

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: Jan Deja
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: AD-LINE.PL

Projekt: Artur Darłak

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

BETONY NOWEJ GENERACJI

NEW GENERATION CONCRETE

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

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

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

Streszczenie

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

Abstract

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

1. Wprowadzenie

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

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

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

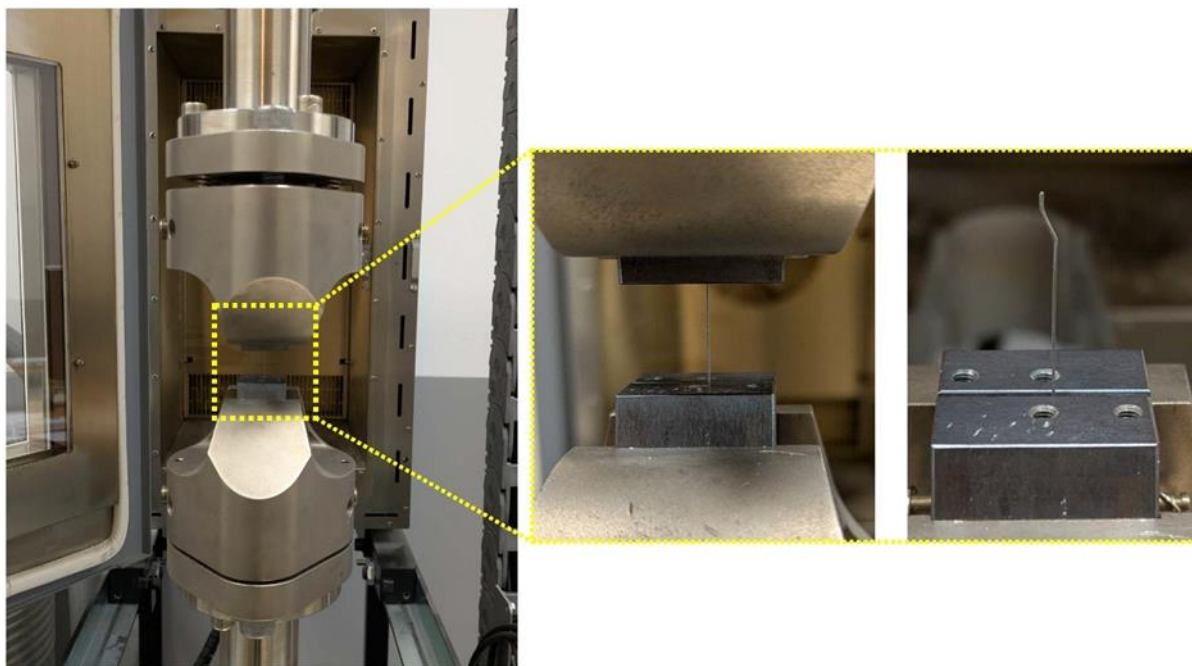
Dotychczasowe badania z Fe-SMA skupiały się głównie na taśmach lub prętach stosowanych lokalnie, co nie zapewnia równomiernego, rozproszonego działania w całym elemencie [10]. W literaturze brakuje kompleksowych analiz dotyczących zastosowania krótkich, losowo rozmieszczonych włókien Fe-SMA oraz ich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

2. Badania eksperymentalne

1.1 Metodologia badań eksperymentalnych

1.1.1 Zachowanie termomechaniczne włókien Fe-SMA

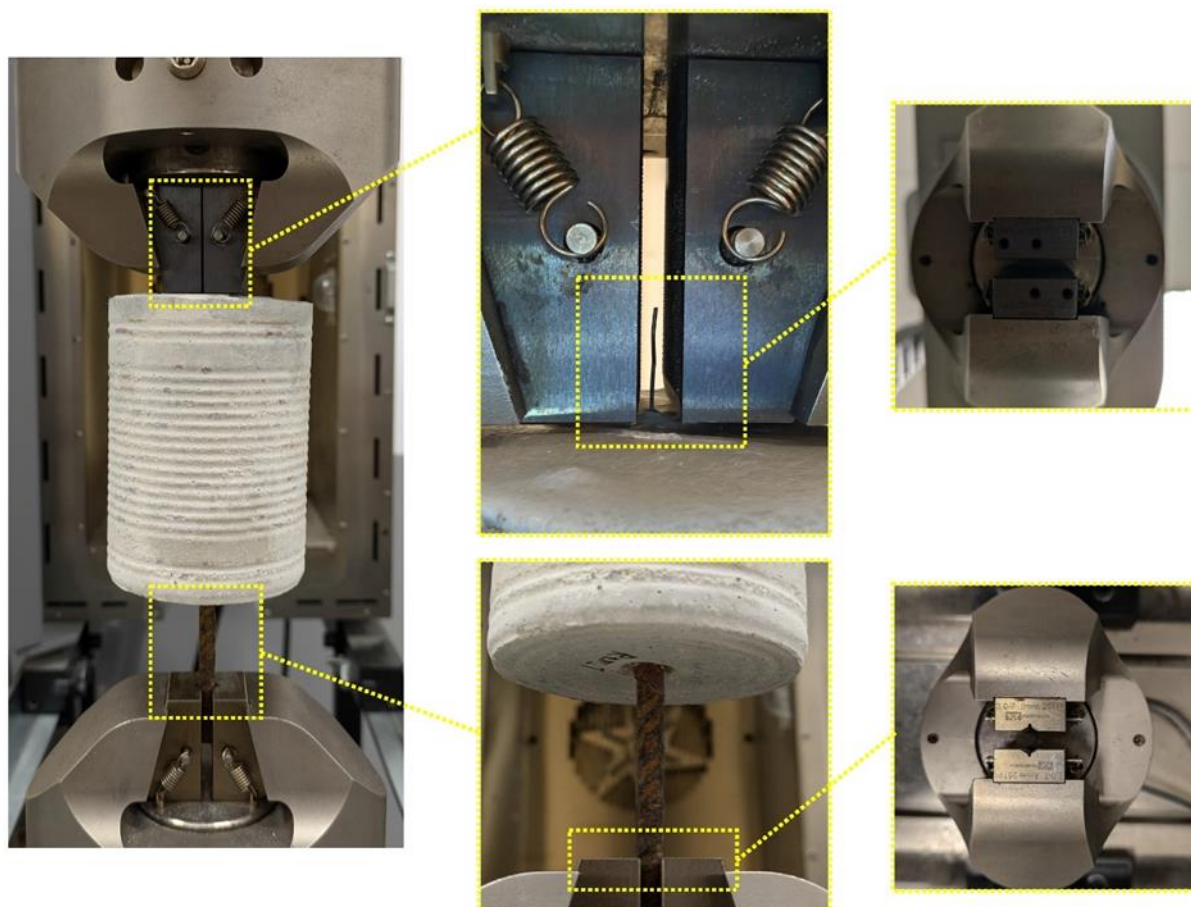
Badania właściwości termomechanicznych Fe-SMA były kluczowe w ocenie ich zdolności do generowania sił odzyskowych i wstępnego naprężania betonu (Rys. 1). Przeprowadzono testy na pojedynczych włóknach (wstępne odkształcenie $\sim 5 \pm 1 \%$) z zakończeniami haczykowymi, umocowanych w układzie umożliwiającym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



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

2.1.2 Test wyrywania włókien z betonu

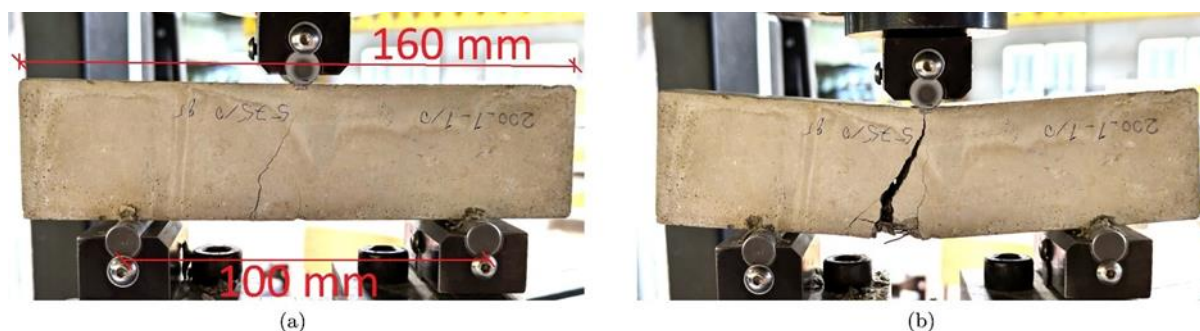
Zbadano charakterystykę połączenia włókna Fe-SMA z betonem w konfiguracji pojedynczego włókna osadzonego w cylindrze betonowym (Rys. 2). Zmiennymi były: geometria (włókna proste lub z haczykowymi zakończeniami), temperatura ekspozycji (20°C , 160°C , 200°C), rodzaj betonu (HPC-1 – z mączką wapienną,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



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

2.1.3 Badanie próbek betonowych na rozciąganie przy zginaniu

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



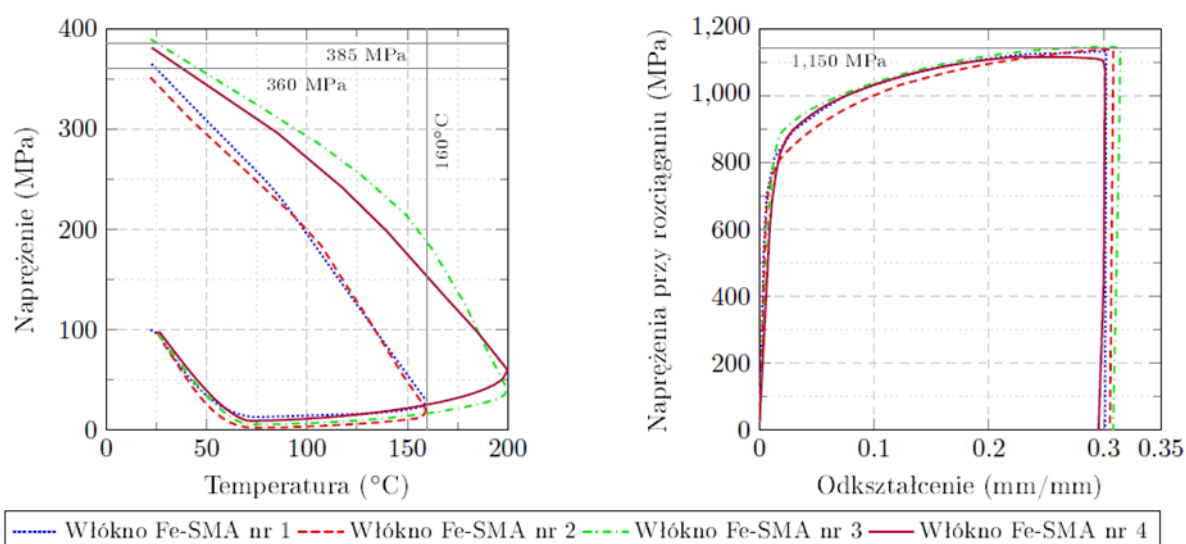
Rys. 3. Badanie zginania trójpunktowego próbek wzmocnionych włóknami Fe-SMA przy (a) maksymalnym naprężeniu oraz (b) zniszczeniu.

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

1.2 Metodologia badań eksperymentalnych

2.2.1 Termomechaniczne właściwości włókien Fe-SMA

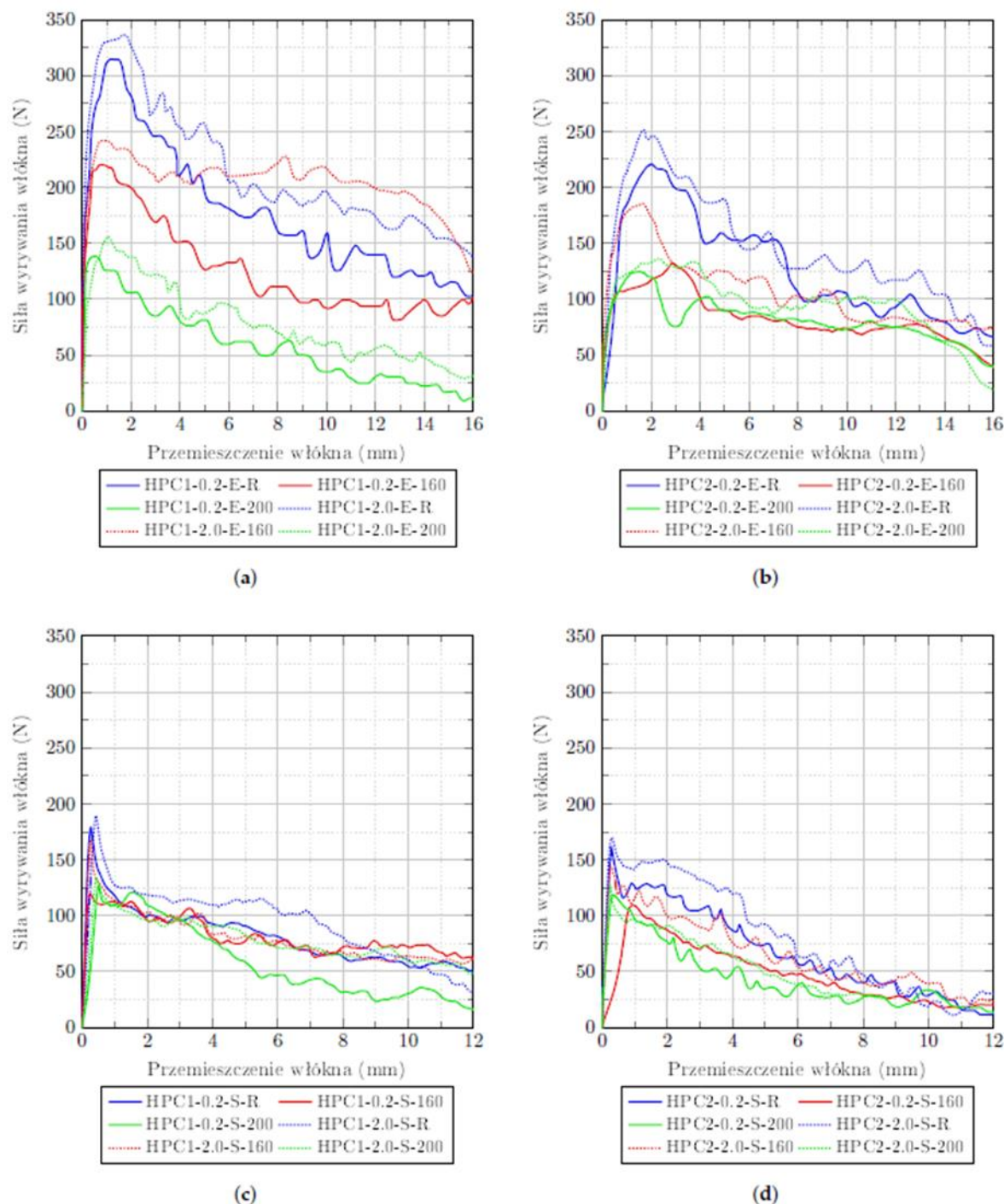
Włókna Fe-SMA wykazały wyraźny efekt pamięci kształtu: po ogrzewaniu do ~70 °C naprężenie spadało dokładnie zgodnie z rozszerzalnością cieplną, a następnie stopniowo wzrastało w miarę przemiany martenzyt→austenit (Rys. 4). Aktywacja do 200 °C generowała naprężenia odzyskowe rzędu ~385 MPa – około 25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



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

2.2.2 Wytrzymałość na wyrywanie

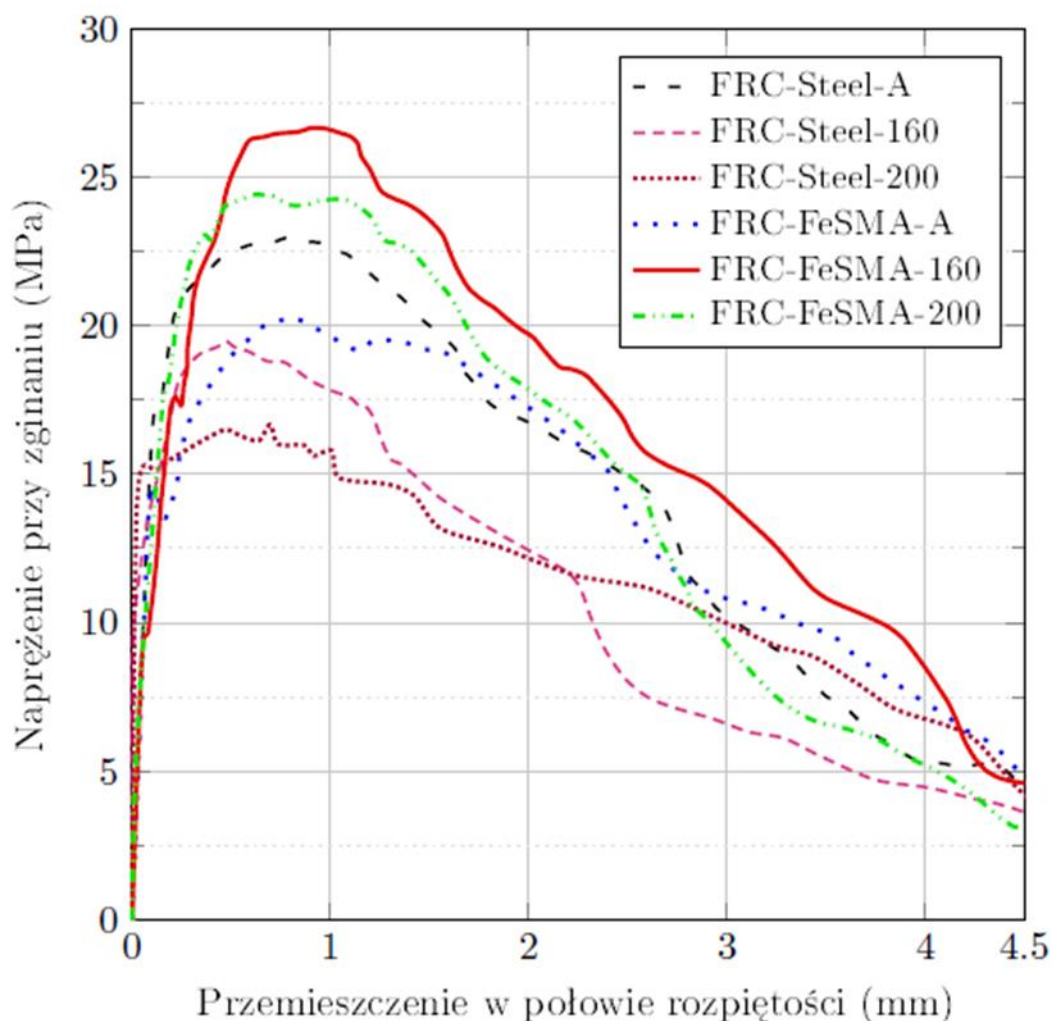
Analiza wyników wskazuje (Rys. 5), że największy wpływ na wytrzymałość połączenia miała geometria włókna (haczyk vs. proste) i rodzaj betonu. W HPC-1 włókna haczykowe osiągały >300 N, podczas gdy proste w HPC-2 ledwo przekraczały 170 N. Ekspozycja cieplna obniżała siły wyrywania (zwłaszcza przy 200 °C),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



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

2.2.3 Zachowanie betonu i wpływ temperatury aktywacji

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



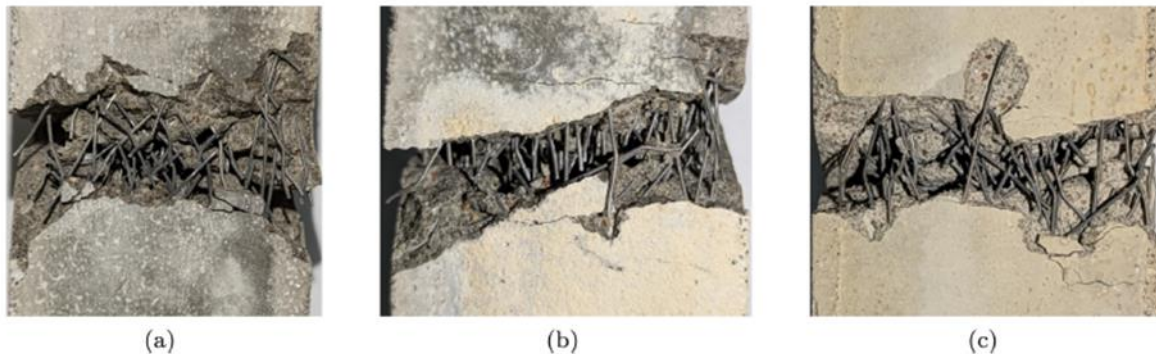
Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie próbek zawierających włókna Fe-SMA i stalowe poddanych różnym procedurom termicznemu.

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

2.2.4 Mechanizmy zniszczenia i rozwój rys

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

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



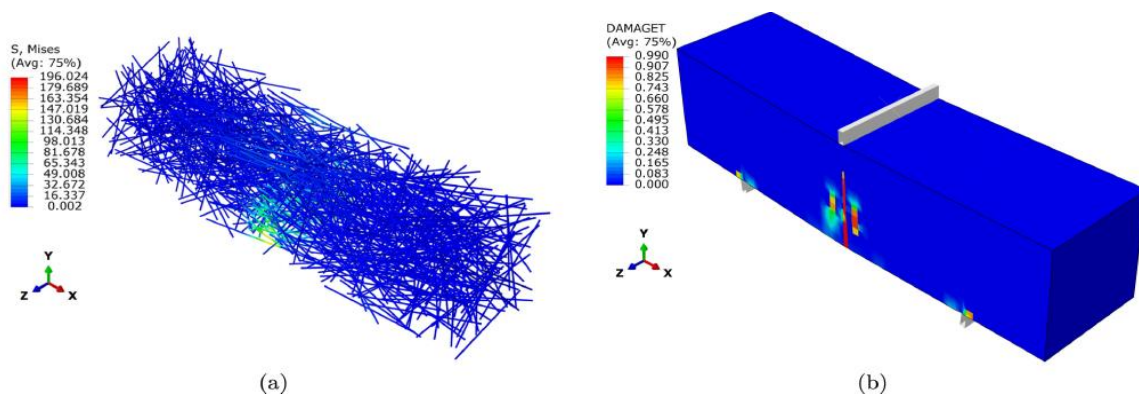
Rys. 7. Rysy w próbkach z włóknami Fe-SMA poddanych ekspozycji na: (a) temperaturę otoczenia (bez ogrzewania), (b) 160°C oraz (c) 200°C.

3. Modelowanie numeryczne

3.1 Generowanie losowo rozmieszczonych włókien

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

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



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

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

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

3.2 Modele materiałowe

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

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

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

3.3 Właściwości kontaktu matrycy betonowej i włókien Fe-SMA

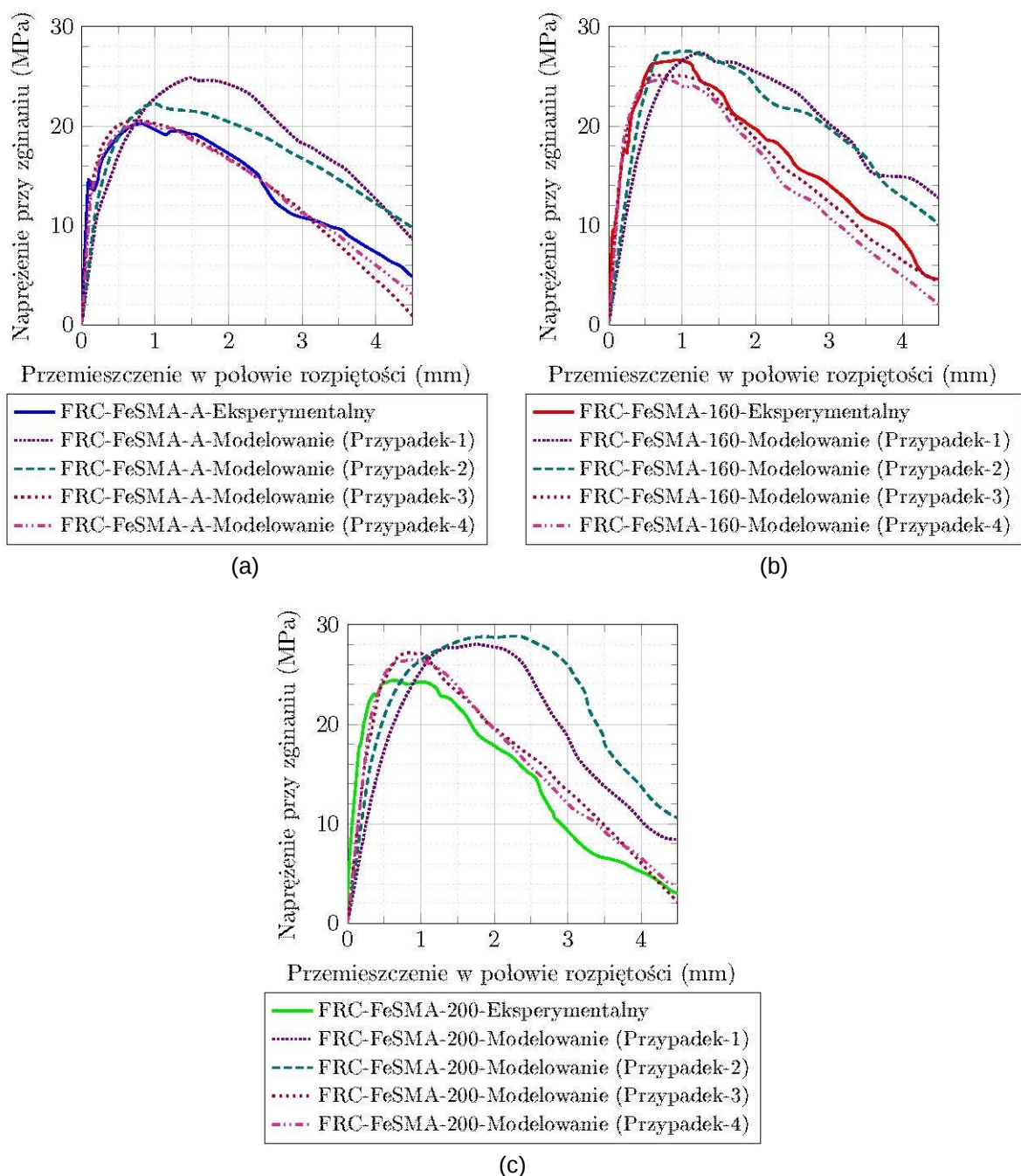
Model numeryczny odwzorowuje interakcję między matrycą betonową a włóknami Fe-SMA poprzez szczegółowy model typu traction–separation, obejmujący zarówno spójne wiązanie (cohesive bond), jak i tarcie. Zamiast uproszczonego rozwiązania typu „tie”, wprowadzono kalibrowany model wiązania odzwierciedlający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

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

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

3.4 Weryfikacja modelu i analiza wrażliwości siatki

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



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

4. Wnioski

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

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

W pracy wskazano następujące obszary wymagające dalszych badań:

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

Podziękowania

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

5. Literatura

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

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

mgr inż. Jędrzej Pawłowski

Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Tomasz Piotrowski prof. uczelni

Politechnika Warszawska

dr inż. Maja Kępnia

Politechnika Warszawska

dr inż. Bartosz Fikus

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Zbigniew Surma

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Robert Paszkowski

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Szymon Wojciechowski

Pekabex

Betony nowej generacji odporne na obciążenie balistyczne

New generation concrete resistant to ballistic loads

Streszczenie

Celem referatu jest przedstawienie podstawowych mechanizmów związanych ze zjawiskiem oddziaływania pocisków amunicji strzeleckiej, oceny odporności balistycznej betonów, a także prezentacja wyników badań eksperymentalnych. Wskazane zostały również potencjalne kierunki rozwoju w projektowaniu betonów, mogących znaleźć zastosowanie w sektorze obronnym oraz infrastrukturze krytycznej, w tym w energetyce jądrowej.

W referacie omówione zostały podstawowe zagadnienia z zakresu mechaniki uderzenia pocisku w powłokę żelbetową, z uwzględnieniem sposobu propagacji fali odkształceń oraz mechanizmów prowadzących do lokalnego pęknięcia i zniszczenia materiału. Opisane zostały kluczowe zjawiska destrukcyjne towarzyszące uderzeniom, takie jak *scabbing* (oderwanie fragmentów materiału od strony przeciwnej do uderzenia) oraz *spalling* (oderwanie fragmentów materiału od strony uderzenia). Wstępnie scharakteryzowana została odporność betonów na uderzenia pocisku o prędkości między 50 a 1000 m/s, o stosunkowo małej masie względem badanej próbki betonu. Przedstawiony został wpływ zbrojenia rozproszonego oraz wybranych parametrów mechanicznych betonu na jego odporność dynamiczną. Przytoczone zostały również wybrane wzory empiryczne służące do szacowania odporności betonów w funkcji parametrów pocisku i właściwości materiałowych.

Referat zawiera opis metodologii oraz wyniki pierwszego etapu badań dotyczących odporności betonów na uderzenia z prędkościami charakterystycznymi dla pocisków amunicji strzeleckiej. Poza standardową oceną właściwości mechanicznych materiału (m.in. wytrzymałości na ściskanie), przeprowadzone zostały wstępne testy odporności balistycznej przy użyciu pocisków pełnopłaszczowych o prędkości ok. 800 m/s w warunkach laboratoryjnych. Rejestracja przebiegu oddziaływania została przeprowadzona przy użyciu kamery do zdjęć szybkich, a po uderzeniu wykonano skany 3D próbek oraz przeanalizowano

lokalne efekty uderzenia pocisku, takie jak głębokość penetracji oraz średnica krateru. Uzyskane wyniki zostały zestawione z wybranymi modelami empirycznymi.

Rezultaty badań stanowią podstawę do przeprowadzenia szerszych analiz betonów nowej generacji, charakteryzujących się odpornością na obciążenia dynamiczne, oraz do zaplanowania kolejnych etapów badań w kierunku ich praktycznego zastosowania.

Abstract

The aim of the paper is to present the fundamental mechanisms related to the interaction between small-caliber ammunition projectiles and concrete targets, to assess the ballistic resistance of concrete, and to provide experimental findings. Potential development directions for the design of concretes intended for use in the defense sector and critical infrastructure, including nuclear energy facilities, are also indicated.

The paper discusses essential issues in the mechanics of projectile impact on reinforced concrete barriers, taking into account the propagation of deformation waves and the mechanisms leading to local cracking and material failure. Key destructive phenomena accompanying impacts—such as scabbing (detachment of material fragments on the rear side of the target) and spalling (detachment of material from the impact side) are described. The ballistic resistance of concrete subjected to projectile impacts at velocities between 50 and 1000 m/s was preliminarily characterized, with projectiles of relatively low mass compared to the concrete specimen. The influence of fiber reinforcement and selected mechanical properties of concrete on its dynamic resistance is also presented. In addition, selected empirical formulas used to estimate concrete resistance as a function of projectile parameters and material properties are cited.

The paper includes the methodology and results of the first stage of experimental studies concerning the resistance of concrete to projectile impacts at velocities characteristic of small-arms ammunition. In addition to standard testing of mechanical properties (e.g., compressive strength), initial ballistic resistance tests were performed using full metal jacket (FMJ) projectiles at approximately 800 m/s under laboratory conditions. The projectile impact event was recorded using a high-speed camera, and post-impact analyses included 3D scanning of the specimens and evaluation of local effects such as penetration depth and crater diameter. The obtained results were compared with selected empirical models.

The outcomes of the study provide a foundation for further analyses of next-generation concretes designed to resist dynamic loading, and for planning subsequent research stages aimed at practical applications.

1. Wprowadzenie

W związku z rosnącym w Europie i na świecie zagrożeniem terrorystycznym budynki powinny zapewniać bezpieczeństwo ze względu na oddziaływania wyjątkowe wywołane umyślnym działaniem człowieka. Odporność balistyczna przegród żelbetowych oraz odporność na działanie fali uderzeniowej wywołanej wybuchem są podstawowymi wymaganiami do zapewnienia bezpieczeństwa budynku poddanego działaniu broni konwencjonalnej lub narażonego na eksplozję

składowanego materiału np. paliw ciekłych, drobnych materiałów sypkich, materiałów wybuchowych.

Szczególnym zagadnieniem są osłony biologiczne reaktorów jądrowych, które muszą jednocześnie zapewniać bezpieczeństwo reaktora przed wszelkimi oddziaływaniami zewnętrznymi (jednym z rozważanych obciążeń jest uderzenie samolotu zgodnie z RCC-CW [1] oraz równocześnie bezpieczeństwo środowiska zewnętrznego przed szkodliwym promieniowaniem powstałym w wyniku reakcji jądrowej.

Obecnie obserwuje się zwiększenie inwestycji w sektorze wojskowym. Zgodnie z planami na 2025 rok Polska będzie liderem w Europie pod względem inwestycji w wojsko, wydatki przekroczą 200 mld zł z czego 0,15 proc. PKB zostanie przeznaczone na inwestycje w systemy ochrony ludności i obrony cywilnej, w tym w budowę schronów [2]. Inwestycja w pierwszą elektrownię jądrową w Polsce ma rozpocząć się w 2028 roku. [3] Zauważalny jest znaczny wzrost zapotrzebowania rynku Polskiego i Europejskiego na nowe technologie zapewniające bezpieczeństwo w warunkach zagrożenia militarnego i terrorystycznego. Bezpieczeństwo w sektorze jądrowym jest szczególnie ważne ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego regionu oraz bardzo poważne konsekwencje awarii reaktora. Obecnie ponad 20% energii w Europie pochodzi z energetyki jądrowej. [4]

2. Mechanika uderzenia pocisku

Uderzenie obiektu w konstrukcję jest zjawiskiem dynamicznym wywołującym dużą szybkość odkształceń w materiale. Szybkość odkształceń jest pochodną odkształcenia po czasie:

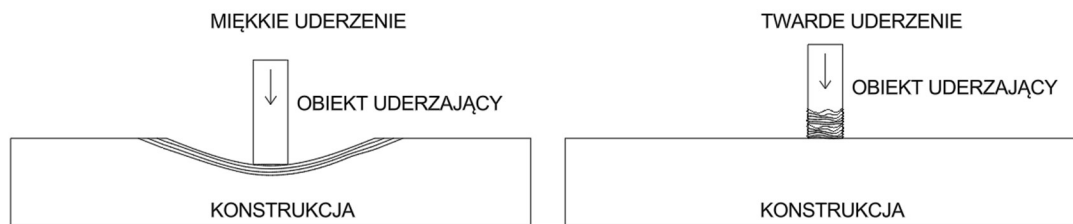
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

Obciążenia statyczne najczęściej spotykane w projektowaniu odpowiadają szybkości odkształceń 10^{-5} - 10^{-4} [s⁻¹] i wpływ przebiegu obciążenia w czasie jest pomijalny. W przypadku obciążeń uderzeniem mechanicznym prędkość odkształceń zawiera się w przedziale 10^1 - 10^4 [s⁻¹]. Większe prędkości odkształceń do 10^4 odpowiadają oddziaływaniom fali uderzeniowej wywołanej przez np. materiały wysokoenergetyczne. [5,6]

Oddziaływania uderzenia na konstrukcje zostały opisane w części 1-7 Eurokodu [7]. Eurokod w zakresie uderzenia skupia się na uderzeniach pojazdów mechanicznych (samochodów, pociągów i statków) w szczególności w obiekty infrastrukturalne. Proponowaną metodą obliczeniową jest wykorzystanie równoważnego statycznie obciążenia. Pozwala to na pominięcie dynamicznej analizy uderzenia pojazdu np. w podporę mostową.

Rozróżnione zostają tam dwa podstawowe rodzaje uderzenia:

- Miękkie uderzenie – energia uderzenia jest pochłaniana przez sprężysto-plastyczne deformacje elementów, gdzie równoważne obciążenie statyczne można wyznaczyć z uwzględnieniem zarówno wytrzymałości plastycznej, jak i zdolności do odkształcenia elementów.
- Twarde uderzenie – energia jest rozproszona głównie przez deformację oraz erozję penetratora.



Rysunek 1 Schemat miękkiego i twardego uderzenia w konstrukcję

W analizie uderzenia pocisków rozpatrywane jest miękkie uderzenie. Uwzględniana jest degradacja konstrukcji oraz lokalne efekty zniszczenia.

Zniszczenie materiału lokalnie powodowane jest przez kontakt z pociskiem. Zniszczenie materiału nie mającego bezpośredniego kontaktu z pociskiem powodowane jest przez mechaniczną falę odkształceń wewnątrz materiału.

Uderzenie pocisku generuje falę mechaniczną, która rozchodzi się sferycznie z prędkością fali sprężystej C , którą można obliczyć ze wzoru (2) dla trójwymiarowych ośrodków ciągłych, izotropowych i jednorodnych:

$$C = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Gdzie:

λ – pierwszy parametr Lamégo

μ – drugi parametr Lamégo (moduł ścinania, moduł Kirchhoffa)

ρ – gęstość materiału

W uproszczonych rozważaniach można wykorzystać wzór do obliczania prędkości w zagadnieniach jednowymiarowych (3).

$$C = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Gdzie:

E – moduł sprężystości materiału

ρ – gęstość materiału

2.1 Oddziaływanie pocisku

W analizie uderzenia rozpatruje się pociski odkształcalne oraz nieodkształcalne. Pociski odkształcalne, takie jak wykorzystano w badaniach, są wykonane z miękkim rdzeniem np. ołowiem, stosowane są powszechnie jako podstawowa amunicja strzelecka. Duże pociski odkształcalne wykonane z rur stalowych mogą być stosowane do symulacji uderzenia złożonych obiektów w konstrukcję np. uderzenia samolotu [8].

Pociski nieodkształcalne pozwalają na badanie odpowiedzi konstrukcji bez dokładnej analizy zachowania pocisku. Mogą być stosowane do izolowanych badań materiałowych tarcz oraz efektów działania pocisków przeciwpancernych.

Podstawowymi parametrami pocisków są:

- Prędkość - w badaniach stosowane są prędkości do ok. 100 m/s. Pociski amunicji do broni lufowej mogą osiągać prędkości do 1700 m/s.
- Masa pocisku – najczęściej stosowane są pociski o małej masie rzędu kilku - kilkunastu gramów.

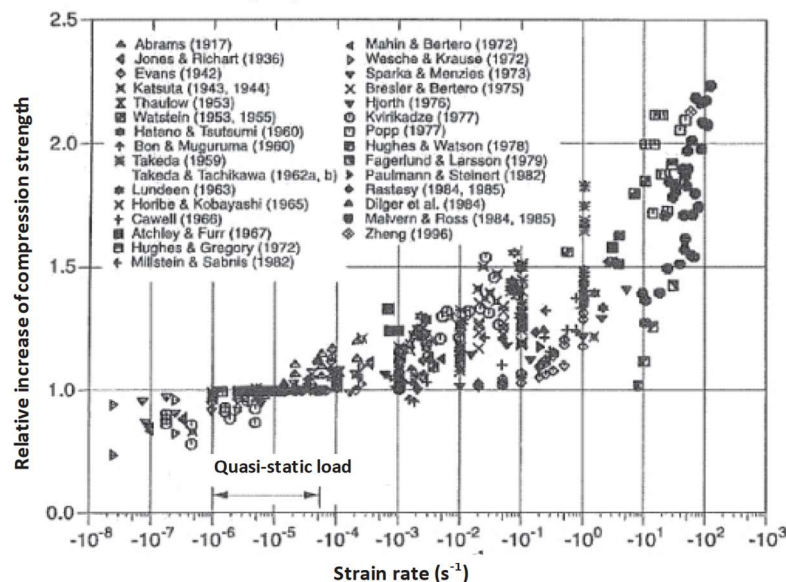
- Kształt pocisku – zależnie od kształtu pocisku inaczej wygląda strefa uplastycznienia materiału w pierwszej fazie kontaktu. Efekt kształtu nieodkształcalnego pocisku był badany przez Young'a [9] oraz Lee [10], badania penetracji pocisków w grunt wykazały że ostry wierzchołek pocisku powoduje przyrost głębokości penetracji do 36% względem wariantu płaskiego i półsferycznego. Badania przeprowadzone przez Barr'a [11] wykazały że płaskie zakończenie pocisku wymaga 30% większej energii do penetracji osłony względem penetratorów z wierzchołkiem półsferycznym.
- Średnica pocisku – głębokość penetracji jest bezpośrednio zależna od średnicy pocisku. Wraz ze spadkiem średnicy pocisku rośnie jego zdolność do penetracji przy tej samej energii kinetycznej, co bezpośrednio wynika ze wzrostu energetycznego obciążenia przekroju obiektu oddziaływania.

2.2 Efekty uderzenia pocisku

Podstawowymi parametrami powłoki żelbetowej które wpływają na odporność na balistyczne oddziaływania są:

- Wytrzymałość na ściskanie betonu. Wraz z pierwiastkiem wytrzymałości betonu na ściskanie wzrasta jego odporność balistyczna.
- Obecność włókien. Dodatek włókien może wpływać pozytywnie na odporność betonu na uderzenie i występowanie różnych efektów oddziaływań.
- Grubość tarczy. Wraz z grubością tarczy wrasta jej odporność na lokalne efekty oddziaływań oraz wzrasta stateczność ustroju.

Dynamiczna praca betonu powoduje zwiększenie jego wytrzymałości. Wytrzymałość na ściskanie wzrasta ok. 2-krotnie, a wytrzymałość na rozciąganie może wzrastać nawet 8 krotnie. [12]



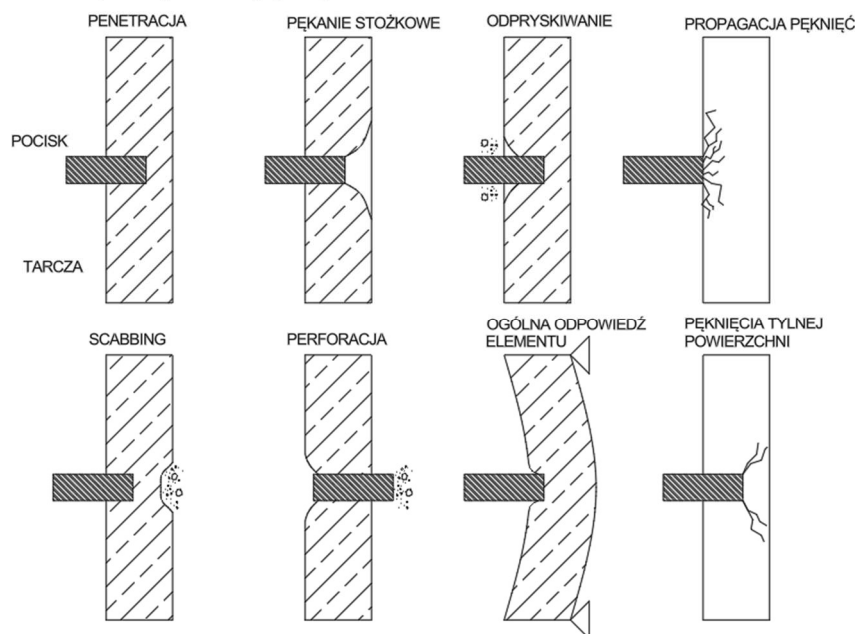
Rysunek 2 Wpływ szybkości odkształcenia na względną wytrzymałość betonu na ściskanie

Uderzenie pocisku zależnie od grubości i wytrzymałości powłoki może wywoływać różne efekty [13,14,15,16]:

- Penetracja to proces, w którym pocisk zagłębia się w tarczę (płyte), nie przebijając jej całkowicie i nie powodując odprysków tylnej strony. Opisywana

jest za pomocą głębokości penetracji (x), która stanowi jeden z najczęstszych wskaźników skuteczności betonu.

- Pękanie stożkowe (ang. cone cracking) to zjawisko, w którym naprężenia ścinające wywołane uderzeniem powodują oderwanie fragmentu w kształcie stożka. Jest to efekt typowy dla materiałów kruchych (np. betonu czy ceramiki).
- Pękanie radialne (ang. radial cracking) to zjawisko powstawania radialnych pęknięć materiału, co jest również typowym wariantem niszczenia materiałów kruchych. Przyczyną powstawania tego typu uszkodzeń jest przekroczenie krytycznej wartości naprężeń rozciągających.
- Odpryskiwanie (ang. spalling) to zjawisko polegające na odrywaniu się fragmentów betonu od strony uderzenia. Pęknięcia promieniowe i ukośne mogą występować po obu stronach przekroju.
- Scabbing to gwałtowne oderwanie masy materiału z tylnej powierzchni.
- Perforacja to całkowite przejście pocisku przez płytę.
- Odpowiedź ogólna celu (tarczy) obejmuje sprężyste odkształcenie tarczy oraz jej konstrukcji wsporczej [17].



Rysunek 3 Efekty oddziaływania pocisku na tarczę

3. Odporność balistyczna betonów

Odporność balistyczną betonów można szacować na podstawie podstawowych cech betonu zbadanych dla obciążania statycznego. Najczęściej wykorzystywanym parametrem do oceny odporności balistycznej jest wytrzymałość betonu na ściskanie. Głębokość penetracji dla betonów zwykłych jest w przybliżeniu proporcjonalna do odwrotności pierwiastka z wytrzymałości betonu na ściskanie. Reira [18] i Hughes [19] w swoich badaniach stwierdzają że parametrem lepiej opisującym to zjawisko jest wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Betony wysokowytrzymałościowe (HSC) osiągające wytrzymałość na ściskanie ok. 100MPa zapewnia najbardziej ekonomiczne ich wykorzystanie. Dalszy wzrost

wytrzymałości nie powoduje tak znacznych przyrostów odporności [20]. Użycie HSC powoduje poza wzrostem wytrzymałości redukcję plastyczności betonu. Wykorzystanie włókien podnosi plastyczność, co zapewnia zwiększenie ochrony przed scabbingiem [21], który jest zjawiskiem równie groźnym jak perforacja osłon.

Wykorzystanie zbrojenia rozproszonego ogranicza propagację pęknięć oraz lokalną strefę oddziaływania uderzenia.[22] Wykorzystanie włókien stalowych zmniejsza propagację pęknięć i wymiar krateru ale nie przekłada się znacznie na redukcję głębokości penetracji betonu [23]. Badania Zhang'a [24] prezentują, że nawet mała ilość włókien redukuje propagację pęknięć jeżeli włókna są zdolne do ich mostkowania oraz utrzymania zwartej struktury betonu. Ram-akrishamn [25] w swoich badaniach odnotował, że wykorzystanie włókien o haczykowatych końcach zapewnia nawet 5. krotny wzrost odporności dla uderzeń o niskiej prędkości względem betonu zwykłego. Williamson [26] badając odporność na oddziaływania fali uderzeniowej odnotował, że zastosowanie włókien redukuje fragmentację o 20% oraz prędkość odłamków do 80%.

4. Metody obliczania odporności betonów na uderzenie pocisku

Dostępnych jest wiele metod szacowania głębokości penetracji. Posiadają one wiele cech wspólnych. Większość z nich uzależnia stosunek głębokości penetracji do średnicy pocisku od prędkości pocisku, masy pocisku i wytrzymałości betonu na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie określana jest na standardowych próbkach walcowych [27].

Zmodyfikowany wzór Petry'ego [14]:

$$\frac{x}{d} = K \left(\frac{M}{d^3} \right) \log_{10} \left(1 + \frac{V^2}{19,974} \right) \quad (4)$$

$K = 6.36 \cdot 10^{-4}$ dla betonów niezbrojonych, $K = 3.39 \cdot 10^{-4}$ dla normlanego zbrojenia, $K = 2.26 \cdot 10^{-4}$ dla specjalnego zbrojenia betonu

Modyfikowane równanie Laboratorium Badań Balistyki (The modified Ballistic Research Laboratory BRL formula) [14]

$$\frac{x}{d} = \frac{1.33 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{M}{d^3} \right) d^{0.2} V^{1.33} \quad (5)$$

Równanie inżynierskiego korpusu armii USA (The U.S. Army Corps of Engineers) (ACE) formula [14]

Równanie jest stosowane dla betonów o wytrzymałości na ściskanie poniżej 50MPa oraz prędkości pocisku poniżej 200m/s. [27]

$$\frac{x}{d} = 3.5 \cdot 10^{-4} \frac{MV^{1.5}}{\sqrt{f_c} d^{2.785}} + 0.5 \quad (6)$$

Modyfikowane równanie Narodowego Komitetu Badań Obronnych (The modified formula of the National Defense Research Committee) (NDRC) [14]

Równanie zostało opracowane dla małych średnic oraz lekkich pocisków o prędkości od 152 do 500m/s.[27]

$$G \left(\frac{x}{d} \right) = 3.8 \cdot 10^{-5} \frac{NM}{\sqrt{f_c} d} \left(\frac{V}{d} \right)^{1.8} \quad (7)$$

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2\sqrt{G} & \text{for } \frac{x}{d} \leq 2.0 \\ 1 + G & \text{for } \frac{x}{d} > 2.0 \end{cases} \quad (8)$$

Gdzie:

- x głębokość penetracji (m)
 d średnica pocisku (m)
 M masa pocisku (kg)
 f_c wytrzymałość betonu na ściskanie (MPa)
 N współczynnik kształtu pocisku
 V prędkość pocisku (m/s).

5. Opis przeprowadzonych badań

5.1 Metodologia badawcza

Badanie wytrzymałości betonu pod obciążeniem dynamicznym bada się za pomocą układu dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB). Badania przeprowadza się na próbkach walcowych dostosowanych do średnicy prętów (wymuszającego oraz odbiorczego). Do badań betonu wystarczające są próbki o średnicy 40 mm oraz długości 40 mm. W przypadku zastosowania kruszyw frakcji powyżej 16 mm zasadne może być wykorzystanie próbek o większej średnicy i dostosowanej do nich aparatury. Badania odporności balistycznej betonu nie są unormowane. Metody badawcze bazują na wykorzystaniu energii kinetycznej obiektu o różnym kształcie, masie, strukturze i prędkości.

Test swobodnego spadku młota oraz test swobodnego spadku kuli stalowej pozwala na osiągnięcie szybkości odkształceń na poziomie 10^0 - 10^1 s⁻¹ [28,29]. Test uderzenia pocisku z wykorzystaniem działa gazowego lub broni konwencjonalnej pozwalają otrzymać prędkości odkształceń dochodzące do 10^4 s⁻¹. Analiza wyników badań różni się w zależności od wybranej metody badawczej ale kluczowymi wynikami pozwalającymi na określenie odporności betonów są głębokość penetracji, średnica stożka odłamu, objętość powstałego krateru czy wystąpienie zjawisk towarzyszących np. scabbing.

Przeprowadzone badania stanowiły podstawę do weryfikacji metody badawczej i przygotowania stanowisk roboczych. Stanowią one badania wstępne do prowadzonych badań odporności balistycznej betonów ciężkich i zbrojenia rozproszonego włóknami różnego rodzaju.

Betony badano po 35 dniach. Przygotowano 2 składy betonów w celu kalibracji stanowisk badawczych. Przeprowadzono badanie modułu sprężystości na próbkach walcowych 150x300 mm, badanie wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską na próbkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm.

Tabela 1 Tabela składów przygotowanych mieszanek betonowych

SKŁAD [kg/m ³]	S_0_1	S_0_2
CEMENT	380	375

WODA	152	169
KRUSZYWO DROBNE 0-2	750	696
KRUSZYWO FRAKCJI 8-16	1345	1186
KRUSZYWO FRAKCJI 2-8	538	715
W/C [bezwymiarowe]	0.40	0.45

5.2 Badania odporności balistycznej

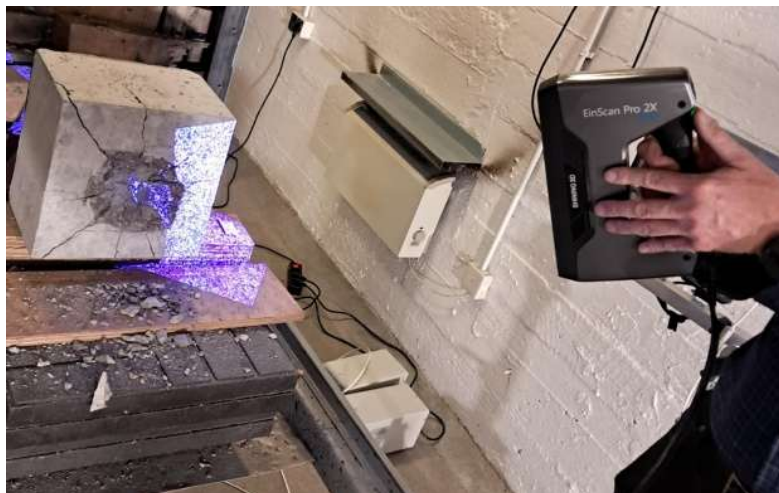
Przygotowano próbki niezbrojone o wymiarach 200x200x120 mm. Próbki umieszczono w osłonie zapobiegającej rozprzestrzenianiu się odłamków i zamocowano podpierając tylną powierzchnię kozłem oporowym z kątowników. Od przodu zabezpieczono próbkę blachą mocującą z oknem przelotowym. Mocowanie próbki uniemożliwiło jej swobodne przemieszczenie pod wpływem uderzenia pocisku. Badanie przeprowadzono w Laboratorium Artylerii i Balistyki Wojskowej Akademii Technicznej.

Próbki betonowe zostały poddane obciążeniu pełnopłaszczowym pociskiem amunicji 7,62x51 mm z rdzeniem ołowianym o masie ok. 9,45 g.



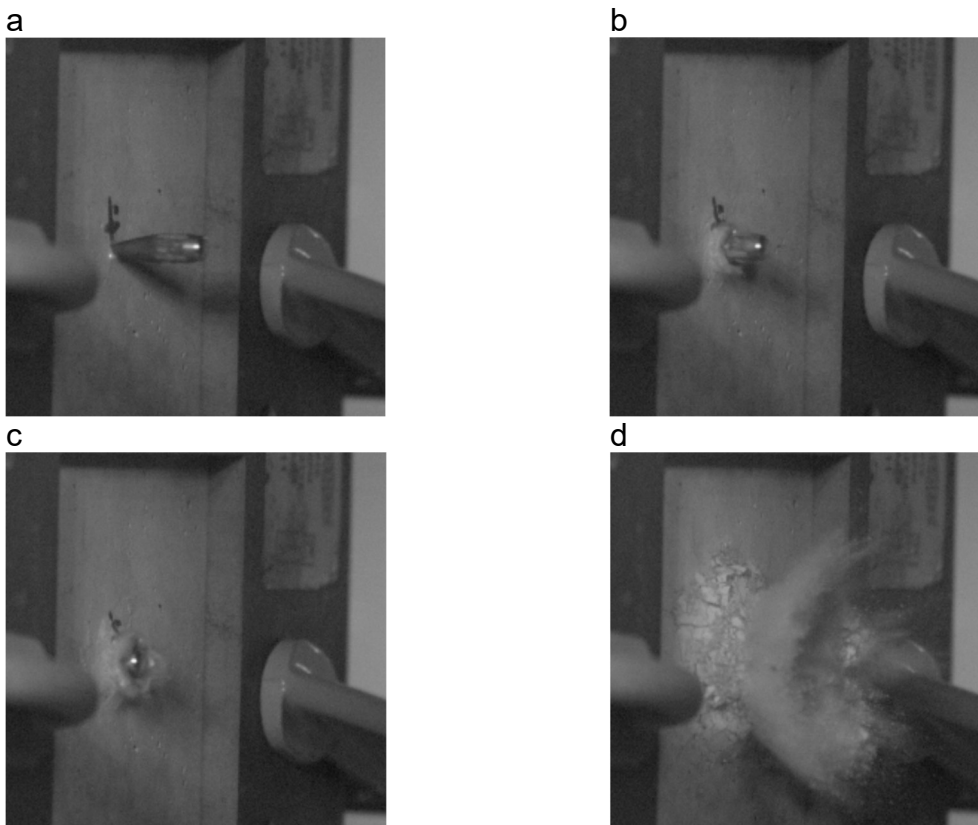
Fotografia 1 Próbka w osłonie balistycznej

Przebieg uderzenia był rejestrowany przez dwie kamery szybkie rejestrujące obraz z szybkością 200 000 kl./s. Próbki po strzale skanowano z wykorzystaniem skanera EinScan Pro 2X Plus w celu otrzymania modelu 3D krateru.



Fotografia 2 Wykonywanie skanu 3D próbki z wykorzystaniem skanera EinScan Pro 2X Plus

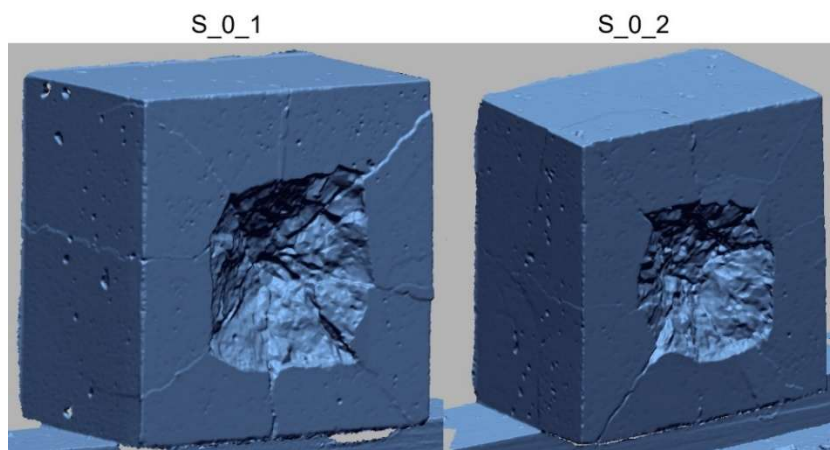
6. Wyniki badań



Fotografia 3 Przykładowe kadry zarejestrowane podczas uderzenia pocisku w próbkę wykonaną z materiału S_0_1 (a – 0 μ s; b – 14 μ s; c – 21 μ s; d – 140 μ s)

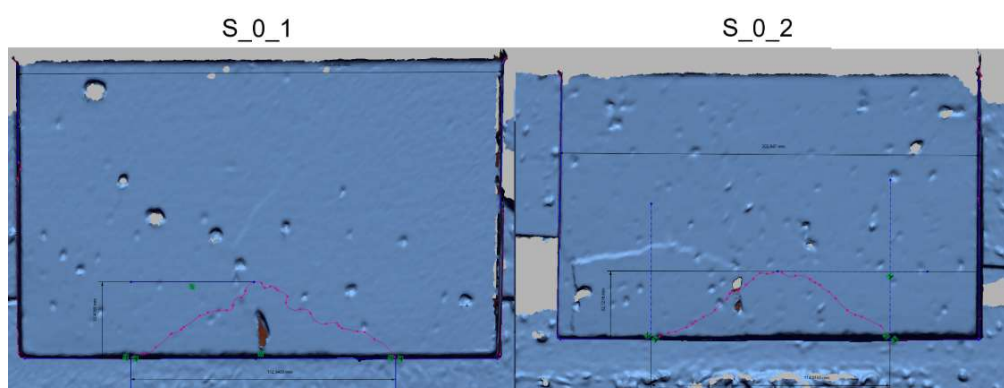
Moment uderzenia i wbicia pocisku w próbkę jest dobrze widoczny, późniejszy rozwój stożka odłamu jest niewidoczny przez dużą liczbę odłamków i pyłu powstałego w

wyniku uderzenia. Pomiarów dokonano z wykorzystaniem analizy modeli 3D. Na rys. 4 przedstawiono skany 3D próbek S_0_1 oraz S_0_2.



Rysunek 4 Skany 3D badanych próbek

Na podstawie skanów 3D pomierzono głębokość penetracji pocisków.



Rysunek 5 Przekroje w miejscu wystąpienia największej głębokości penetracji wraz z widokiem na powierzchnię próbki

W tabeli [2] zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych oraz balistycznych.

Tabela 2 Wyniki badań

Badana właściwość	S_0_1	S_0_2
Wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa]	47.65	52.67
Wytrzymałość betonu na rozciąganie [MPa]	4.72	4.34
Moduł sprężystości [GPa]	47	42
Gęstość [kg/m ³]	2422	2383
Masa pocisku [g]	9,45	9,45
Prędkość pocisku [m/s]	830	830
Energia kinetyczna [kJ]	3.25	3.25
Głębokość penetracji [mm]	32.4	32.7
Średnica stożka wyłamu [mm]	112.3	114.9

Porównanie wyników badań głębokości penetracji z obliczeniami wybranymi metodami zestawiono w tabeli [3].

Tabela 3 Porównanie wyników badań i obliczeń głębokości penetracji, x [mm]

Metoda	S_0_1 [mm]	Różnica względem eksperymentu [%]	S_0_2 [mm]	Różnica względem eksperymentu [%]
eksperyment	32.4	0	32.7	0
Petry	556.6	1618	556.6	1602
Ballistic Research Laboratory	105.1	224	99.9	206
ACE	84.0	159	80.0	145
Whiffen	112.8	248	105.9	224
NDRC	87.6	170	83.6	156
Ammann and Whitney	110.9	242	105.5	222
IRS	4.0	-88	3.9	-88
Haldare and Hamieh formula	103.4	219	94.3	188
UKAEA	87.2	169	83.2	155

6.1 Wnioski

Wytrzymałości na ściskanie betonów S_0_1 oraz S_0_2 różniły się o ok. 9.5%. Głębokość penetracji w uproszczeniu jest zależna od pierwiastka wytrzymałości na ściskanie. Różnica pierwiastków wytrzymałości wynosiła ok. 5% co przekłada się na bardzo zbliżone głębokości penetracji. Duże różnice między eksperymentem oraz wybranymi metodami wynikają z ograniczonego zakresu stosowalności metod pomiarowych oraz plastycznego odkształcenia pocisku, które pochłonęło dużą część energii uderzenia.

Oględziny stożka wyłomu (krateru) wykazały że przyjęty rozmiar próbki oraz okna blachy mocującej, dla występujących podczas badań energii pocisku, blokują wzrost stożka.



Fotografia 4 Wpływ mocowania próbki na kształt stożka wyłomu. Wskazane proste krawędzie wynikają z zablokowania tworzenia się krateru przez blachę mocującą

Przeprowadzone badania wstępne stanowią podstawę do przeprowadzenia badań nad wpływem zastosowania zbrojenia rozproszonego na odporność balistyczną betonów. Analizie należy również poddać betony ciężkie. Uproszczone obliczenia nie odnoszą się do gęstości betonu, a wzrost gęstości i związana z nim zmiana prędkości rozchodzenia się fali mechanicznej oraz dyssypacji energii może w znaczny sposób wpłynąć na zachowania betonu poddanego obciążeniom balistycznym. Uproszczone metody nie uwzględniają wytrzymałości na rozciąganie (szczególnie rozciąganie przy rozłupywaniu), modułu sprężystości elementu oraz współczynnika Poissona. Wymagane są dodatkowe badania sprawdzające wpływ tych parametrów na odporność balistyczną betonów. Ze względu na niedostosowanie wzorów uproszczonych do prędkości pocisków powyżej 800 m/s oraz odkształcalności pocisków wymagane są dodatkowe badania analizujące prędkość i rodzaj pocisku amunicji strzeleckiej.

7. Podziękowania

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 22-047/2025/WAT oraz grantu badawczego 2025 r. wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport pt. „Nowej generacji betony osłonowe z uwagi na oddziaływania balistyczne”.

8. Literatura

- 1 RCC-CW 2015 Edition French Association for Design, Construction, and In Service Inspection Rules for Nuclear Island Components
- 2 <https://www.money.pl/gospodarka/rekordowe-inwestycje-w-armie-polska-zostanie-liderem-nato-7127327470242592a.html>
- 3 <https://fakty.tvn24.pl/zobacz-fakty/rzad-stawia-kolejne-kroki-na-drozdze-do-budowy-elektrowni-atomowej-jestesmy-mocno-spoznieni-st8282125>
- 4 <https://www.consilium.europa.eu/pl/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>
- 5 Solomon Abebe, Tesfaye Alemu Mohammed Review Article Structures under Synergetic Effects of Combined Blast and Impact Loads: A State-of-the-Art Review Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2022, Article ID 6934078, 30 pages
- 6 John L. Provis M&S Highlight: Bischoff and Perry (1991), Compressive behaviour of concrete at high strain rates Materials and Structures (2022) 55:70
- 7 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje Część 1-7: Oddziaływania ogólne Oddziaływania wyjątkowe
- 8 Arja Saarenheimo, Kim Calonius and Markku Tuomala BENDING AND PUNCHING STUDIES ON IMPACT LOADED PLATE Transactions, SMiRT-23 Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015
- 9 Young CW. Depth prediction for earth-penetrating projectiles. J Soil Mech Found Division 1969;95(3):803–17
- 10 Lee S, et al. Strain behavior of concrete panels subjected to different nose shapes of projectile impact. Materials 2018;11(3):409
- 11 Barr P. Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. UKAEA Safety and Reliability Directorate; 1987

- 12 Safety Reports Series No. 87 Safety Aspects of Nuclear Power Plants in Human Induced External Events: Assessment of Structures INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2018 (5-7, 48-55)
- 13 Corbett GG, Reid SR, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *Int J Impact Eng* 1996;18:141e230
- 14 Li QM, Reid SR, Wen HM, Telford AR. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng* 2005;32:224e84
- 15 R. P. Kennedy, A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engng and Design*, Vol. 37, 183-203 (1976).
- 16 Mohamed Abdel-Kader, Ahmed Fouda Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles
- 17 A. Rama Chandra Murthy*, G.S. Palani, and Nagesh R. Iyer Impact Analysis of Concrete Structural Components (Review Paper) *Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 3, May 2010, pp. 307-319
- 18 Riera JD. Penetration, scabbing and perforation of concrete structure hit by solid missile. *Nucl Eng Des* 1989;115:121e31
- 19 Hughes G. Hard missile impact on reinforced concrete. *Nucl Eng Des* 1984;77(1):23e35
- 20 M.H. Zhang, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact *Int J Impact Eng*, 31 (7) (2005), pp. 825-841
- 21 S. M. Uzumeri R. Basset, Behavior of high strength concrete members. *Utilization of High Strength Concrete*. Tapir Publishers, 237 – 248 (1987).
- 22 Malvern LE, Jenkins DA, Tang T, Ross CA. Dynamic compressive testing of concrete. *Proceedings of Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*. Florida: U.S. Dept. of Defense, 1985. p. 194–9.
- 23 Jonas, W., et al., Experimental investigations to determine the kinetic ultimate bearing capacity of reinforced concrete slabs subject to deformable missiles. 1979.
- 24 Zhang MH, Sharif MSH, Lu G. Impact resistance of high-strength fiber-reinforced concrete. *Mag Concr Res* 2007;59(3):199e210.
- 25 Ramakrishnan V, Coyle WV, Fowler LJ, Schrader EK. A comparative evaluation of fiber shotcretes. Report SDSM&T-CBS 7902. USA: Civil Engineering Department, South Dakota School of Mines and Technology; 1979.
- 26 Williamson, G. R. Use of fibrous concrete in structures exposed to explosive hazards. Cincinnati: U.S. Corps of Engineers, Ohio River Division Laboratories: 1965.
- 27 Tarek H. Almusallam, Nadeem A. Siddiqui, Rizwan A. Iqbal, Husain Abbas Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact *International Journal of Impact Engineering* 58 (2013) 17e30
- 28 P. B. Murnal, R. N. Chatorikar IMPACT RESISTANCE OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology* eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308
- 29 Doo-Yeol Yooa,*, Nemkumar Banthia Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review *Cement and Concrete Composites* 104 (2019) 103389

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr inż. Mateusz Techman

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

inż. Paweł Koszyk

Laboratorium Budowlano-Drogowe Betotest Polska sp. z o.o.

dr inż. Karol Federowicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr inż. Szymon Skibicki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

inż. Aleksandra Ludwiczak-Sarżała

Laboratorium Budowlano-Drogowe Betotest Polska sp. z o.o.

Zastosowanie metod niszczących (pull-off, pull-out) oraz nieniszczących do oceny jakości konstrukcji betonowych wykonanych w technologii druku 3D

Application of destructive (pull-off, pull-out) and non-destructive methods for assessing the quality of concrete structures fabricated using 3D printing technology

Streszczenie

Druk 3D z użyciem kompozytów cementowych jest jedną z najbardziej innowacyjnych technologii w budownictwie, której rozwój wiąże się z nowymi wyzwaniami badawczymi i potrzebą nowatorskich rozwiązań. Kluczowe problemy to precyzyjna ocena jakości powierzchni drukowanych konstrukcji oraz redukcja śladu węglowego stosowanego materiału (kompozytu cementowego). W odpowiedzi na potrzeby zrównoważonego rozwoju popularność zyskuje stosowanie materiałów odpadowych i recyklingowych, zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

W artykule przedstawiono sposoby oceny jakości elementów drukowanych z zastosowaniem m.in. metod optycznych (technologii LIDAR) oraz georadaru. Wykorzystano również metody normowe do oceny parametrów mechanicznych wydrukowanych elementów (pull-off i pull-out). Badania przeprowadzono zarówno na mieszance referencyjnej, jak i na kompozytach o obniżonym śladzie węglowym modyfikowanych betonowym kruszywem oraz pyłem recyklingowym.

Metody optyczne umożliwiły porównanie rzeczywistych wymiarów drukowanych konstrukcji z ich komputerowymi modelami, a także analizę zmian geometrii warstw. Wykonano badania przyczepności tynków do powierzchni drukowanych, co pozwoliło na ocenę wpływu zastosowania kruszyw recyklingowych na zewnętrzną strukturę. Wyniki wskazują, że mieszanki z kruszywem recyklingowym, przy odpowiednim projektowaniu, zapewniają parametry przyczepności tynków porównywalne z mieszankami referencyjnymi, niezależnie od rodzaju wykończenia.

Przeprowadzone badanie pull-out wykazało, że oceniona w ten sposób siła wrywająca oraz mechanizm zniszczenia, są zbliżone we wszystkich badanych kompozytach. Badania potwierdziły duży potencjał wykorzystania materiałów

recyklingowych w technologii druku 3D w budownictwie komunalnym, wpisując się w ideę zrównoważonego rozwoju.

Abstract

3D printing with cement composites is one of the most innovative technologies in construction, involving new research challenges and the need for modern solutions. Key issues include precise assessment of the surface quality of printed structures and reducing the carbon footprint of the material (cement-based composite) used. In response to the needs of sustainable development, the popularity of using waste and recyclable materials, in accordance with the principles of a circular economy, is growing.

The article presents methods for assessing the quality of printed elements using optical methods (LiDAR) and ground-penetrating radar. Standard methods were also used to evaluate the mechanical parameters of printed elements (pull-off and pull-out). Studies were conducted on both a reference mixture and composites with a reduced carbon footprint modified with recycled concrete aggregate and powder.

Optical methods allowed for comparing the actual dimensions of printed structures with their computer models, as well as analyzing changes in layer geometry. Adhesion tests of plasters to printed surfaces were conducted, allowing for the evaluation of the impact of using recycled aggregates on the external structure. The results indicate that mixes with recycled aggregate, with proper design, provide plaster adhesion parameters comparable to reference mixes, regardless of the type of finish.

The conducted pull-out test showed that the evaluated pull-off force and the mechanism of destruction are similar in all tested composites. Results of the study indicate high potential for the use of recycled materials in 3D printing technology in municipal construction, aligning with the idea of sustainable development.

1. Wstęp

Druk 3D, zwany również wytwarzaniem przyrostowym (ang. *additive manufacturing*), jest jedną z najdynamiczniej rozwijających się technologii w budownictwie. Pozwala ona na wykonywanie elementów i konstrukcji bez wykorzystania szalunków tradycyjnych, co może przyczynić się do znacznej redukcji czasu realizacji i kosztów [1].

Technologia druku 3D w budownictwie ma również znaczny potencjał środowiskowy, zwłaszcza w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednym z obiecujących kierunków jej rozwoju jest zastosowanie w mieszankach do druku 3D kruszyw recyklingowych np. gruzu budowlanego. Ze względu na konieczność precyzyjnej depozycji materiału poprzez dysze o stosunkowo niewielkich przekrojach oraz potrzebę zapewnienia odpowiednich parametrów mieszanki w stanie niestwardniałym, rozmiar ziaren kruszywa stosowanego w technologii druku 3D jest ograniczony. Typowo w mieszankach stosuje się kruszywo o maksymalnym rozmiarze ziarna wynoszącym 2 mm lub 4 mm. Frakcje tej wielkości w kruszywach recyklingowych powstałych m.in. z gruzu budowlanego, zazwyczaj nie są wykorzystywane w budownictwie. Dzięki możliwości precyzyjnego dozowania materiału i warunkom sprzyjającym stabilizacji drobnych frakcji w drukowanej warstwie, wytwarzanie przyrostowe umożliwia zagospodarowanie materiałów odpadowych w sposób efektywny i technologicznie bezpieczny. To czyni tę

technologię szczególnie atrakcyjną z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju i ograniczenia śladu węglowego sektora budowlanego [2].

Mimo wyraźnych korzyści, technologia ta nadal musi sprostać wielu wyzwaniom, które ograniczają jej wdrożenie na skalę przemysłową. Jednym z problemów jest brak standaryzacji metod badawczych i projektowych, co powoduje trudności w ocenie właściwości fizycznych, mechanicznych i trwałościowych elementów wytwarzanych w technologii druku 3D betonem (3DPC) [3].

Brak deskowania tradycyjnego oraz wytwarzanie warstwa po warstwie powoduje, że boki wytworzonych elementów i konstrukcji cechują się charakterystyczną, pofalowaną fakturą. Końcowy wygląd zależy od właściwości mieszanki i jej składu, rodzaju dyszy, precyzji pozycjonowania urządzenia czy nawet wymuszonych przerw technologicznych. Powoduje to problem z zastosowaniem typowych metod nieniszczących do oceny właściwości konstrukcji. Dodatkowo, często stosowana metoda wytwarzania elementów ściennych z wykratowaniem wewnętrznym sprawia, że pobranie odpowiednich próbek do badań wytrzymałościowych jest właściwie niemożliwe, a niektóre, typowo stosowane metody, prowadzą do uzyskiwania niezetelnych wyników [4].

W przypadku elementów konstrukcyjnych, których powierzchnie pełnią także funkcję warstwy kontaktowej dla powłok wykończeniowych lub systemów ochronnych, pojawia się problem niedostosowania aktualnych metod oceny - np. przyczepności czy twardości powierzchniowej – do warunków, jakie występują w technologii druku 3D [4].

Obecnie dostępne metody badawcze w budownictwie, takie jak próby przyczepności (*pull-off*), testy zakotwienia (*pull-out*), czy badania sklerometryczne (np. młotek Schmidta), zostały opracowane z myślą o betonie formowanym w szalunkach, o gładkiej, jednorodnej powierzchni, z minimalnym wpływem warunków wykonania na morfologię zewnętrzną. Zastosowanie tych metod do elementów drukowanych wiąże się z licznymi ograniczeniami – wyniki mogą być zaburzone przez mikrowarstwową strukturę powierzchni, zmienną porowatość lub niejednorodność materiału w kierunku druku. Dodatkowo, rzeczywista geometria wydrukowanych elementów często odbiega od modelu cyfrowego, co wynika m.in. z odkształceń mieszanki, osiadania materiału, czy niedokładności systemów prowadzenia głowicy. W kontekście wymagań inżynierskich oznacza to potrzebę opracowania nowych metod oceny zgodności geometrycznej, trwałości i jakości elementów drukowanych [5].

W związku z powyższym, istnieje pilna potrzeba opracowania, przystosowania lub walidacji metod badawczych umożliwiających rzetelną ocenę jakości i właściwości użytkowych elementów drukowanych. Artykuł przedstawia próbę analizy przydatności wybranych metod badawczych - *pull-off*, *pull-out* oraz pomiaru młotkiem Schmidta - do oceny właściwości powierzchni i podłoża betonowego wykonanego w technologii druku 3D, w porównaniu z betonem formowanym tradycyjnie. Uwzględniono również wpływ zastosowania różnych warstw wykończeniowych oraz charakterystyki geometrycznej powierzchni na wyniki badań.

2. Materiał i Metoda

2.1 Materiały

Badania zostały przeprowadzone na czterech mieszankach do druku 3D - mieszance kontrolnej (M0F) oraz trzech mieszankach zawierających w składzie recyklat betonowy (RAC0, RAC50, RAC100). Dodatkowo przy badaniu *pull-off*

wykonano próbki referencyjne z betonu towarowego klasy C20/25 (REF). Recyklat był wykorzystany na dwa sposoby, jako częściowy zamiennik cementu (frakcja pyłasta <0,125 mm, w ilości 10%) oraz zamiennik kruszywa naturalnego 0-2 mm (w ilości 0%, 50% i 100% objętościowo). Recyklat uzyskany był poprzez przetworzenie - kruszenie i mielenie - laboratoryjnych próbek betonu klasy C30/37. Ze względu na wysoką wodożądność i porowatość recyklatu, do mieszanek RAC50 i RAC100, w których zastępowano kruszywo naturalne, niezbędne było dodanie wody dodatkowej, zgodnie z literaturą [6]. Skład mieszanek przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Skład badanych mieszanek

Materiał	M0F	RAC0	RAC50	RAC100
			kg/m ³	
CEM I 42,5R	580	522	522	522
Popiół lotny	166	166	166	166
Pył krzemionkowy	83	83	83	83
Piasek naturalny <2 mm	1300	1300	650	-
Recyklat C30/37 <0,125 mm	-	48,2	48,2	48,2
Recyklat C30/37 <2 mm	-	-	644	1289
Superplastyfikator VC111P	2,70	2,70	2,70	2,70
Włókno szklane 6 mm	3,86	3,86	3,86	3,86
Woda	200	200	200	200
Woda dodatkowa	-	-	46,8	93,5

2.2. Badania laboratoryjne

Zakwalifikowanie mieszanek do druku zostało wykonane poprzez przeprowadzenie badania stolika rozplýwu zgodnie z PN-EN 1015-3 [7]. Metoda ta jest uznanym sposobem wstępnej weryfikacji mieszanek do druku 3D stosowanym na całym świecie [8]. W celu zapewnienia odpowiedniej pompowalności i jakości wydruku zakres rozplýwu powinien wynosić między 145 mm a 170 mm.

Ocena wytrzymałości na ściskanie została przeprowadzona na próbkach 4x4x16 cm zgodnie z PN-EN 196-1 [9] po 1, 2 i 28 dniach dojrzewania. Badanie zostało przeprowadzone na próbkach zarówno drukowanych (sufiks „_D” np. M0F_D) jak i formowanych tradycyjnie (sufiks „_F”).

Ocena parametrów jakościowych i wytrzymałościowych betonu została przeprowadzona zarówno dla próbek laboratoryjnych jak i wielkogabarytowego wydruku. Na cele badania wydrukowane zostały elementy badawcze o wymiarach około 50 cm na 50 cm i szerokości warstwy wynoszącej 40 ± 2 mm. Jako próbki porównawcze, z tych samych mieszanek, zaformowane zostały płyty betonowe o wymiarach zbieżnych z próbkami wydrukowanymi.

Badanie wytrzymałości na odrywanie pull-off zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 1542 [10]. Próbki laboratoryjne betonu drukowanego i formowanego tradycyjnie pokryte zostały dwoma rodzajami dostępnych komercyjnie systemów-tynką gipsowym ręcznym oraz tynkiem cementowym. Oba materiały wykończeniowe zostały nałożone na grubość ok. 1 cm na powierzchnię próbek laboratoryjnych. Badania zostały wykonane po 3 dniach od nałożenia materiału, a wyniki przedstawione dla trzech miarodajnych pomiarów.

Oznaczenie siły wyrywającej (badanie pull-out) zostało przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN 12504-3 [11]. Badania zostały przeprowadzone w czterech punktach pomiarowych. Należy zwrócić uwagę, że przedmiotowa norma nie zaleca wykonywania badania na elementach o grubości mniejszej niż 100 mm. Autorzy publikacji chcieli jednak sprawdzić, w jaki sposób zachowa się wielowarstwowy element o typowym wymiarze przekroju w technologii druku 3D (grubość pojedynczej warstwy 40 mm). Wytrzymałość na wyrywanie została obliczona z wzoru:

$$\tau = \frac{F}{\pi * d * l}$$

gdzie τ to wytrzymałość na wyrywanie, F – siła wyrywająca kotwę, d – średnica kotwy (12 mm w badaniu), l – długość zakotwienia (grubość ścianki – 40 mm).

2.3. Wielkoformatowy obiekt

Badany obiekt został wykonany w lipcu 2023 roku w ramach projektu finansowanego z funduszy europejskich „RECYCL3D - Kruszywa z recyklingu do konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D”. Obiekt o polu podstawy 1,5 m x 1,5 m i wysokości 2 m został w całości wydrukowany w technologii druku 3D na bazie opracowanych mieszanek. Konstrukcja ścian wykonana jako powłoka z wewnętrznym wykratowaniem pozwoliła na obniżenie całkowitej wagi elementu o prawie 40%. Widok ściany w czasie wydruku prezentuje Rysunek 1. Wydruk obiektu został podzielony na trzy etapy, do poziomu okien, do wysokości zwieńczenia otworów okiennych oraz wykończenie wieńcem. Obiekt został posadowiony na żelbetowej płycie, która umożliwiła transport na miejsce docelowe. Grubość ścieżki druku została przyjęta na poziomie 40±2 mm.

W celu oceny jakości wykonania obiektu, przeprowadzono skan przy pomocy technologii LiDAR. Skan wykonano instrumentem Trimble SX10 w lokalnym układzie odniesienia. Dokładność położenia punktu 3D określono na 1,5 mm, średnia gęstość chmury punktów wynosi 2 mm. Przetworzenie i filtrację skanu wykonano przy użyciu oprogramowania Trimble Business Center.

Do badania wewnętrznej struktury ściany wykorzystano urządzenie Proceq GP8000 (georadar) (Rysunek 2). Urządzenie przeznaczone jest określania przekroju warstw ściennych, lokalizowania pustek i zbrojenia.

Badanie młotkiem Schmidta zostało przeprowadzone na ścianach obiektu, w czterech miejscach: dwóch punktach w miejscu łączenia wykratowania ze ścianą zewnętrzną (Typ 1) i dwóch miejscach o grubości pojedynczej warstwy zewnętrznej (Typ 2). Powierzchnia ścian została zeszlifowana i odpylona w celu wykonania poprawności pomiarów (Rysunek 2). Pomiary były wykonywane na poletkach badawczych o wielkości około 25 cm x 25 cm. Pomiary w 9 punktach wykonywane były z przesunięciem w każdym z wyznaczonych miejsc badawczych.



Rys. 1. Wydruk wielkoformatowy – z lewej: ściana w czasie druku, z prawej: wydrukowany obiekt demonstracyjny

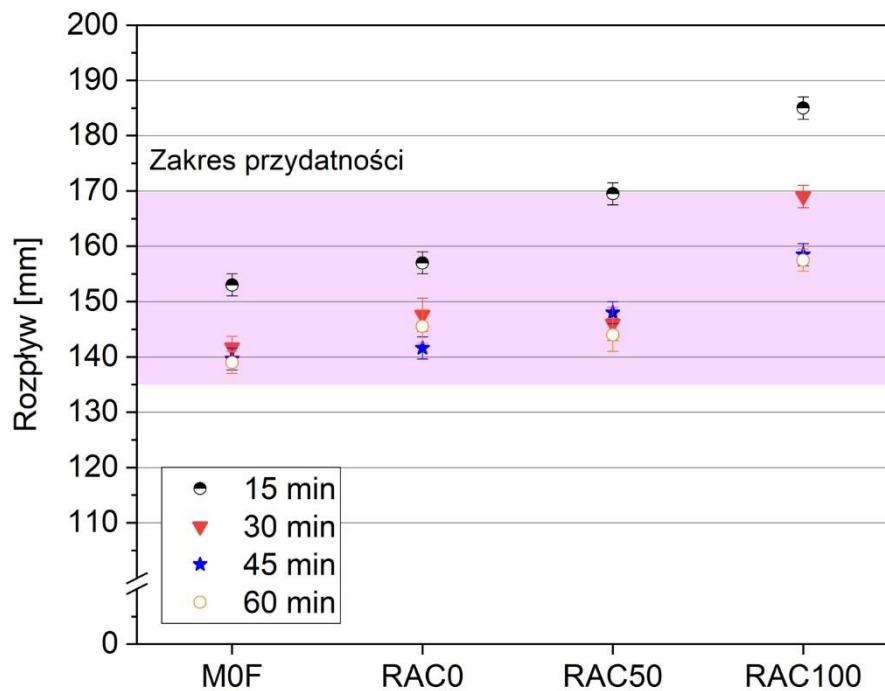


Rys. 2. Wykonywanie prac pomiarowych przy pomocy georadaru (po lewej) oraz przygotowanie ściany do badania sklerometrem (po prawej).

3. Wyniki i dyskusja

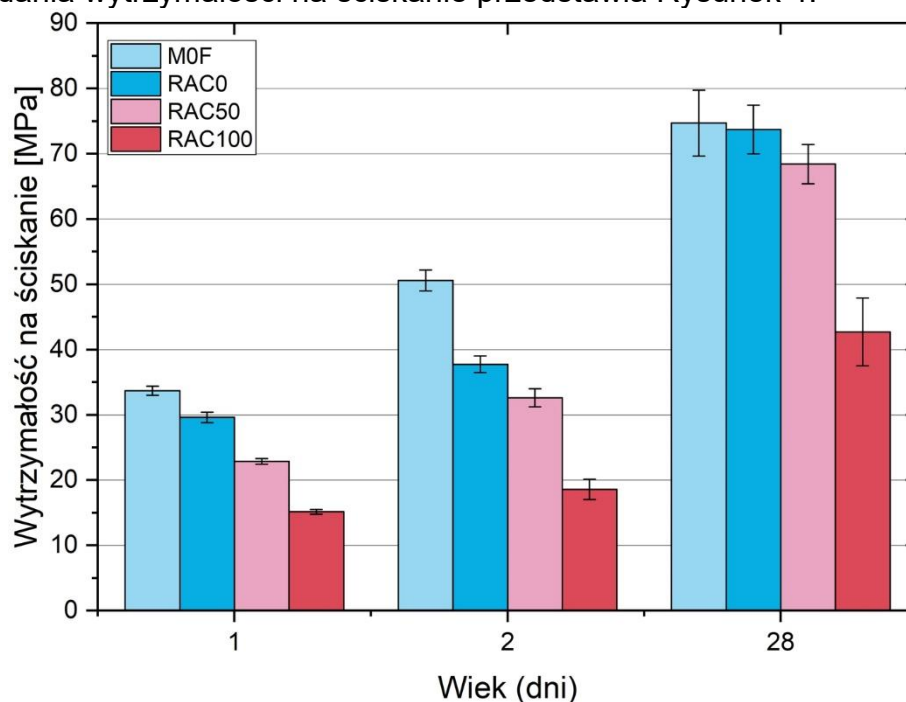
Wyniki badania rozptyłu mieszanek do druku 3D przedstawia Rysunek 3.

Mieszanki RAC100 i RAC50 charakteryzowały się wyższym początkowym (15 minut) rozptywem od mieszanek z kruszywem naturalnym. Mieszanka RAC100 wpisała się w odpowiedni zakres wartości rozptyłu po 30 minutach od dodania wody. Wynikało to z faktu wprowadzenia do mieszanek dodatkowej wody, której absorpcja zachodziła w pierwszym okresie po zakończeniu procesu mieszania. W efekcie możliwe było uzyskanie rozptyłu wymaganego do odpowiedniego pompowania mieszanki.



Rys. 3. Wyniki badania rozptywu badanych mieszanek

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawia Rysunek 4.



Rys. 4. Wyniki wytrzymałości badanych kompozytów cementowych

Wyniki badania wskazały na znacząco niższą wytrzymałość na ściskanie modyfikowanych recyklatem mieszanek w porównaniu do mieszanki referencyjnej we wczesnych okresach dojrzewania. Po 28 dniach dojrzewania wyniki wytrzymałości mieszanki RAC0 i M0F były zbliżone, a wytrzymałość na ściskanie kompozytu RAC50, była około 8% niższa niż kompozytu referencyjnego. Zamiana 100% kruszywa

naturalnego recyklatem betonowym wpłynęła na redukcję wytrzymałości na ściskanie o prawie 50%. Wyniki badania są zgodne z dostępnymi w literaturze. Zastosowanie kruszywa z recyklingu typowo obniża wytrzymałość na ściskanie kompozytów do druku 3D [2,12].

Próbki do badań metodą pull-off przygotowano dwiema technikami: poprzez wydrukowanie elementów z wykorzystaniem technologii druku 3D oraz przez ich tradycyjne zaformowanie. Pozwoliło to na ocenę wpływu charakterystycznej, warstwowej faktury powierzchni bocznych elementów drukowanych na przyczepność stosowanych materiałów wykończeniowych.

Wyniki (Tabela 2 i Rysunek 5) testów wykazały, że najwyższe wartości wytrzymałości na odrywanie, niezależnie od rodzaju zastosowanego materiału wykończeniowego, uzyskano dla powierzchni wykonanej z betonu towarowego. W przypadku zastosowania tynku cementowego zaobserwowano wyraźne różnice w przyczepności pomiędzy próbkami formowanymi a drukowanymi - na korzyść tych drugich. Co istotne, niezależnie od rodzaju zastosowanej mieszanki betonowej, uzyskane wartości wytrzymałości na odrywanie były zbliżone do wyników uzyskanych dla próbki referencyjnej (REF). Interesującym zjawiskiem jest fakt, że próbki formowane wykazywały niższą przyczepność niż próbki drukowane, co można przypisać większej chropowatości i nieregularności powierzchni elementów wykonanych w technologii druku 3D. Charakterystyczna tekstura elementów drukowanych (potocznie określana mianem „bałwanków” lub „nawisów”) zwiększa powierzchnię styku z materiałem wykończeniowym, co pozytywnie wpływa na jego przyczepność do podłoża.

Tabela 2. Wyniki badania pull-off przygotowanych kompozytów cementowych

	Tynk cementowy				Tynk gipsowy			
	P1	P2	P3	Średnia	P1	P2	P3	Średnia
	MPa							
REF	0,81	0,92	1,07	0,93	1,07	1,07	1,07	1,07
M0F_F	0,81	0,76	0,71	0,76	0,15	0,20	0,25	0,20
M0F_D	0,92	0,92	0,92	0,92	0,81	0,71	0,41	0,65
RAC0_F	0,66	0,61	0,51	0,59	0,36	0,36	0,31	0,34
RAC0_D	0,87	0,92	0,97	0,92	0,92	0,87	0,87	0,88
RAC50_F	0,76	0,71	0,66	0,71	0,76	0,41	0,31	0,49
RAC50_D	0,92	0,87	0,81	0,87	0,36	0,31	0,31	0,32
RAC100_F	0,87	0,76	0,66	0,76	0,36	0,31	0,20	0,29
RAC100_D	0,92	0,87	0,87	0,88	0,36	0,36	0,41	0,37

W przypadku badania przyczepności tynku gipsowego odnotowano istotny spadek wytrzymałości na odrywanie dla wszystkich analizowanych kompozytów, niezależnie od sposobu wykonania podłoża. Tynk gipsowy, jako materiał o niższej wytrzymałości mechanicznej niż tynk cementowy, z reguły wykazuje mniejsze wartości przyczepności, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach [13]. Warto jednak podkreślić, że największe różnice w wynikach odnotowano pomiędzy próbkami wykonanymi z tego samego kompozytu, lecz przygotowanymi w różny sposób. Szczególnie istotnym i nietypowym wynikiem jest przypadek kompozytu RAC50, dla

którego próbka drukowana wykazała niższą wytrzymałość na odrywanie niż jej odpowiednik formowany.



Rys.5. Przykład badania pull-off

Niższe wartości przyczepności materiałów wykończeniowych w porównaniu z próbką referencyjną można przypisać właściwościom podłoża wykonanych z kompozytów do druku 3D. Materiały te charakteryzują się niskim współczynnikiem wodno-cementowym (w/c), co przy braku zastosowania warstwy gruntującej skutkuje intensywną migracją wody ze świeżo nałożonej warstwy wykończeniowej do podłoża. Proces ten zachodzi szczególnie intensywnie w początkowej fazie wiązania i schnięcia, prowadząc do obniżenia przyczepności i finalnych wartości wytrzymałości na odrywanie.

Wyniki badania pull-off przedstawia Tabela 3 i Rysunek 6.

Tabela 3. Wyniki badania pull-out kompozytów do druku 3D

	P1	P2	P3	P4	Średnia	τ
	F [kN]					MPa
M0F	12,6	-*	11,4	12,0	12,0	7,8
RAC0	10,3	-*	11,0	10,9	10,7	7,1
RAC50	8,9	9,0	8,1	7,4	8,4	5,5
RAC100	6,4	7,0	7,2	6,5	6,8	4,5

*pęknięcie płytki badawczej



Rys. 6 Badanie pull-out betonu drukowanego

Badanie pull-out zostało wykonane tylko dla mieszanek drukowanych. Autorzy są świadomi, że sposób przeprowadzenia badania (elementy cienkościennie, o niższej niż wymagana w normie grubości) może wpływać istotnie na rezultaty. Zastosowanie tej metody badawczej może spowodować pęknięcie próbki badawczej, co miało miejsce w przypadku mieszanek M0F i RAC0. Wyniki badania wskazują jednak, że metoda ta może pomóc w identyfikacji przyczepności ewentualnego zbrojenia w elementach drukowanych, nawet o niewielkiej grubości ścianek.

Wyniki badania wskazują na wyraźny trend spadkowy wytrzymałości na wrywanie wraz ze wzrostem ilości recyklatu w mieszance. Najniższe wyniki zaobserwowano dla mieszanki RAC100, w której całkowicie zastąpiono kruszywo naturalne kruszywem recyklingowym. Wynik ten skorelować można z niższymi parametrami mechanicznymi kompozytu, który charakteryzuje się prawie dwukrotnie niższą wytrzymałością na ściskanie niż kompozyty RAC0 i M0F. Należy zwrócić uwagę, że siła wrywająca może być zależna od układu warstw i kierunku druku [5,14].

Wyniki badania młotkiem Schmidta przedstawia Tabela 4.

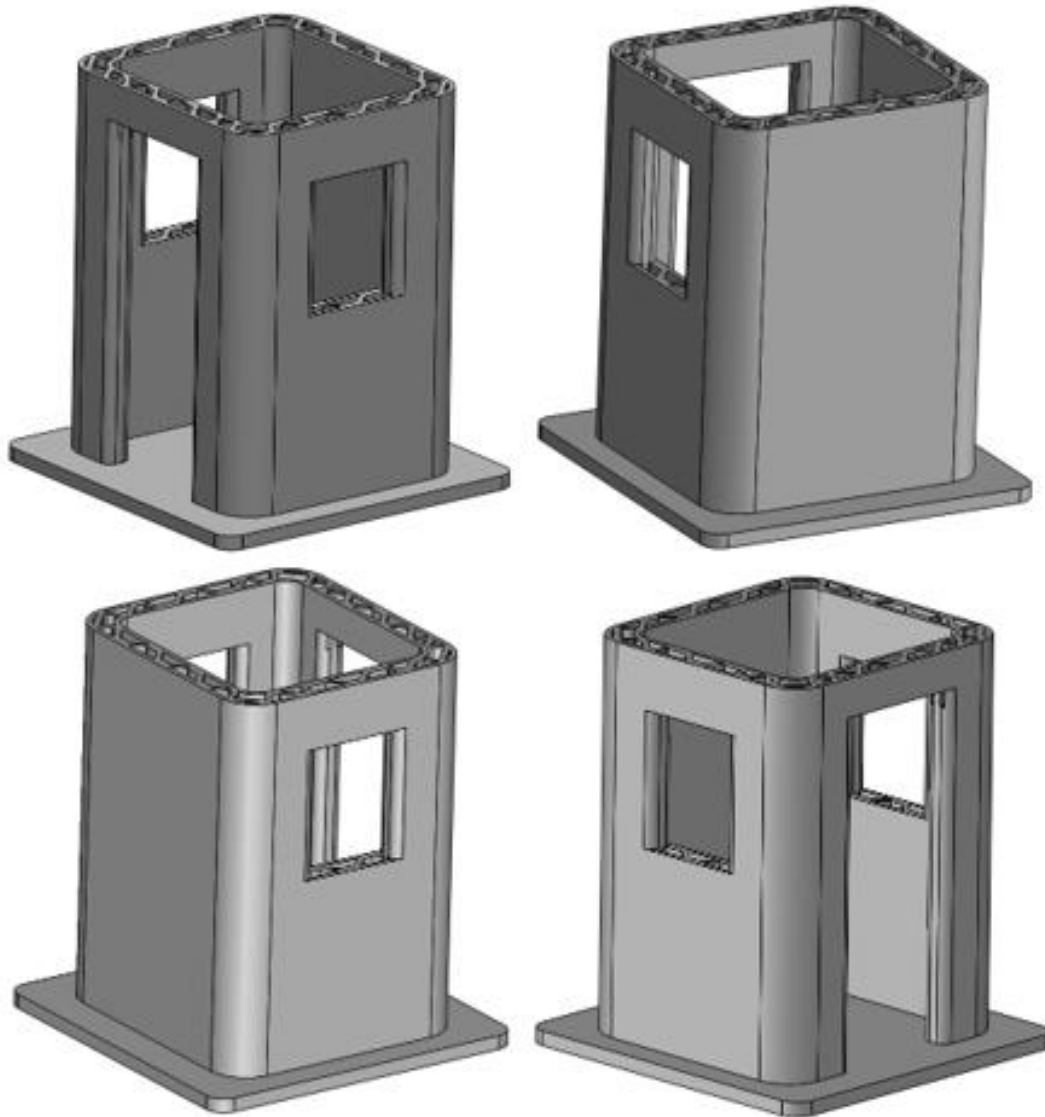
Tabela 4. Wyniki pomiarów młotkiem Schmidta

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Średnia	$f_{ck,cyl}$
	Pkt 1: Typ 1 - Ściana + wykratowanie (liczba odbicia)										MPa
Seria 1	37	41	40	33	40	42	34	44	45	40	35
Seria 2	37	34	38	41	44	43	35	31	46	39	33
	Pkt 2: Typ 1 - Ściana + wykratowanie (liczba odbicia)										
Seria 1	41	43	42	41	40	40	41	36	40	40	35
Seria 2	43	37	40	42	44	42	41	46	38	41	36
	Pkt 3: Typ 2 - Ściana (liczba odbicia)										
Seria 1	35	28	29	41	40	43	41	39	34	37	30
Seria 2	28	26	34	36	40	41	39	21	33	33	25
	Pkt 4: Typ 2 - Ściana (liczba odbicia)										
Seria 1	32	23	30	37	38	36	43	35	30	34	26
Seria 2	39	43	38	36	42	40	41	38	39	40	35

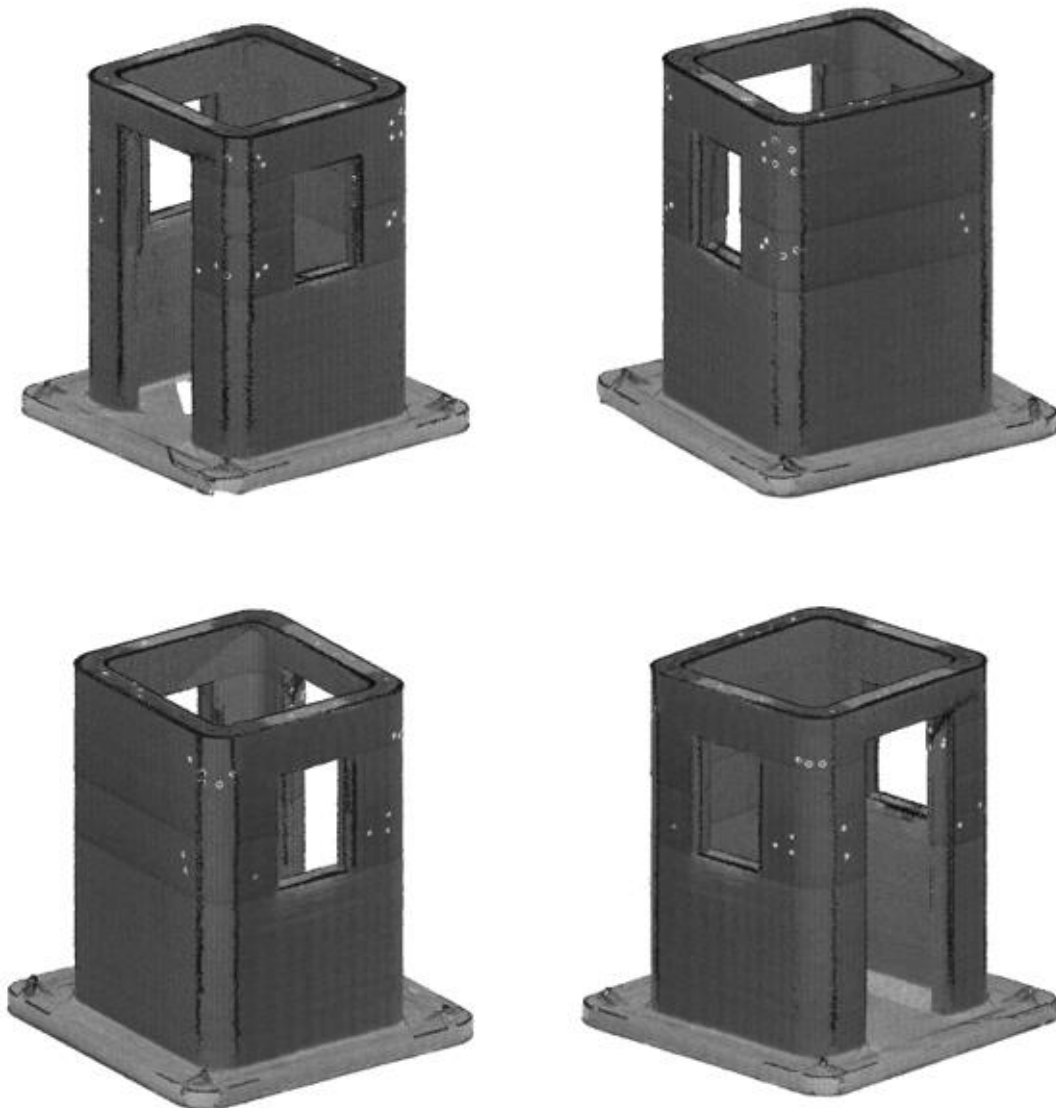
Wyniki badania wskazały na różnicę między wartościami wytrzymałości na ściskanie określonej na podstawie liczby odbicia między punktami o grubości

pojedynczej warstwy (Typ 2) a punktami o podwójnej grubości warstwy (Typ 1). Dodatkowo widoczne są wyraźne różnice między pomiarami wykonanymi w tym samym miejscu przy Typ 2. Różnice wynikają z faktu, że ze względu na krótkie odcinki bez wykratowania, część pomiarów mogła być wykonywana relatywnie blisko fragmentu ściany z wykratowaniem. Wyniki badania zarówno dla pierwszego, jak i drugiego typu miejsca, wskazały na duże różnice w stosunku do określonej w laboratorium wytrzymałości na ściskanie, nawet uwzględniając inny typ próbek. Wskazuje to na to, że badanie młotkiem Schmidta, jest ograniczone w przypadku określenia wytrzymałości konstrukcji wykonanych w technologii druku 3D, w których ściany nie mają pełnego wypełnienia.

W celu oceny jakości wykonania elementu budowlanego wydrukowanego w technologii druku 3D, przeprowadzono porównanie modelu (CAD) z modelem rzeczywistym, uzyskanym na podstawie skanowania laserowego (LiDAR).



Rys. 7. Model komputerowy wydrukowanego obiektu



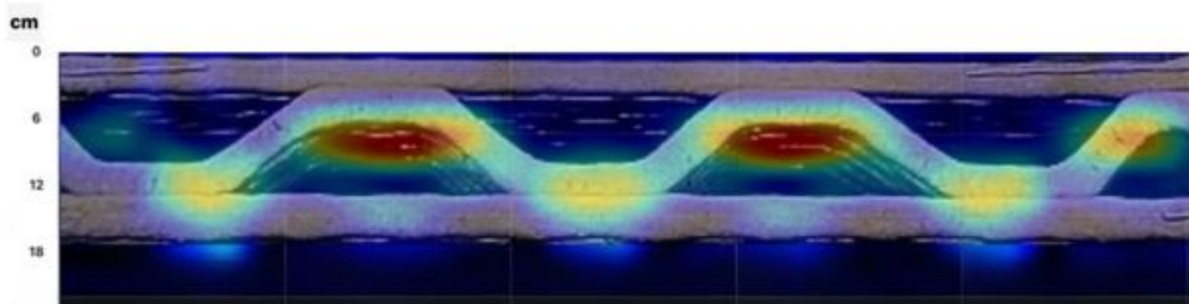
Rys. 8. Skan obiektu z wykorzystaniem LiDAR

Porównanie wizualne pomiędzy cyfrowym modelem (Rysunek 7) a chmurą punktów (Rysunek 8) potwierdza wysoką zgodność kształtu geometrycznego oraz zachowanie zaplanowanej topologii. Widoczne są prawidłowe odwzorowania łukowych naroży, prostoliniowych krawędzi otworów oraz grubości ścian. Skan obiektu nie wskazał jednak charakterystycznej faktury ścian. Widocznie były natomiast przerwy technologiczne między betonowaniami (poziome linie w okolicy otworów okiennych).

Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że zastosowana technologia umożliwia kontrolę wielkoformatowych obiektów budowlanych i ocenę zgodności konstrukcji z projektem.

W ramach prac badawczych zastosowano również georadar do badania struktury ściany tylnej wykonanego obiektu. Badana ściana miała grubość 180 mm, co mieściło się w zakresie pracy urządzenia (300 mm). Wynik skanu z nałożoną strukturą ściany przedstawia Rysunek 9. Pomiar wykazał dobrą zgodność układu warstw z rzeczywistym ich położeniem. Pozwala to stwierdzić, że georadar jest szczególnie przydatnym urządzeniem dla technologii druku 3D. W tej technologii bowiem, elementy

często wykonywane są z ażurowym wypełnieniem, co utrudnia lokalizację odpowiednich miejsc montażowych.



Rys. 9. Badanie georadarem ściany obiektu

Wnioski

Przeprowadzone w ramach artykułu badania i analizy pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Możliwe jest zaprojektowanie mieszanek do druku 3D z wykorzystaniem kruszywa recyklingowego, spełniających wymagania pompowalności i drukowalności. Istotnym aspektem jest znaczący spadek wytrzymałości na ściskanie w przypadku znacznego stopnia zastąpienia kruszywa naturalnego recyklatem.
2. Wykorzystanie georadaru do oznaczenia wewnętrznej struktury konstrukcji wytworzonych w technologii druku 3D jest skuteczne. Metoda ta pozwala na precyzyjne określenie wewnętrznego wykratowania przekrojów ażurowych.
3. Efektywność badania młotkiem Schmidta jest ograniczone w przypadku oznaczania wytrzymałości na ściskanie ażurowych elementów konstrukcyjnych wykonanych w technologii druku 3D. Wyniki badania są podatne na zmiany geometrii przekroju, a także są zaniżone w przypadku elementów cienkościennych.
4. Badania przyczepności tynków wykazały, że tynk cementowy ma zdecydowanie lepszą przyczepność niż tynk gipsowy niezależnie od rodzaju podłoża. Faktura elementów wykonanych w technologii druku 3D poprawia przyczepność warstw wykończeniowych. Ze względu na wysoką chłonność podłoża, szczególnie w przypadku mieszanek z recyklatami, należy dobrać odpowiedni podkład gruntujący, zabezpieczający warstwę wierzchnią przed migracją wody w głąb podłoża.
5. Wykorzystanie LiDARu do oceny jakości wykonania elementów konstrukcyjnych jest skuteczną metodą, pozwalającą na precyzyjne określenie elementów konstrukcji, w tym przerw technologicznych.
6. Badanie pull-out cienkościennych elementów wykonanych w technologii druku 3D może powodować zniszczenie elementu. Zastosowanie kruszywa recyklingowego w kompozytach cementowych w technologii druku 3D obniża siłę potrzebną do wyrwania stalowych kotew.

Finansowanie: Badania zostały sfinansowane w całości przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) w ramach Projektu nr umowy ERA-MIN3/140/Recycl3D/2022 (ERA-NET Cofund ERA-MIN3 (Joint Call 2021))

Literatura

- [1] P. Sikora, M. Techman, K. Federowicz, A.M. El-Khayatt, H.A. Saudi, M.A. Elrahman, M. Hoffmann, D. Stephan, S-Y. Chung. Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens, *Case Studies in Construction Materials*, 17, 2022
- [2] S. Skibicki, K. Federowicz, M. Hoffmann, M. Chougan, D. Sibera, K. Cendrowski, M. Techman, J.N. Pacheco, M. Liard, P. Sikora. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC, *Materials*, 17, 2024
- [3] S. Hou, Z. Duan, J. Xiao, J. Ye. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design, *Construction and Building Materials*, 273, 2021
- [4] V. Mechtcherine, K. van Tittelboom, A. Kazemian, E. Kreiger, B. Nematollahi, V.N. Nerella, M. Santhanam, G. de Schutter, G. Van Zijl, D. Lowke, E. Ivaniuk, M. Taubert, F. Bos. A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete, *Cement and Concrete Research*, 157, 2022
- [5] T. Ding, F. Qin, J. Xiao, X. Chen, Z. Zuo. Experimental study on the bond behaviour between steel bars and 3D printed concrete, *Journal of Building Engineering*, 49, 2022.
- [6] U. Chandru, A. Bahurudeen, R. Senthilkumar. Systematic comparison of different recycled fine aggregates from construction and demolition wastes in OPC concrete and PPC concrete, *Journal of Building Engineering*, 75, 2023
- [7] PN-EN 1015-3:2007 - Metody badań zapraw do murów -- Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)
- [8] S. Ahmed, S. Yehia. Evaluation of Workability and Structuration Rate of Locally Developed 3D Printing Concrete Using Conventional Methods, *Materials*, 15 (3), 2022
- [9] PN-EN 196-1:2016 - Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [10] PN-EN 1542:2000 - Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Pomiar przyczepności przez odrywanie
- [11] PN-EN 12504-3:2006 - Badania betonu w konstrukcjach -- Część 3: Oznaczanie siły wrywającej
- [12] H. Christen, G. van Zijl, W. de Villiers. The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete, *Cleaner Materials*, 4, 2022.
- [13] M. Niedostatkiwicz, T. Majewski. Badania doświadczalne tynków wewnętrznych, *Izolacje*, 4, 2019
- [14] M. Chen, K. Yu, T. Zhang, Y. Wang. Characterizing and modelling the bond-slip behaviour of steel bars in 3D printed engineered cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 157, 2025

Rafał Latawiec
Holcim Polska S.A.

Wydruk pierwszego na świecie zbiornika na wodę pitną w technologii druku 3D betonu w Polsce

Globally first 3D-printed concrete drinking water tank in Poland

Streszczenie

Na jesień 2024 Holcim Polska S.A. we współpracy z partnerami: polską firmą Globtank sp. z o.o., duńską firmą COBOD International zrealizował pierwszy w Polsce obiekt budowlany wydrukowany z betonu w technologii 3D. Jest to pierwszy na świecie zbiornik drukowany z betonu na wodę pitną o wymiarach: 7 metrów wysokości i 7,64 metra średnicy.

Artykuł przedstawia proces realizacji pierwszego w Polsce obiektu budowlanego wykonanego w technologii druku betonu 3D. Opisano praktyczne aspekty związane z wdrożeniem tej innowacyjnej technologii, począwszy od projektowania konstrukcji, przez wybór i testy mieszanki betonowej, aż po sam proces drukowania i finalne prace wykończeniowe. Szczególną uwagę poświęcono wyzwaniom związanym z parametrami technologicznymi, takimi jak czas wiązania betonu, kontrola konsystencji mieszanki oraz dostosowanie sprzętu do lokalnych warunków budowy. Omówiono także kwestie optymalizacji geometrii konstrukcji pod kątem efektywności materiałowej i stabilności strukturalnej. W artykule zaprezentowano również doświadczenia z fazy testowej, w której analizowano jakość warstwowego układania materiału oraz trwałość powstałych elementów. Przedstawiono wnioski dotyczące potencjalnych zastosowań tej technologii w budownictwie mieszkaniowym i infrastrukturalnym w Polsce. Realizacja projektu dostarczyła cennych wskazówek dotyczących przyszłych wdrożeń technologii druku 3D w betonie, a także przyczyniła się do rozwoju wiedzy na temat nowych możliwości zastosowania betonu w formach niemożliwych do osiągnięcia tradycyjnymi metodami budowlanymi.

Abstract

In the fall of 2024, Holcim Polska S.A., in cooperation with partners: the Polish company Globtank sp. z o.o., the Danish company COBOD International, has completed the first 3D-printed concrete tank in Poland. It is the world's first 3D printed potable water tank that is 7 meter high and 7.64 meter in diameter. The article presents the process of constructing the first building in Poland using 3D concrete printing technology. It covers practical aspects of implementing this innovative approach, from structural design and selection of the concrete mix to the printing process and final finishing works. Special attention is given to technological challenges such as setting time control, maintaining the mix consistency, and adapting equipment to local construction conditions. Optimization of structural geometry for material efficiency and

stability is also discussed. The article highlights experiences from the testing phase, which involved analyzing the quality of layered material deposition and the durability of printed elements. Conclusions are drawn regarding the potential applications of this technology in residential and infrastructural construction in Poland. The project provided valuable insights into future implementations of 3D concrete printing and contributed to expanding knowledge about the new possibilities of concrete use in forms unattainable by traditional construction methods.

1. Dlaczego drukujemy beton?

W obliczu rosnących wyzwań w branży budowlanej — takich jak niedobór wykwalifikowanej siły roboczej, presja na ograniczanie emisji CO₂ oraz potrzeba szybszej i bardziej zrównoważonej realizacji inwestycji — Holcim aktywnie poszukuje innowacyjnych rozwiązań, które odpowiedzą na te potrzeby. Jednym z kierunków rozwoju stała się technologia druku 3D z betonu.

Drukowanie betonu to nie tylko futurystyczna ciekawostka, widać w niej realne narzędzie transformacji branży. Technologia ta pozwala znacząco wpłynąć na konserwatywne procesy budowlane dzięki automatyzacji i robotyzacji, możliwości swobodnego kształtowania geometrii konstrukcji i projektowania ich w sposób zoptymalizowany. Materiał, w tym przypadku beton, może być wykorzystany mądrzej.

Wdrożenie tej technologii w Polsce nie jest pozbawione wyzwań. Poza barierami technologicznymi takimi jak odpowiednio zaprojektowane mieszanki betonowe, projekty konstrukcyjne, drukarki i sposób transport mieszanki betonowej, natrafić można na wyzwania związane z brakiem odpowiednich przepisów, konserwatywnym podejściem rynku i wysokimi kosztami wdrożenia technologii. Przedstawiony projekt stanowi inspirację dla branży i wyjście naprzód tym wyzwaniom, sprawdzając w praktyczny sposób możliwość wykorzystania technologii druku 3D betonu.

Na świecie realizuje się coraz więcej projektów związanych z drukowaniem betonu. W tym zakresie w Polsce zrealizowano relatywnie niewiele projektów, takich jak niekonstrukcyjna wiata śmietnikowa, schody skarpowe, mała architektura i przedstawiony zbiornik. Z wymienionych obiektów tylko przedstawiany zbiornik jest obiektem budowlanym wymagającym pozwolenia na budowę i jest to największy obiekt z wymienionych.

Holcim ma wiele praktycznych doświadczeń i projektów zrealizowanych w technologii druku 3D, z których warto wymienić osiedla domów jednorodzinnych w Afryce, obiekty infrastrukturalne takie jak kładki pieszkie realizowane na pokazy Bienalle w Wenecji czy prefabrykaty betonowe.

2. Znalezienie aplikacji – zbiorniki

Wybór odpowiedniego projektu do pierwszej realizacji obiektu budowlanego w technologii druku 3D z betonu był kluczowym elementem strategii wdrożeniowej. Poszukiwano projektu, który pozwoli wykorzystać potencjał drukowania oraz będzie posiadał relatywnie prostą (do drukowania), ale jednocześnie masywną geometrię. Zbiorniki cylindryczne spełniały te warunki.

Zbiorniki cylindryczne można spotkać wykonane głównie z 2 materiałów – żelbetowe i stalowe. Różnego rodzaju zbiorniki żelbetowe to nieodłączny element infrastruktury wodociągowej, a jednocześnie typ konstrukcji, który w tradycyjnej technologii żelbetowej jest trudny i kosztowny w wykonaniu. Zaokrąglone kształty wymagają pracochłonnego deskowania, precyzyjnego zbrojenia oraz licznych etapów robót ręcznych. Z kolei w technologii druku 3D taka geometria staje się wręcz naturalna do wykonania. Jednocześnie okrągły rzut zbiorników pozwala na wysoki poziom optymalizacji projektowej ze względu na równomiernie rozłożone naprężenia.

Grupa Holcim posiada praktyczne doświadczenie w realizacji obiektów o podobnej geometrii – realizowane wspólnie z firmą General Electric oraz COBOD podstawy wież wiatraków o średnicy około 6 metrów i wysokości około 20 metrów. Wybór zbiornika był więc naturalnym rozwojem tej technologii.

3. Znalezienie inwestora – zamówienie publiczne, szczegóły finansowania

Do projektu została zaproszona firma Globtank sp. z o.o. — polski liderem w zakresie kompleksowego wykonywania zbiorników na ciecze. Globtank, po podpisaniu listu intencyjnego z Holcim, rozpoczął poszukiwania odpowiedniego projektu pilotażowego. Takim projektem okazało się zamówienie publiczne w Barczewku, w ramach którego przebudowywano stację ujęcia wody. W ramach zadania do wybudowania był zbiornik na wodę pitną o objętości około 300m³. Po stronie zamawiającego, Zakładu Wodociągów i Kanalizacji Barczewo, oraz generalnego wykonawcy, firmy Eko-wod Czarneccy z Kętrzyna, panowała otwartość na innowacje, a model „zaprojektuj i zbuduj” pozwalał na zastosowanie niestandardowych rozwiązań. Warto podkreślić, że finansowanie inwestycji pochodziło z Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich, pod auspicjami Samorządu Województwa Warmińsko-Mazurskiego. Oznaczało to konieczność spełnienia restrykcyjnych wymogów formalnych i jakościowych — technologia druku musiała być nie tylko efektywna, ale także zgodna z wymogami prawa budowlanego, procedur przetargowych i zasad wykorzystania funduszy europejskich.

Z perspektywy wykonawcy i inwestora publicznego, kluczowym czynnikiem umożliwiającym wdrożenie nowatorskiej metody była tożsamość kosztów – koszt wykonania zbiornika drukowanego nie mógł przewyższać kosztów tradycyjnego zbiornika wykonywanego w ramach takiego projektu.

ZWiK Barczewo, jako inwestor, wykazał się wyjątkową otwartością i odwagą decyzyjną. Inwestycja stała się dowodem na to, że także w sektorze zamówień publicznych możliwe jest wdrażanie rozwiązań pionierskich — o ile są one dobrze zaprojektowane, profesjonalnie przygotowane i oparte na rzetelnej analizie kosztowo-funkcjonalnej. Ostateczna akceptacja zastosowania druku 3D była wynikiem dialogu pomiędzy wszystkimi stronami projektu – zamawiającym, wykonawcą, projektantami oraz dostawcami technologii.

4. Projektowanie zbiornika

a. Projekt wstępny

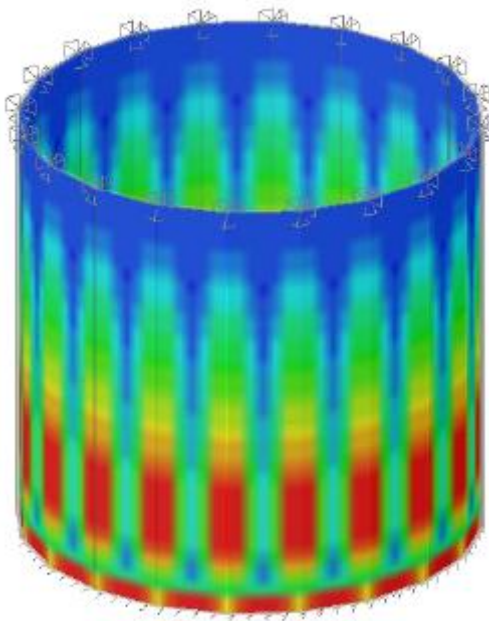
Proces projektowania zbiornika rozpoczął się od etapu koncepcyjnego, realizowanego wspólnie przez zespoły Holcim i Globtank. Głównym celem było szybkie określenie kluczowych wyzwań projektowych oraz przyjęcie wstępnych założeń materiałowych i technologicznych, umożliwiających przeprowadzenie analiz strukturalnych i technologicznych. Za punkt odniesienia posłużył projekt typowego zbiornika o objętości około 300 m³ – jako gotowa dokumentacja projektowa, która odpowiadała wymaganiom inwestora oraz zapisom SIWZ.

Zaprojektowano zbiornik o średnicy wewnętrznej 7,64 metra, wysokości 7 metrów. W celu zapewnienia szczelności w środku zbiornika zastosowano specjalistyczną hydroizolację układaną na warstwie termoizolacji. Technologia uszczelnienia zbiornika została zaprojektowana przez firmę Globtank i jest to standardowe rozwiązanie dla zbiorników na wodę pitną. Warto nadmienić, że technologia zbiornika uzyskała atest PZH, wymagany dla elementów mających styczność z wodą pitną.

Projekt wstępny opierał się na podstawowych parametrach geometrycznych (średnica, wysokość, kształt ścian i dachu), warunków użytkowych (szczelność, dostęp przez drabinę, obecność pokrycia) oraz obciążeniach normowych. Na tym etapie nie zakładano jeszcze zwężenia ścian ku górze – kluczowe było możliwie szybkie uzyskanie pierwszych wyników analizy projektu konstrukcji w celu dalszej analizy materiałowo-technologicznej. Do obliczeń wykorzystano modelowanie metodą elementów skończonych (MES), co pozwoliło na precyzyjne zidentyfikowanie stref krytycznych pod względem naprężeń oraz ocenić zachowanie konstrukcji pod wpływem różnych typów obciążeń – przykłady pokazano na rysunku 1 i 2. Analizowano m.in. ciśnienie hydrostatyczne wody, obciążenia wiatrem, zmiany temperatury w betonie oraz obciążenia eksploatacyjne.

Co istotne, konstrukcja drukowana wymagała uwzględnienia dodatkowych czynników takich jak potencjalne różnice we właściwościach materiału wynikające z technologii warstwowego układania mieszanki. Zidentyfikowano również kluczowe ryzyka związane z procesem druku: obecność zimnych styków, wpływ czasu międzywarstwowego na adhezję oraz możliwą anizotropię materiału. Wymienione czynniki zostały uwzględnione podczas projektowania mając szczególne odzwierciedlenie w założonych parametrach materiału [1].

Już podczas wstępnego projektu konstrukcji założono zastosowanie zbrojenia rozproszonego w celu całkowitego wyeliminowania zbrojenia tradycyjnego. Taki zabieg pozwolił na wyeliminowanie prac zbrojarskich oraz zredukowanie ilości stosowanej stali zbrojeniowej.



Rysunek 1. Model numeryczny zbiornika z rozkładem naprężeń rozciągających

b. Analiza

Po wstępnym zaprojektowaniu zbiornika przystąpiono do szczegółowej analizy w celu określenia kluczowych obszarów z punktu widzenia wykonawstwa, ryzyk związanych z daną technologią oraz możliwych optymalizacji. W proces analityczny włączono firmę COBOD – producenta drukarki – aby dopasować drukarkę pod wymagania projektu. Analiza pozwoliła także na wstępną optymalizację zużycia materiału — na tym etapie zidentyfikowano możliwość redukcji grubości ścian w górnej partii zbiornika, gdzie ciśnienie hydrostatyczne jest niższe. Te założenia przeniesiono do projektu finalnego. Kluczowe wnioski z analizy to:

- sposób przygotowywania mieszanki betonowej oraz jej transportu
- konieczność przygotowania się na przerwy w drukowaniu skutkujące zimnymi stykami pomiędzy następującymi warstwami
- szczegółowa analiza wydajności układu przygotowującego oraz transportującego materiał która musi być potwierdzone praktycznymi testami
- przygotowanie zespołów roboczych realizujących wydruk zbiornika

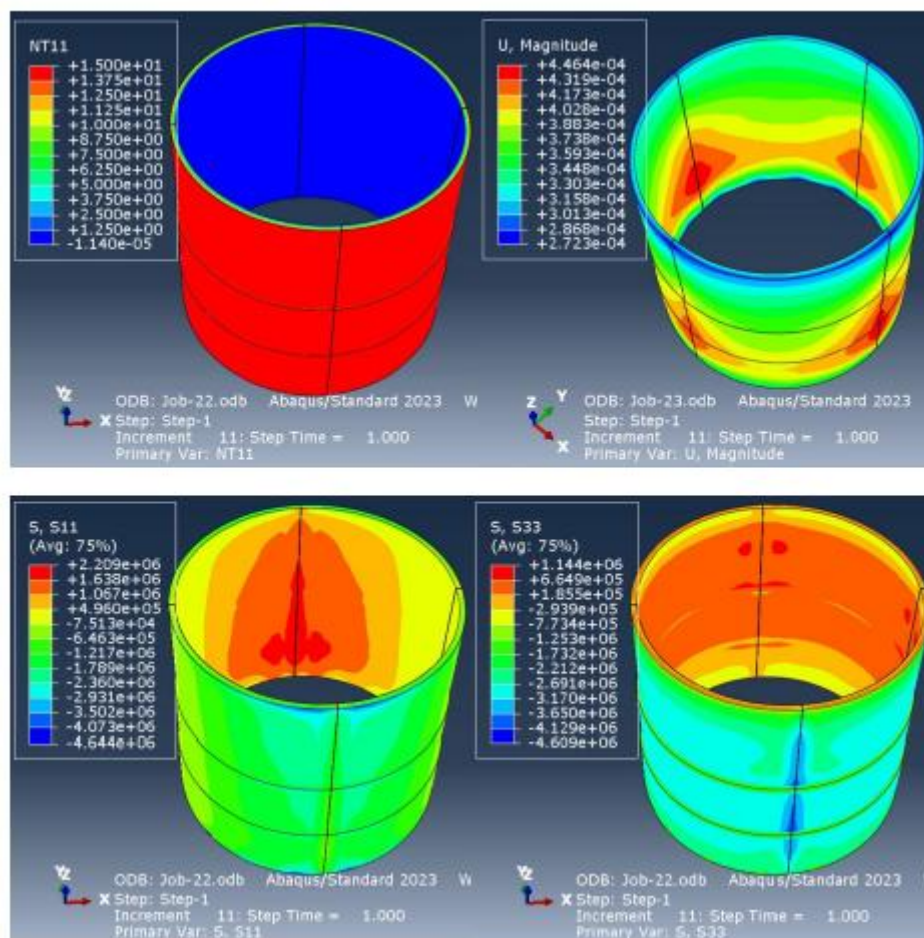
- odpowiednie zaprojektowanie detalu połączenia ścian zbiornika z płytą fundamentową
- wpływ warunków temperaturowo-wilgotnościowych w dniu realizacji na wydruk

W dalszych etapach projektu zweryfikowano oraz przygotowano rozwiązania na wszystkie powyższe wnioski, następnie przystąpiono do sporządzenia projektu wykonawczego.

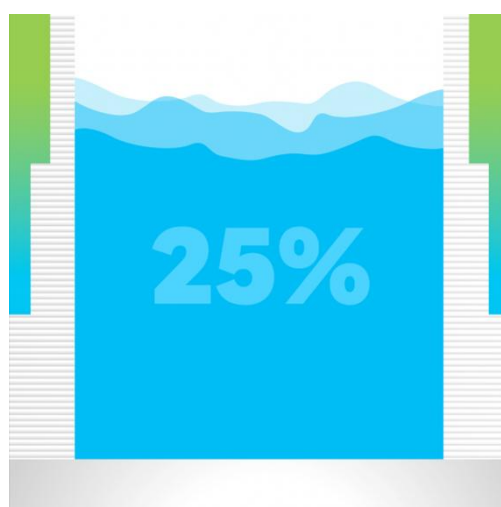
W ramach przeprowadzonych burz mózgów zidentyfikowano kolejny możliwy skok technologiczny dla technologii druku betonu – kiedy możliwe będzie wielkoskalowe drukowanie elementów nadwieszonych, pozwalających na drukowanie kopuł dachowych bez konieczności wykonania szalunku podtrzymującego. Zagadnienie zostało określone jako wymagające szczegółowych badań i wieloletnich przygotowań po stronie badawczo-rozwojowej przez co nie zastosowano go w przedstawionym projekcie.

c. Projekt wykonawczy

Projekt wykonawczy był rezultatem pełnej integracji danych geometrycznych, wyników analiz MES oraz możliwości technologii druku 3D. W ostatecznym rozwiązaniu zdecydowano się na zwężanie ścian ku górze, co umożliwiło znaczną oszczędność materiałową. Grubość ścian wynosiła 25 cm w dolnych 2 metrach konstrukcji, następnie 20 cm w środkowych 2 metrach konstrukcji oraz 15 cm w najwyższych 3 metrach konstrukcji – graficznie pokazano to na rysunku 3. Zastosowane rozwiązanie wpłynęło nie wpłynęło na funkcjonalność i przydatność zbiornika, a pozwoliło na redukcję ilości zastosowanego materiału o 25%.



Rysunek 2. Przykład wizualizacji różnych naprężeń i przemieszczeń w ścianach zbiornika



Rysunek 3. Graficzne przedstawienie zmniejszenia grubości ścian zbiornika

Projekt został wielokrotnie przeliczony, z zachowaniem wyższych niż wymagane współczynników bezpieczeństwa, wynikających z braku masowej skali realizacji podobnych obiektów. Pomimo relatywnie prostej geometrii, konstrukcja została dodatkowo zoptymalizowana tak, by umożliwić szybkie i bezpieczne drukowanie, z uwzględnieniem trajektorii ruchu głowicy drukującej, czasu międzywarstwowego i innych zmiennych procesowych.

Ostateczny projekt zawierał pełną dokumentację inżynierską, opracowaną przez uprawnionego projektanta i zatwierdzoną przez inspektora nadzoru inwestorskiego. Nie zawierał innych drukowanych elementów poza ścianami zbiornika. Złożenie kompletnej dokumentacji trwało około dwóch miesięcy — możliwe było to dzięki wcześniejszym pracom koncepcyjnym oraz sprawnej współpracy wszystkich zaangażowanych stron.

5. Wybór i testy mieszanki betonowej

W technologii druku betonu 3D sukces całego procesu zależy w znacznej mierze od mieszanki — to ona odpowiada za nośność struktury, stabilność geometryczną i możliwość drukowania betonu [3]. Mieszanka do druku musi spełniać jednocześnie kilka wymagań ponad te, którymi charakteryzują się tradycyjne betony — wytłaczalność, drukowalność, jakość druku czy zdolność do przenoszenia obciążeń przed wiązaniem [3]. Jednocześnie mieszanka musi spełniać tradycyjne wymagania stawiane betonom — wytrzymałość, trwałość, pompowalność. Do wydruku zbiornika w Barczewku zastosowano mieszankę Holcim TectorPrint, opracowaną z myślą o technologii 3D i stale rozwijaną przez Holcim. W trakcie analizy wzięto pod uwagę 3 możliwe rozwiązania wytwórcze wykorzystujące ten materiał: gotowa suchej zaprawy, którą trzeba tylko wymieszać z wodą, mieszanka betonowa produkowana na węźle betoniarskim oraz mobilny mieszalnik na terenie budowy wykorzystujący kruszywo lokalne oraz premix spoiwowy. Wybierając konkretne rozwiązanie kierowano się czynnikami materiałowymi, elastycznością rozwiązania, pracochłonnością, wcześniejszymi doświadczeniami oraz gotowością do wdrożenia przemysłowego. System oparty na gotowej zaprawie określono jako zbyt pracochłonny przy wymaganej ilości materiału (ponad 70 ton zaprawy), oparty na kruszywie o relatywnie małej frakcji pomimo wielu wcześniejszych doświadczeń. System mieszanki produkowanej na wytwórni betonowej wyeliminowano ze względu na mniejszą elastyczność przy pierwszym tego typu projekcie — dostawa po kilka m³ w jednej partii. Przyjęte rozwiązanie — wykorzystanie węzła mobilnego na placu budowy pozwalało skorzystać z zalet obu rozwiązań, natomiast miało swoje ograniczenia. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania możliwy był wydruk z betonu o uziarnieniu do 8 mm („prawdziwy” beton), wysoka elastyczność produkcji i możliwość reagowania na zmiany na placu budowy, mieszanka o bardzo wysokiej stabilności parametrów oraz ograniczenie pracochłonności — cała ciężka praca fizyczna była wykonywana przez maszyny.

Analiza, która została przeprowadzona po wstępnym projekcie pozwoliła określić jakie wymagania wytrzymałościowe beton musi spełniać. Ze względu na zastosowane zbrojenie rozproszone, określono wymaganą klasę wytrzymałości na ściskanie betonu oraz resztkową wytrzymałość na zginanie. W ramach wstępnej analizy dostępnych rodzajów zbrojenia rozproszonego analizowano możliwość zastosowania włókien

stalowych lub polimerowych. W ramach projektu zwrócono uwagę na oczywiste parametry takie jak spełnienie wymagań wytrzymałościowych, natomiast zwrócono uwagę także na bardzo nieoczywiste czynniki – zastosowane włókna są wystawione na działanie czynników zewnętrznych, dlatego nie można było zastosować zwykłych włókien stalowych, trzeba było wykorzystać włókna stalowe galwanizowane. Ponadto grupa Holcim przeprowadziła badania wytrzymałościowe różnych typów włókien w betonie drukowanym [2]. Wyniki wykazały najwyższą przydatność włókien stalowych, które wybrano do przedstawianego projektu.

Po doborze składników przystąpiono do projektowania mieszanki betonowej. Specyfikacja obejmowała beton odpowiadający klasom ekspozycji: XC4, XA1, XF1 o klasie wytrzymałości C40/50 oraz wytrzymałości resztkowej $F_{R3} > 5,0$ MPa. Dodatkowo ze względu na drukowanie danego betonu postawiono wymagania związane z tym procesem:

- pompowalność pompą tłokową – konsystencja po 5 minutach od wymieszania materiału mierzona metodą opadu stożka powinna wynosić pomiędzy 150-200 mm.
- wytłaczalność i drukowalność – mieszanka musiała umożliwiać drukowanie w sposób ciągły, tak aby kolejne warstwy łączyły się ze sobą, ta właściwość była na bieżąco kontrolowana w sposób organoleptyczny
- jakość wydruku – szczególnie niedopuszczalne były nieciągłości struktury drukowanego materiału
- zdolność do przenoszenia obciążeń warstw drukowanych wyrażona jako pionowa prędkość drukowania – minimum 0,25 m/godzinę
- czas otwarty mieszanki w 10oC – minimum 45 minut, w tym czasie drukowane na sobie warstwy powinny połączyć się ze sobą bez utworzenia „zimnego styku”
- stabilność mieszanki oraz tolerancje na różnego rodzaju niedoskonałości składników

Wymienione właściwości zostały dodatkowo opisane w następnym rozdziale ze względu na ich ścisłe połączenie z procesem drukowania betonu.

Całość procesu projektowania mieszanki betonowej oraz jej składu nie jest przedstawiony w artykule ze względu na tajemnicę przedsiębiorstwa. Nadmienić można jedynie, że zastosowano układ wieloskładnikowy oparty na spoiwie cementowym, wykorzystujący lokalne kruszywo o uziarnieniu 0/8 mm. Warto dodać, że w obliczu braku norm opisujących metody badawcze tych specyficznych parametrów grupa Holcim zastosowała autorskie metody bazujące na praktycznym wykorzystaniu materiału.

W trakcie testów laboratoryjnych i prób poligonowych analizowano również wpływ warunków atmosferycznych — temperatura i wilgotność mają istotny wpływ na zachowanie świeżego betonu, dlatego procedury robocze były dostosowywane do warunków lokalnych na placu budowy. Przeprowadzono również symulacje awaryjne

— np. zatrzymanie drukowania na określony czas i jego ponowne uruchomienie — aby zweryfikować zachowanie się materiału w przypadku przerw technologicznych.

6. Testy procesu drukowania

Przed rozpoczęciem właściwego wydruku przeprowadzono szereg testów technologicznych, których celem było dopracowanie kluczowych parametrów procesu oraz potwierdzenie wykonalności założeń projektowych w warunkach rzeczywistych. Poza testami laboratoryjnymi przeprowadzono wielkoskalowe testy na pełnym docelowym zestawie, który został następnie wykorzystany na budowie. Testy przeprowadzono w siedzibie dostawcy drukarki, firmie COBOD. Druk 3D z betonu to nie tylko konstrukcja, ale przede wszystkim precyzyjne zarządzanie materiałem, czasem i technologią układania, dlatego testy miały charakter wielowymiarowy i obejmowały:

a. Wydajność

Pierwszym etapem była weryfikacja możliwej do osiągnięcia wydajności wężła mobilnego. Podczas wyboru metody przygotowywania mieszanki betonowej ten aspekt został wskazany jako ograniczający prędkość wydruku całej konstrukcji, dlatego podjęto próby dotyczące zmaksymalizowania go. Standardowy układ mieszający ma wydajność ok. 0,8 m³/godzine, jednak zastosowanie odpowiedniej receptury oraz modyfikacja układu pompującego o powiększenie zbiornika na mieszankę betonową pozwoliło na zwiększenie wydajności do 1,2 m³/godzine. Wiązało się to z jednak z koniecznością przechowywania mieszanki w zbiorniku pośrednim pompy przez około 15 minut. Między innymi z tego powodu czas otwarty mieszanki musiał wynosić minimum 45 minut, a szczególności mieszanka nie mogła wykazywać znaczącej utraty konsystencji w tym czasie. Na przygotowanym wcześniej stanowisku testowym drukowano próbne fragmenty ścian o docelowych wymiarach – szerokości warstwy – do 25 cm i grubości warstwy – około 5 cm.

b. Włókna i reologia mieszanki

Z uwagi na zastosowanie zbrojenia rozproszonego, niezwykle istotnym elementem były testy dotyczące zachowania włókien w mieszance. Badano m.in.:

- jednorodność rozprowadzenia włókien stalowych,
- ich wpływ na reologię i pompowalność materiału,
- ich wpływ na gromadzenie się materiału w strefach martwych głowicy drukującej
- ich wpływ na jakość wydruku w tym wygląd ściany po związaniu

Dzięki testom udało się precyzyjnie określić, że założone dozowanie włókien, wyższe niż standardowe, nie wpływało negatywnie na pompowalność, nie powodowało zatorów w układzie drukującym ani nie wpływało negatywnie na pompowalność i jakość wydruku. Wykazano jednak, że konieczne jest częstsze niż zwykle czyszczenie głowic drukujących, tj. czyszczenie co 2 godziny, a nie standardowe 4-6 godzin.

c. Właściwości mechaniczne wydruku

Kluczowym elementem testów było też badanie wydrukowanych wielkoskalowych elementów w celach wykorzystania do badań wytrzymałościowych. Wydrukowano 3 elementy o wymiarach około 0,6x2,3 metra, z których wycięto 20 belek do badania wytrzymałości resztkowej na zginanie oraz 8 walców do badań modułu sztywności i wytrzymałości na ściskanie. Kluczowym elementem planu badawczego było zasymulowanie dłuższej przerwy roboczej i celowe wytworzenie zimnego styku w celu zamodelowania tego elementu w analizie MES. Badania wytrzymałościowe wykazały, że zaprojektowanie właściwości mechaniczne zostały osiągnięte.

7. Wydruk właściwy

Po przeprowadzeniu analiz, testów, złożeniu projektu i uzyskaniu pozwolenia na budowę, przystąpiono do realizacji projektu. W pierwszym etapie wylano płytę fundamentową, po którym rozpoczęto przygotowaniu do drukowania ścian zbiornika. Drukowanie zaplanowano na okres 21-26.10.2025.

a. Przygotowanie placu budowy oraz prac

Plac budowy został odpowiednio zorganizowany pod kątem logistyki materiałowej i dostępu do infrastruktury technicznej. W bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika zorganizowano:

- strefę załadunku i przygotowania mieszanki,
- system pompowania materiału do głowicy drukującej,
- strefy serwisowe i techniczne dla operatorów oraz zespołu inżynierskiego.

Istotnym elementem przygotowania placu było także stworzenie harmonogramu pracy umożliwiającego ciągłość druku. Ponieważ proces warstwowania wymaga określonych odstępów czasowych między kolejnymi przebiegami, logistyka dostarczania materiału oraz koordynacja personelu musiały być zsynchronizowane z dokładnością co do minuty. Plan pierwotny zakładał wydruk ciągły w systemie trzymianowym 24/7.

b. Rozstawienie drukarki

Proces rozpoczął się od rozstawienia systemu drukującego COBOD BOD2. Drukarka ta składa się z 4 słupów oraz 2 belek, na których zamontowana się głowica drukująca z drugim zbiornikiem pośrednim. Szczegóły tego rozwiązania dostępne są w materiałach COBOD. Każdy ze słupów został ustawiony na prefabrykowanych stopach betonowych rozstawionych dookoła płyty fundamentowej. Drukarka została rozstawiona w ciągu 3 dni, w ciągu których wykonano także pełną kalibrację urządzenia, obejmującą weryfikację geometrii torów prowadzących, kontrolę poziomowania drukarki, test precyzji poruszania się głowicy i zgodności z modelem BIM zbiornika. Obsługa drukarki była prowadzona przez zespół COBOD.

c. Wydruk

Ostateczne testy materiałowe oraz spotkanie zespołu realizującego projekt odbyło się w poniedziałek 21.10.2024. Na miejsce wykonano pierwsze zaroby w docelowym układzie mieszająco-pompującym w celu ostatecznej korekty i weryfikacji przygotowanej receptury. Po przygotowaniu mieszanki betonowej potwierdzono parametry reologiczne oraz parametry wymagane do drukowania.

Właściwy druk ścian zbiornika rozpoczął się 22.10.2024 w godzinach porannych. Wydruk trwał 38 godzin aktywnego druku, zrealizowanego w ciągu 5 dni roboczych. Pierwotny plan zakładający wydruk ciągły 24/7 okazał się trudny do wykonania już pierwszego dnia i odstąpiono od niego. Głównymi przyczynami były początkowy brak zgrania wszystkich zespołów, obciążenie fizyczne i psychiczne pracy w godzinach nocnych dla osób na co dzień nie realizujących tego typu pracy. Szczególnie ostatnie dni drukowania udowodniły jednak, że po zgraniu się zespołów roboczych złożonych ze specjalistów z różnych firm i utrwaleniu schematów postępowania możliwy byłby wydruk w ciągu 2 dni po 2 zmiany.

Zespół roboczy składał się z 5 osób – operatora drukarki (de facto sterującego komputerem), operatora węzła mobilnego i pompy, operatora ładowarki, operatora mieszanki (osoba pełniąca funkcję kontroli jakości mieszanki) oraz wolnego pracownika, który był potrzebny w niektórych momentach wymagających dodatkowych rąk do pracy.

Po zaniechaniu pracy trzymianowej, zdecydowano, aby drukowanie kończyć w momencie koniecznego odpoczynku fizycznego członków zespołu drukującego w danym momencie bez możliwości zmiany na osoby wypoczęte lub poważniejszych problemów z wydrukiem, które skutkowały koniecznością dłuższej przerwy technicznej. Kolejne dni wykazywały ciekawe problemy techniczne, które powodowały konieczność kończenia „dniówki”. Zostały one wskazane poniżej w kolejności chronologicznej i opisane:

- zapchanie systemu pompującego – wydarzyło się poprzez brak przetestowanych w praktyce schematów pomimo przyjętych założeń dotyczących czyszczenia systemu. Przerwa związana z regularnym czyszczeniem dyszy przedłużyła się do ponad godziny, co spowodowało konieczność rozpoczęcia procesu czyszczenia systemu podającego materiał. Dalsze próby wyczyszczenia nie przyniosły pożądaných efektów, co doprowadziło do całkowitego zapchania węży podających mieszankę. Następnego dnia udało się odblokować węże oraz poprawiono schematy czyszczenia systemów. W następnych dniach problem nie wystąpił, a przyjęte działania naprawcze okazały się skuteczne.
- Problem mechaniczny śruby – nastąpiła mechaniczna usterka śruby w głowicy drukującej. Ze względu na porę dnia – wczesne godziny poranne, po całonocnym drukowaniu zdecydowano zakończyć druk w danej sesji i na spokojnie wymienić element następnego dnia.

- Zawartość grubych kamieni w kruszywie o średnicy ok. 50-60 mm – kruszywo dostarczone w bigbagach zawierało pojedyncze kamienie o dużej średnicy, które blokowały się w ekstruderze powodując konieczność dłuższego czyszczenia głowicy. Jako działania przyjęto wolniejsze wsypywanie kruszywa z bigbagów do zasobnika z dokładnym oglądaniem sypiącego się kruszywa.

Poza wskazanymi powyżej problemami technicznymi, w trakcie wydruku nie natrafiono na poważniejsze problemy, które mogły utrudniać drukowanie. Wszystkie problemy zostały skutecznie rozwiązane dzięki obecności zespołów Holcim, COBOD i Globtank na miejscu. Każda sytuacja awaryjna była dokumentowana i analizowana w kontekście przyszłych projektów — co pozwoliło stworzyć solidny zbiór dobrych praktyk do zastosowania przy kolejnych realizacjach. Wydrukowane ściany pokazano na rysunku 4 poniżej.



Rysunek 4. Widok wydrukowanych ścian zbiornika.

Warto nadmienić, że w związku ze zmianą harmonogramu prac z 3-zmianowego na 1-zmianowy ostatni dzień drukowania musiał zostać odłożony o poprzednich o około 2 tygodnie. Pomimo tak długiej przerwy w wydruku i obecności na budowie, ostatniego dnia osiągnięto najbardziej wydajny wydruk, w ocenie pracujących w wyniku lepszego zgrania zespołu oraz wspólnej praktyki.

Należy podkreślić opinię, która wydaje się kluczowym elementem drukowania betonu – kiedy drukowanie betonu wydaje się nudne oraz jest uczucie, że nic się nie dzieje, wydruk idzie najsprawniej.

d. Wykończenie zbiornika oraz odbiory

W następujących po wydruku tygodniach zakończono pozostałe prace związane ze zbiornikiem – hydroizolacji i izolacje termiczne, montaż dachu oraz dodatkowych instalacji. Kompletny zbiornik został pokazany na rysunkach 5 i 6. W marcu 2025 zbiornik został zalany wodą, a następnie przeprowadzono testy szczelności. Na podstawie pozytywnych testów zbiornik został odebrany stanowiąc pierwszy obiekt budowlany wydrukowany w technologii druku 3D betonu w Polsce.



Rysunek 5. Wygląd kompletnego zbiornika



Rysunek 6. Zbliżenie na warstwowy układ betonu na ścianach

8. Wnioski z wydruku

a. Oszczędność materiałowa

Jednym z najbardziej mierzalnych efektów wdrożenia technologii druku 3D w projekcie zbiornika była redukcja zużycia materiału. Dzięki analizom MES i elastyczności geometrycznej, jaką daje drukowanie warstwowe, możliwe było **stopniowe zwężenie ścian zbiornika ku górze**, bez utraty nośności konstrukcji. W tradycyjnej technologii tak skomplikowane rozwiązanie jest wysoce trudne do zrealizowania, a przez to nieopłacalne.

Zastosowanie druku umożliwiło precyzyjne dopasowanie grubości ściany do rozkładu ciśnienia hydrostatycznego. Efektem tego była redukcja zużycia mieszanki betonowej o około **25%** w porównaniu do odpowiednika wykonanego metodą konwencjonalną. To nie tylko oszczędność finansowa, ale przede wszystkim **ograniczenie śladu węglowego**, co w kontekście strategii dekarbonizacji budownictwa ma kluczowe znaczenie.

b. Oszczędność czasu

Wydruk zbiornika o wysokości 7 metrów i średnicy 7,64 metra trwał zaledwie **38 godzin aktywnego druku**, rozłożonych na pięć dni roboczych. W porównaniu do czasu wykonania zbiornika żelbetowego o podobnych parametrach, oznacza to potencjalne **skrócenie czasu realizacji o 40–50%**, przy założeniu odpowiedniego tempa organizacji prac towarzyszących. Znaczące skrócenie czasu drukowania nastąpi w przypadku zastosowania mieszanki betonowej produkowanej na stacjonarnym węźle betoniarskim, co umożliwi 4-krotnie szybszy wydruk. W trakcie wydruku ostatnich warstw, gdy nie było konieczności oczekiwania na kolejną partię materiału wyprodukowanego na węźle mobilnym, potwierdzono możliwość 4-krotnie szybszego wydruku. Czynnikiem ograniczającym była wydajność węzła mobilnego.

Szybszy proces nie oznaczał obniżenia jakości – automatyzacja zapewniła stały poziom precyzji, powtarzalność każdej warstwy oraz pełną kontrolę nad przebiegiem procesu. Czas zaoszczędzony na pracach szalunkowych, zbrojeniowych i betoniarskich przełożył się bezpośrednio na szybsze udostępnienie obiektu do dalszych prac.

c. Zaangażowanie siły roboczej

Jednym z głównych wyzwań w dzisiejszym budownictwie jest malejąca dostępność wykwalifikowanej kadry wykonawczej. Technologia druku 3D minimalizuje to ryzyko, ponieważ proces budowy odbywa się z wysokim udziałem automatyzacji. Na opisywanym projekcie, 1 brygada robocza składała się z 5 osób. Dodatkowy potencjał zastosowania betonu z typowego węzła betoniarskiego pozwoliłby ograniczyć ilość osób do 3 – operatora drukarki, operatora mieszanki (kontrola jakości dostarczanej mieszanki) i pompy oraz wolnego pracownika.

Dzięki temu ograniczono udział typowych prac fizycznych — takich jak montaż szalunków czy ręczne układanie betonu — do absolutnego minimum. To kierunek, który wpisuje się w potrzeby rynku: **mniej ludzi na budowie, więcej wartości w technologii**.

d. Koszty wydruku

Przedstawiony projekt nie był tak efektywny kosztowo jak rozwiązanie tradycyjne. Łączne koszty wykonania zbiornika były prawie dwukrotnie wyższe niż technologii tradycyjnej. W tą różnicę składało się wiele czynników, które wynikały z prototypowego rodzaju inwestycji. Realizacja danego projektu pozwoliła jednak oszacować koszt

takich projektów w przyszłości, po przejściu na model codziennej pracy z drukowaniem betonu. Główne czynniki, które wpłynęły na wyższy wynik kosztowy to: zaangażowanie niewykorzystanych 3 zmian, wykorzystanie węzła mobilnego, który wymagał dodatkowo 2 osób do obsługi, model biznesowy wynajmu drukarki (a nie zakup/leasing), wydajność węzła mobilnego, który można zamienić na beton z tradycyjnego betoniarni. Analiza modelu zakładającego rozwiązania powyższych punktów pozwala oszacować koszty realizacji zbiorników betonowych na podobnym poziomie do metody tradycyjnej.

e. Przyszłość

Zrealizowany projekt stanowi punkt zwrotny dla wdrożenia technologii druku betonu 3D w Polsce. Pokazaliśmy, że możliwe jest wykonanie w pełni funkcjonalnego, dużego obiektu infrastrukturalnego przy zachowaniu wszystkich norm jakości, szczelności i trwałości. Co najważniejsze — nie był to projekt demonstracyjny, ale realna konstrukcja użytkowa, zrealizowana w prawie zamówień publicznych.

Na podstawie doświadczeń z Barczewka planowany jest dalszy rozwój technologii w trzech kierunkach:

1. **Skalowanie** – realizacja większych obiektów, w tym zbiorników retencyjnych, zbiorników na biogaz.
2. **Optymalizacja** – dalsze redukcowanie ilości prac oraz zaangażowanych pracowników poprzez zastosowanie materiału z tradycyjnego węzła betoniarskiego
3. **Komercjalizacja** – budowanie modelu ofertowego, który pozwoli klientom publicznym i prywatnym zamawiać obiekty drukowane w sposób tak samo naturalny, jak dziś zamawiają konstrukcje żelbetowe.

Zbiornik w Barczewku to dowód, że **druk 3D w betonie to nie przyszłość – to już teraźniejszość**. Holcim, jako lider tej technologii w Polsce, otwiera nowy rozdział w sposobie myślenia o budownictwie: szybszym, inteligentniejszym i bardziej zrównoważonym.

Bibliografia

[1] Baz, B. A., Nana, W., Regnault de la Mothe, L., Florentin, J., Ouedraogo, K. A. J., Cardia, G., ... & Lombois-Burger, H. (2024). Structural behavior of 3D printed load bearing elements. Digital Concrete 2024-Supplementary Proceedings, 2024.

[2] Nana, W. S. A., Baz, B. A., Blachier, C., Peraud, M., Regnault de la Mothe, L., Zhang, Q., & Lombois-Burger, H. (2024). Mechanical performance of 3D Printed fiber reinforced concrete. In D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, & F. Herding (Eds.), Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings. Digital Concrete 2024. 4th RILEM

International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 4th to 6th September 2024 - Munich, Germany.

[3] Zieliński, A., & Skibicki, S. Wpływ składu kompozytów cementowych wykonanych w technologii druku 3D na rozwój odkształceń skurczowych. Dni Betonu 2023, 2023.

dr inż. Julita Krassowska¹, dr inż. Paweł Wolka², dr inż. Adam Kłak³, dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB¹

¹Politechnika Białostocka

²Astra Technologia Betonu sp. z o.o.

³Politechnika Świętokrzyska

Rozwój procesu pęknięcia i ocena właściwości mechanicznych betonów zbrojonych włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi

Fracture Process Zone Development and Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Concrete with Basalt, Carbon, and Polymer Fibers

Streszczenie

W pracy przeanalizowano proces pęknięcia oraz właściwości mechaniczne betonu zbrojonego włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi, wykorzystując testy zginania trójpunktowego i technikę DIC. Badano wpływ rodzaju włókien (0,3% obj.) na propagację rys, redystrybucję naprężeń i zdolność pochłaniania energii. Analiza wyników badań wykazała istotne różnice w przebiegu wykresów obciążenie P vs rozwarście wylotu szczeliny pierwotnej CMOD i w zachowaniu po osiągnięciu obciążenia maksymalnego. Betony z włóknami bazaltowymi i węglowymi charakteryzowały się kruchym pękaniem, podczas gdy beton z włóknami polimerowymi wykazywał efekt quasi-umocnienia odkształceniowego oraz większą podatność na deformacje (CMOD $\sim 3,5$ mm wobec $\sim 1,0$ mm dla betonów z włóknami bazaltowymi i $\sim 0,8$ mm dla betonów z włóknami węglowymi). Przekładało się to na wyższą resztkową wytrzymałość na zginanie f_{RI} (0,9 MPa vs $\sim 0,2$ MPa i $\sim 0,4$ MPa). Mimo porównywalnego zasięgu strefy procesowej FPZ, intensywność odkształceń ε w tej strefie była największa w przypadku betonu z włóknami bazaltowymi, a najmniejsza w przypadku betonu z włóknami polimerowymi, co wskazuje na lepszą redystrybucję naprężeń i kontrolę uszkodzeń w przypadku tego ostatniego. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają znaczenie doboru włókien dla poprawy odporności na pęknięcie i trwałości betonu.

Abstract

The paper analyses the fracture process and mechanical properties of concrete reinforced with basalt, carbon and polymer fibres using three-point bending tests and DIC technique. The influence of fibre type (0.3 vol.%) on crack propagation, stress redistribution and energy absorption capacity was investigated. Analysis of the test results showed significant differences in the load P vs crack mouth opening displacement CMOD curves and in the behaviour after reaching the maximum load. Concretes with basalt and carbon fibres were characterised by brittle fracture, while concrete with polymer fibres showed a quasi-strain hardening effect and greater susceptibility to deformation (CMOD ~ 3.5 mm vs. ~ 1.0 mm for concretes with basalt fibres and ~ 0.8 mm for concretes with carbon fibres). This resulted in a higher residual flexural strength f_{RI} (0.9 MPa vs. ~ 0.2 MPa and ~ 0.4 MPa). Despite the comparable extent of the FPZ process zone, the strain intensity ε in this zone was the highest

for concrete with basalt fibers and the lowest for concrete with polymer fibers, which indicates better stress redistribution and damage control in the case of the latter. The results of the conducted tests confirm the importance of fiber selection for improving the crack resistance and durability of concrete.

1. Wprowadzenie

Wzrost wymagań stawianych nowoczesnym konstrukcjom betonowym w zastosowaniach takich jak infrastruktura transportowa, obiekty przemysłowe czy budownictwo na terenach sejsmicznych skłania do poszukiwania materiałów o podwyższonej odporności na pękanie oraz lepszych właściwościach energochłonnych. Klasyczne zbrojenie stalowe, choć efektywne, niesie ze sobą ryzyko korozji i ogranicza kształt elementów. Zatem, alternatywą stają się kompozyty betonowe wzmacniane włóknami - włóknobetony. Ich zaletą jest rozproszone wzmocnienie matrycy betonowej, co przekłada się na opóźnienie inicjacji rys i ograniczenie szybkości propagacji pęknięć.

W ostatnich dekadach szeroko badano wpływ włókien stalowych na wytrzymałość na zginanie, odporność na uderzenia czy odporność na zmęczenie betonu [1–3]. Jednakże rosnące wyzwania środowiskowe oraz konieczność redukcji zużycia stopów żelaza skłaniają do wprowadzenia włókien o różnym pochodzeniu i właściwościach mechanicznych. Włókna bazaltowe, wytwarzane z naturalnej skały wulkanicznej, charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i dużą odpornością chemiczną, a przy tym są odporne na korozję i mają stosunkowo niską cenę [4–6]. Włókna węglowe znane są z wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, wysokiej wartości modułu Younga oraz doskonałej przewodności cieplnej i małej masy własnej, co wpływa na poprawę właściwości dynamicznych i sprężystości kompozytu [7,8]. Z kolei włókna polimerowe (np. aramidowe czy polipropylenowe) oferują dużą elastyczność i odporność na zmęczenie materiału, jednocześnie nie podlegając korozji [9–11].

Właściwością betonu, na którą dodatek włókien ma największy wpływ, jest wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. W prawidłowo wykonanym elemencie włóknobetonowym, poddanym zginaniu, pojawienie się rys następuje przy większych obciążeniach niż w przypadku elementu konstrukcyjnego z betonu zwykłego. Pojawienie się pierwszych mikrorys prowadzi, w kolejnym etapie, do równomiernego zarysowania elementu na długości. Związane jest to ze współpracą włókien i matrycy cementowej. Związek włókno-matryca jest możliwy dzięki wzajemnej przyczepności. Włókna równomiernie rozłożone w całej objętości betonu przekazują naprężenia powstające w miejscu pęknięcia na większy obszar, w ten sposób zmniejszając koncentrację naprężeń w wierzchołku pęknięcia. Zamiast skupionych rys o znacznej rozwartości uzyskujemy system mikrorys mniej szkodliwy dla konstrukcji ze względu na trwałość. Nawet po wystąpieniu rys o znacznej rozwartości, element nadal ma zdolność do przenoszenia obciążeń. Mechanika pękania w ujęciu liniowo-sprężystym nie może być stosowana do betonów zbrojonych włóknami z powodu występowania strefy procesowej FPZ (*fracture proces zone*), która wprowadza nieliniowość do mechanizmu zniszczenia [12–14]. To właśnie w obrębie strefy FPZ dochodzi do rozwoju mikropęknięć, ich koalescencji i przejścia w makropęknięcia, co bezpośrednio decyduje o nośności resztkowej, zdolności pochłaniania energii oraz trwałości elementu betonowego po zarysowaniu. Charakterystyka FPZ — jej długość, rozkład odkształceń i intensywność uszkodzeń — ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego opisu i modelowania mechanizmu pękania betonu zbrojonego włóknami. Im bardziej rozproszony i kontrolowany jest proces rozwijania się FPZ, tym beton wykazuje większą ciągliwość i zdolność do przenoszenia obciążeń w fazie pokrytycznej, co jest istotne w konstrukcjach wymagających wysokiej odporności na pękanie i długotrwałej niezawodno-

ści. Dlatego badania nad rozwojem FPZ są kluczowe dla przewidywania zniszczenia betonów zbrojonych włóknami [15–18].

Przez ostatnie dekady technika cyfrowej korelacji obrazu (DIC) zyskała szerokie zastosowanie w eksperymentalnej mechanice materiałów [19,20]. W trakcie badań materiałów quasi-kruchych, takich jak beton czy ceramika, DIC pozwala na precyzyjne mapowanie przemieszczeń i odkształceń powierzchniowych, co ułatwia wykrywanie inicjacji pęknięć oraz analizę ich kinetyki [21–23]. W ostatnich latach wprowadzenie wysokorozdzielczych kamer cyfrowych oraz zaawansowanych algorytmów korelacji obrazu znacząco poprawiło dokładność i powtarzalność pomiarów, umożliwiając badania strefy FPZ z nieosiągalną wcześniej rozdzielczością zarówno w skali mikro-, jak i makrostrukturalnej. Dotychczas jednak porównawcze badania FPZ betonów z włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi są nieliczne i często ograniczone do standardowych testów zginania.

W celu wypełnienia tej luki badawczej, w niniejszej pracy wykorzystano cyfrową korelację obrazu (Digital Image Correlation, DIC) do precyzyjnego pomiaru przemieszczeń i odkształceń powierzchni próbki podczas testu trójpunktowego zginania belek betonowych z karbem. Technika DIC umożliwia nieniszczącą, wysokorozdzielczą rejestrację map odkształceń oraz śledzenie zmian strefy FPZ w czasie rzeczywistym. Wyniki pozwolą nie tylko na ocenę efektywności poszczególnych rodzajów włókien w opóźnianiu propagacji rys, ale również na optymalizację właściwości kompozytów betonowych o wysokiej trwałości i odporności na uszkodzenia.

2. Założenia i metody badań

2.1. Materiały użyte do badań

Do badań zastosowano cement CEM III/A 42,5 N, wodę wodociągową, piasek naturalny o uziarnieniu do 2 mm, grys wapienny o uziarnieniu 2-8 mm oraz 8-16 mm, superplastyfikator polikarboksyłanowy (PCE) i trzy rodzaje włókien (Tab. 1) tj. bazaltowe, polimerowe i węglowe. Receptury zestawiono w Tabeli 2 i zaprojektowano w taki sposób, aby stosunek wodno-cementowy wynosił 0,49, a objętościowa zawartość włókien w 1 m³ mieszanki betonowej wynosiła 0,3%. Ilość domieszki chemicznej ustalono tak, aby w każdej serii otrzymać zbliżoną konsystencję.

Tabela 1. Parametry zastosowanych włókien

Rodzaj włókien	Bazaltowe 1250 tex	Polimerowe	Węglowe 3K
Długość włókien [mm]	30	24	30
Średnica włókien w wiązce [μm]	15	300	7
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1500	620	4400
Moduł sprężystości [GPa]	65	6	232
Gęstość [kg/m^3]	2600	910	1800

Tabela 2. Receptury mieszanek betonowych użytych do badań

Składniki	Gęstość [kg/m^3]	Mieszanka B [kg/m^3]	Mieszanka P [kg/m^3]	Mieszanka W [kg/m^3]
Cement	3000	320	320	320
Woda efektywna	1000	161	161	161
Kruszywo 0/2 mm	2650	585	585	585
Kruszywo 2/8 mm	2690	688	688	688
Kruszywo 8/16 mm	2700	633	633	633

Superplastyfikator	1050	3,90	3,00	3,50
Włókno bazaltowe	2600	7,80	-	-
Włókno polimerowe	910	-	2,70	-
Włókno węglowe	1800	-	-	5,40

2.2. Metodyka badań

2.2.1. Przygotowanie składników

Wszystkie składniki zważono na wadze laboratoryjnej o dokładności 1g. Zaroby w zależności od objętości wykonywano w mieszalniku laboratoryjnym o cyklu mieszania wymuszonym o pojemności wsadu do 100 dm³. Na wstępie wymieszano składniki stałe: wysuszone kruszywo grube, piasek oraz spoiwo. Składniki te mieszano około 60 sekund po czym dodawano włókna, a następnie część wody zarobowej. W trakcie mieszania dodawano superplastyfikator z pozostałą częścią wody. Wszystkie składniki mieszano ok. 90 sekund. Badania wykonano w laboratorium w temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Po odpowiedniej homogenizacji składników przeprowadzano badania konsystencji, zaformowano próbki kostkowe i pryzmowe w formach zabezpieczonych środkiem antyadhezyjnym. Po rozformowaniu próbki przechowywano w wodzie w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ aż do momentu osiągnięcia wieku badawczego.

2.2.2. Badanie konsystencji mieszanki betonowej

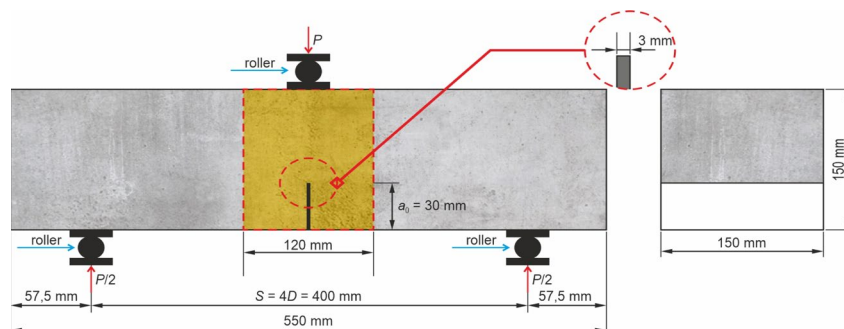
Badanie wykonano według metody opadu stożka zgodnie z normą [PN-EN 206:2014+A2:2021]. Ilość plastyfikatora dobierano w taki sposób aby uzyskać urabialność odpowiednią dla betonu posadzkowego. Dla każdej mieszanki mierzono opad stożka w mm uzyskując wartości dla klasy konsystencji S3 (ok. 100 mm).

2.2.3. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie betonowych próbek sześciennych o boku 150 mm wykonano przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej o zakresie do 3000 kN. Ze względu na zastosowanie cementu CEM III/A 42,5 wytrzymałość określano po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania betonu. Każda seria składała się z trzech próbek. Przebieg i warunki badania były zgodne z PN-EN 12390-3 [24].

2.2.4. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Badanie wykonano zgodnie z procedurą EN 14651:2007 [25]. Wykorzystano elementy próbne o wymiarach 150×150×550 mm z karbem (rysunek 1). Karb typu „U” miał głębokość 30 mm, szerokość 3 mm, a promień zaokrąglenia wynosił około 1,5 mm (Rys. 1). Karby wykonano na 1 dzień przed badaniem, za pomocą piły diamentowej. Serie badawcze liczyły po 3 próbki.



Rys.1. Geometria próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (mm)

Próbki obciążano siłą skupioną w środku rozpiętości, monitorując rozwój pęknięć za pomocą techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC) oraz ekstensometru mierzącego rozwarcie wylotu szczeliny pierwotnej CMOD (*crack mouth opening displacement*). Procedura testowa obejmowała obciążenie do 95% obciążenia niszczącego, następnie cztery cykle odciążenia i ponownego obciążenia, a w końcowej fazie – obciążenie do całkowitego zniszczenia próbki. Obciążenie przykładano automatycznie, a kluczowym parametrem sterującym badaniem była wartość CMOD. Równocześnie ze zmianami szerokości wlotu szczeliny pierwotnej rejestrowano przemieszczenie δ punktu przyłożenia siły do elementu próbnego.

Resztkową wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$ określono według wytycznych PN-EN 14651 [25] ze wzoru:

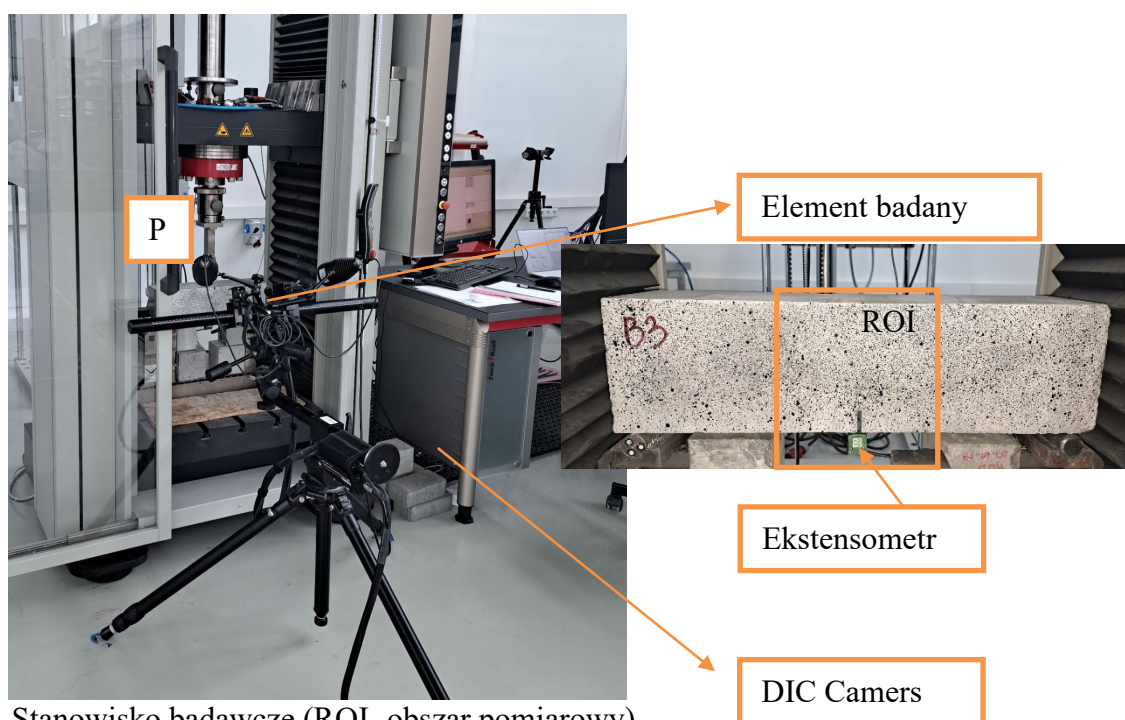
$$f_{R,j} = \frac{3P_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie:

P_j - obciążenie odpowiadające CMOD=CMOD_j [N], przy czym: j = 1: CMOD₁= 0,5 mm, j=2: CMOD₂= 1,5 mm, j = 3: CMOD₃= 2,5 mm, j = 4: CMOD₄= 3,5 mm; l - rozpiętość belki; b - szerokość belki; h_{sp} - odległość między górnym końcem nacięcia a górną krawędzią belki.

2.2.5. Analiza przy wykorzystaniu cyfrowej korelacji obrazu

Aby monitorować proces pęknięcia i ocenić stopień uszkodzenia, zastosowano technikę cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Zestaw pomiarowy składał się z dwóch współpracujących kamer oraz jednostki sterującej. Kamera rejestrowała obrazy obszaru pomiarowego (ROI) z częstotliwością 1 Hz, przy rozdzielczości 5520 × 3680 pikseli i współczynniku skali 5,78 μm/piksel. W tym celu powierzchnia obszaru pomiarowego została pokryta białą farbą jako tło, a następnie losowo nakropiona czarną farbą akrylową. Do lepszego uwidocznienia wzoru speckle zastosowano dodatkowe oświetlenie. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze (ROI- obszar pomiarowy)

3. Omówienie wyników badań

3.1. Konsystencja mieszanki betonowej

Zauważono, że dodatek włókien niezależnie od rodzaju wpływa na pogorszenie urabialności mieszanki betonowej. Analizując wyniki badania konsystencji zanotowano istotne różnice w zapotrzebowaniu na domieszkę superplastyfikatora polikarboksyłanowego w celu zachowaniu tej samej klasy konsystencji mieszanek betonowych. Największej ilości superplastyfikatora wymagała mieszanka z włóknami bazaltowymi, najmniejszej mieszanka z włóknami polimerowymi.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie

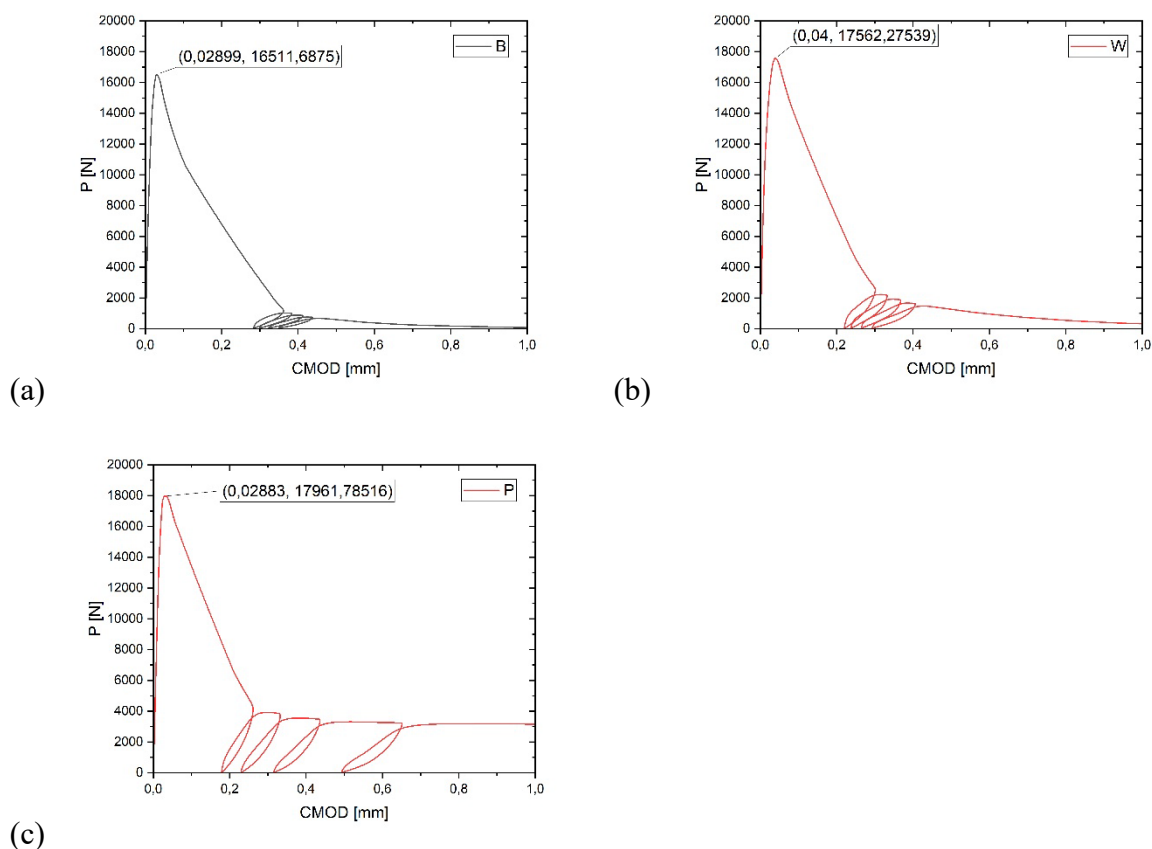
Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w Tabeli 3. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wszystkich betonów z dodatkiem włókien była zbliżona i mieściła się w granicach od 31,9 do 34 MPa, co klasyfikuje wszystkie betony w klasie C25/30. Najwyższą wytrzymałością na ściskanie wykazał się beton z dodatkiem włókien polimerowych a najniższą beton z włóknami bazaltowymi. Zależności te można zauważyć niezależnie od czasu dojrzewania betonu.

Tabela 3. Wartości wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego różne rodzaje włókien

Seria betonu (rodzaj włókien)	Wytrzymałość na ściskanie betonu [MPa]		
	28dni	56 dni	90 dni
Polimerowe	34,0	47,1	80,8
Rozrzut wyników	1,9	4,9	1,5
Odchylenie standardowe	3,7	9,7	2,8
Bazaltowe	31,9	38,9	67,6
Rozrzut wyników	1,3	2,3	2,0
Odchylenie standardowe	2,5	4,4	3,9
Węglowe	32,7	44,8	72,7
Rozrzut wyników	2,8	1,5	2,5
Odchylenie standardowe	5,3	2,9	5

3.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Rysunek 3 przedstawia wykresy zależności obciążenia P w zależności od szerokości rozwarcia szczeliny pierwotnej CMOD dla próbek betonów poddanych zginaniu w układzie trójpunktowym. Na każdym z wykresów zaznaczono wartość maksymalnego obciążenia oraz odpowiadające im wartości rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej CMOD. Tabela 4 przedstawia szczegółowe wyniki badań wszystkich analizowanych betonów, w tym wartości maksymalnego obciążenia P_{max} oraz wartości siły P przy różnych szerokościach rozwarcia szczeliny pierwotnej CMOD (0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm), siłę odpowiadającą granicy proporcjonalności P_{Lk} , a także resztkowe wytrzymałości na zginanie f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} i f_{R4} a także wartość granicy proporcjonalności f_{Lk} . Dane zestawiono osobno dla każdej serii.



Rys. 3. Wykresy zależności P -CMOD: (a) beton z włóknami bazaltowymi (B), (b) beton z włóknami węglowymi (W), (c) beton z włóknami polimerowymi (P). Dla maksymalnych wartości siły P podano odpowiednie wartości CMOD.

Tabela 4. Wartości sił P i wytrzymałości resztkowe na zginanie f_{Rj} badanych betonów

Seria	P_{max}	$P_{CMOD0,5}$	$P_{CMOD1,5}$	$P_{CMOD2,5}$	$P_{CMOD3,5}$	P_{Lk}	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}	f_{Lk}
	N	N	N	N	N	N	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
B	16511,68	599,00	-	-	-	13641	0,19	-	-	-	4,37
W	17562,27	1320,00	-	-	-	9856	0,42	-	-	-	3,15
P	17961,78	2396,99	2167,00	1569,71	1513,54	15371	0,77	0,69	0,50	0,48	4,92

Rysunek 3, przedstawiający zależności obciążenie P -CMOD, prezentuje istotne różnice w zachowaniu badanych betonów w zależności od zastosowanego rodzaju włókien. W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi i węglowymi krzywa rośnie niemal liniowo do osiągnięcia maksymalnego obciążenia, po czym następuje gwałtowny spadek siły, co świadczy o kruchej naturze materiału i ograniczonej zdolności absorpcji energii w fazie pokrytycznej. Beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się największymi wartościami CMOD dla danego obciążenia, co wskazuje na największą deformowalność i stabilne mostkowanie pęknięć, umożliwiające dłuższy i bardziej stabilny okres przenoszenia naprężeń w fazie pokrytycznej. Po osiągnięciu maksymalnego obciążenia, w przypadku betonu z włóknami polimerowymi część opadająca wykresu P -CMOD staje się mniej stroma a rozwarcie szczeliny zwiększa się. Wynika to z efektu mostkowania pęknięć przez włókna, co prowadzi do większej globalnej deformacji podczas zginania oraz znacznego wzrostu resztkowej wytrzymałości

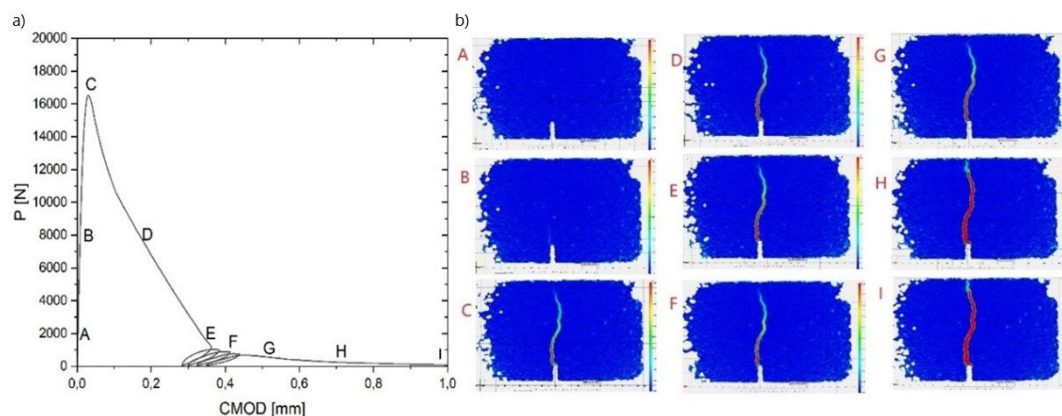
na zginanie w fazie pokrywczącej [32]. Porównanie tych wykresów wskazuje, że wybór rodzaju włókien ma kluczowy wpływ na zachowanie próbki betonu w warunkach zginania.

Analiza wykresów P -CMOD (Rys. 3) oraz danych przedstawionych w Tabeli 4 wskazuje na istotne zmiany parametrów opisujących proces pęknięcia betonu w zależności od rodzaju włókien. W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi (B) granica proporcjonalności (f_{Lk}) wyniosła średnio 4,37 MPa, a resztkowa wytrzymałość na zginanie (f_{Rt}) jest stosunkowo niska (0,19 MPa), co sugeruje, że przy małej zawartości włókien bazaltowych uzyskuje się umiarkowane zwiększenie zdolności przenoszenia naprężeń, jednak ograniczona długość i sztywność tych włókien wpływa negatywnie na efektywność przenoszenia siły w fazie pokrywczącej. W przypadku betonu z włóknami węglowymi (W) obserwuje się nieco większe wartości P_{max} (17562,27 N) oraz znacząco większe wartości siły $P_{CMOD_{0,5}}$ (1320,00 N), co wskazuje na bardziej sprężyste zachowanie materiału przed osiągnięciem maksymalnego obciążenia; resztkowa wytrzymałość na zginanie (f_{Rt}) wyniosła 0,42 MPa, a f_{Lk} 3,15 MPa. Wyższe wartości $P_{CMOD_{0,5}}$ sugerują, że beton z włóknami węglowymi skuteczniej pochłania energię w porównaniu do betonu z włóknami bazaltowymi, umożliwiając większe odkształcenia w fazie przed pęknięciem próbki. Natomiast beton z włóknami polimerowymi (P) charakteryzuje się znacznie większą wartością siły 2396,99 N przy szerokości rozwarcia szczeliny pierwotnej równej CMOD = 0,5 mm, a kolejne etapy rozwarcia szczeliny pierwotnej (CMOD = 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm) wskazują na istotną deformację w fazie pokrywczącej. Pomimo porównywalnych wartości maksymalnych P_{max} (17961,78 N), beton z włóknami polimerowymi osiągnął większą resztkową wytrzymałość na zginanie (f_{Rt} : 0,77 MPa) oraz większą wartość granicy proporcjonalności f_{Lk} (4,92 MPa). Dane te sugerują, że włókna polimerowe skuteczniej zwiększają zdolność betonu do pochłaniania energii pęknięcia oraz umożliwiają lepsze mostkowanie pęknięć.

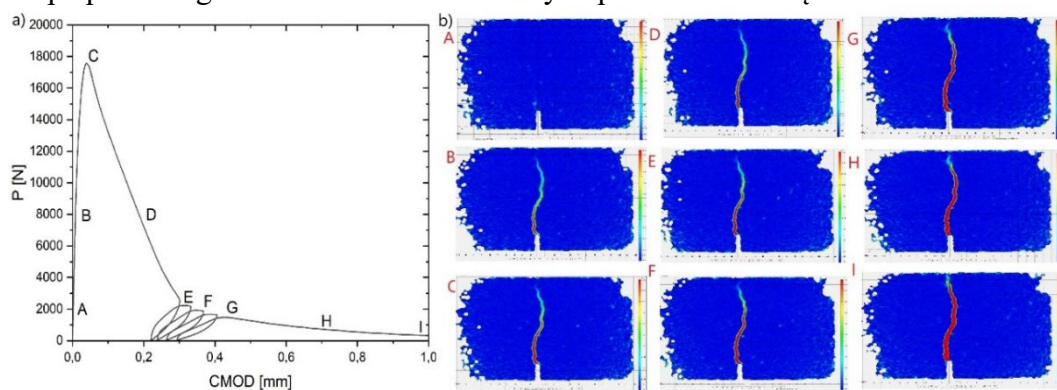
Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy stosunku resztkowych wytrzymałości na zginanie f_{R3}/f_{R1} wynoszącego w przypadku betonów z włóknami polimerowymi od 0,64, można zaklasyfikować ten materiał do klasy ciągliwości 2 (Class 2) zgodnie z kryteriami *fib* Model Code 2010 [26]. Taka klasyfikacja wskazuje, że beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się zdolnością do przenoszenia obciążeń w fazie pokrywczącej. Krzywa siła-CMOD po osiągnięciu maksimum łagodnie opada (*softening*) i utrzymuje istotny poziom resztkowych naprężeń na dłuższym odcinku rozwarcia szczeliny, ale bez pełnego efektu *strain-hardening*. Wiąże się to z wyraźnym efektem quasi-umocnienia odkształceniowego oraz istotnym wzrostem energii absorbowanej podczas procesu pęknięcia w porównaniu do betonu bez włókien. Beton z włóknami bazaltowymi oraz beton z włóknami węglowymi nie mogą zostać sklasyfikowane z uwagi na brak wartości resztkowej wytrzymałości na zginanie f_{R3} .

3.4. Charakterystyka procesu zniszczenia

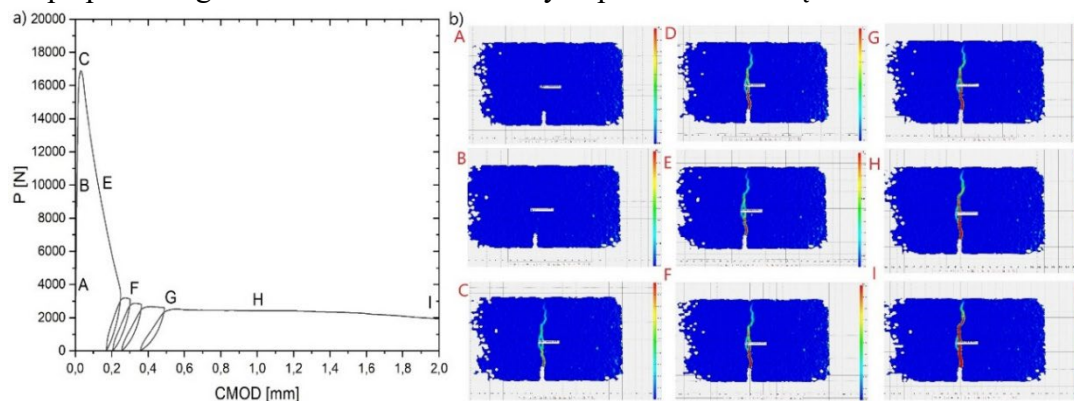
Rysunki 4-6 przedstawiają rozwój strefy pęknięcia w betonach z włóknami bazaltowymi, węglowymi oraz polimerowymi. Zaprezentowano zależności P -CMOD (a) oraz wyniki analizy DIC (b), gdzie pozioma składowa odkształcenia ϵ pozwala najlepiej zidentyfikować cechy procesu pęknięcia. Wykres P -CMOD oraz mapy składowej odkształcenia ϵ przedstawiono dla różnych poziomów obciążenia, odpowiadających punktom A (10 % P_{max}), B (50 % P_{max}), C (P_{max}), D (50 % P_{max}), E (10% P_{max}), F (5% P_{max}), G (2% P_{max}), H (1% P_{max}) oraz I (zniszczenie).



Rys. 4. Proces zarysowania betonu z włóknami bazaltowymi: (a) wykres P –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia ε dla różnych poziomów obciążenia



Rys. 5. Proces zarysowania betonu z włóknami węglowymi: (a) wykres P –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia ε dla różnych poziomów obciążenia



Rys. 6. Proces zarysowania betonu z włóknami polimerowymi: (a) wykres P –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia ε dla różnych poziomów obciążenia

Przebieg procesu zniszczenia belki z betonu z włóknami bazaltowymi przedstawia Rysunek 4. W początkowej fazie (punkt A) w próbce nie obserwowano widocznych odkształceń ani zarysowań, a rozkład odkształceń głównych ε był równomierny. Wraz ze wzrostem obciążenia do około połowy wartości siły maksymalnej (punkt B) pojawiły się lokalne strefy zwiększonego rozciągania w pobliżu nacięcia, co sygnalizowało inicjację mikropęknięć. W punkcie C, odpowiadającym maksymalnemu obciążeniu, nastąpiło utworzenie głównej rysy, wyraźnie widocznej jako intensywnie czerwona strefa na mapie odkształceń. Dalsze zwiększanie rozwarcia szczeliny (punkty D–F) wiązało się z rozwojem i

propagacją rysy ku górnej krawędzi elementu. W kolejnych etapach (punkty G–I) obserwowano utrwalenie się i poszerzenie szczeliny na całej wysokości próbki, przy jednoczesnym znacznym obniżeniu obciążenia. Proces ten odzwierciedla typowe zachowanie betonu w warunkach zginania z kontrolowanym otwarciem rysy, zgodnie z metodologią badania opisaną w normie EN 14651 [25], pozwalając na ocenę zarówno zdolności do przenoszenia obciążeń po zarysowaniu, jak i lokalizacji odkształceń. Szczelina pierwotna osiągnęła rozwarcie maksymalne równe 1 mm (punkt I).

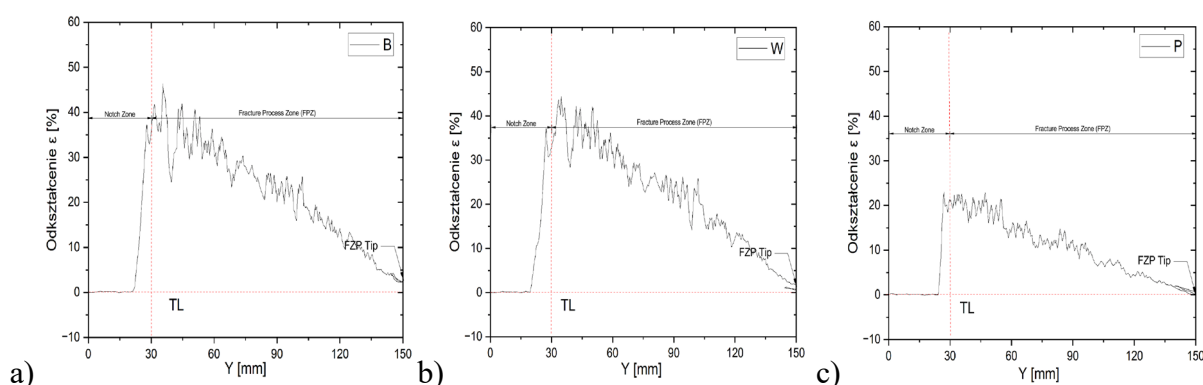
Przebieg procesu zniszczenia belki z betonu z włóknami węglowymi przedstawiono na Rysunku 5. W stanie początkowym (A) materiał pozostawał nienaruszony, a rozkład odkształceń był równomierny. W miarę wzrostu obciążenia do poziomu maksymalnego (punkt C) zaobserwowano lokalne strefy rozciągania w sąsiedztwie nacięcia, wskazujące na inicjację mikropęknięć (B), aż do utworzenia głównej rysy obejmującej całą wysokość elementu. Kolejne etapy (D–G) ukazywały rozwój i stopniową propagację szczeliny, czemu towarzyszyły charakterystyczne lokalne fluktuacje obciążenia widoczne na wykresie, świadczące o zamykaniu i ponownym otwieraniu mikropęknięć. W końcowej fazie (H–I) rozwarcie zwiększało się przy stosunkowo niskim obciążeniu, a maksymalne zarejestrowane rozwarcie szczeliny wyniosło 0,78 mm.

Rysunek 6 przedstawia wyniki badań belki z betonu z włóknami polimerowymi. W stanie początkowym (A–B) próbka pozostawała nienaruszona, a rozkład odkształceń był równomierny. Wraz z osiągnięciem obciążenia maksymalnego doszło do utworzenia głównej rysy (punkt C), po czym nastąpił znaczny spadek obciążenia. Na odcinku D–G widoczne było dalsze rozwijanie i poszerzanie szczeliny, z jednoczesnym występowaniem charakterystycznych wahań obciążenia na wykresie, które świadczyły o cyklicznym otwieraniu i zamykaniu mikropęknięć. W końcowej fazie (H–I) rysa osiągnęła stabilne rozwarcie, przy stosunkowo wysokim poziomie obciążenia, a maksymalne zarejestrowane rozwarcie szczeliny wyniosło 3,55 mm. Takie zachowanie odzwierciedla typową pracę próbki z betonu zbrojonego włóknami, który po zarysowaniu zachowuje zdolność do przenoszenia obciążeń przy znacznych deformacjach.

Można wyróżnić cztery etapy procesu obciążania i odciążania próbki aż do zniszczenia. Pierwszy z nich obejmuje propagację mikropęknięć. Na tym etapie (punkty A, B) odkształcenia ε są równomiernie rozłożone na całym obszarze pomiarowym (ROI), bez wyraźnych koncentracji naprężeń. Mikropęknięcia mogą powstawać w obrębie mikrowklęsłości i stref przejściowych. Niski poziom obciążenia oraz hamujący wpływ kruszywa uniemożliwiają ich łączenie się. W miarę wzrostu obciążenia próbka wkracza w fazę tworzenia pęknięcia, o czym świadczy niewielka strefa koncentracji odkształceń ε tuż nad wierzchołkiem karbu, zauważalna przy obciążeniu odpowiadającym punktowi C (P_{max}). Można to interpretować jako początek makropęknięcia – poziom naprężeń jest już wystarczający do koalescencji mikropęknięć i inicjacji pęknięcia makroskopowego w otoczeniu karbu. Fazę gwałtownego rozwoju pęknięcia widać po przekroczeniu P_{max} , co ilustruje punkt E. Uszkodzenia kumulują się, a makropęknięcia rozszerzają się, prowadząc do zniszczenia próbki. Włókna, łączą brzozy szczeliny i przenoszą naprężenia przez pęknięcie, co obniża koncentrację naprężeń w wierzchołku rysy i spowalnia jej propagację. Efekt mostkowania włókien pozwala zachować relatywnie wysoką siłę przy wzroście CMOD, co prowadzi do zwiększenia odporności na pękanie.

3.5. Rozwój FPZ

W ramach prowadzonych badań, analizowano długość strefy procesowej FPZ (fracture proces zone) dla betonów zbrojonych włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi, aż do momentu osiągnięcia obciążenia maksymalnego. Zgodnie z danymi literaturowymi [13,27,28], za punkt początkowy przyjęto wierzchołek karbu, natomiast koniec FPZ wyznaczano na podstawie danych uzyskanych techniką cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Metoda określania FPZ, oparta jest na analizie skoków poziomego przemieszczenia wzdłuż szeregu linii referencyjnych rozmieszczonych wzdłuż wysokości próbki i umożliwia precyzyjne wskazanie lokalizacji gwałtownych zmian odpowiadających końcowi strefy pęknięcia [29,30]. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 7.



Rys.7. Wykres poziomej składowej odkształcenia głównego ε wzdłuż osi Y dla próbek z betonu a) z włóknami bazaltowymi b) z włóknami węglowymi oraz c) z włóknami polimerowymi, przy maksymalnym obciążeniu

Analiza wyników pomiarów wykazała, że długość FPZ w przypadku wszystkich badanych próbek była zbliżona i sięgała niemal całej wysokości elementu. Natomiast kluczowe różnice dotyczyły intensywności odkształceń głównych ε w obrębie FPZ, co wskazuje na odmienne mechanizmy redystrybucji naprężeń i propagacji uszkodzeń w zależności od rodzaju zbrojenia rozproszonego. Wartości maksymalnych odkształceń głównych ε w rejonie rozwiniętej rysy, uzyskane z analizy DIC odpowiada lokalnej koncentracji przemieszczeń w szczelinie i obrazuje intensywność procesu pęknięcia. Należy podkreślić, że są to odkształcenia rejestrowane w siatce obliczeniowej DIC i opisują rozwarcie szczeliny w stosunku do odległości między punktami pomiarowymi (virtual gauge length).

W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi (Rys. 7a) zaobserwowano największe wartości odkształceń maksymalnych ε , co świadczy o silnej koncentracji uszkodzeń i szybkim postępie rozwoju szczeliny. Podobne zachowanie odnotowano dla betonu z włóknami węglowymi (Rys. 7b), przy czym rozkład deformacji był nieco bardziej rozproszony. Natomiast beton z włóknami polimerowymi (Rys. 7c) charakteryzował się wyraźnie mniejszymi odkształceniami maksymalnymi, co wskazuje na większą zdolność tych włókien do rozpraszania energii i ograniczania intensywności lokalnych deformacji.

Podobne wnioski sformułowali Zhang i inni. [31], którzy wykazali, że obecność włókien syntetycznych (PP i PVA) skutecznie wydłuża strefę FPZ i ogranicza intensywność lokalnych odkształceń w betonie pękającym pod obciążeniem zginającym. Również według Reis i inni [32], kompozyty z włóknami węglowymi i szklanymi wykazują silne oddziaływanie na lokalizację szczeliny, przy jednocześnie bardziej skoncentrowanym rozkładzie odkształceń w porównaniu do kompozytów z włóknami polimerowymi.

Uzyskane różnice w intensywności odkształceń w obszarze FPZ należy interpretować w kontekście mikromechanizmów takich jak przyczepność włókien do matrycy cementowej, mechanizm wyciągania włókien (pull-out) czy potencjalne pękanie włókien.

4. Wnioski

Na podstawie analizy procesu zniszczenia betonów z włóknami bazaltowymi, węglowymi oraz polimerowymi w warunkach trójpunktowego zginania, przy zastosowaniu techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC), sformułowano następujące wnioski:

- Beton z włóknami bazaltowymi jak również beton z włóknami węglowymi wykazują właściwości materiału kruchego, z gwałtownym spadkiem siły po osiągnięciu jej maksymalnej wartości, podczas gdy beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się występowaniem efektu quasi-plastycznego odkształcenia i łagodniejszym przebiegiem opadającej części wykresu P -CMOD, co wskazuje na większą zdolność do pochłaniania energii i kontrolowaną propagację pęknięć.
- Największe wartości CMOD dla danego poziomu obciążenia odnotowano w przypadku próbek z betonu z włóknami polimerowymi, które osiągały rozwarcie szczeliny rzędu 3,5 mm, w porównaniu do ok. 1,0 mm w przypadku betonów z włóknami bazaltowymi i ok. 0,8 mm w przypadku betonów z włóknami węglowymi. Dzięki temu, beton z włóknami polimerowymi utrzymuje zdolność przenoszenia naprężeń przy znacznie większym rozwarcie szczeliny pierwotnej, co skutkuje wyraźnym wzrostem resztkowej wytrzymałości na zginanie — osiągając wartość f_{RI} w przedziale 0,8–1,0 MPa, podczas gdy beton z włóknami bazaltowymi osiągnął jedynie wartość $\sim 0,2$ MPa, a beton z włóknami węglowymi $\sim 0,4$ MPa. Przekłada się to na łagodniejszy przebieg zależności P -CMOD w fazie pokrytycznej i większą zdolnością do pochłaniania energii pękania.
- Proces pękania próbek betonów zbrojonych różnymi rodzajami włókien przebiegał w czterech etapach: od inicjacji mikropęknięć (przy ok. 90 % P_{max}), poprzez formowanie i gwałtowny rozwój makropęknięcia, aż po niestabilną fazę pokrytyczną, w której główna rysa szybko rozszerzała się.
- Analiza FPZ wykazała, że jej długość była porównywalna we wszystkich badanych próbkach i obejmowała niemal całą wysokość elementu. Kluczowe różnice dotyczyły jednak intensywności odkształceń głównych ε w tej strefie, co wskazuje na odmienne mechanizmy redystrybucji naprężeń i rozwoju uszkodzeń w zależności od rodzaju zastosowanych włókien. Najwyższe odkształcenia odnotowano w betonie z włóknami bazaltowymi, nieco niższe w betonie z włóknami węglowymi, natomiast zdecydowanie mniejsze w przypadku betonu z włóknami polimerowymi, co świadczy o skuteczniejszym rozpraszaniu energii i ograniczaniu lokalnych koncentracji odkształceń przez włókna polimerowe.

Badania te zostały dofinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (numer projektu LIDER XIV Nr LIDER14/0206/2023).

Literatura

- [1] H. Aoude, M. Belghiti, W.D. Cook, D. Mitchell, Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with and without Stirrups, *SJ* 109 (2012) 359–368.
<https://doi.org/10.14359/51683749>.
- [2] A.M. Jabbar, M.J. Hamood, D.H. Mohammed, The effect of using basalt fibers compared to steel fibers on the shear behavior of ultra-high performance concrete T-beam, *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021) e00702.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00702>.
- [3] R.N. Swamy, R. Jones, A.T.P. Chiam, Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete I-beams, *ACI Structural Journal* (1993) 103–114.
- [4] T.M. Borhan, Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre | Request PDF, *Materials and Design* (2012) 265–271.
- [5] D.P. Dias, C. Thaumaturgo, Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers, *Cem Concr Compos* (2005) 49–54.
- [6] M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska, Post-cracking behaviour of basalt fibre reinforced concrete, in: *Ponta Delgada (PT)*, 2015: pp. 673–682.
http://katalog.pb.edu.pl/F?func=full-set-set&set_number=006387&set_entry=000012&format=999 (accessed May 6, 2019).
- [7] F. Sayed Ahmad, G. Foret, R. Le Roy, Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Experimental study, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 479–485.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.006>.
- [8] A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry, *Journal of Environmental Sciences-China* 136 (2023) 682–697.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>.
- [9] M.A. Glinicki, Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe, *Cement Wapno Beton R.* 13/75, nr 4 (2008) 184–195.
- [10] J.M. Karwacki, *Betony zbrojone włóknami stalowymi i włóknami syntetycznymi*, *Inżynier Budownictwa* (1995) 80–83.
- [11] J. Qureshi, A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures, *Fibers* 10 (2022) 27.
<https://doi.org/10.3390/fib10030027>.
- [12] Y.S. Jenq, S.P. Shah, A Fracture toughness criterion for concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 21 (1985) 1055–1069. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90009-8).
- [13] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research* 6 (1976) 773–781. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7).
- [14] S. Li, X. Fan, X. Chen, S. Liu, Y. Guo, Development of fracture process zone in full-graded dam concrete under three-point bending by DIC and acoustic emission, *Engineering Fracture Mechanics* 230 (2020) 106972.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106972>.
- [15] A three-frame digital image correlation (DIC) method for the measurement of small displacements and strains, *Measurement Science and Technology* 23 (2012) 105406.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105406>.
- [16] The Integrated Digital Image Correlation Technique Applied to Fracture Mechanics: An Improvement on Crack Detection and Localization, *SciSpace - Paper* (2023) 81–85.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-17467-4_11.

- [17] Deep DIC: Deep Learning-Based Digital Image Correlation for End-to-End Displacement and Strain Measurement, arXiv: Image and Video Processing (2021). <https://scispace.com/papers/deep-dic-deep-learning-based-digital-image-correlation-for-3dczr8qve5> (accessed May 6, 2025).
- [18] A strain mode spectral digital image correlation method for displacement field analysis, *Acta Mechanica Sinica* 39 (2023) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-22430-x>.
- [19] M.A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer Science & Business Media, 2009.
- [20] M.F. Funari, S. Verre, The Effectiveness of the DIC as a Measurement System in SRG Shear Strengthened Reinforced Concrete Beams, *Crystals* 11 (2021) 265. <https://doi.org/10.3390/cryst11030265>.
- [21] Z.L. Xie, H.F. Zhou, L.J. Lu, Z.A. Chen, An investigation into fracture behavior of geopolymer concrete with digital image correlation technique, *Construction and Building Materials* 155 (2017) 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.041>.
- [22] M. Tekieli, S. De Santis, G. de Felice, A. Kwiecień, F. Roscini, Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing, *Composite Structures* 160 (2017) 670–688. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.096>.
- [23] N. Gehri, J. Mata-Falcón, W. Kaufmann, Automated crack detection and measurement based on digital image correlation, *Construction and Building Materials* 256 (2020) 119383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>.
- [24] EN 12390-3:2009, *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*, 2009.
- [25] PN-EN 14651+A1:2007 *Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym -- Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)*, (n.d.).
- [26] fib Model Code, *Fib model code for concrete structures* 2010, 2013.
- [27] Y. Dai, D. Gruber, H. Harmuth, Observation and quantification of the fracture process zone for two magnesia refractories with different brittleness, *Journal of the European Ceramic Society* 37 (2017) 2521–2529. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.02.005>.
- [28] J. Wu, J. Gao, Z. Feng, S. Chen, T. Nie, Investigation of fracture process zone properties of mode I fracture in heat-treated granite through digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics* 235 (2020) 107192. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107192>.
- [29] S. Bhowmik, S. Ray, An experimental approach for characterization of fracture process zone in concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 211 (2019) 401–419. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.02.026>.
- [30] W. Dong, X. Zhou, Z. Wu, On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness, *Construction and Building Materials* 49 (2013) 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041>.
- [31] P. Zhang, Y. Yang, J. Wang, M. Jiao, Y. Ling, Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites—A Review, *Materials (Basel)* 13 (2020) 5495. <https://doi.org/10.3390/ma13235495>.
- [32] J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers, *Construction and Building Materials* 18 (2004) 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.010>.

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



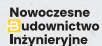
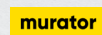
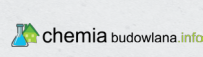
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3