

mgr inż., Alireza Tabrizkahou
Prof. dr hab. inż., Mieczysław Kuczma
Politechnika Poznańska

Beton wysokowartościowy zbrojony włóknami z pamięcią kształtu na bazie żelaza: badania doświadczalne i modelowanie

High Performance Fibre Reinforced Concrete with Iron-Based Shape Memory Fibres:
Experimental Investigations and Modelling

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki własnych badań eksperymentalnych i modelowania numerycznego nowego typu betonu wysokowartościowego, który cechuje się zdolnością do samonaprawy (zamykania rys) dzięki zawartości włókien ze stopów z pamięcią kształtu wprowadzających w betonie wstępne naprężenia sprężające. Stopy z pamięcią kształtu (ang. SMAs, Shape Memory Alloys) stanowią unikatową klasę materiałów aktywnych (inteligentnych, wielofunkcyjnych) dzięki pseudo-sprężystemu zachowaniu i efektowi pamięci kształtu. Te niezwykle własności SMAs są wynikiem odwracalnej martenzytycznej przemiany fazowej między fazą pierwotną (austenitem) i fazą produktową (martenzytem). Badaniom własnym poddano beton z włóknami z pamięcią kształtu ze stopu na bazie żelaza, który wykazuje efekt pamięci kształtu. Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych z wynikami pomiarów w rozległych eksperymentach laboratoryjnych.

Abstract

The paper presents the results of original experimental investigations and numerical modelling of a new type of high performance concrete characterized by its self-healing ability (crack closure) due to the incorporation of shape memory alloy fibres that introduce pre-compressive stresses into the concrete. Shape Memory Alloys (SMAs) represent a unique class of active (smart, multifunctional) materials due to their pseudo-elastic behaviour and shape memory effect. These remarkable properties of SMAs result from the reversible martensitic phase transformation between the primary phase (austenite) and the product phase (martensite). The research focused on concrete reinforced with shape memory alloy fibres based on iron alloy, which exhibits the shape memory effect. A good agreement was obtained between the results of numerical simulations and measurements from extensive laboratory experiments.

1. Wprowadzenie

Beton zbrojony włóknami (ang. FRC, fiber reinforced concrete) stanowi szeroko stosowane rozwiązanie do wzmacniania betonu wysokowartościowego (ang. HPC, high-performance concrete), zwiększające jego wytrzymałość na zginanie dzięki ograniczeniu propagacji rys [1]. Jednak typowe włókna – stalowe czy polimerowe – pełnią jedynie bierną funkcję nośną po powstaniu rys, bez generowania aktywnych sił zamykających pęknięcia. Taka strategia zapobiega dalszemu powiększaniu uszkodzeń, ale nie przywraca pierwotnej integralności materiału. W związku z tym istnieje potrzeba opracowania zbrojeń włóknistych, które działałyby proaktywnie, zarówno zapobiegając rozwojowi rys, jak i aktywnie modyfikując stan naprężeń w materiale.

Sprężony beton, uzyskiwany poprzez wstępne naprężanie stalowych cięgien, skutecznie przeciwdziała obciążeniom rozciągającym i zwiększa nośność. Niemniej jednak tradycyjne metody wymagają prostoliniowych elementów, skomplikowanego osprzętu montażowego oraz aplikacji sił lokalnie – co ogranicza ich zastosowanie w cienkich lub zakrzywionych strukturach nośnych. Dodatkowo układy sprężające generują nierównomierny rozkład naprężeń wyłącznie wokół cięgien. Te ograniczenia skłaniają ku poszukiwaniu alternatywnych rozwiązań umożliwiających wprowadzenie sprężenia rozproszonego wewnątrz całej struktury, bez potrzeby stosowania zewnętrznych instalacji napinających celem wywołania sprężenia.

Stopy z pamięcią kształtu (ang. SMAs, shape memory alloys), w szczególności Ni–Ti (NiTiNol), oferują unikalne właściwości – efekt pamięci kształtu (ang. SME, shape memory effect) oraz pseudosprężystość (lub supersprężystość, ang. pseudoelasticity, superelasticity) – które umożliwiają generowanie sił sprężających lub tłumienie drgań [2–8]. Choć druty i taśmy Ni–Ti potwierdziły możliwość zamykania rys i poprawy nośności poprzez aktywację cieplną, wysoki koszt stanowi znaczącą barierę dla ich zastosowania w szerokiej skali. W tym kontekście stopy Fe-SMA (SMA na bazie żelaza) pojawiają się jako obiecująca alternatywa – tańsze, przetwarzalne w hutniczych procesach produkcyjnych, a jednocześnie oferujące odpowiednią wytrzymałość, plastyczność i odporność na korozję [9]. Wstępnie odkształcone włókna Fe-SMA, aktywowane cieplnie, mogą generować naprężenia ściskające wewnątrz betonu, eliminując potrzebę tradycyjnych instalacji sprężających.

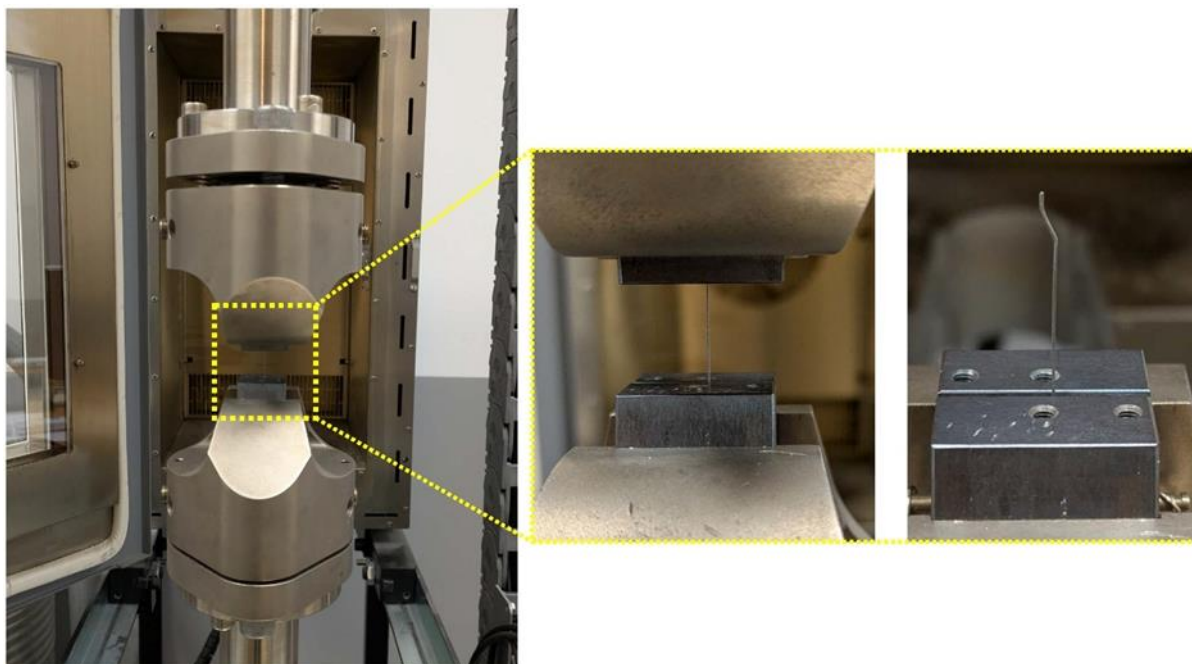
Dotychczasowe badania z Fe-SMA skupiały się głównie na taśmach lub prętach stosowanych lokalnie, co nie zapewnia równomiernego, rozproszonego działania w całym elemencie [10]. W literaturze brakuje kompleksowych analiz dotyczących zastosowania krótkich, losowo rozmieszczonych włókien Fe-SMA oraz ich wpływu na zachowanie betonu – zwłaszcza w kontekście kontroli rys, wzrostu nośności na zginanie czy przyczepności włókien po aktywacji. Ponadto nie opracowano realistycznych modeli MES, które odzwierciedlałyby mikrostrukturę takiego kompozytu i umożliwiały przewidywanie rozkładu naprężeń wewnętrznych po aktywacji włókien.

2. Badania eksperymentalne

1.1 Metodologia badań eksperymentalnych

1.1.1 Zachowanie termomechaniczne włókien Fe-SMA

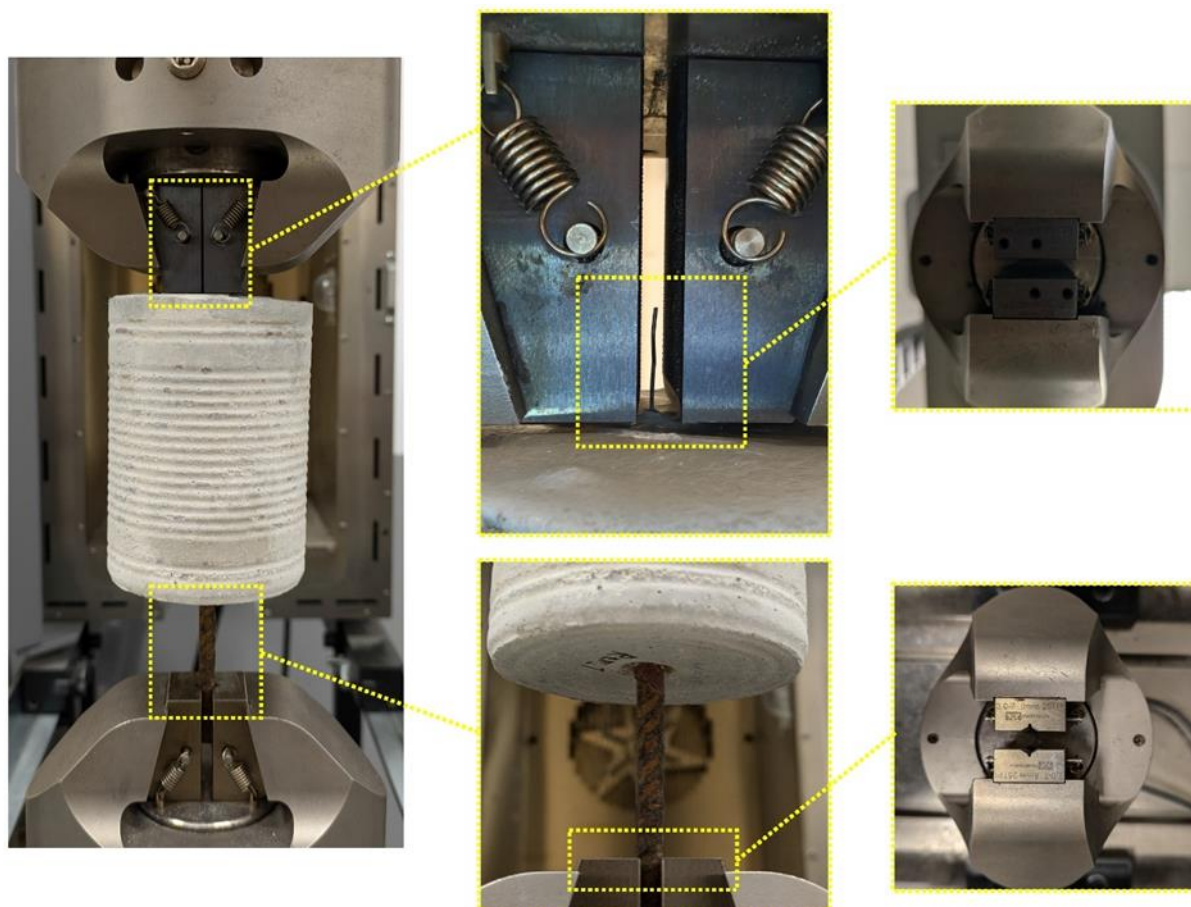
Badania właściwości termomechanicznych Fe-SMA były kluczowe w ocenie ich zdolności do generowania sił odzyskowych i wstępnego naprężania betonu (Rys. 1). Przeprowadzono testy na pojedynczych włóknach (wstępne odkształcenie $\sim 5 \pm 1 \%$) z zakończeniami haczykowymi, umocowanych w układzie umożliwiającym utrzymanie naprężenia (~ 100 MPa) podczas aktywacji cieplnej. Procedura obejmowała cykle ogrzewania do 160°C i 200°C z jednoczesnym pomiarem naprężenia i temperatury. Umożliwiło to określenie poziomu siły odzyskowej oraz wpływu temperatury aktywacji na naprężenie końcowe.



Rys. 1. Układ badawczy użyty do wyznaczenia zachowania termomechanicznego włókien Fe-SMA.

2.1.2 Test wyrywania włókien z betonu

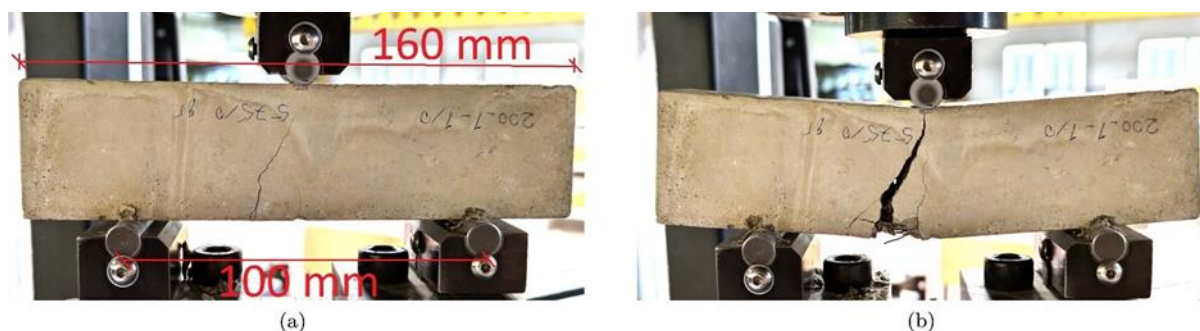
Zbadano charakterystykę połączenia włókna Fe-SMA z betonem w konfiguracji pojedynczego włókna osadzonego w cylindrze betonowym (Rys. 2). Zmiennymi były: geometria (włókna proste lub z haczykowymi zakończeniami), temperatura ekspozycji (20°C , 160°C , 200°C), rodzaj betonu (HPC-1 – z mączką wapienną, HPC-2 – dodatkowo z popiołem krzemionkowym) i szybkość obciążania ($0,2$ i $2,0$ mm/min). Łącznie przebadano 72 próbki. Po uformowaniu betonowych próbek cementowych, część została poddana ogrzewaniu w komorze grzewczej (160°C lub 200°C) aż do termicznego ustabilizowania wewnątrz próbki, co kontrolowano za pomocą termopar. Test wyrywania realizowano przy stałej prędkości przemieszczania, rejestrując krzywe siła–przemieszczenie i maksymalne siły wyrywania. Po teście oceniono wizualnie stan włókien i matrycy, identyfikując dominujący tryb zniszczenia.



Rys. 2. Układ do pomiaru wytrzymałości na wrywanie włókna Fe-SMA osadzonego w betonie.

2.1.3 Badanie próbek betonowych na rozciąganie przy zginaniu

Ocenę globalnego efektu zastosowania włókien Fe-SMA prowadzono na próbkach prostokątnych $40 \times 40 \times 160$ mm, poddawanych zginaniu trójpunktowemu (Rys. 3). Próby wytrzymałościowe wykonano na trzech zestawach: beton bez włókien, z włóknami stalowymi, z włóknami Fe-SMA (2 % objętości).



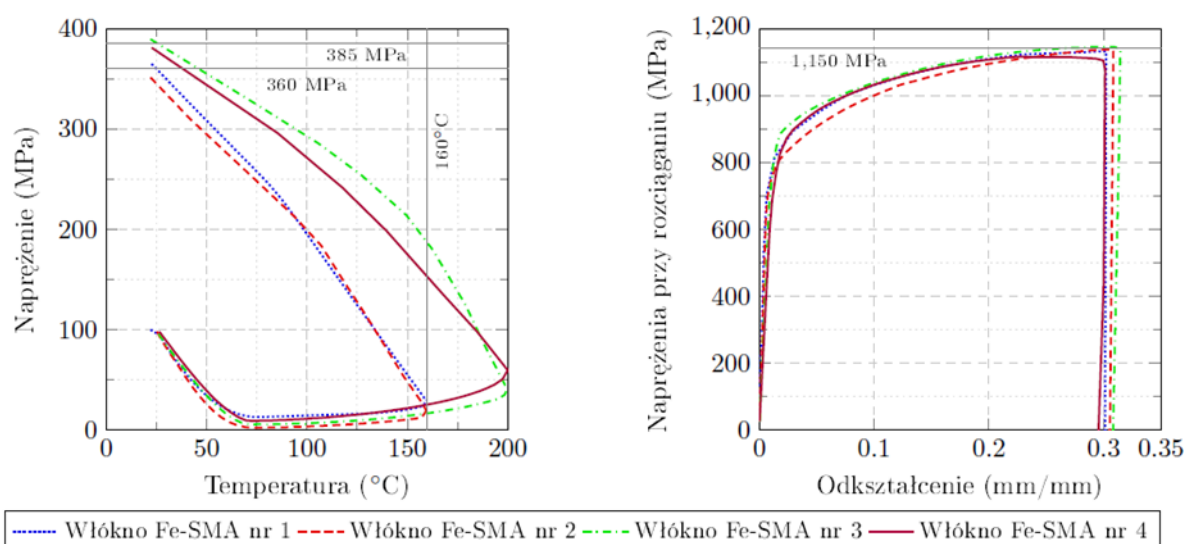
Rys. 3. Badanie zginania trójpunktowego próbek wzmocnionych włóknami Fe-SMA przy (a) maksymalnym naprężeniu oraz (b) zniszczeniu.

Włókna Fe-SMA i stalowe miały haczykowe zakończenie (~35 mm długości, średnica 0,50 mm i 0,55 mm odpowiednio); Fe-SMA wstępnie odkształcono ($\sim 5 \pm 1 \%$). Po 28 dniach dojrzewania część próbek poddano aktywacji cieplnej (160 °C lub 200 °C). Całość poddano zginaniu aż do zniszczenia, rejestrując krzywe siła–przemieszczenie, obserwując rozwój rys i określając charakterystykę naprężenie–odkształcenie.

1.2 Metodologia badań eksperymentalnych

2.2.1 Termomechaniczne właściwości włókien Fe-SMA

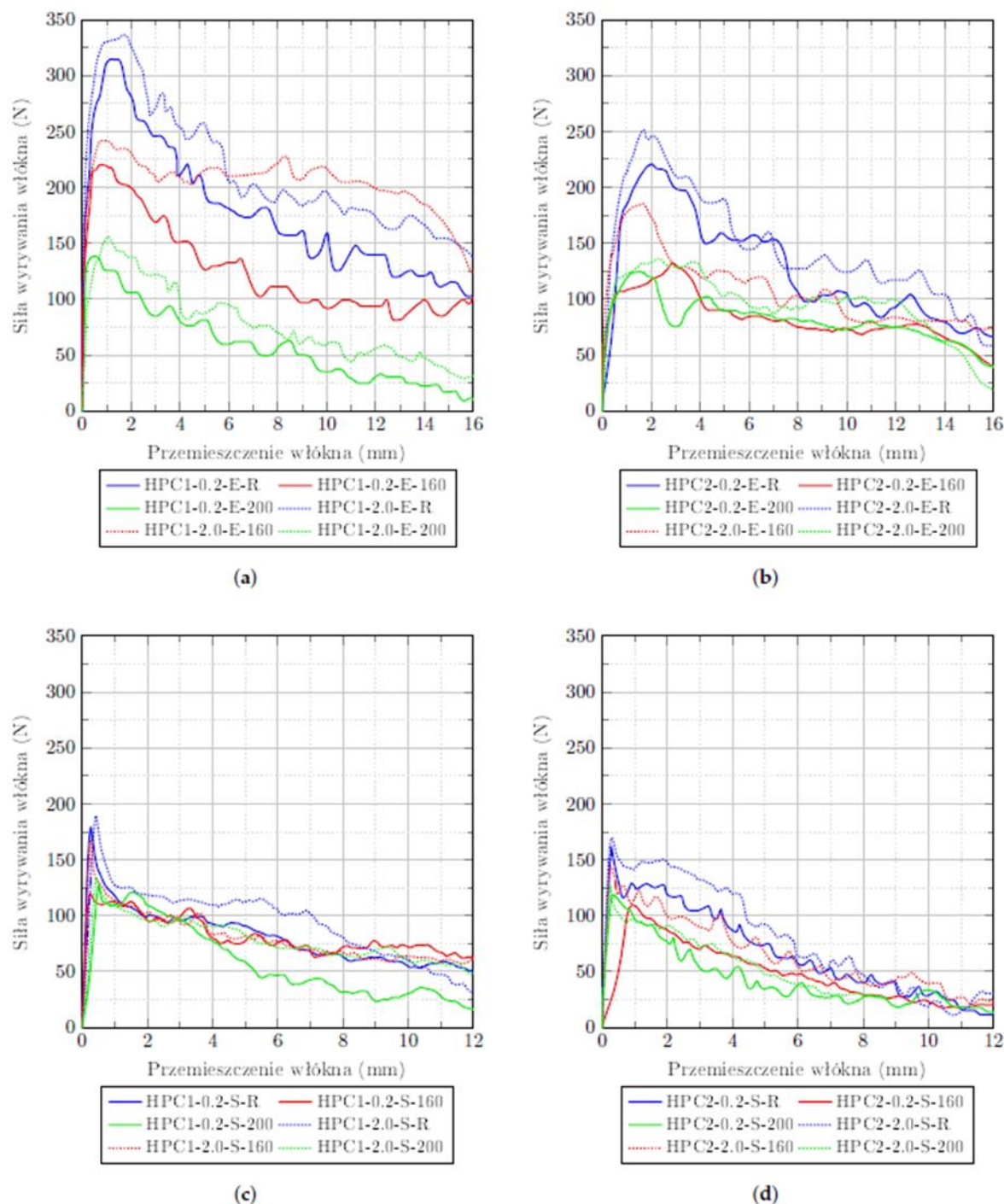
Włókna Fe-SMA wykazały wyraźny efekt pamięci kształtu: po ogrzewaniu do ~70 °C naprężenie spadało dokładnie zgodnie z rozszerzalnością cieplną, a następnie stopniowo wzrastało w miarę przemiany martenzyt→austenit (Rys. 4). Aktywacja do 200 °C generowała naprężenia odzyskowe rzędu ~385 MPa – około 25 MPa więcej niż przy 160 °C. Po ochłodzeniu włókna zachowały maksymalne naprężenia ~1150 MPa przy odkształceniach ~30 %, niezależnie od temperatury aktywacji.



Rys. 4. Proces aktywacji termicznej wstępnie odkształconych włókien Fe-SMA oraz zależność naprężenie–odkształcenie (po aktywacji termicznej).

2.2.2 Wytrzymałość na wyrywanie

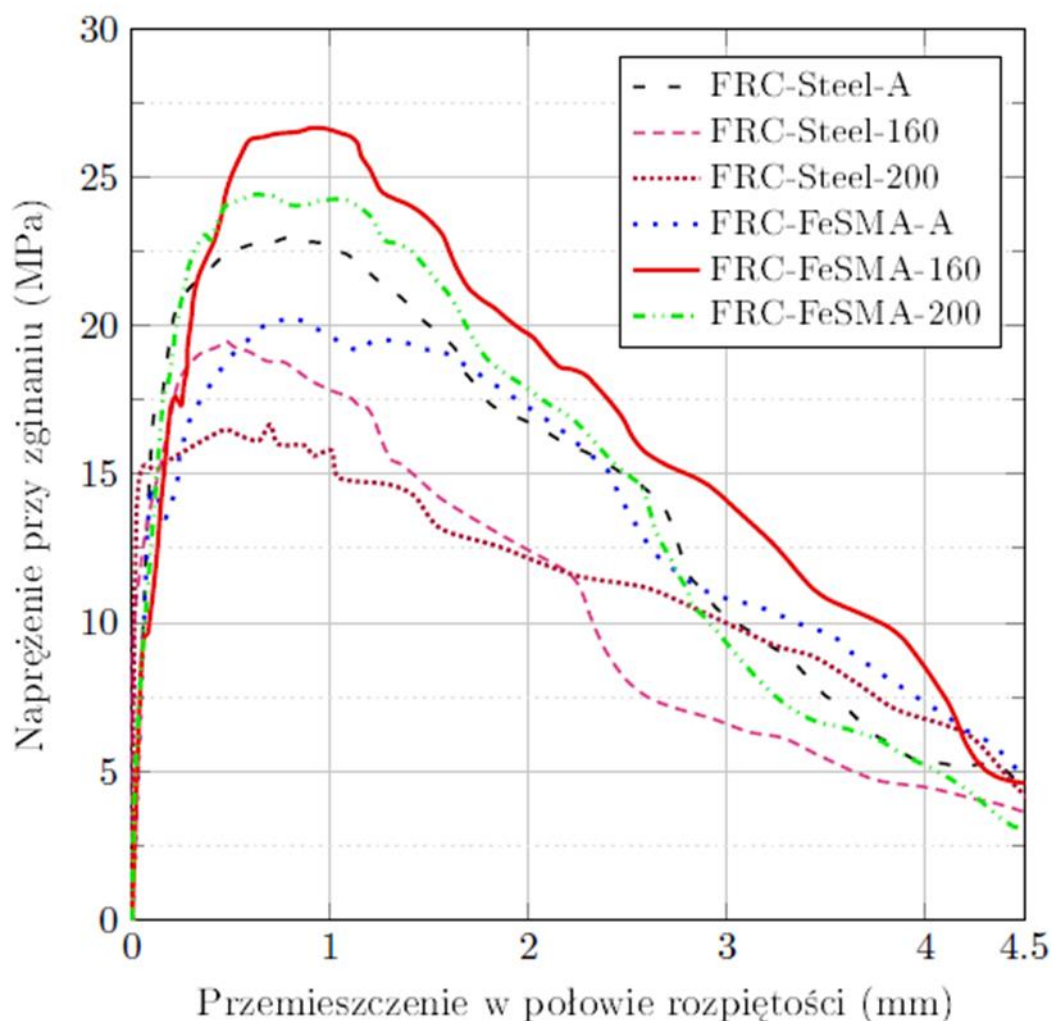
Analiza wyników wskazuje (Rys. 5), że największy wpływ na wytrzymałość połączenia miała geometria włókna (haczyk vs. proste) i rodzaj betonu. W HPC-1 włókna haczykowe osiągały >300 N, podczas gdy proste w HPC-2 ledwo przekraczały 170 N. Ekspozycja cieplna obniżała siły wyrywania (zwłaszcza przy 200 °C), a włókna haczykowe wykazywały najwięcej – do 50 % – spadek. Szybsze obciążanie zwiększało siły maksymalne, co sugeruje istotność tempa aktywacji sił adhezyjnych. Uszkodzenia matrycy i deformacje haczyków potwierdzają, że zakotwienie mechaniczne odgrywa kluczową rolę. Zaleca się dalsze badania nad współczynnikiem tarcia w wysokiej temperaturze.



Rys. 5. Krzywe siła-przemieszczenie uzyskane dla średnich wartości podczas testów wyrywania włókna Fe-SMA z próbek: (a) włókno zakończone haczykami w mieszance HPC-1, (b) włókno zakończone haczykami w mieszance HPC-2, (c) włókno proste w mieszance HPC-1, (d) włókno proste w mieszance HPC-2.

2.2.3 Zachowanie betonu i wpływ temperatury aktywacji

Kostki betonowe bez włókien (HPC-A) uzyskały wytrzymałość ~98 MPa (ściskanie) i ~11,5 MPa (rozciąganie przy zginaniu).



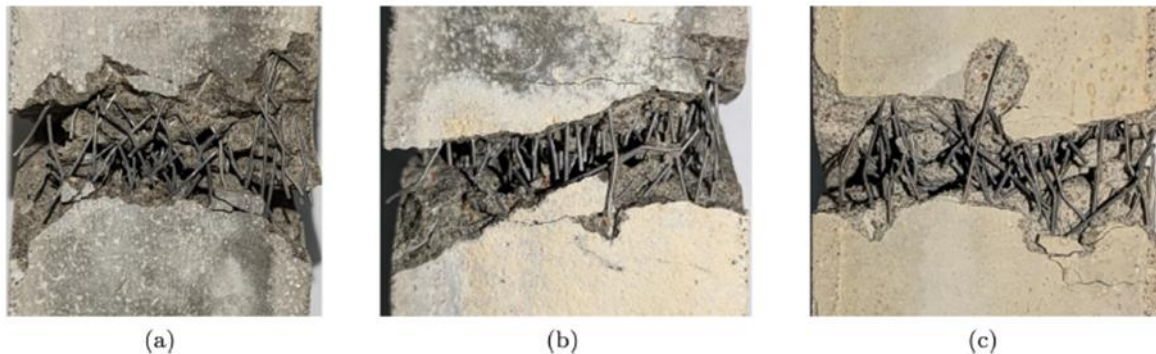
Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie próbek zawierających włókna Fe-SMA i stalowe poddanych różnym procedurom termicznemu.

Po podgrzaniu do 160 °C wytrzymałość spadła (do ~71 MPa i 6,8 MPa), zaś po podgrzaniu do 200 °C – odbudowała się częściowo (do ~95 MPa i ~9,9 MPa), prawdopodobnie wskutek wtórnych reakcji hydratacyjnych i wypełnienia porów. Podczas zginania, próbki wzmacniane Fe-SMA wykazały wzrost nośności po 160 °C (z ~20,2 MPa do ~26,7 MPa), dzięki wstępnemu sprężeniu. Po podgrzaniu do 200 °C nastąpił niewielki spadek (~24,4 MPa), prawdopodobnie z powodu zmniejszonej przyczepności (Rys. 6). W próbkach ze stalowymi włóknami obserwowano stały spadek nośności wraz ze wzrostem temperatury.

2.2.4 Mechanizmy zniszczenia i rozwój rys

Analiza zdjęć pokazuje (Rys. 7), że bez ogrzewania haczyki odkształcały się znacząco przed utratą przyczepności – świadczy to o silnym zakotwieniu. Natomiast przy ogrzewaniu, miększa matryca betonowa i różnice w rozszerzalności termicznej powodowały wcześniejsze zerwanie połączenia. Próby po podgrzaniu do 160 °C i

200 °C wykazały większą liczbę wyrwanych włókien bez odkształcenia haczyków, co wskazuje na osłabienie wiązań włókno–beton przy wzroście temperatury.



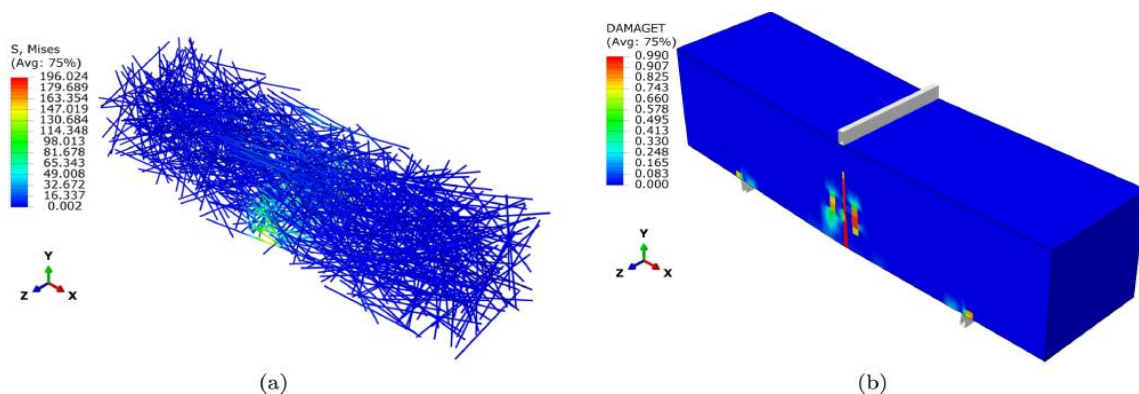
Rys. 7. Rysy w próbkach z włóknami Fe-SMA poddanych ekspozycji na: (a) temperaturę otoczenia (bez ogrzewania), (b) 160°C oraz (c) 200°C.

3. Modelowanie numeryczne

3.1 Generowanie losowo rozmieszczonych włókien

Do modelowania zbrojenia rozproszonego wykorzystano metodę odwzorowania pojedynczych włókien w objętości betonu. Włókna modelowano jako proste odcinki o długości 35 mm i średnicy 0,5~0,55 mm, rozmieszczone losowo w całej objętości elementu, tak aby odpowiadały założonej zawartości włókien (2% objętości). Własny algorytm generowania włókien zapewniał jednorodny, izotropowy rozkład orientacji i położenia włókien przy zachowaniu ograniczeń geometrycznych. Proces rozmieszczania włókien w próbce betonowej przebiegał iteracyjnie według następujących kroków:

- Losowanie położenia i orientacji: Pozycję środka włókna wyznaczano poprzez losowe wylosowanie współrzędnych w obrębie modelu (z zachowaniem marginesu od krawędzi, by całe włókno mieściło się w próbce). Orientację włókna określano przez losowy dobór kątów orientacji w przestrzeni, przyjmując jednakowe prawdopodobieństwo dla każdego kierunku (izotropowy rozkład orientacji).



Rys. 8. Koncentracja naprężeń w matrycy betonowej wywołana aktywacją włókien Fe-SMA po obróbce termicznej w temperaturze (a) 160°C oraz (b) 200°C.

- Sprawdzenie kolizji: Wygenerowane nowe włókno weryfikowano pod kątem kolizji z już umieszczonymi. Jeśli położenie nowego włókna przecinało się z jakimkolwiek wcześniej wstawionym włóknom, było ono odrzucane i ponawiano losowanie pozycji oraz orientacji.
- Akceptacja i iteracja: Włókno niepowodujące kolizji było akceptowane i dodawane do modelu. Procedurę powtarzano aż do uzyskania docelowej liczby włókien odpowiadającej założonemu udziałowi objętościowemu zbrojenia w betonie.

Taki sposób generowania gwarantował realistyczne odwzorowanie przypadkowego rozmieszczenia włókien, zbliżone do rzeczywistej mikrostruktury betonu z włóknami. Rys. 8a przedstawia przykładowy układ losowo rozmieszczonych włókien w modelu numerycznym, uzyskany opisaną metodą.

3.2 Modele materiałowe

Matrycę betonową w modelu opisano sprężysto-plastycznym modelem z uszkodzeniem ciągłym – tzw. modelem Concrete Damaged Plasticity (CDP) [11]. Model CDP umożliwia odwzorowanie nieliniowego zachowania betonu przy ściskaniu i rozciąganiu, uwzględniając zjawiska uplastycznienia oraz degradacji sztywności po zarysowaniu. Parametry materiałowe betonu przyjęto na podstawie wyników badań doświadczalnych. Moduł Younga wyniósł $E = 30$ GPa, a współczynnik Poissona $\nu = 0,2$. Wytrzymałość na ściskanie określono jako $f_c = 40$ MPa, zaś wytrzymałość na rozciąganie przyjęto $f_t = 3,5$ MPa (wartość odpowiadająca betonowi o podanej wytrzymałości na ściskanie). W modelu CDP założono liniową sprężystość do osiągnięcia wartości około $0,3\text{--}0,4 f_c$, po czym uwzględniono nieliniowe wzmocnienie aż do f_c (przy odkształceniu rzędu $0,002$). Dalsze narastanie odkształceń prowadzi do zniszczenia betonu – opisano je w modelu poprzez mięknienie/osłabienie (ang. softening) zdefiniowane krzywą naprężenie–odkształcenie po spękaniu. Krzywą softeningu w rozciąganiu wyznaczono w oparciu o energię pękania betonu $G_F = 0,15$ N·m/m², co zapewnia, że model jest niezależny od rozmiaru elementów siatki (energia zniszczenia zostaje zachowana dla dowolnej gęstości siatki). Parametry plastyczne modelu CDP przyjęto zgodnie z literaturą i domyślnymi zaleceniami dla betonu zwykłego – m.in. $\psi = 36^\circ$, $\epsilon = 0,1$, $K_c = 2/3$. Wartości te skalibrowano tak, by symulacja odtwarzała rzeczywiste zachowanie betonu w zakresie odkształceń plastycznych i inicjacji mikropęknięć. Zastosowanie modelu CDP pozwoliło na realistyczne odwzorowanie zarówno nośności, jak i stopniowego spadku naprężeń po zarysowaniu matrycy betonowej.

Włókna zamodelowano jako oddzielną fazę materiałową o odpowiednich właściwościach mechanicznych. Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału: moduł sprężystości $E = 210$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,3$ oraz granica plastyczności $f_y = 1100$ MPa (odpowiadająca wytrzymałości włókien). W analizach nie dochodziło jednak do uplastycznienia włókien – ich rola polegała głównie na przenoszeniu naprężeń rozciągających aż do momentu wysunięcia z matrycy betonowej. Kluczowym zabiegiem modelowania włókien było przypisanie im ujemnego współczynnika rozszerzalności cieplnej (rzędu $-10\text{--}5$ 1/°C). Dzięki temu możliwe stało się wprowadzenie kontrolowanego wstępnego naprężenia w interakcji włókno–beton poprzez zmianę temperatury. Ten zabieg symuluje efekt zakotwienia włókien w betonie: skutek różnicy odkształceń termicznych włókno wywiera nacisk na beton,

generując naprężenia ściskające na powierzchni interfejsu. W rezultacie między powierzchnią włókna a betonem powstaje wstępna siła tarcia, która przeciwdziała poślizgowi włókna przy małych obciążeniach – odpowiada to uwzględnieniu początkowej przyczepności (adhezji chemicznej i mechanicznego zakotwienia) obserwowanej eksperymentalnie.

3.3 Właściwości kontaktu matrycy betonowej i włókien Fe-SMA

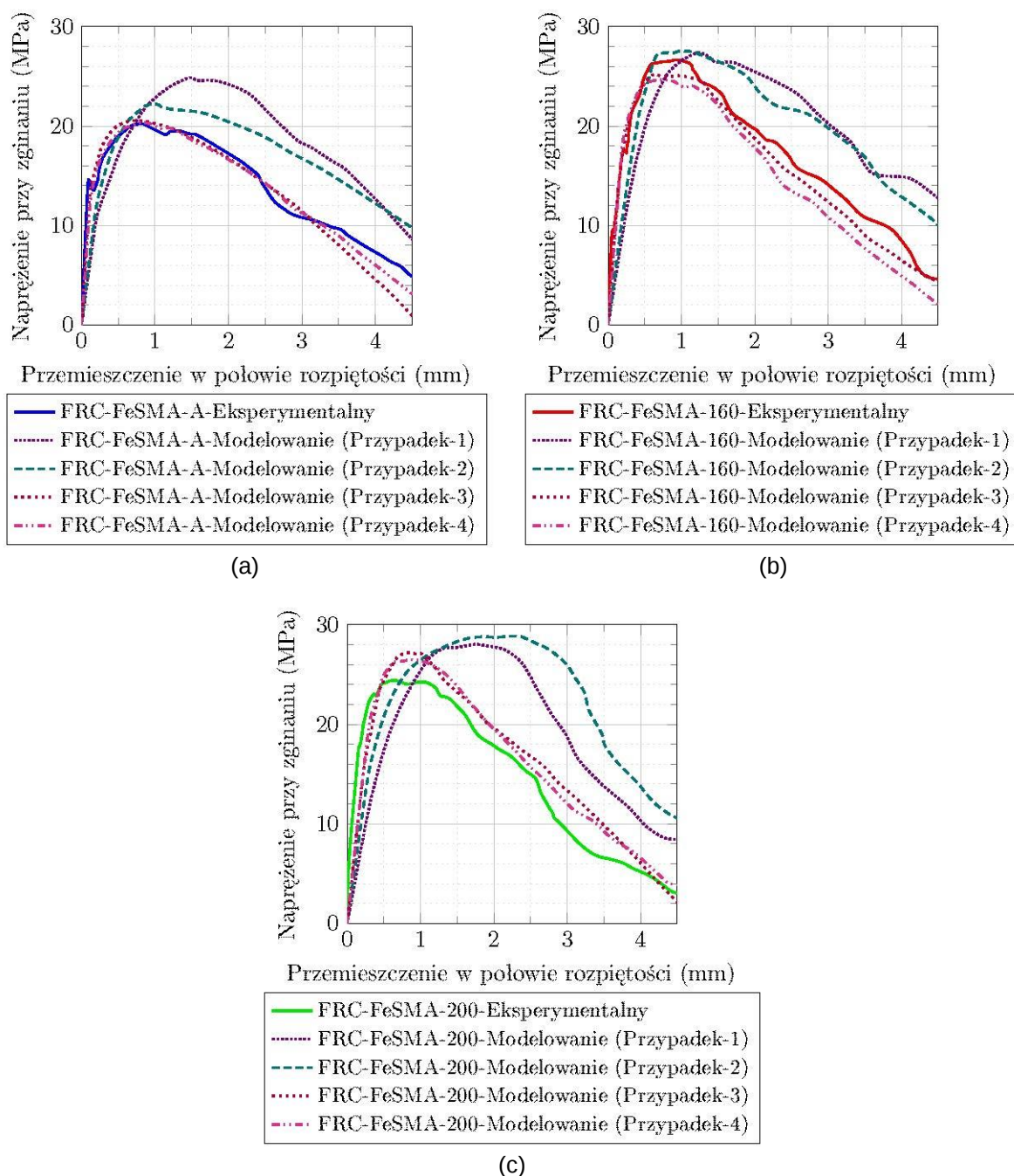
Model numeryczny odwzorowuje interakcję między matrycą betonową a włóknami Fe-SMA poprzez szczegółowy model typu traction–separation, obejmujący zarówno spójne wiązanie (cohesive bond), jak i tarcie. Zamiast uproszczonego rozwiązania typu „tie”, wprowadzono kalibrowany model wiązania odzwierciedlający wyniki testów wyrywania pojedynczych włókien. Mechanizm przenoszenia naprężeń składa się z dwóch etapów: początkowego spójnego wiązania, które opiera się na przyczepności chemicznej i mechanicznym zakotwieniu, oraz późniejszego tarcia po zerwaniu spójności. Parametry modelu – sztywność początkową (K_{nn} , K_{ss} , K_{tt}), maksymalne naprężenie σ_{max} oraz przemieszczenie przy zerwaniu δ_f – zostały dobrane na podstawie eksperymentów, natomiast współczynnik oporu tarcia Coulomba ($=0,1$) odpowiada realnemu zachowaniu gładkich włókien w betonie.

Ze względu na skomplikowaną geometrię haczykowatych zakończeń włókien zdecydowano się na uproszczenie modelu: w włóknach wyróżniono trzy segmenty – dwa końcowe (6 mm każdy) i środkowy (23 mm). W miejscach odpowiadających haczykom zastosowano wyższe wartości parametru spójności, odzwierciedlające efekty mechanicznego zaczepu. Przykładowo końcowe segmenty wykazują maksymalne naprężenie zrywające ok. 33,3 MPa i sztywność normalną ok. 308,6 N/mm³ oraz znacznie większe przemieszczenie przy zerwaniu (~14,8 mm), podczas gdy część środkowa charakteryzuje się odpowiednio mniejszymi wartościami (4,96 MPa, 28,16 N/mm³, 4,7 mm). Taka segmentacja umożliwia wierne odwzorowanie krzywej siła–przemieszczenie z charakterystycznym drugim szczytem wynikającym z działania mechanicznego haczyków.

Temperaturowa zależność modelowanych właściwości kontaktu uwzględniona została przez zmniejszenie wartości σ_{max} dla wyższych temperatur: do 23,36 MPa przy 160 °C i 14,65 MPa przy 200 °C. Zmiany te wynikają z interpolacji przeprowadzonych testów termicznych i uwzględniają spadek siły zrywania o 12–15 % w stosunku do warunków pokojowych.

3.4 Weryfikacja modelu i analiza wrażliwości siatki

Walidacja modelu obejmowała porównanie wyników symulacji numerycznych z danymi eksperymentalnymi oraz analizę wrażliwości wyników na siatkę MES. Wykazano, że siatka o średnim zagęszczeniu (Przypadek 3: elementy o wymiarach 2,5 mm dla betonu i 0,625 mm dla włókien) zapewnia dobrą zgodność czasowo-wydajnościową – symulacje wymagają jedynie ~40 % czasu potrzebnego dla najbardziej gęstej siatki, a wynikowe krzywe obciążenie–przemieszczenie przy zginaniu niemal pokrywają się z pomiarami. Analiza strukturalna wykazała również trafne odwzorowanie kluczowych parametrów: sztywności początkowej, maksymalnej nośności oraz zachowania po wystąpieniu pęknięć we wszystkich scenariuszach temperaturowych oraz efekcie osiadania włókien (Rys. 9).



Rys. 9. Wyniki eksperymentalne i numeryczne zginania belek betonowych z włóknami Fe-SMA w próbie trójpunktowego zginania, analizowane przy różnych gęstościach siatki elementów skończonych, dla próbek poddanych ekspozycji na: (a) warunki pokojowe, (b) ogrzewanie do 160 °C, (c) ogrzewanie do 200 °C.

4. Wnioski

Badania potwierdziły, że krótkie włókna Fe-SMA, rozmieszczone losowo w matrycy betonowej i aktywowane termicznie, skutecznie generują wewnętrzne naprężenia ściskające i znacząco podnoszą nośność elementów betonowych w teście zginania –

o około 24 % przy aktywacji do $\sim 160^{\circ}\text{C}$. Włókna te stanowią ekonomicznie uzasadnioną alternatywę wobec znacznie droższych stopów Ni-Ti. Wskazano, że efektywność kompozytu zależy od kombinacji geometrii włókien (korzystne zakończenia haczykami), składu mieszanki betonowej (lepsze osadzenie w mieszance bez popiołu krzemionkowego) i temperatury aktywacji (ok. 160°C). Poprzez badanie wyrywania włókien z matrycy wyznaczyliśmy siłę wiązania włókien, wpływ temperatury na degradację matrycy, a także warunkowe zachowanie modelu numerycznego względem układu pomiarowego – potwierdzając, że wybrane parametry przeprowadzonych testów i modelowania stanowią solidną podstawę do dalszych analiz.

W pracy wskazano następujące obszary wymagające dalszych badań:

- Optymalizacja aktywacji termicznej: doprecyzowanie zakresu temperatur (np. $120\text{--}160^{\circ}\text{C}$) i rozwój technik lokalnego podgrzewania (indukcja, mikrofalowe), minimalizujące wpływ na matrycę betonową.
- Trwałość i odporność środowiskowa: analiza długookresowego zachowania naprężenia, relaksacji materiałów, reakcji na cykliczne zmiany temperatury i wilgotności oraz korozję w alkalicznych lub morskich środowiskach.
- Projektowanie włókien i ich rozmieszczenia: modyfikacja końcówek włókien (np. zaawansowane haczyki) oraz opracowanie receptur betonu, które zapobiegają osiadaniu i skupianiu włókien, zapewniając ich jednorodne rozproszenie.
- Skalowanie i zastosowania inżynierskie: testowanie większych belek i płyt z zbrojeniem prętami stalowymi, a także badania zachowania dynamicznego i zmęczeniowego; potrzebne ponadto modele homogenizacyjne i uproszczonej analizy dla efektywnych zastosowań w projektowaniu.
- Integracja technologii grzewczych i ocena ekonomiczno-środowiskowa: rozwój systemów lokalnej aktywacji (grzejące maty, druty grzewcze) oraz ocena korzyści kosztowych i emisji CO_2 w porównaniu z tradycyjnymi technologiami.
- Adaptacyjne funkcje kompozytów: badania nad samo-naprawą rys przy cyklicznym aktywowaniu włókien oraz projektowanie hybrydowych systemów włóknistych (np. dodatek włókien polimerowych) w celu zwiększenia ciągliwości i odporności na zmęczenie.

Podziękowania

Pracę wykonano częściowo w ramach grantów NCN (nr 2023/49/N/ST8/03063) oraz SBAD (nr 0412/SBAD/090).

5. Literatura

- [1] J. Jasiczak, A. Wdowska, T. Rudnicki, *Betony ultrawysokowartościowe: właściwości, technologie, zastosowania*. Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2008.
- [2] Z. Bojarski, H. Morawiec, *Metale z pamięcią kształtu*. PWN, Warszawa 1989.
- [3] B. Raniecki, Termomechanika pseudosprężystości materiałów z pamięcią kształtu. [w:] *Współczesne trendy mechaniki materiałów* (red. W.K. Nowacki), tom 1, str. 55-140. IPPT PAN, 1996.

- [4] K. Bhattacharya, *Microstructure of martensite. Why it forms and how it gives rise to the shape memory effect*. Oxford University Press, New York, 2003.
- [5] D.C. Lagoudas, *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. Springer, 2008.
- [6] M. Kuczma, *Podstawy mechaniki konstrukcji z pamięcią kształtu. Modelowanie i numeryka*. Wyd. UZ, Zielona Góra 2010.
- [7] A. Tabrizikahou, M. Kuczma, M. Łasecka-Plura, E. Farsangi, M. Noori, P. Gardoni, S. Li. Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.* 342 (2022) 127975.
- [8] A. Tabrizikahou, J. Białasik, S. Borysiak, M. Fabisiak, M. Łasecka-Plura, T. Jesionowski, M. Kuczma, Shear strengthening of damaged reinforced concrete beams with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strips: numerical and parametric analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (2024) 24:189.
- [9] C. Czaderski, M. Shahverdi, R. Brönnimann, C. Leinenbach, M. Motavalli, Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. *Constr. Build. Mater.* 56 (2014) 94–105.
- [10] A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi, M. Motavalli, Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. *Constr. Build. Mater.* 63 (2014) 281–293.
- [11] ABAQUS. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA 2019.