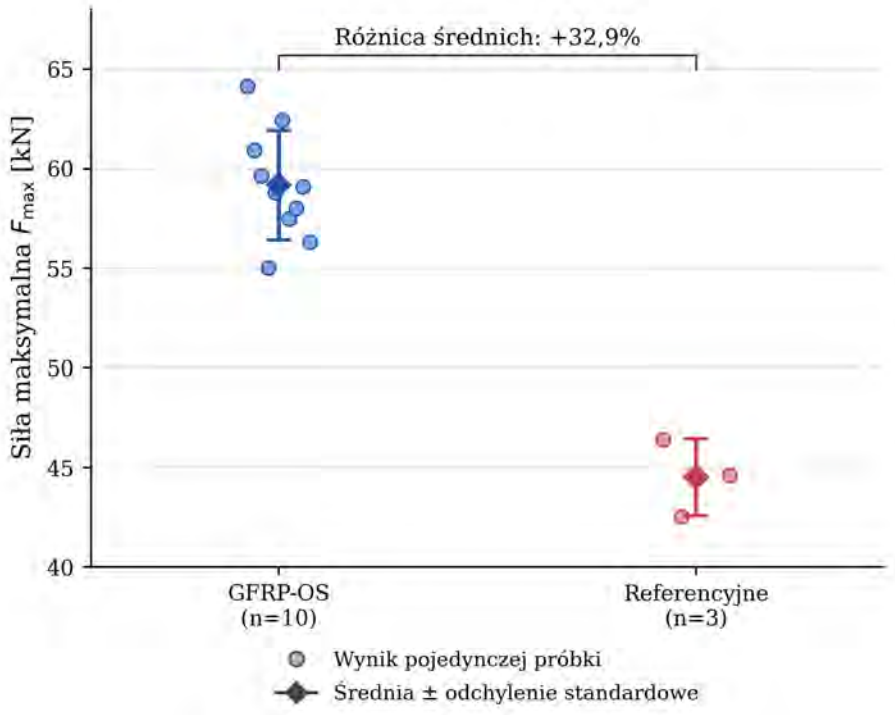
Współczynnik zmienności siły maksymalnej był zbliżony w obu grupach i wynosił 4,66 % dla belek z GFRP-OS oraz 4,35 % dla belek referencyjnych. Wskazuje to na porównywalny względny rozrzut wyników wewnątrz grup, przy czym należy uwzględnić niewielką liczebność grupy referencyjnej. Średnie przemieszczenie tłoka przy $F_{\max}$ wyniosło 20,79 mm dla belek z GFRP-OS i 22,42 mm dla belek referencyjnych.

Tablica 4-18. Zbiorcze statystyki opisowe i porównanie grup.

Parametr	**Belki z GFRP-OS**	**Belki referencyjne**	**Porównanie grup**
Liczebność n	10	3	–
Średnia $F_{\max}$ [kN]	59,18	44,51	$+14,66$ kN; $+32,9\,\%$
Odchylenie standardowe $F_{\max}$ [kN]	2,76	1,94	–
Mediana $F_{\max}$ [kN]	58,93	44,61	–
Zakres $F_{\max}$ [kN]	55,01–64,13	42,53–46,40	brak nakładania zakresów
Współczynnik zmienności $F_{\max}$ [%]	4,66	4,35	–
Średnie przemieszczenie tłoka przy $F_{\max}$ [mm]	20,79	22,42	$-1,62$ mm
Odchylenie standardowe przemieszczenia [mm]	2,56	2,32	–

Na rysunku 4-38 przedstawiono wszystkie wartości indywidualne oraz średnie z odchyleniem standardowym. W żadnej z dziesięciu belek z GFRP-OS nie odnotowano siły maksymalnej mniejszej niż w belkach referencyjnych. Wyższe wartości siły w grupie GFRP-OS wskazują, że ich obecność mogła wpływać na pracę elementu. W przypadku próbek laboratoryjnych o niewielkich wymiarach sztywny czujnik monolityczny może zmieniać odpowiedź elementu wskutek lokalnego wzmocnienia betonu [174].

Ze względu na różny moment zakończenia poszczególnych prób krzywe średnie przedstawiono wyłącznie do przemieszczenia tłoka wynoszącego 20 mm. Powyżej tej wartości pokazano przebiegi indywidualne. Na podstawie tego wykresu porównano globalną odpowiedź mechaniczną belek, natomiast szczegółową analizę rozwoju zarysowania i procesu dochodzenia do zniszczenia przedstawiono w dalszej części pracy na podstawie zestawienia wyników maszyny wytrzymałościowej z pomiarami DFOS.



Rys. 4-38. *Porównanie siły maksymalnej $F_{\max}$ belek z czujnikami GFRP-OS i belek referencyjnych. Koła oznaczają wyniki poszczególnych próbek, romby – wartości średnie, a belki błędów – ± odchylenie standardowe. Nad wykresem podano względną różnicę wartości średnich.*

4.5.2. Rozkład odsztalceń w betonowych belkach

W analizowanych przypadkach przestrzenne profile odkształceń prezentowane są do poziomu obciążenia stanowiącego maksymalnie 80 % siły niszczącej ($F_{\max}$), właściwej dla danego elementu. Przy wyższych poziomach obciążeń lokalne wartości odkształceń w strefach zarysowań zbliżały się do granicy zakresu pomiarowego interrogatora ODiSI 7100. Generowało to utratę ciągłości w losowych obszarach rejestrowanego sygnału w widmie rozproszenia Rayleigha. Należy podkreślić, że zjawiska tego nie interpretowano jako fizycznego przerwania czujnika światłowodowego.

Rozkład odkształceń w belkach z trzema aktywnymi czujnikami

Na rysunku 4-39a przedstawiono rozkłady odkształceń (wyrażone w $\mu\varepsilon$) w funkcji położenia na długości belki [cm]. Profile zarejestrowano wzdłuż czujników światłowodowych OS1–OS3 przy obciążeniach stanowiących 10, 30, 50, 60 oraz 70 % maksymalnej siły osiągniętej w trakcie badania. Maksymalna siła wynosiła $F_{\max} = 64{,}13$ kN, dlatego analizowane profile odpowiadają kolejno siłom 6,41; 19,24; 32,07, 38,48 oraz 44,89 kN. W układzie czteropunktowego zginania, przy symetrycznym rozdziale obciążenia, na każdy punkt obciążenia przypadała nominalnie połowa siły całkowitej.

Czujniki OS2 i OS3, umieszczone w dolnej części przekroju (rys. 3-30a), rejestrowały

odkształcenia rozciągające. Ich wartości zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia. Ogólny przebieg profili był zbliżony do rozkładu momentu zginającego, gdzie odkształcenia wzrastały w kierunku części środkowej belki, osiągały największe wartości pomiędzy punktami przyłożenia sił, a następnie zmniejszały się w kierunku przeciwnej podpory. W strefie stałego momentu zginającego, który obejmował odcinek 30–70 cm, krzywe nie były równomierne. Widoczne były powtarzające się lokalne maksima, których amplituda zwiększała się wraz ze wzrostem obciążenia.

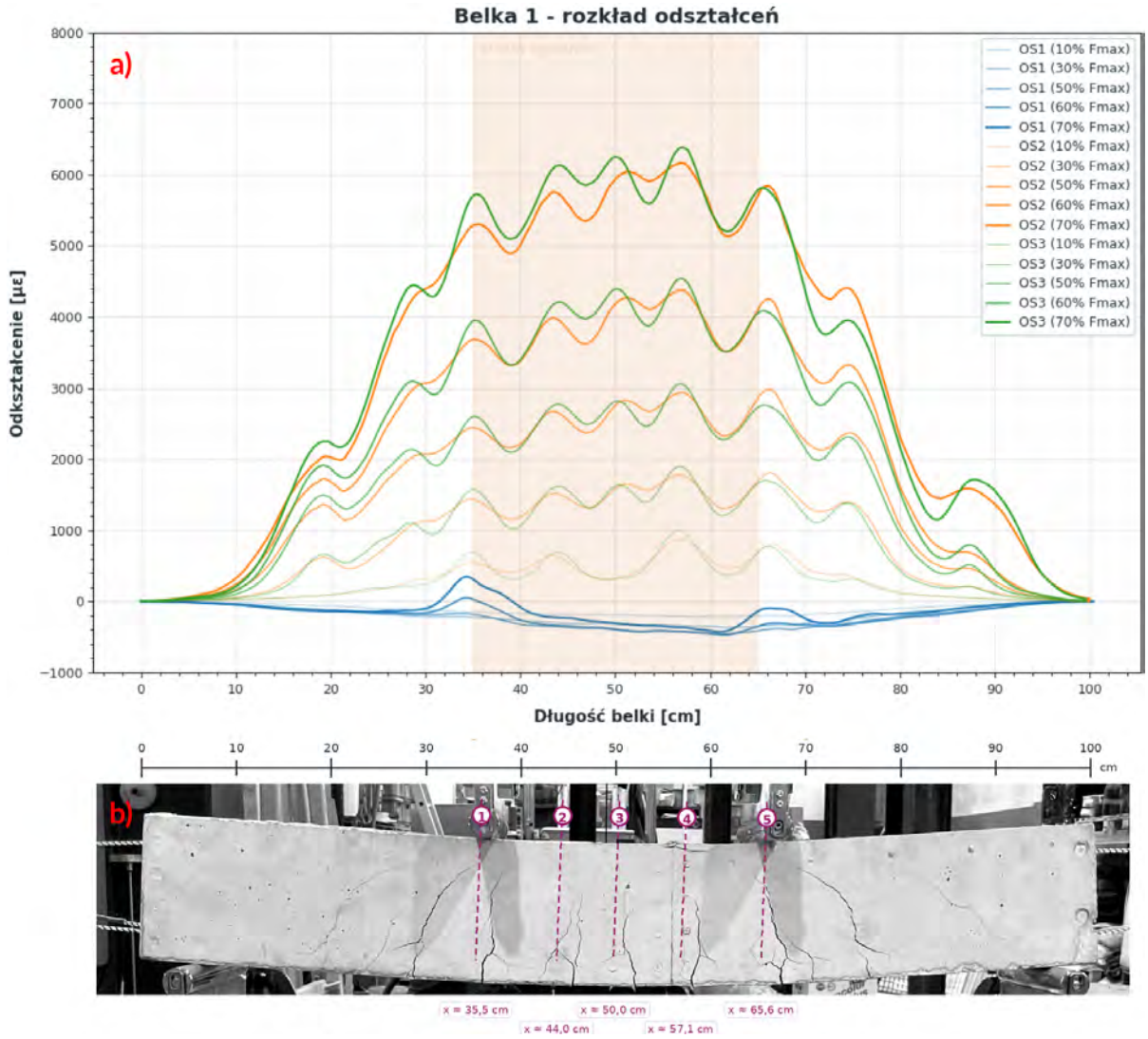
W przypadku czujnika OS3, znajdującego się od strony fotografowanej powierzchni belki (rys. 4-39b), przy 70 % $F_{\max}$ wyróżniono pięć głównych lokalnych maksimów. Ich przybliżone współrzędne wynosiły 35,5; 44,0; 50,0; 57,1 oraz 65,6 cm. Odczytane z wykresu wartości odkształcenia w tych obszarach mieściły się w przybliżeniu w zakresie od 7100 do 7700 $\mu\varepsilon$. Porównanie z dokumentacją fotograficzną wykazało, że ich współrzędne przypadały w pobliżu głównych rys lub skupisk rys widocznych na powierzchni belki. Najbardziej czytelna zgodność występowała w rejonach około 35,5; 50,0 oraz 65,6 cm. W pozostałych obszarach widoczne były grupy blisko położonych rys, dlatego stosunkowo szerokie maksimum profilu DFOS mogło odzwierciedlać odpowiedź czujnika na więcej niż jedną lokalną nieciągłość. Podobny sposób przyporządkowania lokalnych maksimów odkształcenia do udokumentowanych rys stosowano w badaniach elementów betonowych wyposażonych w czujniki rozproszone [174].

Przebiegi zarejestrowane przez OS2 i OS3 wykazywały podobny ogólny kształt oraz zbliżone położenia głównych maksimów. Potwierdza to, że oba czujniki odwzorowywały wspólną odpowiedź belki na zginanie. Lokalne różnice wartości i położenia maksimów mogą wynikać z przestrzennego przebiegu rys na szerokości belki oraz z odmiennego usytuowania czujników w przekroju. OS2 i OS3 były oddalone od siebie o około 6–7 cm, dlatego ta sama rysa nie musiała przecinać obu czujników w dokładnie tej samej współrzędnej.

Czujnik OS1, umieszczony w górnej części przekroju, rejestrował na większości długości odkształcenia ujemne, odpowiadające ściskaniu. Ich wartości były wyraźnie mniejsze co do wartości bezwzględnej niż odkształcenia rozciągające rejestrowane przez OS2 i OS3. Taki znak odpowiedzi jest zgodny z położeniem OS1 po ściskanej stronie przekroju belki poddanej dodatniemu momentowi zginającemu.

Przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$ w profilu OS1 zaobserwowano lokalne przejścia odkształceń na wartości dodatnie, zlokalizowane w przybliżeniu w przekrojach 35 oraz 65 cm. Obszary te odpowiadały położeniu pierwszego i piątego wyraźnego maksimum profilu OS3. Na fotografii końcowego stanu zarysowania, przedstawionej na rysunku 4-39b, w tych częściach belki widoczne są rysy rozwinięte na znaczną wysokość przekroju. Jedną z możliwych interpretacji zmiany znaku odkształcenia OS1 jest lokalne przesunięcie położenia osi obojętnej w sąsiedztwie głębokiej rysy propagującej w kierunku górnej krawędzi belki.

Rysy występujące w strefie stałego momentu miały na powierzchni bocznej przede wszystkim przebieg zbliżony do pionowego i rozwijały się od dolnej krawędzi belki. Poza tą strefą widoczne były również rysy nachylone, rozwijające się w kierunku punktów przyłożenia sił. Fotografia potwierdza zatem występowanie intensywnego zarysowania zarówno w środkowej



Rys. 4-39. Zestawienie rozkładu odkształceń wzdłuż czujników oraz obrazu zarysowania w belce 1. a) Profile odkształcenia wzdłuż czujników OS1–OS3 w belce 1, zarejestrowane przy obciążeniu równym 10, 30, 50, 60 oraz 70 % maksymalnej siły $F_{\max}$. Intensywność barwy odpowiada kolejnym poziomom obciążenia. Czujnik OS1 był umieszczony w górnej, ściskanej części przekroju, natomiast czujniki OS2 i OS3 w dolnej części przekroju, podlegającej rozciąganiu. b) Końcowy obraz zarysowania belki 1 z zaznaczonymi przybliżonymi położeniami pięciu lokalnych maksimów profilu OS3 zarejestrowanego przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$. Oznaczenia 1–5 wskazują współrzędne maksimów odkształcenia, natomiast fotografia przedstawia stan belki po zakończeniu całej próby.

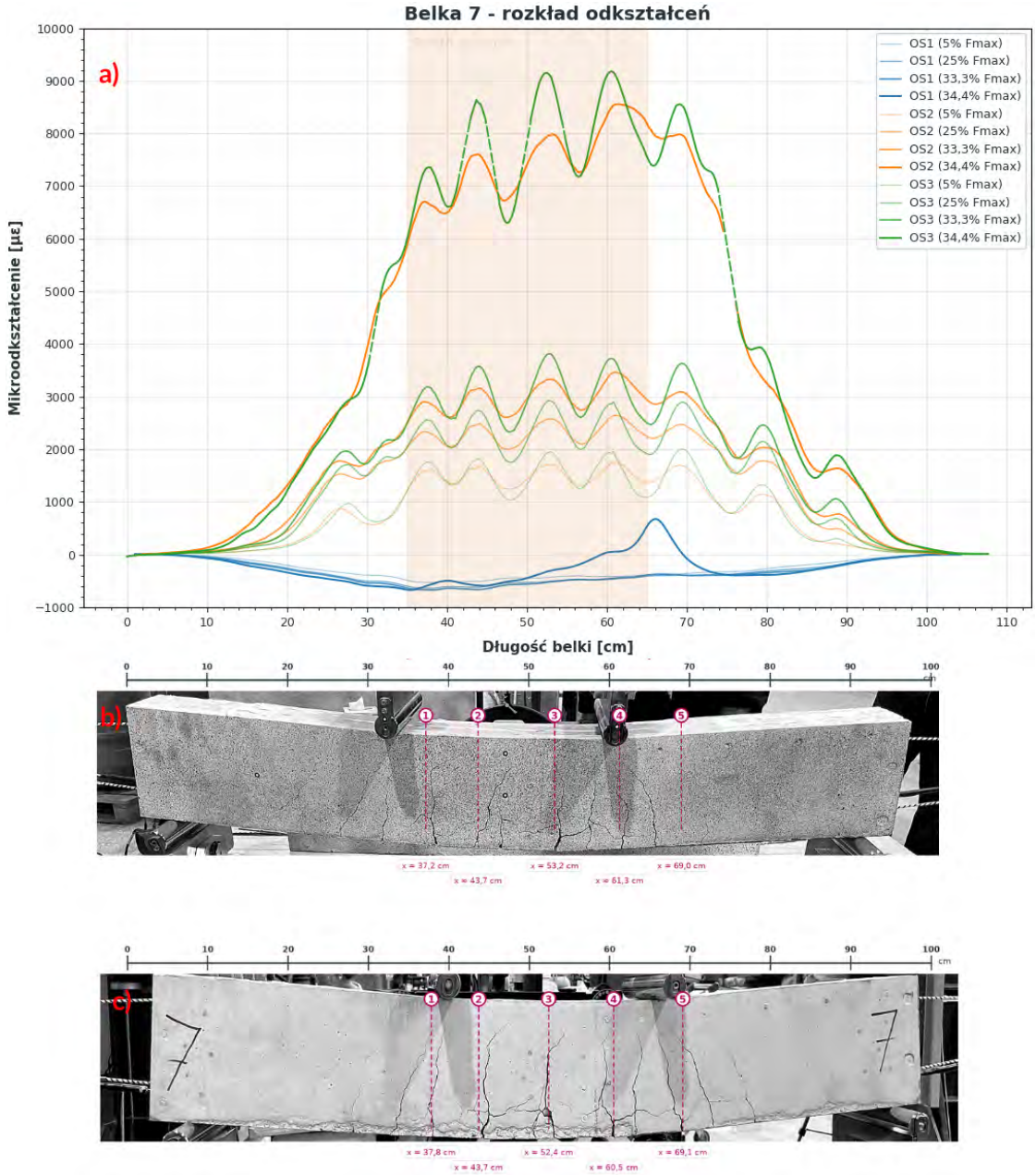
części belki, jak i w sąsiadujących strefach.

Ponadto czujnik OS3 był zatopiony wewnątrz betonu, podczas gdy rysy dokumentowano na powierzchni bocznej. Ze względu na przestrzenny i nieregularny przebieg rysy jej współrzędna na wysokości czujnika może nieznacznie różnić się od położenia obserwowanego przy dolnej krawędzi lub w środkowej części powierzchni. Z tego samego powodu fotografia końcowa i przedstawione profile nie stanowią podstawy do bezpośredniego wyznaczania szerokości poszczególnych rys.

Dla Belki 7 maksymalna siła zarejestrowana podczas próby wyniosła $F_{\max} = 57{,}47$ kN,

a odpowiadające jej przemieszczenie tłoka było równe $23{,}65$ mm. Czujnik OS1 znajdował się w górnej części przekroju, natomiast OS2 i OS3 umieszczono w dolnej części, po przeciwnych stronach belki. Takie rozmieszczenie podobnie jak w belce 1 umożliwiało rejestrację odkształceń ściskających przez OS1 oraz odkształceń rozciągających przez OS2 i OS3.

Do analizy wybrano profile odpowiadające poziomom 5, 25, 33,3 oraz 34,4 % indywidualnej wartości $F_{\max}$, co nominalnie odpowiadało siłom około $2{,}87$, $14{,}37$, $19{,}14$ i $19{,}77$ kN. Zestawienie profili przedstawiono na rys. 4-40.



Rys. 4-40. *P*rofile odkształcenia wzdłuż czujników OS1–OS3 przy obciążeniach równych 5, 25, 33,3 oraz 34,4 % $F_{\max}$ Belki 7. - a) profile odkształcenia zarejestrowane przez czujniki OS1, OS2 i OS3.; b) Powierzchnia po stronie czujnika OS2.; c) Powierzchnia po stronie czujnika OS3.

Przy najniższym poziomie obciążenia profile miały stosunkowo wyrównany przebieg, a wartości odkształcenia były niewielkie. Wraz ze wzrostem obciążenia w profilach dolnych czujników OS2 i OS3 pojawiały się lokalne maksima wskazujące na narastającą niejednorodność pola odkształceń. Czujnik OS1 rejestrował przeważnie wartości ujemne, zgodne z jego położeniem w ściskanej części przekroju.

Szczególnie wyraźna zmiana profili nastąpiła pomiędzy poziomami 33,3 i 34,4 % $F_{\max}$. Pomiędzy tymi stanami przeprowadzono etap przetrzymania przy przemieszczeniu tłoka wynoszącym około $1{,}40\ \mathrm{mm}$. W czasie przetrzymania siła zmniejszyła się z około $19{,}66$ do $18{,}09\ \mathrm{kN}$, po czym wznowiono obciążanie. W porównywanym zakresie maksymalna wartość odkształcenia rejestrowana przez OS2 zwiększyła się z około $3500\ \mu\varepsilon$ do $8570\ \mu\varepsilon$, natomiast dla OS3 wzrosła z około $3800\ \mu\varepsilon$ do $9190\ \mu\varepsilon$. Ponad dwukrotny wzrost lokalnych maksimów, występujący przy niewielkiej zmianie poziomu siły, wskazuje na rozwój zarysowania i redystrybucję odkształceń pomiędzy sąsiednimi strefami belki.

Przy poziomie 34,4 % $F_{\max}$ w profilach OS2 i OS3 wyróżniono po pięć głównych lokalnych maksimów. Ich położenie oraz wartości zestawiono w tab. 4-19.

Tablica 4-19. Położenie i wartości lokalnych maksimów zarejestrowanych przez czujniki OS2 i OS3 w Belce 7 przy 34,4 % $F_{\max}$.

	OS2		OS3	
Nr	Położenie [cm]	Odkształcenie [$\mu\varepsilon$]	Położenie [cm]	Odkształcenie [$\mu\varepsilon$]
1	37,2	6710	37,8	7380
2	43,7	7610	43,7	8640
3	53,2	7990	52,4	9170
4	61,3	8570	60,5	9190
5	69,0	7990	69,1	8570

Położenia odpowiadających sobie maksimów OS2 i OS3 różniły się o nie więcej niż około $1\ \mathrm{cm}$. Największą zgodność uzyskano dla obszarów położonych w przybliżeniu przy 44, 52–53, 60–61 oraz $69\ \mathrm{cm}$. Zbieżność ta wskazuje, że oba dolne czujniki rejestrowały rozwój tych samych stref lokalizacji odkształceń, mimo że znajdowały się po przeciwnych stronach belki.

W celu jakościowej weryfikacji lokalizacji maksimów profile porównano z końcowym obrazem zarysowania obu powierzchni belki. Na fotografiach 4-40a i na rys. 4-40b zaznaczono przybliżone położenia pięciu maksimów wyznaczonych odpowiednio dla OS2 i OS3.

Położenia lokalnych maksimów były zbieżne z obszarami zarysowania widocznymi na fotografiach. Dotyczyło to zwłaszcza stref położonych w przybliżeniu przy 44, 52–53 oraz 60–61 cm. Zgodność obserwowano również w pobliżu $69\ \mathrm{cm}$, gdzie na obu powierzchniach występowały kolejne rysy. Wyniki potwierdzają, że lokalne koncentracje odkształcenia rejestrowane przez dolne czujniki odpowiadały strefom rozwoju zarysowania belki.

Porównanie należy traktować jako jakościowe. Fotografie przedstawiają stan zarysowania po zakończeniu całej próby, natomiast profile odkształcenia odnoszą się do wybranego poziomu

34,4 % $F_{\max}$. Na ich podstawie nie można ustalić, czy wszystkie widoczne na zdjęciach rysy istniały już przy tym poziomie obciążenia jak i nie jest możliwe, aby odtworzyć kolejności ich powstawania. Zbieżność położeń maksimum i rysy stanowi zatem potwierdzenie zgodności przestrzennej, ale nie dowód ich jednoczesnego powstania.

Zbliżone położenie maksimów OS2 i OS3 nie oznacza również, że każde odpowiadające sobie maksimum było związane z dokładnie tą samą pojedynczą rysą przechodzącą przez cały przekrój. W danym obszarze mogło występować kilka rys rozwijających się z obu powierzchni. Wyniki wskazują jednak, że oba dolne czujniki prawidłowo identyfikowały wspólne strefy koncentracji odkształceń i rozwoju uszkodzeń.

Rozkład odkształceń w belkach z dwoma aktywnymi czujnikami

W belkach 3, 5, 9 i 10 analizę oparto na sygnałach z dwóch sprawnych czujników. Czujnik OS1 znajdował się w górnej części przekroju, natomiast drugi czynny czujnik umieszczono w dolnej strefie rozciąganej. W Belce 3 był to OS3, a w pozostałych belkach – OS2. Do porównania wszystkich czterech belek przyjęto profile odpowiadające 30, 50, 60 i 70 % $F_{\max}$. W przypadku belek 9 i 10 analizę uzupełniono o wyniki zarejestrowane przy 80 % $F_{\max}$.

Maksymalne siły osiągnięte przez badane elementy mieściły się w zbliżonym zakresie od 56,30 do 59,64 kN. Również przemieszczenie tłoka przy $F_{\max}$ było zbliżone i wynosiło od 20,39 do 21,38 mm. Pod względem globalnej odpowiedzi mechanicznej belki tworzyły zatem dość jednorodną grupę. Znacznie większe różnice wystąpiły w przestrzennym rozkładzie odkształceń oraz w końcowym obrazie zniszczenia.

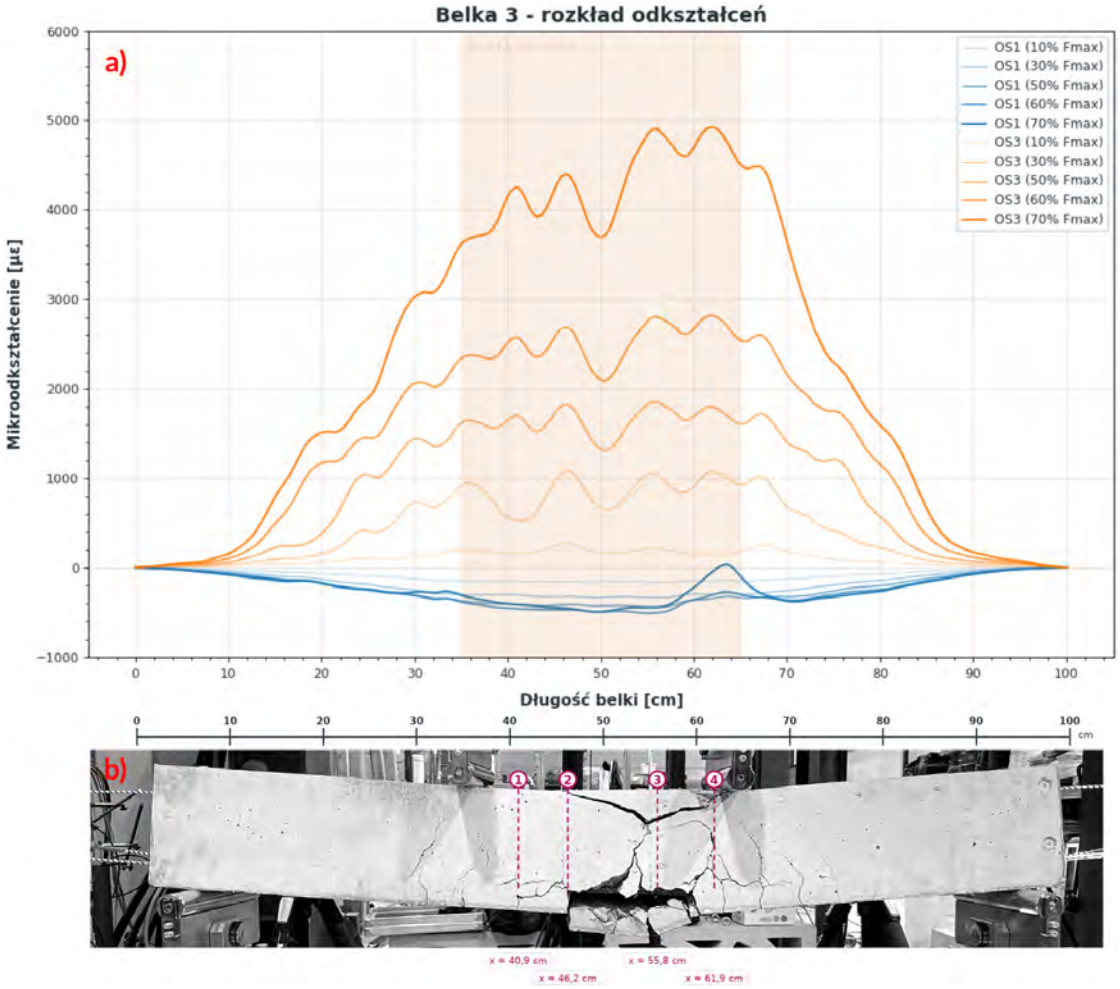
Przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$, odpowiadającym sile około 41,74 kN, na profilu dolnego czujnika OS3 wyróżniono cztery główne maksima. Występowały one w przybliżeniu przy $x = 40{,}9$; 46,2; 55,8 oraz 61,9 cm. Dwa ostatnie osiągały najwyższe wartości, zbliżone do $4900\ \mu\varepsilon$. Położenie tych maksimów zestawiono z końcowym obrazem zarysowania na rysunku 4-41. W tym przypadku porównanie ma charakter bezpośredni, ponieważ fotografia przedstawia powierzchnię znajdującą się od strony czynnego czujnika OS3.

Fotografia pokazuje silnie skoncentrowane uszkodzenie w środkowej części belki. Obejmuje ono szerokie rozwarcie rys, wykruszenie fragmentu dolnej strefy oraz uszkodzenie betonu przy górnej krawędzi w pobliżu prawego punktu przyłożenia siły. Maksima przy około 55,8 i 61,9 cm znajdują się wewnątrz tej strefy.

Czujnik OS1 rejestrował na większości długości odkształcenia ściskające. Przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$ w rejonie około 62–64 cm pojawiło się jednak lokalne przejście w kierunku wartości dodatnich. Położenie tego zaburzenia odpowiada obszarowi późniejszego, rozległego uszkodzenia widocznego na fotografii. Można je wiązać z lokalną redystrybucją pola odkształceń wywołaną rozwojem głębokiej rysy.

W Belce 5 obciążenie równe 70 % $F_{\max}$ wynosiło około 41,15 kN. Na profilu OS2 wyróżniono maksima przy $x \approx 36{,}2$; 41,1; 53,9; 59,3 oraz 64,8 cm. Największą wartość, około $5510\ \mu\varepsilon$, zarejestrowano przy 59,3 cm. Zbliżone amplitudy wystąpiły również w rejonach 53,9

i 64,8 cm.

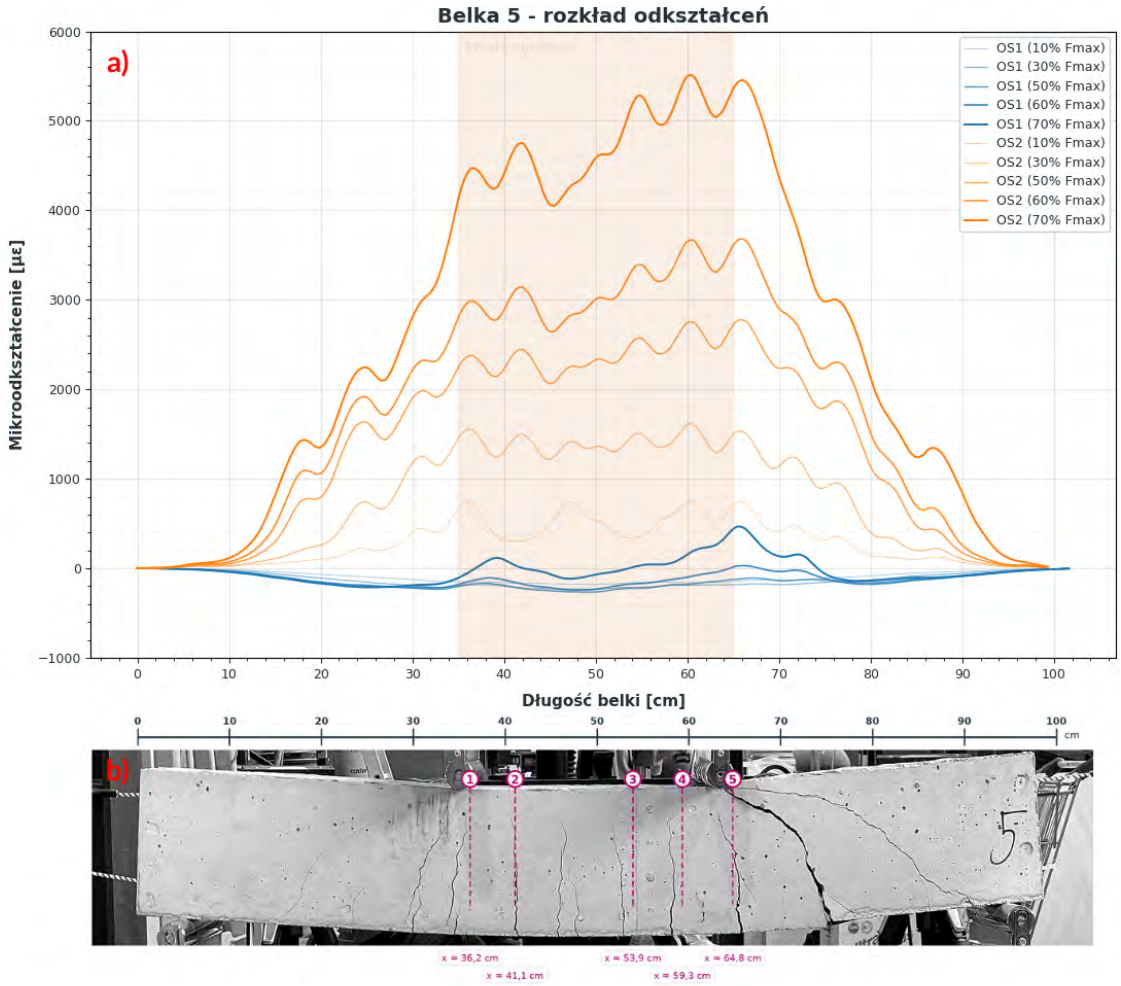


Rys. 4-41. *Rozkład odkształceń i końcowy obraz zarysowania Belki 3 - a) Profile odkształcenia zarejestrowane przez czujniki OS1 i OS3. b) Końcowy obraz zarysowania zestawiony z położeniami maksimów OS3 przy 70 % $F_{\max}$. Fotografia przedstawia stronę OS3.*

Porównanie profilu OS2 z fotografią Belki 5 przedstawiono na rysunku 4-42. Fotografia uwidacznia stronę czujnika OS3, a więc powierzchnię przeciwną do czynnego czujnika OS2. Z tego względu porównywano odpowiadające sobie obszary zarysowania, bez przypisywania każdemu maksimum jednej konkretnej rysy.

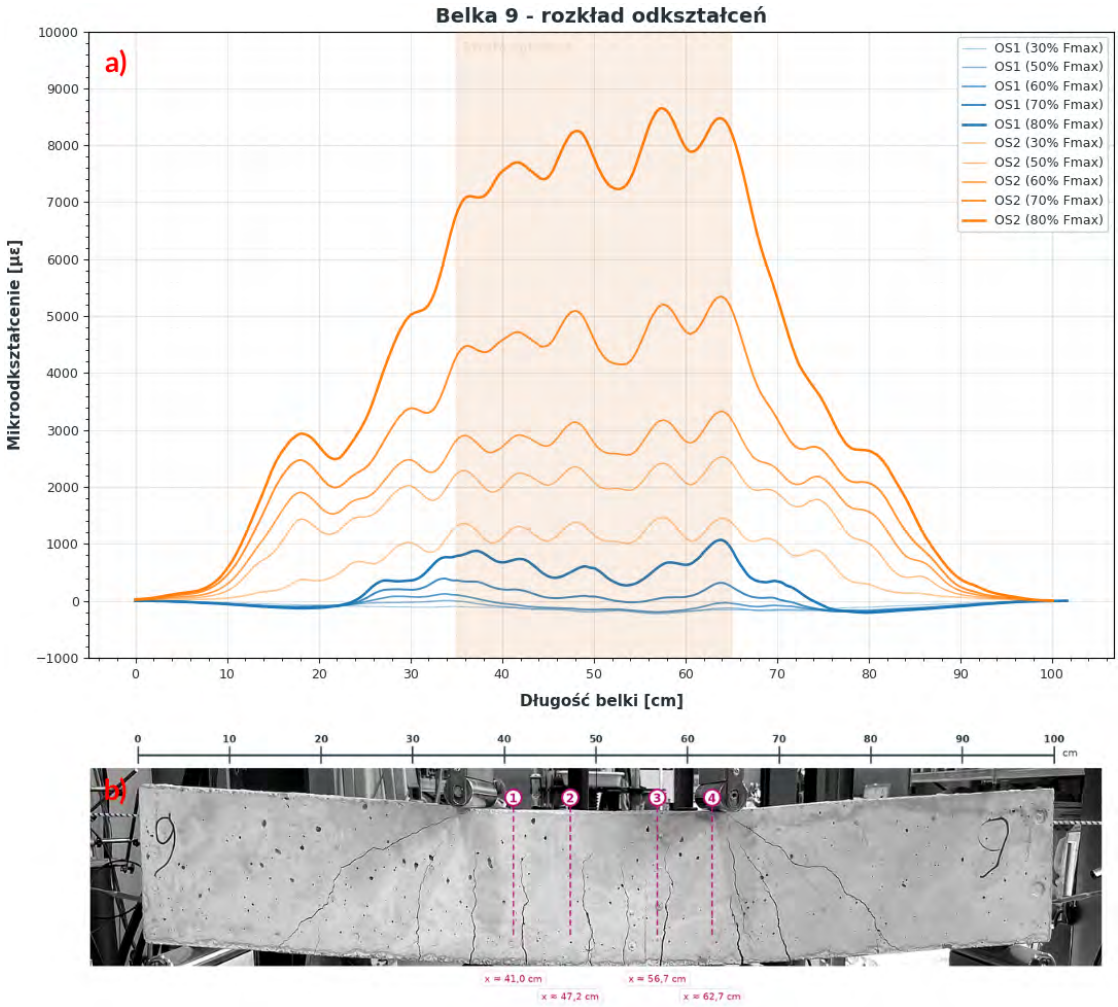
Przy prawej granicy strefy stałego momentu, w rejonie $x \approx 64{,}8$ cm, profil dolnego czujnika OS2 osiąga lokalne maksimum. Współrzędna ta pokrywa się z obszarem oznaczonym na fotografii numerem 5, w którym widoczna jest jedna z rys tworzących strefę zniszczenia ukośnego (rys. 4-42b). Dominująca rysa ukośna rozpoczyna się przy dolnej krawędzi belki, w przybliżeniu przy $x \approx 75$ cm, a następnie rozwija się w kierunku górnej krawędzi i prawego punktu przyłożenia siły. W tym samym obszarze profil górnego czujnika OS1 wykazuje wyraźną zmianę pomiędzy poziomami 60 i 70 % $F_{\max}$: odkształcenie, wcześniej ujemne, przy 70 % $F_{\max}$ przyjmuje lokalnie wartość dodatnią. Zbieżność położenia maksimum OS2 oraz zmiany odpowiedzi OS1 wskazuje na silne zaburzenie pola odkształceń obejmujące znaczną część

wysokości przekroju. Jest ono zgodne z rozwojem głębokiej rysy ukośnej od dolnej, rozciąganej części belki w kierunku jej górnej strefy. Na podstawie przedstawionych profili można zatem stwierdzić, że pomiędzy 60 i 70 % $F_{\max}$ nastąpiła wyraźna redystrybucja odkształceń w tym obszarze. Nie można natomiast jednoznacznie określić, czy przy 70 % $F_{\max}$ rysa osiągnęła już poziom czujnika OS1, ponieważ fotografia przedstawia stan belki po zakończeniu całej próby.



Rys. 4-42. *Rozkład odkształceń i końcowy obraz zarysowania Belki 5 - a) profile odkształcenia zarejestrowane przez czujniki OS1 i OS2.; b) końcowy obraz zarysowania zestawiony z położeniami maksimów OS2 przy 70 % $F_{\max}$.*

Na rysunku 4-43 zestawiono końcowy obraz zarysowania Belki 9 z rozkładami odkształceń zarejestrowanymi przez czujniki światłowodowe. Fotografia przedstawia stronę OS3, przeciwną do czynnego dolnego czujnika OS2. Przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$, czyli około 41,36 kN, w profilu OS2 wyróżniono cztery główne maksima, położone przy $x \approx 41{,}0$; 47,2; 56,7 oraz 62,7 cm. Największe odkształcenie, wynoszące około $5350\ \mu\varepsilon$, zarejestrowano w rejonie $x \approx 62{,}7$ cm.



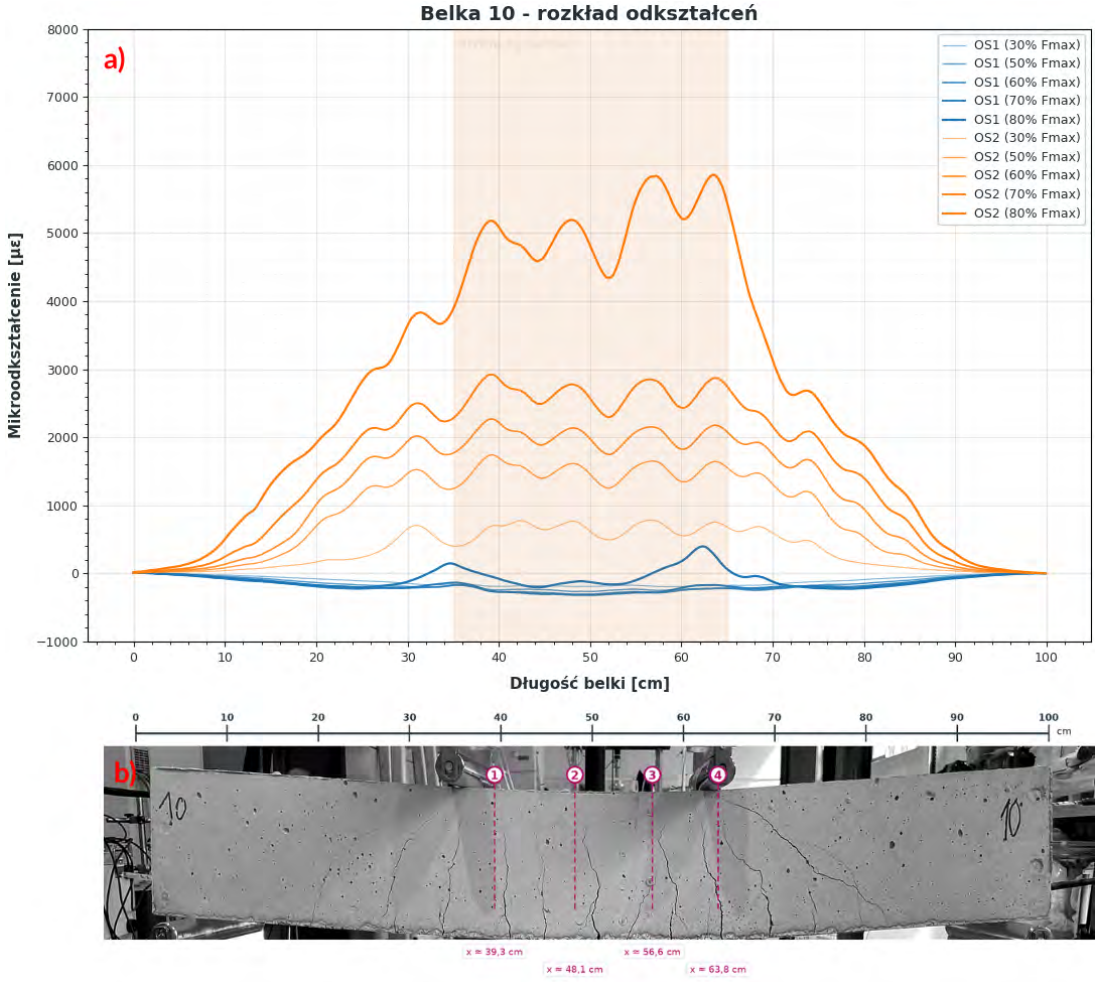
Rys. 4-43. *Rozkład odkształceń i końcowy obraz zarysowania Belki 9. a) Profile odkształcenia zarejestrowane przez czujniki OS1 i OS2. b) Końcowy obraz zarysowania zestawiony z położeniami maksimów OS2 przy 70 % $F_{\max}$. Fotografia przedstawia stronę OS3, przeciwną do czynnego OS2.*

Belka 9 wykazywała rozproszone zarysowanie na znacznej części długości. W strefie stałego momentu dominowały rysy zbliżone do pionowych, natomiast w kierunku podpór ich przebieg stawał się bardziej ukośny. Maksima OS2 przy około 41,0; 47,2; 56,7 i 62,7 cm przypadają na wyraźnie zarysowane pasma widoczne. W odróżnieniu od Belki 5 nie powstała jedna rysa, która zdominowałaby końcowy obraz zniszczenia.

Zwiększeniu obciążenia z 70 do 80 % $F_{\max}$ towarzyszył wzrost maksymalnej wartości odkształcenia z około 5350 do 8650 $\mu\varepsilon$, czyli o około 62 %. Przy 70 % $F_{\max}$ najwyższe maksimum występowało w rejonie $x \approx 62{,}7$ cm, natomiast przy 80 % $F_{\max}$ największą wartość zarejestrowano przy $x \approx 56{,}6$ cm. W pobliżu pierwszej z tych współrzędnych zaobserwowano rozwój kolejnej rysy, której początkowy odcinek znajdował się około 2 cm powyżej dolnej krawędzi belki. W tym samym przekroju lokalne zaburzenie profilu OS1 było widoczne już przy 60 % $F_{\max}$. Zbieżność przestrzenna obu obserwacji wskazuje, że rozwijająca się rysa mogła już na tym etapie wpływać na rozkład odkształceń w górnej części przekroju. Nie oznacza to jednak, że przy 60 % $F_{\max}$ rysa osiągnęła poziom czujnika OS1. Dodatkowo zmiana położenia

największej wartości nie świadczy o przemieszczeniu oraz zaniku wcześniejszej strefy lokalizacji. Przy 80 % $F_{\max}$ oba obszary nadal wykazywały znaczne odkształcenia, zmieniła się natomiast ich względna aktywność. Duży przyrost lokalnego odkształcenia w stosunku do przyrostu siły wskazuje na redystrybucję odkształceń pomiędzy sąsiednimi rysami oraz lokalne zmniejszenie sztywności elementu.

W Belce 10 siła odpowiadająca 70 % $F_{\max}$ wynosiła około 39,41 kN. Maksima profilu OS2 występowały w przybliżeniu przy $x = 39{,}3$; 48,1; 56,6 oraz 63,8 cm. Największa wartość przy tym poziomie obciążenia wynosiła około $2920\ \mu\varepsilon$ i była wyraźnie mniejsza niż w pozostałych trzech belkach. Profile i końcowy obraz zarysowania Belki 10 zestawiono na rysunku 4-44. Fotografia została wykonana od strony OS3, przeciwnej do czynnego OS2.



Rys. 4-44. *Rozkład odkształceń i końcowy obraz zarysowania Belki 10. a) Profile odkształcenia zarejestrowane przez czujniki OS1 i OS2. b) Końcowy obraz zarysowania zestawiony z położeniami maksimów OS2 przy 70 % $F_{\max}$. Fotografia przedstawia stronę OS3, przeciwną do czynnego OS2.*

Na fotografowanej powierzchni widocznych jest 12 rys, które rozwijają się od dolnej krawędzi. W części środkowej mają one przeważnie przebieg pionowy, a po prawej i lewej stronie stopniowo przechodzą w rysy ukośne. Położenia maksimów OS2 odpowiadają głównym pasmom zarysowania oznaczonym na rysunku 4-44b numerami od 1 do 4.

Odpowiedź Belki 10 zmieniła się wyraźnie pomiędzy 70 i 80 % $F_{\max}$. Przy 80 % $F_{\max}$ największe odkształcenie wzrosło do około 5850 $\mu\varepsilon$, przy czym główne maksimum wystąpiło w rejonie 57 cm oraz 63,6 cm. Wysokie wartości pojawiły się również przy około 39, 48 i 57 cm. Położenia stref lokalizacji pozostały więc podobne do obserwowanych wcześniej. Zasadniczej zmianie uległa przede wszystkim ich amplituda. Oznacza to, że pomiędzy 70 i 80 % $F_{\max}$ rozwinęły się istniejące już obszary koncentracji odkształceń, bez wyraźnego utworzenia nowego układu lokalizacji.

We wszystkich czterech belkach dolne czujniki rejestrowały dodatnie odkształcenia, które wraz ze wzrostem obciążenia skupiały się w kilku powtarzających się obszarach. Najczęściej występowały one w rejonach około 40–41, 46–48 oraz 56–64 cm. Powtarzalność położenia maksimów jest zgodna z podobną geometrią elementów i identycznym układem obciążenia.

Końcowy sposób uszkodzenia nie był jednak jednakowy. W Belce 3 zniszczenie skoncentrowało się w środkowej części elementu i objęło również górną strefę betonu. W Belce 5 obraz końcowy został zdominowany przez szeroko rozwartą rysę ukośną w prawym przęśle ścinania. Belki 9 i 10 zachowały bardziej rozproszony układ zarysowania, bez porównywalnego, miejscowego ubytku betonu.

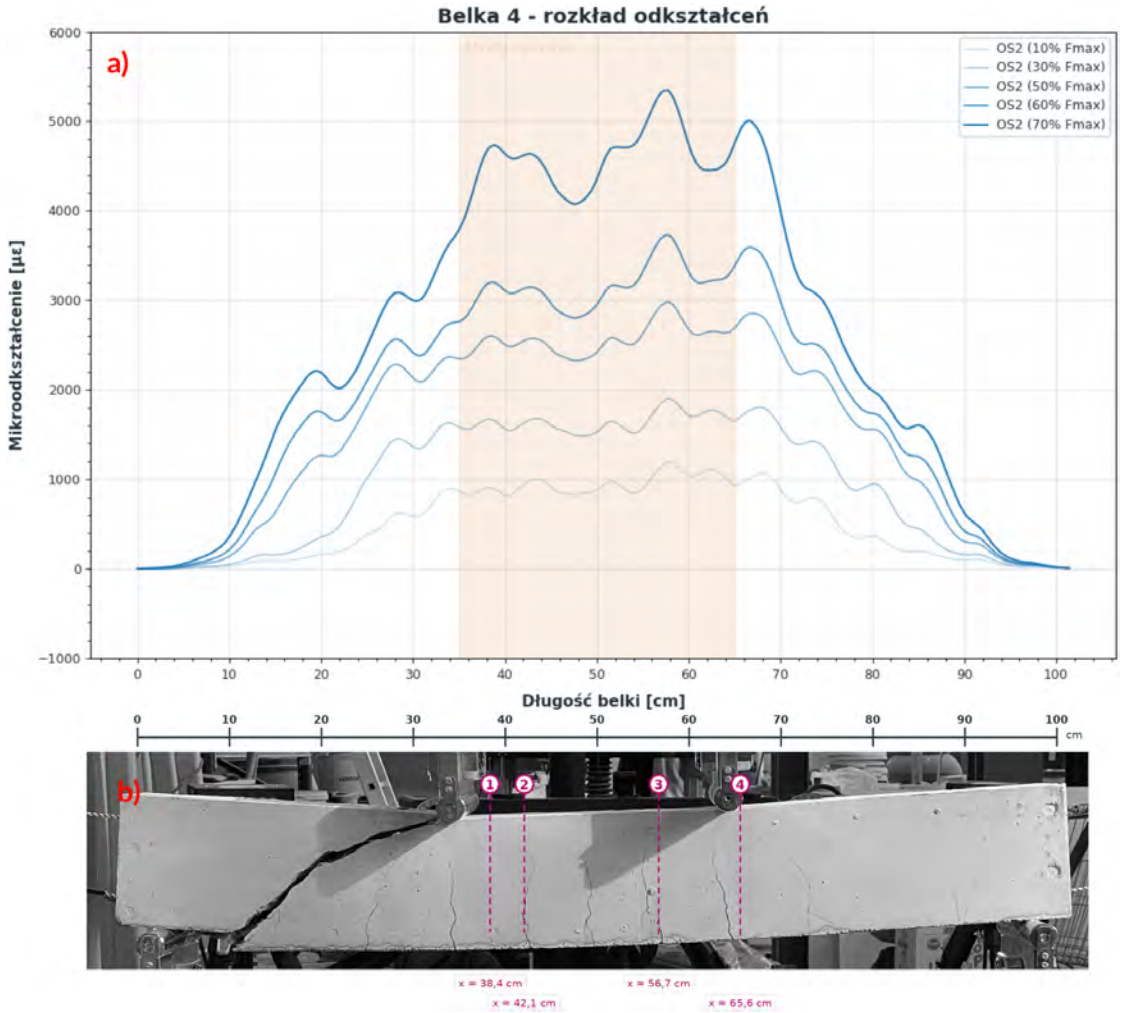
Belki z pojedynczym czujnikiem w dolnej strefie rozciąganej

W przypadku belek 2, 4 i 8 analizę oparto na sygnale z jednego sprawnego czujnika światłowodowego, umieszczonego w dolnej, rozciąganej części przekroju. W Belce 2 był to czujnik OS3, natomiast w belkach 4 i 8 – OS2. Maksymalna siła zarejestrowana podczas badania belki 2 wyniosła 60,93 kN, przy przemieszczeniu 20,31 mm, belki 4 wyniosła 55,01 kN, przy przemieszczeniu tłoka równym 14,73 mm. W przypadku Belki 8 osiągnięto 58,01 kN przy przemieszczeniu 20,07 mm. Nośność elementów była zbliżona, natomiast Belka 4 osiągnęła maksimum siły przy wyraźnie niższym przemieszczeniu tłoka.

Rozkłady odkształceń zarejestrowane wzdłuż czujników OS2 przy obciążeniach odpowiadających 10, 30, 50, 60 i 70 % $F_{\max}$ przedstawiono na rysunku 4-45 dla belki 4 oraz na rysunku 4-46 dla belki 8.

W obu belkach wartości zarejestrowane przez OS2 były dodatnie, co odpowiada rozciąganiu dolnej części przekroju. Odkształcenia zwiększały się wraz z obciążeniem, ale ich rozkład nie był równomierny. Już przy obciążeniu 10% $F_{\max}$ widoczne były lokalne zaburzenia profilu. W miarę postępu badania ich położenie pozostawało w przybliżeniu stałe, rosła natomiast amplituda poszczególnych maksimów. Oznacza to, że rozwój odkształceń skupiał się w określonych przekrojach, zamiast rozkładać się równomiernie na całej długości strefy zginanej.

W Belce 4, przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$, główne maksima występujące w nominalnej strefie stałego momentu znajdowały się w przybliżeniu przy $x = 38{,}4$; 42,1; 56,7 oraz 65,6 cm. Najwyższą wartość dla tego obciążenia, wynoszącą około 5350 $\mu\varepsilon$, zarejestrowano w rejonie 56,7 cm. Poza tą strefą widoczne były także lokalne wzrosty odkształcenia w rejonach około 19 i 28 cm. Te ostatnie zaburzenia moża odnieść do końcowego sposobu zniszczenia belki.

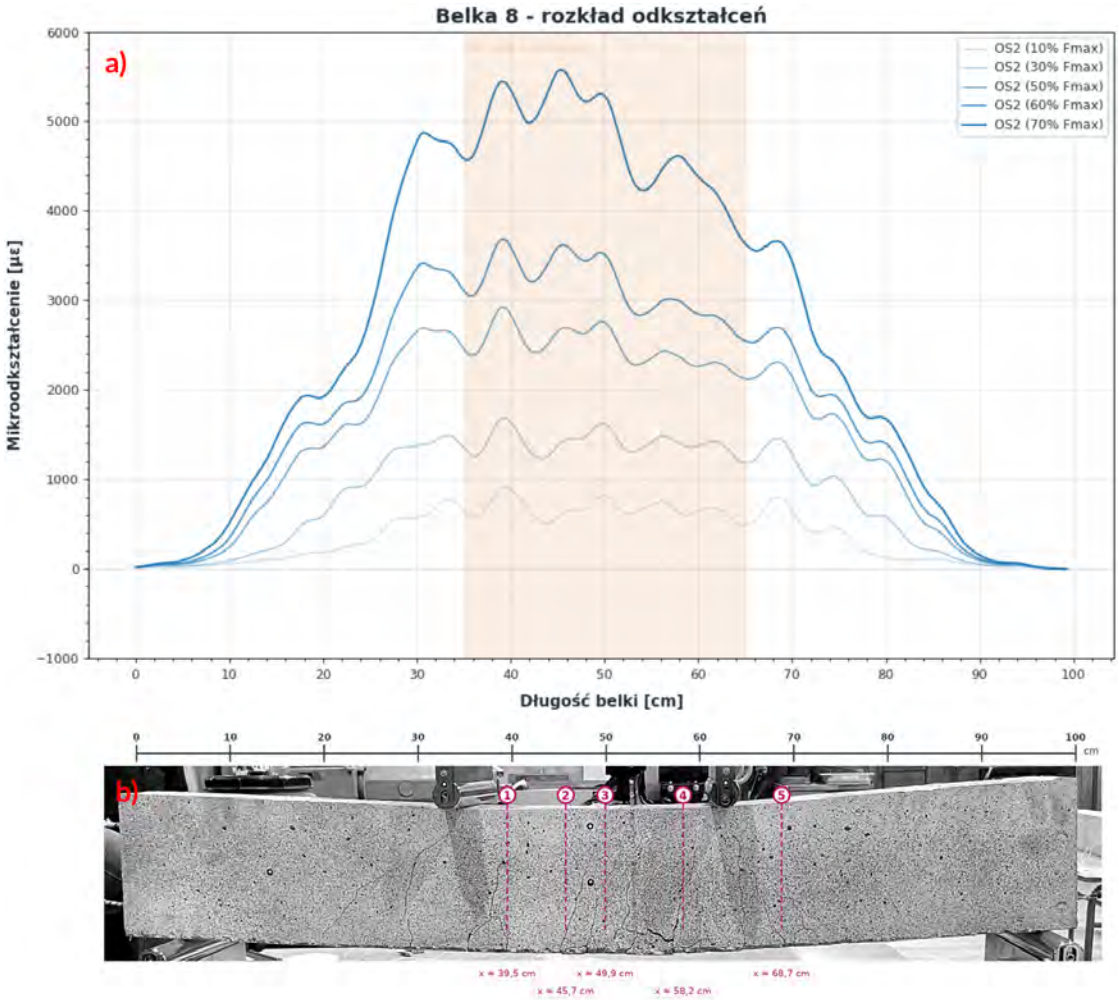


Rys. 4-45. *Profile odkształcenia wzdłuż czujnika OS2 w Belce 4 zarejestrowane przy obciążeniach równych 10, 30, 50, 60 i 70 % maksymalnej siły $F_{\max}$. Jasnym polem zaznaczono nominalną strefę przyłożenia obciążenia od 35-65 cm. Poniżej rozkładów odkształceń zaprezentowano końcowe obrazy zarysowań belki 4 i 8 wraz z przybliżonymi położeniami głównych maksimów profilu OS2.*

Na lewym odcinku Belki 4 powstała dominująca, szeroko rozwarta rysa ukośna, przechodząca przez całą wysokość elementu, która doprowadziła do zniszczenia próbki. Jej rzut na oś podłużną belki obejmuje szeroki zakres współrzędnych, a lokalne piki w rejonach około 19 i 28 cm są przestrzennie zgodne z obszarem przebiegu tej rysy.

Położenie dominującej rysy ukośnej wskazuje, że jej rozwój nastąpił w lewym przęśle ścinania, czyli pomiędzy podporą a punktem przyłożenia siły. W tym obszarze występowały jednocześnie moment zginający i siła poprzeczna. Najbardziej uzasadniona jest zatem interpretacja tej rysy jako efektu złożonego działania zginania i ścinania. Mogła ona powstać przez rozwinięcie wcześniej zainicjowanej rysy giętnej albo jako rysa związana z rozciąganiem ukośnym.

W rejonie $x \approx 47$ cm, mimo obecności rysy widocznej na fotografii końcowej, profil OS2 nie wykazywał lokalnego maksimum, lecz względne minimum pomiędzy sąsiednimi strefami koncentracji odkształceń. Czujnik rejestrował w tym miejscu nadal znaczne odkształcenie rozciągające, wynoszące przy 70 % $F_{\max}$ około 4100 $\mu\varepsilon$. Obniżenie wartości może wynikać



Rys. 4-46. *Profile odkształcenia wzdłuż czujnika OS2 w Belce 8 zarejestrowane przy obciążeniach równych 10, 30, 50, 60 i 70 % maksymalnej siły $F_{\max}$. Jasnym polem zaznaczono nominalną strefę przyłożenia obciążenia od 35-65 cm. Poniżej rozkładów odkształceń zaprezentowano końcowe obrazy zarysowań belki 4 i 8 wraz z przybliżonymi położeniami głównych maksimów profilu OS2..*

z redystrybucji odkształceń pomiędzy sąsiednimi, intensywniej rozwijającymi się rysami oraz z przekazywania siły między zbrojeniem i betonem na odcinku pomiędzy nimi.

W Belce 8 rozkład zarysowania był bardziej rozproszony. Przy 70 % $F_{\max}$ główne maksima profilu OS2 występowały w przybliżeniu przy $x = 39{,}5$; 45,7; 49,9; 58,2 oraz 68,7 cm. Największe odkształcenie, około $5580\ \mu\varepsilon$, zarejestrowano w rejonie 45,7 cm. Poszczególne strefy lokalizacji można rozpoznać również przy wcześniejszych poziomach obciążenia, gdzie stopniowo zwiększają swoją amplitudę. W tym przypadku porównanie z dokumentacją fotograficzną **??**b-b jest bardziej bezpośrednie, ponieważ fotografia przedstawia powierzchnię znajdującą się od strony czujnika OS2.

Na powierzchni Belki 8 widoczny jest układ licznych rys, zainicjowanych przy dolnej krawędzi elementu. W środkowej części belki ich przebieg jest przeważnie zbliżony do pionowego, co odpowiada dominującemu wpływowi zginania. W kierunku przęseł ścinania część rys zmienia nachylenie. Jest to zgodne ze zmianą stanu naprężenia poza obszarem położonym między

punktami przyłożenia sił.

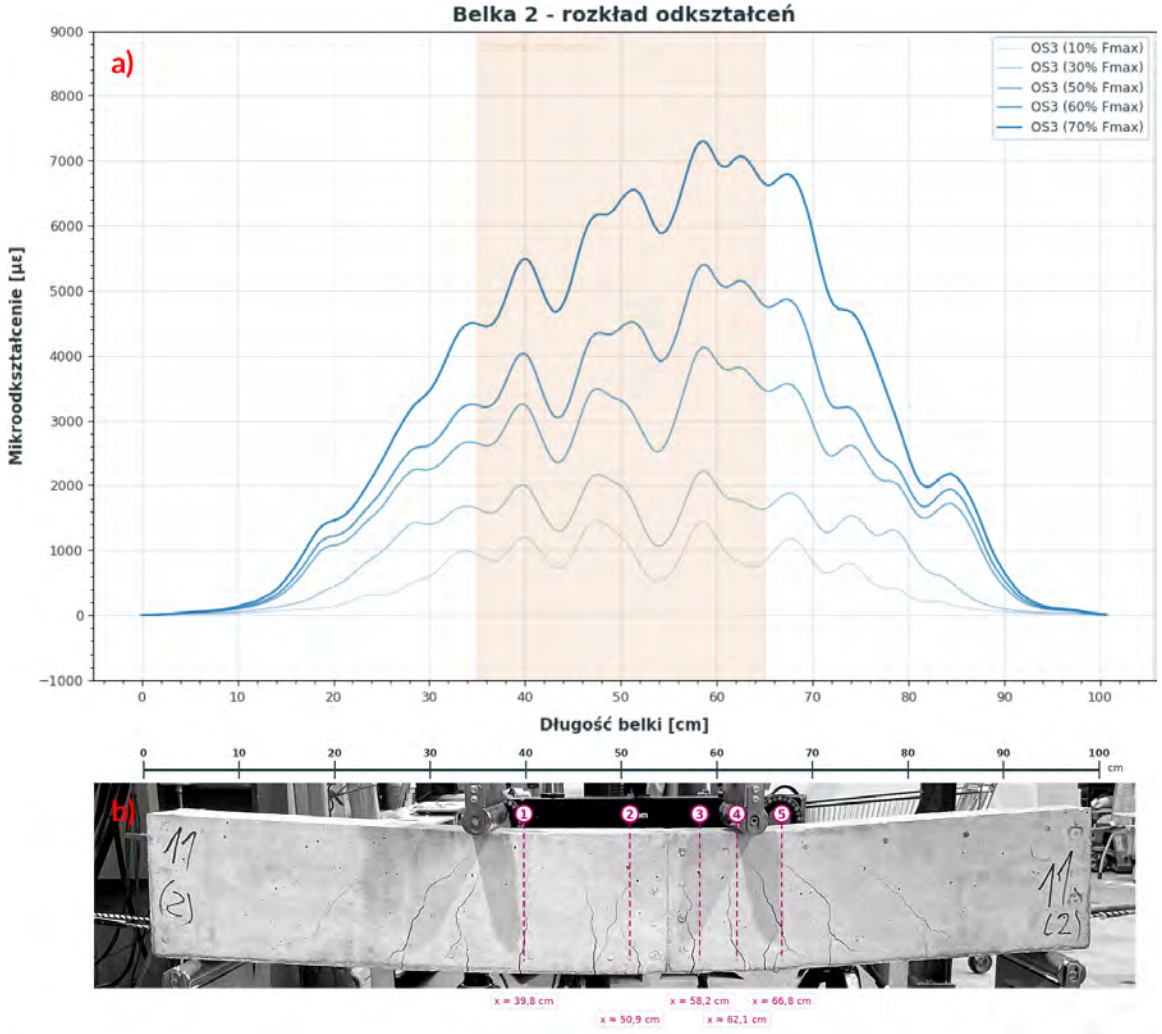
Porównanie obu elementów wskazuje na odmienny sposób lokalizacji uszkodzenia. W Belce 8 występowała większa liczba rys rozmieszczonych w środkowej części elementu, co odpowiada obszarowi bez zbrojenia poprzecznego. Profil OS2 zawierał kilka wyraźnych, utrzymujących swoje położenie maksimów. W Belce 4 końcowy obraz został zdominowany przez pojedynczą rysę ukośną o znacznym rozwarciu.

Końcowy obraz zarysowania Belki 2 zestawiono z położeniami wymienionych maksimów na rysunku 4-47. Fotografia przedstawia powierzchnię znajdującą się od strony czujnika OS3. W Belce 2 czujnik znajdował się w dolnej, rozciąganej części przekroju, na tej samej wysokości co czujniki OS2 zastosowane w belkach 4 i 8. Profile zarejestrowane przez OS3 miały róWnież wartości dodatnie i zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia. Początkowo rozkład odkształceń był równomiernie rozłożony. Przy kolejnych poziomach siły stawał się coraz bardziej nierównomierny, a lokalne maksima wyraźniej oddzielały się od otaczających fragmentów profilu. Ich położenie pozostawało przy tym zbliżone. Wskazuje to na stopniowy rozwój odkształceń w już aktywnych przekrojach belki.

Przy obciążeniu równym 70 % $F_{\max}$, czyli około 42,65 kN, główne maksima profilu OS3 znajdowały się w przybliżeniu przy $x = 39{,}8$; 50,9; 58,2; 62,1 oraz 66,8 cm. Odczytane z wykresu wartości wynoszą odpowiednio około 5500, 6570, 7320, 7090 i 6810 $\mu\varepsilon$. Największe odkształcenie zarejestrowano przy $x \approx 58{,}2$ cm. Wysokie wartości utrzymywały się również w sąsiednich przekrojach, szczególnie pomiędzy około 58 i 67 cm, gdzie dla tej części belki zidentyfikowano liczne rysy rozpoczynające się przy dolnej krawędzi elementu. Większość z nich podobnie jak w belce 8 ma przebieg zbliżony do pionowego, charakterystyczny dla zarysowania wywołanego zginaniem. Poza obszarem położonym między punktami przyłożenia sił część rys zmienia kierunek i przebiega ukośnie, co jest zgodne ze wzrastającym udziałem siły poprzecznej w przęsłach ścinania.

Pierwsze maksimum, przy $x \approx 39{,}8$ cm, odpowiada wyraźnej rysie rozwijającej się od dolnej krawędzi. Kolejne maksimum, przy około 50,9 cm, znajduje się w obrębie następnej aktywnej strefy zarysowania. Najsilniejsza koncentracja odkształceń, zarejestrowana przy około 58,2 cm, pokrywa się z jedną z głównych rys środkowej części belki. Maksima przy 62,1 i 66,8 cm przypadają natomiast na obszar kilku blisko położonych rys. W tym przypadku pojedyncze maksimum profilu może odzwierciedlać łączną odpowiedź czujnika na więcej niż jedną nieciągłość.

Zgodność przestrzenna profilu OS3 z układem zarysowania jest w Belce 2 szczególnie czytelna. Nie oznacza to jednak, że wszystkie rysy widoczne na fotografii były już rozwinięte przy 70 % $F_{\max}$. Zdjęcie wykonano po zakończeniu próby, dlatego zestawienie potwierdza zgodność położenia aktywnych stref, ale nie określa chwili powstania poszczególnych rys.



Rys. 4-47. *Końcowy obraz zarysowania Belki 2 zestawiony z przybliżonymi położeniami lokalnych maksimów profilu OS3 zarejestrowanego przy obciążeniu równym 10, 30, 5, 60 i 70 % $F_{\max}$. Fotografia przedstawia powierzchnię znajdującą się od strony czujnika OS3.*

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Główny cel rozprawy został osiągnięty w zakresie dotyczącym pultrudowanych prętów kompozytowych o przekroju okrągłym. Opracowano sposób osiowego wprowadzania światłowodu do struktury pręta bezpośrednio podczas ciągłego procesu pultruzji. Otrzymane elementy poddano następnie badaniom strukturalnym i mechanicznym, a ich przydatność do prowadzenia przestrzennie rozproszonych pomiarów odkształceń sprawdzono w warunkach obciążenia elementów betonowych.

Badania porównawcze prętów z zintegrowanym światłowodem i prętów referencyjnych wykazały różnice w zależności od ocenianej właściwości mechanicznej. W próbach rozciągania i ścinania średnie wartości wytrzymałości prętów ze światłowodem były niższe niż w serii referencyjnej. Przy zginaniu uzyskano natomiast wyższą średnią wartość maksymalnego naprężenia nominalnego, a w badaniu udarności większą średnią udarność. Średni moduł sprężystości przy rozciąganiu prętów z zintegrowanym światłowodem był o $4{,}14\,\%$ niższy niż w serii referencyjnej. Różnica ta była istotna statystycznie. Wyniki wskazują zatem na potrzebę oddzielnej oceny właściwości wytrzymałościowych i sztywności prętów, ponieważ podobny poziom wytrzymałości obu serii nie oznacza jednakowej odpowiedzi materiału na obciążenie.

Funkcję pomiarową opracowanych prętów sprawdzono po ich osadzeniu w belkach betonowych poddanych czteropunktowemu zginaniu. Zintegrowane światłowody umożliwiły rejestrację rozkładu odkształceń wzdłuż prętów na kolejnych poziomach obciążenia. Już przy początkowych poziomach obciążenia w profilach odkształceń widoczne były niewielkie lokalne maksima. Wraz ze wzrostem obciążenia i postępującym zarysowaniem betonu ich wartości zwiększały się, a koncentracje odkształceń stawały się coraz bardziej wyraźne. Położenia lokalnych maksimów odkształceń porównano z końcowym obrazem zarysowania belek. Stwierdzono, że wiele z nich występowało w obszarach odpowiadających rysom lub ich skupiskom widocznym na powierzchni betonu. Potwierdzono w ten sposób możliwość wykorzystania zintegrowanych światłowodów do monitorowania rozkładu odkształceń oraz identyfikowania stref ich lokalnej koncentracji.

Oceniono również zachowanie mechaniczne belek podczas czteropunktowego zginania. W serii badawczej, w której zbrojenie stalowe uzupełniono prętami GFRP z zintegrowanym światłowodem, średnia maksymalna wartość całkowitej siły obciążającej zarejestrowanej przez maszynę wytrzymałościową wyniosła $59{,}18$ kN. Dla belek referencyjnych, zawierających wyłącznie zbrojenie stalowe, uzyskano $44{,}51$ kN. Różnica pomiędzy seriami wyniosła $14{,}67$ kN, co odpowiada wzrostowi o $32{,}9\,\%$.

Średnie przemieszczenie tłoka maszyny wytrzymałościowej w chwili osiągnięcia maksymalnej siły obciążającej wyniosło $20{,}79$ mm dla belek ze zbrojeniem stalowym uzupełnionym prętami GFRP z zintegrowanym światłowodem oraz $22{,}42$ mm dla belek zawierających wyłącznie zbrojenie stalowe.

Belki z dodatkowymi prętami kompozytowymi przenosiły większe maksymalne obciążenia niż belki referencyjne. Uzyskany wynik dotyczy jednak porównania dwóch układów zbrojenia: stalowego oraz stalowego uzupełnionego prętami kompozytowymi ze światłowodem. Nie przeprowadzono badań trzeciej grupy belek, w której zastosowano by taką samą liczbę dodatkowych prętów GFRP, lecz bez zintegrowanych światłowodów. Z tego względu na podstawie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że belki z dodatkowym zbrojeniem kompozytowym osiągały większe wartości maksymalnej siły obciążającej, ale nie można określić, czy obecność światłowodu wewnątrz tych prętów miała wpływ na nośność belek.

5.1. Ocena realizacji celów naukowych

Cel naukowy 1 - określenie wpływu osiowo zintegrowanego światłowodu na właściwości mechaniczne prętów kompozytowych.

Realizację celu oparto na porównaniu wyników prób rozciągania, trójpunktowego zginania, ścinania pozornego oraz udarności prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem i prętów referencyjnych.

W próbie rozciągania średnia wytrzymałość prętów z wbudowanym światłowodem była o $3{,}98\,\%$ niższa od średniej wytrzymałości prętów referencyjnych. Różnica ta nie była istotna statystycznie. W tej samej próbie średni moduł sprężystości prętów z wbudowanym światłowodem był o $4{,}14\,\%$ niższy niż w serii referencyjnej, a stwierdzona różnica była istotna statystycznie.

W próbie trójpunktowego zginania średnia wartość maksymalnego naprężenia nominalnego prętów z wbudowanym światłowodem była o $7{,}72\,\%$ wyższa niż w przypadku prętów referencyjnych. Średnie wartości modułu sprężystości wyznaczonego przy zginaniu były zbliżone w obu seriach.

W badaniu ścinania pozornego średnia wytrzymałość prętów z wbudowanym światłowodem była o $5{,}35\,\%$ niższa od średniej wytrzymałości prętów referencyjnych. Wynik testu statystycznego znajdował się blisko przyjętej granicy istotności. W próbie udarności średnia wartość udarności prętów z wbudowanym światłowodem była natomiast o $9{,}27\,\%$ wyższa niż w serii referencyjnej.

Uzyskane wyniki wykazały różnice zależne od ocenianej właściwości mechanicznej. W części prób pręty z wbudowanym światłowodem osiągały niższe średnie wartości badanych parametrów, w pozostałych wyższe. Szczególne znaczenie miał wynik próby rozciągania, w której stwierdzono istotną statystycznie różnicę modułu sprężystości, podczas gdy różnica wytrzymałości na rozciąganie nie była istotna statystycznie. Przeprowadzone porównanie pozwoliło określić wielkość i kierunek różnic między badanymi seriami w zakresie ocenianych właściwości mechanicznych. Tym samym pierwszy cel naukowy został zrealizowany.

Cel naukowy 2 - ocena położenia i integralności światłowodu oraz struktury wewnętrznej kompozytu.

Do oceny położenia światłowodu, jego otoczenia materiałowego oraz struktury wewnętrznej pręta wykorzystano mikroskopię optyczną, skaningową mikroskopię elektronową i tomografię

komputerową. W analizowanym fragmencie pręta światłowód przebiegał w pobliżu osi geometrycznej, zachowując niemal prostoliniowy przebieg. Średnica jego części szklanej wyznaczona na podstawie obserwacji mikroskopowych wyniosła około $126\ \mu\mathrm{m}$, przy wartości nominalnej równej $125\ \mu\mathrm{m}$.

Analiza tomograficzna wykazała dominującą orientację włókien zbrojących wzdłuż osi pręta. Wartość składowej tensora orientacji a_{yy} wyniosła $0{,}86$, podczas gdy dla pozostałych kierunków uzyskano $a_{xx} = 0,08$ oraz $a_{zz} = 0,07$. Lokalnie wyznaczony udział fazy włóknistej wyniósł $64{,}33\,\%$.

Obserwacje potwierdziły zachowanie zasadniczej architektury zbrojenia kompozytowego w badanym fragmencie pręta. W obszarze połączenia powłoki światłowodu z osnową stwierdzono jednak miejscowe szczeliny, odspojenia oraz nieregularności struktury. Nie można jednoznacznie przypisać ich powstania procesowi integracji światłowodu, ponieważ część zaobserwowanych zmian mogła być następstwem przygotowania zgładów do badań mikroskopowych. Przeprowadzone analizy pozwoliły jednak na ocenę położenia światłowodu względem osi pręta oraz stan jego bezpośredniego otoczenia. Zakres obserwacji nie obejmował ilościowego wyznaczania odległości światłowodu od osi geometrycznej w kolejnych przekrojach.

Drugi cel naukowy został zatem zrealizowany w zakresie oceny strukturalnej badanego fragmentu pręta.

Cel naukowy 3 - charakterystyka obszaru połączenia światłowód–osnowa i ocena przenoszenia odkształceń.

Obserwacje mikroskopowe wykazały, że na przeważającej części badanego obwodu powłoka światłowodu pozostawała w bezpośrednim kontakcie z utwardzoną osnową żywiczną. W niektórych miejscach stwierdzono szczeliny i lokalne odspojenia. Nie ustalono jednoznacznie ich pochodzenia, ponieważ część zaobserwowanych nieciągłości mogła powstać podczas przygotowania zgładów. Wyniki pozwoliły zatem scharakteryzować obszar połączenia światłowodu z osnową, lecz nie stanowiły podstawy do przyjęcia, że kontakt na całym obwodzie był jednakowy.

Ocenę przenoszenia odkształceń przeprowadzono również na podstawie modelu analitycznego uwzględniającego przyjętą geometrię układu i właściwości materiałów. Obliczony współczynnik przenoszenia odkształceń wyniósł około 0,998. Wartość ta wskazuje, że w warunkach określonych założeniami modelu wpływ warstw pośrednich na przekazywanie odkształceń do światłowodu jest niewielki. Obliczenia nie uwzględniały jednak wszystkich lokalnych nieciągłości zaobserwowanych w badanym materiale. Wyniki modelowania uzupełniono badaniami belek betonowych. Zarejestrowane profile odkształceń zmieniały się wraz z obciążeniem, a położenie lokalnych koncentracji odpowiadało obszarom zarysowania. Potwierdziło to możliwość przekazywania odkształceń do wbudowanego światłowodu w badanym układzie, bez ilościowego wyznaczania dokładności tego przekazywania. Cel naukowy został osiągnięty w zakresie oceny strukturalnej połączenia oraz analitycznej i doświadczalnej oceny jego funkcji pomiarowej.

Cel naukowy 4 - określenie właściwości termicznych i reologicznych mieszanki żywicznej istotnych dla procesu pultruzji.

Badania reologiczne pozwoliły scharakteryzować zmiany lepkości mieszanki żywicznej

w warunkach istotnych dla przygotowania materiału i impregnacji włókien podczas pultruzji. Wraz ze wzrostem szybkości ścinania lepkość mieszanki malała, co wskazuje na jej właściwości rozrzedzane ścinaniem. Podczas badania prowadzonego w stałej temperaturze $40\,^{\circ}\mathrm{C}$ zaobserwowano stopniowy wzrost lepkości. W czasie objętym pomiarem mieszanka nie osiągnęła jednak punktu żelowania.

Wyniki różnicowej kalorymetrii skaningowej dostarczyły informacji o przebiegu reakcji utwardzania. W pomiarach dynamicznych, wraz ze zwiększaniem szybkości ogrzewania, temperatura maksimum efektu egzotermicznego wzrastała od około $117{,}17$ do $147{,}23\,^{\circ}\mathrm{C}$. Energia aktywacji wyznaczona metodą Kissingera wyniosła $53{,}83$ kJ/mol. W badaniach izotermicznych stwierdzono natomiast skrócenie czasu przebiegu zasadniczej części reakcji wraz ze wzrostem temperatury.

Otrzymane wyniki wykorzystano podczas doboru warunków prowadzenia procesu pultruzji. Charakterystyki reologiczne stanowiły podstawę oceny zachowania mieszanki podczas impregnacji włókien, natomiast badania kalorymetryczne dostarczyły danych dotyczących przebiegu utwardzania w różnych warunkach temperaturowych. W ten sposób zrealizowano cel obejmujący charakterystykę właściwości mieszanki żywicznej istotnych dla procesu wytwarzania prętów.

Cel naukowy 5 - ocena możliwości wykorzystania zintegrowanego światłowodu do przestrzennie rozproszonego pomiaru odkształceń w elemencie betonowym.

Funkcję pomiarową opracowanych prętów sprawdzono w belkach betonowych poddanych czteropunktowemu zginaniu. Belki badawcze zawierały zbrojenie stalowe uzupełnione dwoma lub trzema prętami kompozytowymi z wbudowanymi światłowodami. Pozwoliło to ocenić działanie czujników po przeprowadzeniu procesu pultruzji, przygotowaniu zakończeń światłowodów, montażu prętów w szkielecie zbrojenia i betonowaniu.

Podczas obciążania belek uzyskano przestrzenne profile odkształceń wzdłuż czynnych czujników światłowodowych. Ich przebieg zależał od poziomu obciążenia i położenia czujnika w przekroju. Światłowody umieszczone w dolnej, rozciąganej części belek rejestrowały dodatnie wartości odkształceń, natomiast czujniki znajdujące się w górnej strefie wykazywały przeważnie odkształcenia ściskające. Już przy niewielkich obciążeniach w części profili występowały lokalne maksima, których wartości zwiększały się w kolejnych etapach próby. W niektórych belkach obserwowano również zmianę względnej intensywności koncentracji odkształceń w sąsiednich obszarach.

Położenia głównych maksimów porównano z końcowym obrazem zarysowania powierzchni belek. Stwierdzono zgodność przestrzenną wielu maksimów z rysami lub ich skupiskami. Analiza ta miała charakter jakościowy, ponieważ fotografie wykonane po zakończeniu prób nie pozwalały określić chwili powstania poszczególnych rys. Ponadto przedstawione profile analizowano przy obciążeniach nieprzekraczających 80% maksymalnej siły osiągniętej przez daną belkę, ze względu na ograniczenia zakresu pomiarowego interrogatora przy większych lokalnych odkształceniach.

Wyniki potwierdziły możliwość prowadzenia przestrzennie rozproszonych pomiarów

odkształceń za pomocą światłowodów wbudowanych w pręty kompozytowe oraz rozpoznawania stref lokalnej koncentracji odkształceń w badanych belkach betonowych. W tym zakresie piąty cel naukowy został zrealizowany.

Cel naukowy 6 - porównanie wyników pomiarów rozproszonych z niezależnym pomiarem odniesienia.

Walidację wyników pomiarów rozproszonych przeprowadzono na dwóch uzupełniających się płaszczyznach. Pierwszą stanowiły pomiary siły obciążającej, rejestrowanej niezależnie przez maszynę wytrzymałościową. Na ich podstawie przyporządkowano przestrzenne profile odkształceń do poszczególnych poziomów obciążenia belek. Porównanie wykazało, że wraz ze wzrostem siły zwiększały się wartości odkształceń rejestrowanych przez światłowody, a w wybranych obszarach belek narastały ich lokalne koncentracje.

Drugą płaszczyzną weryfikacji było porównanie wyników pomiarów światłowodowych z dokumentacją fotograficzną zarysowania belek. Położenia lokalnych maksimów odkształceń zestawiono z obszarami występowania rys widocznych na powierzchni betonu. W wielu przypadkach stwierdzono zgodność przestrzenną tych lokalizacji, co potwierdziło związek rejestrowanych koncentracji odkształceń z obszarami zarysowania elementów.

Przeprowadzona walidacja potwierdziła zgodność odpowiedzi czujników światłowodowych ze zmianami obciążenia oraz przestrzennym rozmieszczeniem zarysowania. Szósty cel naukowy został zrealizowany w zakresie funkcjonalnej i przestrzennej weryfikacji pomiarów rozproszonych.

5.2. Ocena realizacji celów technologicznych i wdrożeniowych

Cele technologiczne koncentrowały się na opracowaniu sposobu wprowadzania światłowodu do prętów kompozytowych podczas ciągłego procesu pultruzji. Wymagało to dostosowania linii produkcyjnej do oddzielnego podawania światłowodu, utrzymywania go w pobliżu osi formowanego pręta oraz ograniczenia oddziaływań mechanicznych mogących prowadzić do jego uszkodzenia przed wejściem materiału do układu formującego. Opracowane rozwiązanie wykorzystano podczas wytwarzania kolejnych serii prętów. W rozprawie przedstawiono przebieg procesu i sposób włączenia poszczególnych operacji do linii pultruzyjnej. Szczegóły konstrukcyjne układu podawania i pozycjonowania światłowodu zachowano natomiast jako know-how technologiczne.

Przy doborze parametrów procesu wykorzystano wyniki badań reologicznych i kalorymetrycznych mieszanki żywicznej. Charakterystyki lepkości posłużyły do oceny zachowania mieszanki podczas impregnacji włókien, a wyniki badań kalorymetrycznych dostarczyły informacji o przebiegu reakcji utwardzania w różnych warunkach temperaturowych. Na tej podstawie dobierano warunki prowadzenia procesu pultruzji. Wytworzone pręty były o przekroju okrągłym i średnicy $3{,}15$ mm. Badania strukturalne wykazały, że w analizowanym fragmencie pręta światłowód przebiegał w pobliżu jego osi geometrycznej.

Osobnym zagadnieniem technologicznym było przygotowanie zakończeń światłowodu

znajdującego się wewnątrz utwardzonego pręta kompozytowego. Opracowano dwie metody jego odsłaniania: mechaniczną i chemiczną. Następnie określono sposób łączenia i zabezpieczania przygotowanych zakończeń oraz sprawdzania ciągłości toru optycznego. Przyjęta procedura umożliwiła podłączenie światłowodów do interrogatora i wykorzystanie prętów podczas badań laboratoryjnych oraz prób przeprowadzonych na belkach betonowych.

W ramach prac opracowano również autorskie oprogramowanie do analizy danych pomiarowych. Program umożliwiał synchronizację wyników pomiarów światłowodowych z danymi rejestrowanymi przez maszynę wytrzymałościową, przypisywanie profili odkształceń do określonych poziomów siły obciążającej, wybór analizowanych przedziałów pomiarowych oraz przygotowywanie zestawień i wykresów rozkładu odkształceń. Oprogramowanie wykorzystano do opracowania wyników kolejnych prób, co ułatwiło analizę dużych zbiorów danych według jednolitej procedury.

Cele technologiczne i wdrożeniowe zrealizowano w zakresie opracowania procesu ciągłego wytwarzania okrągłych prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem oraz przygotowania ich do prowadzenia pomiarów odkształceń. Próby dotyczące płaskich elementów kompozytowych wytwarzanych metodą infuzji miały charakter rozpoznawczy i nie zostały objęte pełną oceną właściwości mechanicznych oraz struktury wewnętrznej. Dalszych badań wymaga również powtarzalność położenia światłowodu w prętach wytwarzanych w długich seriach produkcyjnych oraz trwałość opracowanego rozwiązania w warunkach eksploatacyjnych. Przeprowadzone prace potwierdziły natomiast wykonalność przyjętej metody integracji światłowodu podczas pultruzji i możliwość wykorzystania otrzymanych prętów do pomiarów odkształceń w badanych elementach betonowych.

5.3. Weryfikacja hipotez badawczych

Weryfikację hipotez przeprowadzono oddzielnie dla funkcji pomiarowej opracowanych prętów oraz ich właściwości mechanicznych. Pierwszą hipotezę oceniono na podstawie wyników pomiarów odkształceń uzyskanych podczas czteropunktowego zginania belek betonowych. Podstawę weryfikacji drugiej stanowiły porównawcze badania mechaniczne prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem oraz prętów referencyjnych.

Hipoteza 1: Integracja kompozytowych prętów zbrojeniowych z wbudowanym czujnikiem światłowodowym w strukturę konstrukcji betonowej / kompozytowej pozwala na ciągłe monitorowanie zmian odkształceń elementów wielkogabarytowych - potwierdzono.

Pręty kompozytowe z wbudowanym światłowodem, osadzone w belkach betonowych, umożliwiły rejestrację przestrzennego rozkładu odkształceń podczas czteropunktowego zginania. Na kolejnych poziomach obciążenia obserwowano wzrost wartości odkształceń oraz zmiany lokalnych koncentracji występujących w profilach pomiarowych. W wielu przypadkach położenia głównych maksimów odkształceń odpowiadały obszarom występowania rys lub ich skupisk widocznych na fotografiach wykonanych po zakończeniu badań, co szczegółowo przedstawiono w podrozdziale 4.5.2. Zarejestrowane profile pozwoliły również zaobserwować zmiany intensyw-

ności odkształceń pomiędzy sąsiednimi strefami ich koncentracji.

Wykazano, że czynne światłowody zachowały funkcję pomiarową po procesie pultruzji, przygotowaniu zakończeń, montażu prętów w szkielecie zbrojenia oraz betonowaniu. Podczas obciążania belek rejestrowano zarówno zmiany ogólnego rozkładu odkształceń wzdłuż prętów, jak i lokalne koncentracje związane z pracą zarysowanego betonu. Hipotezę 1 potwierdzono w zakresie badanych elementów betonowych i zastosowanego schematu obciążenia. Wyniki stanowią podstawę do dalszej oceny możliwości wykorzystania opracowanej technologii do monitorowania rzeczywistych konstrukcji wielkogabarytowych.

Hipoteza 2: Integracja czujników światłowodowych w wybranych strukturach kompozytowych nie wpływa na obniżenie ich wytrzymałości - potwierdzono.

Weryfikację hipotezy 2 oparto na porównaniu właściwości mechanicznych prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem i prętów referencyjnych, wytworzonych bez światłowodu. Program obejmował próby rozciągania, trójpunktowego zginania, ścinania pozornego oraz udarności. Uzyskane wyniki różniły się w zależności od rodzaju obciążenia. W próbach rozciągania i ścinania średnie wartości wytrzymałości były niższe w serii z wbudowanym światłowodem, natomiast przy zginaniu i w badaniu udarności uzyskano wyższe średnie wartości odpowiednich parametrów.

Różnice średnich wartości badanych parametrów wytrzymałościowych względem serii referencyjnej mieściły się w zakresie od $-5{,}35\,\%$ do $+9{,}27\,\%$. W próbie rozciągania średnia wytrzymałość prętów z wbudowanym światłowodem była niższa o $3{,}98\,\%$, jednak różnica ta nie była istotna statystycznie. Osobno oceniono moduł sprężystości przy rozciąganiu, którego średnia wartość w serii z wbudowanym światłowodem była niższa o $4{,}14\,\%$. W tym przypadku różnica była istotna statystycznie i dotyczyła sztywności osiowej.

Wyniki badań wspierają hipotezę 2 w zakresie ocenianych właściwości wytrzymałościowych prętów GFRP o przekroju okrągłym, ponieważ nie stwierdzono jednakowego kierunku zmian parametrów wytrzymałościowych we wszystkich przeprowadzonych próbach. Należy jednak uwzględnić, że brak istotnej statystycznie różnicy w poszczególnych badaniach nie stanowi dowodu całkowitego braku obniżenia wytrzymałości. Weryfikacja hipotezy dotyczyła prętów o przekroju okrągłym, dla których przeprowadzono pełny program badań porównawczych. W przypadku profili prostokątnych wykazano możliwość technologicznej integracji światłowodu, natomiast ocena wpływu tego rozwiązania na ich właściwości mechaniczne wymaga dalszych badań.

5.4. Realizacja zadań indywidualnego planu badawczego

Prace realizowane w ramach indywidualnego planu badawczego dostosowywano do potrzeb weryfikacji przyjętych hipotez oraz wyników uzyskiwanych na kolejnych etapach badań. W obszarze modelowania numerycznego przygotowano model pręta i określono warunki brzegowe. Na dalszym etapie uznano jednak, że przeprowadzenie pełnej analizy metodą elementów skończonych nie jest konieczne do osiągnięcia celów rozprawy. Weryfikację hipotez oparto

na wynikach badań mechanicznych prętów oraz pomiarów światłowodowych prowadzonych w belkach betonowych.

Z1. Przeprowadzono analizę stanu wiedzy dotyczącą monitorowania stanu konstrukcji i rozproszonych pomiarów światłowodowych w rozdziale 1.1 oraz metod integracji światłowodów z materiałami kompozytowymi opisanych w przeglądzie literatury 2.2. Analiza pozwoliła określić wymagania materiałowe, technologiczne i pomiarowe dla opracowywanego rozwiązania.

Z2. Przeanalizowano właściwości światłowodów dostępnych na rynku oraz opisanych w literaturze przedmiotu. Do integracji z kompozytem wybrano światłowód jednomodowy, którego charakterystykę przedstawiono w podrozdziale 2.1.1. Opracowano procedury przygotowania zakończeń światłowodu (3.3.1), wykonywania połączeń spawanych (3.3.2), ich zabezpieczania (3-21) oraz kontroli ciągłości toru optycznego (3.3.3).

Z3. Właściwości kompozycji żywicznej określono na podstawie badań reologicznych opisanych w podrozdziale 4.2 oraz różnicowej kalorymetrii skaningowej przedstawionej w podrozdziale 4.3. Wyznaczono wpływ temperatury na lepkość i przebieg sieciowania, a wyniki wykorzystano przy doborze warunków cieplnych oraz prędkości procesu pultruzji.

Z4. Jako podstawową technologię ciągłego wytwarzania wybrano pultruzję. Opracowano koncepcję osiowego wprowadzania światłowodu na podstawie analizy literatury opisanej w podrozdziale 2.2 oraz dostosowano linię technologiczną do prowadzenia światłowodu równolegle ze zbrojeniem szklanym.

Z5. Opracowano sposób ciągłego podawania światłowodu, utrzymywania jego naciągu oraz pozycjonowania względem wiązki rovingów (3.1.3). Przygotowano również procedury mechanicznego i chemicznego odsłaniania zakończeń światłowodu z utwardzonej osnowy kompozytowej, opisane w podrozdziale 3.3.1. Umożliwiły one wykonanie połączeń z zewnętrznym torem optycznym.

Z6. Wytworzono profile kompozytowe z zintegrowanym światłowodem, w tym pręty o przekroju okrągłym, które przedstawiono na fotografii 3-1 oraz próbne elementy o przekroju prostokątnym (płaskie próbki), które opisano w metodologii w podrozdziale 3.1.4. Dla prętów okrągłych przygotowano serie ze światłowodem i bez światłowodu przeznaczone do bezpośrednich badań porównawczych.

Z7. Geometrię prętów, ich strukturę wewnętrzną oraz obszar połączenia światłowodu z osnową oceniono za pomocą mikroskopii optycznej (4.1.1), skaningowej mikroskopii elektronowej (4.1.2) oraz rentgenowskiej tomografii komputerowej (4.1.3). Badania wykazały,

że w analizowanym fragmencie pręta światłowód przebiegał w pobliżu jego osi geometrycznej.

Z8. Przeprowadzono badania porównawcze prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem oraz prętów referencyjnych. Program badawczy obejmował próby rozciągania (3.2.6), trójpunktowego zginania (3.2.7), ścinania pozornego (3.2.8) oraz udarności (3.2.9). Wyniki badań poddano analizie statystycznej i wykorzystano do weryfikacji hipotezy 2. Szczegółowe rezultaty przedstawiono w podrozdziale 4.4.

Z9. Opracowano model analityczny opisujący przenoszenie odkształceń pomiędzy kompozytem a osiowo umieszczonym światłowodem. Przygotowano również model numeryczny pręta, określono warunki brzegowe oraz wykonano dyskretyzację siatką elementów skończonych, przedstawioną na rysunku 2-6. Nie przeprowadzono jednak obliczeń metodą elementów skończonych oraz nie porównano ich wyników z badaniami mechanicznymi. Zadanie Z9 zostało zrealizowane częściowo. Odstąpienie od dalszych analiz numerycznych nie uniemożliwiło weryfikacji hipotez, którą przeprowadzono na podstawie wyników eksperymentalnych.

Z10. Pręty kompozytowe z wbudowanym światłowodem zastosowano w belkach betonowych ze zbrojeniem stalowym. Przeprowadzono próby czteropunktowego zginania zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 3.4.2. Ocenę odpowiedzi mechanicznej belek przedstawiono w podrozdziale 4.5.1, natomiast analizę przestrzennych profili odkształceń, stanowiącą podstawę weryfikacji hipotezy 1, omówiono w podrozdziale 4.5.2.

Z11. Dane z pomiarów światłowodowych powiązano z przebiegiem obciążenia i udokumentowanym obrazem zarysowania belek. Opracowano autorskie oprogramowanie do przetwarzania, synchronizacji, analizy i wizualizacji przestrzennych profili odkształceń, przedstawione w podrozdziale 3.4.4. Weryfikację wyników pomiarowych przeprowadzono w zakresie funkcjonalnym i przestrzennym.

Zrealizowane zadania obejmują wszystkie zasadnicze etapy przewidziane w indywidualnym planie badawczym: dobór materiałów i technologii, modelowanie, wytworzenie próbek, badania strukturalne i mechaniczne, integrację prętów z docelowymi elementami betonowymi oraz opracowanie narzędzi do analizy danych. Zadania dotyczące badań porównawczych prętów stanowiło podstawę weryfikacji hipotezy 2, natomiast badania belek betonowych i analiza wyników pomiarów rozproszonych umożliwiły weryfikację hipotezy 1.

5.5. Najważniejsze osiągnięcia i ograniczenia pracy

Najważniejszym rezultatem rozprawy jest opracowanie technologii wytwarzania pultrudowanych prętów kompozytowych, w których światłowód pomiarowy zostaje trwale zintegrowany

z kompozytem podczas jego formowania. Uzyskany element pełni jednocześnie funkcję konstrukcyjną i pomiarową. Zakres pracy objął cały proces rozwoju rozwiązania: od doboru materiałów i parametrów pultruzji, przez zaprojektowanie układu podawania światłowodu, po badania prętów oraz ich zastosowanie w elementach betonowych.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczono:

- opracowanie sposobu ciągłego podawania i osiowego pozycjonowania światłowodu w wiązce rovingów szklanych podczas pultruzji;
- dostosowanie linii technologicznej do wytwarzania prętów kompozytowych z zintegrowanym światłowodem oraz dobór warunków procesu na podstawie charakterystyki reologicznej i kalorymetrycznej mieszanki żywicznej;
- opracowanie procedur przygotowania światłowodu, kontroli ciągłości toru optycznego, odsłaniania jego zakończeń z utwardzonego kompozytu oraz wykonywania połączeń światłowodowych;
- potwierdzenie możliwości zachowania uporządkowanej struktury włóknistej kompozytu i zbliżonego do osiowego przebiegu światłowodu w analizowanych fragmentach prętów;
- określenie różnic we właściwościach mechanicznych kompozytowych prętów z wbudowanym światłowodem i prętów referencyjnych na podstawie porównawczych badań rozciągania, trójpunktowego zginania, ścinania pozornego i udarności;
- wykazanie, że światłowód zintegrowany z prętem zachowuje zdolność do przestrzennie rozproszonego pomiaru odkształceń po przejściu procesu pultruzji, przygotowaniu zbrojenia, betonowaniu i obciążeniu elementu;
- zastosowanie prętów z wbudowanym światłowodem w belkach betonowych oraz wykazanie przestrzennej zgodności lokalnych koncentracji odkształceń z obszarami zarysowania udokumentowanymi na powierzchni elementów;
- opracowanie oprogramowania wspomagającego synchronizację, przetwarzanie i wizualizację danych pochodzących z rozproszonych pomiarów światłowodowych i maszyny wytrzymałościowej.

Zakres przeprowadzonych badań wyznacza jednocześnie granice formułowanych wniosków. Pełny program porównawczy właściwości mechanicznych wykonano dla prętów o przekroju okrągłym. W przypadku profili prostokątnych potwierdzono możliwość ich wytwarzania z zintegrowanym światłowodem, natomiast ich właściwości mechaniczne wymagają osobnej, rozszerzonej oceny.

Badania mikroskopowe i tomograficzne dotyczyły wybranych fragmentów prętów. Pozwoliły one ocenić lokalne położenie światłowodu, strukturę kompozytu i obszar połączenia światłowód–osnowa, lecz nie obejmowały ilościowego śledzenia położenia światłowodu na całej długości elementów ani statystycznej oceny tego położenia w dużej partii produkcyjnej.

Weryfikację funkcji pomiarowej przeprowadzono na podstawie porównania profili odkształceń z przebiegiem siły obciążającej oraz końcowym obrazem zarysowania belek. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość rejestrowania przestrzennego rozkładu odkształceń i identyfi-

kowania stref ich lokalnej koncentracji. Podczas badań zgromadzono również dane z systemu ARAMIS, jednak w niniejszej rozprawie nie przeprowadzono ich ilościowego porównania z wynikami pomiarów światłowodowych. Przedstawiona weryfikacja miała charakter funkcjonalny i przestrzenny, bez wyznaczania błędu wskazań opracowanych czujników względem niezależnego pomiaru odkształceń.

W badaniach czteropunktowego zginania porównano dziesięć belek, w których zbrojenie stalowe uzupełniono prętami GFRP z wbudowanym światłowodem, z trzema belkami zawierającymi wyłącznie zbrojenie stalowe. Zaobserwowane różnice maksymalnej siły obciążającej dotyczą zatem dwóch odmiennych układów zbrojenia. Ponieważ nie przeprowadzono badań belek zawierających dodatkowe pręty GFRP bez światłowodu, nie można określić, czy sama obecność światłowodu miała wpływ na nośność elementów. Przy interpretacji wyników należy również uwzględnić mniejszą liczebność grupy referencyjnej.

Program badań obejmował obciążenia krótkotrwałe prowadzone w warunkach laboratoryjnych. Trwałość toru optycznego, stabilność połączenia światłowód–osnowa oraz zachowanie prętów podczas długotrwałego, cyklicznego i środowiskowego oddziaływania pozostają zagadnieniami wymagającymi dalszej weryfikacji.

5.6. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych prac technologicznych i badawczych sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Hipotezę 1 potwierdzono w zakresie badań laboratoryjnych belek betonowych poddanych czteropunktowemu zginaniu. Pręty kompozytowe z wbudowanym światłowodem umożliwiły rejestrację przestrzennego rozkładu odkształceń podczas kolejnych etapów obciążania oraz identyfikowanie obszarów ich lokalnej koncentracji. Badania nie obejmowały długotrwałego monitorowania konstrukcji w warunkach eksploatacyjnych.
- Wyniki porównawczych badań mechanicznych wspierają hipotezę 2 w zakresie właściwości wytrzymałościowych prętów kompozytowych o przekroju okrągłym. W zależności od rodzaju próby średnie wartości badanych parametrów wytrzymałościowych prętów z wbudowanym światłowodem były wyższe lub niższe niż w serii referencyjnej. Nie stwierdzono więc jednakowego kierunku zmian we wszystkich przeprowadzonych próbach. W badaniu rozciągania wykazano natomiast istotną statystycznie różnicę modułu sprężystości, którego średnia wartość była niższa w serii prętów z wbudowanym światłowodem. W przypadku profili prostokątnych wpływ integracji światłowodu na właściwości mechaniczne wymaga dalszej oceny.
- Główny cel rozprawy osiągnięto w zakresie opracowania i eksperymentalnej weryfikacji technologii osiowej integracji światłowodu z okrągłymi prętami kompozytowymi. Otrzymane pręty łączą zdolność do przenoszenia obciążeń z funkcją przestrzennie rozproszonego czujnika odkształceń i mogą stanowić podstawę dalszego rozwoju systemów monitorowania konstrukcji betonowych.

- Możliwe jest osiowe wprowadzenie światłowodu pomiarowego do pultrudowanego pręta kompozytowego bez przerywania ciągłości procesu wytwarzania. Opracowany układ podawania i pozycjonowania pozwolił uzyskać element kompozytowy zawierający ciągły tor optyczny.
- Charakterystyka reologiczna i kalorymetryczna mieszanki żywicznej umożliwiła powiązanie zmian jej lepkości i przebiegu utwardzania z warunkami panującymi podczas pultruzji. Wyniki wykorzystano przy doborze parametrów procesu i ocenie warunków oddziałujących na światłowód.
- Badania mikroskopowe i tomograficzne potwierdziły zbliżony do osiowego i prostoliniowy przebieg światłowodu w analizowanym fragmencie pręta oraz zachowanie dominującej orientacji włókien szklanych wzdłuż jego osi. Obserwowane nieciągłości miały charakter lokalny.
- Porównanie właściwości wytrzymałościowych okrągłych prętów kompozytowych z wbudowanym światłowodem i prętów referencyjnych wykazało różnice zależne od rodzaju przeprowadzonej próby. Średnie wartości ocenianych parametrów wytrzymałościowych w serii z wbudowanym światłowodem różniły się od wyników serii referencyjnej w zakresie od $-5{,}35\,\%$ do $+9{,}27\,\%$.
- W próbie rozciągania średni moduł sprężystości prętów z wbudowanym światłowodem był o $4{,}14\,\%$ niższy od średniego modułu sprężystości prętów referencyjnych. Różnica ta była istotna statystycznie i wskazuje na odmienną sztywność osiową badanych serii.
- Światłowody zachowały funkcję pomiarową po przeprowadzeniu procesu pultruzji, przygotowaniu zakończeń prętów, wykonaniu połączeń optycznych oraz betonowaniu. Podczas czteropunktowego zginania belek uzyskano przestrzenne profile odkształceń, w których wraz ze wzrostem obciążenia zwiększały się wartości lokalnych maksimów. Ich położenia były zgodne z obszarami zarysowania udokumentowanymi na powierzchni belek.
- W badaniach czteropunktowego zginania średnia z maksymalnych wartości całkowitej siły obciążającej wyniosła $59{,}18$ kN dla belek ze zbrojeniem stalowym uzupełnionym prętami GFRP z wbudowanym światłowodem oraz $44{,}51$ kN dla belek zawierających wyłącznie zbrojenie stalowe. Różnica średnich wyniosła $14{,}67$ kN, czyli $32{,}9\,\%$. Badaniami objęto dziesięć belek z dodatkowym zbrojeniem kompozytowym oraz cztery belki referencyjne, przy czym wynik jednej z belek referencyjnych wyłączono z analizy ze względu na błąd metodologiczny podczas przeprowadzania próby. Mniejsza liczebność grupy referencyjnej ogranicza precyzję oszacowania średniej maksymalnej siły obciążającej dla tej grupy.
- Opracowane oprogramowanie umożliwiło połączenie danych optycznych z przebiegiem obciążenia oraz analizę zmian przestrzennych profili odkształceń. Stanowi ono integralny element przygotowanego rozwiązania pomiarowego.

5.7. Kierunki dalszych badań

Dalszy rozwój opracowanego rozwiązania powinien koncentrować się na przejściu od potwierdzenia jego wykonalności do uzyskania wiarygodnego i powtarzalnego systemu monitorowania konstrukcji. Wymaga to przede wszystkim rozszerzenia programu badań, kalibracji prętów oraz rozwoju metod interpretacji danych. Proponowane prace powinny obejmować następujące obszary:

- Badania pilotażowe obejmujące przejście od elementów betonowych w skali laboratoryjnej do demonstratorów oraz wybranych elementów rzeczywistych konstrukcji. Pozwoli to ocenić zachowanie czujników w bardziej złożonych stanach obciążenia i zróżnicowanych warunkach otoczenia.
- Kalibracja prętów pomiarowych, której celem będzie ilościowe określenie zależności pomiędzy odkształceniem pręta a wartością rejestrowaną przez wbudowany światłowód. Program badań powinien obejmować ocenę czułości, powtarzalności oraz stabilności wskazań podczas kolejnych cykli obciążenia. Ważnym elementem będzie również eksperymentalne wyznaczenie współczynnika przenoszenia odkształceń pomiędzy kompozytem a światłowodem i porównanie uzyskanego wyniku z wartością obliczoną na podstawie modelu analitycznego. Pozwoli to ocenić znaczenie rodzaju powłoki światłowodu oraz jakości połączenia pomiędzy materiałami.
- Rozszerzenie programu badań elementów betonowych o kolejne eksperymenty z różnym typem zbrojenia metalicznego i niemetalicznego. Pozwoli to określić wpływ pręta kompozytowego i wpływ integracji światłowodu. Wskazane jest zwiększenie liczebności serii oraz objęcie badaniami obciążeń cyklicznych, wielokrotnego otwierania rys i stanów poprzedzających zniszczenie elementu.
- Budowa bazy wyników eksperymentalnych pochodzących z większej liczby prób przeprowadzanych według powtarzalnych procedur. Profile odkształceń powinny być zestawiane z poziomem obciążenia, przemieszczeniem, położeniem i szerokością rys oraz wynikami niezależnych metod pomiarowych. Zgromadzenie takich danych umożliwi dalszą analizę zmian związanych z pracą konstrukcji, wpływem temperatury, zakłóceniami pomiarowymi oraz lokalnymi zaburzeniami toru optycznego.
- Rozwój oprogramowania do analizy wyników pomiarowych powinien obejmować automatyczną kontrolę jakości danych, filtrowanie sygnału, porównywanie kolejnych stanów obciążenia oraz kompensację wpływu temperatury. Kolejnym etapem będzie opracowanie algorytmów identyfikujących lokalne zmiany profili odkształceń, umożliwiających lokalizację stref zarysowania i ocenę zmian ich aktywności podczas obciążania. System powinien również umożliwiać tworzenie stanu odniesienia, określanie progów ostrzegawczych, ocenę wiarygodności wskazań oraz prezentowanie historii pracy monitorowanego elementu.
- Walidacja metrologiczna i interpretacyjna powinna obejmować ilościowe porównanie wyników pomiarów rozproszonych z niezależnymi pomiarami odkształceń. W pierw-

szej kolejności można wykorzystać dane zarejestrowane podczas badań belek za pomocą systemu ARAMIS, których analiza porównawcza nie została przeprowadzona w niniejszej rozprawie. Dalsze badania mogą również obejmować pomiary z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych i ekstensometrów. Porównanie powinno uwzględniać wartości odkształceń, dokładność lokalizacji stref ich koncentracji oraz różnice pomiędzy odpowiedziami poszczególnych metod pomiarowych. Umożliwi to ocenę dokładności, powtarzalności i przestrzennej zdolności rozdzielczej opracowanego układu.

- Badania powinny objąć również wpływ długotrwałego i cyklicznego obciążenia, pełzania, zawilgocenia, zmian temperatury oraz środowiska alkalicznego charakterystycznego dla betonu. Osobnej oceny wymagają zakończenia światłowodów, połączenia spawane i sposoby ich zabezpieczenia w warunkach eksploatacyjnych, ponieważ elementy te decydują o niezawodności toru optycznego podczas eksploatacji konstrukcji.
- Opracowanie systemu zdalnego monitorowania konstrukcji wykorzystującego pręty kompozytowe z wbudowanymi światłowodami. Prowadzenie pomiarów wymaga połączenia światłowodowego pomiędzy czujnikami a jednostką interrogacyjną, natomiast transmisja przetworzonych wyników do systemu nadrzędnego może odbywać się bezprzewodowo. Rozwiązanie wymaga umieszczenia interrogatora w pobliżu monitorowanej konstrukcji, zapewnienia jego stałego lub autonomicznego zasilania, ochrony przed warunkami środowiskowymi oraz lokalnego zapisu danych. Do przesyłania wyników i komunikatów diagnostycznych można wykorzystać sieć GSM/LTE/5G. Oprogramowanie powinno umożliwiać zdalną kontrolę stanu systemu, przekazywanie ostrzeżeń oraz odzyskiwanie danych zapisanych lokalnie po przerwie w łączności.

6. BIBLIOGRAFIA

Publikacje

[1] M. Javankhoshraftar. „Evaluating the Interfacial Mechanics of Distributed Strain Sensors Mounted to GFRP Reinforcing Bars". Master of Applied Science Thesis. Ottawa, Canada: University of Ottawa, 2025.

[2] H.-P. Chen i Y.-Q. Ni, red. *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. John Wiley & Sons, marzec 2018. ISBN: 978-1-119-16643-6. DOI: 10.1002/9781119166641.

[3] J.L. Beck i L. Katafygiotis. „Probabilistic System Identification and Health Monitoring of Structures". W: *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*. Madrid, Spain, 1992.

[4] A. Mita. „Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures". W: *2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford University, 1999.

[5] A. Al-Khalidy i in. „A study of health monitoring systems of linear structures using wavelet analysis". W: *ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 347 (1997), s. 49–58.

[6] D. Lehmhus i M. Busse. „Structural Health Monitoring (SHM)". W: *Material-Integrated Intelligent Systems: Technology and Applications*. Oprac. S. Bosse i in. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018. Rozdz. 22, s. 567–588. ISBN: 978-3-527-33606-7. DOI: 10.1002/9783527679249.

[7] H.-P. Chen i Y.-Q. Ni. „Introduction to Structural Health Monitoring". W: *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. Oprac. H.-P. Chen i Y.-Q. Ni. John Wiley & Sons, 2018, s. 1–14. DOI: 10.1002/9781119166641.

[8] J. Zhao i J.T. DeWolf. „Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used in Damage Detection". W: *Journal of Structural Engineering* 125.4 (1999), s. 410–416. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(410).

[9] D.C. Zimmerman i M. Kaouk. „Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory". W: *Journal of Vibration and Acoustics* 116.2 (1994), s. 222–231. DOI: 10.1115/1.2930416.

[10] D.-a.M. Amafabia i in. „A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures". W: *Structural Durability & Health Monitoring* 11.2 (2017), s. 91–147. DOI: 10.3970/sdhm.2017.011.091.

[11] Z. Su, X. Wang i L. Ye. „Data Fusion of Multiple Signals from the Sensor Network". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[12] P. Corvaglia i in. „Development and Some Investigative Testing of Smart Structural FRP Devices with Embedded Fiber Optic Sensor for Health Monitoring of Civil Structures". W: *Advances in Structural Engineering* 13.5 (2010), s. 905–925. DOI: 10.1260/1369-4332.13.5.905.

[13] H. Guan, V.M. Karbhari i C.S. Sikorsky. „Long-term Structural Health Monitoring System for a FRP Composite Highway Bridge Structure". W: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18.8 (2007), s. 809–823. DOI: 10.1177/1045389X06073471.

[14] C.R. Farrar i K. Worden. „An introduction to structural health monitoring". W: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365.1851 (2007), s. 303–315. DOI: 10.1098/rsta.2006.1928.

[15] M. Wevers i K. Lambrighs. „Applications of Acoustic Emission for SHM: A Review". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[16] Z. Zhou, Y.W.S. Chan i J. Ou. „Advances in FRP-Based Smart Components and Structures". W: *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. Oprac. G. Rajan i B.G. Prusty. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. ISBN: 978-1-4987-3317-5.

[17] W.M. Ostachowicz, T. Wandowski i P.H. Malinowski. „Structural Health Monitoring Methods for Composite Materials". W: *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. Oprac. G. Rajan i B.G. Prusty. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017, s. 25–54. ISBN: 978-1-4987-3317-5.

[18] R. Wu i in. „Composite Bridge Girders Structure Health Monitoring Based on the Distributed Fiber Sensing Textile". W: *Sensors* 23.10 (2023), s. 4856. DOI: 10.3390/s23104856.

[19] A. Rytter. „Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures". Ph.D. Thesis. Denmark: Aalborg University, 1993.

[20] C.R. Farrar i K. Worden. „Introduction". W: *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, 2012, s. 1–18. ISBN: 978-1-119-99433-6. DOI: 10.1002/9781118443118.

[21] H. Sohn i C.K. Oh. „Statistical Pattern Recognition". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009, s. 459–475. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[22] C. Boller. „Structural Health Monitoring: An Introduction and Definitions". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009, s. 1–12. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[23] M. Dziendzikowski i in. „An Approach to Structural Health Monitoring of Composite Structures Based on Embedded PZT Transducers". W: *Fatigue of Aircraft Structures* 2014.6 (2014), s. 113–118. DOI: 10.1515/fas-2014-0012.

[24] V. Gharehbaghi i in. „A Critical Review on Structural Health Monitoring: Definitions, Methods, and Perspectives". W: *Archives of Computational Methods in Engineering* 29.3 (2022), s. 1811–1841. DOI: 10.1007/s11831-021-09665-9.

[25] M. Garevski, red. *Earthquakes and Health Monitoring of Civil Structures*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013. ISBN: 978-94-007-5181-1. DOI: 10.1007/978-94-007-5182-8.

[26] H.-P. Chen i T.S. Maung. „Structural Damage Evolution Assessment Using the Regularised Time Step Integration Method". W: *Journal of Sound and Vibration* 333.18 (2014), s. 4104–4122. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.044.

[27] H.W. Shih. „Damage Assessment in Structures Using Vibration Characteristics". Ph.D. Thesis. Brisbane, Australia: Queensland University of Technology, 2009.

[28] H.-P. Chen. „Chapter IV - Structural Damage Identification Techniques". W: *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. Oprac. H.-P. Chen i Y.-Q. Ni. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2018, s. 89–118. ISBN: 978-1-119-16643-6. DOI: 10.1002/9781119166641.

[29] N.M.M. Maia i in. „Damage Detection and Quantification Using Transmissibility". W: *Mechanical Systems and Signal Processing* 25.7 (2011), s. 2475–2483. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.04.002.

[30] H. Nandan i M.P. Singh. „A System Identification Based Approach For Estimating Modal Frequencies of Bridges Under Environmental Influence". W: *Civil Engineering Topics, Volume 4: Proceedings of the 29th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2011*. Oprac. T. Proulx. Bethel, CT: Springer, 2011, s. 273–281. DOI: 10.1007/978-1-4419-9316-8_25.

[31] C.M. Scala, S.J. Bowles i I.G. Scott. „The Development of Acoustic Emission for Structural Integrity Monitoring of Aircraft". W: *International Advances in Nondestructive Testing* 14 (1988), s. 219–258.

[32] S. Gopalakrishnan, A. Chakraborty i D.R. Mahapatra. *Spectral Finite Element Method: Wave Propagation, Diagnostics and Control in Anisotropic and Inhomogeneous Structures*. London, UK: Springer Science & Business Media, 2007. ISBN: 978-1-84628-601-8.

[33] M.Y. Bhuiyan, Y. Shen i V. Giurgiutiu. „Interaction of Lamb Waves with Rivet Hole Cracks from Multiple Directions". W: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 231.16 (2017), s. 2974–2987. DOI: 10.1177/0954406216686996.

[34] M.K. Moghaddam i in. „Sensor Integration in Fiber-Reinforced Polymers". W: *Material-Integrated Intelligent Systems: Technology and Applications*. Oprac. S. Bosse i in. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018, s. 155––180. ISBN: 978-3-527-33606-7. DOI: 10.1002/9783527679249.

[35] S. Gschossmann, C. Humer i M. Schagerl. „Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Elements: Essential Aspects for a Reliable Numerical Simulation". W: *Proceedings of the 8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)*. Bilbao, Spain, lipiec 2016.

[36] C. Humer, C. Kralovec i M. Schagerl. „Scattering Analysis of Lamb Waves at Subsurface Cracks in Isotropic Plates". W: *Proceedings of the 8th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. Madrid, Spain, czerwiec 2017, s. 1843–1853.

[37] D.M. Donskoy. „Nonlinear Acoustic Methods". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009, s. 229–246. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[38] V. Giurgiutiu. „Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors – Predictive Modeling and Simulation". W: *INCAS BULLETIN* 2.3 (2010), s. 31–44. DOI: 10.13111/2066-8201.2010.2.3.4.

[39] L. Yu i V. Giurgiutiu. „Piezoelectric Wafer Active Sensors". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009, s. 839–854. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[40] R. Soman i in. „Kalman Filter Based Neutral Axis Tracking in Composites Under Varying Temperature Conditions". W: *Mechanical Systems and Signal Processing* 110 (2018), s. 485–498. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.03.046.

[41] S.W. Doebling i in. *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. Sprawozdanie techniczne LA-13070-MS. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, maj 1996.

[42] H. Sohn i in. *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. Sprawozdanie techniczne LA-UR-02-2095. Los Alamos National Laboratory, 2002.

[43] W.J. Staszewski i in. „Damage Detection Using Stress and Ultrasonic Waves". W: *Health Monitoring of Aerospace Structures*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. Rozdz. 4, s. 125–162. ISBN: 978-0-470-09286-6. DOI: 10.1002/0470092866.ch4.

[44] C.R. Farrar i N.A.J. Lieven. „Damage Prognosis: The Future of Structural Health Monitoring". W: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365.1851 (2006), s. 623–632. DOI: 10.1098/rsta.2006.1927.

[45] S.-Y. Kim i M. Mukhiddinov. „Data Anomaly Detection for Structural Health Monitoring Based on a Convolutional Neural Network". W: *Sensors* 23.20 (2023), s. 8525. DOI: 10.3390/s23208525.

[46] C. Kralovec i M. Schagerl. „Review of Structural Health Monitoring Methods Regarding a Multi-Sensor Approach for Damage Assessment of Metal and Composite Structures". W: *Sensors* 20.3 (2020), s. 826. DOI: 10.3390/s20030826.

[47] M.D. Todd. „Data Interrogation Approaches with Strain and Load Gauge Sensor Arrays". W: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Oprac. C. Boller, F.-K. Chang i Y. Fujino. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009, s. 191–206. ISBN: 978-0-470-05822-0.

[48] K. Bremer i in. „Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors". W: *Sensors* 17.2 (2017), s. 345. DOI: 10.3390/s17020345.

[49] T. Hamouda i A.-F.M. Seyam. „Smart Composite Textiles with Embedded Optical Fibers". W: *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. Oprac. G. Rajan i B.G. Prusty. Devices, Circuits, and Systems. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. Rozdz. 9, s. 233–268. ISBN: 978-1-4987-3317-5.

[50] C. Pendão i I. Silva. „Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications". W: *Sensors* 22.19 (2022), s. 7554. DOI: 10.3390/s22197554.

[51] M. Xenidou i in. *Integration of Fiber Optic Sensors into CFRP for Structural Health Monitoring of a Marine Composite Propeller*. Sprawozdanie techniczne. Zenodo, lipiec 2024. DOI: 10.5281/zenodo.15804772.

[52] S. Palhewar i A. Khare. „Design and Analysis of Optical Point Sensors, Quasi-Distributed, and Distributed Optical Fiber Sensors". W: *2025 Third International Conference on Microwave, Antenna and Communication (MAC)*. 2025, s. 1–5. DOI: 10.1109/MAC64480.2025.11140072.

[53] E. Udd i I.U. Scheel. „Fiber Grating Sensors". W: *Fiber Optic Sensors*. John Wiley & Sons, Ltd, 2024. Rozdz. 16, s. 397–448. DOI: 10.1002/9781119678892.ch16.

[54] M. Abolbashari, A.S. Gerges i F. Farahi. „A Combined Fiber Bragg Grating and Interferometric Based Quasi-Distributed Sensor Network". W: *2009 6th International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)*. 2009, s. 193–197. DOI: 10.1109/HONET.2009.5423073.

[55] A.D. Kersey i in. „Fiber Grating Sensors”. W: *Journal of Lightwave Technology* 15.8 (1997), s. 1442–1463. DOI: 10.1109/50.618377.

[56] A. Onoufriou, K. Kalli i G. Kohnke. „Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”. W: *Physics Today* 53.5 (2000), s. 72–73. DOI: 10.1063/1.883086.

[57] D. Kinet i in. „Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions”. W: *Sensors* 14.4 (2014), s. 7394–7419. DOI: 10.3390/s140407394.

[58] M.B. Davis i in. „Distributed Sensing for Shrinkage and Tension-Stiffening Measurement”. W: *ACI Structural Journal* 114.3 (2017). DOI: 10.14359/51689463.

[59] D. Marcuse. „Rayleigh Scattering and the Impulse Response of Optical Fibers”. W: *The Bell System Technical Journal* 53.4 (1974), s. 705–715. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1974.tb02765.x.

[60] G.-L. Lan, P.K. Banerjee i S.S. Mitra. „Raman Scattering in Optical Fibers”. W: *Journal of Raman Spectroscopy* 11.5 (1981), s. 416–423. DOI: 10.1002/jrs.1250110521.

[61] G. Agrawal. „Stimulated Brillouin Scattering”. W: *Nonlinear Fiber Optics*. 5th. Boston: Academic Press, 2013. Rozdz. 9, s. 353–396. DOI: 10.1016/B978-0-12-397023-7.00009-7.

[62] H. Murayama. „Structural Health Monitoring of Composite Materials Using Distributed Fiber-Optic Sensors”. W: *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. Oprac. G. Rajan i B.G. Prusty. Devices, Circuits, and Systems. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. Rozdz. V, s. 133–152. ISBN: 978-1-4987-3317-5.

[63] Y. Feng, H. Zheng i H. Ge. „Applications in Bridge Structure Health Monitoring Using Distributed Fiber Sensing”. W: *AOPC 2017: Fiber Optic Sensing and Optical Communications*. Oprac. Z.-S. Zhao i in. T. 10464. Proceedings of SPIE. SPIE, 2017, s. 104640I. DOI: 10.1117/12.2284106.

[64] K. Chizhimbayeva i in. „Possibility of Using the Brillouin Reflectometry Method to Determine Deformations in Bridge Structures”. W: *2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. 2024, s. 397–402. DOI: 10.1109/SIST61555.2024.10629535.

[65] L. Lu i in. „Coherent Optical Time Domain Reflectometry Using Three Frequency Multiplexing Probe”. W: *Optics and Lasers in Engineering* 50.12 (2012), s. 1735–1739. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.07.008.

[66] N. Fouad i M.A. Saifeldeen. „Smart Self-Sensing Fiber-Reinforced Polymer Sheet with Woven Carbon Fiber Line Sensor for Structural Health Monitoring”. W: *Advances in Structural Engineering* 24.1 (2021), s. 17–24. DOI: 10.1177/1369433220944507.

[67] C.Y. Chhoa, X. Bao i T.W. Bremner. „Strain measurement in concrete structure using distributed fiber optic sensing based on Brillouin scattering with single-mode fibers embedded in vinyl-ester glass-fiber reinforced rod and bonded to”. W: *Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. T. 4337. SPIE, 2001, s. 4337–25. DOI: 10.1117/12.435623.

[68] J.S. Sirkis i Y. Lu. „On Interphase Modeling for Optical Fiber Sensors Embedded in Unidirectional Composite Systems”. W: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 6.2 (1995), s. 199–209. DOI: 10.1177/1045389X9500600206.

[69] D.W. Jensen, J. Pascual i J.A. August. „Performance of Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part II: Uniaxial Compression”. W: *Smart Materials and Structures* 1.1 (1992), s. 31–35. DOI: 10.1088/0964-1726/1/1/005.

[70] D.W. Jensen, J. Pascual i J.A. August. „Performance of Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Tension”. W: *Smart Materials and Structures* 1.1 (1992), s. 24–30. DOI: 10.1088/0964-1726/1/1/004.

[71] M.S. Kim, C.S. Lee i W. Hwang. „Effect of the Angle Between Optical Fiber and Adjacent Layer on the Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates with Embedded Fiber-Optic Sensor”. W: *Journal of Materials Science Letters* 19.19 (2000), s. 1673–1675. DOI: 10.1023/A:1006764516315.

[72] K.-T. Lau i in. „Strain Monitoring in Composite-Strengthened Concrete Structures Using Optical Fibre Sensors”. W: *Composites Part B: Engineering* 32.1 (2001), s. 33–45. DOI: 10.1016/S1359-8368(00)00030-9.

[73] K. Shivakumar i L. Emmanwori. „Mechanics of Failure of Composite Laminates with an Embedded Fiber Optic Sensor”. W: *Journal of Composite Materials* 38.8 (2004), s. 669–680. DOI: 10.1177/0021998304040552.

[74] D. Li, L. Ren i H. Li. „Mechanical Property and Strain Transferring Mechanism in Optical Fiber Sensors". W: *Fiber Optic Sensors*. Oprac. M. Yasin, S.W. Harun i H. Arof. InTech, 2012. ISBN: 978-953-307-922-6. DOI: 10.5772/27731.

[75] R. Lingle Jr. i in. „Light-Guiding Fundamental and Fiber Design". W: *Specialty Optical Fibers Handbook*. Elsevier, 2006. ISBN: 978-0-1236-9406-5.

[76] J.M. Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd. Assisted by M. Yousif Jamro. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2009. ISBN: 978-0-13-032681-2.

[77] K. Wan, C. Leung i N. Olson. „Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors". W: *Smart Materials and Structures* 17.3 (2008), s. 035037. DOI: 10.1088/0964-1726/17/3/035037.

[78] F. Falcetelli i in. „Strain Transfer in Surface-Bonded Optical Fiber Sensors". W: *Sensors* 20.11 (2020), s. 3100. DOI: 10.3390/s20113100.

[79] X. Lu, M.A. Soto i L. Thévenaz. „Impact of the Fiber Coating on the Temperature Response of Distributed Optical Fiber Sensors at Cryogenic Ranges". W: *Journal of Lightwave Technology* 36.4 (2018), s. 961–967. DOI: 10.1109/JLT.2017.2757843.

[80] S. Schmid i A. Toussaint. „Optical Fiber Coatings". W: *Specialty Optical Fibers Handbook*. Elsevier, 2007, s. 131–160. DOI: 10.1016/B978-012369406-5/50006-0.

[81] S.-T. Shiue. „Determination of interfacial shear strength between the glass fiber and primary coating in double-coated optical fibers from mechanical strip forces". W: *Applied Optics* 41.8 (2002), s. 1649–1653. DOI: 10.1364/AO.41.001649.

[82] S.-C. Her i C.-Y. Huang. „Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors". W: *Sensors* 11.7 (2011), s. 6926–6941. DOI: 10.3390/s110706926.

[83] S.O. Kasap. *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. 2nd. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2013. ISBN: 978-0-13-215149-8.

[84] K. Petermann. „Constraints for fundamental-mode spot size for broadband dispersion-compensated single-mode fibres". W: *Electronics Letters* 19.18 (1983), s. 712–714. DOI: 10.1049/el:19830485.

[85] P. Zhu i in. „Evaluating and Minimizing Induced Microbending". W: *Journal of Lightwave Technology* 39.22 (2021), s. 7292–7300. DOI: 10.1109/JLT.2021.3112484.

[86] L. Palmieri i L. Schenato. „Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering". W: *The Open Optics Journal* 7 (2013), s. 104–127. DOI: 10.2174/1874328501307010104.

[87] D. Marcuse. „Microdeformation Losses of Single-Mode Fibers". W: *Applied Optics* 23.7 (1984), s. 1082––1091. DOI: 10.1364/AO.23.001082.

[88] O. Kawata. „Statistical Analysis of Fusion Splice Losses for Single-Mode Fibers". W: *Applied Optics* 23.19 (1984), s. 3289–3293. DOI: 10.1364/AO.23.003289.

[89] M. Nakazawa. „Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers". W: *J. Opt. Soc. Am.* 73.9 (1983), s. 1175–1180. DOI: 10.1364/JOSA.73.001175.

[90] E. Brinkmeyer. „Backscattering in single-mode fibres". W: *Electronics Letters* 16.9 (1980), s. 329–330. DOI: 10.1049/el:19800235.

[91] P. Healey. „Statistics of Rayleigh Backscatter From a Single-Mode Fiber". W: *IEEE Trans. Commun.* 35 (1987), s. 210–214.

[92] J. Moore. „High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter". W: *Applied Optics* 37 (1998), s. 1735–1740. DOI: 10.1364/AO.37.001735.

[93] M.E. Froggatt i D.K. Gifford. „Rayleigh backscattering signatures of optical fibers—Their properties and applications". W: *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. 2013, s. 1–3.

[94] S. Kreger i in. „High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single- and Multi-Mode Fiber Using Swept-Wavelength Interferometry". W: *Optical Fiber Sensors*. 2006, ThE42. DOI: 10.1364/OFS.2006.ThE42.

[95] Z. Guo i in. „High Sensing Accuracy Realisation With Millimetre/Sub-Millimetre Resolution in Optical Frequency Domain Reflectometer”. W: *Journal of Lightwave Technology* 40 (2022), s. 4050–4056. DOI: 10.1109/JLT.2022.3141596.

[96] Q. Shuai i in. „Improvement of Strain Measurement Range via Image Processing Methods in OFDR System”. W: *Journal of Lightwave Technology* 39 (2021), s. 6340–6347. DOI: 10.1109/JLT.2021.3097198.

[97] X. Bao i L. Chen. „Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors”. W: *Sensors* 12.7 (2012), s. 8601––8639. DOI: 10.3390/s120708601.

[98] I. Baran. *Pultrusion: State-of-the-Art Process Models*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK: Smithers Rapra Technology Ltd, 2015. ISBN: 978-1-91024-242-1.

[99] A. Frank i in. „Fiber optic Bragg grating sensors embedded in GFRP rockbolts”. W: *Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*. Oprac. R.O. Claus i W.B. Spillman Jr. T. 3670. SPIE, 1999, s. 497–504. DOI: 10.1117/12.349767.

[100] P.M. Nellen i in. „Structurally embedded fiber Bragg gratings: civil engineering applications”. W: *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*. T. 3860. SPIE, 1999, s. 286–295. DOI: 10.1117/12.372954.

[101] A.L. Kalamkarov, S.B. Fitzgerald i T. Georgiades. „On the Processing and Evaluation of Pultruded Smart Composites”. W: *Composites Part B: Engineering* 30.7 (1999), s. 709–719. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00037-2.

[102] A.L. Kalamkarov i in. „Pultruded Fibre Reinforced Polymer Reinforcements with Embedded Fibre Optic Sensors”. W: *Canadian Journal of Civil Engineering* 27.5 (2000), s. 972–984. DOI: 10.1139/l00-034.

[103] R. Romaniuk. *Miernictwo światłowodowe*. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2001, s. 229–231.

[104] D. Bailey i E. Wright. „Theory of Fiber Optic Transmission”. W: *Practical Fiber Optics*. Oxford: Newnes, 2003, s. 42–80. ISBN: 978-0-7506-5800-3. DOI: 10.1016/B978-075065800-3/50003-5.

[105] M. Loos. „Chapter 2 - Composites”. W: *Carbon Nanotube Reinforced Composites*. Oxford: William Andrew Publishing, 2015, s. 37–72. ISBN: 978-1-4557-3195-4. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3195-4.00002-3.

[106] G. Luyckx i in. „Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research”. W: *Sensors* 11.1 (2011), s. 384–408. DOI: 10.3390/s110100384.

[107] Z. Zhou, Z. Wang i L. Shao. „Fiber-Reinforced Polymer-Packaged Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors for Infrastructures under Harsh Environment”. W: *Journal of Sensors* 2016.1 (2016), s. 3953750. DOI: 10.1155/2016/3953750.

[108] A. Kalamkarov i in. „Strain and Deformation Monitoring in Infrastructure Using Embedded Smart FRP Reinforcements”. W: *Composites Part B: Engineering* 36.5 (2005), s. 455–467. DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.12.003.

[109] A.L. Kalamkarov i in. „Smart pultruded composite reinforcements incorporating fiber optic sensors”. W: *Structural Materials Technology III: An NDT Conference*. Oprac. R.D. Medlock i D.C. Laffrey. T. 3400. SPIE, 1998, s. 94–105. DOI: 10.1117/12.300079.

[110] S. Young i in. „Smart Polymer Composite Deck Monitoring Using Distributed High Definition and Bragg Grating Fiber Optic Sensing”. W: *Sensors* 22.11 (2022), s. 4089. DOI: 10.3390/s22114089.

[111] Ł. Bednarski i in. „Distributed Fibre Optic Sensors (DFOS) in Measurements of Rail Strain and Displacements”. W: *Procedia Structural Integrity* 64 (2024), s. 1681–1688. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.09.173.

[112] A. Melloni i in. „Pultruded fiber optic ribbon sensor for applications in severe environments”. W: *Optical Engineering - OPT ENG* 39 (listopad 2000), s. 3068–3075. DOI: 10.1117/1.1313768.

[113] D.-H. Kang i in. „Mechanical Strength Characteristics of Fiber Bragg Gratings Considering Fabrication Process and Reflectivity”. W: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18.4 (2007), s. 303–309. DOI: 10.1177/1045389X06066030.

[114] P. Mallick. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, And Design*. 3rd. T. 2. CRC Press, 2007. ISBN: 9780429122064. DOI: 10.1201/9781420005981.

[115] M. Sozer, P. Simacek i S. Advani. „Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites”. W: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* (lipiec 2012), s. 245–309. DOI: 10.1016/B978-0-85709-067-6.50009-2.

[116] F. Tucci i in. „Injection Pultrusion of Glass-Reinforced Epoxy: Cure Kinetics, Rheology, and Force Analysis". W: *Polymers* 16.12 (2024), s. 1642. DOI: 10.3390/polym16121642.

[117] P. Ouagne i J. Bréard. „Continuous transverse permeability of fibrous media". W: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41.1 (2010), s. 22–28. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.07.008.

[118] S. Bickerton, Q. Govignon i P.A. Kelly. „Resin Infusion/Liquid Composite Moulding (LCM) of Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP)". W: *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. Oprac. J. Bai. Woodhead Publishing, 2013, s. 155–186. DOI: 10.1533/9780857098641.2.155.

[119] T. Lundström, S. Toll i J.M. Håkanson. „Measurement of the Permeability Tensor of Compressed Fibre Beds". W: *Transport in Porous Media* 47.3 (2002), s. 363–380. DOI: 10.1023/A:1015511312595.

[120] R. Gebart. „Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM". W: *Journal of Composite Materials* 26.8 (1992), s. 1100–1133. DOI: 10.1177/002199839202600802.

[121] S.C. Joshi. „The pultrusion process for polymer matrix composites". W: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Woodhead Publishing, 2012, s. 381–413. ISBN: 978-0-85709-067-6. DOI: 10.1016/B978-0-85709-067-6.50012-2.

[122] F. Ansari i Y. Libo. „Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors". W: *Journal of Engineering Mechanics* 124.4 (1998), s. 385–394. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:4(385).

[123] X. Zeng i in. „Strain Measurement in a Concrete Beam by Use of the Brillouin-Scattering-Based Distributed Fiber Sensor with Single-Mode Fibers Embedded in Glass Fiber Reinforced Polymer Rods and Bonded to Steel Reinforcing Bars". W: *Applied Optics* 41.24 (2002), s. 5105–5114. DOI: 10.1364/AO.41.005105.

[124] P. Mitschang i M. Christmann. „Continuous fiber reinforced profiles in polymer matrix composites". W: *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. Woodhead Publishing, 2012, s. 209–242. ISBN: 978-0-85709-067-6. DOI: 10.1016/B978-0-85709-067-6.50008-0.

[125] D.H. Waters, M. Kumosa i J. Hoffman. „Evaluating Strain Limits of Embedded FBG Sensors in Pultruded Hybrid Composite Rods". W: *IEEE Transactions on Power Delivery* 37.6 (2022), s. 5025–5032. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3166070.

[126] I. De Baere i in. „Strain Monitoring in Thermoplastic Composites with Optical Fiber Sensors: Embedding Process, Visualization with Micro-tomography, and Fatigue Results". W: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 20.5 (2007), s. 453–472. DOI: 10.1177/0892705707082325.

[127] A.L. Kalamkarov i in. „Smart FRP Reinforcements for Long-Term Health Monitoring in Infrastructure". W: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 17 (2004), s. 359–381. DOI: 10.1177/0892705704040994.

[128] E. Chehura i in. „Multiplexed fibre optic sensors for monitoring resin infusion, flow, and cure in composite material processing". W: *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2013*. Oprac. K.J. Peters, W. Ecke i T.E. Matikas. T. 8693. SPIE, 2013, 86930F. DOI: 10.1117/12.2012214.

[129] D.A. Jesson i J.F. Watts. „The Interface and Interphase in Polymer Matrix Composites: Effect on Mechanical Properties and Methods for Identification". W: *Polymer Reviews* 52.3 (2012), s. 321–354. DOI: 10.1080/15583724.2012.710288.

[130] L.T. Drzal i in. „Adhesion of Graphite Fibers to Epoxy Matrices: II. The Effect of Fiber Finish". W: *Journal of Adhesion* 16 (1983), s. 133–152.

[131] L.H. Sharpe. „Some Fundamental Issues in Adhesion: A Conceptual View". W: *The Journal of Adhesion* 67.1-4 (1998), s. 277–289. DOI: 10.1080/00218469808011112.

[132] L.H. Sharpe. „Some Thoughts About the Mechanical Response of Composites". W: *The Journal of Adhesion* 6.1-2 (1974), s. 15–21. DOI: 10.1080/00218467408072236.

[133] D. Hull i T.W. Clyne. „The Interface Region". W: *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, s. 133–157.

[134] E.P. Plueddemann, red. *Interfaces in Polymer Matrix Composites*. T. 6. Composite Materials. New York: Academic Press, 1974. ISBN: 0121365069.

[135] J.-K. Kim i Y.-W. Mai. „Chapter 2 - Characterization of interfaces". W: *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Oprac. J.-K. Kim i Y.-W. Mai. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1998, s. 5–41. ISBN: 978-0-08-042695-2. DOI: 10.1016/B978-008042695-2/50003-8.

[136] J.G. Williams i in. „Properties of the interphase in organic matrix composites”. W: *Materials Science and Engineering: A* 126.1 (1990), s. 305–312. DOI: 10.1016/0921-5093(90)90137-R.

[137] M. Madhukar i L. Drzal. „Fiber-Matrix Adhesion and Its Effect on Composite Mechanical Properties: IV. Mode I and Mode II Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composites”. W: *Journal of Composite Materials* 26 (1992), s. 936–968. DOI: 10.1177/002199839202600701.

[138] M.F. Hibbs, M.K. Tse i W.L. Bradley. „Interlaminar Fracture Toughness and Real-Time Fracture Mechanism of Some Toughened Graphite/Epoxy Composites”. W: *Toughened Composites*. ASTM International, 1987. ISBN: 978-0-8031-0934-6. DOI: 10.1520/STP24374S.

[139] W.S. Johnson i P.D. Mangalgiri. „Influence of the Resin on Interlaminar Mixed-Mode Fracture”. W: *Toughened Composites*. ASTM International, 1987. ISBN: 978-0-8031-0934-6. DOI: 10.1520/STP24384S.

[140] D. Hull i T.W. Clyne. „Toughness of composites”. W: *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, s. 208–236.

[141] J.-K. Kim i Y.-W. Mai. „Chapter 6 - Interface mechanics and fracture toughness theories”. W: *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Oprac. J.-K. Kim i Y.-W. Mai. Oxford: Elsevier Science, 1998, s. 239–277. ISBN: 978-0-08-042695-2. DOI: 10.1016/B978-008042695-2/50007-5.

[142] J.-K. Kim i Y.-W. Mai. „Chapter 5 - Surface treatments of fibers and effects on composite properties”. W: *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Oprac. J.-K. Kim i Y.-W. Mai. Oxford: Elsevier Science, 1998, s. 171–237. ISBN: 978-0-08-042695-2. DOI: 10.1016/B978-008042695-2/50006-3.

[143] H. Ishida i J.L. Koenig. „Fourier transform infrared spectroscopic study of the silane coupling agent/porous silica interface”. W: *Journal of Colloid and Interface Science* 64.3 (1978), s. 555–564. DOI: 10.1016/0021-9797(78)90398-3.

[144] H. Ishida i J.L. Koenig. „Effect of hydrolysis and drying on the siloxane bonds of a silane coupling agent deposited on E-glass fibers”. W: *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition* 18.2 (1980), s. 233––237. DOI: 10.1002/pol.1980.180180206.

[145] A.J. Kinloch. „Interfacial contact”. W: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, s. 18–55. DOI: 10.1007/978-94-015-7764-9.

[146] V. Koutsos. „Interfacial Adhesion Between Fibres and Polymers in Fibre-Reinforced Polymer Composites”. W: *Adhesives* 1.3 (2025), s. 11. DOI: 10.3390/adhesives1030011.

[147] M.E. Schrader. „Radioisotopic Studies of Bonding at the Interface”. W: *The Journal of Adhesion* 2.3 (1970), s. 202–212. DOI: 10.1080/0021846708544593.

[148] V. Dutschk i in. „“Fundamental” and “practical” adhesion in polymer-fiber systems”. W: *Mechanics of Composite Materials* 34.4 (1998), s. 309–320. DOI: 10.1007/BF02257899.

[149] K.K. Chawla. „Polymer Matrix Composites”. W: *Composite Materials: Science and Engineering*. New York, NY: Springer New York, 2012, s. 137–195. ISBN: 978-0-387-74365-3. DOI: 10.1007/978-0-387-74365-3_5.

[150] D.K. Owens i R.C. Wendt. „Estimation of the surface free energy of polymers”. W: *Journal of Applied Polymer Science* 13.8 (1969), s. 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815.

[151] A.V. Pocius. „The Relationship of Surface Science and Adhesion Science”. W: *Adhesion and Adhesives Technology*. Hanser Publishers, 2012. Rozdz. 6, s. 145–179. DOI: 10.3139/9783446431775.006.

[152] D. Hull i T.W. Clyne. „Fibre Architecture”. W: *An Introduction to Composite Materials*. 2 wyd. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, s. 39–59. DOI: 10.1017/CBO9781139170130.005.

[153] D. Hull i T.W. Clyne. „Thermal Behaviour of Composites”. W: *An Introduction to Composite Materials*. 2 wyd. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, s. 237–270. DOI: 10.1017/CBO9781139170130.012.

[154] T. Clyne i D. Hull. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2019. ISBN: 9780521860956. DOI: 10.1017/9781139050586.

[155] A.J. Kinloch. „Mechanisms of adhesion”. W: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, s. 56–100. ISBN: 978-94-015-7764-9. DOI: 10.1007/978-94-015-7764-9_3.

[156] E.P. Plueddemann. „Chemistry of Silane Coupling Agents”. W: *Silane Coupling Agents*. New York: Springer Science+Business Media, 1982. Rozdz. 2, s. 29–47.

[157] E.P. Plueddemann. „Surface Chemistry of Silanes at the Interface". W: *Silane Coupling Agents*. New York: Springer Science+Business Media, 1982. Rozdz. 4, s. 75–109.

[158] A.J. Kinloch. „Surface pretreatments". W: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, s. 101–170. DOI: 10.1007/978-94-015-7764-9.

[159] E.P. Plueddemann. „Aqueous Solutions of Silane Coupling Agents". W: *Silane Coupling Agents*. New York: Springer Science+Business Media, 1982. Rozdz. 3, s. 49–73.

[160] A.J. Kinloch. „Mechanical behaviour of adhesive joints". W: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, s. 188–263. DOI: 10.1007/978-94-015-7764-9.

[161] J.W. Hutchinson i H.M. Jensen. „Models of Fiber Debonding and Pullout in Brittle Composites with Friction". W: *Mechanics of Materials* 9 (1990), s. 139–163. DOI: 10.1016/0167-6636(90)90037-G.

[162] Z. Chen i W. Yan. „A Shear-Lag Model with a Cohesive Fibre–Matrix Interface for Analysis of Fibre Pull-Out". W: *Mechanics of Materials* 91 (2015), s. 119–135. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.07.007.

[163] D.-S. Li i in. „Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors". W: *Optical Engineering* 45.2 (2006). DOI: 10.1117/1.2173659.

[164] H.-N. Li i in. „Strain Transfer Coefficient Analyses for Embedded Fiber Bragg Grating Sensors in Different Host Materials". W: *Journal of Engineering Mechanics* 135.12 (2009), s. 1343–1353. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:12(1343).

[165] L. Sun i in. „The Strain Transfer Mechanism of Fiber Bragg Grating Sensor for Extra Large Strain Monitoring". W: *Sensors* 19.8 (2019), s. 1851. DOI: 10.3390/s19081851.

[166] Z. Yang i in. „Stress transfer around a broken fiber in unidirectional fiber-reinforced composites considering matrix damage evolution and interface slipping". W: *Science China Physics, Mechanics and Astronomy* 54.2 (2011), s. 296–302. DOI: 10.1007/s11433-010-4148-1.

[167] S. Vyazovkin i in. „ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data". W: *Thermochimica Acta* 520.1–2 (2011), s. 1–19. DOI: 10.1016/j.tca.2011.03.034.

[168] J.V. Gauchel, L. Peters i T.F. Starr. „Reinforcements for pultrusion". W: *Pultrusion for Engineers*. Oprac. T.F. Starr. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2000, s. 175–196. ISBN: 978-1-85573-425-8. DOI: 10.1533/9781855738881.175.

[169] T.F. Starr. „Pultrusion applications – a world-wide review". W: *Pultrusion for Engineers*. Oprac. T.F. Starr. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2000, s. 197–230. ISBN: 978-1-85573-425-8. DOI: 10.1533/9781855738881.197.

[170] J. Sim, C. Park i D.Y. Moon. „Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures". W: *Composites Part B: Engineering* 36.6 (2005), s. 504–512. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002.

[171] S.-J. Liu. „Injection molding in polymer matrix composites". W: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Oprac. S.G. Advani i K.-T. Hsiao. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2012, s. 15–46. ISBN: 978-0-85709-067-6. DOI: 10.1533/9780857096258.1.13.

[172] C.H. Park i W.I. Lee. „Compression molding in polymer matrix composites". W: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Oprac. S.G. Advani i K.-T. Hsiao. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2012, s. 47–94. ISBN: 978-0-85709-067-6. DOI: 10.1533/9780857096258.1.47.

[173] V. Fiore i in. „A review on basalt fibre and its composites". W: *Composites Part B: Engineering* 74 (2015), s. 74–94. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034.

[174] T. Howiacki i in. „Crack Shape Coefficient: Comparison between Different DFOS Tools Embedded for Crack Monitoring in Concrete". W: *Sensors* 23.2 (2023), s. 566. DOI: 10.3390/s23020566.

Normy

[175] SAE International. *Guidelines for Implementation of Structural Health Monitoring on Fixed Wing Aircraft*. Warrendale, PA, sierpień 2021. DOI: 10.4271/ARP6461A. URL: https://www.sae.org/standards/content/arp6461a/.

[176] International Telecommunication Union. *Definitions and Test Methods for Linear, Deterministic Attributes of Single-Mode Fibre and Cable*. Recommendation ITU-T. 2024.

[177] International Telecommunication Union. *Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable*. Genewa, 2024. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en.

[178] International Telecommunication Union. *Characteristics of a Non-Zero Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fibre and Cable*. Genewa, 2009. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/en.

[179] International Telecommunication Union. *Characteristics of a Bending-Loss Insensitive Single-Mode Optical Fibre and Cable*. Genewa, 2024. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/en.

[180] *Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa B500SP – Pręty i walcówka żebrowana*. Zastępuje PN-H-93220:2006; Element dodatkowy: PN-H-93220:2018-02/Ap1:2018-04. 2018.

[181] Polski Komitet Normalizacyjny. *Polimery wzmocnione włóknami (FRP) – Pręty i siatki do zbrojenia betonu – Metody badań – Część 1: Pręty FRP*. Warszawa, 2015.

[182] CEN/TC 249 - Tworzywa sztuczne. *Kompozyty tworzyw sztucznych wzmocnione włóknami – Oznaczanie właściwości zginających*. 1998.

[183] Polski Komitet Normalizacyjny. *Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami – Oznaczanie pozornej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki*. Warszawa, 2001.

[184] ASTM International. *ASTM D4475-21: Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: 10.1520/D4475-21. URL: https://www.astm.org/d4475-21.html.

[185] International Electrotechnical Commission. *IEC 60793-2-50:2025: Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*. Geneva, Switzerland: IEC, 2025.

Materiały informacyjne

[186] National Geographic Polska. *Katastrofa w Genui [CAŁY FILM]*. 2024. URL: https://www.youtube.com/watch?v=f-btttyj5zo (dostęp 11.07.2026).

[187] Prokuratura Okręgowa w Koszalinie. *Akt oskarżenia w sprawie zawalenia się koszalińskiego wiaduktu*. 2024. URL: https://www.gov.pl/web/po-koszalin/akt-oskarzenia-w-sprawie-zawalenia-sie-koszalinskiego-wiaduktu (dostęp 11.07.2026).

[188] ekoszalin.pl. *Wiadukt. Miasto nie ucierpiało na jego zawaleniu. Prokuratura powołała nowy zespół biegłych*. 2024. URL: https://ekoszalin.pl/wideo/43604-Wiadukt-Miasto-nie-ucierpialo-na-jego-zawaleniu-Prokuratura-powolala-nowy-zespol-bieglych (dostęp 11.07.2026).

[189] Corning Incorporated. *Corning® SMF-28e+® Optical Fiber Product Information*. P11463. Product Specification / Datasheet. Corning, NY, USA, 2024. URL: https://www.corning.com/opticalfiber.

[190] Corning Incorporated. *Corning SMF-28 Ultra Optical Fiber: Product Information*. PI-1424. Corning, NY, USA, 2025. URL: https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/product-information-sheets/PI-1424-AEN.pdf.

[191] Corning Incorporated. *Corning SMF-28 Ultra Optical Fiber: Fusion Splicing Report*. AN2008. Corning, NY, USA, 2017. URL: https://www.corning.com/content/dam/corning/catalog/coc/documents/application-notes/AN2008.pdf.

[192] *ODiSI-B User's Guide: ODiSI-B Software 5.2.0*. Luna Innovations. Blacksburg, VA, 2017.

[193] China Jushi Co., Ltd. *E6 386H Direct Roving for General Purpose: Product Description and Technical Parameters*. Technical Data Sheet. China Jushi Co., Ltd. 2026.