



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Modelowanie numeryczne i badania
eksperymentalne betonu
wysokowartościowego z włóknami ze stopu
z pamięcią kształtu**

mgr inż. Alireza TABRIZIKAHOU

Promotor:

prof. dr hab. inż. Mieczysław KUCZMA

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Magdalena ŁASECKA-PLURA

Poznań, 2025

“Niech piękno tego, co kochasz, będzie tym, co czynisz”

Rumi

Streszczenie

Beton zbrojony włóknami (w j. ang. Fiber-Reinforced Concrete, w skrócie FRC) charakteryzuje się istotnie lepszymi właściwościami mechanicznymi, jednak konwencjonalne włókna (np. stalowe lub syntetyczne) pozostają bierne. Uwagę zyskują natomiast aktywne sposoby wzmacniania betonu takie jak włókna ze stopów z pamięcią kształtu (w j. ang. Shape Memory Alloy, w skrócie SMA), które po aktywacji termicznej mogą wstępnie sprężać elementy betonowe. Dzięki odwracalnej, termosprężystej przemianie fazowej (efekt pamięci kształtu) włókna SMA odzyskują pierwotny kształt po podgrzaniu, wywołując w matrycy betonowej naprężenia ściskające. Pełne zrozumienie wpływu stosowania ekonomicznego wariantu SMA—takiego jak SMA na bazie żelaza Fe-SMA o niższej cenie w porównaniu do innych typów SMA—na zachowanie FRC wymaga połączenia badań eksperymentalnych z zaawansowanym modelowaniem numerycznym.

Celem niniejszej pracy było wyznaczenie wpływu zastosowania włókien Fe-SMA na właściwości mechaniczne betonu. W ramach części eksperymentalnej określono wytrzymałość na wyrywanie włókien Fe-SMA dla różnych wariantów: geometrii włókna (proste, zakończone hakiem), mieszanek betonowych o różnej wytrzymałości na ściskanie, temperatur aktywacji oraz prędkości przyłożenia obciążenia. Ponadto przeprowadzono badania wytrzymałości na zginanie próbek betonowych zawierających włókna Fe-SMA, aby ocenić skuteczność wstępnego sprężenia betonu. Dodatkowo opracowano model numeryczny metodą elementów skończonych (MES), uwzględniający losowe rozproszenie włókien, nieliniowe zachowanie betonu oraz odzyskiwanie kształtu włókien poprzez wprowadzenie ujemnego współczynnika rozszerzalności termicznej. Model skalibrowano i zweryfikowano na podstawie wyników badań eksperymentalnych, a optymalny rozmiar siatki został określony na podstawie wyników numerycznych badań wrażliwości siatki. Otrzymane wyniki potwierdzają, że dodatek włókien Fe-SMA poprawia właściwości mechaniczne betonu dzięki generowaniu wstępnych naprężeń ściskających podczas aktywacji termicznej, co przekłada się na wyższą nośność elementu. Model MES poprawnie odwzorował krzywe siła–przemieszczenie próbek poddanych zginaniu, wykazując zgodność z danymi z badań eksperymentalnych.

Sformułowane wnioski wskazują, że wykorzystanie włókien Fe-SMA jako elementu sprężającego stanowi efektywną metodę zwiększenia nośności elementu betonowego. Opracowana metodologia badawcza oraz model obliczeniowy mogą być wykorzystane do projektowania nowej generacji inteligentnych kompozytów betonowych o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych.

Abstract

Fiber-reinforced concrete (FRC) is characterized by significantly improved mechanical properties; however, conventional fibers (e.g., steel or synthetic) remain passive. Consequently, there is growing interest in the use of smart materials such as shape memory alloy (SMA) fibers, which, upon thermal activation, can prestress concrete elements. Through a reversible, thermoelastic phase transformation (shape memory effect), SMA fibers recover their original shape when heated, inducing compressive stresses in the surrounding concrete matrix. A comprehensive understanding of the impact of employing an economical SMA variant—iron-based SMA (Fe-SMA), which is less expensive than other SMA types—on FRC behavior requires a combination of experimental investigations and advanced numerical modeling.

The aim of this study was to determine the influence of Fe-SMA fibers on the mechanical properties of concrete. In the experimental phase, the pull-out strength of Fe-SMA fibers was determined for various configurations—fiber geometry (straight and end-hooked), concrete mixes of differing compressive strengths, activation temperatures, and loading rates. Additionally, flexural strength tests were performed on concrete specimens containing Fe-SMA fibers in order to assess the effectiveness of concrete prestressing. Moreover, a finite element method (FEM) numerical model was developed, incorporating random fiber distribution, nonlinear concrete behavior, and fiber shape recovery through the introduction of a negative coefficient of thermal expansion. The model was calibrated and validated against the experimental results, and the optimal mesh size was determined based on numerical mesh sensitivity analyses. The findings confirm that the addition of Fe-SMA fibers enhances the mechanical performance of concrete by generating prestress compressive forces during thermal activation, thereby increasing the element's load-bearing capacity. The FEM model accurately replicated the force–displacement response of the flexural tests, demonstrating agreement with the experimental data.

The conclusions drawn indicate that employing Fe-SMA fibers as prestressing elements is an effective method for increasing the load-bearing capacity of concrete elements. The developed experimental methodology and computational model can be used to design the next generation of intelligent concrete composites with enhanced strength characteristics.

Podziękowania

Pragnę wyrazić najserdeczniejsze podziękowania **Panu Profesorowi dr hab. inż. Mieczysławowi Kuczmie** za wskazanie kierunku badań, nieocenione wsparcie i życzliwe mentorstwo w trakcie całego procesu przygotowywania niniejszej rozprawy. Jego nieustanna zachęta do podejmowania ambitnych wyzwań naukowych, troska o mój rozwój oraz umiejętne łączenie wskazówek z pozostawieniem mi przestrzeni do samodzielnych poszukiwań były kluczowe dla powstania tej pracy.

Wyrazy wdzięczności kieruję również do **dr hab. inż. Magdaleny Łaseckiej-Plury** za cenne uwagi i wsparcie, które znacząco przyczyniły się do udoskonalenia wyników moich badań.

Szczególne podziękowania składam mojej żonie **Małgorzacie** za nieustające wsparcie, wiarę i zrozumienie okazywane mi na każdym etapie tej drogi.

Dziękuję także moim **Rodzicom** za stałą motywację i wsparcie, które towarzyszyły mi przez wszystkie lata.

Spis treści

Streszczenie	ii
Abstract	iii
Podziękowania	iv
1 Wprowadzenie	1
1.1 Motywacja i problem badawczy	1
1.2 Cel i zakres pracy	5
1.3 Forma i układ rozprawy	6
2 Badania eksperymentalne	8
2.1 Metodologia badań eksperymentalnych	8
2.1.1 Badania zachowania termomechanicznego Fe-SMA	8
2.1.2 Badania wyrywania włókien z betonu	9
2.1.3 Badania eksperymentalne próbek betonowych	12
2.2 Dyskusja i interpretacja wyników badań eksperymentalnych	14
2.2.1 Zachowanie termomechaniczne włókien Fe-SMA	14
2.2.2 Wytrzymałość na wyrywanie włókien z betonu	14
2.2.3 Zachowanie termomechaniczne betonu	16
3 Modelowanie numeryczne	19
3.1 Generowanie losowo rozproszonych włókien	19
3.2 Modele materiałowe	21
3.2.1 Matryca betonowa	21
3.2.2 Fe-SMA	24
3.3 Właściwości kontaktu matrycy betonowej i włókien Fe-SMA	24
3.4 Weryfikacja modelu i analiza wrażliwości siatki	28
4 Wnioski i kierunki dalszych badań	32
4.1 Oryginalne elementy badań	32
4.2 Wnioski końcowe	33
4.2.1 Wnioski ogólne	33
4.2.2 Wnioski poznawcze	33
4.2.3 Wnioski metodyczne	34
4.2.4 Wnioski utylitarne	35
4.2.5 Wnioski prognostyczne	37
4.3 Kierunki dalszych badań	38

Literatura	40
Załącznik A Aktywność naukowa	46
A.1 Publikacje naukowe	46
A.2 Konferencje naukowe	47
A.3 Projekty naukowe	48
A.4 Staże naukowe	49
A.5 Nagrody i wyróżnienia	49
A.6 Dane naukometryczne – podsumowanie	50
Załącznik B Artykuły stanowiące podstawę pracy doktorskiej	51
B.1 Artykuł 1	51
B.2 Artykuł 2	52
B.3 Artykuł 3	53
B.4 Artykuł 4	54
Załącznik C Oświadczenia współautorów	55

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Motywacja i problem badawczy

Beton zbrojony włóknami (w skrócie FRC¹) jest powszechnie stosowany w celu poprawy wytrzymałości na zginanie betonu wysokowartościowego (w skrócie HPC²) [1–4]. Włókna (stalowe, syntetyczne itp.) osadzone w betonie działają jako element zapobiegający pęknięciom, hamując rozwój rys i poprawiając właściwości mechaniczne betonu [5–7]. Skutkuje to równomiernym rozkładem rys w elementach betonowych, takich jak płyty i belki [8–10]. Jednak najczęściej wykorzystywane włókna w kompozytach FRC są bierne — nie wprowadzają żadnych aktywnych naprężeń wewnątrz betonu. Włókna stanowią element uciągający lico betonowe po wystąpieniu pęknięć, zamiast aktywnie przywracać lub poprawiać stan przed powstaniem rys. Innymi słowy, konwencjonalne włókna nie są w stanie samodzielnie zamykać rys ani wytwarzać sił sprężających; wykazują działanie hamujące dalszą propagację rys, po uszkodzeniu betonu, gdy naprężenia rozciągające już uszkodziły beton. Te ograniczenia motywują poszukiwania aktywnych zbrojeń włóknistych, które nie tylko reagują na pęknięcia, lecz także proaktywnie poprawiają wytrzymałość i właściwości mechaniczne betonu.

Sprężony beton poprawia właściwości betonu na rozciąganie poprzez wprowadzenie początkowych naprężeń ściskających, zwykle za pomocą wstępnie naciągniętych cięgieł stalowych [11]. W standardowym systemie sprężania, druty lub struny z wysokogatunkowej stali są rozciągane i kotwione, aby wywierać siłę ściskającą na element betonowy [12, 13]. To wstępne sprężanie przeciwdziała zewnętrznym obciążeniom rozciągającym, zwiększając wartość obciążenia potrzebnego do spękania betonu i redukując ugięcia pod obciążeniami eksploatacyjnymi [14]. Sprężenie wykazało wysoką skuteczność w poprawie nośności betonu na zginanie [15, 16]. Niemniej jednak tradycyjne techniki sprężania mają ograniczenia: zazwyczaj wymagają prostych lub łagodnie wygiętych elementów, aby pomieścić cięgna i kotwy, oraz specjalistycznego osprzętu (kotwy, układy podnoszące), co utrudnia stosowanie w cienkich, segmentowanych lub mocno zakrzywionych elementach. Wprowadzone naprężenie jest również niejednorodne — skoncentrowane wzdłuż linii cięgieł, a nie równomiernie rozłożone w przekroju elementu [17]. Konieczność stosowania przewodów, głowic kotwiących i siłowników hydraulicznych komplikuje konstrukcję i uniemożliwia łatwe wprowadzenie sprężenia

¹w j. ang. Fiber-Reinforced Concrete

²w j. ang. High-Performance Concrete

wewnątrz masy betonu. Ponadto zakrzywione przebiegi cięgien generują straty związane z tarcie, a zastosowanie sprężenia ma praktyczne ograniczenia [18–20]. Podsumowując, konwencjonalne sprężanie zapewnia korzyści lokalne, ale nie umożliwia wprowadzenia rozproszonego, wewnętrznego sprężenia w całym materiale. Te wyzwania wskazują na potrzebę alternatywnego podejścia do uzyskania jednolitego sprężenia w skomplikowanych lub smukłych elementach betonowych.

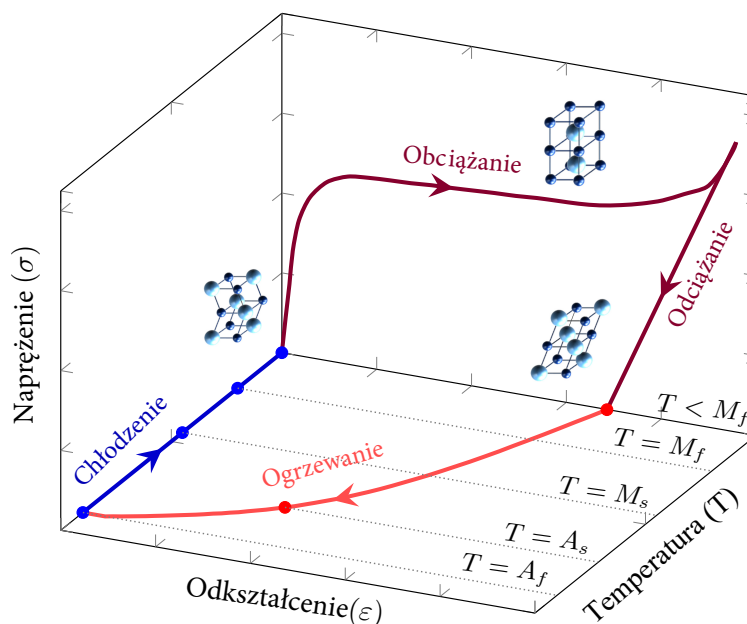
Stopy z pamięcią kształtu (w skrócie SMA³) to klasa metali charakteryzujących się zdolnością do dużych odkształceń, a następnie powrotu do pierwotnego kształtu pod wpływem określonych bodźców [21–23]. Ich unikalne zachowanie wynika z przemian fazowych na poziomie krystalicznym. Dwie kluczowe właściwości SMA to efekt pamięci kształtu (w skrócie SME⁴) — materiał (Rys. 1.1), odkształcony w fazie niskotemperaturowej (martenzytowej), „zapamiętuje” kształt pierwotny i powraca do niego po ogrzaniu powyżej krytycznej temperatury przemiany [24, 25]; oraz pseudoprężystość (w skrócie SE⁵) — materiał (Rys. 1.2) w fazie wysokotemperaturowej (austenitowej) może utrzymywać duże odkształcenia i automatycznie wracać do pierwotnego kształtu po odciążeniu, bez trwałej deformacji [26, 27]. W praktyce SME pozwala na wstępne odkształcenie elementu SMA i jego późniejszą aktywację termiczną w celu wygenerowania siły odzyskowej lub odkształcenia, natomiast SE zapewnia doskonałe tłumienie energii pod obciążeniami cyklicznymi [28–30]. Wykorzystując te właściwości, SMA znalazły zastosowanie w budownictwie jako inteligentne zbrojenie do sprężania wstępnego i tłumienia drgań [31]. Dzięki wstępnemu odkształceniu SMA, osadzeniu go w świeżym betonie (przy założeniu mechanicznego ograniczenia odkształcenia po stwardnieniu betonu) i ogrzewaniu w celu wyzwolenia odwróconej przemiany fazowej martenzyt–austenit, SMA generuje naprężenia odzyskowe, które indukują jednolite sprężenie ściskające zarówno w stopie, jak i w otaczającej macierzy betonowej (Rys. 1.3).

Nikolowo-tytanowy stop (Ni-Ti), znany jako Nitinol, jest najczęściej badanym SMA w tym kontekście. Badacze analizowali Ni-Ti w różnych formach (druty, taśmy, włókna) celem nadania aktywnych funkcji elementom betonowym [32, 33]. Na przykład wstępnie odkształcone druty Ni-Ti osadzone w betonie były ogrzewane, aby wywołać SME, kurcząc się i aktywnie sprężając otaczający beton [34]. Udowodniono, że taka metoda zwiększa nośność elementu oraz znacznie polepsza jego wytrzymałość, a nawet umożliwia częściowe zamknięcie rys po ponownym ogrzewaniu spękanego betonu [35]. W zastosowaniach sejsmicznych pseudoprężystość Ni-Ti wykorzystuje się w zbrojeniu belek i słupów żelbetowych, co pozwala na samocentrowanie się konstrukcji po oddziaływaniach dynamicznych [36]. SMA Ni-Ti używane są także w urządzeniach tłumiących i złączach sprzęgających z powodu ich zdolności do amortyzacji [37, 38]. Główną przeszkodą szerokiego zastosowania Ni-Ti w budownictwie jest jednak wysoki koszt produkcji i przetwarzania wysokiej jakości stopu, co czyni go ekonomicznie nieopłacalnym w powszechnym użyciu [39]. Ta bariera ekonomiczna przyczyniła się do rozwoju alternatywnych SMA dostosowanych do potrzeb konstrukcji budowlanych [40].

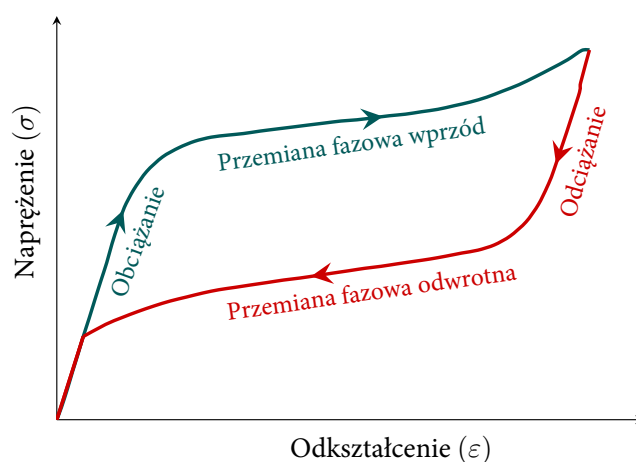
³w j. ang. Shape Memory Alloy

⁴w j. ang. Shape Memory Effect

⁵w j. ang. Superelasticity/Pseudoelasticity



Rys. 1.1: Efekt pamięci kształtu.



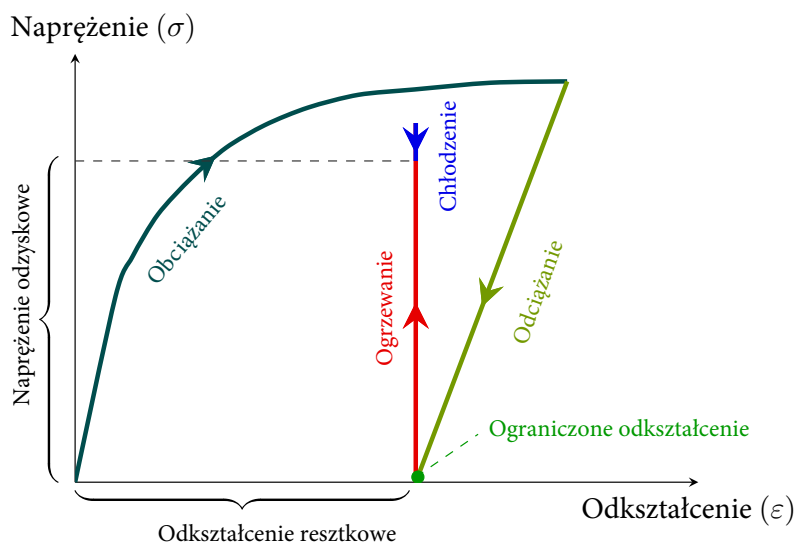
Rys. 1.2: Pseudosprężystości.

SMA na bazie żelaza (Fe-SMA⁶), zazwyczaj stopione z dodatkiem manganu, krzemu i innych pierwiastków, wyłoniły się jako obiecująca i ekonomiczna alternatywa dla Ni-Ti w zastosowaniach budowlanych [40, 41]. Fe-SMA oferują istotne zalety dla budownictwa: materiały bazowe (żelazo, mangan itd.) są stosunkowo tanie i mogą być przetwarzane w konwencjonalnych hutniczych procesach wytwarzania stali, co umożliwia masową produkcję [39, 42]. Ponadto Fe-SMA charakteryzują się doskonałymi właściwościami mechanicznymi do zastosowań konstrukcyjnych — wysoką wytrzymałością i ciągliwością — oraz dobrą odpornością na korozję (porównywalną ze stałą nierdzewną dzięki dodatkom stopowym) i wytrzymałością zmęczeniową [43]. Te cechy czynią Fe-SMA praktycznym materiałem do dużych zastosowań, gdzie Ni-Ti byłby zbyt kosztowny. Co ważne, Fe-SMA zachowują kluczową właściwość funkcjonalną niezbędną do sprężania — silny efekt pamięci kształtu [44]. Dzięki wstępnemu odkształceniu elementów Fe-SMA i ich

⁶ „Fe” oznaczający żelazo – od łacińskiego słowa „Ferrum”

późniejszemu ogrzewaniu w celu wywołania przemiany fazowej, elementy Fe-SMA mogą być aktywowane i generować naprężenia odzyskowe [45]. Jeśli taki element jest połączony z betonem, próba skurczenia będzie skutkować powstaniem naprężeń ściskających w otaczającym betonie. Przełomowe badania wykazały, że Fe-SMA mogą być wykorzystane do sprężania betonu bez ograniczeń tradycyjnych metod.

Czaderski i in. [46] udowodnili, że dzięki efektowi pamięci kształtu, za pomocą Fe-SMA można sprężać elementy betonowe bez potrzeby przewodów, głowic kotwiących, siłowników hydraulicznych czy wtrysku ciśnieniowego. W ciągu ostatniej dekady opracowano taśmy i pręty Fe-SMA używane w budownictwie. Na przykład cienkie taśmy Fe-SMA zostały zastosowane jako zbrojenie blisko powierzchni belek (w skrócie NSM⁷); po związaniu betonu taśmy ogrzewano, aby aktywować SME i samoczynnie sprężyć belkę bez zewnętrznych kotwień [47]. Takie systemy taśm Fe-SMA skutecznie zwiększyły nośność betonu na zginanie, potwierdzając koncepcję sprężania opartego na Fe-SMA. Podobnie badano pręty żebrowane Fe-SMA jako zamienniki lub uzupełnienie zwykłego zbrojenia stalowego, zdolne do wewnętrznego sprężania po aktywacji [48, 49]. Te innowacyjne zastosowania pokazują, że Fe-SMA oferują atrakcyjną metodę sprężania betonu: aktywną, lecz nie wymagającą skomplikowanego sprzętu hydraulicznego. Niemniej jednak dotychczasowe zastosowania Fe-SMA dotyczyły głównie dużych, ciągłych elementów zbrojenia (taśmy lub pręty) umieszczanych w ograniczonej liczbie miejsc (np. na powierzchni rozciąganej belki). Pełny potencjał Fe-SMA do zapewnienia rozproszonego sprężenia w całym elemencie — analogicznie rozproszenia włókien w FRC — pozostaje jeszcze niewykorzystany.



Rys. 1.3: Koncepcja wstępnego sprężania betonu z wykorzystaniem wstępnie odkształconych Fe-SMA.

Na podstawie przeglądów literatury [33, 50] oraz wyników opisanych w artykułach B.1 i B.2, pomimo postępów w zastosowaniach SMA, w literaturze nadal występuje kilka kluczowych luk dotyczących użycia krótkich włókien Fe-SMA (w przeciwieństwie do

⁷w j. ang. near-surface mounted strengthening method

długich cięgien czy taśm) do sprężania betonu:

- **Większość dotychczasowych badań nad SMA w betonie koncentrowała się na drutach lub włóknach Ni-Ti w celu zamykania rys i ograniczonych efektach sprężania.** Badania wykazały, że krótkie włókna Ni-Ti mogą być osadzone w zaprawie lub betonie, by uzyskać aktywne działanie — zapewniając pewne naprężenie przed spękaniami i zamykając rysy po ogrzewaniu [51–54]. **Jednak koszt Ni-Ti uniemożliwia jego szerokie zastosowanie.** Według wiedzy autora, **nie istnieją badania analizujące wpływ termicznie aktywowanych włókien Fe-SMA osadzonych w matrycy betonowej.** Nieznane jest, jak losowo rozproszona sieć wstępnie odkształconych włókien Fe-SMA, podgrzewana wewnątrz stwardniałego elementu betonowego, wpłynie na rozwój rys, nośność oraz wytrzymałość na zginanie. To wyraźna luka badawcza, ponieważ wszystkie dotychczasowe badania nad sprężaniem Fe-SMA wykorzystują bardziej zdyskretyzowane zbrojenia (pręty/taśmy), a nie jednorodny rozkład włókien.
- **Kolejnym niezgłębionym tematem jest wytrzymałość na wyrywanie włókien Fe-SMA z matrycy betonowej.** Skuteczne przeniesienie naprężeń odzyskowych z włókna do betonu zależy od mocnego zakotwienia. Podczas gdy właściwości połączenia dla biernych włókien stalowych są dobrze zbadane, nie ma opublikowanych danych na temat wytrzymałości na wyrywanie włókien Fe-SMA w różnych warunkach (np. różna geometria włókien, wytrzymałość betonu czy temperatura aktywacji termicznej). Nie wiadomo, czy włókna Fe-SMA pozostaną dobrze zakotwione podczas próby skurczenia po ogrzaniu, ani jak wysoka temperatura wpłynie na właściwości adhezyjne pomiędzy włóknom a betonem. Bez tej wiedzy nie byłoby możliwe przewidzenie efektywności przeniesienia naprężeń.
- Na koniec, istnieje luka w modelowaniu numerycznym — **żadne wcześniejsze badania nie doprowadziły do opracowania szczegółowych modeli MES odzwierciedlających mikrostrukturę, umożliwiającą numeryczne modelowanie betonu z rozproszonymi osadzonymi włóknami Fe-SMA.** Takie modele są niezbędne do zrozumienia i przewidywania zachowania kompozytu (np. jak rozkładają się naprężenia wewnętrzne po aktywacji włókien, jak mogą powstawać rysy w obecności aktywnych włókien itp.). Istniejące badania numeryczne nad SMA w betonie zwykle dotyczą większych elementów SMA (pręty lub taśmy).

1.2 Cel i zakres pracy

Uwzględniając wspomniane nieprzeanalizowane zagadnienia, niniejsza rozprawa wynika z potrzeby zbadania i zweryfikowania nowego podejścia do wzmocnienia konstrukcji betonowych poprzez zastosowanie krótkich włókien Fe-SMA do aktywnego wstępnego sprężenia betonu wysokowartościowego. Główną ideą — i nowatorskim wkładem tej pracy — jest połączenie zalet zbrojenia włóknami (jednorodnie rozproszonymi w całej objętości elementu) z korzyściami płynącymi ze sprężenia (wstępne ściskanie, które zwiększa rysoodporność i poprawia wytrzymałość na zginanie), poprzez wykorzystanie efektu pamięci kształtu włókien Fe-SMA. W odróżnieniu od konwencjonalnych włókien (które

działają biernie) i tradycyjnego sprężenia (stosowanego wyłącznie za pomocą zewnętrznych cięgien), proponowane podejście utworzy wewnętrznie sprężony kompozyt FRC, w którym każde krótkie włókno będzie pełnić rolę drobnego cięgna, wprowadzającego wtórne naprężenia w otaczający beton po aktywacji. Zapewnia to jednorodne, rozproszone sprężenie w całym elemencie betonowym, co nie jest osiągalne metodami konwencjonalnymi.

Aby zrealizować tę koncepcję, opracowano program badawczy. W ramach eksperymentu przetestowano próbki HPC z osadzonymi włóknami Fe-SMA w celu oceny wpływu aktywacji włókien na zachowanie przy zginaniu — w kontekście zwiększenia nośności. Eksperymenty obejmują badania zginania trzypunktowego próbek, wyznaczające wytrzymałość na zginanie przed oraz po aktywacji włókien Fe-SMA, a także dedykowane testy wyrywania pojedynczych włókien w celu określenia właściwości połączenia włókno–beton. W części modelowania numerycznego opracowano szczegółowy model elementów skończonych (w skrócie MES) kompozytu Fe-SMA-FRC, zaimplementowany w oprogramowaniu ABAQUS/CAE [55], w którym włókna są odwzorowane za pomocą losowego rozkładu (odzwierciedlającego rzeczywistą mikrostrukturę kompozytu).

Podsumowując, cele i założenia przeprowadzonych badań są następujące:

- Określić wytrzymałość na wyrywanie i charakterystykę połączenia włókien Fe-SMA z betonem w różnych warunkach (w tym przed i po aktywacji), aby zapewnić skuteczne przeniesienie naprężeń odzyskowych.
- Zmierzyć wpływ aktywowanych włókien Fe-SMA na ostateczną nośność na zginanie betonu w porównaniu ze wzmocnieniem biernym, za pomocą badań trzypunktowego zginania.
- Opracować model MES oparty na mikrostrukturze, symulujący zachowanie losowo rozmieszczonych włókien Fe-SMA w betonie, w celu przewidywania rozwoju naprężeń wewnętrznych i właściwości mechanicznych po aktywacji włókien.

Teza wynikająca z niniejszej pracy głosi, że osadzenie włókien Fe-SMA w macierzy betonu konstrukcyjnego tworzy ekonomiczny, wstępnie samosprężony kompozyt zdolny do aktywnej redukcji rys i poprawy parametrów wytrzymałościowych. Dzięki zastosowaniu kompleksowego podejścia obejmującego przegląd literatury, testy eksperymentalne oraz skalibrowane modelowanie MES, niniejsze badania wykazują, że termicznie aktywowane włókna Fe-SMA mogą skutecznie odzyskiwać wstępne odkształcenie i zwiększać wytrzymałość betonu przy zginaniu.

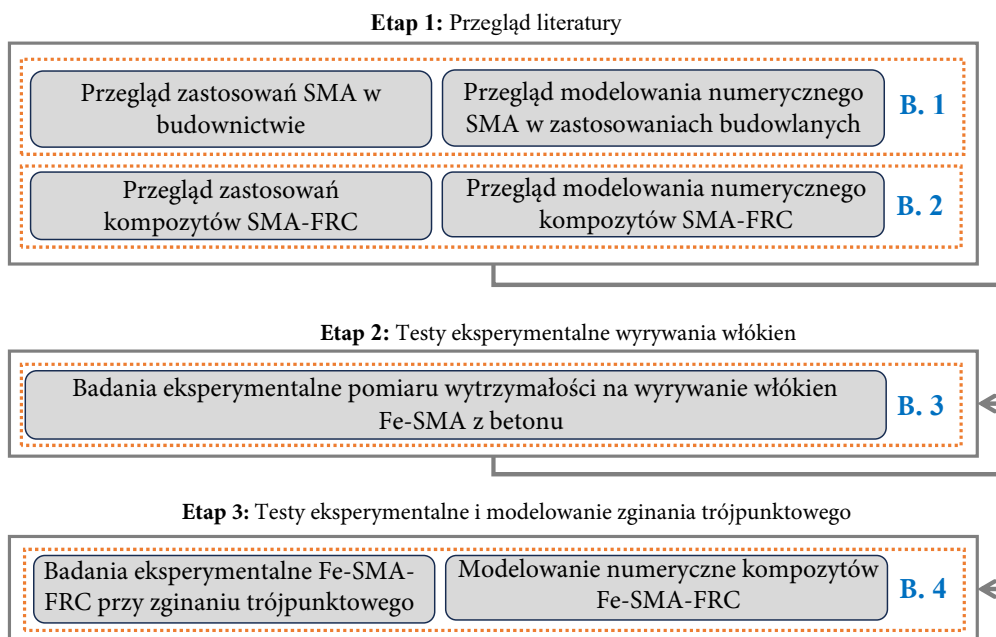
1.3 Forma i układ rozprawy

Rozprawa składa się z czterech oryginalnych artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych indeksowanych w bazie Journal Citation Reports (JCR).

- **B.1: Tabrizikahou A.**, Kuczma M., Łasecka-Plura M., Farsangi E-N., Noori N., Gardoni P., Li S. *Application and modeling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review*. Construction and Building Materials 342 (2022) 127975.

- **B.2:** Tabrizikahou A., Kuczma M., Czaderski C., Shahverdi M. *From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites*. Composites Part B: Engineering 281 (2024) 111530.
- **B.3:** Tabrizikahou A., Kuczma M., Shahverdi M. *Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation*. Construction and Building Materials 456 (2024) 139298.
- **B.4:** Tabrizikahou A., Kuczma M., Triantafyllidis Z., Shahverdi M. *Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis*. Construction and Building Materials 467 (2025) 140309.

Rozdział 1 jest wprowadzeniem, prezentując motywację, problem badawczy oraz formę rozprawy. Rozdział 2 zawiera szczegółowe informacje dotyczące użytych materiałów, procesu przygotowania próbek zastosowanych, metod badawczych oraz uzyskanych wyników, wraz z dyskusją i interpretacją tych ustaleń. Rozdział 3 opisuje procedury modelowania, w tym generowanie losowych rozkładów włókien, modele materiałowe, właściwości kontaktu, analizę wrażliwości siatki oraz walidację symulacji numerycznych. Rozdział 4 przedstawia wnioski końcowe oraz propozycje dalszych kierunków badań. W załączniku A zawarto podsumowanie działań naukowych związanych z rozprawą doktorską. W Załączniku B dołączono dalsze informacje o publikacjach B.1–B.4, natomiast w Załączniku C zamieszczono oświadczenia współautorów. Chociaż niniejsza rozprawa doktorska streszcza badania przedstawione w publikacjach B.1–B.4, nie może być rozpatrywana bez ich udziału. Rysunek 1.4 prezentuje główny zakres tematyczny rozprawy oraz etapy badań związane z publikacjami wymienionymi w Załączniku B.



Rys. 1.4: Zakres badań oraz odniesienia do istotnych publikacji.

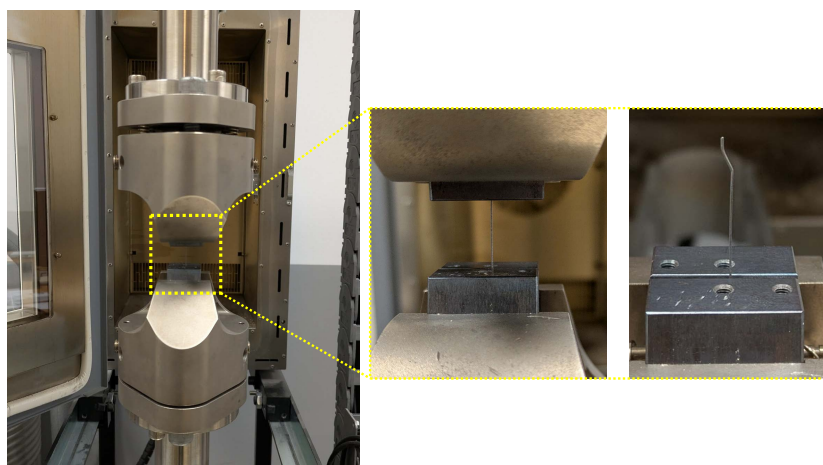
Rozdział 2

Badania eksperymentalne

2.1 Metodologia badań eksperymentalnych

2.1.1 Badania zachowania termomechanicznego Fe-SMA

Niezwykle istotne było szczegółowe poznanie zachowania termomechanicznego włókien Fe-SMA, gdyż efektywność wstępnego sprężenia betonu zależy od ich reakcji na aktywację termiczną i obciążenie mechaniczne. Dlatego przeprowadzono badania na pojedynczych włóknach Fe-SMA (z zakończeniami haczykowymi, wstępnie odkształconych o około $5.0 \% \pm 1.0 \%$) w warunkach odpowiadających planowanym scenariuszom ogrzewania. Charakteryzacja zależności naprężenie–odkształcenie przy wybranych temperaturach aktywacji umożliwiła ocenę zdolności włókien do generowania siły odzysku i wstępnego sprężenia. W badaniach cztery włókna poddano kontrolowanemu cyklowi termomechanicznemu (Rys. 2.1): każde włókno zamocowano na obu końcach i zastosowano wstępne naprężenie ok. 100 MPa, aby zapobiec ścisnaniu wskutek rozszerzalności termicznej. Dwa włókna ogrzano do 160 °C, a pozostałe dwa do 200 °C, po czym umożliwiono ich powrót do temperatury pokojowej, jednocześnie nieprzerwanie rejestrując wartości naprężenia i zmiany temperatury w komorze. Inne badania wskazują, że podwyższenie temperatury aktywacji może częściowo zwiększyć poziom naprężenia odzyskowego [43, 56–58]. W związku z tym, dla porównania, w niniejszym badaniu uwzględniono również ogrzewanie do 200 °C.

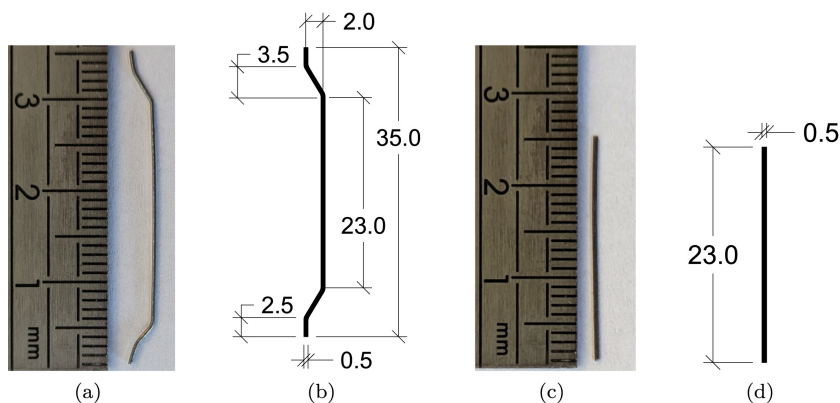


Rys. 2.1: Układ badawczy zastosowany do wyznaczenia zachowania termomechanicznego włókien Fe-SMA [59].

2.1.2 Badania wyrywania włókien z betonu

Eksperyment polegał na wykonaniu testu wyrywania włókna, mającego na celu zbadanie charakterystyki interakcji między włóknami Fe-SMA a matrycą betonową w różnych warunkach. Zmiennymi badawczymi były: geometria włókna (włókna proste lub włókna zakończone haczykiem), ekspozycja termiczna (temperatura otoczenia ok. 20 °C, podgrzewanie do 160 °C i 200 °C), rodzaj mieszanki betonowej (dwie mieszanki HPC oznaczone jako HPC-1 i HPC-2) oraz szybkość obciążania. Łącznie przebadano 72 próbki w celu zmierzenia wytrzymałości na wyrywanie włókna Fe-SMA.

Każda próbka składała się z pojedynczego włókna Fe-SMA umieszczonego w betonowym cylindrze. Włókna Fe-SMA testowano w dwóch wariantach geometrycznych: prostym oraz zakończonym haczykami. Włókna z haczykami posiadały na obu końcach zagięte haki o długości 6 mm (Rys. 2.2). Stop Fe-SMA o składzie Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni-1V (% wagowy) wybrano ze względu na silny efekt pamięci kształtu i wysokie naprężenia odzyskowe w zakresie aktywacji 160–200 °C.

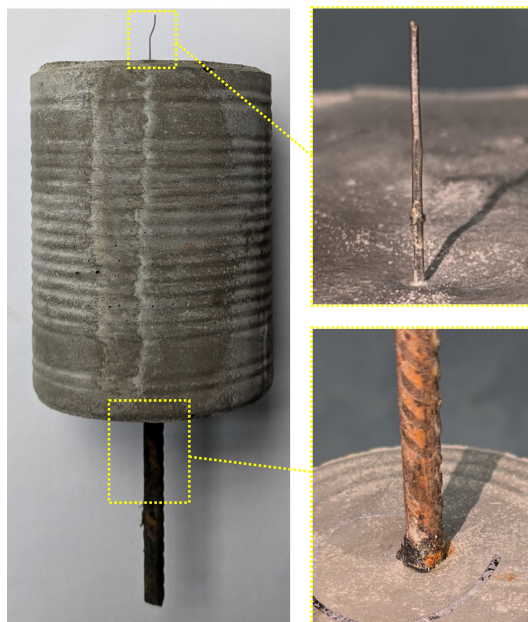


Rys. 2.2: Geometria włókien Fe-SMA: (a) i (b) – z zakończeniami haczykowatymi, oraz (c) i (d) – proste (wymiały podano w milimetrach) [60].

Zastosowano dwa rodzaje betonu HPC, oba o docelowej wytrzymałości na ściskanie w przedziale 50–100 MPa. Mieszanka HPC-1 zawierała mączkę wapienną jako wypełniacz mineralny, natomiast HPC-2 dodatkowo wzbogacono o popiół krzemionkowy (SIKA-FUME). Po 28 dniach dojrzewania w standardowych warunkach średnia wytrzymałość na ściskanie dla HPC-1 wyniosła około 98 MPa, a dla HPC-2 około 67 MPa. Dodatek popiołu krzemionkowego w HPC-2 poprawił mikrostrukturę porów. Pomimo nieznacznie zwiększonej kruchości, mieszanka HPC-1 wykazała lepsze podstawowe właściwości mechaniczne. Mieszanki zróżnicowano pod względem składu, aby zbadać jego wpływ na przyczepność włókien, zwłaszcza po narażeniu na wysoką temperaturę.

Każdą próbkę przygotowano poprzez wylanie betonu do cylindrycznej formy z uprzednim zamocowaniem pojedynczego włókna pionowo w osi próbki (Rys. 2.3). Przed testami mechanicznymi wybrane grupy próbek poddawano kondycjonowaniu termicznemu: umieszczano je w komorze grzewczej, podgrzewano do określonej temperatury (160 °C lub 200 °C), utrzymywano w docelowej temperaturze, aby wyrównać rozkład temperatury wewnątrz próbek, a następnie studzono do temperatury otoczenia. W

celu kontroli rozkładu temperatur wewnątrz betonowej próbki, zastosowano wbudowane termopary umożliwiające pomiar temperatury wewnętrznej i zewnętrznej próbki (Rys. 2.4). Pomiar potwierdził, że osiągnięto planowane warunki eksperymentu (Rys. 2.5). Temperatura ta przewyższała temperaturę końca przemiany austenitycznej A_f , stosowaną dla stopu Fe-SMA (ok. 160 °C), co oznaczało, że włókna ulegały przemianom fazowym martenzyt-austenit.



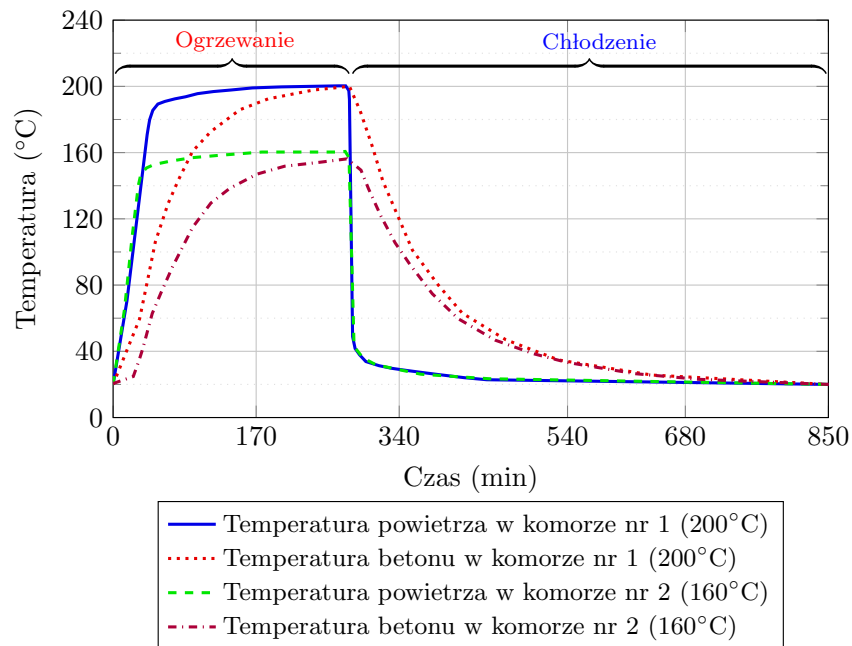
Rys. 2.3: Próbka cylindryczna po zdjęciu form i 28-dniowym dojrzewaniu [60].



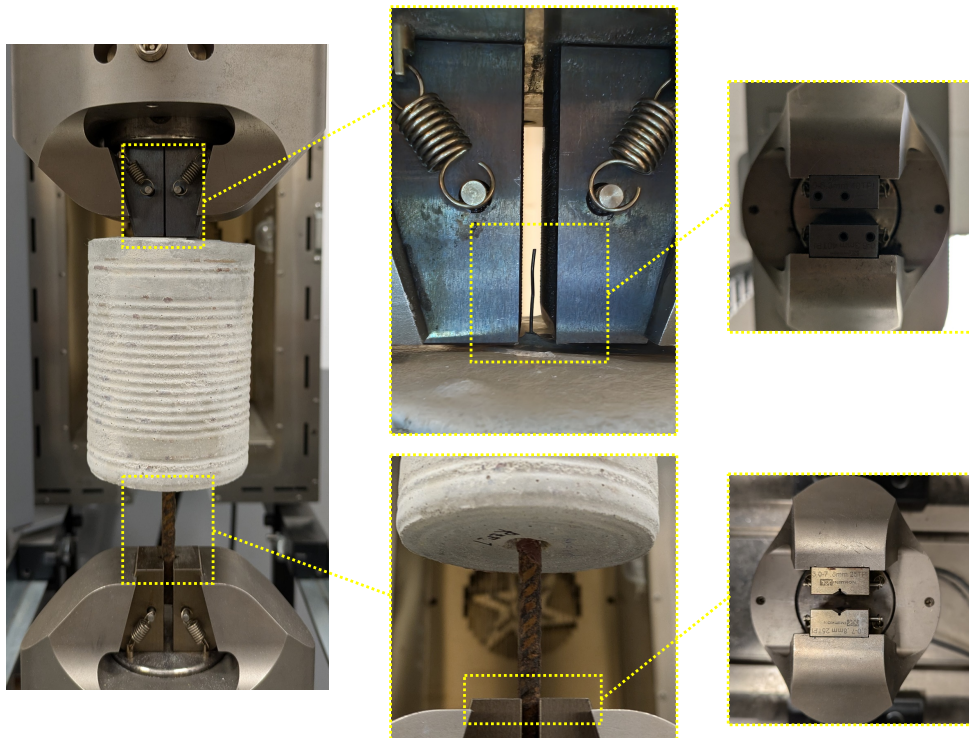
Rys. 2.4: Termopary zamontowane wewnątrz oraz na powierzchni próbki betonowej w celu monitorowania temperatury podczas nagrzewania [60].

Po kondycjonowaniu termicznym (lub bezpośrednio po okresie dojrzewania dla próbek referencyjnych) przeprowadzono test wyrywania włókien. Układ badawczy składał się z zacisku trzymającego wystającą końcówkę włókna (zamocowaną w ramieniu maszyny wytrzymałościowej) oraz podpory stabilizującej cylinder betonowy. Konfigurację testu pokazano na Rys. 2.6, uwzględniając zaciski i wystający pręt. Obciążenie przyłożono w trybie sterowania przemieszczeniem tak, aby włókno było wyrywane ze stałą prędkością. Zastosowano dwie prędkości: *quasi*-statyczną rzędu 0,2 mm/min oraz szybką o wartości 2,0 mm/min w celu oceny wpływu szybkości obciążania na siły przyczepności. Z każdego testu uzyskano krzywą siła–przemieszczenie, na podstawie której określono maksymalną siłę wyrywania. Podczas testów rejestrowano przemieszczenie górnego zacisku oraz siłę

przykładną przez maszynę wytrzymałościową. Po zakończeniu testu dokonano wizualnej oceny stanu włókna oraz powierzchni zniszczenia betonu, aby określić dominujący tryb zniszczenia (np. plastyczne odkształcenie włókna lub pęknięcie matrycy betonowej).



Rys. 2.5: Temperatury betonu oraz powietrza (wewnątrz komory grzewczej) rejestrowano za pomocą termopar zainstalowanych w modelowej cylindrycznej próbce.



Rys. 2.6: Układ do pomiaru wytrzymałości na wyrywanie włókna Fe-SMA osadzonego w betonie [60].

2.1.3 Badania eksperymentalne próbek betonowych

Przeprowadzono serię badań, mających na celu ocenę globalnego wpływu zastosowania włókien Fe-SMA jako elementu wzmacniającego beton, poprzez pomiar wytrzymałości próbek na zginanie. Elementy z włóknami rozproszonymi losowo poddano zginaniu trójpunktowemu. Zmiennymi badawczymi były: włókna (Fe-SMA, stalowe, lub beton bez włókien) oraz aktywacja termiczna (brak podgrzewania, podgrzewanie do 160 °C lub 200 °C).

Próbki stanowiły prostopadłościanny o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm (rozstaw podpór 100 mm) wykonane zgodnie z normą EN 1015-11 [61]. Ponieważ właściwości mieszanki HPC-1 — zapewniające wyższą wytrzymałość na ściskanie oraz większą wytrzymałość na wyrywanie (szczegóły omówiono w artykule B.3) — były kluczowe dla niniejszych badań, to właśnie ją wykorzystano przy wykonywaniu próbek i przeprowadzaniu dalszych eksperymentów. We wszystkich próbkach z włóknami ich ilość wynosiła 2,0% objętości betonu. Przygotowano trzy serie badawcze: z włóknami Fe-SMA, ze stalowymi włóknami oraz referencyjną (bez włókien). W elementach zastosowano włókna Fe-SMA o identycznej geometrii jak w testach wyrywania (z zakończeniami haczykowymi) i wstępnie odkształcone w granicach około 5,0 % ± 1,0 %. Włókna stalowe dobrano w taki sposób, aby miały taką samą geometrię (zakończenia haczykowe) i podobną długość (35 mm), a ponieważ komercyjnie dostępne są jedynie włókna o nieco większej średnicy, wynoszącej 0,55 mm, różnicę 0,05mm uznano za nieistotną. Dzięki temu oba typy włókien miały zbliżoną geometrię i taki sam udział objętościowy w próbkach (2,0 %), różniąc się głównie właściwościami materiałowymi (stal bierna lub włókna Fe-SMA). Dzięki porównaniu z próbkami ze stalowymi włóknami możliwe było wyodrębnienie wpływu aktywacji efektem pamięci kształtu na właściwości mechaniczne betonu.

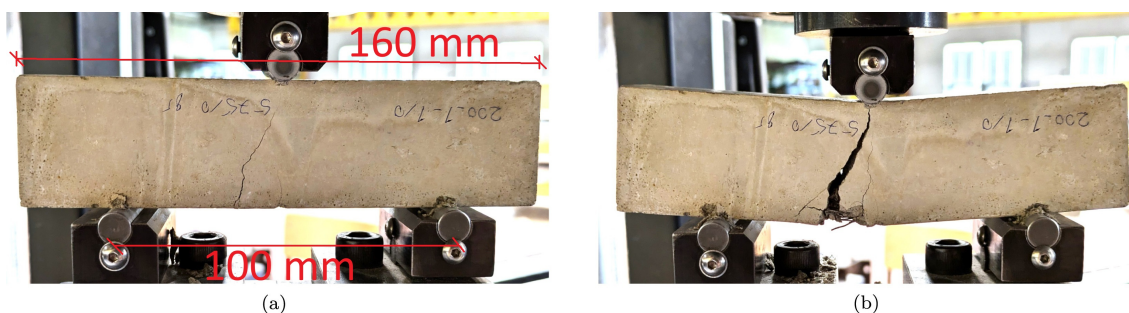
Po 28 dniach dojrzewania wybrane próbki poddano aktywacji termicznej (Rys. 2.7). Aby odtworzyć warunki wyzwalające efekt pamięci kształtu, próbki umieszczono w piecu i podgrzano do 160 °C lub 200 °C (pozostałe utrzymywano w temperaturze pokojowej). Przy 160 °C większość wody związanej zostaje usunięta z matrycy betonowej, a włókna Fe-SMA przechodzą w fazę austenitu. Dalsze podgrzewanie do 200 °C wiąże się z dodatkowymi procesami odwodnienia oraz drobnymi zmianami mikrostruktury matrycy (opisanymi w dalszej części). Po schłodzeniu włókna Fe-SMA pozostają w stanie sprężystego odkształcenia (naprężenie odzyskowe), wywierając na otaczający beton naprężenie ściskające.



Rys. 2.7: Próbkki umieszczone w komorze grzewczej w celu aktywacji termicznej [59].

Wszystkie próbki poddano zginaniu trójpunktowemu aż do zniszczenia w trybie sterowania przemieszczeniem. Rozstaw podpór wynosił 100 mm, a obciążenie przykładano w środkowym punkcie belki. W trakcie badania rejestrowano krzywe siła–przemieszczenie oraz obserwowano proces tworzenia i rozwoju rys. Ze względu na niewielkie wymiary próbek nie zastosowano tensometrów ani ekstensometrów; zamiast tego ekwiwalentną charakterystykę naprężenie–odkształcenie przy zginaniu wyprowadzono na podstawie danych siła–przemieszczenie. Na Rys. 2.8 przedstawiono próbkę z włóknami Fe-SMA podczas obciążenia: przy maksymalnym obciążeniu powstała rysa przesunięta względem osi, a w chwili zniszczenia zaobserwowano liczne rysy oraz wrywanie włókien.

W programie badań obejmującym zarówno próbki niewzmocnione włóknami, jak i wzmacnione, zastosowano jednolite procedury termiczne w celu wyizolowania efektu samego ogrzewania od korzyści wynikających z wstępnego sprężenia włókien. Najpierw odlewano próbki z mieszanki HPC-1 (bez dodatku włókien) i po upływie 28 dni poddawano je trójpunktowemu zginaniu, rejestrując wytrzymałość na zginanie. Następnie z końców tych próbek odcinano kostki o boku 40 mm, które testowano w ściskaniu ze sterowaniem przemieszczeniem (2,0 mm/min), co pozwoliło określić wytrzymałości betonu na ściskanie. Równolegle próbki z włóknami Fe-SMA i stalowymi poddano wyłącznie próbie zginania, dzięki czemu porównanie ich wyników z wynikami próbek bez włókien umożliwiło oddzielenie wzrostu nośności spowodowanego wstępnym sprężeniem włókien od obniżenia wytrzymałości matrycy betonowej na skutek działania wysokiej temperatury.

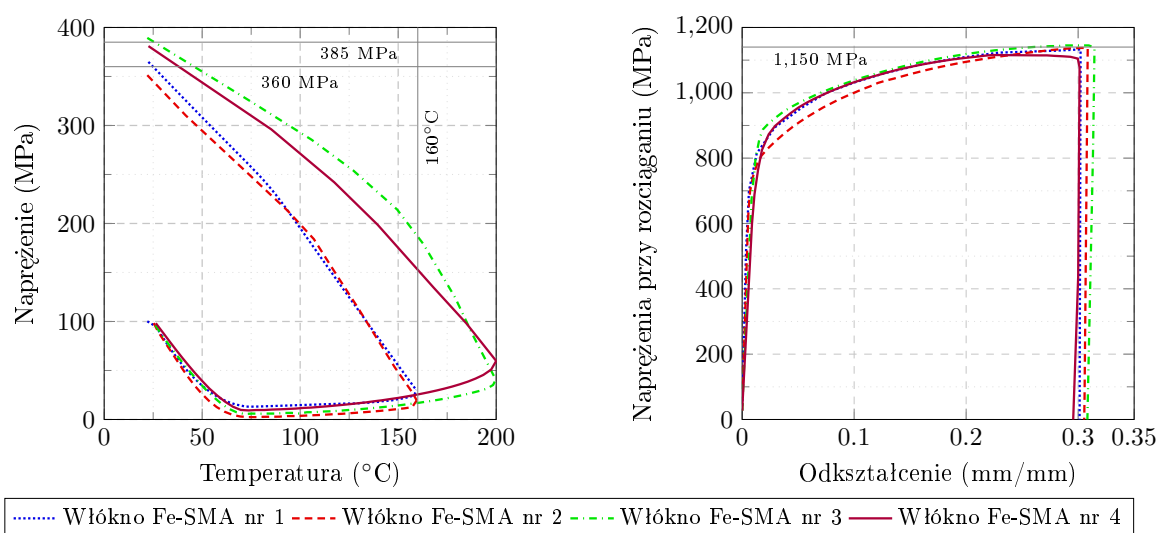


Rys. 2.8: Badanie zginania trójpunktowego próbek wzmacnionych włóknami Fe-SMA przy (a) maksymalnym naprężeniu oraz (b) zniszczeniu [59].

2.2 Dyskusja i interpretacja wyników badań eksperymentalnych

2.2.1 Zachowanie termomechaniczne włókien Fe-SMA

Na Rys. 2.9 pokazano, że włókna Fe-SMA wykazują silną aktywację efektu pamięci kształtu, nie tracąc przy tym pierwotnej wytrzymałości na rozciąganie: w fazie ogrzewania od temperatury pokojowej do około 70 °C następuje przewidywany spadek naprężenia (do wartości rzędu 10–17 MPa) związany z rozszerzalnością cieplną, a następnie — wraz z inicjacją przemiany fazowej martenzyt→austenit — obserwuje się stopniowy wzrost naprężenia. W scenariuszu aktywacji do 200 °C zaobserwowano wyraźny wzrost naprężeń dla temperatur powyżej 155 °C, co prowadzi ostatecznie do ich odzyskania rzędu ≈ 385 MPa (czyli o około 25 MPa więcej niż przy aktywacji do 160 °C). Kolejne testy rozciągania potwierdzają, że włókna aktywowane zarówno do 160 °C, jak i do 200 °C osiągają niemal identyczne wartości naprężenia maksymalnego (≈ 1150 MPa) przy odkształceniach bliskich 30 %.

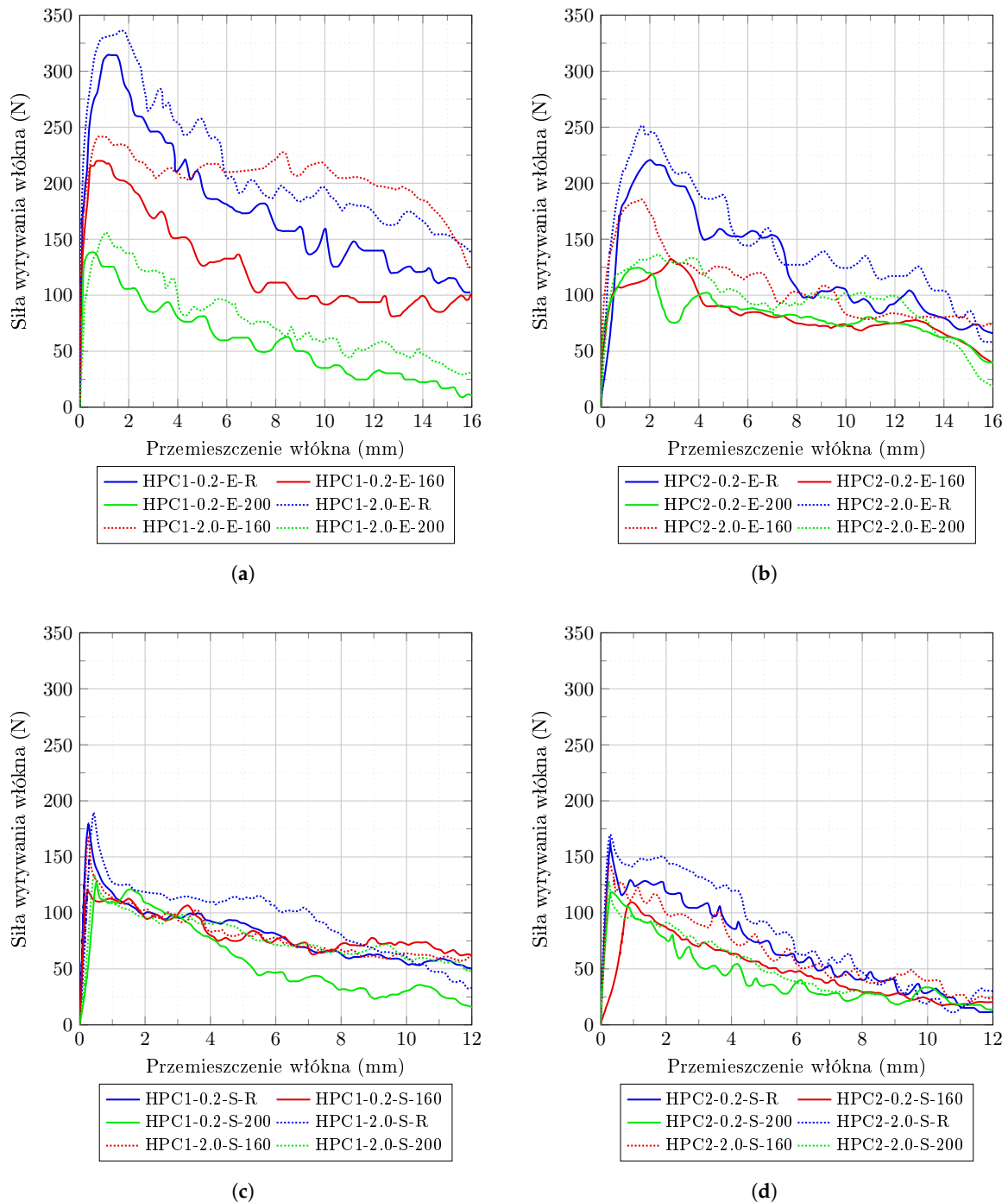


Rys. 2.9: Proces aktywacji termicznej wstępnie odkształconych włókien Fe-SMA oraz zależność naprężenie–odkształcenie (po aktywacji termicznej) [59].

2.2.2 Wytrzymałość na wyrywanie włókien z betonu

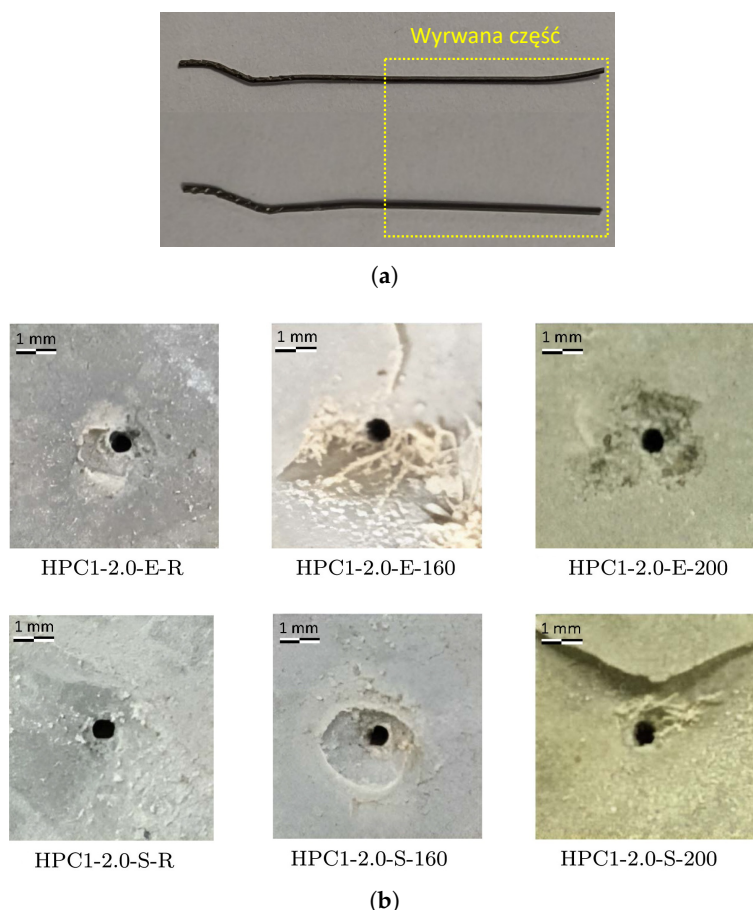
Wyniki wykazały, że na wytrzymałość na wyrywanie włókien Fe-SMA w największym stopniu wpływa geometria zakończenia włókna i skład mieszanki betonowej, natomiast szybkość obciążenia oraz temperatura aktywacji odgrywają rolę drugorzędą. Włókna z zakończeniami haczykowymi w mieszance HPC-1 stale osiągały najwyższe maksymalne siły wyrywania — przekraczające 300 N w warunkach referencyjnych (bez ogrzewania) — podczas gdy włókna proste w mieszance HPC-2 wykazywały najniższą wytrzymałość, rzadko przekraczającą 170 N (Rys. 2.10). Podniesienie temperatury aktywacji z temperatury otoczenia do 160 °C i 200 °C wywołało systematyczne zmniejszenie siły wyrywania we wszystkich konfiguracjach, przy czym włókna zakończone haczykami wykazały bardziej wyraźny spadek (nawet do 50 %), niż włókna proste. Przy 200 °C i wolnym tempie obciążania włókna proste wykazały niewielką poprawę wytrzymałości, co sugeruje złożone mechanizmy tarcia, wymagające dalszych badań. Szybsze tempo przemieszczenia (2,0

mm/min) skutkowało nieznacznie wyższymi siłami szczytowymi, potwierdzając wpływ szybkości. Zaobserwowana (Rys. 2.11) deformacja haczyków kotwiących włókna i lokalne uszkodzenia matrycy, podkreślając kluczową rolę mechanicznego zakotwienia. W związku z tym dla uzyskania optymalnej wydajności elementów betonowych z włóknami Fe-SMA zaleca się stosowanie włókien zakończonych hakami w matrycy o wysokiej wytrzymałości, takiej jak HPC-1, a także kontynuację badań nad zjawiskiem tarcia w wyższych temperaturach w celu udoskonalenia modeli predykcyjnych.



Rys. 2.10: Krzywe siła-przemieszczenie uzyskane dla średnich wartości podczas testów wyrywania włókna Fe-SMA dla próbek z: (a) zakończonymi haczykami w mieszance HPC-1, (b) zakończonymi haczykami w mieszance HPC-2, (c) prostymi w mieszance HPC-1 oraz (d) prostymi w mieszance HPC-2 [60].

W legendzie wykresów na Rys. 2.10 występują następujące oznaczenia: HPC-1 i HPC-2 to dwie różne receptury betonu o zróżnicowanym składzie mineralnym (szczegóły składu przedstawiono w artykule B.3); wartości 0.2 i 2.0 oznaczają szybkości obciążenia odpowiednio 0,2 mm/min i 2,0 mm/min; litera S odnosi się do włókien prostych (ang. straight), natomiast E – do włókien zakończonych haczykami (ang. end-hooked); symbol R oznacza próbki referencyjne bez aktywacji termicznej; liczby 160 i 200 wskazują temperatury aktywacji wynoszące 160 °C oraz 200 °C.

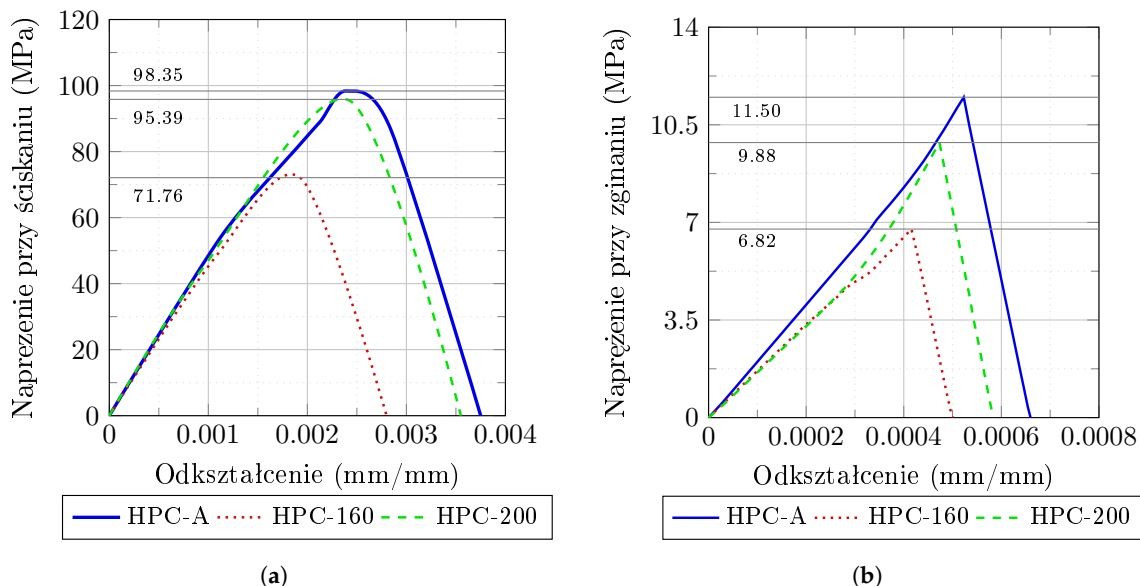


Rys. 2.11: Wizualna inspekcja po próbach wyrywania: (a) kształt włókien Fe-SMA wyrwanych z betonu; (b) ubytki w matrycy betonowej powstałe w różnych próbkach [60].

2.2.3 Zachowanie termomechaniczne betonu

Próbki nieogrzewane (oznaczone jako HPC-A) uzyskały najwyższe wytrzymałości przy próbie ściskania kostek – odpowiednio 98,35 MPa przy ściskaniu oraz 11,50 MPa przy zginaniu (Rys. 2.12). Ogrzewanie do 160 °C spowodowało znaczące pogorszenie parametrów (spadek o 27 MPa w próbie ściskania i o 4,68 MPa w próbie zginania), co jest efektem utraty wody w przekroju betonowym oraz pojawieniem się mikropełnięć w matrycy betonowej. Dalsze podgrzewanie do 200 °C przyniosło częściową odbudowę wytrzymałości, osiągając 95,39 MPa przy ściskaniu oraz 9,88 MPa przy zginaniu – wciąż niższe od wartości dla próbek referencyjnych, lecz sugerujące występowanie wtórnych reakcji hydratacyjnych lub wypełniania porów, które zagęszczają matrycę pomiędzy 160 °C a 200 °C. Zjawisko to, zauważane w niektórych recepturach HPC/UHPC [62–66], podkreśla

złożoną interakcję pomiędzy uszkodzeniami termicznymi a korzystnymi procesami chemicznymi w umiarkowanych temperaturach i uzasadnia przeprowadzenie szczegółowych badań mikrostrukturalnych w celu wyjaśnienia dominujących mechanizmów.

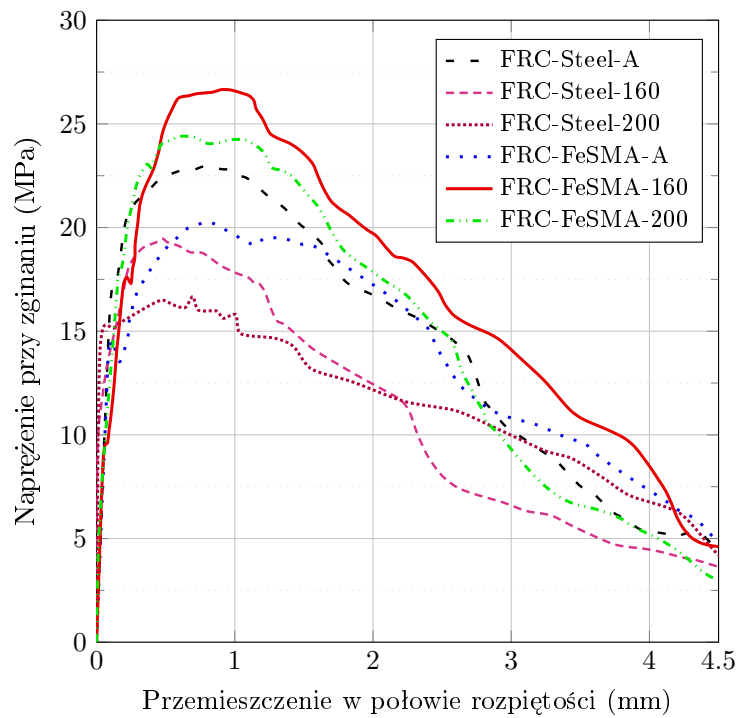


Rys. 2.12: (a) Zachowanie przy ściskaniu i (b) przy zginaniu betonu zwykłego poddanego różnym warunkom temperaturowym [59].

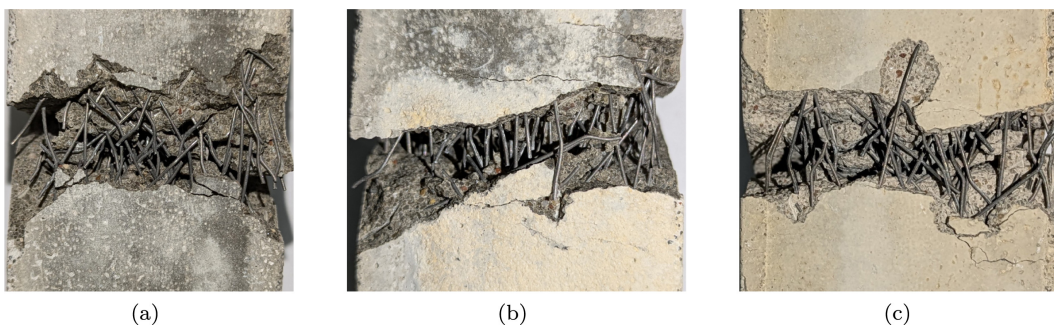
Na Rys. 2.13 przedstawiono wpływ temperatury na wytrzymałość na zginanie próbek z włóknami stalowymi i Fe-SMA. W przypadku zbrojenia stalowego obserwuje się monotoniczny spadek wytrzymałości: 22,96 MPa (próbki referencyjne), 19,46 MPa przy 160 °C oraz 16,67 MPa przy 200 °C, co odzwierciedla negatywny wpływ wysokiej temperatury na zachowanie materiału i osłabienie interakcji włókno–beton. Z kolei próbki z włóknami Fe-SMA wykazują wyraźny wzrost wytrzymałości po ogrzaniu do 160 °C (z 20,20 MPa do 26,66 MPa), wynikający z efektu wstępnego sprężenia wywołanego przemianą fazową martenzytyczną oraz przekazania naprężeń do matrycy. Przy 200 °C wytrzymałość na zginanie nieznacznie spada do 24,39 MPa, co można przypisać osłabieniu wytrzymałości na wyrywanie w wyższej temperaturze. Nieco mniejsza średnica włókien Fe-SMA (0,50 mm wobec 0,55 mm dla stali) skutkująca większą liczbą włókien na jednostkę objętości może dodatkowo poprawiać zasklepianie rys. Oddzielenie wpływu liczby włókien od efektu pamięci kształtu wymagałoby dalszych badań (np. przy różnych średnicach, ale stałej objętości). Choć wyniki sugerują, że włókna Fe-SMA wprowadzają lokalne naprężenie ściskające w matrycy, bezpośrednia zależność pomiędzy zawartością włókien a wielkością wstępnego sprężenia pozostaje do ustalenia. Zbadanie wpływu zmiennej objętości włókien Fe-SMA czy warunków aktywacji na wielkość wstępnego sprężenia stanowi obiecujący kierunek dalszych prac.

Rysunek 2.14 ukazuje związek pomiędzy dominującym mechanizmem uszkodzenia próbek a temperaturą. W belkach nieogrzewanych zaczepy haczykowe włókien wyprostowały się w znacznym stopniu, zanim doszło do ich wyrywania, co świadczy o wystarczającej przyczepności matrycy betonowej. Natomiast przy wyższych temperaturach,

wskutek zwiększonego mikropęknięcia oraz różnicowej rozszerzalności termicznej betonu i włókien, to zaczepienie ulega osłabieniu. W efekcie włókna zostają wyrwane z matrycy łatwiej, przy mniejszym odkształceniu haczyków i obniżonej sile wyrywania. Natomiast próbki poddane ogrzewaniu do 160 °C i 200 °C wykazywały wiele włókien wyciągniętych bez znacznego prostowania haczyków, co potwierdza, że wraz ze wzrostem temperatury struktura matrycy ulega zmianom osłabiającym wiązania włókno–beton i zmniejszającym wytrzymałość na wyrywanie.



Rys. 2.13: Wytrzymałość na zginanie próbek zawierających włókna Fe-SMA i stalowe poddanych różnym procedurom termicznym [59].



Rys. 2.14: Rysy w próbkach z włóknami Fe-SMA poddanych ekspozycji na: (a) temperaturę otoczenia (bez ogrzewania), (b) 160 °C oraz (c) 200 °C [59].

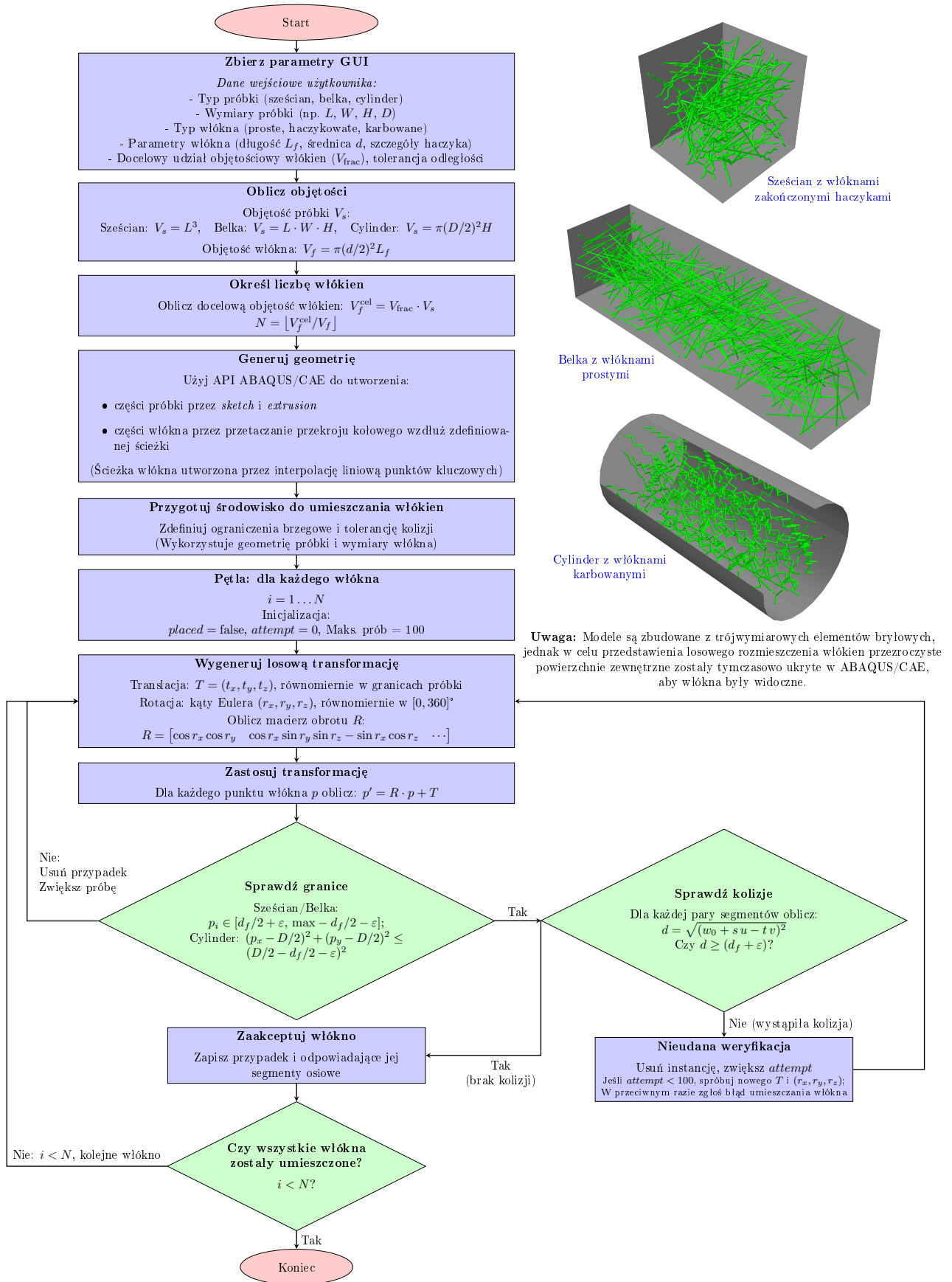
Rozdział 3

Modelowanie numeryczne

3.1 Generowanie losowo rozproszonych włókien

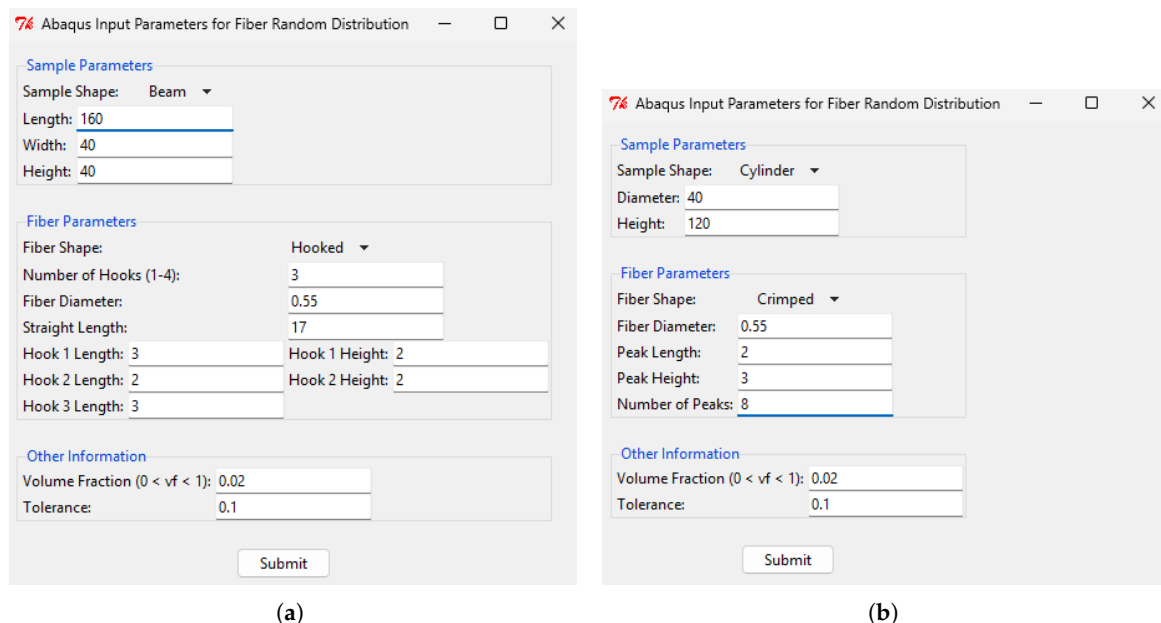
Realistyczne odwzorowanie dużej liczby włókien w betonie uzyskano poprzez wygenerowanie losowego, trójwymiarowego rozproszenia krótkich włókien wewnątrz próbki. Na Rys. 3.1 przedstawiono schemat blokowy opracowanego algorytmu, którego celem było odtworzenie losowego rozmieszczenia włókien w mieszance przy jednoczesnym zapewnieniu, że żadne włókno nie wystaje poza obrys próbki ani nie zachodzi na inne. Algorytm losowego rozmieszczania włókien został zrealizowany według poniższych etapów:

- **Inicjalizacja:** Wprowadzenie wymiarów próbki oraz liczby włókien odpowiadającej udziałowi objętościowemu 2,0%. Należy także określić typ włókien (proste, z zakończeniem haczykowym, karbowane), parametry geometryczne (długość L i średnica d) oraz odległość tolerancji między włóknami (minimalną przestrzeń, jaka musi pozostać między dwoma włóknami, uwzględniając obecność ziaren kruszywa).
- **Losowa pozycja i orientacja:** Losowe generowanie potencjalnej linii centralnej osi włókna (równomiernie w objętości betonu) oraz jego orientację (losowe kąty Eulera w przestrzeni 3D). W efekcie definiowany jest odcinek prostej o długości L , reprezentujący centralną oś włókna, z przypadkowo przypisanymi kątami Eulera w układzie współrzędnych 3D.
- **Sprawdzenie granic:** Sprawdzenie, czy cały odcinek włókna mieści się wewnątrz granic próbki (z uwzględnieniem średnicy włókna oraz odległości tolerancji). Jeśli jakkolwiek część włókna wychodziłaby poza obszar próbki (np. przekraczała jej zewnętrzną powierzchnię), to umiejscowienie należy odrzucić i ponownie wylosować pozycję oraz orientację. Dzięki temu żadne włókno nie będzie wystawać poza zewnętrzną powierzchnię próbki.
- **Sprawdzenie kolizji:** Weryfikacja, czy nowe włókno nie przecina się z żadnym z wcześniej umieszczonym ani nie znajduje się w zbyt bliskiej odległości. W przypadku wykrycia przecięcia lub zbyt bliskiego sąsiedztwa odrzuca się tę propozycję włókna i losuje nową pozycję oraz orientację. Dzięki temu unika się wzajemnego nakładania włókien.
- **Umieszczenie:** Jeżeli włókno przejdzie pomyślnie weryfikację granic i kolizji, zatwierdza się jego umiejscowienie i zostaje dodane do modelu. Algorytm następnie przechodzi do kolejnego włókna, aż do osiągnięcia docelowej liczby włókien.



Rys. 3.1: Algorytm wykorzystany przy generowaniu losowego rozproszenia włókien w matrycy betonowej.

Algorytm losowego rozproszenia włókien został zrealizowany jako skrypt w języku Python zintegrowany z ABAQUS/CAE [55]. W pierwszym etapie interakcji użytkownik wprowadza dane wejściowe za pomocą okna GUI (Rys. 3.2) udostępnionego przez bibliotekę Tkinter [67]. Skrypt został opracowany uniwersalnie, tak aby umożliwiać generowanie różnych geometrii modeli (sześciątów, belek, cylindrów) oraz kształtów włókien (proste, z zakończeniami haczykowymi oraz karbowane), w tym dowolnej liczby i wymiarów haczyków (długości i wysokości), co pozwoli na jego wykorzystanie w przyszłych badaniach dotyczących odmiennego rodzaju próbek i włókien. Obecnie trwają prace nad udostępnieniem tego rozwiązania jako komponent (plugin) do ABAQUS/CAE. Równolegle rozwijane są kolejne funkcjonalności, takie jak odwzorowanie efektu splątania włókien [68–70] zaobserwowanego podczas mieszania, gdy niektóre włókna tworzyły „kule” o lokalnie zwiększonej gęstości oraz zoptymalizowanie kontroli kolizji — zamiast sprawdzania przecięć z tysiącami wcześniej umieszczonych włókien, planowane jest ograniczenie weryfikacji do najbliższego otoczenia nowo generowanego włókna, co znacząco skróci czas działania skryptu.



Rys. 3.2: Graficzny interfejs (GUI) skryptu Python w ABAQUS/CAE do losowego rozproszenia włókien, przedstawiający wymiary próbki, udział objętościowy włókien i odległość tolerancji dla: (a) belki z włóknem zakończonym haczykami, (b) próbki cylindrycznej z karbowanym włóknem.

3.2 Modele materiałowe

3.2.1 Matryca betonowa

Matrycę betonową przedstawiono jako ośrodek ciągły z uwzględnieniem sprzężonego modelu plastyczności i uszkodzeń (ang. Concrete Damage Plasticity, w skrócie CDP) [71], zaimplementowanego w ABAQUS/CAE. Model ten opisuje zachowanie betonu podczas ściskania oraz rozciągania, wprowadzając zmienne uszkodzenia, które degradują sztywność materiału po pojawieniu się pęknięć lub zgniotu. W przypadku jednoosiowego rozciągania, po przekroczeniu granicy pękania, zmienna uszkodzenia d_t (od 0 – materiał nienaruszony,

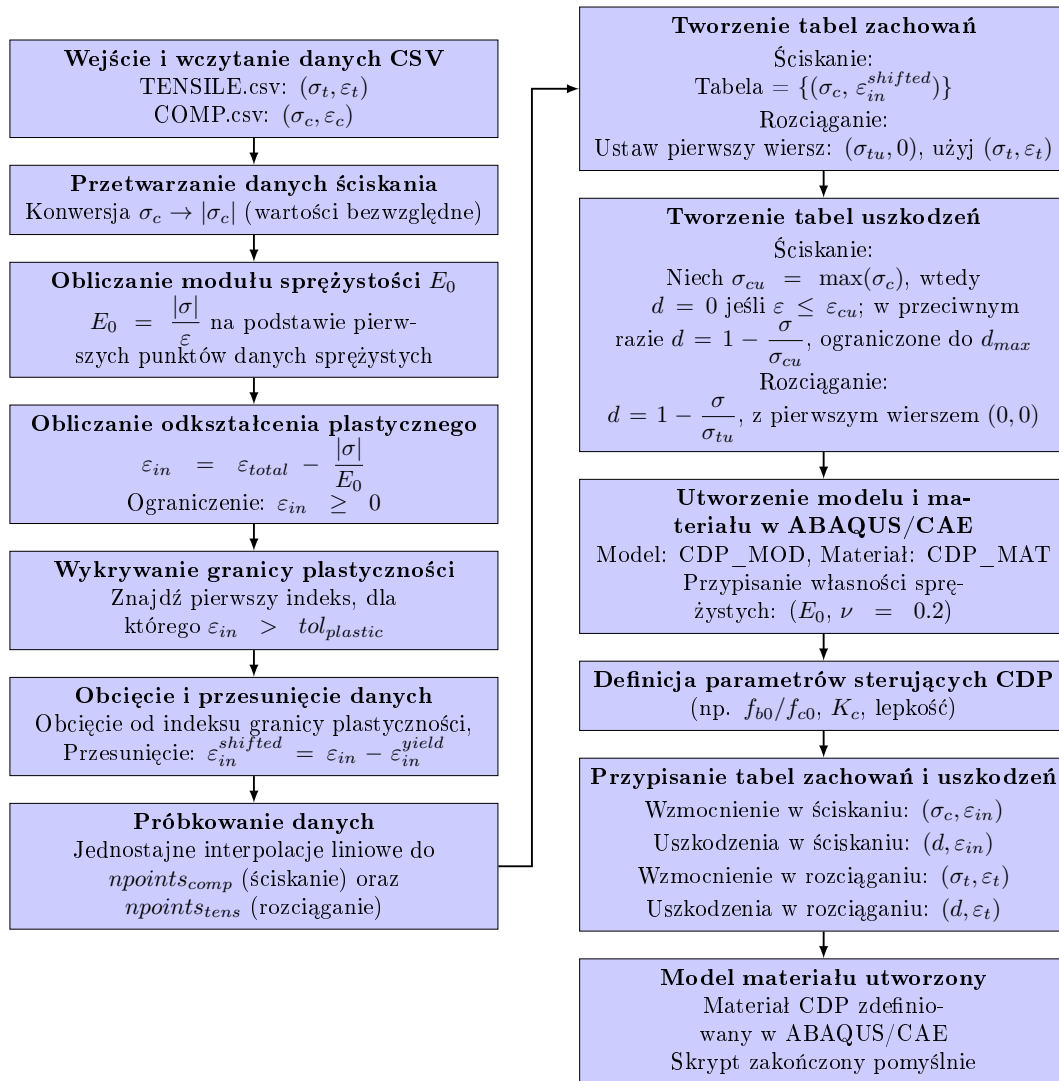
do 1 – materiał w pełni popękany) redukuje efektywną sztywność; analogicznie, zmienna d_c odpowiada za degradację podczas ściskania [72]. Równania dla jednoosiowego stanu naprężenia przy rozciąganiu i ściskaniu przyjmują postać:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}),$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}),$$

gdzie E_0 oznacza początkowy moduł sprężystości betonu, ε jest całkowitym odkształceniem, a $\tilde{\varepsilon}^{pl}$ odpowiada ekwiwalentnemu odkształceniu plastycznemu odpowiednio przy rozciąganiu (t) lub ściskaniu (c). Powyższe zależności oznaczają, że w miarę rozwoju odkształcenia pękającego lub miażdżącego, wartość naprężenia zostaje pomniejszona o czynnik $(1 - d)$, co odzwierciedla degradację sztywności [73]. W istocie, model CDP umożliwia betonowi przechodzenie w stan odkształceń nieodwracalnych (plastycznych) i redukcję sztywności pod obciążeniem [74]. Wybór modelu CDP został dokonany ze względu na jego zdolność do realistycznego odwzorowania złożonego zachowania betonu pod różnymi typami obciążeń. Model ten umożliwia oddzielne definiowanie charakterystyk ściskania i rozciągania, co pozwala na dokładne odtworzenie asymetrii zachowania materiału. Ponadto, CDP uwzględnia kryterium płynięcia zależne od ciśnienia hydrostatycznego i odkształceń niesprężystych oraz reguły ewolucji zmiennych uszkodzeń opartych na energii lub odkształceniach rozciągających i ściskających. Dzięki temu model CDP umożliwia realistyczne przewidywanie inicjacji pęknięć, propagacji stref uszkodzeń oraz utraty nośności betonu zarówno w próbach jednoosiowych, jak i w złożonych stanach naprężenia.

Parametry modelu betonu wyznaczono na podstawie połączenia badań wytrzymałości na ściskanie oraz prób zginania trójpunktowego, tak aby symulowane zachowanie materiału odpowiadało zmierzonym wartościom wytrzymałości. Zdefiniowano trzy odrębne zestawy parametrów betonu, odpowiadające różnym warunkom termicznym: HPC-A dla betonu nieogrzewanego, HPC-160 dla betonu poddanego temperaturze 160 °C oraz HPC-200 dla betonu ogrzewanego do 200 °C. Dzięki temu model CDP mógł odzwierciedlić zmiany wytrzymałości wywołane ogrzewaniem. Dla betonu w stanie nieogrzewanym przyjęto wytrzymałość na ściskanie $f_c \approx 98$ MPa oraz średnią wytrzymałość na rozciąganie (skalibrowaną na podstawie prób zginania) około 8 MPa. Po ekspozycji na 160 °C wartość f_c spadła do 71 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie do 6,5 MPa, co odzwierciedla efekty termicznego uszkodzenia matrycy. Dla betonu ogrzewanego do 200 °C przyjęto $f_c \approx 95$ MPa i wytrzymałość na rozciąganie 7,8 MPa. Początkowy moduł sprężystości przyjęto jednakowy dla wszystkich przypadków ($E_0 \approx 47,5$ GPa, przy $\nu = 0,2$). Wartości te posłużyły do zdefiniowania krzywych nośności i zmiennych uszkodzenia w modelu CDP dla poszczególnych warunków termicznych. Aby zautomatyzować generowanie danych wejściowych CDP na podstawie wyników eksperymentów, opracowano algorytm oraz skrypt w języku Python zintegrowany z ABAQUS/CAE — schemat tej procedury przedstawiono na Rys. 3.3.



Rys. 3.3: Algorytm służący do wyznaczania danych wejściowych modelu CDP na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

Jak pokazano na Rys. 3.3, algorytm opiera się na skalibrowanych danych eksperymentalnych określających zachowanie betonu zarówno podczas ściskania, jak i rozciągania. Charakterystykę ściskania wyznaczono na podstawie wyników prób ściskania kostek betonowych. Z uwagi na brak możliwości przeprowadzenia bezpośrednich testów rozciągania (np. według normy ASTM C307 [75]), parametry rozciągania w modelu CDP w ABAQUS/CAE kalibrowano iteracyjnie. Po każdej symulacji porównywano przebieg numeryczny z krzywymi zginania uzyskanymi w próbach trójpunktowego zginania i w razie potrzeby korygowano parametry rozciągania. Cykl ten – polegający na porównywaniu wyników eksperymentalnych z predykcjami numerycznymi oraz dostrajaniu parametrów – powtarzano aż do uzyskania zgodności modelu z danymi eksperymentalnymi.

3.2.2 Fe-SMA

Jak omówiono w Sekcji 1.1, Fe-SMA wykazują zdolność do odzyskiwania pierwotnego, nieodkształconego kształtu wskutek przemiany fazowej martenzytycznej po podgrzaniu powyżej temperatury końca przemiany fazowej austenitycznej A_f , jeżeli zostały uprzednio odkształcone. Do implementacji zachowania Fe-SMA w symulacjach w ABAQUS/CAE można zastosować trzy podejścia:

- User-material subroutine (UMAT): stworzenie podprogramu materiałowego implementującego właściwości materiałowe Fe-SMA.
- Pre-defined stress field: bezpośrednie narzucenie w modelu pola naprężeń odpowiadającego wstępnemu sprężeniu.
- Thermal shrinkage: przypisanie ujemnego współczynnika rozszerzalności cieplnej, naśladującego proces kurczenia się włókna podczas odzyskiwania kształtu.

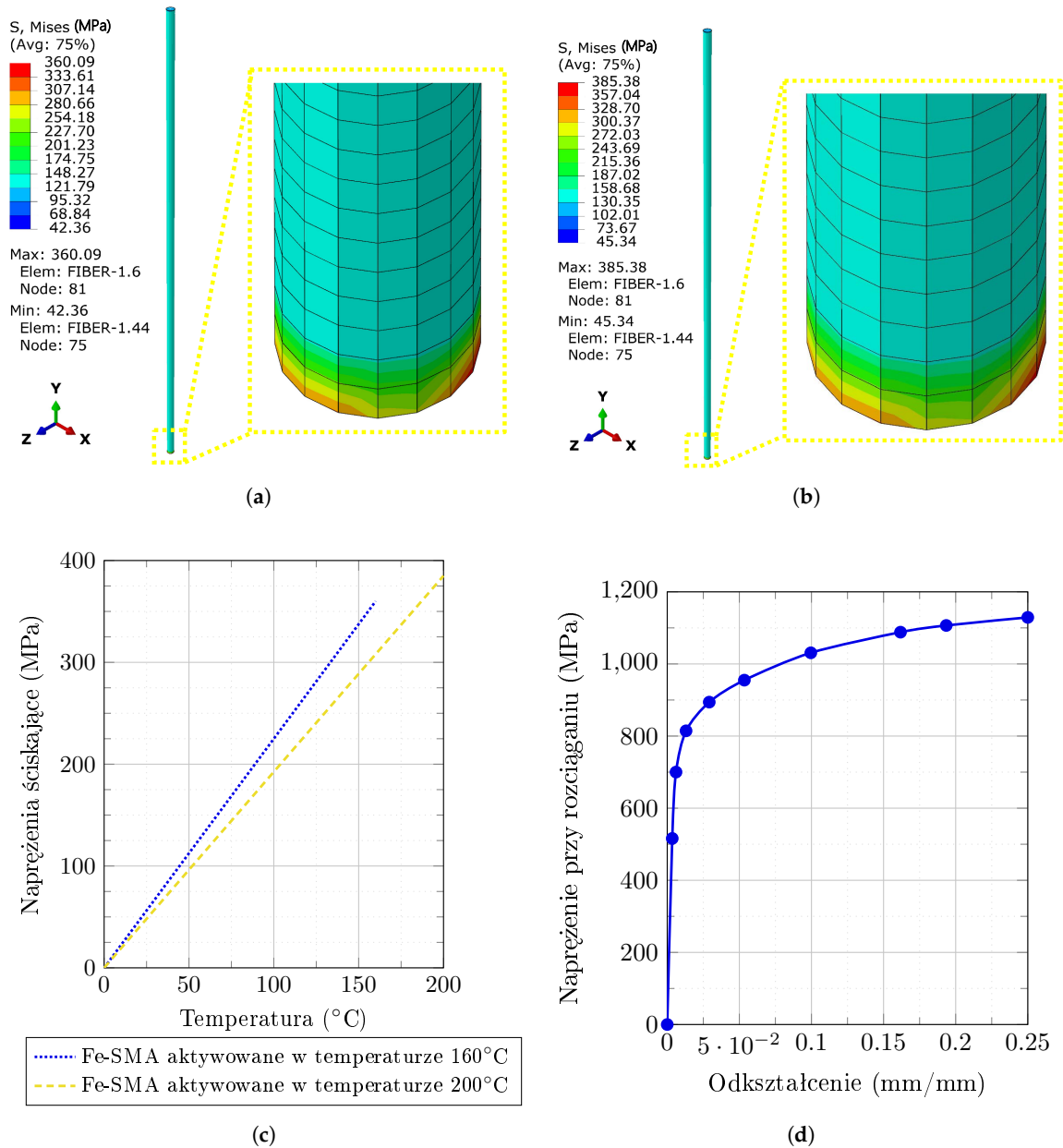
Ponieważ nie istnieją szczegółowe podprogramy UMAT ani modele materiałowe dedykowane Fe-SMA — a opublikowane modele dla Nitinolu nie odzwierciedlają właściwie termomechanicznego zachowania stopów Fe-SMA — zdecydowano się na zastosowanie trzeciej metody. Poprzez zdefiniowanie ujemnego współczynnika rozszerzalności cieplnej włókna Fe-SMA poddane wstępnemu odkształceniu (wydłużeniu) kurczą się swobodnie w warunkach niekrępowanych lub generują naprężenia odzyskowe podczas ogrzewania, gdy pozostają unieruchomione w matrycy betonowej.

Badania eksperymentalne wykazały, że podgrzanie do 160 °C indukuje naprężenie odzysku w wysokości około 360 MPa, natomiast podgrzanie do 200 °C generuje wartość około 385 MPa. Model włókna Fe-SMA oparto na izotropowym umocnieniu plastycznym, przy module Younga wynoszącym 160 GPa przed aktywacją oraz 85 GPa po aktywacji [43], $\nu = 0,275$, granicy plastyczności 500 MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie 1125 MPa przy odkształceniu 22,5 %. Symulacja weryfikacyjna dla dwóch termicznie aktywowanych włókien Fe-SMA wykazała zgodność między przewidywanymi naprężeniami odzyskowymi a danymi eksperymentalnymi (Rys. 3.4).

3.3 Właściwości kontaktu matrycy betonowej i włókien Fe-SMA

Kontakt pomiędzy matrycą betonową a włóknami Fe-SMA zostały odwzorowane za pomocą dokładnych definicji kontaktu, obejmujących zarówno spójne wiązanie (ang. cohesive bond), jak i tarcie. Zamiast stosować w ABAQUS/CAE wiązania typu „tie”, wprowadzono szczegółowy model traction–separation na styku włókno–beton, skalibrowany na podstawie wyników testów wyrywania pojedynczych włókien opisanych w rozdziale 2.

Każde włókno zostało umieszczone w betonie, a na jego powierzchni określono właściwości wiążące. W modelu uwzględniono dwa mechanizmy przenoszenia naprężeń na styku: (1) spójne wiązanie (cohesive bonding) prostopadle do powierzchni włókna i w kierunkach stycznych, odwzorowujące przyczepność chemiczną oraz mechaniczne zakotwienie, jak i (2) tarcie po zerwaniu spójności, odpowiadające oporowi ślizgowemu. W

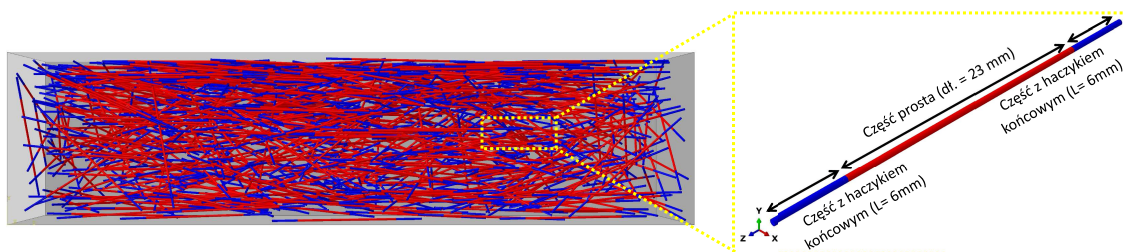


Rys. 3.4: (a) Zachowanie termiczne podczas ekspozycji na ogrzewanie, (b) zachowanie mechaniczne po ogrzewaniu określone w modelu włókien Fe-SMA, (c) symulacja włókna po podgrzaniu do 160 °C oraz (d) symulacja włókna po podgrzaniu do 200 °C (jednostki w MPa) [59].

ramach strefy wiązania opisano początkową, liniowo-sprężystą zależność pomiędzy naprężeniami (traction) a względnymi przemieszczeniami (slip) przed odspajaniem, następnie zastosowano prawo degradacji (softening) reprezentujące uszkodzenie, a w końcowym etapie zerwanie wiązania. Sztywność początkową stref wiązania określono przez moduły sprężyste w kierunku normalnym (K_{nn}) oraz w dwóch kierunkach stycznych (K_{ss} , K_{tt}), skalibrowane na podstawie nachylenia wstępnego odcinka krzywych siła–przemieszczenie. Maksymalne naprężenie wiązania (cohesive strength) $\sigma_{\max}$ oraz odpowiadające mu przemieszczenie przy całkowitej utracie spójności δ_f wyznaczono na podstawie eksperymentalnych badań. Dodatkowo wprowadzono współczynnik tarcia Coulomba $\mu = 0,1$, zapewniający resztkowy opór styczny po zerwaniu spójności, zgodny z

danymi dla ślizgu gładkich włókien w betonie.

Geometrię włókien zastosowanych w próbkach stanowiły włókna z zakończeniami haczykowymi. Aby w modelu wiernie odwzorować wygięte końcówki włókien, konieczne byłoby zastosowanie bardzo gęstej siatki elementów skończonych w miejscach zagięć, co znacząco zwiększyłoby liczbę elementów i drastycznie obniżyłoby wydajność obliczeń. W celu uniknięcia takiego spadku efektywności przyjęto rozwiązanie uproszczone: włókna z haczykami zostały zamodelowane jako włókna proste podzielone na trzy segmenty. Aby odzwierciedlić wzmocnione zakotwienie w miejscach zakończeń, właściwości stref kontaktu nie były jednolite wzdłuż długości włókna. Każde włókno podzielono na dwa końcowe odcinki po 6 mm każdy oraz środkowy odcinek o długości 23 mm (Rys. 3.5). Odcinkom końcowym przypisano wyższe wartości wytrzymałości wiązania, imitujące mechaniczne działanie haczyków, zaś odcinkowi środkowemu – niższe wartości odpowiadające prostemu kształtowi włókna.

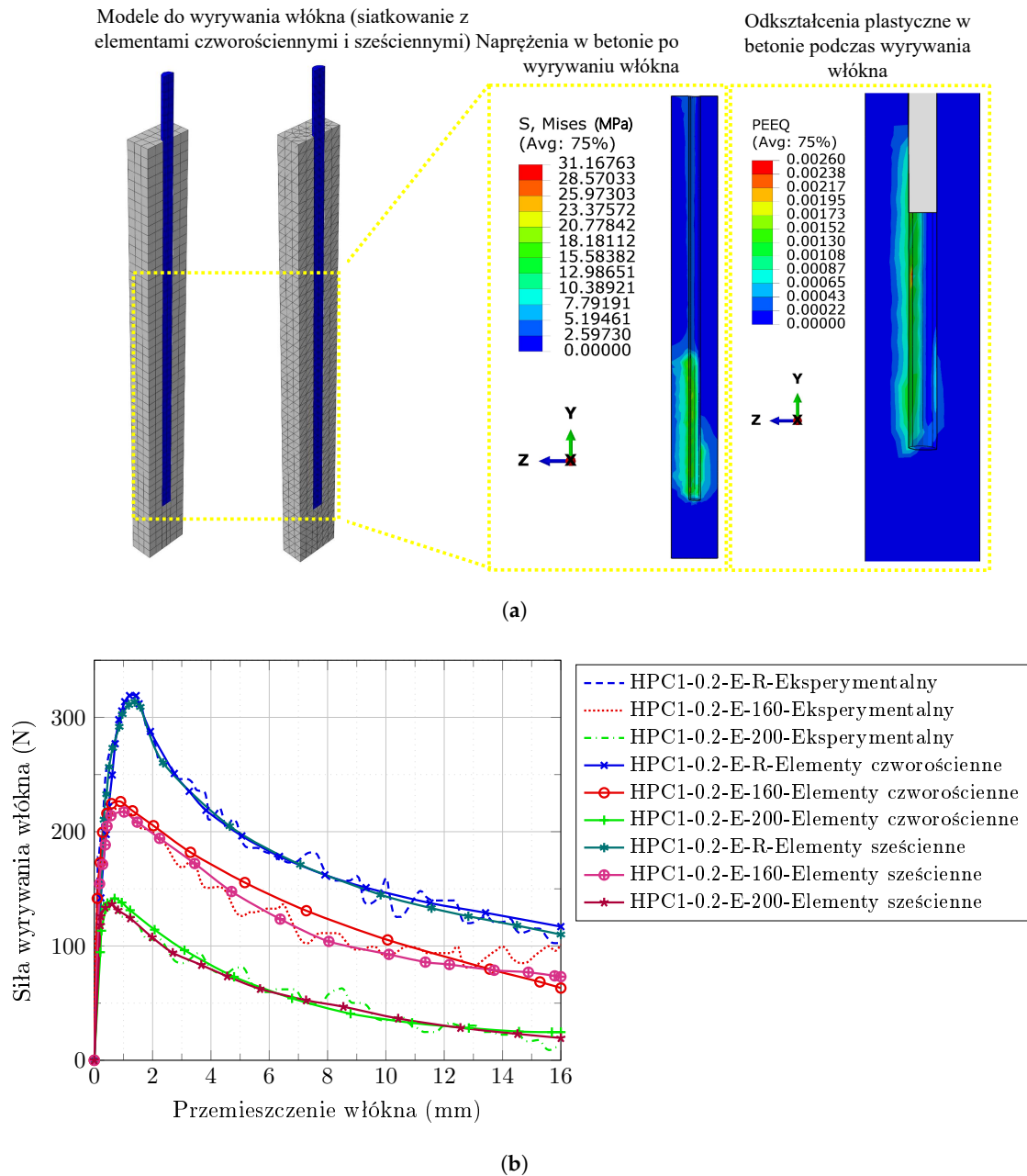


Rys. 3.5: Włókno proste podzielone na segmenty o różnych właściwościach wiązania: odcinki końcowe (6 mm) o właściwościach odpowiadających haczykom oraz segment środkowy (23 mm) z właściwościami charakterystycznymi dla włókna prostego [59].

Przykładowo w warunkach pokojowych obszary końcowe włókien otrzymały maksymalne naprężenie zrywające w kierunku normalnym rzędu 33,3 MPa, podczas gdy środkowy odcinek – zaledwie 4,96 MPa. Podobnie sztywność normalna wiązania w strefie haczykowej była o rząd wielkości wyższa (308,6 N/mm³ vs. 28,16 N/mm³ w części środkowej), a dopuszczalne przemieszczenie przy zerwaniu znacznie większe (około 14,8 mm vs. 4,7 mm). Różnice te odzwierciedlają silniejsze sprzężenie haczyków z matrycą betonową, umożliwiające rozwinięcie większych sił i przemieszczeń (koniecznych do wyprostowania lub obrotu haczyków w betonie). Natomiast odcinki proste odłączają się przy niższych siłach i wysuwają po zerwaniu wiązania chemicznego. Wartości te zostały wyznaczone poprzez kalibrację modelu na podstawie eksperymentalnych badań wyrywania pojedynczych włókien. Model zawierający dwa typy kontaktu wiernie odtwarza tę charakterystykę – podczas symulowanego wyrywania włókna odcinki końcowe osiągają większe naprężenia, co skutkuje krzywą siła–przemieszczenie z drugim szczytem odpowiadającym zaangażowaniu haczyków, zgodnie z obserwacjami eksperymentalnymi (Sekcja 2.2.2).

Do walidacji symulacji wykorzystano model analizy wyrywania oparty na charakterystykach materiałowych betonu i włókien Fe-SMA. Na Rys. 3.6a przedstawiono siatkovany model z narzuconymi warunkami brzegowymi symetrii w celu zmniejszenia nakładów obliczeniowych. Początkowo ze względu na złożoność geometrii zastosowano

siatkę czworościenną (tetrahedral mesh). Aby jednak poprawić dokładność, model został podzielony na mniejsze części, co pozwoliło na użycie siatki sześcienniej (hexahedral mesh). Porównanie wyników uzyskanych dla obu rodzajów siatek wykazało, że elementy sześciennie lepiej odwzorowują maksymalną siłę wyrywania uzyskaną w eksperymentalnych badaniach (Rys. 3.6b), co potwierdza poprawność przyjętych i skalibrowanych parametrów kontaktowych.



Rys. 3.6: (a) Modelowanie wyrywania prostego włókna Fe-SMA z różnymi właściwościami kontaktu: 6 mm na końcach odwzorowujące geometrię haczyków oraz 23 mm dla części prostej włókna, (b) porównanie wyników wyrywania włókien Fe-SMA z badań eksperymentalnych [60] i modelowania [59].

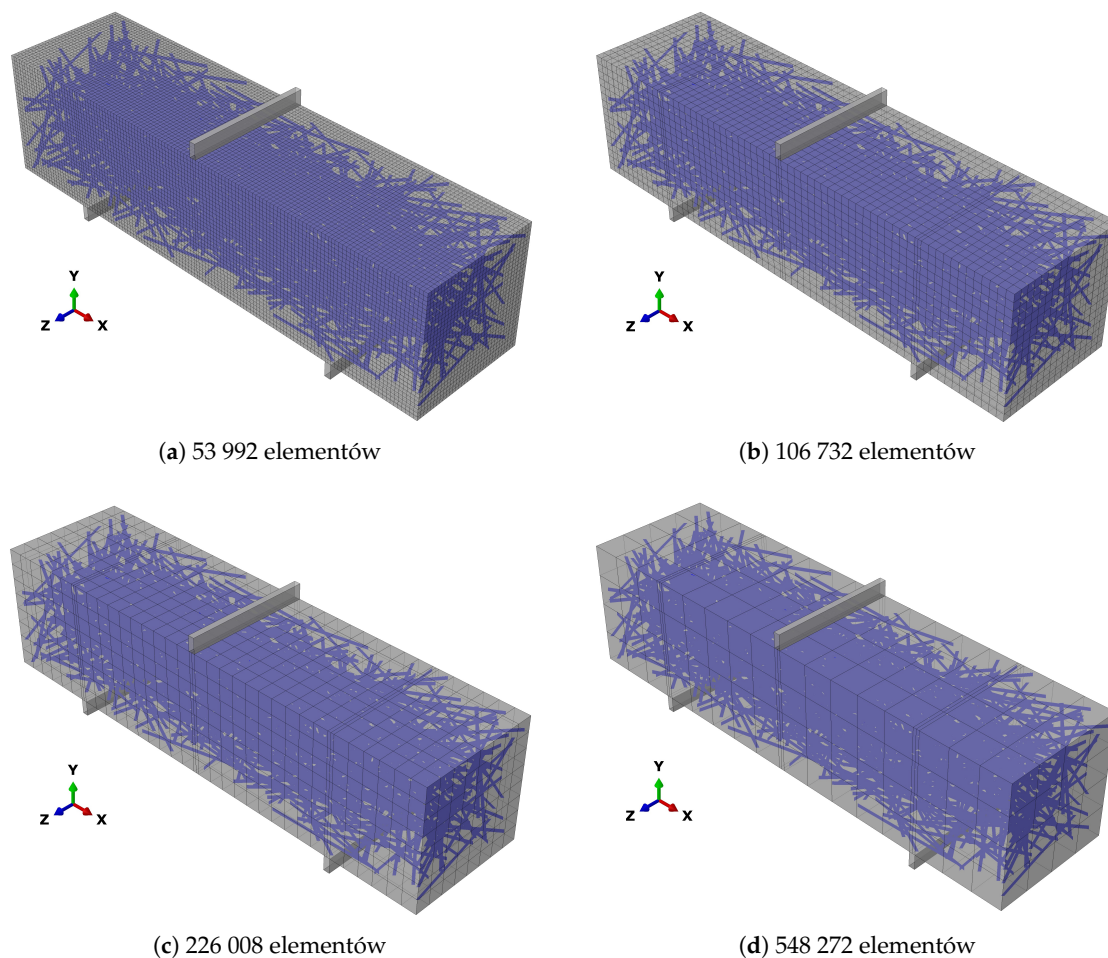
Właściwości kontaktu były również zależne od temperatury, co pozwalało uwzględnić osłabienie wiązania w podwyższonych temperaturach. W związku z tym parametry kontaktu zostały odpowiednio zredukowane dla próbek poddanych ogrzewaniu. Na

przykład wartość $\sigma_{\max}$ dla stref końcowych obniżono do 23,36 MPa przy 160 °C oraz do 14,65 MPa przy 200 °C, co świadczy o osłabieniu wiązania. Zmiany te zostały ustalone na podstawie interpolacji wyników testów wrywania w różnych temperaturach, które wykazały spadek maksymalnej siły o około 12–15 % przy przejściu od temperatury pokojowej do 200 °C wskutek degradacji wiązania.

3.4 Weryfikacja modelu i analiza wrażliwości siatki

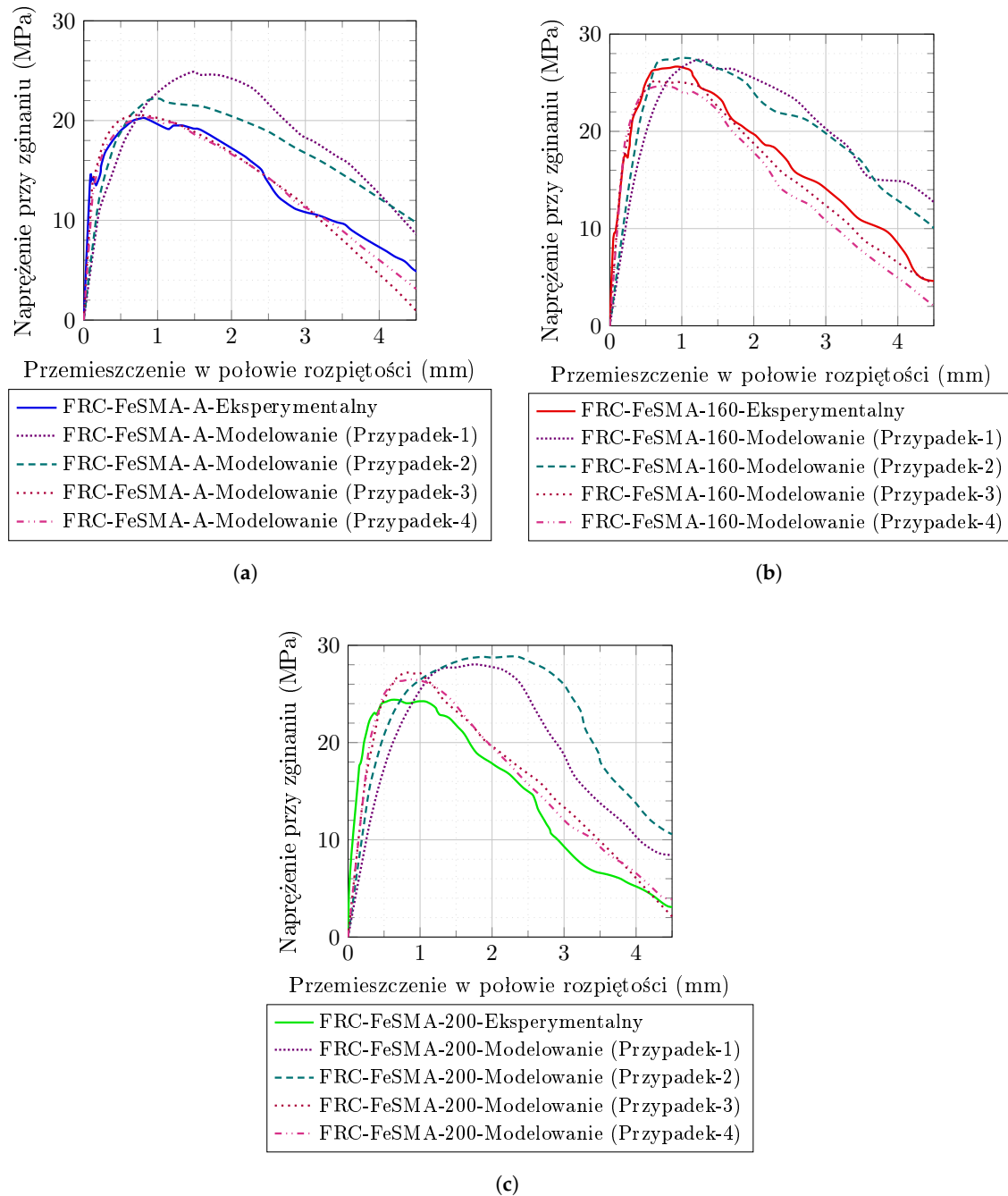
Model został zweryfikowany na podstawie porównania wyników eksperymentalnych i numerycznych. Dodatkowo przeprowadzono analizę wrażliwości siatki w celu określenia optymalnego rozmiaru siatki. W niniejszej sekcji podsumowano najważniejsze wnioski płynące z analizy zagęszczenia siatki oraz zestawiono numeryczne odpowiedzi strukturalne z danymi eksperymentalnymi.

Z uwagi na złożone zachowanie materiału i rozkład naprężeń wokół włókien, rozmiar elementów mógł istotnie wpłynąć na dokładność wyników. Przebadano cztery gęstości siatki (zestawione w Tabeli 4 z B.4), od relatywnie rzadkiej (Przypadek 1) do bardzo gęstej (Przypadek 4). W Przypadku 1 elementy betonowe miały rozmiar około 10 mm, a włókniste – 2 mm. W najdrobniejszej siatce (Przypadek 4) elementy betonu mierzyły 1,25 mm, a włókien 0,25 mm, co łącznie dało ponad pół miliona elementów. Na Rys. 3.7 przedstawiono schematy wszystkich konfiguracji siatki. Symulacje przy rzadkiej siatce przebiegały znacznie szybciej, podczas gdy dla najgęstszej siatki czas obliczeń był bardzo długi – dla tej samej konfiguracji sprzętowej Przypadek 1 trwał ok. 15 godzin, a Przypadek 4 ok. 201 godzin (korzystając z tego samego systemu komputerowego: AMD® Ryzen™ 7-4800 CPU 2.90GHz i 64GB pamięci RAM). Konieczne stało się zatem znalezienie kompromisu między dokładnością a efektywnością. Porównano krzywe siła–przemieszczenie belki w zginaniu uzyskane dla każdej siatki z wynikami eksperymentalnymi. Rzadkie siatki (10 mm i 5 mm w Przypadkach 1 i 2) wyraźnie się różniły, zwłaszcza w części po pęknięciu i pod wyższymi temperaturami, nie odtwarzając poprawnie sztywności po pęknięciu i wartości maksymalnego obciążenia. Drobniejsze siatki (2,5 mm w Przypadku 3 i 1,25 mm w Przypadku 4) dawały wyniki zbieżne z pomiarami – po osiągnięciu pewnego stopnia zagęszczenia różnice stały się pomijalne, a krzywe dla Przypadków 3 i 4 niemal się pokrywały pod kątem wartości szczytowej i kształtu przebiegu. Ponieważ Przypadek 3 wymagał zaledwie 40 % czasu obliczeń Przypadku 4 (ok. 92 godz. vs. 201 godz.), uznano go za optymalną siatkę.



Rys. 3.7: Modele elementów skończonych o różnej gęstości siatki zastosowane w analizie wrażliwości na siatkę: (a) Przypadek 1, (b) Przypadek 2, (c) Przypadek 3, (d) Przypadek 4 [59].

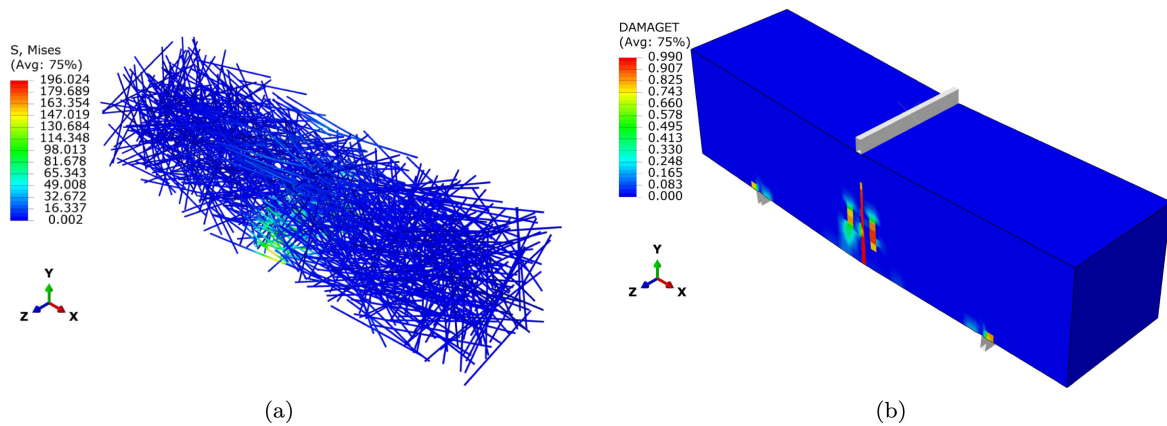
Na Rys. 3.8 przedstawiono porównanie krzywych symulacyjnych z odpowiadającymi im krzywymi eksperymentalnymi. Ogólnie rzecz biorąc, model wykazał dobrą zgodność z badaniami we wszystkich rozważanych scenariuszach (temperatura otoczenia, 160 °C oraz 200 °C). Kluczowe parametry nośności strukturalnej – wytrzymałość na zginanie, początkowa sztywność oraz nachylenie części krzywej po pęknięciu – w symulacjach pokrywały się z zachowaniem zmierzonym eksperymentalnie. Przykładowo, w temperaturze otoczenia symulowana wartość maksymalna naprężenia przy zginaniu dla próbki betonowej wzbogaconej włóknami Fe-SMA mieściła się w przedziale 20–21 MPa, co było bardzo zbliżone do pomiaru (20,2 MPa). Po aktywacji włókien w 160 °C model przewidywał wzrost obciążenia granicznego o około 25 %, osiągając 26–27 MPa, co również odpowiadało wynikowi pomiarowemu (26,65 MPa). Przy 200 °C zarówno eksperyment, jak i symulacja odnotowały niewielki spadek nośności w porównaniu do 160 °C (jednak pozostając powyżej wartości dla stanu nieogrzewanego): model wskazał 24 MPa, a pomiar 24,39 MPa. Dodatkowo, uwzględnienie w modelu efektu osiadania włókien skutkowało subtelnym wzrostem nośności w porównaniu z rozkładem jednolitym – próbki z 5 % osiadania włókien osiągały o 12–15 % wyższe obciążenie graniczne. Wynika to z faktu, że włókna przemieszczone w kierunku rozciąganej (dolnej) strefy zwiększają zbrojenie tam, gdzie jest to najbardziej potrzebne.



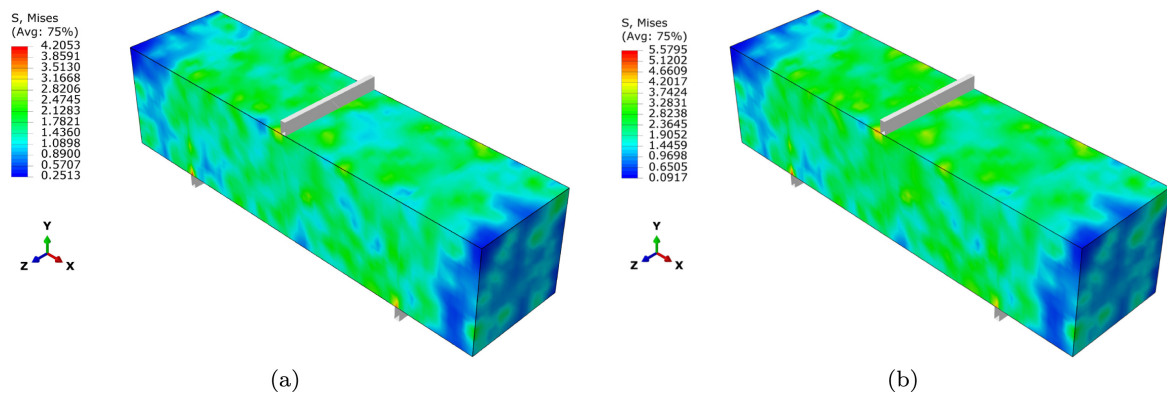
Rys. 3.8: Eksperymentalne i numeryczne zachowanie przy zginaniu belek betonowych z włóknami Fe-SMA w teście trójpunktowego zginania, analizowane pod różnymi gęstościami siatki, dla próbek poddanych ekspozycji na: (a) warunki pokojowe, (b) ogrzewanie do 160 °C, (c) ogrzewanie do 200 °C [59].

Rysunek 3.9 obrazuje koncentrację naprężeń ściskających w betonie po ogrzewaniu do 160 °C lub 200 °C. Model CDP umożliwia wizualizację lokalizacji pęknięć za pomocą konturów uszkodzenia przy rozciąganiu (d_t), analizowanych zarówno w chwili osiągnięcia maksymalnego obciążenia, jak i po zniszczeniu. W obu przypadkach na symulowanych próbkach propagowały się pionowe rysy w strefie środkowej, często z wyraźniejszym pęknięciem po jednej stronie, co można wytłumaczyć losowym rozkładem włókien i drobnymi różnicami w ich koncentracji (Rys. 3.10). Rozkłady uszkodzeń w strefie rozciąganej wykazały jedno dominujące pęknięcie z kilkoma wtórnymi, pokrywające się z

miejscami pęknięć zaobserwowanymi w próbkach. Ponadto skupiska uszkodzeń w symulacji występowały także w rejonie przyłożenia obciążenia i podpór (Rys. 2.8).



Rys. 3.9: Koncentracja naprężeń ściskających w matrycy betonowej wywołana aktywacją włókien Fe-SMA po obróbce termicznej w temperaturze (a) 160 °C oraz (b) 200 °C [59].



Rys. 3.10: (a) Rozkład uszkodzeń w strefie rozciąganej w betonie, oraz (b) koncentracja naprężeń w włóknach Fe-SMA [59].

Rozdział 4

Wnioski i kierunki dalszych badań

4.1 Oryginalne elementy badań

Główne i oryginalne elementy badań eksperymentalnych i numerycznych obejmowały:

- **Wytrzymałość na wyrywanie włókien Fe-SMA w betonie HPC:** Do tej pory, mimo licznych badań dotyczących wytrzymałości na wyrywanie różnych typów włókien (np. stalowych) z betonu, nie przeprowadzono oceny włókien Fe-SMA z uwzględnieniem kluczowych parametrów – rodzaju matrycy betonowej, temperatury aktywacji, prędkości obciążania oraz geometrii włókien (zakończonych haczykiem vs. prostych). W niniejszym badaniu każdy z tych czynników został oceniony w ramach parametrycznej analizy eksperymentalnej celem ilościowego określenia ich wpływu na zachowanie się włókien Fe-SMA podczas testów wyrywania.
- **Monitorowanie temperatury wewnętrznej za pomocą termopar:** W próbce betonowej osadzono termopary, aby zweryfikować jednorodność rozkładu temperatury i upewnić się, że wszystkie włókna Fe-SMA osiągnęły założoną temperaturę aktywacji. Na Rys. 2.5 pokazano jak temperatura w komorze wzrasta szybciej niż wewnątrz betonu ze względu na przewodność termiczną. Dlatego też bieżący odczyt termopar był niezbędny do potwierdzenia, że zadana wartość temperatury została równomiernie osiągnięta w całym przekroju próbki betonowej.
- **Badania wytrzymałości na zginanie próbek zbrojonych i niezbrojonych:** Przeprowadzono eksperymentalne próby zginania próbek z betonu wysokowartościowego zbrojonych włóknami stalowymi, włóknami Fe-SMA oraz próbek referencyjnych (bez włókien). Po raz pierwszy wykazano korzystny wpływ aktywowanych włókien Fe-SMA na wzrost wytrzymałości na zginanie, potwierdzając ich przydatność jako innowacyjnego materiału zbrojeniowego.
- **Automatyzacja w Pythonie i integracja z Abaqus/CAE:** Opracowano zestaw skryptów w języku Python do automatycznego generowania modeli oraz przygotowywania danych eksperymentalnych do użytku w modelach numerycznych w Abaqus/CAE. Pierwsze narzędzie, wyposażone w interfejs GUI, umożliwia wprowadzenie parametrów i losowe rozmieszczenie włókien z zachowaniem kontroli kolizji z powierzchnią próbki oraz już umieszczonymi włóknami. Drugi skrypt przetwarza doświadczalne dane naprężenie–odkształcenie (zarówno dla ściskania, jak i rozciągania) na parametry modelu Concrete Damage Plasticity (CDP) betonu.

- **Uproszczone termomechaniczne modelowanie Fe-SMA:** W Abaqus/CAE przypisano skalibrowany ujemny współczynnik rozszerzalności cieplnej, dzięki czemu włókna, uległy skurczowi podczas ogrzewania – w przeciwieństwie do zwykłych stopów – odwzorowując wstępne sprężenie bez konieczności stosowania UMAT.
- **Efektywne modelowanie wiązania dla włókien zakrzywionych:** Choć algorytm generowania włókien potrafi tworzyć złożone geometrie, w modelu numerycznym stosuje się uproszczone włókna proste podzielone na trzy segmenty (środkowy i dwa końcowe). Przypisanie wzmocnionych właściwości wiązania w segmentach końcowych pozwala na uwzględnienie efektu haczyków, bez konieczności stosowania drobnej siatki wokół zakrzywień, co znacząco obniża koszty obliczeniowe. Właściwości kontaktu zostały skalibrowane na podstawie wyników eksperymentalnych testów wyrywania.
- **Analiza wrażliwości siatki:** Przeprowadzono badanie wrażliwości siatki, w którym porównywano różne wielkości elementów skończonych w celu oceny ich wpływu na przewidywane charakterystyki siła–przemieszczenie. Porównanie wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi pozwoliło dobrać optymalny rozmiar siatki, zapewniający kompromis między dokładnością wyników numerycznych a efektywnością obliczeniową.

4.2 Wnioski końcowe

4.2.1 Wnioski ogólne

Potwierdzono, że beton zbrojony krótkimi włóknami Fe-SMA stanowi obiecujący kompozyt poprawiający właściwości mechaniczne i funkcjonalność betonu. Dzięki połączeniu analizy literatury, badań eksperymentalnych oraz modelowania numerycznego wykazano, że umieszczenie włókien Fe-SMA w matrycy betonowej umożliwia aktywne wstępne sprężenie. Warto podkreślić, że włókna Fe-SMA stanowią ekonomicznie uzasadnioną alternatywę dla włókien z Ni-Ti, które pomimo wyższych naprężeń odzyskowych są zbyt kosztowne, by mogły być szeroko stosowane w budownictwie. Wyniki badań wykazały, że po aktywacji termicznej włókna Fe-SMA odzyskują swój pierwotny kształt i przyczyniają się do wzrostu nośności elementów; na przykład ogrzanie próbek betonowych z włóknami do ok. 160 °C spowodowało wzrost wytrzymałości na zginanie o około 24 % w porównaniu z próbkami nieaktywowanymi. Praca dostarcza wszechstronnego zrozumienia kompozytów Fe-SMA-FRC, potwierdzając ich potencjał do samosprężenia oraz do aktywnego naprawiania zarysowanych elementów infrastruktury przyszłości, a także wskazuje praktyczne aspekty (takie jak temperatura aktywacji czy rozkład włókien), które należy uwzględnić, aby w pełni wykorzystać ich możliwości.

4.2.2 Wnioski poznawcze

Kluczowym wnioskiem jest wykazanie wpływu geometrii włókna i aktywacji termicznej na zachowanie połączenia: w temperaturze pokojowej włókna zakończone haczykami wykazują prawie dwukrotnie wyższą odporność na wyrywanie niż włókna proste, dzięki

mechanicznemu zakotwieniu. Jednak po ogrzaniu ich przewaga maleje – szczególnie powyżej 160 °C, gdy wysoka temperatura osłabia połączenie włókno–beton, zmniejszając skuteczność haczyków. Dla włókien prostych podwyższenie temperatury aktywacji ze 160 °C do 200 °C wiązało się z niewielkim wzrostem siły wyrywania, co może świadczyć o mikrostrukturalnych przemianach w podgrzewanym betonie (np. zagęszczeniu porów). Te obserwacje ukazują skomplikowaną relację między właściwościami mechanicznymi i termicznymi, podkreślając istotną rolę zakresu temperatur zastosowanych do aktywacji – temperatura ok. 160 °C maksymalizuje naprężenie odzyskowe włókien przy stosunkowo niewielkiej degradacji spoiwa, podczas gdy aktywacja w 200 °C przynosi tylko ok. 17 % netto przyrostu wytrzymałości.

Praca doktorska dostarczyła również wiedzy na temat wpływu składu mieszanki i parametrów materiałowych na właściwości betonu z włóknami Fe-SMA. Wykazano, że dobór mieszanki HPC istotnie oddziałuje na efektywność włókien: mieszanka z dodatkiem popiołu krzemionkowego osiągała niższą nośność przy wyrywaniu włókien Fe-SMA w porównaniu z mieszanką bez tego dodatku. Badania próbek na zginanie przyniosły pierwsze bezpośrednie dowody na to, że włókna Fe-SMA mogą aktywnie wstępnie sprężyć element betonowy: belki z włóknami Fe-SMA bez podgrzewania osiągały nieco niższe wytrzymałości na zginanie od porównywalnych belek ze stalowymi włóknami; natomiast po aktywacji termicznej przewyższały je, dzięki efektowi pamięci kształtu i generowaniu naprężeń sprężających.

Podsumowując, główne osiągnięcia poznawcze obejmują: jasne określenie optymalnych warunków aktywacji włókien Fe-SMA, zrozumienie wpływu geometrii włókien i receptury betonu na właściwości wytrzymałościowe betonu z włóknami Fe-SMA oraz wykazanie wykonalności stosowania włókien Fe-SMA do wprowadzenia wstępnego rozproszonego sprężenia.

4.2.3 Wnioski metodyczne

Metodycznie praca doktorska wprowadziła i zweryfikowała nowe podejścia do badania kompozytów Fe-SMA-FRC. Zrealizowano rozbudowany program eksperymentalny, w którym cztery kluczowe czynniki – geometria zakończeń włókien, skład mieszanki betonowej, temperatura aktywacji termicznej oraz prędkość obciążania – były systematycznie zmieniane w celu wydzielenia ich wpływu na wytrzymałość na wyrywanie włókien. Tak zaprojektowany układ badań stanowił innowację w testowaniu betonu zbrojonego włóknami: przeprowadzono próby wyrywania przy podwyższonych temperaturach (160 °C i 200 °C) oraz różnych prędkościach wysuwania, odtwarzając tym samym warunki termomechaniczne związane z aktywacją SMA wewnątrz betonowej matrycy. Specjalnie opracowane mieszanki HPC (zarówno z dodatkiem popiołu krzemionkowego, jak i bez) posłużyły do analizy jak właściwości matrycy wpływają na wytrzymałość na wyrywanie pod wpływem wysokiej temperatury, a włókna o odmiennych kształtach zakończeń (proste vs. z haczykami) pozwoliły ilościowo określić zalety mechanicznego zakotwienia. Uzyskany materiał badawczy należy do pierwszych, które charakteryzują zachowanie związania włókien Fe-SMA i matrycy pod obciążeniem

termomechanicznym, dostarczając praktycznych wniosków (np. wyraźne korzyści wynikające z haczyków w warunkach temperatury pokojowej oraz ich degradacja przy wysokich temperaturach).

Podczas analizy numerycznej opracowano zaawansowane środowisko MES do symulacji zginania próbek Fe-SMA-FRC o losowym rozmieszczeniu. Zaimplementowano dedykowany algorytm, który losowo rozmieszcza włókna w objętości betonu, przy jednoczesnym wykluczeniu kolizji między włóknami oraz ich umieszczenia zbyt blisko krawędzi próbki. Kluczowym elementem modelu jest definicja oddziaływania kontaktowego włókno–matryca betonowa, skalibrowana na podstawie danych z eksperymentalnych testów wrywania, co zapewnia odtworzenie zaobserwowanego przebiegu zależności siła–przemieszczenie. Aby ograniczyć wielkość siatki, kształt włókien zakończonych haczykami zastąpiono w modelu prostym kształtem osiowym, przy czym w strefach końcowych przypisano zmodyfikowane parametry kontaktu, naśladujące mechaniczne zaczepienie haczyka. Beton odwzorowano za pomocą modelu CDP, natomiast specyfikę Fe-SMA uwzględniono po przez nadanie włóknom ujemnego współczynnika rozszerzalności cieplnej — dzięki temu przy obciążeniu termicznym włókna ulegają skurczowi, generując naprężenia odzyskowe analogiczne do tych wywoływanych w rzeczywistym efekcie pamięci kształtu. Taka innowacyjna strategia modelowania umożliwiła symulację wstępnego sprężenia termicznego w próbkach Fe-SMA-FRC. Wyniki obliczeń dobrze odwzorowywały krzywe siła–przemieszczeń uzyskane podczas eksperymentów, co potwierdza wiarygodność przyjętego podejścia.

Istotnym wnioskiem z zastosowanej metodyki jest ukazanie zarówno zalet, jak i ograniczeń współczesnych technik modelowania. Szczegółowy model na poziomie pojedynczych włókien dostarczył cennych informacji (m.in. rozkład naprężeń we włóknach i matrycy oraz lokalizację uszkodzeń w betonie), ale był bardzo czasochłonny – czas analizy jednej próbki zawierającej ≈ 750 włókien wynosił ponad sto godzin. To wskazuje na potrzebę opracowania bardziej efektywnych metod numerycznych lub wieloskalowych do analiz większych konstrukcji. Niemniej jednak, wkład tej pracy metodycznej – począwszy od protokołu badań wrywania włókien w warunkach podwyższonych temperatur, aż po skalibrowany model MES zginania Fe-SMA-FRC – stanowi solidne narzędzie dla przyszłych badań.

4.2.4 Wnioski utylitarne

Wyniki tych badań niosą praktyczne implikacje dla inżynierii lądowej i wdrożenia betonu zbrojonego włóknami Fe-SMA w budownictwie. Zdolność włókien Fe-SMA do generowania wewnętrznego wstępnego sprężenia może zostać wykorzystana w newralgicznych elementach konstrukcyjnych w celu zwiększenia ich wytrzymałości. Na przykład zastosowanie Fe-SMA-FRC w strefach szczególnie narażonych na drgania sejsmiczne (takich jak węzły słup–belka czy strefy krytyczne ścinania) może poprawić wytrzymałość. W przeciwieństwie do biernych włókien stalowych, Fe-SMA można „uruchamiać” na żądanie, dając inżynierom nowe możliwości projektowe jak i umożliwiając nowy poziom kontroli nad zachowaniem konstrukcji w trakcie eksploatacji.

Praktyczne wdrożenie wymaga uwzględnienia wyzwań sklasyfikowanych w niniejszej pracy. Kluczową kwestią jest aktywacja cieplna: aby aktywować włókna Fe-SMA, element betonowy należy podgrzać do określonej temperatury (150–200 °C). Badania wykazały, że takie nagrzewanie może osłabić właściwości mechaniczne betonu. W laboratorium próbki podgrzewano równomiernie w piecu; w warunkach budowlanych jednak nie byłoby praktyczne ani bezpieczne podgrzewanie całych elementów konstrukcji do tak wysokich temperatur. W związku z tym realne zastosowania wymagają technik selektywnego ogrzewania – np. systemów indukcyjnych, izolowanych mat grzewczych czy zintegrowanych elementów grzejnych, które pozwolą nagrząć włókna bez nadmiernej ekspozycji otaczającego betonu na oddziaływanie termiczne. Ponadto należy starannie dobrać optymalną temperaturę aktywacji – wyniki wskazują, że ok. 160 °C stanowi kompromis zapewniający istotne wstępne sprężenie włókien przy minimalnej degradacji matrycy betonowej.

Kolejną kwestią praktyczną jest rozmieszczenie i orientacja włókien w betonie. Podobnie jak w każdym kompozycie FRC, kluczowe znaczenie ma równomierne rozproszenie włókien, co bezpośrednio przekłada się na właściwości mechaniczne elementu. Literatura wskazuje problemy takie jak grupowanie włókien czy ich opadanie (osiadanie cięższych włókien w świeżej mieszance betonowej), co prowadzi do niejednorodnego wzmocnienia. Włókna Fe-SMA są relatywnie ciężkie, dlatego bez odpowiednich modyfikacji receptury (np. zwiększenia lepkości mieszanki lub skrócenia długości włókien) mogą opadać podczas wylewania. W niniejszych badaniach wykorzystano beton HPC o wysokiej zawartości drobnych frakcji, co ograniczyło ten efekt, lecz w realizacji na większą skalę niezbędna będzie kontrola jakości mieszania i układania, aby zapewnić równomierne rozprowadzenie włókien w całym przekroju. Techniki stosowane w konwencjonalnym betonie z włóknami stalowymi — takie jak dodatek środków rozpraszających czy mieszanie z użyciem pola magnetycznego — mogą zostać zaadaptowane także do włókien Fe-SMA, by zapobiegać ich zbijaniu się w grupy i osiągnąć założoną losową orientację, na której opiera się model numeryczny. Udział objętościowy włókien to również ważny parametr praktyczny — w badaniach zastosowano 2% objętości, ale zwiększenie tej wartości może podnieść efekty wstępnego sprężenia kosztem urabialności mieszanki i gęstości betonu. Dlatego w warunkach wykonawczych konieczne będzie dobranie optymalnej zawartości włókien, tak by pogodzić korzyści wytrzymałościowe z właściwościami roboczymi betonu.

Pod kątem zastosowań przemysłowych włókna Fe-SMA wyróżniają się korzystnym stosunkiem koszt–wydajność, ponieważ są wytwarzane ze względnie tanich stopów żelaza w porównaniu z Ni-Ti. Ich użycie dobrze wpisuje się w proces prefabrykacji betonu: elementy można wytwarzać z osadzonymi włóknami SMA, a następnie w kontrolowanych warunkach poddawać wygrzewaniu w zakładzie przed transportem na budowę w celu aktywacji włókien. W przypadku betonu wbudowywanego na placu budowy można rozważyć zastosowanie specjalnych urządzeń grzewczych, które krótko ogrzewałyby deskowanie lub sam element po zakończeniu dojrzewania, umożliwiając miejscową aktywację efektu pamięci kształtu.

4.2.5 Wnioski prognostyczne

Badania przedstawione w tej pracy wskazują kompozyty Fe-SMA-FRC jako innowacyjny system materiałowy o dużym potencjale dla przyszłej infrastruktury. Skalowalność tej technologii to jej kluczowy wyróżnik – włókna Fe-SMA, jak wykazano, są znacznie bardziej opłacalne i łatwiejsze w masowej produkcji niż stopy Ni-Ti, co sprawia, że możliwe jest wytwarzanie i stosowanie w ilościach tonowych włókien Fe-SMA w ramach dużych projektów. W nadchodzącej dekadzie prawdopodobne są postępy w opracowywaniu stopów o niższej temperaturze aktywacji i wyższych naprężeniach odzysku, co jeszcze bardziej ułatwi ich zastosowanie w budownictwie. Jeśli uda się wdrożyć te materiały na szeroką skalę oraz opracować efektywne metody aktywacji na budowie, technologia ta może stać się powszechna – nowe obiekty budowlane będą rutynowo wykorzystywać włókna Fe-SMA w newralgicznych strefach.

Długoterminowa trwałość będzie kluczowym czynnikiem decydującym o praktycznym sukcesie kompozytów Fe-SMA-FRC. Z badań wynika, że po aktywacji włókna Fe-SMA zachowują wywołane naprężenie, gdyż nie występuje pełzanie stopu w odkształceniu pamięciowym – jest to stała zmiana kształtu, co stanowi przewagę nad sprężeniami wstępnymi ze stali, które relaksują się z upływem czasu. Jednakże wiązanie włókno–matryca może z czasem ulec osłabieniu, zwłaszcza przy cyklicznych obciążeniach termicznych lub mechanicznych. Ważne będzie więc zapewnienie, aby wstępne sprężenie włókien Fe-SMA nie ulegało istotnemu rozluźnieniu na skutek poślizgu włókien czy pełzania betonu wokół nich pod długotrwałym ściskaniem. Dodatkowo należy uwzględnić czynniki środowiskowe, np. korozję: stopy Fe-SMA zazwyczaj tworzą stabilne warstwy tlenkowe i wykazują dobrą trwałość, ale konieczne jest przeprowadzenie badań długotrwałej odporności w alkalicznym roztworze porowym betonu lub w warunkach morskich.

W szerszym kontekście kompozyty Fe-SMA-FRC wykonują krok w kierunku samo-adaptacyjnej infrastruktury. W przyszłości kluczowe obiekty (mosty, wieżowce, zakłady przemysłowe) mogłyby być wyposażone nie tylko w czujniki monitorujące stan techniczny, lecz także w osadzone wewnątrz włókna Fe-SMA pełniące funkcję siłowników reagujących na sygnały z tych czujników. Na przykład w sytuacji wykrycia rys lub nadmiernych odkształceń belki mostowej można by skoncentrować lokalne źródło ciepła, aby aktywować włókna Fe-SMA w danym obszarze i w czasie rzeczywistym skompensować uszkodzenia. Tego rodzaju adaptacyjne reakcje umożliwiałyby odzyskanie sztywności lub domknięcie szczelin, zyskując czas na trwałe naprawy lub nawet ich unikając. Choć jest to wizja przyszłościowa, wyniki tego opracowania potwierdzają jej wykonalność: udowodniono, że rozproszone włókna Fe-SMA są w stanie wytworzyć istotne wstępne sprężenie w betonie i poprawić jego zachowanie konstrukcyjne po aktywacji. Infrastruktura nowej generacji, która zintegruje te materiały, będzie prawdopodobnie także wyposażona w zaawansowane systemy aktywacji (np. sterowane elektrycznie nagrzewnice indukcyjne). W szczególności włókna Fe-SMA wyróżniają się na tle innych stopów dzięki niższym kosztom i relatywnej łatwości wdrożenia, co potwierdzono w przeglądzie najnowszych osiągnięć [50]. Podsumowując, perspektywy

długoterminowe wskazują, że kompozyty Fe-SMA-FRC mogą przekształcić tradycyjny, bierny beton w materiał aktywny i samoadaptacyjny.

4.3 Kierunki dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań można wskazać następujące kierunki dalszych prac badawczych:

- **Optymalizacja temperatury aktywacji**
 - Eksperymentalne zbadanie wpływu temperatur poniżej 160 °C (np. w zakresie 120–160 °C) na odzyskiwane naprężenia przez włókna Fe-SMA, celem minimalizacji degradacji matrycy betonowej przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiego wstępnego sprężenia.
 - Analiza alternatywnych metod szybkiej aktywacji (np. indukcyjne lub mikrofalowe nagrzewanie włókien) w celu ograniczenia czasu oraz nierównomierności rozkładu temperatury w przekroju elementu.
- **Badania długoterminowej trwałości**
 - Ocena utrzymania wstępnego sprężenia w czasie, uwzględniająca pełzanie i skurcz betonu oraz relaksację włókien przy zmiennych warunkach wilgotności i temperatury.
 - Badanie odporności Fe-SMA na korozję w agresywnym środowisku alkalicznym i morskich warunkach klimatycznych.
- **Udoskonalenie technologii włókien i ich ułożenia**
 - Opracowanie modyfikowanych kształtów zakończeń włókien (np. haczyki wielowymiarowe) w celu zwiększenia wytrzymałości na wrywanie przy podwyższonej temperaturze.
 - Optymalizacja strategii mieszania i dodatków w mieszankach betonowych HPC/UHPC w celu zapobiegania osiadaniu włókien i zapewnienia jednolitego rozkładu w przekroju.
- **Skalowanie do elementów konstrukcyjnych**
 - Przeprowadzenie badań na większych belkach i płytach, uwzględniających rzeczywiste zbrojenie konwencjonalne, aby zweryfikować korzyści ze wstępnego sprężenia w skali elementu oraz wpływ rozkładu włókien na nośność kompozytu.
 - Analiza zachowania dynamicznego i zmęczeniowego elementów Fe-SMA-FRC poddanych cyklicznym obciążeniom.
- **Modelowanie wieloskalowe i uproszczone podejścia analityczne**
 - Rozwój modeli homogenizacyjnych, łączących wpływ losowego rozkładu włókien i ich aktywacji na właściwości całego kompozytu, w celu szybkiej oceny efektu wstępnego sprężenia.
 - Implementacja efektywnych metod symulacji, np. wykorzystanie elementów włóknowych⁸ zamiast pełnych modeli 3D, dla przyspieszenia obliczeń.

⁸np. w ABAQUS/CAE "wire element"

- **Integracja z technologiami aktywacji miejscowej**

- Badania nad wbudowanymi systemami grzewczymi (np. druty grzewcze) pozwalającymi na lokalne i aktywowanie włókien Fe-SMA bez konieczności nagrzewania całego elementu.

- **Ocena ekonomiczna i środowiskowa**

- Analiza kosztów wdrożenia Fe-SMA-FRC w porównaniu z tradycyjnymi metodami sprężania i zbrojenia, uwzględniająca oszczędności eksploatacyjne wynikające z wydłużonej trwałości oraz redukcji kosztów napraw.

- Ocena wpływu na środowisko, w tym bilansu emisji CO₂ i możliwości recyklingu Fe-SMA w porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami.

- **Funkcje dodatkowe: samonaprawa i adaptacja**

- Eksperymenty nad zdolnością kompozytu Fe-SMA-FRC do samodzielnego domykania rys w trakcie eksploatacji poprzez cykliczne aktywacje termiczne.

- Opracowanie hybrydowych systemów włókiennych z dodatkiem włókien polimerowych lub stalowych, aby połączyć aktywne wstępne sprężenie z wysoką ciągliwością i odpornością na zmęczenie.

Literatura

- [1] Y. Huang, S. Grünewald, E. Schlangen, and M. Luković. "Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review". *Construction and Building Materials* 336 (2022), p. 127398. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127398](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127398).
- [2] H. Wu, A. Shen, G. Ren, Q. Ma, Z. Wang, Q. Cheng, and Y. Li. "Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review". *Construction and Building Materials* 366 (2023), p. 130145. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.130145](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130145).
- [3] T. Sadowski and G. Golewski. "A failure analysis of concrete composites incorporating fly ash during torsional loading". *Composite Structures* 183 (2018), pp. 527–535. DOI: [10.1016/j.compstruct.2017.05.073](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.073).
- [4] A. Harichane, N. T. Seghir, P. Niewiadomski, Łukasz Sadowski, and M. Cisiński. "Effectiveness of the Use of Polymers in High-Performance Concrete Containing Silica Fume". *Polymers* 15 (18 2023), p. 3730. DOI: [10.3390/polym15183730](https://doi.org/10.3390/polym15183730).
- [5] A. A. El-Abbasy. "Tensile, flexural, impact strength, and fracture properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete – A comprehensive review". *Construction and Building Materials* 408 (2023), p. 133621. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.133621](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133621).
- [6] J. Gong, Y. Ma, J. Fu, J. Hu, X. Ouyang, Z. Zhang, and H. Wang. "Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review". *Composites Part B: Engineering* 241 (2022), p. 109995. DOI: [10.1016/j.compositesb.2022.109995](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995).
- [7] D. Pietras and T. Sadowski. "A numerical model for description of mechanical behaviour of a Functionally Graded Autoclaved Aerated Concrete created on the basis of experimental results for homogenous Autoclaved Aerated Concretes with different porosities". *Construction and Building Materials* 204 (2019), pp. 839–848. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.01.189](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.189).
- [8] M. Al-Zu'bi, M. Fan, and L. Anguilano. "Advances in bonding agents for retrofitting concrete structures with fibre reinforced polymer materials: A review". *Construction and Building Materials* 330 (2022), p. 127115. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127115](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127115).
- [9] V. Afroughsabet, L. Biolzi, and T. Ozbakkaloglu. "High-performance fiber-reinforced concrete: a review". *Journal of Materials Science* 51 (14 2016), pp. 6517–6551. DOI: [10.1007/s10853-016-9917-4](https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4).
- [10] M. Muthu and Łukasz Sadowski. "Performance of permeable concrete mixes based on cement and geopolymer in aggressive aqueous environments". *Journal of Building Engineering* 76 (2023), p. 107143. DOI: [10.1016/j.jobbe.2023.107143](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107143).

- [11] A. E. Naaman. "New methodology for the analysis of beams prestressed with external or unbonded tendons". *American Concrete Institute (ACI): Special Publication 120* (1990), pp. 339–354. DOI: [10.14359/2765](https://doi.org/10.14359/2765).
- [12] Y. Wu, B. Chen, S. M. Lopes, A. V. Lopes, and T. Lou. "A critical review of prestressed concrete structures with external FRP tendons". *Structures* 71 (2025), p. 108049. ISSN: 23520124. DOI: [10.1016/j.istruc.2024.108049](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108049).
- [13] M. Aslam, P. Shafigh, M. Z. Jumaat, and S. N. R. Shah. "Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers – A review". *Construction and Building Materials* 82 (2015), pp. 235–256. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.02.051](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.051).
- [14] H. Abdel-Jaber and B. Glisic. "Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—An overview". *Structural Control and Health Monitoring* 26 (8 2019). DOI: [10.1002/stc.2374](https://doi.org/10.1002/stc.2374).
- [15] K. Zdanowicz, R. Kotynia, and S. Marx. "Prestressing concrete members with fibre-reinforced polymer reinforcement: State of research". *Structural Concrete* 20 (3 2019), pp. 872–885. DOI: [10.1002/suco.201800347](https://doi.org/10.1002/suco.201800347).
- [16] R. J. Jiang, F. T. K. Au, and Y. F. Xiao. "Prestressed Concrete Girder Bridges with Corrugated Steel Webs: Review". *Journal of Structural Engineering* 141 (2 2015). DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001040).
- [17] S. Hong. "Effect of Prestress Levels and Jacking Methods on Friction Losses in Curved Prestressed Tendons". *Applied Sciences* 7 (8 Aug. 2017), p. 824. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app7080824](https://doi.org/10.3390/app7080824).
- [18] H. Minh, H. Mutsuyoshi, and K. Niitani. "Influence of grouting condition on crack and load-carrying capacity of post-tensioned concrete beam due to chloride-induced corrosion". *Construction and Building Materials* 21 (7 2007), pp. 1568–1575. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2005.10.004](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.10.004).
- [19] C.-H. Jeon, J.-B. Lee, S. Lon, and C.-S. Shim. "Equivalent material model of corroded prestressing steel strand". *Journal of Materials Research and Technology* 8 (2 2019), pp. 2450–2460. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.010).
- [20] A. Menga, T. Kanstad, D. Cantero, L. Bathen, K. Hornbostel, and A. Klausen. "Corrosion-induced damages and failures of posttensioned bridges: A literature review". *Structural Concrete* 24 (1 2023), pp. 84–99. DOI: [10.1002/suco.202200297](https://doi.org/10.1002/suco.202200297).
- [21] D. C. Lagoudas. *Shape Memory Alloys: modeling and engineering applications*. 2008.
- [22] J. Van Humbeeck. "Shape Memory Alloys: A Material and a Technology". *Advanced Engineering Materials* 3.11 (2001), pp. 837–850. DOI: [10.1002/1527-2648\(200111\)3:11<837::AID-ADEM837>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:11<837::AID-ADEM837>3.0.CO;2-0).
- [23] K. Wilde, P. Gardoni, and Y. Fujino. "Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges". *Engineering Structures* 22 (3 2000), pp. 222–229. DOI: [10.1016/S0141-0296\(98\)00097-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00097-2).
- [24] D. C. Lagoudas, J. G. Boyd, and Z. Bo. "Micromechanics of Active Composites With SMA Fibers". *Journal of Engineering Materials and Technology* 116 (3 1994), pp. 337–347. DOI: [10.1115/1.2904297](https://doi.org/10.1115/1.2904297).

- [25] K. Otsuka and X. Ren. "Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys". *Progress in Materials Science* 50 (5 2005), pp. 511–678. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2004.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001).
- [26] M. Kuczma, A. Mielke, and E. Stein. "Modelling of hysteresis in two phase systems". *Arch. Mech.* 51 (1999), pp. 693–715.
- [27] M. Kuczma and A. Mielke. "Influence of hardening and inhomogeneity on internal loops in pseudoelasticity". *ZAMM* 80 (2000), pp. 291–306.
- [28] K. Otsuka and X. Ren. "Recent developments in the research of shape memory alloys". *Intermetallics* 7 (5 1999), pp. 511–528. DOI: [10.1016/S0966-9795\(98\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(98)00070-3).
- [29] L. Brinson. "One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 4 (2 1993), pp. 229–242. DOI: [10.1177/1045389X9300400213](https://doi.org/10.1177/1045389X9300400213).
- [30] J. Ma, I. Karaman, and R. D. Noebe. "High temperature shape memory alloys". *International Materials Reviews* 55 (5 2010), pp. 257–315. DOI: [10.1179/095066010X12646898728363](https://doi.org/10.1179/095066010X12646898728363).
- [31] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson. "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities". *Materials & Design (1980-2015)* 56 (2014), pp. 1078–1113. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.11.084](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084).
- [32] M. S. Alam, M. A. Youssef, and M. Nehdi. "Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review". *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (9 2007), pp. 1075–1086. DOI: [10.1139/107-038](https://doi.org/10.1139/107-038).
- [33] A. Tabrizikahou, M. Kuczma, M. Łasecka-Plura, E. Noroozinejad Farsangi, M. Noori, P. Gardoni, and S. Li. "Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review". *Construction and Building Materials* 342 (2022), p. 127975. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127975](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127975).
- [34] S. Zareie, A. S. Issa, R. J. Seethaler, and A. Zabihollah. "Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review". *Structures* 27 (2020), pp. 1535–1550. DOI: [10.1016/j.istruc.2020.05.058](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.058).
- [35] A. M. Billah, J. Rahman, and Q. Zhang. "Shape memory alloys (SMAs) for resilient bridges: A state-of-the-art review". *Structures* 37 (2022), pp. 514–527. DOI: [10.1016/j.istruc.2022.01.034](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.034).
- [36] O. E. Ozbulut, S. Hurlbaas, and R. Desroches. "Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys: A Review". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 22 (14 2011), pp. 1531–1549. DOI: [10.1177/1045389X11411220](https://doi.org/10.1177/1045389X11411220).
- [37] S. Saadat, J. Salichs, M. Noori, Z. Hou, H. Davoodi, I. Bar-on, Y. Suzuki, and A. Masuda. "An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy". *Smart Materials and Structures* 11 (2 2002), pp. 218–229. DOI: [10.1088/0964-1726/11/2/305](https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/305).
- [38] R. Desroches and B. Smith. "Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations". *Journal of Earthquake Engineering* 8 (3 2004), pp. 415–429. DOI: [10.1080/13632460409350495](https://doi.org/10.1080/13632460409350495).

- [39] L. Janke, C. Czaderski, M. Motavalli, and J. Ruth. "Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas". *Materials and Structures* 38 (5 2005), pp. 578–592. DOI: [10.1007/BF02479550](https://doi.org/10.1007/BF02479550).
- [40] A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi, and M. Motavalli. "Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview". *Construction and building materials* 63 (2014), pp. 281–293.
- [41] Z. Dong, U. E. Klotz, C. Leinenbach, A. Bergamini, C. Czaderski, and M. Motavalli. "A Novel Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy With Improved Shape Recovery Properties by VC Precipitation". *Advanced Engineering Materials* 11.1-2 (2009), pp. 40–44. DOI: [10.1002/adem.200800312](https://doi.org/10.1002/adem.200800312).
- [42] E. Ghafoori, M. Neuenschwander, M. Shahverdi, C. Czaderski, and M. Fontana. "Elevated temperature behavior of an iron-based shape memory alloy used for prestressed strengthening of civil structures". *Construction and Building Materials* 211 (2019), pp. 437–452. ISSN: 09500618. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.03.098](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.098).
- [43] M. Shahverdi, J. Michels, C. Czaderski, and M. Motavalli. "Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization". *Construction and Building Materials* 173 (2018), pp. 586–599. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057).
- [44] B. Schranz, J. Michels, C. Czaderski, M. Motavalli, T. Vogel, and M. Shahverdi. "Strengthening and prestressing of bridge decks with ribbed iron-based shape memory alloy bars". *Engineering Structures* 241 (2021), p. 112467. DOI: [10.1016/j.engstruct.2021.112467](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112467).
- [45] J. Michels, M. Shahverdi, and C. Czaderski. "Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips". *Structural Concrete* 19 (3 2018), pp. 876–891. DOI: [10.1002/suco.201700120](https://doi.org/10.1002/suco.201700120).
- [46] C. Czaderski, M. Shahverdi, R. Brönnimann, C. Leinenbach, and M. Motavalli. "Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures". *Construction and Building Materials* 56 (2014), pp. 94–105. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2014.01.069](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.069).
- [47] M. Shahverdi, C. Czaderski, and M. Motavalli. "Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams". *Construction and Building Materials* 112 (2016), pp. 28–38. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.02.174](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.174).
- [48] S. Raza, J. Michels, and M. Shahverdi. "Uniaxial behavior of pre-stressed iron-based shape memory alloy rebars under cyclic loading reversals". *Construction and Building Materials* 326 (2022), p. 126900. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126900](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126900).
- [49] S. Raza, B. Shafei, M. S. Saiidi, M. Motavalli, and M. Shahverdi. "Shape memory alloy reinforcement for strengthening and self-centering of concrete structures—State of the art". *Construction and Building Materials* 324 (2022), p. 126628. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126628](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126628).

- [50] A. Tabrizikahou, M. Kuczma, C. Czaderski, and M. Shahverdi. "From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites". *Composites Part B: Engineering* 281 (2024), p. 111530. DOI: [10.1016/j.compositesb.2024.111530](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530).
- [51] K. Moser, A. Bergamini, R. Christen, and C. Czaderski. "Feasibility of concrete prestressed by shape memory alloy short fibers". *Materials and Structures* 38 (5 2005), pp. 593–600. DOI: [10.1007/BF02479551](https://doi.org/10.1007/BF02479551).
- [52] M. K. Kim, D. J. Kim, Y.-S. Chung, and E. Choi. "Direct tensile behavior of shape-memory-alloy fiber-reinforced cement composites". *Construction and Building Materials* 102 (2016), pp. 462–470. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.11.015](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.015).
- [53] E. Choi, J.-S. Jeon, and J.-H. Lee. "Active action of prestressing on direct tensile behavior of mortar reinforced with NiTi SMA crimped fibers". *Composite Structures* 281 (2022), p. 115119. DOI: [10.1016/j.compstruct.2021.115119](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115119).
- [54] E. Choi, A. Ostadrahimi, J.-H. Lee, and J.-S. Jeon. "On the efficiency of induced prestressing in SMA mortar beams through different thermal stimuli". *Smart Materials and Structures* 31 (12 2022), p. 125026. DOI: [10.1088/1361-665X/aca3e2](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aca3e2).
- [55] Dassault Systèmes Simulia. "Abaqus User's Manual version 2022" (2022).
- [56] M. Izadi, E. Ghafoori, M. Shahverdi, M. Motavalli, and S. Maalek. "Development of an iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strengthening system for steel plates". *Engineering Structures* 174 (2018), pp. 433–446. DOI: [10.1016/j.engstruct.2018.07.073](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.073).
- [57] G. Fawaz and J. Murcia-Delso. "Bond behavior of iron-based shape memory alloy reinforcing bars embedded in concrete". *Materials and Structures* 53 (5 2020), p. 114. DOI: [10.1617/s11527-020-01548-y](https://doi.org/10.1617/s11527-020-01548-y).
- [58] J. Vůjtek, P. Ryjáček, J. C. Matos, and E. Ghafoori. "Iron-Based shape memory alloy for strengthening of 113-Year bridge". *Engineering Structures* 248 (2021), p. 113231. DOI: [10.1016/j.engstruct.2021.113231](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113231).
- [59] A. Tabrizikahou, M. Kuczma, Z. Triantafyllidis, and M. Shahverdi. "Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis". *Construction and Building Materials* 467 (2025), p. 140309. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.140309](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140309).
- [60] A. Tabrizikahou, M. Kuczma, and M. Shahverdi. "Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation". *Construction and Building Materials* 456 (2024), p. 139298. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139298](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139298).
- [61] European Committee for Standardization (CEN). "EN 1015–11:2020 Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar" (2020).
- [62] W. Meng, A. Kumar, and K. H. Khayat. "Effect of silica fume and slump-retaining polycarboxylate-based dispersant on the development of properties of portland cement paste". *Cement and Concrete Composites* 99 (2019), pp. 181–190. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.021).

- [63] H. Bahmani and D. Mostofinejad. "Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review study". *Journal of Building Engineering* 50 (2022), p. 104118. DOI: [10.1016/j.jobbe.2022.104118](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104118).
- [64] S. Banerji and V. Kodur. "Effect of temperature on mechanical properties of ultra-high performance concrete". *Fire and Materials* 46 (1 2022), pp. 287–301. DOI: [10.1002/fam.2979](https://doi.org/10.1002/fam.2979).
- [65] I.-H. Yang and J. Park. "Mechanical and Thermal Properties of UHPC Exposed to High-Temperature Thermal Cycling". *Advances in Materials Science and Engineering* 2019 (2019), pp. 1–12. DOI: [10.1155/2019/9723693](https://doi.org/10.1155/2019/9723693).
- [66] Y. Zhu, H. Hussein, A. Kumar, and G. Chen. "A review: Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions". *Cement and Concrete Composites* 123 (2021), p. 104212. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2021.104212](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104212).
- [67] F. Lundh. "An introduction to tkinter". 539 (1999), p. 540.
- [68] K. Wijesinghe, C. Gunasekara, D. W. Law, H. Hidallana-Gamage, N. Wanasekara, and L. Wang. "Thermal and acoustic performance in textile fibre-reinforced concrete: An analytical review". *Construction and Building Materials* 412 (2024), p. 134879. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.134879](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134879).
- [69] P. Park, S. El-Tawil, S.-Y. Park, and A. E. Naaman. "Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at -20oC". *Construction and Building Materials* 81 (2015), pp. 47–57. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.02.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.005).
- [70] P. Su, M. Li, Q. Dai, and J. Wang. "Mechanical and durability performance of concrete with recycled tire steel fibers". *Construction and Building Materials* 394 (2023), p. 132287. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132287](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132287).
- [71] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate. "A plastic-damage model for concrete". *International Journal of Solids and Structures* 25 (3 1989), pp. 299–326. DOI: [10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).
- [72] J. Lee and G. L. Fenves. "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures". *Journal of Engineering Mechanics* 124 (8 1998), pp. 892–900. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)).
- [73] M. Szczecina and A. Winnicki. "Relaxation Time in CDP Model Used for Analyses of RC Structures". *Procedia Engineering* 193 (2017), pp. 369–376. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.06.226](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.226).
- [74] A. Wosatko, A. Winnicki, M. A. Polak, and J. Pamin. "Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete". *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19 (4 2019), pp. 1268–1283. DOI: [10.1016/j.acme.2019.07.003](https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.07.003).
- [75] American Society for Testing and Materials. "ASTM C307-18: Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing". *Technical report, ASTM International* (2018).

Załącznik A

Aktywność naukowa

A.1 Publikacje naukowe

1. Saeedi, A., Tabrizikahou, A., Wagner, P. R., & Shahverdi, M. (2025). *Multiphysical simulation of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) activation embedded in concrete structures*. Engineering Structures, 327, 119623. IF = 5,6; MNiSW = 140.
2. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Triantafyllidis, Z., & Shahverdi, M. (2025). *Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis*. Construction and Building Materials, 467, 140309. IF = 7,4; MNiSW = 140.
3. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., & Shahverdi, M. (2024). *Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation*. Construction and Building Materials, 456, 139298. IF = 7,4; MNiSW = 140.
4. Saeedi, A., Tabrizikahou, A., & Shahverdi, M. (2024). *Study of activation parameters in Fe-SMA reinforced concrete structures using multiphysics modelling*. Procedia Structural Integrity, 64, 2044-2050. MNiSW = 5.
5. Tabrizikahou, A., Pavić, G., Shahsavani, Y., & Hadzima-Nyarko, M. (2024). *Prediction of reinforced concrete walls shear strength based on soft computing-based techniques*. Soft computing, 28(15), 8731-8747. IF = 3,1; MNiSW = 70.
6. Tabrizikahou, A., Białasik, J., Borysiak, S., Fabisiak, M., Łasecka-Plura, M., Jesionowski, T., & Kuczma, M. (2024). *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, 24(3), 189. IF = 4,4; MNiSW = 140.
7. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., & Shahverdi, M. (2024). *From experimental testing to computational modelling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites*. Composites Part B: Engineering, 111530. IF = 12,7; MNiSW = 200.
8. Łasecka-Plura, M., Białasik, J., Kuczma, M., & Tabrizikahou, A. (2023). *Application of isogeometric approach to dynamics of curved beam*. Vibrations in Physical Systems, 34(1). MNiSW = 70.

9. **Tabrizikahou, A.,** & Nowotarski, P. (2022). *Analysis of problems and barriers in construction sites processes*. Materiały Budowlane. MNiSW = 100.
10. **Tabrizikahou, A.,** Kuczma, M., & Łasecka-Plura, M. (2022). *Out-of-plane behavior of masonry prisms retrofitted with shape memory alloy stripes: numerical and parametric analysis*. Sensors, 22(20), 8004. IF = 3,9; MNiSW = 100.
11. **Tabrizikahou, A.,** Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., Farsangi, E. N., Noori, M., Gardoni, P., & Li, S. (2022). *Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review*. Construction and Building Materials, 342, 127975. IF = 7,4; MNiSW = 140.
12. Javanmardi, A., Ghaedi, K., Huang, F., Hanif, M. U., & **Tabrizikahou, A.** (2022). *Application of structural control systems for the cables of cable-stayed bridges: state-of-the-art and state-of-the-practice*. Archives of Computational Methods in Engineering, 29(3), 1611-1641. IF = 9,7; MNiSW = 200.
13. **Tabrizikahou, A.,** Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., & Noroozinejad Farsangi, E. (2022). *Cyclic behavior of masonry shear walls retrofitted with engineered cementitious composite and pseudoelastic shape memory alloy*. Sensors, 22(2), 511. IF = 3,9; MNiSW = 100.
14. Javanmardi, A., Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Huang, F., Kuczma, M., **Tabrizikahou, A.,** & Mohammad-Sedighi, H. (2022). *Pounding mitigation of a short-span cable-stayed bridge using a new hybrid passive control system*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 134, 625-636. IF = 3,3; MNiSW = 100.
15. **Tabrizikahou, A.,** Kuczma, M., Nowotarski, P., Kwiatek, M., & Javanmardi, A. (2021). *Sustainability of civil structures through the application of smart materials: A review*. Materials, 14(17), 4824. IF = 3,748; MNiSW = 140.
16. **Tabrizikahou, A.,** Hadzima-Nyarko, M., Kuczma, M., & Lozančić, S. (2021). *Application of shape memory alloys in retrofitting of masonry and heritage structures based on their vulnerability revealed in the Bam 2003 earthquake*. Materials, 14(16), 4480. IF = 3,748; MNiSW = 140.
17. **Tabrizikahou, A.,** & Nowotarski, P. (2021). *Mitigating the energy consumption and the carbon emission in the building structures by optimization of the construction processes*. Energies, 14(11), 3287. IF = 3,252; MNiSW = 140.

A.2 Konferencje naukowe

1. **95th Annual Meeting of the Association of Applied Mathematics and Mechanics** (7-11 kwietnia 2025, Poznań). *Prestressing of concrete with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical investigation*. **Tabrizikahou, A.,** Kuczma, M.
2. **43rd Solid Mechanics Conference** (16-18 września 2024, Wrocław). *Shape Memory Alloy Fiber-Reinforced Concrete (SMA-FRC) Composites: An Experimental and Multiscale Modelling Investigation*. **Tabrizikahou, A.,** Białasik, J., Kuczma, M.

3. [7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures](#) (4-6 września 2024, Salerno, Włochy). *Computational Modeling of Concrete Composites with Short Shape Memory Alloys Fibers*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M., Shahverdi, M.
4. [94th Annual Meeting of the Association of Applied Mathematics and Mechanics](#) (18-22 marca 2024, Magdeburg, Niemcy). *Computational Modeling of Concrete Composites with Short Shape Memory Alloys Fibers*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M.
5. [5th Polish Congress of Mechanics, 25th International Conference on Computer Methods in Mechanics](#) (4-7 września 2023, Gliwice). *Multiscale Modelling of Concrete Reinforced with Shape Memory Alloys: An Investigation into the Mechanical Properties of High-Performance Concrete*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M.
6. [93rd Annual Meeting of the Association of Applied Mathematics and Mechanics](#) (30 maja - 2 czerwca 2023, Drezno, Niemcy). *Multiscale Modelling of Concrete Reinforced with Shape Memory Alloys: An Investigation into the Mechanical Properties of High-Performance Concrete*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M.
7. [24th International Conference on Computer Methods in Mechanics, 42nd Solid Mechanics Conference](#) (5-8 września 2022, Świnoujście). *Masonry walls strengthened with shape memory alloy and engineered cementitious composite*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., Noroozinejad-Farsangi, E.
8. [International Conference of Selected Issues in Building Structures Design](#) (14-15 lipca 2022, Kielce). *Strengthening and retrofitting of masonry constructions by using shape memory alloys*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M., Łasecka-Plura, M.
9. [52nd Scientific Conference Construction Projects Engineering and The International Colloquium Modern Technologies In Construction, Challenges Of The 21st Century](#) (18-20 października 2021, Białystok). *Sustainability of Civil Structures through the Application of Smart Materials: A Review*. **Tabrizikahou, A.**, Kuczma, M., Nowotarski, P., Kwiatek, M., Javanmardi, A.

A.3 Projekty naukowe

- Kierownik projektu (PI) **Beton samonaprawiający się z wykorzystaniem włókien ze stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza** finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) w ramach konkursu PRELUDIUM 22. Okres realizacji: 03.01.2024–02.01.2026. Nr grantu [2023/49/N/ST8/03063](#).
- Członek zespołu badawczego w projekcie **Badania doświadczalne, modelowanie i digitalizacja nowego betonu ze zdolnością do samonaprawy i pamięcią kształtu** finansowanym przez rektora Politechniki Poznańskiej. Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma. Nr grantu 0412/SIGR/6587.

A.4 Staże naukowe

- 7–13.7.2024: W ramach programu Erasmus+ Mobility Agreement Staff Mobility For Training, współpraca z prof. dr hab. inż. Martinem Drieschnerem z Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg – Cottbus, Niemcy. Temat pracy: "Analiza eksperymentalna i numeryczna ramy żelbetowej pod obciążeniem dynamicznym i cyklicznym".
- 1.9.2023–30.11.2023: W ramach programu Erasmus+ Traineeship, współpraca z prof. dr hab. inż. Geraľfem Hütterem z Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg – Cottbus, Niemcy. Temat pracy: "Wieloskalowe modelowanie kompozytów betonowych z włóknami SMA".
- 20.10.2023–24.10.2023: Referat na seminarium wydziałowym z prof. dr hab. inż. Björnem Kieferem z TU Bergakademie Freiberg – Freiberg, Niemcy. Temat pracy: "Modelowanie i testowanie kompozytów betonowych z włóknami SMA".
- 2.2.2023–28.4.2023: Staż naukowy w Empa (Federalne Laboratoria Materiałów i Technologii) – Zurych, Szwajcaria, pod kierunkiem prof. dr inż. Moslema Shahverdiego. Temat pracy: "Analiza eksperymentalna betonu z Fe-SMA" w ramach projektu NAWA-INPUTDoc – STER – MOBILNOŚĆ II.

A.5 Nagrody i wyróżnienia

Wyróżnienie w Konkursie PAN na najlepszą oryginalną pracę twórczą doktoranta

Wybrane przez Prezydium Oddziału Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu w konkursie na najlepszą oryginalną pracę twórczą doktoranta opublikowaną w 2024.

Wyjątkowy recenzent – Materials

Wybrany Wyjątkowym recenzentem roku 2025 czasopisma Journal of Materials (IF = 3,1) przez prof. [Maryam Tabrizian](#) z McGill University w Kanadzie ([Link](#)).

Najlepszy zagraniczny student w Polsce

Laureat Specjalnej nagrody "Najlepszy zagraniczny student w Polsce" za wybitne osiągnięcia naukowe przyznanej przez Fundację Edukacyjną Perspektywy w 2024 r. ([Link 1](#) i [Link 2](#)).

Nagroda im. Jana Szmeltera

Laureat Nagrody im. Jana Szmeltera za najlepszy referat młodego naukowca przyznanej przez [Polskie Towarzystwo Metod Komputerowych w Mechanice \(PTMKM\)](#) w 2023 r. ([Link](#)).

Stypendium NAWA STER

Laureat konkursu na Stypendia dla najlepszych doktorantów Szkoły Doktorskiej Politechniki Poznańskiej realizujących projekty w międzynarodowej współpracy w 2023 r. ([Link](#)).

Mobilność NAWA STER

Laureat konkursu na Mobilność zagraniczną najlepszych doktorantów Szkoły Doktorskiej Politechniki Poznańskiej – finansowanie trzymiesięcznego stażu badawczego za granicą w 2022 r. ([Link](#)).

Wyjątkowa recenzja ASCE

Wybrany Wyjątkowym recenzentem 2021 American Society of Civil Engineers (ASCE) dla Journal of Practice Periodical on Structural Design and Construction (IF = 1,6) przez prof. [Solimana Khudeirę](#) z Illinois Institute of Technology w USA ([Link](#)).

A.6 Dane naukometryczne – podsumowanie

Liczba publikacji		17
Liczba konferencji		9
Łączny IF		79,548
Średni IF na publikację		4,679
Łączna liczba punktów MNiSW		2065
Dane wg bazy Scopus	Cytowania:	274
	Indeks H:	8
Dane wg bazy WoS	Cytowania:	235
	Indeks H:	9
Dane wg bazy Google Scholar	Cytowania:	348
	Indeks H:	9

Załącznik B

Artykuły stanowiące podstawę pracy doktorskiej

B.1 Artykuł 1

Tabrizikahou A., Kuczma M., Łasecka-Plura M., Farsangi E-N., Noori N., Gardoni P., Li S.

*Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control:
State-of-the-art review*

Construction and Building Materials 342 (2022) 127975

IF = 7,4; MNiSW = 140

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127975>

Abstract: One of the most essential components of structural design for civil engineers is to build a system that is resistant to environmental conditions such as harsh chemical environments, and catastrophic disasters like earthquakes and hurricanes. Under these circumstances and disturbances, conventional building materials such as steel and concrete may demonstrate inadequate performance in the form of corrosion, deterioration, oxidizing, etc. Shape Memory Alloys (SMAs) are novel metals with distinct features and desirable potential to overcome the inadequacies of existing construction materials and enable the structure to tolerate disturbances more efficiently. Shape Memory Effect (SME) and Pseudoelasticity (PE) have been the most attractive characteristics that scientists have focused on among the various features that SMAs exhibit. The SME enables the material to retain its original shape after severe deformation, whereas the PE behaviour of SMAs provides a wide range of deformation while mitigating a substantial amount of susceptible stresses. These behaviours are the consequence of the phase transformation between austenite and martensite. Many investigations on the modelling and application of SMAs in structural systems to endure applied dynamic loadings in the form of active, passive, and hybrid vibration control systems have been undertaken. The focus of this paper is to present an overview of the SMA-based applications and most frequently employed constitutive modelling, as well as their limits in structural vibration control and seismic isolation devices.

B.2 Artykuł 2

Tabrizikahou A., Kuczma M., Czaderski C., Shahverdi M.

From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites

Composites Part B: Engineering 281 (2024) 111530

IF = 12,7; MNI_{SW} = 200

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530>

Abstract: Shape memory alloys (SMAs) have unique characteristics, such as the shape memory effect, which allows them to recover their initial shape after being deformed when stimulated, and pseudoelasticity, which enables them to accommodate large deformation without residual strains after being unloaded. SMAs may be used as short fibers in fiber-reinforced concrete (FRC) composites to pre-stress, heal fractures, and re-center themselves. As a result, SMA-FRC is a potential alternative to conventional construction materials in a wide range of applications. SMA-FRC composite application and modeling may present challenges, such as computational modeling complexities, practical constraints regarding fiber volume fraction, fiber-to-concrete adhesion strength, and the complex temperature-based activation of SMA fibers embedded in concrete. Despite these challenges and difficulties, significant work toward resolution is being made, making SMA-FRC an innovative technology with many potential research and development alternatives. This article presents an overview of experimental testing, computational methods, limitations, and future research potential for SMA-FRC composite materials. The study also looks at practical applications of SMA fibers in concrete composites including beam-column junctions, pre-stressing, and self-healing, as well as major developments and implications. The advantages and limits of several computational strategies for studying SMA-FRCs are discussed. The research suggests multiscale modeling as an effective approach for analyzing SMA-FRC, and a unique example of SMA-FRC multiscale modeling is briefly demonstrated. In conclusion, this research emphasizes the significant potential of SMA-FRC composites as novel construction materials with prospective practical applications, as well as the importance of multiscale modeling in SMA-FRC computational modeling.

B.3 Artykuł 3

Tabrizikahou A., Kuczma M., Shahverdi M.

Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation

Construction and Building Materials 456 (2024) 139298

IF = 7,4; MNiSW = 140

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139298>

Abstract: An experimental campaign was conducted to determine the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) fibers embedded in high-performance fiber-reinforced concrete (HPFRC). Seventy-two specimens were examined using different thermal heating temperatures, loading rates, fiber end shapes, and concrete mixtures. The results indicated that end-hooked fibers had double the pull-out resistance of straight fibers. Increasing the temperature greatly reduced pull-out resistance in end-hooked fibers but had minimal impact on straight fibers. Concrete mixtures with higher compressive and flexural strengths exhibited greater pull-out resistance. Finally, the loading rate had a negligible effect; a tenfold increase induced merely a slight rise in pull-out resistance.

B.4 Artykuł 4

Tabrizikahou A., Kuczma M., Triantafyllidis Z., Shahverdi M.

*Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers:
Experimental and numerical analysis*

Construction and Building Materials 467 (2025) 140309

IF = 7,4; MNiSW = 140

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140309>

Abstract: Iron-based shape memory alloys (Fe-SMAs) exhibit unique shape recovery and memory effect behavior upon thermal activation, making them advantageous for structural applications such as prestressing. Introducing short Fe-SMA fibers into concrete structures allows for a uniform and localized distribution of prestressing forces within the concrete matrix. In this study, an experimental campaign was conducted to evaluate the efficiency of prestressing concrete using short Fe-SMA fibers. Concrete prism specimens reinforced with randomly dispersed Fe-SMA fibers, steel fibers, and plain concrete reference specimens were tested under three-point bending after exposure to ambient temperature, 160 °C, and 200 °C. All fiber-reinforced specimens contained a targeted 2% volume fraction of fibers with identical geometries featuring end-hooked shapes for enhanced pull-out resistance. At ambient temperature, the Fe-SMA fibers remain in a passive, non-activated state and do not undergo the phase transformation required to generate prestressing forces. As a result, at ambient temperature, specimens with steel fibers show higher flexural strength (22.95 MPa) than those containing Fe-SMA fibers (20.2 MPa). However, when the prisms with Fe-SMA fibers are heated to 160 °C and 200 °C, they recover their pre-defined shape, which applies prestress to the surrounding concrete. This prestress increases the load-bearing capacity of the prism, leading to higher flexural strength in the Fe-SMA specimens (26.65 MPa and 24.39 MPa, respectively) compared to their steel-fiber counterparts (19.46 MPa and 16.67 MPa, respectively). Based on these findings, a numerical model was developed to simulate the behavior of concrete composites reinforced with randomly dispersed Fe-SMA fibers. An algorithm was created to define the random distribution of fibers, and a novel modeling approach accounted for the end-hooked geometry by assigning different contact properties to the modeled straight fiber ends and middle sections. A mesh sensitivity analysis was performed to determine the optimal mesh size, and the model was validated by comparing numerical results with experimental data. In summary, the key finding of this work is that thermally activated Fe-SMA fibers can effectively prestress concrete and enhance its flexural strength beyond that achievable with conventional steel fibers at ambient conditions.

Załącznik C

Oświadczenia współautorów



Poznań, 28.05.2025

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuły naukowe

Niniejszym oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w przygotowaniu poniższych publikacji naukowych:

1. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Triantafyllidis, Z., & Shahverdi, M. (2025). **Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis.** Construction and Building Materials, 467, 140309. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.140309](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140309).

Oświadczam, że jestem pierwszym, głównym oraz korespondującym autorem niniejszej publikacji naukowej; mój wkład obejmował conceptualizację badania, opracowanie metodologii badań eksperymentalnych, przygotowanie próbek, przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz modelowanie numeryczne, zebranie danych wraz z ich analizą i interpretacją, walidację uzyskanych wyników, stworzenie wykresów ilustrujących rezultaty, napisanie i redakcję manuskryptu, a także zgłoszenie artykułu do czasopisma i prowadzenie pełnej korespondencji z redakcją i recenzentami.

2. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., & Shahverdi, M. (2024). **Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation.** Construction and Building Materials, 456, 139298. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139298](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139298).

Oświadczam, że jestem pierwszym, głównym oraz korespondującym autorem niniejszej publikacji naukowej. Mój wkład obejmował koncepcję badania, opracowanie metodologii badań eksperymentalnych, przygotowanie próbek, przeprowadzenie eksperymentów, zebranie danych pomiarowych oraz ich analizę i interpretację, walidację wyników, opracowanie wykresów, napisanie i redakcję manuskryptu, zgłoszenie artykułu do czasopisma oraz pełną korespondencję z redakcją i recenzentami.

3. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., & Shahverdi, M. (2024). **From experimental testing to computational modelling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites.** Composites Part B: Engineering, 111530. DOI: [10.1016/j.compositesb.2024.111530](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530).

Oświadczam, że jestem pierwszym, głównym oraz korespondującym autorem niniejszej publikacji naukowej. Mój wkład obejmował zebranie i selekcję literatury z lat 2005–2021 dotyczącej zastosowania i numerycznego modelowania włókien ze stopów z pamięcią kształtu w konstrukcjach betonowych, przeprowadzenie kompleksowego i krytycznego przeglądu około 200 prac, wskazanie istniejących luk praktycznych i naukowych oraz wyznaczenie kierunków



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

mgr inż. Alireza TABRIZIKAHOV

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU
INSTYTUT BUDOWNICTWA
Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 20 86
e-mail: alireza.tabrizikahou@put.poznan.pl

dalszych badań, opracowanie i przygotowanie ilustracji, napisanie i redakcję manuskryptu, a także zgłoszenie artykułu do czasopisma oraz pełną korespondencję z redakcją i recenzentami.

4. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., Farsangi, E. N., Noori, M., Gardoni, P., & Li, S. (2022). **Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review**. Construction and Building Materials, 342, 127975. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127975](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127975).

Oświadczam, że jestem pierwszym, głównym oraz korespondującym autorem niniejszej publikacji naukowej. Mój wkład obejmował zebranie i selekcję literatury z lat 1980–2021 dotyczącej zastosowań stopów z pamięcią kształtu w budownictwie, przeprowadzenie kompleksowego i krytycznego przeglądu około 200 prac, identyfikację istniejących luk praktycznych i naukowych oraz wyznaczenie kierunków dalszych badań, opracowanie i przygotowanie ilustracji, napisanie i redakcję manuskryptu, a także zgłoszenie artykułu do czasopisma oraz pełną korespondencję z redakcją i recenzentami.

Alireza Tabrizikahou
Podpis



prof. dr hab. inż. Mieczysław KUCZMA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU
INSTYTUT BUDOWNICTWA
Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 21 55
e-mail: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl

Poznań, 28.05.2025

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuły naukowe

Niniejszym oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w przygotowaniu poniższych publikacji naukowych:

1. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Triantafyllidis, Z., & Shahverdi, M. (2025). Prestressing of concrete using iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) short fibers: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 467, 140309. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.140309](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140309).
2. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., & Shahverdi, M. (2024). Impact of fiber geometry, temperature, loading rate, and concrete mix on the pull-out resistance of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA): Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 456, 139298. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139298](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139298).
3. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., & Shahverdi, M. (2024). From experimental testing to computational modelling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites. *Composites Part B: Engineering*, 111530. DOI: [10.1016/j.compositesb.2024.111530](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530).
4. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., Farsangi, E. N., Noori, M., Gardoni, P., & Li, S. (2022). Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 342, 127975. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127975](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127975).

Mój udział w przygotowaniu powyższych publikacji naukowych obejmował koncepcję badań, nadzór merytoryczny, omówienie uzyskanych wyników z krytyczną analizą, recenzję i redakcję manuskryptów oraz pozyskanie finansowania na projekt stanowiący podstawę tych publikacji. Jednocześnie oświadczam, że mgr inż. Alireza Tabrizikahou jest głównym i korespondującym autorem wyżej wymienionych publikacji.


.....
Podpis



dr hab. inż. Magdalena ŁASECKA-PLURA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU
INSTYTUT ANALIZY KONSTRUKCJI
Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 26 97
e-mail: magdalena.lasecka-plura@put.poznan.pl

Poznań, 28.05.2025

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuły naukowe

Niniejszym oświadczam, że aktywnie uczestniczyłam w przygotowaniu poniższych publikacji naukowych:

1. Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Łasecka-Plura, M., Farsangi, E. N., Noori, M., Gardoni, P., & Li, S. (2022). Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 342, 127975. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127975](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127975).

Mój udział w przygotowaniu powyższej publikacji naukowej obejmował koncepcję badań, nadzór merytoryczny, omówienie uzyskanych wyników z krytyczną analizą, recenzję i redakcję manuskryptu. Jednocześnie oświadczam, że mgr inż. Alireza Tabrizikahou jest głównym i korespondencyjnym autorem wyżej wymienionych publikacji.

Łasecka-Plura

Podpis