UNIWERSYTET
WARMIŃSKO-MAZURSKI
W OLSZTYNIE

WYDZIAŁ
GEOINŻYNIERII

WYDZIAŁ GEOINŻYNIERII

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: inżynieria lądowa, geodezja i transport

mgr inż. Aneta Skoratko

Rozprawa doktorska

KOMPOZYTY CEMENTOWE ZBROJONE PRZESTRZENNYMI ELEMENTAMI PLASTIKOWYMI WYKONANYMI ZA POMOCĄ DRUKU 3D

CEMENT COMPOSITES REINFORCED BY SPATIAL PLASTIC ELEMENTS CREATED BY 3D-PRINTING

Praca wykonana w Instytucie Geodezji i Budownictwa UWM

Promotor: dr hab. inż. Jacek Katzer, prof. UWM

Olsztyn, 2024

Spis treści

1. Wskazanie osiągnięć naukowych 5
2. Cel i zakres pracy 7
3. Przegląd stanu wiedzy 9
4. Druk 3-D betonu, metali i tworzyw sztucznych – przegląd literatury 13
5. Materiały i projekt eksperymentu 25
6. Wyniki i dyskusja 32
   6.1 Właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi przeznaczonego do wykonywania słupów o przekrojach fraktalnych – A5 33
   6.2 Koncepcja wykorzystania druku 3D do produkcji słupów betonowo-plastikowych o niekonwencjonalnych przekrojach – A1 34
   6.3 Wykorzystanie drukowanych w 3D szalunków do tworzenia słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi (słupy SFRC-plastik) – A3 41
   6.4 Właściwości słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi z przekrojem w postaci fraktala Cesaro (słup SFRC-plastik II) – A6 50
   6.5 Właściwości mechaniczne belek zbrojonych elementami przestrzennymi z tworzywa sztucznego wydrukowanymi w 3D (gyroidy) – A4 52
7 Uwagi końcowe i wnioski 58
8 Dalsze plany badawcze 63
9 Literatura 64
10 Spis rysunków i tabel 73

Streszczenie

Druk 3D, na przestrzeni ostatnich dwóch dekad, stał się jedną z najszybciej rozwijających się i najbardziej obiecujących technologii. Powstanie nowych koncepcji i rozwiązań technologicznych druku 3D jest podyktowane rosnącą potrzebą drukowania materiałów pełniących funkcje konstrukcyjne, termoizolacyjne i oświetleniowe w budynkach. Przedstawiony w rozprawie cykl publikacji dotyczy wykorzystania druku 3D tworzyw sztucznych do zastosowań budowlanych – niekonwencjonalne zbrojenie wewnętrzne i szalunek tracony pełniący funkcję zbrojenia zewnętrznego. Pierwsza praca dotyczy przeglądu najnowszych osiągnięć w druku 3D tworzyw sztucznych dla budownictwa. Omówiono praktyczne zastosowania takich rozwiązań oraz wyzwania w ich dalszych badaniach. Przed przystąpieniem do badań właściwych przygotowano plan eksperymentu oraz dokonano doboru matrycy cementowej przeznaczonej do wypełniania słupów fraktalnych i skomplikowanych zbrojeń przestrzennych. W kolejnych trzech pracach przedstawiono koncepcję słupów betonowo-plastikowych. Przekroje szalunków słupów wydrukowanych w 3D z tworzyw sztucznych reprezentowały trzy typy kształtów: najczęściej spotykane, rzadkie oraz niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych szalunków (opartych na fraktalach). Przygotowane szalunki z tworzywa sztucznego wypełniono zaprawą normową (zaprawa przyjęta jako matryca cementowa (z dodatkiem włókien stalowych i bez)) pełniącą rolę betonu zwykłego. Badano charakterystykę obciążeniowo-odkształceniową ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki niszczenia i rozpraszania energii dla wszystkich słupów betonowych. Ostatni etap badań dotyczył wydrukowanych w 3D gyroidów, które zostały wykorzystane jako przestrzenne elementy zbrojące, nieosiągalne przy użyciu tradycyjnych technik wzmacniania. Udowodniono, że słupy betonowo-plastikowe charakteryzowały się zachowaniem quasi-plastycznym podczas procesu niszczenia. Uzyskane wyniki dowiodły, że możliwe jest zastąpienie tradycyjnych szalunków i zwykłego, zbrojonego stalowymi prętami i strzemionami, betonu zautomatyzowanym drukiem 3D na bazie betonu zbrojonego tworzywami sztucznymi i włóknami stalowymi. Konstrukcje, które mogą być narażone na przypadkowe obciążenia uderzeniami, falami uderzeniowymi, falami wodnymi, wibracjami, trzęsieniami ziemi, wybuchami itp. to najbardziej prawdopodobne przyszłe zastosowania elementów betonowych zbrojonych przestrzennymi elementami z tworzyw sztucznych.

Słowa kluczowe: druk 3D, tworzywo sztuczne, szalunek, zbrojenie

Abstract

3D printing, over the last two decades, has become one of the fastest growing and most promising technologies. The emergence of new concepts and technological solutions of 3D printing is dictated by the growing need to print materials that perform construction, thermal insulation and lighting functions in buildings. The series of publications presented in the dissertation concerns the use of 3D printing of plastics for construction applications - unconventional internal reinforcement and permanent formwork serving as external reinforcement. The first work concerns a review of the latest achievements in 3D printing of plastics for construction industry. Practical applications of such solutions and challenges in their further research are discussed. Before starting the actual research, an experimental plan was prepared and a cement matrix was selected for filling fractal columns and complex spatial reinforcement. The next three works presented the concept of concrete-plastic columns. The cross-sections of 3D-printed plastic column formworks represented three types of shapes: the most common, rare and impossible to implement using traditional formwork (based on fractals).The prepared formwork plastic was filled with standard mortar (mortar adopted as a cement matrix (with and without the addition of steel fibers)) acting as ordinary concreto. The load-strain characteristics were investigated with particular emphasis on the destruction and energy dissipation characteristics for all concrete columns. The last stage of the research concerned 3D printed gyroids, which were used as spatial reinforcement elements, unattainable using traditional reinforcement techniques. It was proved that concrete-plastic columns were characterized by quasi-plastic behavior during the destruction process. The results obtained proved that it is possible to replace traditional formwork and ordinary concrete reinforced with steel rods and stirrups with automated 3D printing based on concrete reinforced with plastics and steel fibers. Concrete structures that may be exposed to accidental loads from impacts, shock waves, water waves, vibrations, earthquakes, explosions, etc. are the most likely future applications of concrete elements reinforced with spatial plastic elements.

Keywords: 3D printing, plastic, formwork, reinforcement

Wykaz skrótów i oznaczeń

FDM	*Fused Deposition Modeling*
STL	*Stereolithography – format pliku stosowany w druku 3D*
ABS	*Akrylonitrylo-butadieno-styren*
PLA	*Polilaktyd*
PBF	*Powder Bed Fusion*
DED	*Directed Energy Deposition*
SFRC	*Steel fibre reinforced concrete*
H	*Wysokość w środku przęsła, mm*
D	*Grubość ścianki, mm*
SHCC	*Strain-Hardening Cement-Based Composites*
PETG	*Politereftalan etylenu z glikolem*
CFI	*Liczba iteracji fraktalnej Cesaro*
NS	*Liczba boków wielokąta początkowego*
α	*Kąt o który boki wielokąta są zagięte, °*
IC	*Obwód wewnętrzny tworzonego przekroju fraktalnego, mm*
f_f	*Wytrzymałość na zginanie, MPa*
f_c	*Wytrzymałość na ściskanie, MPa*
F_{MAX}	*Maksymalna siła obciążająca, kN*
$f_{C\text{-}CP}$	*Wytrzymałość na ściskanie uwzględniająca pole przekroju poprzecznego tworzywa sztucznego i betonu, MPa*
f_{CC}	*Wytrzymałość na ściskanie uwzględniająca tylko pole przekroju betonu, MPa*
A_P	*Pole powierzchni przekroju poprzecznego tworzywa sztucznego, mm^2*
A_C	*Pole powierzchni przekroju betonu, mm^2*
A_{SFRC}	*Pole powierzchni przekroju samego SFRC, mm^2*
$A_{SFRC+ABS}$	*Pole powierzchni przekroju poprzecznego tworzywa sztucznego i przekroju SFRC, mm^2*
f_{SFRC}	*Wytrzymałość na ściskanie uwzgledniająca tylko przekrój SFRC, MPa*
$f_{SFRC+ABS}$	*Wytrzymałość na ściskanie uwzględniająca przekrój poprzeczny tworzywa sztucznego i SFRC, MPa*
p^*	*Gęstość względna, %*
t	*Parametr modyfikujący kształt i położenie izopowierzchni*

1. Wskazanie osiągnięć naukowych

Przedstawiona przeze mnie rozprawa doktorska składa się z cyklu sześciu monotematycznych artykułów naukowych przedstawionych poniżej w kolejności chronologicznej odpowiadającej datom ukazywania się publikacji:

Lp.	Tytuł publikacji	IF	Punktacja MEiN
A1	Katzer J., Skoratko A.: Concept of Using 3D Printing for Production of Concrete-Plastic Columns with Unconventional Cross-Sections, Materials, 14 (6) (2021). doi 10.3390/ma14061565	3,748	140
A2	Skoratko A., Katzer J.: Harnessing 3D Printing of Plastics in Construction - Opportunities and Limitations, Materials, 14(16) (2021). doi 10.3390/ma14164547 *	3,748	140
A3	Katzer J., Skoratko A.: Using 3D printed formworks for the creation of steel fibre reinforced concrete-plastic columns, Construction and Building Materials, 337(27) (2022). doi 10.1016/j.conbuildmat.2022.127586	7,693	140
A4	Skoratko A., Szatkiewicz T., Katzer J., Jagoda M. Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements, Cement and Concrete Composites, 134 (2022). doi 10.1016/j.cemconcomp.2022.104809	9,930	200
A5	Katzer J., Skoratko A. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Dedicated for Casting Columns with Fractal Based Cross-sections (2023) – opublikowane w materiałach konferencyjnych **	-	-
A6	Katzer J., Skoratko A., Seitl S. Properties of steel fiber reinforced mortar-plastic columns with the cross-section in a form of a Cesaro fractal, Structural Concrete, 2023. doi 10.1002/suco.202300146	3,200	100

* Referat wygłoszony na 52. Konferencji Naukowej Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych, The International Colloquium Modern Technologies in Construction, Challenges of the 21st Century – Budownictwo 4.0, Białystok, 18-20 października 2021 – załącznik A2a

** Referat wygłoszony na NTCC, Brno, 25-28 czerwca 2023, pełna wersja artykułu oczekuje na publikację w Trans Tech Publications (pełna wersja do wglądu - załącznik A7)

Cały dorobek naukowy doktorantki obejmuje dodatkowo następujące publikacje naukowe:

1. Bilko P., **Skoratko A**., Rutkiewicz A., Małyszko L. Determination of the Shear Modulus of Pine Wood with the Arcan Test and Digital Image Correlation, Materials 14(2) (2021), doi: 10.3390/ma14020468
2. **Skoratko A**., Rutkiewicz A. Remarks on experimental shearing of wood, Lightweight structures contemporary problems: theoretical and experimental studies in mechanics of lightweight structures / editors Leszek Małyszko, Piotr Bilko (Monographs LSCE - Lightweight Structures in Civil Engineering; vol. 1) (2020)
3. **Skoratko A**., Rutkiewicz A. Experimental results regarding shearing of wood. Lightweight Structures in Civil Engineering, XXV LSCE, Olsztyn, Polska 6 grudnia 2019
4. Brzyski P., Kosiński P., **Skoratko A**., Motacki W. Thermal properties of cellulose fiber as insulation material in a loose state. Central European Symposium on Thermophysics (CEST 2019), Banska Bystrica, Slovakia 16-18 października 2019
5. Brzyski P., Kosiński P., **Skoratko A**. Thermal bridges occurrence analysis in timber construction walls filled with hemp fibers. Central European Symposium on Thermophysics (CEST 2019), Banska Bystrica, Slovakia 16-18 października 2019
6. Kosiński P., **Skoratko A**. The influence of climatic conditions on the thermal tate of frame partitions insulated with loose fiber materials. 4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2019), Prague, Czech Republic, 2-5 września 2019
7. Kosiński P., Brzyski P., **Szewczyk A**[*]., Motacki W. Thermal properties of raw hemp fiber as a loose-fill insulation material, Journal of Natural Fibers 15(5) (2018), doi:10.1080/15440478.2017.1361371

[*] Nazwisko panieńskie doktorantki

2. Cel i zakres pracy

Główny cel pracy doktorskiej było udowodnienie następujących tez naukowych:

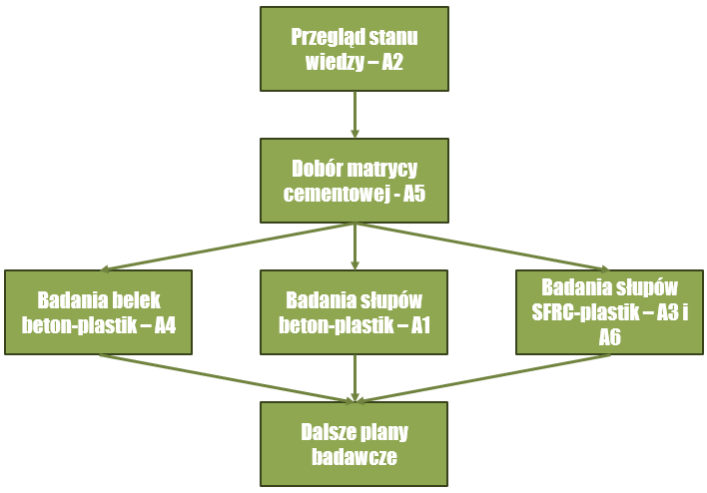
- ✓ **Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako szalunek tracony słupów betonowych i fibrobetonowych.**
- ✓ **Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako zbrojenie wewnętrzne belek betonowych.**
- ✓ **Możliwe jest kształtowanie cech mechanicznych elementów wykonanych z kompozytów cementowych za pomocą elementów przestrzennego zbrojenia plastikowego.**

Pełen zakres prac został opisany w 6 artykułach (A1 do A6). Każdy artykuł przedstawia oddzielne zadanie prowadzonego doktorskiego programu badawczego. Schemat przedstawiający poszczególne zadania programu badawczego pracy doktorskiej został przedstawiony na rysunku 1. Głównym celem poszczególnych zadań było:

1. Praca A2 – Przedstawia przegląd najnowszych osiągnięć w druku 3D tworzyw sztucznych dla budownictwa. Omówiono tu różne zastosowania, w tym niekonwencjonalne zbrojenie przestrzenne (niemożliwe do uzyskania w tradycyjny sposób), drukowane szalunki tracone itp. Omówiono również wyzwania dla dalszych badań i praktycznych zastosowań takich rozwiązań.
2. Praca A5 – Przedstawia dwustopniowy plan eksperymentu doboru matrycy cementowej przeznaczonej do wypełniania kolumn fraktalnych i skomplikowanych zbrojeń przestrzennych wykonanych w technologii druku 3D.
3. Praca A1 – Przedstawia koncepcję słupów betonowo-plastikowych. Wydrukowano w 3D siedem różnych przekrojów szalunków słupów z tworzywa sztucznego. Przekroje reprezentowały trzy typy kształtów słupów: najczęściej spotykane, rzadkie oraz niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych szalunków (opartych na fraktalach). Przygotowane szalunki z tworzywa sztucznego wypełniono matrycą cementową pełniącą rolę zwykłego betonu. Po 28 dniach utwardzania zbadano charakterystykę obciążeniowo-odkształceniową wszystkich słupów betonowych.
4. Praca A3 – Przedstawia dalsze prace badawcze nad słupami betonowo-plastykowymi. Biorąc pod uwagę kształt uzyskanych relacji obciążenie-

odkształcenie w pracy A1 (przypominających relacje uzyskiwane podczas badań betonów zbrojonych włóknami) zdecydowano się na wykonanie słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi, gdzie przekroje szalunków odpowiadały kształtom z A1. Tworzywo sztuczne pełniło rolę trwałego szalunku wydrukowanego w 3D. Podczas badań rejestrowano charakterystyki obciążeniowo-odkształceniowe.

5. Praca A6 – Przedstawia koncepcję i badania słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi. Tworzywo sztuczne także służyło jako wydrukowany w 3D szalunek, który pozostał na swoim miejscu. Stworzono pięć różnych kształtów przekroju poprzecznego słupa, w oparciu o iteracje fraktalne Cesaro, które wypełniono matrycą wzmocnioną włóknem stalowym. Kształt był inspirowany poprzednim programem badawczym. Po utwardzeniu próbki obciążano i rejestrowano charakterystykę obciążenia-odkształcenia, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki niszczenia i rozpraszania energii.
6. Praca A4 – Przedstawia badania elementów belkowych zbrojonych przestrzennymi elementami z tworzywa sztucznego. W prowadzonym programie badań wydrukowano gyroidy o różnych charakterystykach. Ich geometria jest nieosiągalna przy użyciu tradycyjnych technik. Właściwości badanych elementów z tworzywa sztucznego i matrycy były wysoce quasi-plastyczne i zbliżone do właściwości dobrego betonu zbrojonego włóknami stalowymi.



Rysunek 1. Schemat przedstawiający poszczególne zadania programu badawczego pracy doktorskiej [opracowanie własne]

3. Przegląd stanu wiedzy

Do zbrojenia betonu, od czasu wynalezienia żelbetu, na masową skalę stosowanym materiałem jest stal. Elementy stalowe w postaci prętów, strzemion i siatek miały wpływ na możliwe do uzyskania kształty geometryczne zbrojenia (Zhang, Liu, Yi, 2014). Inżynierowie budowlani byli przyzwyczajeni do projektowania elementów betonowych z dużymi (z konstrukcyjnego punktu widzenia) objętościami stali zbrojeniowej, co było niezbędne do spełnienia wymagań dotyczących tworzenia klatek zbrojeniowych (Momeni i in., 2022). W drugiej połowie XX wieku sytuacja ta uległa częściowej zmianie wraz z początkiem stosowania włókien stalowych, które umożliwiły zastąpienie części strzemion i siatek (Naaman, Argon, Moavenzadeh, 1973). Obecnie pręty zbrojeniowe nadal pozostają dominującym rodzajem zbrojenia betonu, powodując nieoptymalne rozmieszczenie zbrojenia oraz tylko częściowo wykorzystując jego wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie (Desnerck, Lees, Morley, 2016). Dodatkowo, podążając za ideą zautomatyzowanego placu budowy, wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie betonu zbrojonego włóknami stalowymi (*SFRC*).

Wysoka wytrzymałość na ściskanie, duża odporność na odkształcenia i stosunkowo niska cena to niewątpliwie zalety betonu. Natomiast wady betonu zwykłego to kruchość, mała ciągliwość i mała odporność na pękanie (Kizilkanat, Kabay, Akyüncü, Chowdhury, Akça, 2015; Zheng i in.,2020). Włókna stalowe są skutecznie stosowane jako zbrojenie poprawiające właściwości betonu zwykłego od lat 60-tych XX wieku (Babaie, Abolfazli, Fahimifar, 2019; Domski 2016). Wymiary, kształt włókien, przyczepność do stwardniałej matrycy betonowej oraz ilość dodawanego włókna są kluczowymi czynnikami wpływającymi na charakterystykę wszystkich rodzajów betonu typu *SFRC* (Shah, Ribakov, 2011; Song, Hwang 2004). Ważną funkcją zbrojenia włóknistego w betonie jest hamowanie powstawania spękań związanych z wysychaniem i skurczem plastycznym. Zbrojenie z włókien poprawia również właściwości wytrzymałościowe poprzez udział w przenoszeniu naprężeń. Zwiększa się również trwałość elementów zbrojonych włóknami. Duże, pojedyncze spękania w betonie zwykłym są zastępowane układem rozproszonych mikropęknięć w *SFRC*, które nie wpływają niekorzystnie na trwałość elementów betonowych (Ding, You, Jalali, 2011; Yoo, Yang 2018). Zastosowanie *SFRC* zamiast betonu zwykłego daje możliwość zmniejszenia ilości tradycyjnego zbrojenia stalowego w postaci prętów, strzemion

czy siatek. Zastosowanie *SFRC* wraz z aktualnie wprowadzanym na rynek drukiem 3D tworzy nowe możliwości inżynierskie.

W ciągu ostatnich dziesięcioleci druk 3D stał się jedną z najszybciej rozwijających się i najbardziej obiecujących gałęzi technologii związanych z robotyką i informatyką. Drukarki 3D znalazły szerokie zastosowanie w branży motoryzacyjnej, medycznej, oraz inżynierii mechanicznej (Bose, Vahabzadeh, Bandyopadhyay, 2013; Huang, Liu, Mokasdar, Hou, 2013; Kothman, Faber, 2016; McCullough, Yadavalli, 2013). Udoskonalanie drukarek i technologii druku a także materiałów wykorzystywanych do druku 3D jest celem wielu programów badawczych na całym świecie. Najbardziej aktualnym przedmiotem badań nad drukiem 3D jest drukowanie betonu, metali i tworzyw sztucznych. Postęp cywilizacyjny i potrzeba redukcji emisji CO_2 oraz mechanizm automatyzacji procesu budowlanego zmusza wszystkie strony do poszukiwania nowych technologii i materiałów budowlanych (Gibson, Rosen, Stucker, 2010; Tay i in., 2017). Oczywistym jest, że te nowe rozwiązania powinny odpowiadać na rosnące potrzeby ilościowe i jakościowe budownictwa, przy jednoczesnym zachowaniu zasad zrównoważonego rozwoju (Gebler, Schoot Uiterkamp, Visser, 2014; Ghaffar, Corker, Fan, 2018; Gibson i in., 2010; Tay i in., 2017). Sektor budowlany musi ograniczyć swój negatywny wpływ na środowisko i w ten sposób przeciwdziałać zmianom klimatycznym (Gebhard, Mata-Falcón, Anton, Dillenburger, Kaufmann, 2021). Potrzeba drukowania materiałów pełniących funkcje konstrukcyjne, termoizolacyjne czy oświetleniowe w budynkach doprowadziła do powstania koncepcji nowoczesnych technologii i rozwiązań druku 3D. Te wszystkie metody i działania tworzą nowy rozdział w technice budowlanej (Hager, Golonka, Putanowicz, 2016; Hager, 2018).

Druk 3D ma potencjał, aby stać się wysoce zrównoważoną technologią (Ma, Li, Wang, 2018). Mieszanki wykorzystywane do druku 3D bazują na drobnych kruszywach oraz, w porównaniu do betonu zwykłego, na większych ilościach cementu. Dodatkowo są modyfikowane znacznymi ilościami dodatków i domieszek (Bock, 2015; Liu, Sun, 2021; Lyu, Zhao, Hou, Sun, Zhang, 2021). Piasek jest zasobem trudno dostępnym w wielu częściach świata, a jego pozyskiwanie (np. poprzez pogłębianie koryt rzek) ma znacząco negatywny wpływ na środowisko (Gavriletea, 2017; Koehnken i in., 2020).

Natomiast do drukowania betonu można stosować mieszanki betonowe z kruszywem pochodzącym z odzysku odpadów budowlanych. Druk tworzyw sztucznych wykorzystuje zarówno naturalne, jak i sztuczne włókna. Obecnie do produkcji addytywnej wykorzystuje się polimery w postaci proszku, polimery otrzymywane

z surowców odnawialnych, żywice, monomery oraz włókna termoplastyczne (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, Hui, 2018; Savija, 2020). Odpady z tworzyw sztucznych w postaci generowanych tymczasowych podpór, powstające podczas drukowania 3D, można przetopić, przetworzyć, a także poddać recyklingowi na nowe filamenty (Mikula i in., 2021; Ngo i in., 2018; Zander, Gillan, Lambeth, 2018). Technologia druku 3D jawi się jako kluczowa szansa na zachowanie naszego środowiska naturalnego (Kreiger, Mulder, Glover, Pearce, 2014; Ma i in., 2018; Morales, Maranon, Hernandez, Michaud, Porras, 2023). Zaletą wykorzystania druku 3D w budownictwie jest również minimalizacja „mokrych" procesów budowlanych. Dzięki temu podczas budowy budynku powstaje mniej odpadów materiałowych i pyłów. Przedstawione poniżej osiągnięcia technologii druku 3D związane są z drukiem 3D betonu, metali i tworzyw sztucznych (Choi, 2011). Szczególnym zainteresowaniem branży budowlanej cieszyły się przestrzenne elementy z tworzywa sztucznego wykonane w technologii *FDM*. Technologia ta polega na budowaniu elementu przestrzennego za pomocą przeciskanego przez dyszę stopionego materiału termoplastycznego. Dysza znajduje się pod głowicą termiczną z ekstruderem materiału (filamentu). Ułożenie warstw filamentu zgodnie z geometrią zaprojektowanego modelu umożliwia realizację wydruku 3D poprzez poziomy ruch głowicy termicznej oraz pionowy ruch platformy roboczej. Warstwy układane są jedna po drugiej (Berman, 2012; Kruth, Leu, Nakagawa, 1998). Nałożona świeża warstwa materiału zastyga i łączy się z poprzednią. Cyfrowy model przedmiotu do druku jest tworzony bezpośrednio z projektu (np. z plików stworzonych za pomocą oprogramowania *CAD*) (Wong, Hernandez, 2012). Najpopularniejszym formatem modeli cyfrowych do druku jest *STL*. Za twórcę tej technologii druku 3D uważany jest amerykański naukowiec Charles Hull, który opatentował technikę stereolitografii, wprowadzając format *STL* (Kret, Michnowicz, 2013). Addytywny sposób układania materiału pozwala na pełną dowolność architektoniczną poprzez uzyskiwanie bardzo skomplikowanych form i odważnych projektów przestrzennych (Labonnote, Rønnquist, Manum, Rüther, 2016; Mehar i in., 2020). W metodzie *FDM* wykorzystuje się kilka rodzajów materiałów: *ABS*, poliwęglan, *PLA*, nylon itp. Jednak najbardziej popularne są *ABS* i *PLA*.

Obecnie druk 3D jest wykorzystywany na wielu etapach procesu budowlanego. Począwszy od projektowania (kiedy wykonywane są makiety przedstawiające obiekt zgodnie z projektem architektonicznym) po druk z mieszanek betonowych całych

budynków (Major, Minda, 2016). Jest to również sposób weryfikacji poprawności projektu, dzięki czemu można wyeliminować ewentualne błędy konstrukcyjne.

4. Druk 3-D betonu, metali i tworzyw sztucznych – przegląd literatury

Produkcja addytywna od dziesięciu lat cieszy się coraz większym zainteresowaniem branży budowlanej. Przedmiotem badań jest druk betonu, metali i tworzyw sztucznych (Ali, Issayev, Shehab, Sarfraz, 2022; Baigarina, Shehab, Ali, 2023).

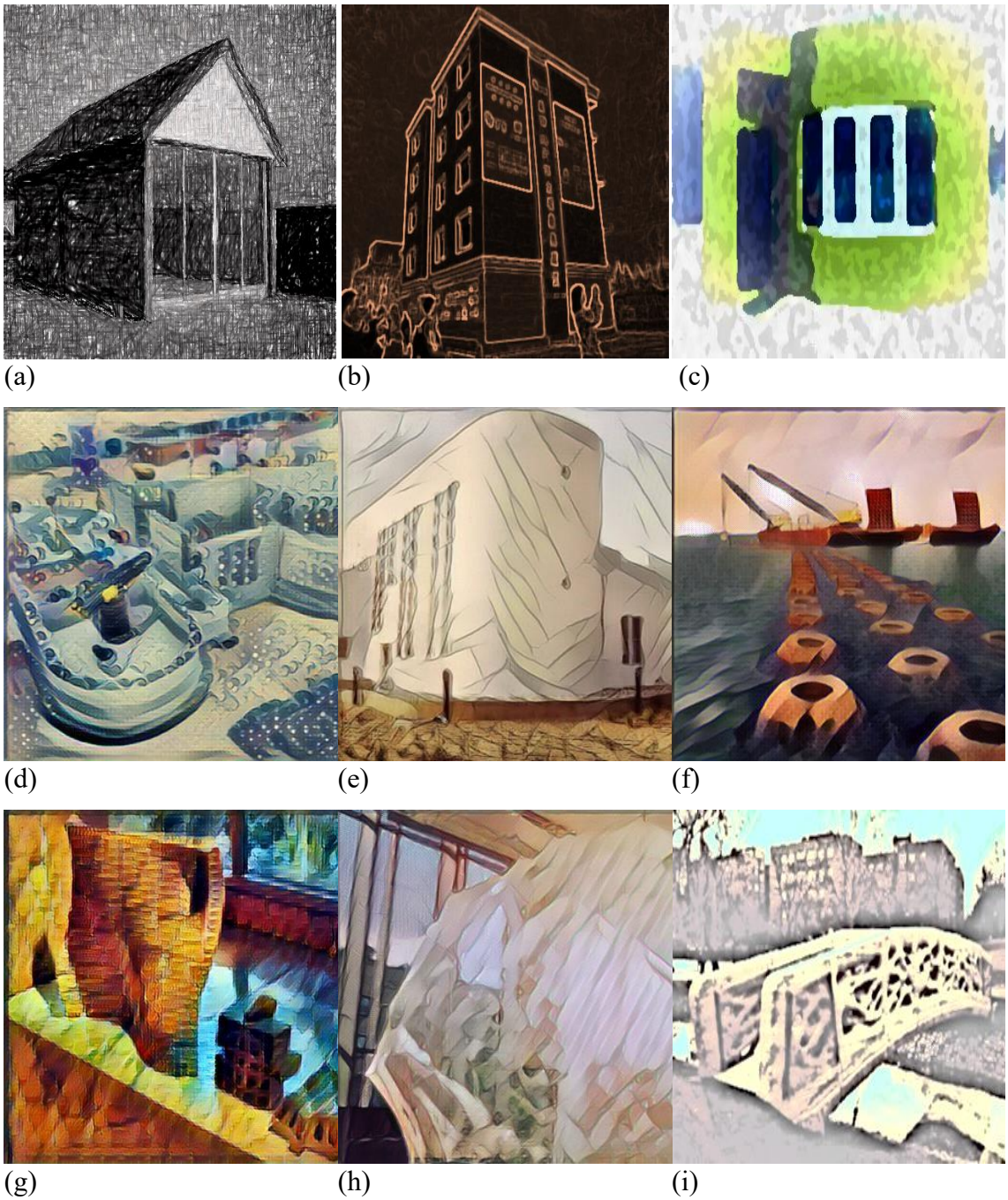
Druk betonu i metali

Większość prac badawczych w dziedzinie inżynierii lądowej koncentruje się obecnie na betonie drukowanym w 3D (Hager i in., 2016; Huang i in., 2013; Shakor, Nejadi, Paul, Malek, 2019; Shakor, Sanjayan, Nazari, Nejadi, 2017). Technologia druku 3D budynków i konstrukcji betonowych rozwija się najszybciej i daje niemal nieograniczone możliwości. Najczęściej stosuje się technologię contour crafting czyli sposób drukowania domów z betonu polegający na szybkim nakładaniu przez drukarkę kolejnych warstw betonu. Producenci dążą do zwiększenia efektywności środowiskowej procesu budowlanego. Dlatego też, do drukowania, często używana jest mieszanka betonowa składająca się z cementu zbrojonego włóknem szklanym i kruszywa pochodzącego z odzysku odpadów budowlanych, takich jak gruz z rozebranych budynków. Warstwy zadrukowanego betonu są wyraźnie oddzielone od siebie, co może niekorzystnie wpływa na estetykę ściany (ale tylko w stanie surowym) oraz na jej charakterystyki mechaniczne. Na placu budowy ustawiane są szyny przystosowane do ruchu ramienia drukarki, następnie na podstawie projektu komputerowego wykonywany jest obiekt w stanie surowym. Konstrukcja drukarki bazuje na suwnicy niewiele szerszej od szerokości budynku, po której porusza się dysza układająca kolejne warstwy ścian. Istnieje również możliwość produkcji elementów prefabrykowanych w zakładzie. Na budowanie w technologii druku 3D zużywa się od 50 do 70% mniej czasu niż w przypadku budownictwa tradycyjnego (Forbes, 2016). Najdynamiczniej rozwijającym się w tym kierunku krajem są Chiny (Dodziuk, 2020). Wiodącą firmą jest WinSun, która w 2014 roku wydrukowała w ciągu jednego dnia 10 domów o powierzchni 200 m^2 (rys. 2a). W 2015 roku wybudowano czterokondygnacyjny budynek mieszkalny (rys. 2b) oraz ekskluzywną willę o powierzchni 1100 m^2 (3Ders, 2014; Wheeler, 2015). Kolejnym osiągnięciem Chińczyków jest postawienie w ciągu 3 godzin domu z elementów wydrukowanych w 3D. Dom miał być ognioodporny i odporny na wstrząsy

o sile 9° w skali Richtera (Wang; 2015). Pierwszy biurowiec wydrukowany w 3D znajduje się w Dubaju (Mendoza, 2016). W Zurychu z piaskowego druku 3D wykonano strop płytowy, który ważył 15 ton i mierzył 80 m^2 (Scott, 2018). W 2017 roku amerykańska firma Apis Cor zaprezentowała pierwszy dom mieszkalny o powierzchni 38 m^2 , który powstał w Rosji w zaledwie 24h (rys. 2c) (Rębosz-Kurdek, Gierulski, Szmidt, 2018). Budynek powstał bezpośrednio na placu budowy i charakteryzuje się nietypowym kształtem. Dowodzi możliwości projektowania i konstruowania unikalnych geometrii dzięki drukowi 3D. W 2018 roku pierwsza francuska rodzina wprowadziła się do wydrukowanego w 3D pięciopokojowego domu o powierzchni 95 m^2 . Szkielet ścian wykonany jest z pianki poliuretanowej, a puste przestrzenie wypełnione są betonem. Projekty związane z drukiem 3D domów mieszkalnych realizowane są także w Dubaju i Holandii (Boffey, 2018; Drury, 2018). W Polsce pierwszy budynek z mieszanki betonowej przy użyciu drukarki powstał w 2019 roku. Proces drukowania trwał 13 h, a budynek miał powierzchnię 7 m^2. Największy na świecie budynek z drukarki 3D wybudowano w Dubaju pod koniec 2019 roku (rys. 2d,e). Ma on 640 m^2, 9,5 m wysokości i powstał z mieszanki pochodzącej z recyklingu odpadów budowlanych. Ukończenie konstrukcji zajęło 3 tygodnie a w procesie drukowania tego budynku zaangażowanych było tylko trzech pracowników. Można, więc powiedzieć, że drukarki 3D to przyszłość budownictwa, chociaż wciąż wymagają obecności człowieka (Cheniuntai, 2019; Gadomska, 2020). Drukowanie domów to jedno z wielu zastosowań druku 3D. Jest on również z powodzeniem wykorzystywany do produkcji np. sztucznych raf. Firma o nazwie Reef Arabia opracowała plan odbudowy skał przybrzeżnych warstwami betonu. Sztuczne rafy (rys. 2f) zostały już dostarczone do Australii (Usidus). Innym ciekawym projektem jest druk 3D bloczków ceramicznych PolyBricks (rys. 2g), który przyczyniłby się do murowania bez zaprawy. Elementy są zaprojektowane tak, aby można je było łączyć ze sobą za pomocą specjalnych zaczepów. Wykonano je z surowca podobnego do sproszkowanej gliny. Bardzo ciekawy budynek powstał w Massachusetts Institute of Technology na podstawie projektu Neri Oxmana: pawilon, w którym wydrukowany w 3D szkielet jest podobny do produkcji jedwabiu przez jedwabniki (rys. 2h). Ich ruch został odtworzony przez urządzenie drukujące. Miało to stworzyć możliwość tworzenia obiektów prototypowych przy użyciu dużej liczby małych robotów, aby uniknąć wielkogabarytowych instalacji i suwnic (Howard, 2013; Usidus).

Oprócz budynków w technologii 3D możliwe jest także drukowanie kładek dla pieszych, schronów awaryjnych, bunkrów wojskowych, form i szalunków do elementów

nośnych oraz reprodukcja historycznych elementów budowli itp. (Wu, Wang J., Wang X., 2016; Zhang, Wang, Dong, Yu, Han, 2019). Pierwszym mostem wydrukowanym w 3D jest kładka dla pieszych Castilla-La Mancha w Madrycie (rys. 2i). Kładka ma 1,75 m szerokości i 12 m rozpiętości (Malik Chua, 2017).



Rysunek 2. Przykłady budynków i konstrukcji z betonu wydrukowanych w 3D: (a) jeden z pierwszych domów; (b) dom wielopiętrowy; (c) dom wykonany według projektu Apis Cor; (d) etap budowy największego budynku; (e) największy budynek wydrukowany w 3D; (f) betonowe sztuczne rafy; (e) bloki PolyBricks; (h) konstrukcja wzorowana na pracy jedwabników; (i) Kładka dla pieszych Kastylia-La Mancha. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Apis Cor, 2019; IAAC, 2017; Cheniuntai, 2019; Usidus))

Ponadto druk 3D metali można również wykorzystać w budownictwie, łącząc drukowane formy z tradycyjnymi kształtami strukturalnymi, które tworzą struktury hybrydowe. Może służyć również do tworzenia wewnętrznych usztywnień, otworów, przekrojów niepryzmatycznych lub węzłów łączących oraz metalowych przekrojów konstrukcyjnych (Buchanan, Gardner, 2019). Dokładnie przebadano nośność belkowych konstrukcji kratownicowych (Niu, Choo, Sun, Mok, 2018), a uzyskane wyniki są bardzo obiecujące. Wczesne próby wykorzystania druku 3D metali koncentrowały się tylko na elementach małej skali. W Amsterdamie w 2021 roku otwarto pierwszy w pełni funkcjonalny 12-metrowy most, który powstał dzięki technologii druku 3D z wykorzystaniem robotów spawalniczych. Został on wykonany ze specjalnej, nierdzewnej, przeznaczonej do druku stali. Techniki wytwarzania przyrostowego metali obejmują: technologię polegająca na warstwowym spiekaniu metalowego proszku (*PBF*) ukierunkowane osadzanie energii (*DED,* które działa poprzez prowadzenie energii, która działa jak wiązka elektronów skupiająca się na określonym obszarze, w którym proszki metali są podgrzewane i osadzane po stopieniu) laminowanie arkuszy i form oraz produkcja przyrostowa elektrochemiczna. Przykłady drukowanych elementów metalowych pokazano na rysunku 3.



(**a**) (**b**) (**c**)

Rysunek 3. Przykłady wydrukowanych w 3D elementów metalowych: (a) węzeł aluminiowy; (b) zoptymalizowane węzły; (c) most MX3D w Amsterdamie. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Buchanan, Gardner, 2019; Galjaard, Hofman, Ren, 2015; Strauss, Emmer Pfenninger Partner, Knaack, 2015))

Tworzywa sztuczne

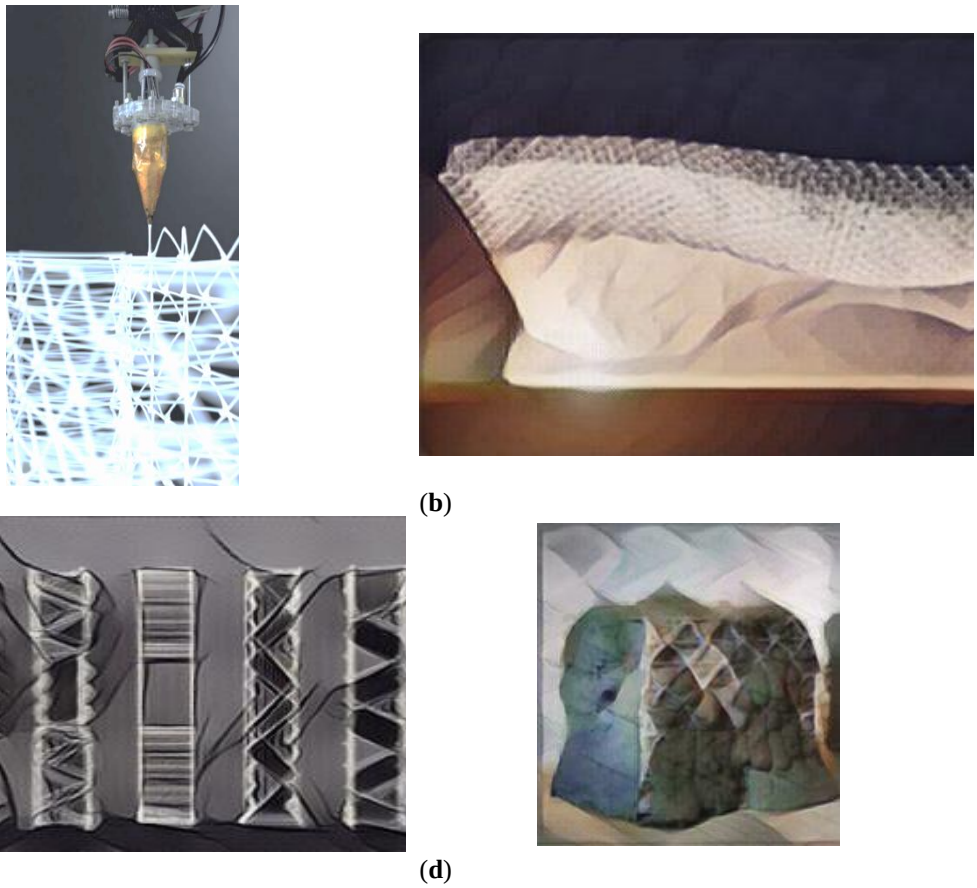
Przy wytwarzaniu zoptymalizowanych konstrukcyjnie (o niestandardowych kształtach) elementów betonowych tradycyjnymi metodami odlewania, przygotowany

szalunek ulega najczęściej zniszczeniu podczas demontażu (Wangler i in., 2016; Wangler, Roussel, Bos, Salet, Flatt, 2019). Wznoszone obecnie betonowe elementy konstrukcyjne są często ograniczone kształtem przekroju ze względu na bariery technologiczne (np. związane z możliwością wykonania szalunków). Kolumny i filary są dobrymi przykładami takich elementów. Występują w większości wznoszonych budynków (zwłaszcza o funkcji publicznej) jako podpory konstrukcyjne lub elementy dekoracyjne. Te kolumny i filary mają przekroje kołowe, kwadratowe lub prostokątne (Government of India – MOR; 2017). Inne kształty geometryczne przekrojów słupów można uzyskać przy użyciu tradycyjnych szalunków opartych na drewnianych deskach. Jednak takie podejście jest pracochłonne. Tradycyjne szalunki oparte na deskach drewnianych są obecnie niemal całkowicie zastępowane przez systemy szalunkowe, w tym systemy szalunków traconych (tzw. pozostających na miejscu). Zdaniem doktorantki wykorzystanie druku 3D do tworzenia szalunków słupów pozwoliłoby na ominięcie zarówno barier geometrycznych, jak i pracowniczych. Przekrój szalunku wydrukowanego w 3D może mieć w zasadzie dowolny kształt geometryczny, zapewniając projektantom większą elastyczność projektową w tym zakresie (Mehar i in., 2020). Stosując w trakcie budowy druk 3D można pominąć szalunki do elementów konstrukcyjnych z betonu, które stanowią 40% całkowitego budżetu robót betonowych, ostatecznie skracając harmonogram projektu bez ponoszenia dodatkowych kosztów (Kothman, Faber, 2016). Dzięki temu osiągamy znaczną redukcję całkowitych kosztów budowy (35–60%) poprzez pominięcie procesu demontażu szalunków (Shakor i in., 2017). Dlatego przy użyciu technologii druku 3D projektowanie konstrukcji nie będzie ograniczać się już do prostych szalunków i kolekcji monotonnych prefabrykatów (Gosselin i in., 2016; Tay i in., 2017). Przemysł budowlany jest także w stanie wykorzystać, w postaci drukowanych szalunków, duże ilości tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu. Świat jest zaśmiecony odpadami z tworzyw sztucznych, które można przekształcić w filament używany do drukowania 3D (Mikula, 2021; Ngo i in., 2018; Zander i in., 2018). Obecnie nad możliwościami wykorzystania odpadowego tworzywa do produkcji filamentu zajmuje się zespół badawczy prof. M. Hinge z Uniwersytetu Aarhus w Danii (Aarhus University, 2021). Z ekologicznego punktu widzenia zastosowanie zbrojeń z tworzyw sztucznych, zamiast stalowych, jest wizją bardzo kuszącą. Połączenie *SFRC* z drukowanym w 3D szalunkiem pozostającym na miejscu, który później pełniłby również rolę zbrojenia (Skoratko, Katzer, 2021),

potencjalnie umożliwiłoby całkowite wyeliminowanie z placu budowy tradycyjnego zbrojenia stalowego.

Branża przemysłowa dołożyła wszelkich starań, aby całkowicie wyeliminować potrzebę stosowania tradycyjnych szalunków. Chociaż zmiany te dają nadzieję na możliwość budowania powierzchni o dowolnym kształcie całkowicie bezodpadowym, istnieją pewne ograniczenia i trudności związane z takimi systemami.

Hack, Laurer (2014) opisują badania, które podjęli w celu opracowania formy siatkowej jako alternatywy dla konwencjonalnych szalunków w oparciu o elastyczną produkcję in-situ. Daje to nieograniczone możliwości do uproszczenia geometrycznego, standaryzacji i powtórzeń. Polimery były swobodnie wytłaczane w przestrzeni 3D, precyzyjnie sterowane przez robota w celu przygotowania niezbędnych siatek i uwolnienia szalunku z ograniczeń geometrycznych. Zastosowanie polimerów termoplastycznych, podobnie jak w konwencjonalnych drukarkach 3D, umożliwia kontrolę nad utwardzaniem materiału. Możliwość chłodzenia podczas procesu wytłaczania zapewnia opcję wytłaczania przestrzennego i kreowania konstrukcji szkieletowej (rys. 4a). Następnie na ten szalunek wylewany jest beton, który dociera się ręcznie w celu wygładzenia powierzchni (rys. 4b). Ponadto gęstość oczek jest generowana w zależności od różnych sił działających na konstrukcję (rys. 4c). Co ciekawsze, obecność siatki zwiększa wytrzymałość betonu na rozciąganie, czyniąc go ostatecznie możliwym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia stalowego (Hack, Lauer, Gramazio, Kohler, 2014). Projektowanie siatek o dowolnym kształcie pozwala nie tylko na lokalną adaptację do działających naprężeń czy istniejących krzywizn, ale także na integrację wnęk dla lżejszych struktur porowatych.



Rysunek 4. Formy siatkowe (a) wytłaczanie polimeru; (b) pierwszy prototyp siatki wypełniony betonem; (c) różne modele oczek; (d) kostki testowe po odlaniu. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Hack, Lauer, 2014; Hack i in., 2014))

Głównym celem badań Hacka i in. (2014) było udowodnienie, że ekstruzja przestrzenna może być zastosowana do złożonych powierzchni. Sztywna, świeża mieszanka betonowa nie była wylewana od góry, ale przeciskana od zewnątrz przez siatkę, sukcesywnie zagęszczając wnętrze. Strategia okazała się skuteczna, ale pracochłonna. Po nałożeniu 35 kg świeżej mieszanki betonowej nie stwierdzono deformacji siatki. Przy takim rozwiązaniu należy zoptymalizować przepływ betonu. Oczka siatki nie powinny być zbyt rzadkie, aby beton wyciekł, ale także nie powinny być zbyt gęste, aby beton równomiernie pokrył konstrukcję, nie pozostawiając żadnych wewnętrznych pustek. Testowano również ten sam typ siatki, ale z betonowym wypełnieniem od góry. Celem było uzyskanie jak najlepszej zależności pomiędzy lepkością betonu a wielkością oczek. Przebadano sześciany o krawędzi 15 cm (rys. 4d) przy różnych wymiarach otworów. Zastosowano dwie mieszanki, jedną z dodatkiem włókien i drugą bez. Włókna powodowały zapychanie się gęstej struktury wewnętrznej. Mieszanka pozbawiona włókien działała najlepiej przy opadającym przepływie 19 cm, mierzonym za pomocą mini-stożka Haegermanna. Ogólnie

stwierdzono, że struktura wewnętrzna jest zbyt gęsta. Uniemożliwiało to równomierne spływanie betonu wokół siatki przestrzennej z tworzywa sztucznego. Trzecia seria badań miała na celu sprawdzenie integralności strukturalnej siatek podczas procesu zalewania. Seria kostek testowych o różnej liczbie i różnych rozmiarach otworów umieszczono na dnie jednej kolumny ciśnieniowej 15 x 15 x 150 cm. Kolumna została wypełniona betonem od góry. Eksperymenty wykazały, że żadna z siatek nie pękła pod wpływem ciężaru betonu.

Jak wykazano, możliwe jest wykorzystanie wydrukowanych w 3D elementów plastikowych jako niekonwencjonalnego zbrojenia belek betonowych (Katzer, Szatkiewicz, 2019, 2020). Szalunki miałyby służyć do tradycyjnego wylewania betonowych elementów konstrukcyjnych. Wydrukowana forma z betonem tworzyłaby kompozyt o wysokiej wytrzymałości na zginanie.

Katzer, Szatkiewicz (2019) zaproponowali wydrukowany w 3D plastikowy szalunek do wykonywania belek. Próbki wykonano w dwóch etapach. Najpierw wydrukowano szalunek (rys. 5a), a następnie wypełniono go zaprawą normową (zaprawa przyjęta jako matryca cementowa). Dodatkowo szalunek posiadał żebra (od 0 do 3), charakteryzujące się wysokością od 0 do 15 mm. Geometria żeber była bardzo podstawowa. Miały pełnić rolę prętów zbrojeniowych. Stałym wymiarem była grubość ścian zewnętrznych, żebra oraz wymiary zewnętrzne. Punktem odniesienia były próbki wykonane z samej matrycy cementowej. Po wylaniu betonu szalunek z tworzywa sztucznego pozostał na swoim miejscu i służył jako wzmocnienie elementu betonowego. Próbki poddano badaniu wytrzymałości na zginanie w jednym centralnym punkcie obciążenia (rys. 5b). Siła była przykładana tylko do powierzchni matrycy cementowej.

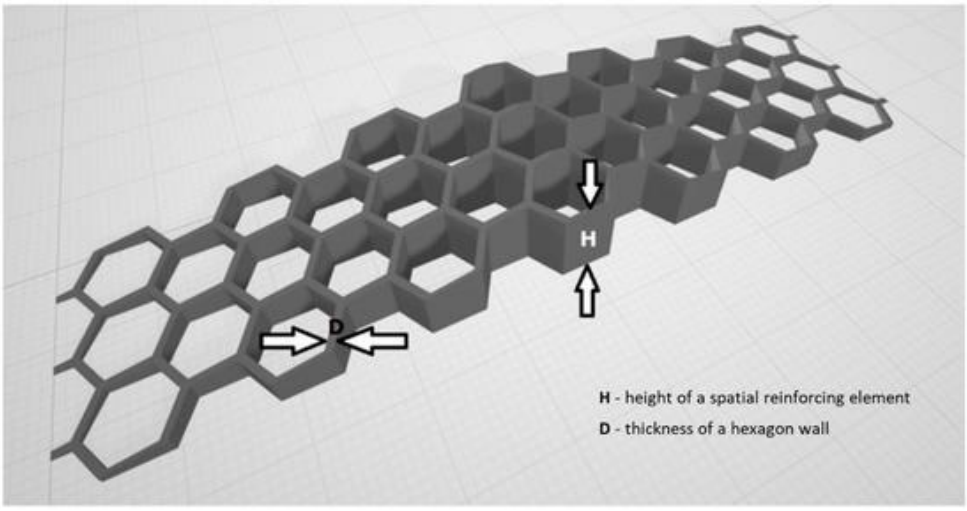


(**a**) (**b**)

Rysunek 5. (a) Deskowanie belkowe wydrukowane w 3D; (b) badanie wytrzymałości na zginanie elementu z szalunkiem wydrukowanym w 3D. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Katzer, Szatkiewicz, 2019))

Uzyskane przez autorów wyniki wykazały, że zachowanie się belek z szalunkiem jest quasi-plastyczne. Zachowanie mechaniczne porównano z właściwościami żelbetu i betonów zbrojonych zbrojeniem rozproszonym. Stwierdzono, że obecność dodatkowych żeber wpływa na wytrzymałość na zginanie. Najwyższą wytrzymałość osiągnięto dzięki trzem żebrom o wysokości 15 mm każde. Próbki z matrycy cementowej wraz z szalunkiem bez żeber są w stanie osiągnąć prawie dwukrotnie większą wytrzymałość niż próbki wykonane z samej matrycy cementowej. Próbki z szalunkami z żebrami są w stanie osiągnąć czterokrotność wytrzymałości elementu wzorcowego.

W innych pracach Katzera, Szatkiewicza (2020) badano charakterystykę zginania próbek zbrojonych przestrzennymi elementami wydrukowanymi w 3D w oparciu o geometrię heksagonalną. Ta geometria została wybrana do zbrojenia przestrzennego na podstawie sprawdzonych sztywnych właściwości mechanicznych (Song i in., 2017). Geometria heksagonalna została również wykorzystana do stworzenia belkowych struktur kratowych (Niu i in., 2018). Wydrukowane elementy umieszczono w stalowych formach, a następnie wypełniono matrycą cementową. Element zbrojący miał trójkątny przekrój wzdłuż długości belki (rys. 6). Odstępy między sześciokątami i ich rozmiary były stałe. Parametrami zmiennymi były: wysokość w środku przęsła *H* oraz grubość ścianki *D*. Autorzy zaprojektowali cztery różne wysokości i grubości.



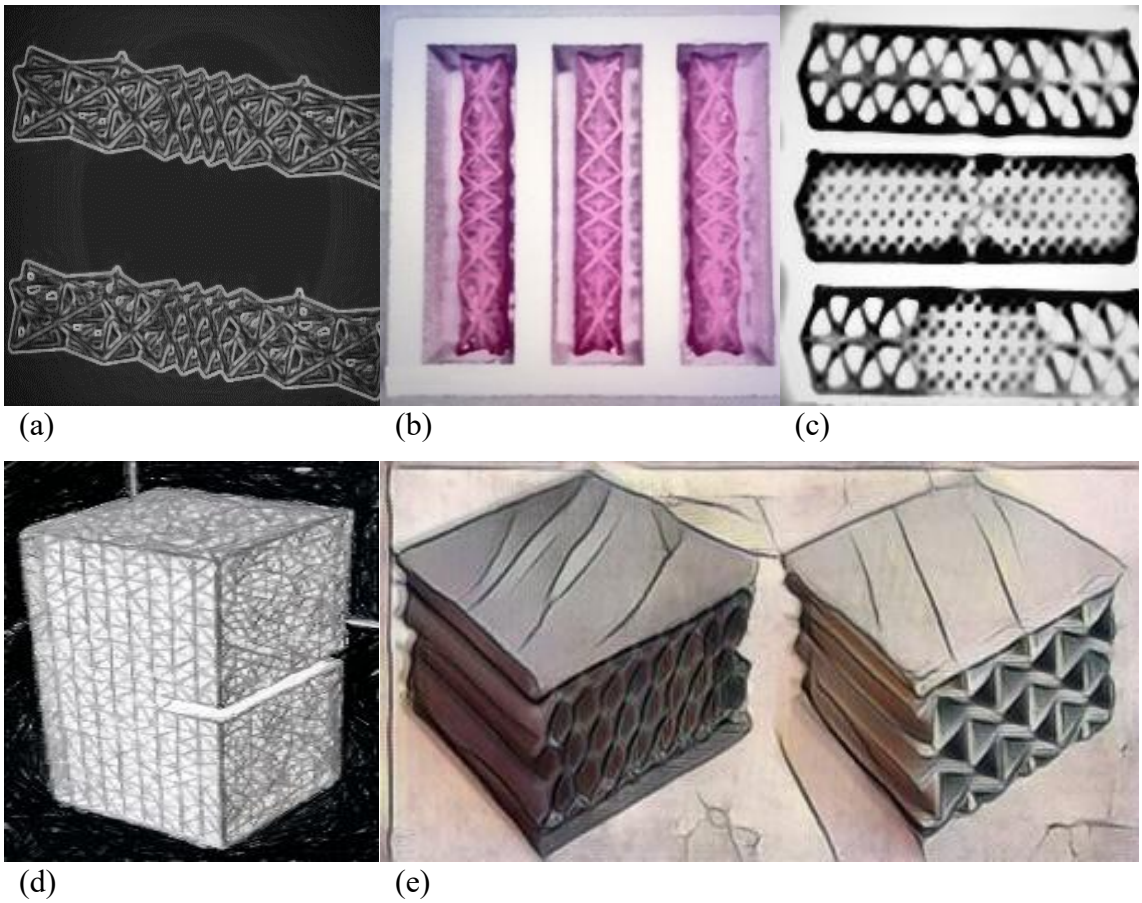
Rysunek 6. Widok ogólny projektowanego przestrzennego elementu wzmacniającego. Obraz stworzony przez A. Skoratko (inspiracja (Katzer, Szatkiewicz, 2020))

Wytrzymałość belki na zginanie wzrastała wraz ze wzrostem grubości ścianki i wysokości *H* elementu zbrojącego wykonanego z tworzywa sztucznego. Odpowiedni

dobór tych dwóch parametrów pozwolił na uzyskanie wartości maksymalnej siły równej 184% właściwości czystej matrycy. Udowodniono, że możliwe jest skuteczne zbrojenie elementów betonowych odpowiednim kształtem i rozmiarem elementu zbrojeniowego wydrukowanego w 3D.

Technologię druku 3D wykorzystano również do zbrojenia kompozytów cementowych drukowanymi polimerowymi strukturami sieciowymi (Xu, Zhang, Gan, Šavija, 2021). Strukturę zaprojektowanego zbrojenia polimerowego można dostosować do momentu zginającego i rozkładu naprężeń rozciągających. Autorzy Xu, Zhang, Šavija, Chaves Figueiredo, Schlangen (2019) zaprojektowali i wydrukowali cztery różne struktury kratownicowe (rys. 7a), stosowane do zbrojenia matrycy cementowej. Próbki poddano czteropunktowemu zginaniu. Wydrukowane elementy umieszczono wewnątrz form styropianowych (rys. 7b). Podczas testów wykazano, że próbki zbrojone wydrukowaną w 3D siatką wykonaną z tworzywa polimerowego wykazują właściwości plastyczne. Pęknięcie kruche konwencjonalnej matrycy cementowej zostało zmienione na pęknięcie plastyczne. Wytrzymałość kompozytów, w porównaniu z konwencjonalnym materiałem cementowym, wzrosła pod względem wytrzymałości na zniszczenie ciągliwe i ogólnej pracy wymaganej do rozerwania. Stwierdzono, że odpowiednia adaptacja funkcjonalna wzmocnień zwiększa podatność na zginanie przy mniejszym zastosowaniu zbrojenia.

Ci sami badacze w innej pracy (Šavija, 2020; Xu, Šavija, 2019; Xu, 2019) wydrukowali w 3D zbrojenie polimerowe. Siatki zbrojące miały być alternatywą dla tworzenia *SHCC*. W trakcie badań wykazano, że odpowiednie zaprojektowanie siatki zbrojeniowej umożliwia uzyskanie kompozytów cementowych o podwyższonej charakterystyce odkształceniowej i ugięciowej. Wielokrotne pękanie tradycyjnego *SHCC* zaobserwowano również w przypadku elementów ze zbrojeniem polimerowym wydrukowanym w 3D. Przetestowano trzy różne wzmocnienia różniące się geometrycznymi wzorami trójkątów. Kształt drukowanych elementów zbrojących przedstawiono na rysunku 7c. Dodatkowo zastosowano różną chropowatość drukowanych zbrojeń. Próbki poddano czteropunktowemu zginaniu i jednoosiowemu obciążeniu rozciągającemu. Dzięki zastosowanym zbrojeniom próbki mogły ulegać większym odkształceniom i osiągać większą wytrzymałość na rozciąganie. Niektóre projekty siatek umożliwiły tworzenie kompozytów o właściwościach *SHCC*.



Rysunek 7. (a) funkcjonalnie stopniowane struktury sieci oktetu; (b) próbki drukowane w formach polistyrenowych; (c) drukowane wzmocnienie z różnymi wzorami trójkątów; (d) próbki drukowane z nacięciem do próby rozciągania; (e) przykłady płyt warstwowych PLA wydrukowanych w 3D. Obrazy wykonane przez A. Skoratko (inspiracja (Yazdani Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, Hermenean, 2018; Xu i in., 2019, 2021; Xu, Šavija, 2019))

Gödek, Şevik, Özdilli (2020) stworzyli siatki w kształcie plastra miodu o dwóch grubościach, 1 mm i 2 mm, wydrukowane z *PLA*. Wzmocnienia były płaskie, a także z wypustkami. Próbki poddano trójpunktowemu zginaniu. Grubsze próbki z wypukłościami wykazywały twardość przy odkształceniu. Wypustki nieznacznie poprawiły wytrzymałość na zginanie (bardziej widoczne w grubszych próbkach). Zarówno wybrzuszenie, jak i pogrubienie poprawiło charakterystykę ugięcia i wartość udarności.

Zbadano również jednoosiową wytrzymałość na rozciąganie nieuporządkowanych struktur kratowych wydrukowanych w 3D (rys. 7d). Dokonano porównania wyników eksperymentalnych i symulacyjnych, a także omówiono wpływ kierunku druku. Właściwości struktur różnią się w zależności od kierunku drukowania. Wykazano, że im większa losowość i nieuporządkowanie materiału sieci, tym mniejsza wytrzymałość, sztywność i kruchość tych elementów (Xu i in., 2019).

Przeprowadzono również badania w celu określenia preferowanej geometrii architektonicznej polimerowych paneli warstwowych drukowanych w 3D (rys. 7e) (Yazdani Sarvestani, 2018). Wydrukowane panele charakteryzowały się różnymi topologiami komórek. Panele zostały poddane testom udarnościowym w celu określenia ich efektywności i zdolności do pochłaniania energii.

Farina i in. (2016) skoncentrowali swoje badania na drukowaniu dyskretnych prętów zbrojeniowych przy użyciu żywicy fotopolimerowej Fullcure 720. Przygotowane pręty posiadały zarówno gładką, jak i chropowatą powierzchnię. Wykorzystano je do badań trzypunktowego zginania. Porównano trzy rodzaje próbek: referencyjną (bez zbrojenia), zbrojoną gładką i zbrojoną szorstka. Próbki wzorcowe uległy zniszczeniu kruchemu, próbki ze zbrojeniem gładkim po osiągnięciu szczytowego obciążenia wykazywały stałą, resztkową nośność, natomiast próbki ze zbrojeniem szorstkim po szczytowym obciążeniu traciły swoją nośność, a następnie twardniały aż do drugiego szczytu, po którym to ulegały zniszczeniu. Próbki ze zbrojeniem gładkim uległy zniszczeniu typowemu dla zginania i propagacji pęknięcia środkowego aż do zniszczenia. W próbkach o szorstkim zbrojeniu zaobserwowano zniszczenie na ścinanie (liczne pęknięcia ukośne).

Pręty zbrojeniowe drukowano również przy użyciu termoplastycznych polimerów *PLA* i *PETG* (Shweiki, Junaid, Barakat, 2019). Służyły one do zbrojenia belek wykonanych z zaprawy murarskiej o wymiarach 200 × 50 × 50 mm. Pręty miały prostokątny przekrój poprzeczny 10 × 5 mm i długość 190 mm. W próbce zatopiono cztery sztuki i poddano próbom zginania w trzech punktach. Próbki ze wzmocnieniem wykonanym z *PLA* wykazywały znacznie niższą odporność na zginanie w porównaniu z próbkami, w których zastosowano *PETG*, pod względem odkształceń i obciążeń granicznych. Średnia wytrzymałość na zginanie próbek *PETG* była prawie dwukrotnie większa, a odkształcenie tych próbek przy maksymalnym obciążeniu osiągnęło trzykrotność odkształcenia próbek *PLA*. Dla obu omawianych polimerów przeprowadzono również próbę rozciągania. Oba osiągnęły podobną wytrzymałość, podczas gdy *PETG* nie uległ nagłej awarii i wykazywał znaczne wydłużenie. Energia pochłonięta przez próbki *PETG* była również wyższa (5-krotnie w porównaniu do próbek *PLA*.

5. Materiały i projekt eksperymentu

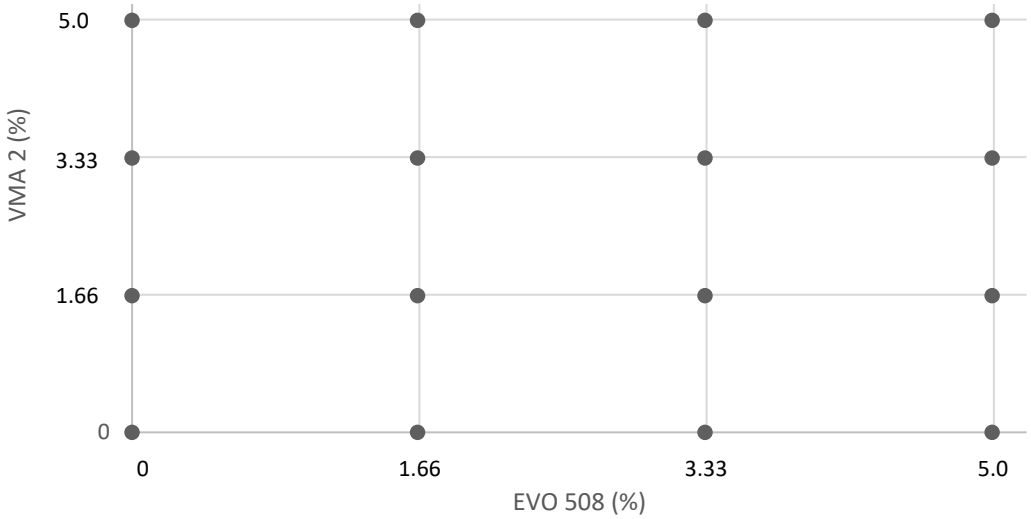
Do przeprowadzenia eksperymentu zaprojektowano mieszankę dedykowaną do wypełniania szalunków drukowanych 3D o przekrojach opartych na fraktalach a także wewnętrznych zbrojeń przestrzennych. Mieszankę taką należało ograniczyć w maksymalnym rozmiarze użytego kruszywa (maksymalna średnica użytego kruszywa 2mm) ze względu na stosunkowo mały rozmiar wykonywanych próbek spowodowany dostępną drukarką 3D. Mieszanka musiała również charakteryzować się dużą płynnością (na granicy samozagęszczalności) ze względu na skomplikowaną geometrię szalunków i konieczność ograniczenia lub zaniechania jakichkolwiek działań zagęszczających (Boulekbache, Hamrat, Chemrouk, Amziane, 2010).

W programie badawczym finalnie opracowano dwa rodzaje matryc: matrycę bez włókien (I) oraz matrycę z dodatkiem włókien (II) (pełniącą rolę *SFRC*) (Załącznik A5). Jako kruchą matrycę cementową przyjęto zaprawę normową opisaną w normie EN 196-1 (EN 196-1 Chapter 13, 2016). Do wytworzenia zaprawy użyto piasku CEN (Comité européen de normalization) (EN 196-1) o medianie średnicy (Katzer, 2012) 0,24 mm, cementu CEM II 32,5R oraz wody wodociągowej. Zmodyfikowano ją również dwoma domieszkami: superplastyfikatorem i stabilizatorem. Obie domieszki zastosowano w celu uzyskania bardzo płynnej i stabilnej konsystencji świeżej mieszanki. Zarówno superplastyfikator, jak i stabilizator były dostępne komercyjnie i spełniały wymagania normy BS EN 934-2:2009+A1:2012. Superplastyfikator (MC PowerFlow evo 508, dostarczony przez MC-Bauchemie, Środa Wielkopolska, Polska. Jest oparty na technologii polimeryzacji. Stabilizator (MC Centrament VMA 2, dostarczony przez MC-Bauchemie, Środa Wielkopolska) zwiększa spoistość zaczynu cementowego, co ogranicza sedymentację i wyciekanie świeżej mieszanki. Dzięki temu można uzyskać wysoką jednorodność – tak istotną w przypadku betonów płynnych i samozagęszczalnych. Uzyskane konsystencje świeżych mieszanek zaprawowych zostały określone tablicą płynięcia wg UNE EN 1015-3:2000/A2:2007.

Matryca bez dodatku włókien (I)

Pierwszy etap programu badawczego opierał się na tradycyjnym projekcie eksperymentu ortogonalnego. Schemat przyjęty do programu badań przedstawiono na rys. 8. Jako punkt odniesienia zastosowano mieszankę bez domieszek (0% VMA2 i 0%

EVO 508). Maksymalna doza dla obu domieszek wynosiła 5% według informacji producenta.



Rysunek 8. Projekt matrycy cementowej bez włókien [opracowanie własne]

Wyboru ostatecznej mieszanki dokonano na podstawie konsystencji świeżych mieszanek oraz ich właściwości mechanicznych. Uzyskane wyniki przedstawiono w załączniku A5. Wybrana mieszanka została wykorzystana do wypełnienia przestrzennych elementów zbrojących przedstawionych w pracy A4 oraz do zalania szalunków słupów przedstawionych w A1.

Matrya z dodatkiem włókien (*SFRC)* (II)

Elementy betonowe pozbawione zbrojenia są kruche. Dlatego prawie cały beton używany do celów konstrukcyjnych jest zbrojony stalowymi prętami, strzemionami, rzadziej siatkami lub włóknami. Z uwagi na powyższe fakty mieszankę matrycy cementowej opracowaną w pierwszym etapie badawczym modyfikowano włóknem stalowym w ilości od 0,5% do 2,0%.

Jako zbrojenie rozproszone zastosowano włókno stalowe (DM6/0,16 KrampeHarex). Włókno jest proste, o okrągłym przekroju. Długość i średnica włókna wynoszą odpowiednio 6 mm ± 0,6 mm i 0,16 mm, co daje smukłość 37,5. Włókno przedstawiono na rysunku 9. Ostatecznie zdecydowano się na wybór *SFRC* z 1% zawartością włókna. Matryca z dodatkiem włókien została wykorzystana w badaniach opisanych w A3 i A6.



Rysunek 9. Włókno stalowe użyte podczas programu badawczego [opracowanie własne]

Finalny skład matrycy bez dodatku włókien (I) i z dodatkiem włóknami (II) przedstawiono w tabeli 1 . Składniki dozowano i wymieszano za pomocą mieszalnika zapraw i procedury mieszania powszechnie stosowanej do tworzenia zaprawy normowej stosowanej do badań wytrzymałościowych cementów (BSI, BS EN 197-1. Cement. Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, 2011).

Tabela 1 Skład matrycy cementowej [opracowanie własne]

Składnik	Ilość (g)	Gęstość (g/cm^3)
Piasek CEN	1350.0	2.65
Cement portlandzki	450.0	3.10
Woda	225.0	1.00
Superplastyfikator	7.5	1.04
Stabilizator	7.5	1.01
Włókna stalowe*	66.0	7.50

* Składnik mieszanki występujący tylko w matrycy II

Próbki użyte do badań właściwości obu matryc cementowych miały kształt graniastosłupa o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm. Po 28 dniach dojrzewania zbadano gęstość pozorną, wytrzymałość na zginanie i ściskanie. Próbę zginania trójpunktowego przeprowadzono aparatem o maksymalnej sile obciążenia 10 kN. Procedura obciążania składała się z obciążenia wstępnego i obciążenia głównego. Siła startowa wynosiła 1 N, a prędkość obciążania 5 mm/min. Prędkość obciążania utrzymywano do momentu, gdy maksymalne obciążenie spadło o 95%. Charakterystykę mechaniczną stwardniałych zapraw po 28 dniach dojrzewania (w temperaturze +20 ± 1°C w owinięciu folią polietylenową) przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Właściwości mechaniczne stwardniałych matryc [opracowanie własne]

Właściwość	Matryca (I)	SFRC (II)	Jednostka
Wytrzymałość na ściskanie	22.7	33.6	MPa
Wytrzymałość na zginanie	4.3	5.3	MPa
Gęstość pozorna	2040.0	2140.0	kg/m^3
Konsystencja	285.0	267.0	mm

Filament

Szalunki z tworzywa sztucznego, typu stay-in-place oraz przestrzenne elementy zbrojące zostały stworzone przy użyciu dostępnej na rynku drukarki 3D. Drukarka 3D była zdolna do drukowania różnych tworzyw sztucznych, ale jako filament używany w programie badawczym wybrano *ABS*. Jest to filament problematyczny w użytkowaniu ze względu na tendencję do rozwarstwiania się, możliwego kurczenia się po wydrukowaniu oraz zwijania się na końcach drukowanych dłuższych elementów. Niemniej jednak filament okazał się bardzo skuteczny w przypadku wytrzymałych elementów zbrojących drukowanych w 3D do kompozytów cementowych w innych programach badawczych (Katzer, Szatkiewicz, 2019, 2020). Jego wysokie właściwości mechaniczne wraz ze znaczną odpornością na agresję chemiczną były również czynnikiem przy wyborze rodzaju filamentu do programu badawczego. Najważniejsze właściwości zastosowanego filamentu *ABS* (podane przez producenta) przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3 Kluczowe właściwości filamentu *ABS* [opracowanie własne]

Gęstość	Temperatura topnienia	Średnica	Moduł sprężystości przy rozciąganiu	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu	Moduł sprężystości przy zginaniu	Wytrzymałość na zginanie
[kg/dm^3]	[˚C]	[mm]	[GPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]
1100	+225	2.85	1.7	33.9	2.1	70.5

Plany eksperymentów

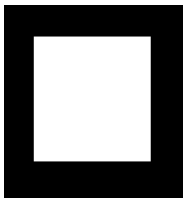
Plan eksperymentu opisanego w A1 i A3 obejmował trzy grupy przekrojów szalunków plastikowych. Utworzono siedem przekrojów reprezentujących różne rodzaje kształtów słupów. Pierwsza grupa składała się z przykładów przekrojów, które są

powszechnie wykorzystywane do tworzenia słupów lub filarów. Do tej grupy zaliczono szalunki o przekroju kołowym i kwadratowym. Druga grupa składała się z przykładów przekrojów, które są możliwe do wykonania przy użyciu tradycyjnych technik szalunkowych, ale byłyby bardzo pracochłonne w wykonaniu. Do tej grupy zaliczono szalunki o przekroju pięciokąta (pierwsza (1.) iteracja Cesaro Polyflake) oraz druga (2.) iteracja Cesaro Polyflake. Trzecią grupę stanowiły przykłady przekrojów, których wykonanie nie jest możliwe przy pomocy tradycyjnych technik szalunkowych. Szalunki o przekrojach opartych na bardziej skomplikowanych fraktalach (czyli: trzecia (3.) iteracja Cesaro Polyflake, trzecia i czwarta (3.) i (4.) iteracja Gwiazdy Kocha) zostały przydzielone do tej grupy. Różnicę w tych obu badaniach stanowi tylko matryca cementowa (A1- matryca I bez dodatku włókien, A3- matryca II (*SFRC*)).

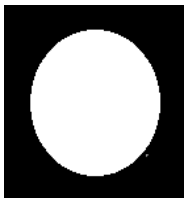
W przypadku artykułu A6 projekt eksperymentu składał się z pięciu przekrojów szalunków z tworzywa sztucznego opartych na iteracjach fraktalnych Cesaro (*CFI*). Wybór przekrojów był inspirowany wcześniejszym programem badawczym. Przekroje różnicowane są liczbą boków wielokąta początkowego (*NS*) oraz kątem (α) o który boki wielokąta są zagięte, wpływając bezpośrednio na obwód wewnętrzny (*IC*) tworzonego przekroju fraktalnego.

Kształty wszystkich omawianych przekrojów przedstawiono na rysunku 10. Zdecydowano, że graniastosłup o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm będzie pełnić rolę punktu odniesienia. Graniastosłup (w pozycji pionowej) był modelem słupa betonowego o polu przekroju 1600 mm^2. Wszystkie kształty rozpatrywanych przekrojów szalunków zostały zaprojektowane w taki sposób, aby pole powierzchni matrycy cementowej było zawsze równe 1600 mm^2. Wysokość wszystkich wydrukowanych w 3D szalunków była taka sama jak wysokość graniastosłupa i wynosiła 160 mm. Grubość ścian szalunku wynosiła 1,6 mm. Pola powierzchni samego tworzywa sztucznego a także wartość obwodu wewnętrznego danego przekroju z *ABS* przedstawiono w załącznikach A1, A3 i A6. Stosując takie podejście badawcze można stwierdzić, że wszystkie różnice we właściwościach mechanicznych badanych słupów spowodowane były kształtem przekroju szalunku, a następnie ilością tworzywa użytego do jego wykonania.

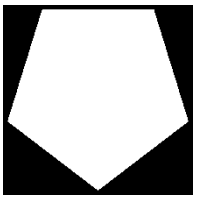
Kształty przekrojów (A1 i A3)



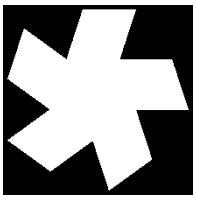
(**a**) Kwadrat



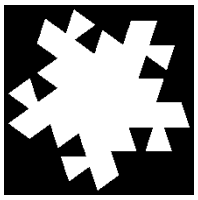
(**b**) Koło



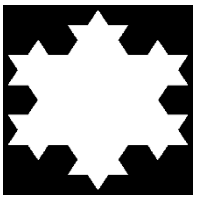
(**c**) 1. iteracja Cesaro Polyflake



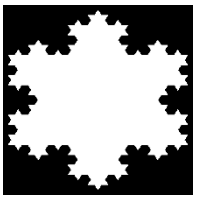
(**d**) 2. iteracja Cesaro Polyflake



(**e**) 3. iteracja Cesaro Polyflake

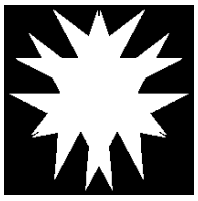


(f) 3. iteracja Koch Star



(**g**) 4. iteracja Koch Star

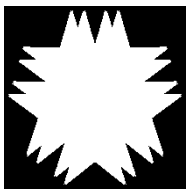
Kształty przekrojów (A6)



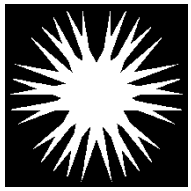
CFI=3; NS=3; α=155°



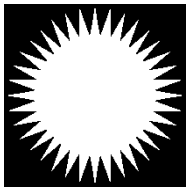
CFI=3; NS=5; α=150°



CFI=4; NS=5; α=145°



CFI=4; NS=3; α=190°



CFI=6; NS=4; α=170°

Rysunek 10. Przekroje szalunków wydrukowanych w 3D [opracowanie własne]

Szalunki z *ABS* zostały wydrukowane w 3D w pozycjach pionowych w grupach po cztery sztuki w A1 i A6 oraz po 6 sztuk w A3. Dysza użyta do druku 3D charakteryzowała się średnicą 0,8 mm. Do wykonania każdej ściany szalunkowej potrzebne były dwie warstwy filamentu. Średnia prędkość druku 30 mm/s została wykorzystana do zachowania integralności drukowanych smukłych szalunków i jak najlepszej jakości druku. W sumie wydrukowano: 28 szalunków w ramach badań opisanych w A1, 42 szalunki w A3 oraz 20 szalunków w A6. Szalunki od spodu uszczelniono taśmą klejącą, a od góry wypełniono świeżą matrycą cementową (I) lub (II). Szalunki przykryto od góry taflami szkła i pozostawiono na 28 dni do dojrzewania w temperaturze +20 ± 1 °C. Przed badaniami usunięto taśmę klejącą z dolnych partii próbek. Na rysunku 11 przedstawiono szalunki i elementy zbrojące wydrukowane w 3D oraz próbki szalunkowe po zabetonowaniu. Natomiast wszystkie warstwy zewnętrzne i wypełniające gyroidy (A4) zostały wydrukowane jako bryły, aby uzyskać najlepszą możliwą wytrzymałość w każdym kierunku. Średnia prędkość druku była mniejsza niż zwykle przyjmowana dla innych wydruków i wynosiła 25 mm/s. Elementy zbrojące umieszczono w stalowych formach. Wylewanie matrycy wykonano w jednej warstwie. W badaniu zostały użyte cztery różne typy przestrzennego zbrojenia.



Rysunek 11. Wydrukowane szalunki i elementy zbrojące oraz próbki wykonane z betonu i tworzywa sztucznego [opracowanie własne]

6. Wyniki i dyskusja

Doktorantka zamierzała udowodnić, że możliwe jest tworzenie słupów betonowo-plastikowych o niekonwencjonalnych przekrojach, charakteryzujących się quasi-plastycznym zniszczeniem. W trakcie programu badawczego szalunki słupów zostały wydrukowane w 3D i wypełnione samozagęszczalną matrycą cementową I lub II, która pełniła rolę betonu. Ze względu na wielkość szalunków 3D zastosowano matrycę zamiast betonu. Szalunek pełnił również rolę zbrojenia. Powstały różne przekroje słupów, od bardzo podstawowych (kwadratowy, kołowy) po bardzo skomplikowane i niemożliwe do stworzenia w jakikolwiek tradycyjny sposób oparte na iteracjach różnych fraktali. Przygotowane próbki słupów betonowo-plastikowych wykorzystano do badań wytrzymałości na ściskanie. Zarejestrowano pełny stosunek obciążenia do odkształcenia, aż do ostatecznego zniszczenia próbki. Uzyskano quasi-plastyczne zachowanie badanych próbek.

Próbki badano po 28 dniach utwardzania aparatem wytrzymałościowym o maksymalnej sile obciążenia 300 kN. Siła obciążająca była osiowa względem wysokości badanych słupów. Procedura załadunku składała się z obciążenia wstępnego i obciążenia właściwego. Początkowe obciążenie 100 N utrzymywano przez 30 s, aby próbki się ustabilizowały. Następnie zwiększono siłę. Szybkość była kontrolowana przez generowane odkształcenia (0,5 mm/min). Obciążenie utrzymywano aż do ostatecznego zniszczenia próbki lub do osiągnięcia odkształcenia 5,6 mm (3,5% wysokości próbki) dla próbek z A1 i A3 i do osiągniecia 6% odkształcenia dla A6. Ze względu na weryfikacyjny charakter programu badawczego oraz niewielkie rozmiary badanych próbek dane dotyczące obciążenia i odkształcenia pobrano bezpośrednio z aparatury wytrzymałościowej. Nie zastosowano zewnętrznych czujników. Skomplikowane przekroje poprzeczne próbek uniemożliwiały wykorzystanie jakiegokolwiek systemu *DIC* (Digital Image Correlation).

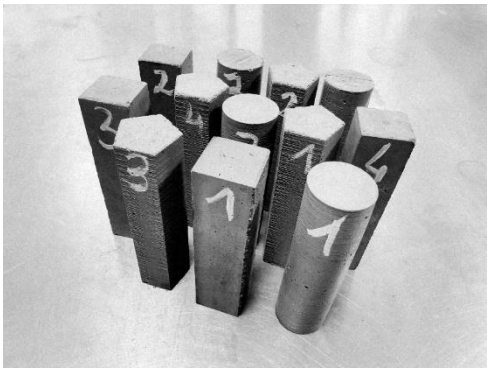
Do badań wytrzymałości na zginanie w A4 przyjęto schemat trzypunktowego zginania (dwie podpory i jeden punkt obciążenia). Siła obciążająca została wygenerowana w środku próbki z prędkością 50 N/s. Odległość między podporami wynosiła 0,1 m. Był to układ badawczy wykorzystywany do badania właściwości cementów przy użyciu znormalizowanej zaprawy, zgodnie z opisem (EN 196-1) [92]. W programie badawczym opisanym w A4 ze względu na oczekiwane zachowanie quasi-plastyczne testowanych elementów plastikowych, próbkę po osiągnięciu ugięcia 3%

uznano za całkowicie zniszczoną. Podczas badania zarejestrowano pełną zależność ugięcia środka rozpiętości od siły obciążającej (w odstępach czasu 0,02 s). Szczególną uwagę zwrócono na trzy punkty zależności obciążenie-ugięcie każdej próbki. Pierwszym punktem była siła krytyczna, drugim punktem było ugięcie 0,5% natomiast trzecim punktem było ugięcie 3,0%. Punkty siły krytycznej wykorzystano do obliczenia wytrzymałości na zginanie (f_f)

6.1 Właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi przeznaczonego do wykonywania słupów o przekrojach fraktalnych – A5

Program badań podzielono na trzy etapy. W pierwszym etapie badano czystą matrycę cementową (bez dodatku włókien). W drugim etapie programu badawczego wzięto pod uwagę tylko trzy najlepsze mieszanki. Ten etap badania poświęcono przetestowaniu zachowania się mieszanek zabetonowanych w kształcie słupów o różnych przekrojach. Ostatecznie w trzecim etapie programu badawczego wybrano jedną mieszankę, którą zmodyfikowano różnymi objętościami włókna stalowego, a następnie przetestowano.

W pierwszej kolejności zbadano konsystencję świeżych mieszanek bez dodatku włókien. Osiągane wyniki wahały się od około 180 mm do ponad 300 mm. Test wytrzymałości na ściskanie i testy wytrzymałości na zginanie prowadzono przez okres 91 dni. Biorąc pod uwagę konsystencję świeżych mieszanek oraz ich właściwości mechaniczne w stanie stwardniałym wybrano następujące mieszanki: 1,66% EVO 508 + 1,66% VMA 2, 3,33% EVO 508 + 1,66% VMA 2 i 5% EVO 508 +1,66% VMA 2, które zostały zakwalifikowane do drugiego etapu programu badawczego. Do tego etapu programu badawczego wybrano trzy różne typy przekrojów słupów (kwadrat, koło i 1. iteracja Cesaro Polyflake), które przedstawiono na rysunku 12.



Rysunek 12. Trzy różne typy przekrojów słupów [opracowanie własne]

Przekroje zostały utworzone w taki sposób, aby miały taką samą powierzchnię betonu 1600 mm^2.

Drugi etap programu badawczego zakończono wyborem najlepszej mieszanki betonowej do modyfikacji włóknem stalowym. Wyboru dokonano na podstawie właściwości mechanicznych mieszanek podczas ładowania próbek kolumnowych. Do kolejnego etapu programu badawczego wybrano mieszankę 1,66% EVO 508 + 1,66% VMA 2.

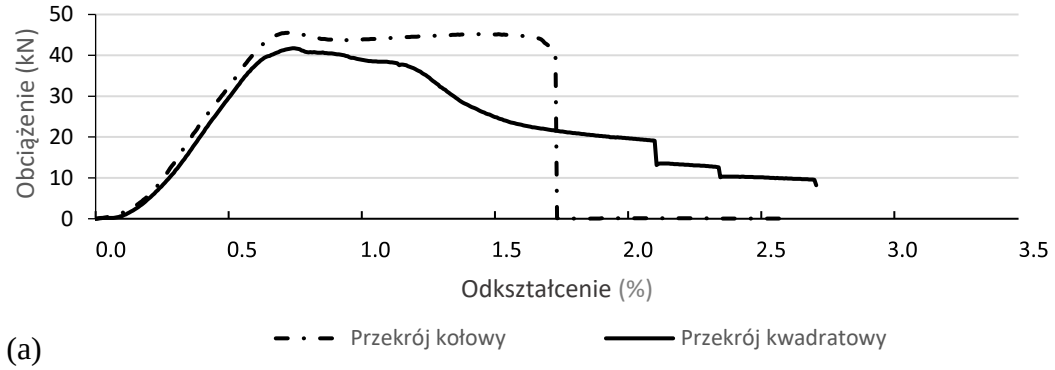
Wybraną mieszankę wykorzystano w trzecim etapie programu badawczego. Modyfikowano ją włóknem stalowym w ilości od 0,5% do 2,0%. Pierwszą właściwością, którą przetestowano na tym etapie programu badawczego, była konsystencja. Następnie przeprowadzono standardowe testy zginania i ściskania. Dla wszystkich czterech objętości dodawanego włókna uzyskano bardzo dobrą powtarzalność wyników. Najlepszą powtarzalność wyników uzyskano dla objętości włókien równej 1%. Relacje obciążenie-odkształcenie umożliwiły obliczenie energii dysypowanej w celu osiągnięcia siły krytycznej. W przypadku dodatku włókien o objętości 0,5%, 1,0% i 1,5% ilość rozpraszanej energii jest prawie taka sama i wynosi 0,34 J ± 0,01 J. Zgodnie z literaturą (Chang, Chai, 1995; Iskhakov, Ribakov, 2007; Johnston, Zemp, 1991; Lee, Barr, 2004; Paskova, Meyer, 1997) dodatek 0,5% włókna do betonu jest uznawany za minimalną objętość włókna gwarantującą jednorodność *SFRC*. Maksymalna badana ilość dodanego włókna (2%) pozwoliła na uzyskanie większej ilości rozpraszanej energii przy obciążeniu krytycznym, ale jednocześnie świeża mieszanka charakteryzowała się najbardziej gęstą konsystencją. Inne właściwości mechaniczne, a mianowicie wytrzymałość na zginanie i ściskanie, były bardzo podobne dla wszystkich badanych *SFRC*. Biorąc pod uwagę powyższe fakty, zdecydowano się na wybór *SFRC* z 1% zawartością włókna do wykonania kolumn o przekrojach opartych na fraktalach.

6.2 Koncepcja wykorzystania druku 3D do produkcji słupów betonowo-plastikowych o niekonwencjonalnych przekrojach – A1

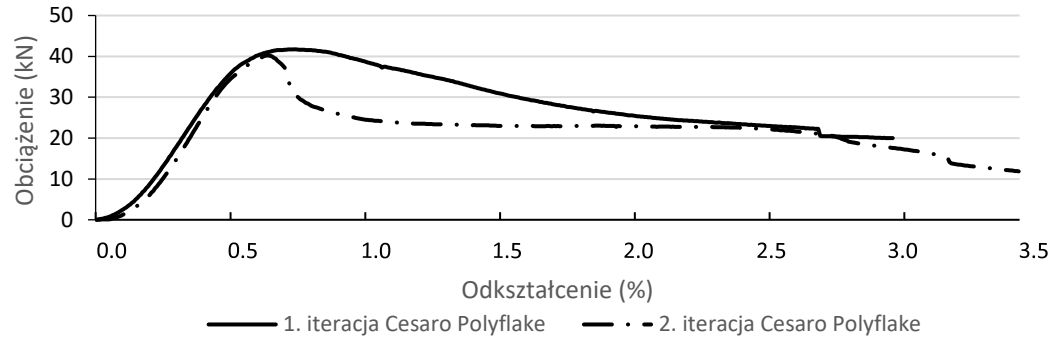
Na rysunkach 13a, 13b, 13c przedstawiono przykładowe zależności obciążenia od odkształcenia zarejestrowane podczas badań. Charakterystyki obciążenia i odkształcenia przekrojów, które są powszechnie stosowane do tworzenia słupów lub filarów (przekroje kołowe i kwadratowe) przedstawiono na rysunku 13a. Oba typy próbek osiągnęły maksymalną siłę obciążenia większą niż 40 kN. Ostateczne zniszczenie próbek o przekroju kołowym było nagłe i towarzyszyło mu pęknięcie plastikowego szalunku

traconego. Kawałki szalunków oderwały się od matrycy cementowej, pękały, a część z nich odprysła na zewnątrz. Zniszczenie próbek o przekroju kwadratowym było mniej nagłe, a sam proces niszczenia był dość podobny do tego z przekroju kołowego. W tym przypadku żadne odłamki zniszczonego szalunku nie odpryskiwały na zewnątrz. Na rysunku 13b, przedstawiono zależności obciążenie-odkształcenie próbek o przekrojach, które można wykonać przy użyciu tradycyjnych technik szalunkowych, ale ich wykonanie byłoby bardzo pracochłonne. Oba typy próbek charakteryzują się bardzo podobną maksymalną siłą obciążenia (około 40 kN), ale ich zachowanie jest znacznie bardziej quasi-plastyczne w porównaniu z zależnościami przedstawionymi na rysunku 13a. Próbki osiągają dwa razy większe odkształcenie, zanim zostaną ostatecznie zniszczone. Procesowi niszczenia towarzyszy również pękanie szalunków plastikowych, jednak odłamki szalunków nie oddzielają się od próbek. Nagłe spadki wartości siły obciążającej reprezentują zniszczenie pewnej warstwy szalunku wydrukowanego w 3D. W przypadku przekroju kwadratowego proces rozpoczynał się od narożnika próbki, co skutkowało utratą warstwy szalunku. W przypadku przekroju kołowego proces ten przebiegał znacznie szybciej. Szalunek został ostatecznie zniszczony niemal na całej wysokości okazu. Zjawisko to można śledzić w relacji obciążenie-odkształcenie (patrz rysunek 13a), gdy siła obciążająca spada natychmiast z wartości ponad 40 do 0 kN.

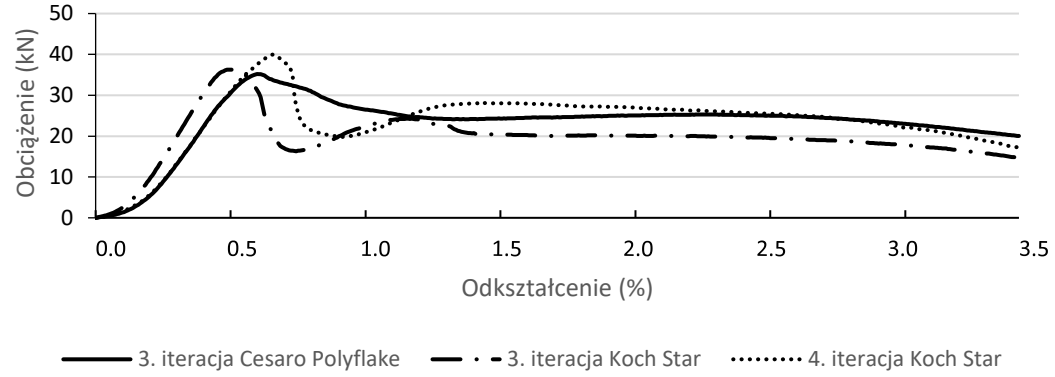
Na rysunku 13c przedstawiono zależności obciążenie-odkształcenie dla przekrojów poprzecznych, których nie można utworzyć przy pomocy tradycyjnych technik szalunkowych. Badane próby o skomplikowanych przekrojach opartych na fraktalach (tj. 3. iteracja Cesaro Polyflake, 3. i 4. iteracja Gwiazdy Kocha) charakteryzują się właściwościami quasi-plastycznymi. Po osiągnięciu największej siły obciążającej (od 35 do 40 kN) dalszy proces niszczenia jest bardzo płynny i wiąże się z dużymi odkształceniami. Kształt krzywych obciążenie-odkształcenie przypomina zachowanie się betonów zbrojonych włóknami (Babaie i in., 2019; Boulekbache i in., 2010; Domski, 2016). We wszystkich badanych próbkach fraktalnych proces obciążania został zatrzymany po osiągnięciu maksymalnego planowanego odkształcenia 3,5%. Żaden z okazów nie został ostatecznie zniszczony w tym momencie.



(a)



(b)



(c)

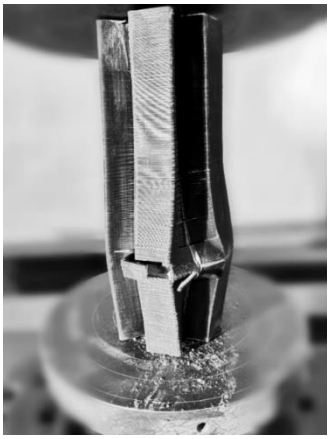
Rysunek 13. Zależności obciążenie-odkształcenie dla badanych słupów: a) o przekroju kwadratowym i kołowym; b) o przekroju poprzecznym w kształcie 1. i 2. iteracji Cesaro Polyflake; c)o kształcie 3. iteracji Cesaro Polyflake, 3. i 4. iteracji gwiazdy Kocha [opracowanie własne]

Oprócz odkształceń pionowych proces obciążania próbek wiązał się ze znacznymi poziomymi odkształceniami przekroju poprzecznego. Szalunek z tworzywa sztucznego uległ deformacji, ale nie pękł, utrzymując quasi-plastyczne zachowanie całej próbki. Zdjęcia próbek po badaniach wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 14 .

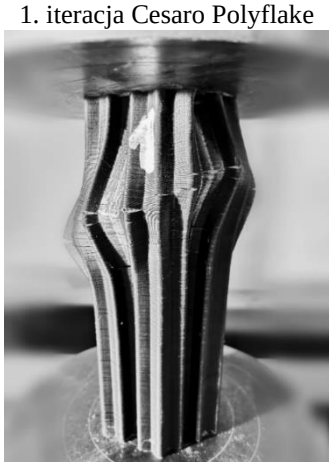

Kwadrat

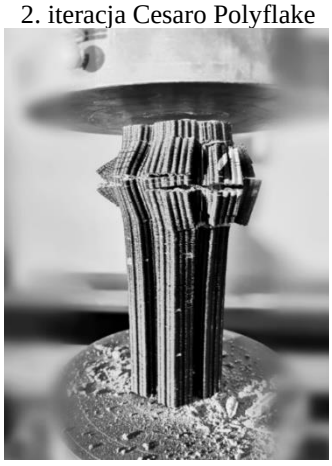

Koło


1. iteracja Cesaro Polyflake


2. iteracja Cesaro Polyflake


3. iteracja Cesaro Polyflake


3. iteracja Koch Star

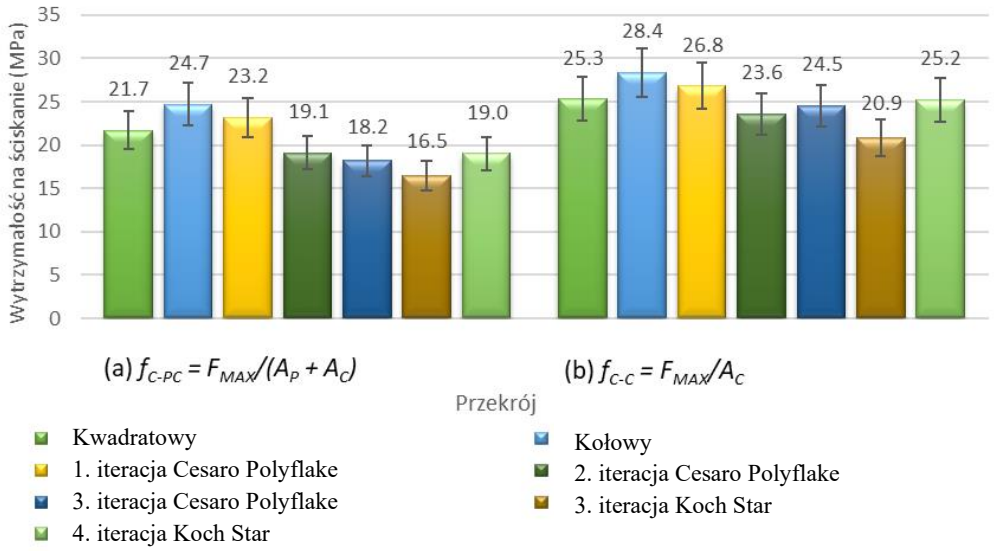

4. iteracja Koch Star

Rysunek 14. Obrazy próbek po badaniu [opracowanie własne]

Zarejestrowane zależności obciążenie-odkształcenie umożliwiły obliczenie wytrzymałości na ściskanie (f_C) badanych słupów. Dla wszystkich próbek wyznaczono maksymalną osiągniętą siłę obciążenia (F_{MAX}) i wykorzystano ją do obliczeń wytrzymałości na ściskanie. Obliczono dwie wersje wytrzymałości na ściskanie, pamiętając o specyficznych właściwościach geometrycznych szalunków drukowanych w 3D. Wersja (a) obliczonej wytrzymałości na ściskanie ($f_{C\text{-}PC}$) uwzględniała zarówno

pola przekroju poprzecznego tworzywa sztucznego (A_P) jak i betonu (A_C) (pełna powierzchnia przekroju). Wersja (b) obliczonej wytrzymałości na ściskanie ($f_{C\text{-}C}$) uwzględniała tylko pole przekroju poprzecznego betonu. Takie podejście było spowodowane bardzo małą wartością modułu sprężystości filamentu w porównaniu z betonem. Zdaniem doktorantki zasadne jest założenie, że tylko rdzeń betonowy przenosi osiowe obciążenie ściskające, a szalunek z tworzywa sztucznego pracuje tylko w stanie rozciągania, zapobiegając pękaniu rdzenia betonowego. Po osiągnięciu (F_{MAX}) betonowy rdzeń pęka, a jego ostateczne zniszczenie spowalnia szalunek.

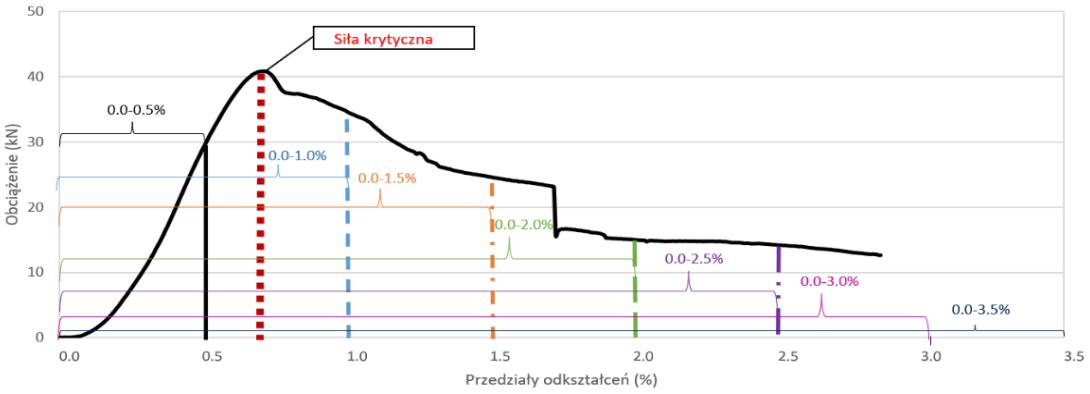
Oba warianty obliczonej wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 15 . Można zauważyć, że uwzględnienie powierzchni tworzywa sztucznego jest szczególnie ważne w przypadku przekrojów opartych na fraktalach. Powierzchnia tworzywa sztucznego jest w tych przypadkach największa i może wpłynąć na obliczoną wytrzymałość na ściskanie nawet o 6,3 MPa.



Rysunek 15. Wytrzymałość na ściskanie badanych słupów betonowo-plastikowych [opracowanie własne]

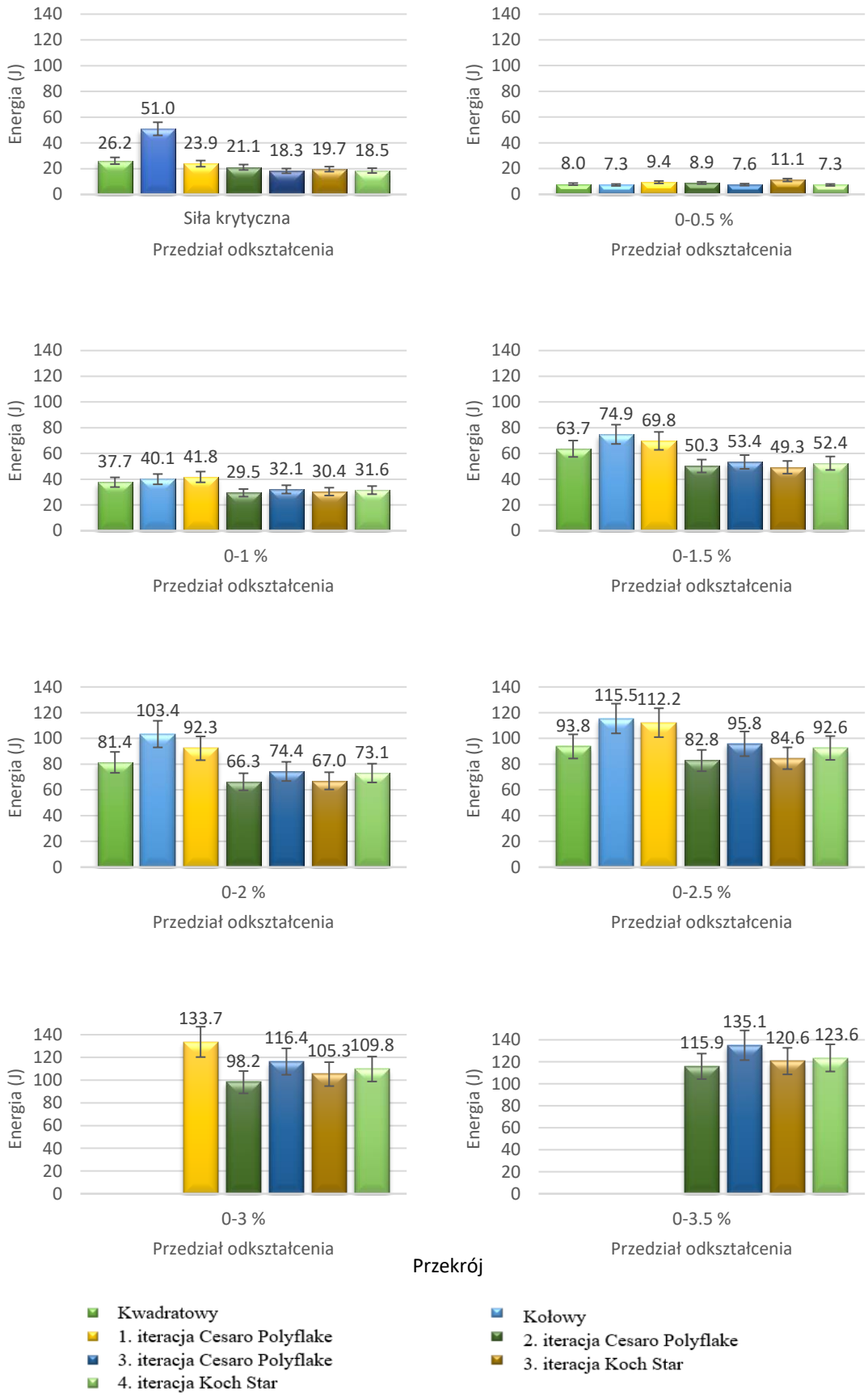
Ze względu na niekonwencjonalne zachowanie się badanych słupów z szalunkami z tworzywa sztucznego wydrukowanymi w 3D (pełniącymi również rolę zbrojenia), ich wytrzymałość na ściskanie nie jest parametrem wystarczającym do uchwycenia ich właściwości mechanicznych. Biorąc pod uwagę kształt uzyskanych relacji obciążenie-odkształcenie, które przypominają relacje uzyskiwane podczas badań betonów zbrojonych włóknami, doktorantka zdecydowała się na zastosowanie metod zbliżonych do przyjętych w technologii betonów zbrojonych włóknami (NF EN 14651+A1. Test

Method for Metallic Fibre Concrete—Measureing the Flexural Tensile Strength, 2012). Dla wszystkich badanych próbek obliczono energię potrzebną do ich ostatecznego zniszczenia. Mianowicie obliczono pole pod krzywą obciążenie-odkształcenie w siedmiu przedziałach związanych z osiągniętym odkształceniem (co 0,5%). Dodatkowa wartość energii została obliczona dla maksymalnego obciążenia niezależnie od tego, przy jakiej wartości odkształcenia została osiągnięta. Graficzny schemat obliczania energii przedstawiono na rysunku 16.



Rysunek 16. Schemat przedziałów odkształceń, dla których obliczono energię [opracowanie własne]

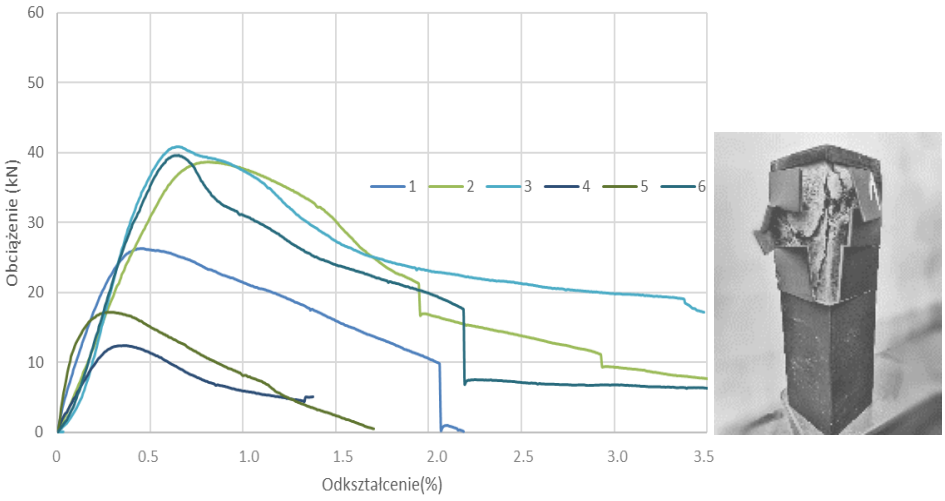
Energię potrzebną do uzyskania poszczególnych odkształceń badanych słupów betonowo-plastikowych przedstawiono na rysunku 17. Do odkształcenia 2,5% możliwa była rejestracja energii dla wszystkich badanych próbek. Dla odkształceń powyżej 2,5% zniszczono próby o tradycyjnych (kwadratowych i kołowych) przekrojach, dlatego energia nie jest rejestrowana. Próbki o przekrojach, które można utworzyć przy użyciu tradycyjnych technik szalunkowych, ale których wykonanie byłoby bardzo pracochłonne (1. i 2. iteracja Cesaro Polyflake), są w stanie wytrzymać nieco większe odkształcenia niż próbki o przekrojach kwadratowych i kołowych. W przypadku próbek o przekrojach niemożliwych do wykonania tradycyjnymi technikami szalunkowymi, maksymalna planowana do realizacji wartość odkształcenia została osiągnięta, podczas gdy próbki nadal przenosiły znaczne obciążenie (50 ± 5% obciążenia maksymalnego). Najwyższa zarejestrowana wartość energii wynosiła 135,1 J i została osiągnięta przez kolumnę o przekroju 3. iteracji Cesaro Polyflake. Z tradycyjnego konstrukcyjnego punktu widzenia najbardziej interesujące są wartości energii potrzebnej do osiągnięcia maksymalnego obciążenia. Kołowy przekrój poprzeczny okazał się najlepszym rozwiązaniem z tej perspektywy z prawie dwukrotnie większą potrzebą energii w porównaniu z kwadratowym przekrojem i uzyskaniem największej siły obciążającej, a co za tym idzie wytrzymałości na ściskanie.



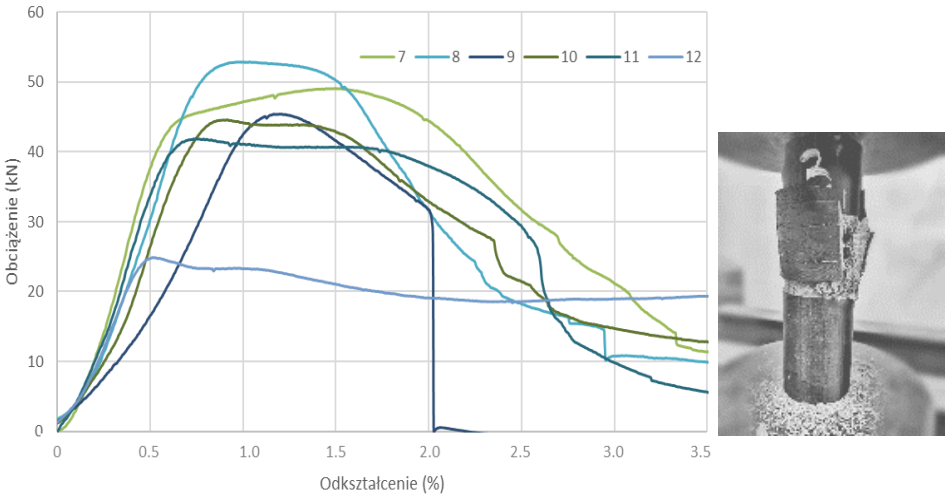
Rysunek 17. Energia potrzebna do uzyskania określonego odkształcenia badanych słupów betonowo-plastikowych [opracowanie własne]

6.3 Wykorzystanie drukowanych w 3D szalunków do tworzenia słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi (słupy SFRC-plastik) – A3

Na rysunku 18a, 18b przedstawiono zależności obciążenie-odkształcenie dla badanych słupów SFRC-plastik o przekroju kwadratowym i kołowym. Prawie wszystkie próbki kołowe osiągnęły maksymalną siłę obciążenia większą niż 40 kN. Najwyższe zarejestrowane obciążenie wyniosło 53 kN. Maksymalna siła obciążenia próbek kwadratowych wynosiła od 12 kN do 41 kN. Ostateczne zniszczenie obu rodzajów słupów SFRC-plastik było nagłe i związane z miejscowym zniszczeniem szalunku. Pionowe pęknięcie powstało natychmiast w plastikowym szalunku, powodując oddzielenie się od *SFRC*. Proces był bardzo dynamiczny, podobny do małej eksplozji. Błyskawiczne zniszczenie szalunku z tworzywa sztucznego jest szczególnie dobrze widoczne w przypadku próbek o przekroju kwadratowym 1 i 6 (rys. 18a). Nagły spadek siły obciążającej, który pojawił się po osiągnięciu odkształcenia 2%, jest właśnie taką awarią. W przypadku próbki 2 zniszczenie szalunku plastycznego następowało dwuetapowo przy odkształceniach prawie 2%, a następnie przy odkształceniach prawie 3%. Próbki 4 i 5 charakteryzują się znacznie mniejszymi obciążeniami i odkształceniami w porównaniu z pozostałymi próbkami o przekroju kwadratowym. Dzięki obecności włókna stalowego, odpryski matrycy cementowej nie zostały wystrzelone na zewnątrz. W przypadku próbek kwadratowych powstawanie pęknięcia pionowego zawsze pojawiało się w jednym z naroży.



(a)



(b)

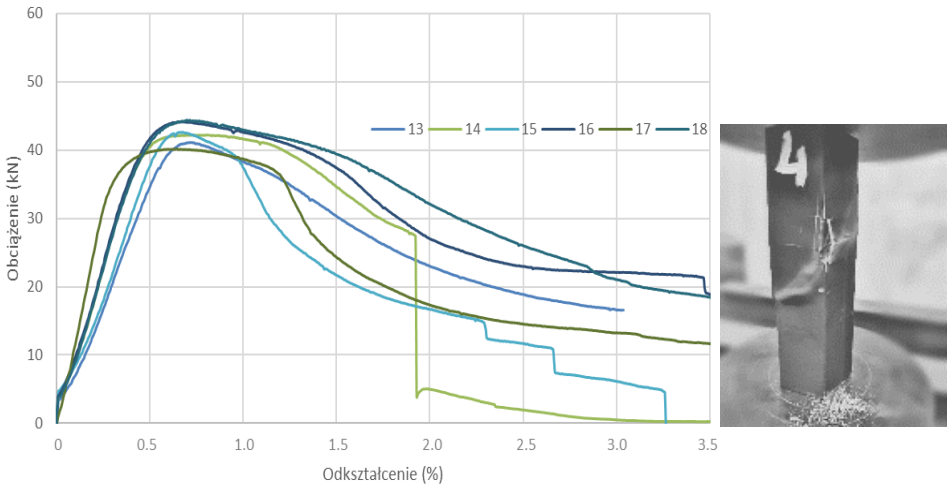
Rysunek 18. Zależności obciążenie–odkształcenie dla słupów SFRC–plastik: (a) (próbki od 1 do 6) o przekrojach kwadratowych; (b) (próbki od 7 do 12) o przekrojach kołowych [opracowanie własne]

Relacje obciążenie-odkształcenie dla słupów SFRC-plastik o kwadratowym przekroju poprzecznym tworzą bardzo luźną rodzinę z dużą zmiennością zarówno pod względem maksymalnego obciążenia, jak i odkształcenia. Ogólny charakter procesu niszczenia różni się również w zależności od próbki. W przypadku słupów SFRC-plastik o przekroju kołowym (rys. 18b) tylko jedna próbka (nr 9) wykazuje natychmiastowe zniszczenie szalunku z tworzywa sztucznego i tylko jedna próbka (nr 12) charakteryzuje się znacznie niższymi charakterystykami obciążeniowo-odkształceniowymi w porównaniu z innymi próbkami o przekroju kołowym. Relacje obciążenie-odkształcenie pozostałych próbek są podobne, z wieloma małymi „karbami" reprezentującymi lokalne uszkodzenie szalunku z tworzywa sztucznego.

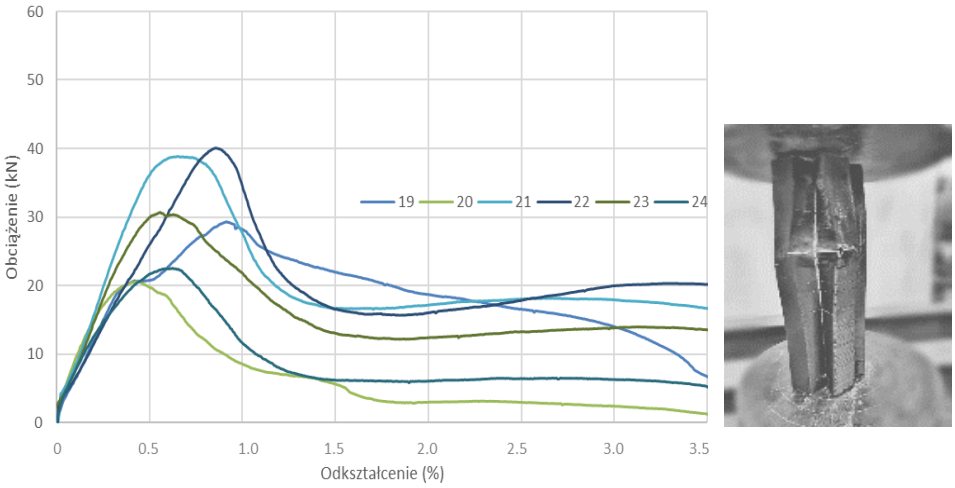
Na rysunku 19a, 19b przedstawiono zależności obciążenie-odkształcenie dla słupów SFRC-plastik z 1. (pięciokąt) i 2. iteracją przekrojów Cesaro Polyflake. Wszystkie próbki pięciokątne osiągnęły maksymalną siłę obciążenia większą niż 40 kN. Maksymalna siła obciążenia dla próbek o przekroju poprzecznym w kształcie 2. iteracji Cesaro Polyflake wynosiła od 20 kN do 40 kN. Ostateczny proces niszczenia przebiegał mniej gwałtownie niż w przypadku próbek o przekroju kwadratowym i kołowym. Osiągnięciu maksymalnej siły obciążenia towarzyszyło odkształcenie i miejscowe pęknięcie szalunku z tworzywa sztucznego. Jednak szalunki nie zostały oddzielone od *SFRC*. Zależności zarejestrowane dla próbek o przekroju pięciokątnym są podobne do zarejestrowanych dla próbek o przekroju kołowym. Jeden egzemplarz

charakteryzuje się natychmiastowym zniszczeniem szalunku z tworzywa sztucznego (nr 14). Relacje obciążenie-odkształcenie dla wszystkich pozostałych próbek reprezentują podobne zachowanie i tworzą znacznie ściślejszą rodzinę wyników w porównaniu z próbkami o przekroju kołowym i kwadratowym. Zarejestrowane zależności obciążenie-odkształcenie słupów SFRC-plastik o przekroju poprzecznym w kształcie 2. iteracji Cesaro Polyflake są nieco rozproszone i reprezentują zupełnie inne zachowanie dla każdej z sześciu próbek.

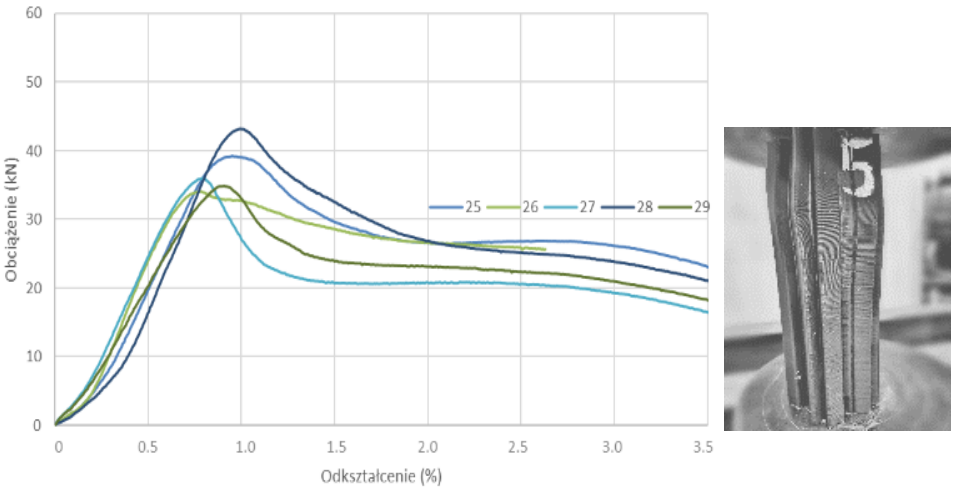
Na rysunku 19c, 19d, 19e przedstawiono zależności obciążenia i odkształcenia próbek o najbardziej skomplikowanych przekrojach. Średnie maksymalne obciążenie dla trzech typów próbek było bliskie 40 kN. Wszystkie badane próbki o przekrojach opartych na fraktalach charakteryzowały się wysoce quasi-plastycznymi zachowaniami. Po osiągnięciu maksymalnej siły obciążającej dalszy proces niszczenia przebiegał płynnie. Towarzyszyły mu duże odkształcenia poziome szalunku bez nagłego pęknięcia tworzywa sztucznego. Obciążenie było prowadzone aż do osiągnięcia odkształcenia 3,5%. Żadna z próbek opartych na fraktalach nie została w tym momencie ostatecznie zniszczona. Zdeformowane próbki nadal zachowywały swoje quasi-plastyczne cechy i dalsze obciążanie było nadal możliwe. Zdjęcia przykładowych próbek po badaniach wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w załączniku A3.



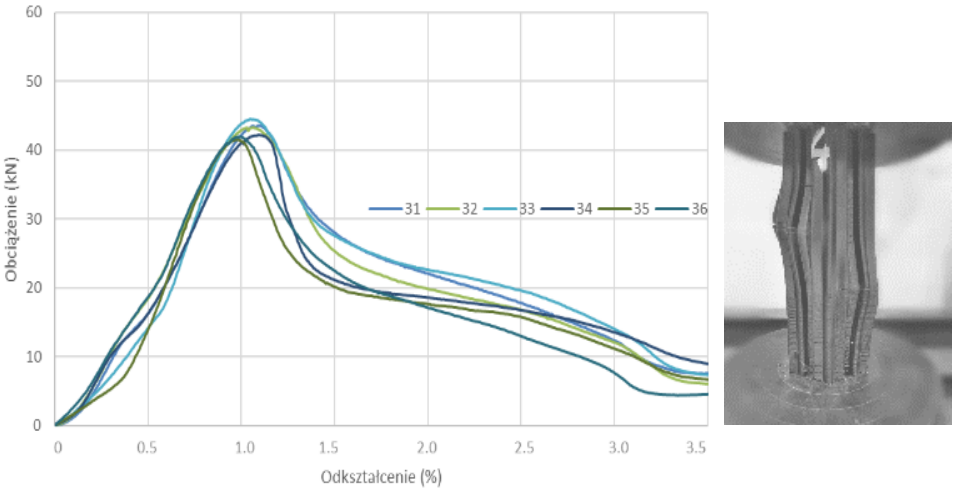
(a)


Obciążenie (kN)
Odkształcenie (%)
19
20
21
22
23
24

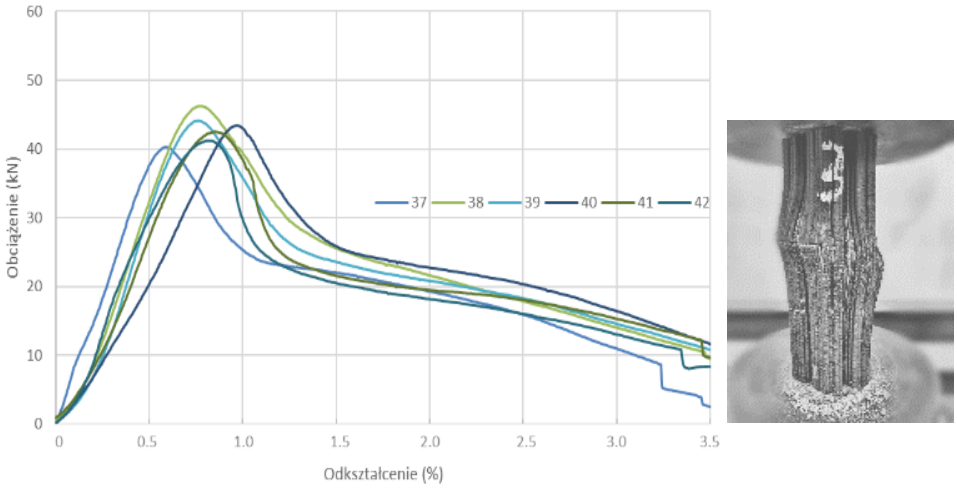
(b)


Obciążenie (kN)
Odkształcenie (%)
25
26
27
28
29

(c)


Obciążenie (kN)
Odkształcenie (%)
31
32
33
34
35
36

(d)



(e)

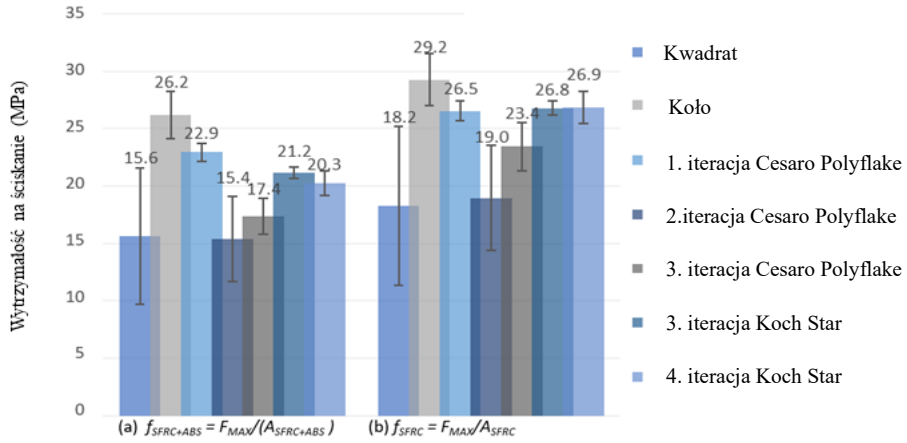
Rysunek 19. Zależności obciążenie-odkształcenie słupów SFRC-plastik: (a) (próbki od 13 do 18) z przekrojem w kształcie 1. iteracji Cesaro Polyflake; (b) (próbki od 19 do 24) z przekrojem w kształcie 2. iteracji Cesaro Polyflake; (c) próbki od 25 do 29) z przekrojem w kształcie 3. iteracji Cesaro Polyflake; (d) (próbki od 31 do 36) o przekroju poprzecznym w kształcie 3. iteracji Gwiazdy Kocha; (e) (próbki od 37 do 42) o przekroju poprzecznym w kształcie 4. iteracji Gwiazdy Kocha [opracowanie własne]

Relacje obciążenie-odkształcenie słupów o zaawansowanych przekrojach fraktalnych (rys. 19c, 19d, 19e) są bardzo spójne i tworzą jednorodne populacje wyników. Nie ma pęknięć warstw zewnętrznych szalunku, a charakterystyki obciążenia i odkształcenia wszystkich badanych próbek są do siebie bardzo podobne. Najlepsze wyniki pod względem jednorodności zarejestrowanych relacji uzyskały próbki o przekroju w kształcie 3. iteracji Gwiazdy Kocha (rys. 19d).

Tak jak poprzednio zależności obciążenie-odkształcenie badanych słupów SFRC-plastik wykorzystano do dwuetapowej analizy. Pierwszy etap obejmował oszacowanie granicznej wytrzymałości słupów na ściskanie. Dla każdej relacji obciążenie-odkształcenie określono maksymalną siłę obciążającą (F_{MAX}). Do obliczeń wykorzystano dwie wersje pola przekroju poprzecznego. Pierwsza wersja uwzględniała zarówno obszary *SFRC*, jak i szalunek z tworzywa sztucznego ($A_{SFRC+ABS}$). Druga wersja uwzględniała tylko obszar *SFRC* (A_{SFRC}). W ten sposób uzyskano dwie wersje maksymalnej wytrzymałości na ściskanie: $f_{SFRC+ABS}$ oraz f_{SFRC}. Obie wersje wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 20 . Powierzchnia plastiku jest znacznie większa w przypadku przekrojów opartych na fraktalach (nawet 2,4 razy w przypadku badanych próbek) niż w przypadku tradycyjnego przekroju kołowego. To podwójne podejście było motywowane dużą różnicą wartości modułu

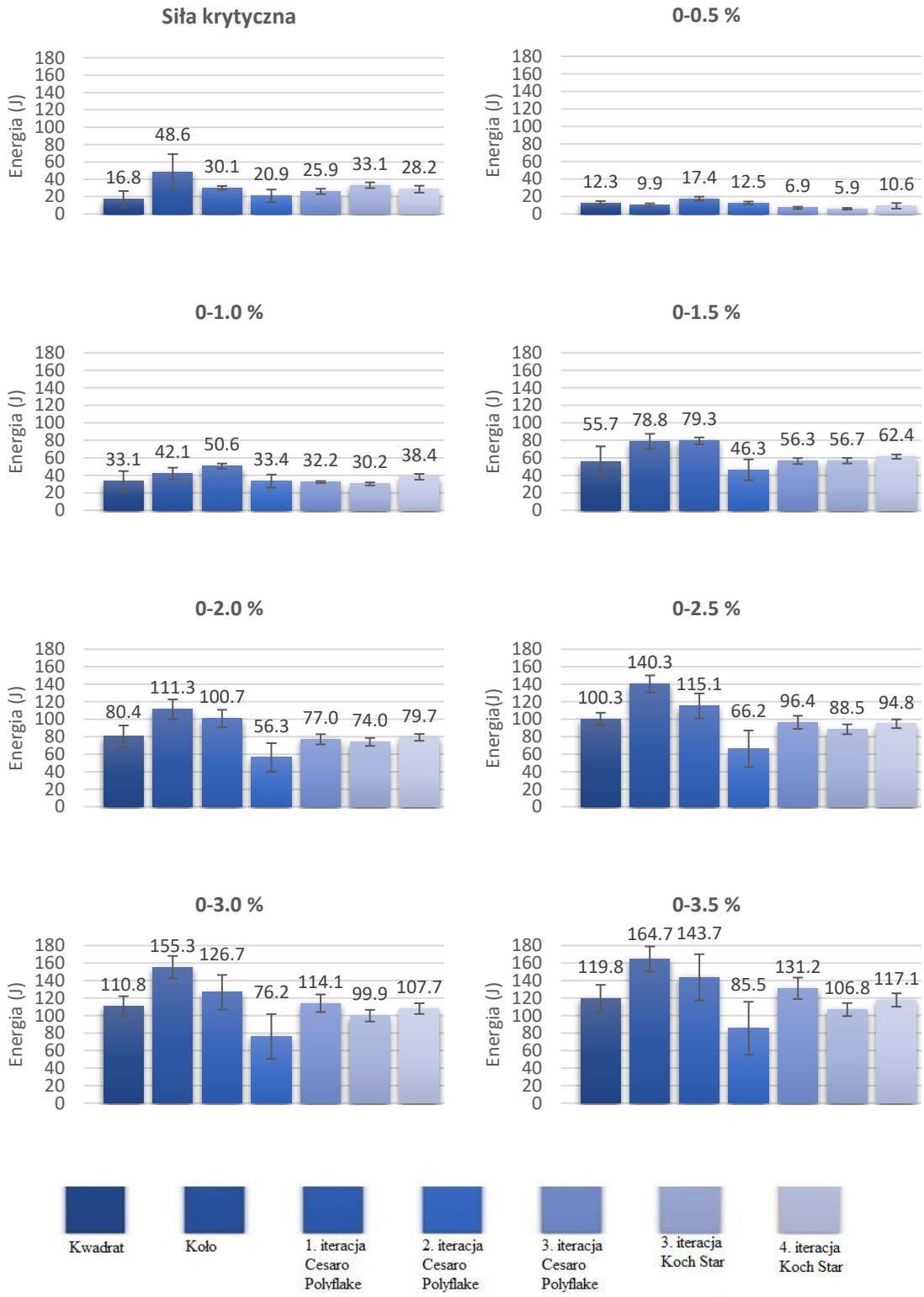
sprężystości między *SFRC* i *ABS*. Zdaniem doktorantki interakcja obu materiałów podczas obciążania jest złożona. Na początku można założyć, że tylko rdzeń SFRC przenosi obciążenie. Szalunek z tworzywa sztucznego zaczyna działać, gdy odkształcenie słupa jest coraz większe. Po osiągnięciu F_{MAX} *SFRC* zaczyna ulegać procesom pękania. Proces ten jest powstrzymywany przez wzmocnienie włóknami.

Wreszcie w dalszej części procesu niszczenia słupa szalunek z tworzywa sztucznego pracuje głównie na rozciąganie, spowalniając proces degradacji rdzenia *SFRC*. Różnice między f_{SFRC} i $f_{SFRC+ABS}$ wynoszą odpowiednio od 11,4% do 34,5% dla przekroju kołowego i 3. iteracji przekroju Ceasaro Polyflake. Można zauważyć, że uwzględnienie pola przekroju poprzecznego szalunku plastikowego ma szczególne znaczenie w przypadku przekrojów opartych na fraktalach. Omówione różnice w przypadku 4. iteracji przekroju poprzecznego Koch Star osiągnęły wartość 6,6 MPa.



Rysunek 20. Wytrzymałość na ściskanie słupów SFRC-plastik [opracowanie własne]

Biorąc pod uwagę, że szalunek z tworzywa sztucznego wzmacnia niekonwencjonalne zachowanie słupa SFRC-plastik, doktorantka postanowiła, tak jak poprzednim badaniu, opracować metodę inspirowaną metodologią stosowaną podczas badań zwykłych belek *SFRC* (NF EN 14651+A1. Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measureing the Flexural Tensile Strength, 2012). Wybrano osiem wartości odkształceń, dla których obliczono energię rozproszoną. Obliczoną energię rozproszoną przy osiągnięciu określonego odkształcenia przedstawiono na rysunku 21. Odkształcenia do 0,5% reprezentują znacznie więcej niż tylko zachowanie sprężyste próbek. Dla ostatecznej siły obciążającej słup o kołowym przekroju poprzecznym charakteryzuje się największą rozproszoną energią równą 48,6 J.



Rysunek 21. Obliczona energia rozproszona przy osiągnięciu określonego odkształcenia [opracowanie własne]

Kwadratowe przekroje poprzeczne są najmniej przewidywalne z wszystkich omawianych i nie powinny być brane pod uwagę w przyszłych programach badawczych. Zależności obciążenie-odkształcenie dla próbek o przekroju kołowym i pięciokątnym są znacznie bardziej spójne w porównaniu z przekrojami kwadratowymi. Próbki obu przekrojów charakteryzują się również najwyższą wytrzymałością na ściskanie badanej partii osiągając wartości f_{SFRC} równe 29,2 MPa i 26,5 MPa odpowiednio dla przekroju kołowego i pięciokątnego. Niektóre próbki ostatecznie pękają podczas testu, a inne zachowują częściową integralność strukturalną do końca testu. Próbki o przekrojach poprzecznych opartych na fraktalach niemożliwych do stworzenia tradycyjnymi technikami szalunkowymi, tworzą ścisłe wiązki relacji obciążenie-odkształcenie. Ostatecznie, wszystkie próbki o tych przekrojach nie pękają podczas badania. Nadal przenoszą znaczne obciążenie (mniej więcej od 25% do 50% maksymalnego obciążenia) po osiągnięciu maksymalnego odkształcenia 3,5%. Biorąc pod uwagę jedynie spójność uzyskanych wyników, najlepszym rozwiązaniem jest przekrój w postaci 3. iteracji Koch Star. F_{SFRC} równe odpowiednio 26,8 MPa. Aby w pełni zrozumieć i ocenić zachowanie quasi-plastyczne badanych próbek, konieczna jest analiza energii dysypowanej podczas prób wytrzymałości na ściskanie. Najwyższą zarejestrowaną wartość energii wyniosła 164,7 J i uzyskał ją przekrój kołowy dla największego odkształcenia. Drugą i trzecią najwyższą wartość rozproszonej energii 143,7 J i 131,2 J uzyskano odpowiednio w 1. i 3. iteracji Cesaro Polyflake. Warto zauważyć, że w przypadku 3. iteracji Cesaro Polyflake próbki nadal przenosiły ponad 50% obciążenia maksymalnego przy maksymalnym planowanym odkształceniu. Obecnie dla projektantów konstrukcji najważniejsze są wartości energi uzyskiwane dla maksymalnej siły obciążającej. Nie ma wątpliwości, że w tym tradycyjnym podejściu, przekrój kołowy jest najlepszym rozwiązaniem. Wymagana jest prawie trzykrotnie większa energia w porównaniu do próbek o przekroju kwadratowym (drugie najczęściej stosowane). Warto zauważyć, że w przypadku badanych słupów SFRC-plastik, im więcej tworzywa, tym mniejsze zróżnicowanie relacji obciążenie-odkształcenie. Do pełnej oceny właściwości mechanicznych badanych słupów niezbędna jest analiza wieloelementowa. Doktorantka przeprowadziła taką analizę uwzględniając: wytrzymałość na ściskanie, energię potrzebną do ostatecznego zniszczenia, jednorodność relacji obciążenie-odkształcenie oraz charakter zniszczenia. Zastosowano system gwiazdek, przyznający od jednej do trzech gwiazdek dla każdej rozpatrywanej właściwości. Ta uproszczona, ale wieloczynnikowa ocena została przedstawiona w tabeli

4. W tym systemie ocen zwyciężyły kolumny o przekrojach opartych na fraktalach, których nie da się stworzyć tradycyjnymi technikami szalunkowymi. 4. iteracja Koch Star, 3. iteracja Koch Star i 3. iteracja Polyflake otrzymały odpowiednio 10, 9 i 9 gwiazdek.

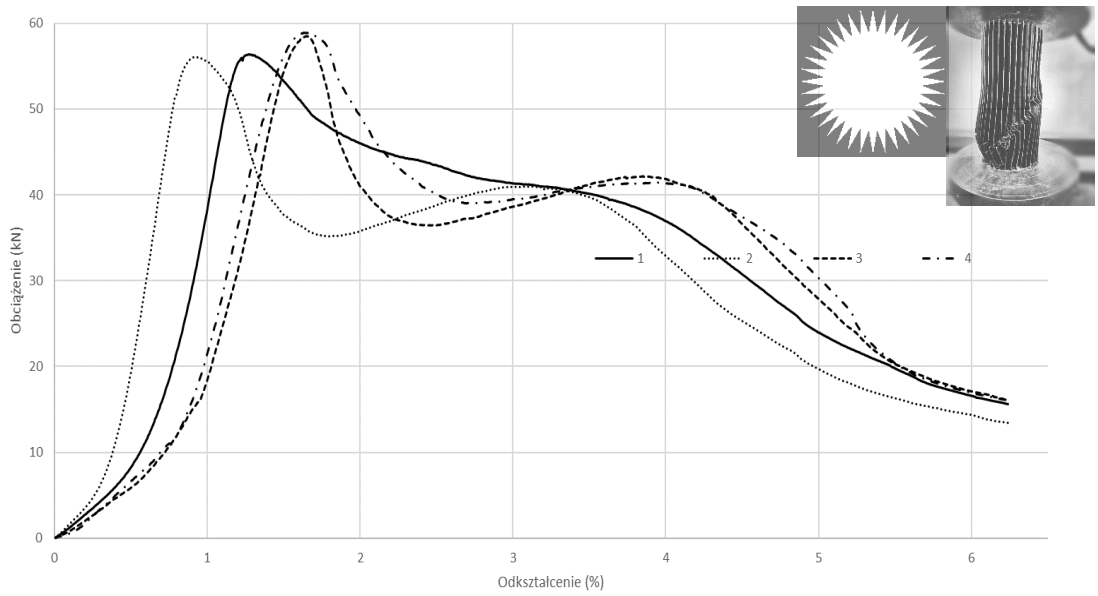
Tabela 4 Uproszczona ocena wydajności słupów SFRC-plastik [opracowanie własne]

Właściwość	Koło	Kwadrat	Cesaro Polyflake			Koch Star	
			1.	2.	3.	3.	4.
Wytrzymałość na ściskanie	***	*	*	*	**	**	**
Energia potrzebna do ostatecznego zniszczenia	***	**	**	*	**	**	**
Jednoroność relacji obciążenie-odkształcenie	*	*	*	*	**	***	**
Charakter zniszczenia	*	*	**	**	***	***	***
∑ =	*** *** **	*** **	*** ***	*** **	*** *** ***	*** *** *** *	*** *** ***

Wysoce quasi-plastyczne zachowanie słupów SFRC-plastik nie może być skutecznie opisane za pomocą tradycyjnych modeli teoretycznych stosowanych w przypadku słupów betonowych. Pożądane jest nowe podejście, które uchwyciłoby znaczące różnice między słupami SFRC-plastik ze względu na kształt przekroju, zastosowane tworzywo sztuczne i włókno stalowe. Zdaniem doktoratnki jednym z najbardziej obiecujących podejść jest modelowanie oparte na technikach sztucznych sieci neuronowych (Isleem, Tayeh, Alaloul, Musarat, Raza, 2021). Ten rodzaj modelowania okazał się bardzo skuteczny w przypadku słupów z betonu zbrojonego włóknem szklanym (*GFRP*) poddanych ściskaniu osiowemu (Isleem, Peng, Tayeh, 2022), dlatego jego zastosowanie do słupów z tworzywa sztucznego *SFRC* wydaje się wykonalne.

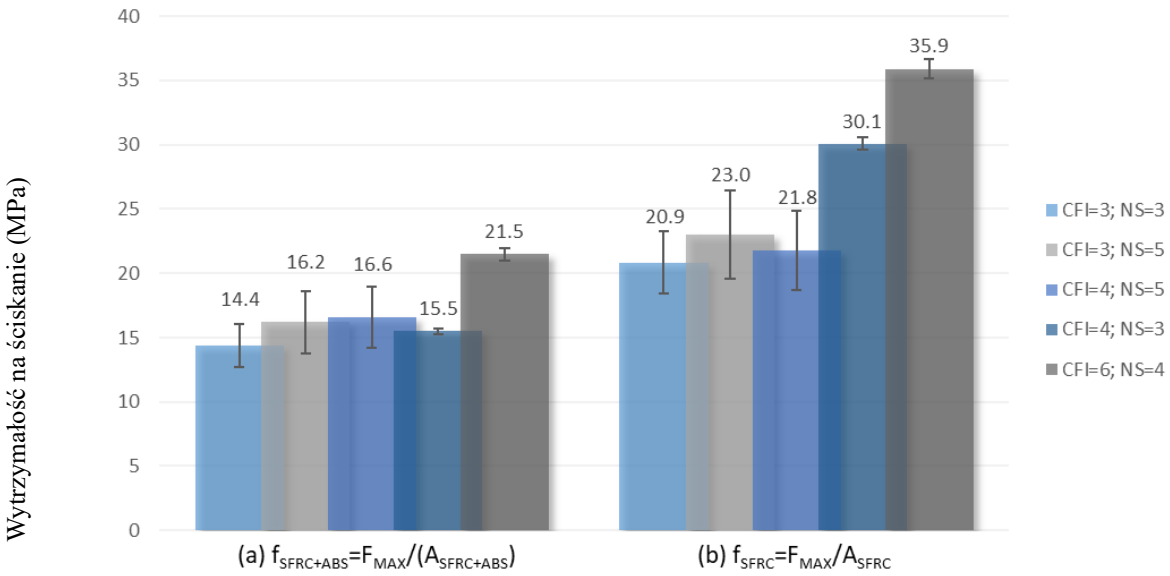
6.4 Właściwości słupów betonowo-plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi z przekrojem w postaci fraktala Cesaro (słup SFRC-plastik II) – A6

Słupy o przekrojach charakteryzujących się CFI = 3 NS = 3 i CFI = 4 NS = 5 osiągały średnio maksymalne obciążenia mniejsze niż 40 kN. Najwyższe wartości maksymalnego obciążenia osiągnęły przekroje charakteryzujące się CFI = 6 NS = 4. Rysunek 22 przedstawia zależności obciążenie-odkształcenie dla owego przypadku. Pozostałe przypadki można zobaczyć w załączniku A6.



Rysunek 22. Relacje obciążenie–odkształcenie dla słupów SFRC–plastik o przekroju poprzecznym w kształcie iteracji Cesaro Polyflake charakteryzujących się CFI = 6 i NS = 4 [opracowanie własne]

Zależności między obciążeniem a odkształceniem słupów SFRC-plastik II zostały przeanalizowane także w dwóch etapach jak poprzednio. Dało to dwie wartości wytrzymałości na ściskanie: $f_{SFRC+ABS}$ i f_{SFRC}, które pokazano na rysunku 23.



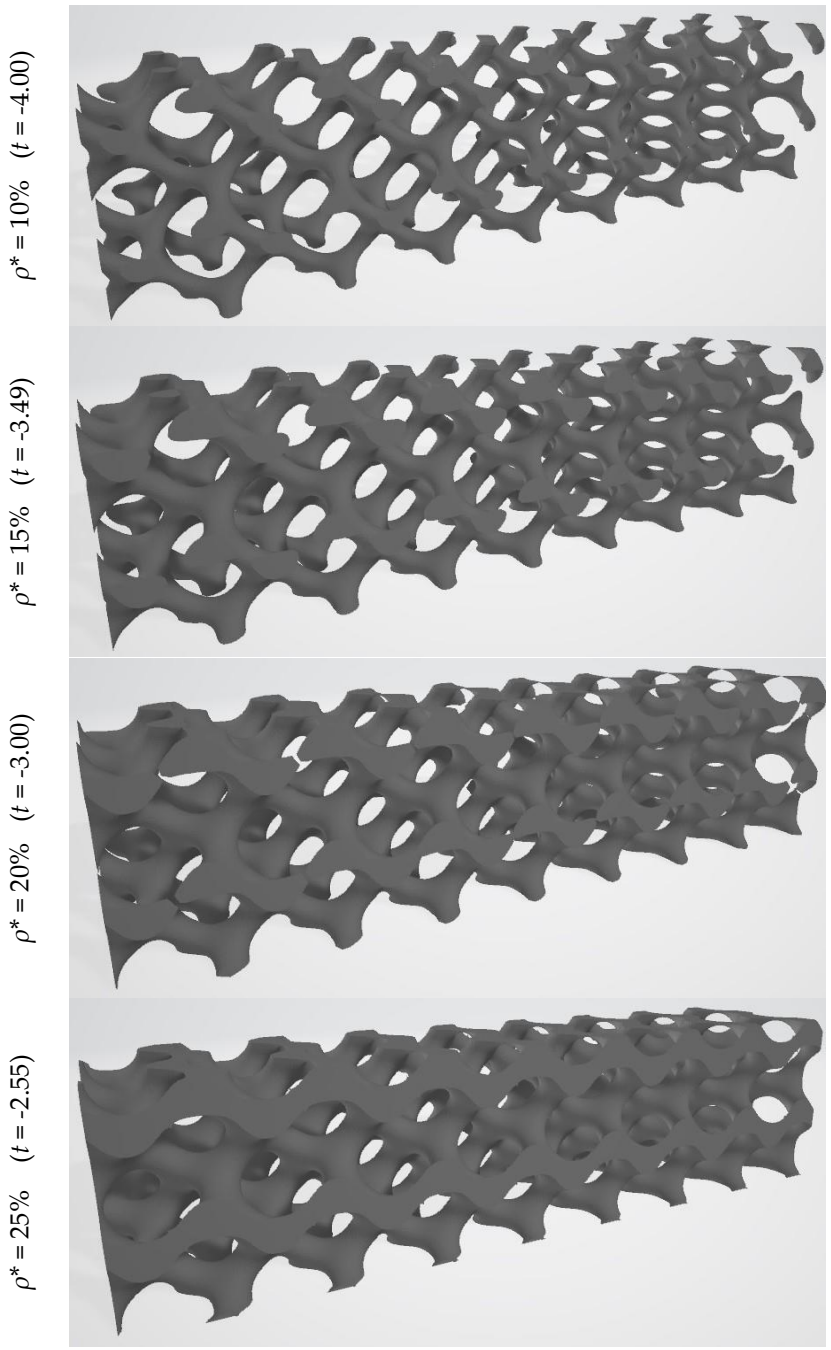
Rysunek 23. Wytrzymałość na ściskanie słupów SFRC-plastik II [opracowanie własne]

Ze względu na znaczną różnicę w module sprężystości między *SFRC* i *ABS* uważano, że interakcja między materiałami podczas obciążania była złożona. Początkowo tylko rdzeń *SFRC* przenosił obciążenie, a szalunek z tworzywa sztucznego zaczynał odgrywać rolę dopiero, gdy naprężenie słupa wzrosło. Po osiągnięciu F_{MAX}, *SFRC* zaczął pękać, czemu zapobiegło wzmocnienie włóknem. W późniejszych etapach niszczenia słupów szalunki z tworzywa sztucznego pracowały głównie na rozciąganie, spowalniając degradację rdzenia *SFRC*. Różnica między $f_{SFRC+ABS}$ a f_{SFRC} wahała się od 31% do 94% dla przekroju charakteryzującego się odpowiednio *CFI* = 4 *NS* = 5 i *CFI* = 4 *NS* = 3. Wpływ uwzględnienia pola przekroju szalunku z tworzywa sztucznego był szczególnie istotny w przekrojach o najbardziej skomplikowanej geometrii (*CFI* = 4 *NS* = 3 i *CFI* = 6 *NS* = 4) skutkujących najwyższymi wartościami A_{ABS} równymi odpowiednio 1508,1 mm^2 oraz 1073,9 mm^2. Podstawowa wytrzymałość na ściskanie nie jest wystarczającą cechą do opisania zachowania mechanicznego *SFRC*. Z biegiem lat opracowano wiele metod, aby lepiej zrozumieć zachowanie mechaniczne *SFRC*, z których wszystkie opierają się na energii rozpraszanej podczas procesu niszczenia próbek. Doktorantka stworzyła nową metodę zainspirowaną testami zwykłych belek *SFRC* (NF EN 14651+A1. Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measureing the Flexural Tensile Strength, 2012). Obliczono rozproszoną energię przy trzynastu wartościach odkształcenia i pole pod krzywą obciążenie-odkształcenie (wykresy dostępne w załączniku A6). Wyniki pokazały, że przekrój charakteryzujący się *CFI* = 4 *NS* = 3 osiągnął największą wartość energii rozproszonej (154,6 J) przy osiągnięciu siły

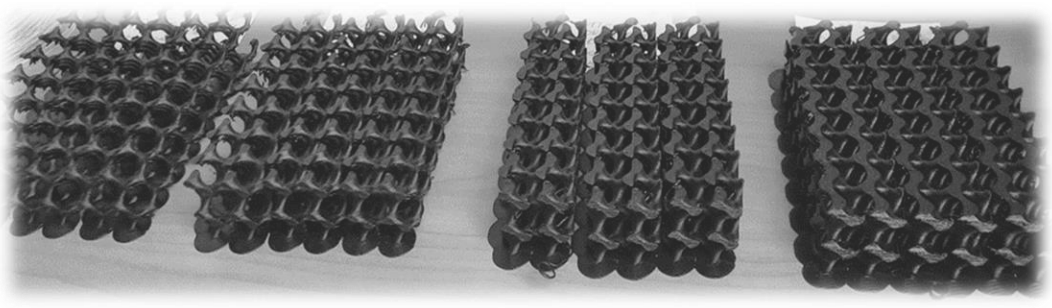
krytycznej. Do odkształcenia 1,5% wszystkie testowane kolumny zachowywały się bardzo podobnie z wartościami energii rozpraszanej w zakresie od 44 J do 55,4 J. Wraz ze wzrostem odkształceń ilość energii rozpraszanej związana z danym typem słupa jest coraz bardziej zróżnicowana. Dla maksymalnych zmierzonych odkształceń wynoszących 6% słupa o największej rozproszonej energii (306,1 J) miały przekrój poprzeczny *CFI* = 6 *NS* = 4. Kolumny o najmniejszej ilości rozproszonej energii (152,6 J) to kolumny o przekroju *CFI* = 4 *NS* = 5, co daje różnicę nieco ponad 200%. Wykorzystanie szalunków wydrukowanych w 3D znacząco zmieniło właściwości mechaniczne testowanych słupów *SFRC*. Stają się one niezwykle quasi-plastyczne. W zależności od zastosowanej geometrii przekroju zachowanie się konkretnego słupa może być związane z zachowaniem odkształceniowym lub odkształceniowo-utwardzalnym. Przekrój *CFI* = 4 i *NS* = 3 jest najbardziej oczywistym przykładem wzmocnienia po zarysowaniu z testowanych słupów. Należy również zaznaczyć, że proces niszczenia słupów był bardzo „bezpieczny". Po początkowej awarii wypełnienia *SFRC* szalunek z tworzywa sztucznego utrzymywał je w całości, ulegając znacznej deformacji. Ani *SFRC* ani elementy z tworzywa sztucznego nie odpryskiwały. Przy odkształceniach 6%, co uznano za ostateczne zniszczenie badanego elementu, wszystkie próbki były nadal w jednym kawałku.

6.5 Właściwości mechaniczne belek zbrojonych elementami przestrzennymi z tworzywa sztucznego wydrukowanymi w 3D (gyroidy) – A4

Program badawczy został przeprowadzony przy użyciu czterech różnych typów przestrzennych gyroidów wydrukowanych w 3D. Zbadano wpływ zarówno geometrii, jak i objętości tworzywa sztucznego użytego do wytworzenia elementów zbrojących na właściwości mechaniczne. Geometria 3D cyfrowo skonstruowanych przestrzennych elementów zbrojących jest pokazana na rysunku 24, natomiast na rysunku 25 pokazano już wydrukowane elementy zbrojące. Dla każdego rodzaju zbrojenia wydrukowano po trzy elementy przestrzenne.

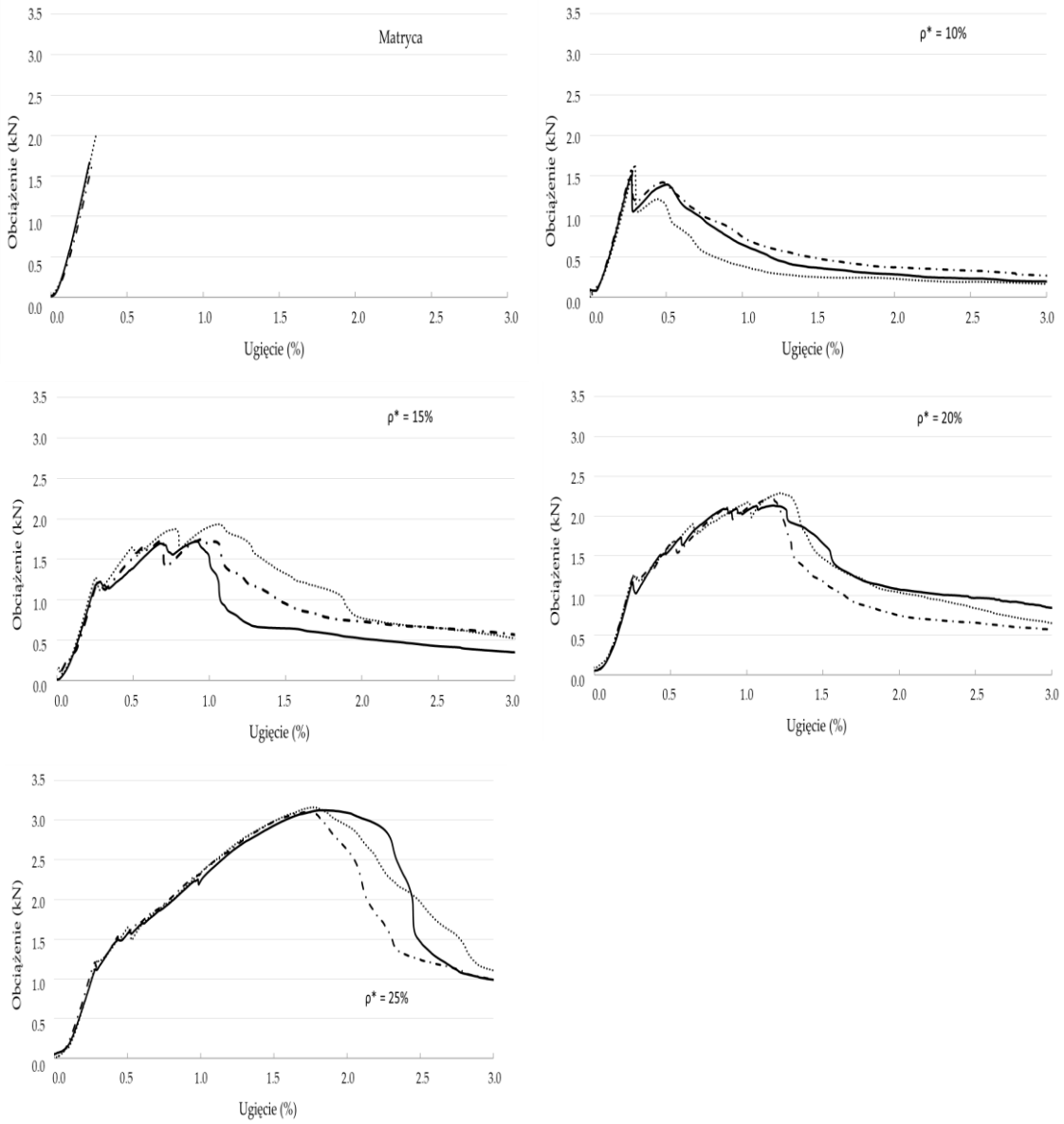


Rysunek 24. Geometria cyfrowo skonstruowanych przestrzennych elementów zbrojeniowych [opracowanie własne]



Rysunek 25. Wydrukowane przestrzenne elementy zbrojące [opracowanie własne]

Szczególną uwagę zwrócono na trzy punkty charakterystyki obciążenie-ugięcie każdej próbki. Pierwszym punktem była siła krytyczna, drugim punktem było ugięcie o 0,5%, a trzecim punktem było ugięcie o 3,0%. Punkty siły krytycznej wykorzystano do obliczenia wytrzymałości na zginanie (f_f). Matryca cementowa charakteryzowała się f_f = 4,0 MPa. Wytrzymałość na zginanie graniastosłupów ze zbrojeniem z tworzywa sztucznego wahała się od 3,5 MPa (dla ρ * = 10% i t = −4,00) do 7,0 MPa (dla ρ * = 25% i t = −2,55). Podczas badania zarejestrowano pełną zależność ugięcia w środku rozpiętości od siły obciążającej (w odstępach czasu 0,02 s). Zarejestrowane zależności przedstawiono na rys. 26 dla wszystkich badanych próbek.



Rysunek 26. Relacje obciążenie-ugięcie graniastosłupów matrycy cementowej z wewnętrznymi elementami zbrojeniowymi [opracowanie własne]

Po wykonaniu prób zginania połówki graniastosłupów wykorzystano do badania wytrzymałości na ściskanie (f_c). Matryca cementowa charakteryzowała się wartością f_c = 25,7 MPa. Wytrzymałość na ściskanie próbek ze zbrojeniem plastikowym wahała się od 28,1 MPa (dla ρ^* = 25% i t = −2,55) do 29,6 MPa (dla ρ^* = 10% i t = −4,00). Warto zauważyć, że wytrzymałości na ściskanie próbek charakteryzujących się ρ^* = 15%, 20% i 25% były prawie identyczne. Wytrzymałość na ściskanie, jako kluczowa cecha każdego materiału konstrukcyjnego, może być wykorzystana jako pierwszy próg akceptacji lub odrzucenia materiału. W przypadku omawianego kompozytu wszystkie elementy ze zbrojeniem z tworzywa sztucznego charakteryzują się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż matryca cementowa, spełniając tym samym wymagany, podstawowy próg. Co ciekawe, kompozyt modyfikowany najmniejszą objętością plastiku (ρ^* = 10%) wykazywał najwyższą wytrzymałość na ściskanie równą 29,6 MPa. Wszystkie pozostałe elementy zbrojone miały prawie taką samą wytrzymałość na ściskanie od 28,1 do 28,2 MPa. Analiza wytrzymałości na zginanie jest bardziej złożona niż wytrzymałość na ściskanie. Kompozyt o najmniejszej objętości zbrojenia z tworzywa sztucznego (ρ^* = 10%) charakteryzował się wytrzymałością na zginanie o ponad 10% mniejszą niż matryca cementowa. Kompozyt ze zbrojeniem o ρ^* = 15% odpowiadał wytrzymałości na zginanie matrycy cementowej. Pozostałe dwa elementy matryca-tworzywo charakteryzują się wyższymi wartościami wytrzymałości na zginanie w porównaniu z matrycą cementową o 22,5% i 75% dla ρ^* = odpowiednio 20% i 25%. Ogólna tendencja jest taka, że im większa objętość zbrojenia z tworzywa sztucznego, tym wyższa osiągana wytrzymałość na zginanie. Ważną częścią tej analizy było śledzenie ugięcia, przy którym zarejestrowano siłę krytyczną. Zarówno dla matrycy cementowej, jak i kompozytu matryca-tworzwo o współczynniku ρ^* = 10%, krytyczne obciążenie zginające zarejestrowano dla ugięcia około 0,3%. Dla elementów o ρ^* = 15%, 20% i 25%, krytyczne obciążenie zginające zarejestrowano dla ugięcia odpowiednio 0,9%, 1,2% i 1,8%. Dla każdego z trzech kluczowych punktów (siła krytyczna, ugięcie 0,5% i ugięcie 3,0%) uzyskano zależności obciążenie-ugięcie i obliczono pole powierzchni pod krzywą. Taki obszar jest graficzną reprezentacją energii rozpraszanej podczas osiągania określonego punktu na krzywej obciążenie-ugięcie. To podejście do analizy wykresów obciążenia i ugięcia zostało zainspirowane japońską normą JSCE-SF4. Norma jest poświęcona analizie betonu zbrojonego włóknami stalowymi wyników uzyskanych podczas prób zginania SFRC. Rozproszona energia obliczona dla przedmiotowych graniastosłupów z matrycy i tworzywa sztucznego jest przedstawiona w załączniku A4.

Zależność obciążenia od ugięcia kompozytu matryca-tworzywo charakteryzująca się $\rho^* = 10\%$ jest zbliżona do zachowania się betonu zbrojonego włóknami stalowymi z niewielką ilością dodanego włókna (do 0,5%) (Hager i in., 2016; Ponikiewski, Katzer, 2014). Zniszczenie kruchej matrycy jest widoczne na wykresie (pierwszy szczyt siły obciążającej, który reprezentuje maksymalną siłę obciążającą), po którym następuje drugi szczyt siły obciążającej, w którym rozpoczyna się zniszczenie zbrojenia z tworzywa sztucznego, powodujące osłabienie. Zależność obciążenia od ugięcia kompozytu ze zbrojeniem z tworzywa sztucznego $\rho^* = 15\%$ i 20% jest podobna do zachowania *SFRC* z objętością włókien odpowiednio 1% i 2% (Song, Hwang, 2004). Po uszkodzeniu matrycy (pierwszy pik obciążenia) następuje wzmocnienie i osiągnięcie maksymalnego obciążenia (drugi lub trzeci pik obciążenia). Po osiągnięciu maksymalnego obciążenia zniszczenie zbrojenia było gwałtowne i skutkowało znacznym osłabieniem. Quasi-plastyczne zachowanie kompozytów z tworzywa sztucznego i matrycy z $\rho^* = 25\%$ jest niemożliwe do osiągnięcia przez *SFRC*; jednak zachowanie to można osiągnąć za pomocą niektórych konstrukcyjnych kompozytów cementowych (ECC) (Li, 2003), żelazocementów (Batson i in., 1988) i określonych tradycyjnie zbrojonych (za pomocą prętów zbrojeniowych i strzemion) elementów betonowych (Hager i in., 2016). Maksymalne obciążenia osiągane przez kompozyty matryca-plastik o $\rho^* = 20\%$ i 25% są odpowiednio dwa i trzy razy większe od obciążenia potrzebnego do zniszczenia matrycy. Jednak dodanie włókien stalowych do matrycy cementowej jest ograniczone problemami czysto technologicznymi, a objętość włókna 3% jest uważana za górną granicę wykonalności przy użyciu zwykłych środków mieszania, wykonywania i zagęszczania mieszanki betonowej w skali laboratoryjnej. Maksymalna ilość dodawanego włókna stalowego podczas betonowania pełnowymiarowych elementów betonowych na miejscu zwykle ogranicza się do 2%. W przypadku zbrojenia z tworzywa sztucznego drukowanego w 3D, jego maksymalna objętość w elemencie betonowym (zarówno pod względem wykonalności technologicznej, jak i pozytywnego wpływu na właściwości mechaniczne) nie została jeszcze ustalona. Elementy przestrzenne użyte podczas programu badawczego zdawały się nie osiągać maksymalnej możliwej objętości zbrojenia plastycznego. Geometria ewentualnego zbrojenia z tworzywa sztucznego 3D również odgrywa ważną rolę w znalezieniu optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych.

W przypadku badanych próbek zaobserwowano poprawę ich właściwości mechanicznych po wyczerpaniu wytrzymałości na zginanie matrycy cementowej. Pierwszy szczyt siły obciążającej jest związany z uszkodzeniem matrycy cementowej.

Zależności obciążenie–odkształcenie próbek matrycy bez zbrojenia są bardzo podobne do kształtu zależności obciążenie–odkształcenie próbek zbrojonych przed osiągnięciem pierwszego szczytu. W tym momencie zaczyna działać przestrzenny element z tworzywa sztucznego wydrukowany w 3D. Różnice w zachowaniu zginania badanych belek bardzo dobrze odzwierciedla układ spękań. W przypadku kompozytu matryca-tworzywo charakteryzującego się $\rho^* = 10\%$ powstaje tylko jedno pęknięcie główne. Powstanie pęknięcia jest bardzo dobrze widoczne na jego krzywej obciążenie-ugięcie (pierwszy szczyt). Kompozyty z większą ilością zbrojenia z tworzywa sztucznego tworzą więcej niż jedno pęknięcie podczas próby zginania, dlatego na ich krzywych obciążenie-odkształcenie widoczne są trzy lub cztery wierzchołki. Podczas testu wytrzymałości na zginanie kompozytu, charakteryzującego się $\rho^* = 25\%$, powstaje wiele małych pęknięć, dlatego jego krzywa obciążenia i ugięcia jest gładka, bez lokalnych szczytów. Ilustracje wszystkich omówionych schematów pęknięć przedstawiono w załączniku A4.

W porównaniu z tradycyjnymi elementami żelbetowymi, omawiane elementy okazują się trudniejsze do jednoznacznego określenia stanu granicznego użytkowalności (SGU) i stanu granicznego nośności (SGN).

Charakterystyka zginania pokazuje, że plastikowe wzmocnienie wydrukowane w 3D nadaje się do niekonwencjonalnych zastosowań, w których wymagane jest takie quasi-plastyczne zachowanie.

7 Uwagi końcowe i wnioski

Współczesne budownictwo jest jedną z najbardziej materiało i energochłonnych branż. Typowy proces betonowania obejmuje długi i sekwencyjny łańcuch zadań. Od wstępnego przygotowania szalunku, transportu, logistyki na placu budowy, gięcia i układania prętów zbrojeniowych, montażu szalunków, betonowania, demontażu i czyszczenia szalunków, aż po wykończenie powierzchni. Przeprowadzone badania miały na celu określenie możliwości uproszczenia budowlanego procesu technologicznego (Khoshnevis, 2004; Hack, Lauer, 2014).

Druk 3D zminimalizowałby zależność budownictwa od czynnika ludzkiego. Ponadto przyczyniłby się do zwiększenia produktywności oraz poprawy bezpieczeństwa i higieny pracy branży budowlanej. Najbardziej ryzykowne lub najbardziej niebezpieczne prace, mogłyby być prowadzone z wykorzystaniem innowacyjnych technologii (Cai, Ma, Skibniewski, Bao, 2019; Delgado Camacho, 2018).

Dodatkowo druk 3D przyczyniłby się do większej elastyczności i ekspresji twórczej architekta. Druk 3D eliminuje ograniczenia geometryczne i pozwala na architektoniczną swobodę. Za pomocą szalunków z tworzyw sztucznych drukowanych w 3D można tworzyć skomplikowane kształty przekrojów kolumn i filarów, które zazwyczaj są kołowe, kwadratowe lub prostokątne. Tradycyjne szalunki oparte na płaskich płytach ze sklejki, tworzyw sztucznych, czy stalowych, znacznie ograniczają kształt wykonywanych elementów. Druk 3D umożliwia niemal bezproblemowe tworzenie szalunków słupów o skomplikowanych przekrojach (Kothman, Faber, 2016; Savija, 2020; Skoratko, Katzer, 2021). Te wydrukowane w 3D elementy mogą również służyć jako niekonwencjonalne zbrojenie elementów betonowych, zastępując tradycyjne zbrojenie strzemionowo-zbrojeniowe (Katzer, Szatkiewicz, 2019, 2020; Xu i in., 2019).

Urządzenia drukujące mogą pracować bez przerw, co gwarantuje wysoką wydajność. Koszty druku budynku mieszkalnego są niższe niż w przypadku tradycyjnych technologii, co znacząco wpłynie na cenę mieszkań (Ghaffar i in., 2018; Major, Minda, 2016). Prognozowano również, że złożone przekroje fraktalne słupów, poza walorami artystycznymi, mogą mieć wpływ na redukcję hałasu w przestrzeni publicznej (Katzer, Skoratko, 2021). Obecnie, trudno jednak wyobrazić sobie, aby technologia druku 3D całkowicie zastąpiła tradycyjne techniki budowlane. Niewykluczone, że w większym stopniu będzie pełniła rolę drugoplanową, zwłaszcza przy tworzeniu elementów wyróżniających się niezwykłą i skomplikowaną geometrią (Delgado Camacho i in., 2018;

Labonnote i in., 2016). Wymaga to zastosowania odpowiedniego materiału budowlanego o odpowiednich właściwościach technicznych, dzięki któremu uzyskuje się odpowiednio dobrą jakość druku (Labonnote i in., 2016; Rębosz-Kurdek, 2018). W niedalekiej przyszłości równie łatwe będzie wznoszenie słupów betonowo-plastikowych o podstawowych i bardzo skomplikowanych przekrojach. Przeprowadzony program badawczy dowiódł, że możliwe jest uzyskanie słupów o nietypowych kształtach, charakteryzujących się podobną wytrzymałością na ściskanie do „nudnych" powszechnie wznoszonych przekrojów kołowych i kwadratowych.

Połączenie konwencjonalnie odrębnych procesów: przygotowania deskowania, przygotowania zbrojenia i wylewania betonu w jeden zautomatyzowany proces produkcyjny, może skutkować bezodpadowymi, materiało-wydajnymi i geometrycznie nieograniczonymi metodami wytwarzania złożonych konstrukcji betonowych (Hack, Lauer, 2014). Pomysł wykorzystania zbrojenia z tworzywa sztucznego zamiast stali jest bardzo atrakcyjny z ekologicznego punktu widzenia (Baciu, Kiss, Desnica, Sárosi, 2021; Hager i in., 2016; Tahir, Sbahieh, Al-Ghamdi, 2022). Druk 3D tworzyw sztucznych stwarza unikatową możliwość efektywnego recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych dostępnych na całym świecie (Katzer, Szatkiewicz, 2019). Branża budowlana jest w stanie wykorzystać ogromne ilości plastiku pochodzącego z recyklingu w postaci drukowanych szalunków (Hack, Lauer, 2014; Katzer, Skoratko, 2021; Katzer, Szatkiewicz, 2019; Skoratko, Katzer, 2021), elementów zbrojących (Shweiki i in., 2019; Xu, 2019; Xu, Šavija, 2019), włókien (Farina i in., 2016), a także do produkcji filamentu do drukarki 3D (Pakkanen, Manfredi, Minetola, Iuliano, 2017; Ronkay, Molnar, Gere, Czigany, 2021; Zander i in., 2018; Zhong, Pearce, 2018; Woern, McCaslin, Pringle, Pearce, 2018). Automatyzacja konstrukcji związana z zagospodarowaniem odpadów tworzyw sztucznych i ograniczeniem zużycia stali zbrojeniowej przyniosłaby oczywiste korzyści dla środowiska (Ronkay i in., 2021; Zhong, Pearce, 2018). Wykorzystanie druku 3D tworzyw sztucznych jest obecnie niedoceniane w inżynierii lądowej. Przestrzenne elementy z tworzyw sztucznych drukowane w 3D mogą znacząco wpłynąć na proces budowy. Wykorzystanie szalunków wydrukowanych w 3D jako zbrojenia przyczynia się do zmiany właściwości mechanicznych betonu z kruchego na quasi-plastyczny. Proces niszczenia jest znacznie płynniejszy i wiąże się z dużymi ilościami rozpraszanej energii oraz znacznymi naprężeniami. Aby uzyskać podobny efekt przy użyciu tradycyjnych typów elementów stalowych (pręty, strzemiona, siatki) (Ding i in., 2011; Shah, Ribakov, 2011; Song, Hwang, 2004; Yoo, Yang, 2018) wzmocnienie miałoby kształt

skomplikowanej siatki. Takie zbrojenie jest trudne i czasochłonne w przygotowaniu oraz utrudnia proces wylewania i zagęszczania betonu. Przeprowadzony program badawczy dowodzi, że szalunki drukowane z tworzywa sztucznego mogą stać się szansą na częściowe lub całkowite wyeliminowanie tradycyjnego zbrojenia stalowego. W przyszłości stalowe pręty zbrojeniowe będą stosowane tylko w krytycznych i najbardziej obciążonych częściach konstrukcji betonowych. Wszystkie inne rodzaje zbrojenia (drugorzędne pręty zbrojeniowe, strzemiona, siatki itp.) zostaną zastąpione elementami przestrzennymi wydrukowanymi w 3D z tworzyw sztucznych. Wprawdzie właściwości mechaniczne tworzyw sztucznych drukowanych w 3D są gorsze w porównaniu ze stalą. Niemniej jednak innowacyjny kształt i przekrój szalunku i znaczenie samego szalunku traconego może w znacznym stopniu zastąpić słabsze właściwości mechaniczne tworzywa sztucznego (Katzer, Szatkiewicz, 2019). Kształt i wielkość zbrojenia można dopasować do rozstawu naprężeń w elemencie. Bardziej zbalansowane właściwości elementów betonowych zbrojonych elementami wydrukowanymi w 3D z tworzyw sztucznych są również związane z gęstością tworzonych elementów. Stal (gęstość ok. 7600 kg/m^3) jest zastępowana większymi ilościami tworzyw sztucznych (gęstość ok. 1000 kg/m^3) wpływające na całkowitą masę elementu żelbetowego. Co więcej, różnica między temperaturą topnienia stali (około +1450°C) i tworzywa sztucznego (około +225°C) sprawia, że tworzywo jest znacznie bardziej ekologiczną alternatywą w procesie recyklingu (np. tworzenia nowego filamentu do drukarki 3D z odpadów z tworzy sztucznych) w porównaniu do tworzenia nowych prętów stalowych ze złomu. Różnice w temperaturach topnienia stali i tworzyw sztucznych stwarzają nowe wyzwania w zakresie odporności ogniowej.

Program badawczy dowiódł że słupy betonowo-plastikowe charakteryzowały się zachowaniem quasi-plastycznym podczas ostatecznego niszczenia, zwłaszcza te o przekrojach opartych na fraktalach. Mogą one pochłonąć duże ilości energii, zanim ostatecznie zostaną zniszczone. Takie zachowanie materiałów nie jest wykorzystywane w codziennej eksploatacji konstrukcji budynków. Niemniej jednak istnieje wiele scenariuszy, w których takie quasi-plastyczne właściwości są niezbędne. Kluczowe scenariusze to: trzęsienie ziemi, eksplozja, tsunami czy inne przypadkowe obciążenie dynamiczne (np. zderzenie ciężarówki czy gwałtowna powódź). Betonowo-plastikowe słupy na bazie fraktali testowane w ramach tego programu badawczego okazały się bezpieczne w przypadku ostatecznego zniszczenia. Zachowując znaczny procent pierwotnej wytrzymałości na ściskanie, ulegają deformacji we wszystkich trzech

wymiarach. Podczas obciążenia niszczącego, nawet przy maksymalnych wartościach odkształceń (równych 3,5% lub 6%), próbki fraktalne zachowały swoją integralność (nie odpryskiwały żadne odłamki plastiku czy betonu). Słupy betonowo-plastikowe po zdarzeniu niszczącym (np. trzęsieniu ziemi) uległyby znacznemu odkształceniu, ale umożliwiłyby ewakuację ludzi. Słupy (i inne betonowo-plastikowe) elementy konstrukcyjne po takim zdarzeniu byłyby kierowane do rozbiórki, aby tworzywa sztuczne zostały ponownie wykorzystane na nowe włókno, a gruz betonowy na przygotowanie nowego kruszywa grubego.

Mechanizmy zniszczenia przedstawionych zbrojeń (i ogólnie zbrojeń z tworzyw sztucznych drukowanych w 3D) nie zostały jeszcze w pełni przetestowane, wymodelowane (Král, Konečný, Lehner, Katzer, 2022) ani opisane. W porównaniu z tradycyjnym zbrojeniem stalowym (pręty i strzemiona, siatki, włókna) proces niszczenia jest bardziej skomplikowany i zależy od wielu czynników. Oprócz właściwości tworzyw sztucznych wykorzystywanych jako filamenty do drukarek 3D, wiele parametrów związanych z procesem drukowania 3D takich jak: rdzeń druku, wysokość warstwy, szerokość linii, szerokość linii wypełnienia, grubość ściany, liczba linii ściany, optymalizacja kolejności drukowania ścian, wypełnienie szczelin między ścianami, gęstość wypełnienia, odległość między liniami wypełnienia, wzór wypełnienia, grubość warstwy wypełnienia, temperatura drukowania, prędkość drukowania i chłodzenie podczas drukowania, wpływają na właściwości tworzonego elementu. Kształt drukowanego elementu, to, czy ma równoległy, prostopadły lub skośny rozstaw drukowanych warstw względem kierunku działania siły obciążającej, oraz jakość powierzchni zewnętrznej to kolejne czynniki wpływające na zachowanie drukowanego zbrojenia z tworzywa sztucznego. Prowadzony program badawczy koncentrował się także na wykorzystaniu gyroidów wydrukowanych w 3D z tworzywa sztucznego jako zbrojenia betonu. Koncepcja została pomyślnie sprawdzona. Jednakże, potrzebne są inne programy badawcze, aby w pełni zrozumieć zachowanie tego typu zbrojenia i jego interakcję z matrycą na bazie cementu. Dokładna analiza omawianych cech wymaga przeprowadzenia badań na próbkach o różnej wielkości i kształcie, z wykorzystaniem analizy DIC (Zhang, Wang, Li, 2022), testując liczne kształty gyroidów oraz procedury drukowania 3D z wykorzystaniem różnych rodzajów plastiku.

Charakterystyka zginania badanych kompozytów matryca-tworzywo umożliwia efektywne zbrojenie kompozytów cementowych za pomocą przestrzennych elementów z tworzywa sztucznego wydrukowanych w 3D. Biorąc pod uwagę niemal nieograniczone

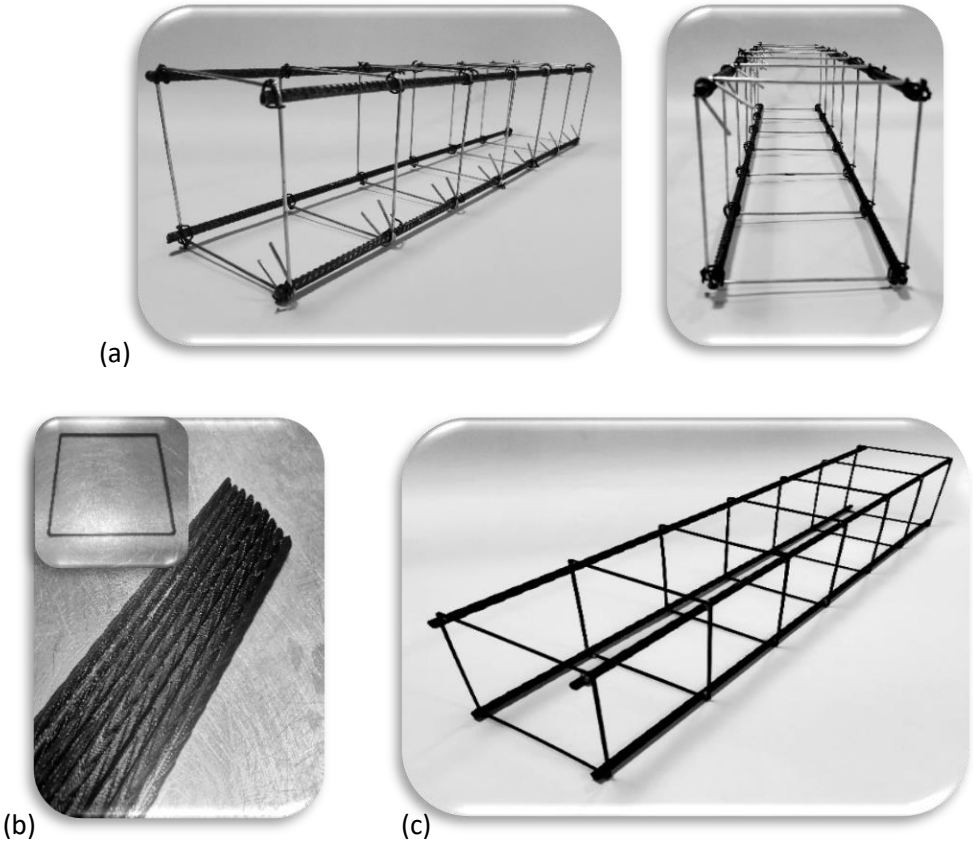
możliwości kształtowania geometrii takiego zbrojenia, próby kształtowania właściwości mechanicznych kompozytów cementowych osiągnęły nowy poziom. Projektowanie właściwości sprężystych i quasi-plastycznych takich kompozytów cementowych jest możliwe i ma potencjalne zastosowanie w wielu dziedzinach budownictwa.

Można także stwierdzić, że technologia druku 3D stwarza ogromne możliwości przyszłego podboju kosmosu. Dzięki zastosowaniu tej metody, zamiast transportu z Ziemi elementów konstrukcyjnych niezbędnych do wzniesienia bazy, astronauci byliby w stanie wykorzystać księżycowy (lub marsjański) regolit jako surowiec do drukowania 3D. Badania nad tym zagadnieniem prowadzą obecnie naukowcy z Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) we współpracy z firmą słynnego architekta Normana Fostera – Foster and Partners (Cesaretti, Dini, De Kestelier, Colla, Pambaguian, 2014; Paolini, Kollmannsberger, Rank, 2019;Zhang i in., 2019).

Na podstawie przeprowadzonych badań i opisanych w niniejszej rozprawie ich rezultatów można dowieźć, że postawione trzy tezy badawcze znalazły potwierdzenie w zaprezentowanych i opisanych wynikach.

8 Dalsze plany badawcze

Przyszłe testy i analizy będą skoncentrowane na porównaniu elementów konstrukcyjnych zbrojonych plastikowymi i stalowymi prętami zbrojeniowymi wydrukowanymi w 3D. Stworzono 4 rodzaje belek: belka bez zbrojenia, belka zbrojona prętami stalowymi i belka zbrojona prętami plastikowymi I i belka zbrojona prętami plastikowymi II. Wymiar wszystkich belek 150 x 150 x 600 mm. W każdej belce użyto 7 strzemion, rozstaw strzemion co 90 mm, otulina 20 mm. Do wykonania belek zbrojonych prętami stalowymi użyto pręta żebrowanego ϕ 6mm i drut wiązałkowy 2mm. Następnie pręty stalowe żebrowane zostały zeskanowane przy użyciu skanera laserowego 3D. Stworzono ich modele cyfrowe a następnie wydrukowano prototypy z tworzywa sztucznego *ABS*. Zastosowano wysokość warstwy 0,2 mm, wysokość dyszy 0,4 mm oraz wypełnienie 100% 90°- 0° (pręty plastikowe I) i 100% 45° - 45° (pręty plastikowe II). Strzemiona również wydrukowano przy użyciu drukarki 3D. Usługę skanowania i druku 3D długich prętów zbrojeniowych zapewniła sieć badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Poniżej na rysunku 27 pokazano zbrojenie stalowe i wydrukowane w 3D.



Rysunek 27. (a) Zbrojenie stalowe; (b)wydrukowane strzemiona, pręty; (c) przygotowane zbrojenie plastikowe belki [opracowanie własne]

9 Literatura

3Ders. (2014). *10 Completely 3D Printed Houses Appear in Shanghai, Built under a Day*. Pobrane z: http://www.3ders.org/articles/20140401-10-completely-3d-printed-houses-appears-in-shanghai-built-in-a-day.html (6.05.2021).

Aarhus University. (2021). Pobrane z: https://bce.au.dk/en/research/examples-of-research-projects/recycled-plastics-transformed-into-3dprinting-material/ (8.05.2021).

Ali, M. H., Issayev, G., Shehab, E., Sarfraz, S. (2022). A critical review of 3D printing and digital manufacturing in construction engineering. *Rapid Prototyping Journal*, *28(7).* Doi:10.1108/RPJ-07-2021-0160

Apis cor Company Dubai Project. (2019) Pobrane z: http://apis-cor.com/en/about/blog/features-and-perspectives-of-3d-printing (7.05.2021).

Babaie, R., Abolfazli, M., Fahimifar, A. (2019). Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, *28 (1)*, 119–134. Doi:10.1515/jmbm-2019-0014.

Baciu, A.M., Kiss, I., Desnica, E., Sárosi, J. (2021). Reinforcing concrete with recycled plastic wastes. *Journal of Physics: Conference Series*, *1*

Baigarina, A., Shehab, E., Ali, M. H. (2023). Construction 3D printing: a critical review and future research directions. *Progress in Additive Manufacturing*. Doi:10.1007/s40964-023-00409-8

Batson, G.B., Castro, J.O., Guerra, A.J., Iorns, M.E., Johnston, C.D., Naaman, A.E., Romualdi, J.P., Shah, S.P., Zollo, R.F., Swamy, N., Tilsen, B.L., Williamson, R.B., Zubieta, R.C. (1988). Guide for the design, construction, and repair of ferrocement. *ACI Structural Journal*, *85(3)*, 325–351.

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, *55(2)*, 155–162. Doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003.

Bock, T. (2015). The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, *59*, 113–121. Doi:10.1016/j.autcon.2015.07.022.

Boffey, D. (2018). *Netherlands to build world's first habitable 3D printed houses*. Pobrane z: https://www.theguardian.com/artanddesign/2018/jun/06/netherlands-to-build-worlds-first-habitable-3d-printed-houses (7.05.2021).

Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A. (2013). Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*, *16*, 496–504. Doi:10.1016/j.mattod.2013.11.017.

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S. (2010). Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials, 24*, 1664–1671. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025.

BS EN 934-2:2009+A1:2012 Admixtures for Concrete, Mortar and Grout. Concrete Admixtures. Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling. Pobrane z: https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030234820 (10.03.2021).

BSI, BS EN 197-1. Cement. Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, 2011. Pobrane z:

https://infostore.saiglobal.com/preview/is/en/2011/i.s.en197-1-2011.pdf?sku=1492629 (10.03.2021).

Buchanan, C., Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, *180*.

Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M.J., Bao, S. (2019). Construction automation and robotics for high-rise buildings over the past decades: A comprehensive review. *Advanced Engineering Informatics*, *42*.

Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, *93*, 430–450.

Chang, D-I., Chai, W-K. (1995). Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, *156*, 201–207.

Cheniuntai, N. (2019). *Dubai – project*. Pobrane z: https://www.apis-cor.com/dubai-project (7.05.2021).

Choi, J.W., Medina, F., Kim, C., Espalin, D., Rodriguez, D., Stucker, B., Wicker, R. (2011). Development of a mobile fused deposition modeling system with enhanced manufacturing flexibility. *Journal of Materials Processing Technology*, *211*, 424–432. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.10.019

Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien,W.J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in Construction*, *89*, 110–119.

Desnerck, P., Lees, J.M., Morley, C.T. (2016) Impact of the reinforcement layout on the load capacity of reinforced concrete half-joints. *Engineering Structures*, *127*, 227–239. Doi:10.1016/j.engstruct.2016.08.061.

Ding, Y., You, Z., Jalali, S. (2011). The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concreto. *Engineering Structures*, *33*, 107–117. Doi:10.1016/j.engstruct.2010.09.023.

Dodziuk, H. (2020). Druk 3D w budownictwie. *Napędy i Sterowanie*, *12*, 41–47.

Domski, J. (2016). A blurred border between ordinary concrete and SFRC. *Construction and Building Materials*, *112*, 247–252. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.205.

Drury, C. (2018). *World's first 3D-printed home unveiled in France*. Pobrane z: https://www.independent.co.uk/news/world/europe/3d-printed-home-world-first-francea8298446.html (7.05.2021).

EN 196-1 Chapter13. Cement—Determination of Strength. Building Materials 10—Testing Methods. 2016.

Farina, I., Fabbrocino, F., Carpentieri, G., Modano, M., Amendola, A., Goodall, R., Feo, L., Fraternali, F. (2016). On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Composites Part B Engineering*, *90*, 76–85. Doi:10.1016/j.compositesb.2015.12.006.

Forbes. (2016) *TheWorld's First Office from a 3D Printer.* Pobrane z: https://www.forbes.pl/life/wydarzenia/biuro-wydrukowane-drukarka-3d/jk9elx7 (6.05.2021).

Gadomska, H. (2020). *Największy na Świecie Budynek z Drukarki 3D Stanął Właśnie w Dubaju*. Pobrane z: https://www.focus.pl/artykul/najwiekszy-na-swiecie-budynek-z-drukarki-3d-stanal-wlasnie-w-dubaju (7.05.2021).

Galjaard, S., Hofman, S., Ren, S. (2015). New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. *Advances in Architectural Geometry 2014*. Switzerland: Springer.

Gavriletea, M.D. (2017). Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. *Sustainability*, *9 (7)*. Doi:10.3390/su9071118.

Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., Kaufmann, W. (2021). Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*., *240*. Doi:10.1016/j.engstruct.2021.112380.

Gebler, M., Schoot Uiterkamp AJ, M., Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, *74*, 158–167. Doi:10.1016/J.ENPOL.2014.08.033.

Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, *93*, 1–11. Doi:10.1016/J.AUTCON.2018.05.005.

Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.(2010). Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer. Doi:10.1007/978-1-4419-1120-9.

Gödek, E., Şevik, S., Özdilli, Ö. (2020). A Study on Flexural Behavior of Cement Paste Reinforced by Using 3D-Printed Polylactic Acid-Based Reinforcement. *In Proceedings of the 2. International ICONTECH SYMPOSIUM on Innovative Surveys in Positive Sciences*, Budapest, Hungary, 23–26 September 2020.

Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., Morel, P. (2016) Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—A new processing route for architects and builders. *Materials and Design*, *100*, 102–109. Doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097.

Government of India, Ministry of Railways. Report on Modern Formwork Systems; Report no.: RDSO/WKS/2017/1; Research Design and Standards Organization: Uttar Pradesh, India, 2017.

Hack, N., Lauer, W.V. (2014). Mesh-mould: Robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design*, *84*, 44–53. Doi:10.1002/ad.1753.

Hack, N., Lauer, W.V., Gramazio, F., Kohler, M. (2014). Mesh Mould: Differentiation for enhanced performance. *In Proceedings of the Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture*—Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA, Kyoto, Japan, 14–16 May 2014.

Hager, I. (2018). Rewolucja technologiczna w budownictwie—Druk 3D budynków i obiektów inżynieryjnych. *Ujęcie Aktualnych Problemów Budownictwa*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

Hager, I., Golonka, A., Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, *151*, 292–299. Doi:10.1016/j.proeng.2016.07.357.

Howard, D. (2013). *Silkworms and robot work together to weave Silk Pavilion*. Pobrane z: https://www.dezeen.com/2013/06/03/silkworms-and-robot-work-together-to-weave-silkpavilion/ 7.05.2021).

Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *67*, 1191–1203. Doi:10.1007/s00170-012-4558-5.

IAAC. (2017). *Large Scale 3D Printing*. Pobrane z: https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printedbridge (7.05.2021).

Iskhakov, I., Ribakov, Y. (2007). A design method for two-layer beams consisting of normal and fibered high strength concrete. *Materials & Design*, *28(5)*,1672-1677.

Isleem, H.F., Peng, F., Tayeh, B.A. (2022). Confinement model for LRS FRP-confined concrete using conventional regression and artificial neural network techniques. *Composite Structures*, *279*. Doi:10.1016/j.compstruct.2021.114779.

Isleem, H.F., Tayeh, B.A., Alaloul, W.S., Musarat, M.A., Raza, A. (2021). Artificial Neural Network (ANN) and Finite Element (FEM) Models for GFRP-Reinforced Concrete Columns under Axial Compression. *Materials*, *14(23)*. Doi: 10.3390/ma14237172.

Johnston, CD., Zemp, RW. (1991). Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete-influence of fiber content, aspect ratio, and type. *ACI Materials Journal*, *88(4*) 374–83.

JSCE-SF4 Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete.

Katzer, J. (2012). Median diameter as a grading characteristic for fine aggregate cement composite designing. *Construction and Building Materials, 35*, 884–887. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.050.

Katzer, J., Skoratko, A. (2021). Concept of using 3D printing for production of concrete-plastic columns with unconventional cross-sections. *Materials*, *14.* Doi:10.3390/ma14061565

Katzer, J., Szatkiewicz, T. (2019). Properties of concrete elements with 3-D printed formworks which substitute steel reinforcement. *Construction and Building Materials*, *210*, 157–161. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.204.

Katzer, J., Szatkiewicz, T. (2020). Effect of 3D Printed Spatial Reinforcement on Flexural Characteristics of Conventional Mortar. *Materials*, *13*. Doi:10.3390/ma13143133.

Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, *13*, 5–19.

Kizilkanat, A.B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., Akça, A.H. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, *100*, 218-224. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006.

Koehnken, L., Rintoul, M.S., Goichot, M., Tickner, D., Loftus, A-C., Acreman, M.C. (2020). Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research. *River Research and Applications*, *36*, 362– 370. Doi:10.1002/rra.3586.

Kothman, I., Faber, N. (2016). How 3D printing technology changes the rules of the game Insights from the construction sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *27*, 932–943. Doi:10.1108/JMTM-01-2016-0010.

Král, P., Konečný, P., Lehner, P., Katzer, J. (2022). Numerical analysis of flexural behavior of concrete element with 3-D printed formwork. *Paper Presented at the AIP Conference Proceedings*, *2425*. Doi.org/10.1063/5.0081317.

Kreiger, M.A., Mulder, M.L., Glover, A.G., Pearce, J.M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of Cleaner Production*, *70*, 90–96. Doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.009.

Kret, W., Michnowicz, M. (2013). Drukarka 3D oparta na dokumentacji. *Edukacja-Technika-Informatyka*, *4*, 393–397.

Kruth, J.-P., Leu, M., Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Ann*als, *47*, 525–540. Doi:10.1016/s0007-8506(07)63240-5.

Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, *72*, 347–366. Doi:10.1016/J.AUTCON.2016.08.026

Lee, M.K., Barr, B.I.G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concreto. *Cement and Concrete Composites*, *26 (4)*, 299-305

Li, V.C. (2003). On engineered cementitious composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, *1(3)*, 215–230.

Liu, X., Sun, B. (2021). The influence of interface on the structural stability in 3D concrete printing processes. *Additive Manufacturing, 48 (Prt B).* Doi:10.1016/j.addma.2021.102456.

Lyu, F., Zhao, D., Hou, X., Sun, L., Zhang, Q. (2021). Overview of the Development of 3D-Printing Concrete: A Review. *Applied Sciences*, *11 (21)*. Doi:10.3390/app11219822.

Ma, G., Li, Z., Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*, *162*, 613–627. Doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.051.

Major, M., Minda, I. (2016). The use of 3D printing technologies in the civil engineering. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo 22*, 238–247, Doi:10.17512/znb.2016.1.23.

Malik Chua, J. (2017). *World's First 3D-Printed Pedestrian Bridge Pops up in Madrid.* Pobrane z: https://inhabitat.com/worlds-first-3d-printed-pedestrian-bridge-pops-up-in-madrid/ (7.05.2021).

McCullough, E.J., Yadavalli, V.K. (2013). Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices. *Journal of Materials Processing Technology*, *213*, 947–954. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015.

Mehar, P., Khobragade, P., Mendhe, M., Bhada, S., Singh, V., Salodkar, P.(2020). 3d Printing Trends in Building and Construction Industry. *International Journal of Scientific & Technology Research*, *7*, 314–318. Doi:10.32628/ijsrst207342

Mendoza, H.R. (2016). *Syska Hennessy Group Continues Involvement in Dubai's 3D Printed Office Building*. Pobrane z: https://3dprint.com/138336/syska-hennessy-dubai-office/ (6.05.2021).

Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Warchoł J., Moustakas K., Chojnacka K., Witek-Krowiak A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *28 (10)*, 12321–12333. Doi:10.1007/s11356-020-10657-8.

Momeni, M., Relefors, J., Khatry, A., Pettersson, L., Papadopoulos, A.V., Nolte, T. (2022) Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cel. *Automation in Construction*, *133.* Doi:10.1016/j. autcon.2021.103990.

Morales, M. A., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2023) Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments. *Polymers*, *15(3)*. Doi:10.3390/polym15030528

Naaman, A.E., Argon, A.S, Moavenzadeh, F. (1973). A fracture model for fiber reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, *3(4*), 397–411. Doi:10.1016/0008-8846(73)90078-1.

NF EN 14651+A1. Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measureing the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual); British Standards Institute: London, UK, 2012.

Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B Engineering*, *143*, 172–196. Doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

Niu, J., Choo, H.L., Sun,W., Mok, S.H. (2018). Numerical study on load-bearing capabilities of beam-like lattice structures with three different unit cells. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, *14*, 443–460.

Pakkanen, J.A., Manfredi, D.G., Minetola, P., Iuliano, L. (2017). About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing. *Crisis Management for Software Development and Knowledge Transfer*, *68*, 776–785. Doi:10.1007/978-3-319-57078-5_73.

Paolini, A., Kollmannsberger, S., Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additve Manufacturing*, *30*. Doi:10.1016/j.addma.2019.100894.

Paskova, T., Meyer, C. (1997). Low-cycle fatigue of plain and fiber-reinforced concreto. *ACI Materials Journal*, *94(4),* 273–85.

Ponikiewski, T., Katzer J. (2014). Properties of fresh SCC mix reinforced by different types of steel and polymer fibre. *Construction and Building Materials*, *62*, 96–101.

Rębosz-Kurdek, A., Gierulski, W., Szmidt, A. (2018). The innovative 3D printer head. Part 1. Concept. *Mechanik*, *91*, 538–542.

Ronkay, F., Molnar, B., Gere, D., Czigany, T. (2021) Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies. *Waste Management*, *119*, 101–110. Doi:10.1016/j.wasman.2020.09.029.

Savija, B. (2020). Use of 3D printing to create multifunctional cementitious composites: review, challenges and opportunities. *RILEM Technical Letters*, *5*, 17–25. Doi:10.21809/rilemtechlett.2020.113.

Scott, C. (2018). *Sand 3D Printing Used to Create Smart Slab Ceiling for ETH Zurich's DFAB House*. Pobrane z: https://3dprint.com/220965/sand-3d-printing-smart-slab/ (6.05.2021).

Shah, A.A., Ribakov, Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concreto. *Materials & Design*, *32 (8-9)*, 4122–4151. Doi:10.1016/j.matdes.2011.03.030.

Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3d printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment.* Doi:10.3389/fbuil.2018.00085.

Shakor, P., Sanjayan, J., Nazari, A., Nejadi, S. (2017). Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials*, *138*, 398-409. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.037.

Shweiki, A., Junaid, M.T., Barakat, S. (2019). Flexural characteristics of mortar cement reinforced with 3D-printed polymer. *In Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19)*, Rome, Italy, 7–9 April, 2019. Doi:10.11159/icsect19.154.

Skoratko, A., Katzer, J. (2021). Harnessing 3D Printing of Plastics in Construction—Opportunities and Limitations, *Materials*, *14*. Doi:0.3390/ma14164547

Song, G.H., Jing, S.K., Zhao, F.L., Wang, Y.D., Xing, H., Zhou, J.T. (2017). Design Optimization of Irregular Cellular Structure for Additive Manufacturing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, *30*, 1184–1192. Doi:10.1007/s10033-017-0168-3.

Song, P., Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concreto. *Construction and Building Materials*, *18 (9)*, 669–673. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.

Strauss, H., Emmer Pfenninger Partner, A.G., Knaack, U. (2015). Additive manufacturing for future facades: The potential of 3D printed parts for the building envelope. *Journal of Facade Design and Engineering Facade*, *3*, 225–235.

Tahir F et al. (2022). Environmental impacts of using recycled plastics in concreto. *Materials Today: Proceedings*, *62(6)*, 4013-4017

Tay, Y.W.D., Panda, B., Paul, S.C., Noor Mohamed, N.A., Tan, M.J., Leong, K.F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: A review. *Virtual and Physical Prototyping*, *12*, 261–276. Doi:10.1080/17452759.2017.1326724

UNE EN 1015-3:2000/A2:2007 Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). Pobrane z: https://www.en-standard.eu/une-en-1015-3-2000/a2-2007-methods-of-test-for-mortar-for-masonry-part-3-determination-of-consistence-of-fresh-mortar-by-flow-table/ (10.03.2021).

Usidus, M. *Will 3D Printing Revolutionize Construction?* Pobrane z: https://mlodytechnik.pl/technika/28916-czy-druk-3d-zrewolucjonizuje-budownictwo (7.05.2021).

Wang, L. (2015). *Chinese company 'builds' 3D-printed villa in less than 3 hours*. Pobrane z: https://inhabitat.com/chinese-company-builds-3d-printed-villa-in-less-than-3-hours/ (6.05.2021).

Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., et al. (2016). Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*, *1*, 67–75.

Wangler, T., Roussel, N., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Flatt, R.J. (2019). Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research*, *123*. Doi:10.1016/j.cemconres.2019.105780

Wheeler, A. (2015).*Winsun leaps Ahead 3d printing villa and 5-storey apartment building.* Pobrane z: https://3dprintingindustry.com/news/winsun-3d-printing-building-40316/ (6.05.2021).

Woern, A.L., McCaslin, J.R., Pringle, A.M., Pearce, J.M. (2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*, *4*. Doi:10.1016/j.ohx.2018.e00026.

Wong, K.V., Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering.* Doi:10.5402/2012/208760.

Wu, P., Wang, J., Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, *68*, 21–31.

Xu, Y. (2019). Creating strain hardening cementitious composites (SHCCs) through use of additively manufactured polymeric meshes as reinforcement. *In Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Bayonne, France, 24–26 June 2019. Doi:10.21012/fc10.235158

Xu, Y., Šavija, B. (2019). Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: Mechanical properties. *Composites Part B: Engineering, 174*. Doi:10.1016/j.compositesb.2019.107011.

Xu, Y., Zhang, H., Gan, Y., Šavija, B. (2021). Cementitious composites reinforced with 3D printed functionally graded polymeric lattice structures: Experiments and modelling. *Additive Manufacturing*, *39*. Doi:10.1016/j.addma.2021.101887.

Xu, Y., Zhang, H., Šavija, B., Chaves Figueiredo, S., Schlangen, E. (2019). Deformation and fracture of 3D printed disordered lattice materials: Experiments and modeling. *Materials and Design*, *162*, 143–153. Doi:10.1016/j.matdes.2018.11.047.

Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A.H., Niknam, H., Hermenean, K. (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composites Structures, 200*, 886–909. Doi:10.1016/j.compstruct.2018.04.002.

Yoo, D-Y., Yang, J-M. (2018). Effects of stirrup, steel fiber, and beam size on shear behavior of high-strength concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, *87*, 137–148. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.12.010.

Zander N.E., Gillan M., Lambeth R.H. (2018). Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material. *Additive Manufacturing*, *21*, 174–182. Doi:10.1016/j.addma.2018.03.007.

Zhang, D., Wang, W., Li, V.C. (2022). Microcrack characterization of loaded engineered cementitious composites via optical scans and photogrammetric analyses. *Construction and Building Materials*, *318*. Doi.org/10.1016/j. conbuildmat.2021.126000.

Zhang, H.Z., Liu, X., Yi, W.J. (2014). Reinforcement layout optimisation of RC D-regions. *Advanced Structural Engineering*,*17 (7)*, 979–992. Doi:10.1260/1369- 4332.17.7.979.

Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *125*. Doi:10.1016/j.compositesa.2019.105533.

Zheng, D., Song, W., Fu, J., Xue, G., Li, J., Cao, S. (2020). Research on mechanical characteristics, fractal dimension and internal structure of fiber reinforced concrete under

uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, *258*. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120351.

Zhong, S., Pearce, J.M. (2018). Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. *Resources, Conservation and Recycling*, *128*, 48–58. Doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.023.

10 Spis rysunków i tabel

Spis rysunków:

Rysunek 1. Schemat przedstawiający poszczególne zadania programu badawczego pracy doktorskiej [opracowanie własne] 8
Rysunek 2. Przykłady budynków i konstrukcji z betonu wydrukowanych w 3D: (a) jeden z pierwszych domów; (b) dom wielopiętrowy; (c) dom wykonany według projektu Apis Cor; (d) etap budowy największego budynku; (e) największy budynek wydrukowany w 3D; (f) betonowe sztuczne rafy; (e) bloki PolyBricks; (h) konstrukcja wzorowana na pracy jedwabników; (i) Kładka dla pieszych Kastylia-La Mancha. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Apis Cor, 2019; IAAC, 2017; Cheniuntai, 2019; Usidus)) 15
Rysunek 3. Przykłady wydrukowanych w 3D elementów metalowych: (a) węzeł aluminiowy; (b) zoptymalizowane węzły; (c) most MX3D w Amsterdamie. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Buchanan, Gardner, 2019; Galjaard, Hofman, Ren, 2015; Strauss, Emmer Pfenninger Partner, Knaack, 2015)) 16
Rysunek 4. Formy siatkowe (a) wytłaczanie polimeru; (b) pierwszy prototyp siatki wypełniony betonem; (c) różne modele oczek; (d) kostki testowe po odlaniu. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Hack, Lauer, 2014; Hack i in., 2014)) 19
Rysunek 5. (a) Deskowanie belkowe wydrukowane w 3D; (b) badanie wytrzymałości na zginanie elementu z szalunkiem wydrukowanym w 3D. Obrazy stworzone przez A. Skoratko (inspiracja (Katzer, Szatkiewicz, 2019)) 20
Rysunek 6. Widok ogólny projektowanego przestrzennego elementu wzmacniającego. Obraz stworzony przez A. Skoratko (inspiracja (Katzer, Szatkiewicz, 2020)) 21
Rysunek 7. (a) funkcjonalnie stopniowane struktury sieci oktetu; (b) próbki drukowane w formach polistyrenowych; (c) drukowane wzmocnienie z różnymi wzorami trójkątów; (d) próbki drukowane z nacięciem do próby rozciągania; (e) przykłady płyt warstwowych PLA wydrukowanych w 3D. Obrazy wykonane przez A. Skoratko (inspiracja (Yazdani Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, Hermenean, 2018; Xu i in., 2019, 2021; Xu, Šavija, 2019)) 23
Rysunek 8. Projekt matrycy cementowej bez włókien [opracowanie własne] 26
Rysunek 9. Włókno stalowe użyte podczas programu badawczego [opracowanie własne] 27
Rysunek 10. Przekroje szalunków wydrukowanych w 3D [opracowanie własne] 30
Rysunek 11. Wydrukowane szalunki i elementy zbrojące oraz próbki wykonane z betonu i tworzywa sztucznego [opracowanie własne] 31
Rysunek 12. Trzy różne typy przekrojów słupów [opracowanie własne] 33
Rysunek 13. Zależności obciążenie-odkształcenie dla badanych słupów: a) o przekroju kwadratowym i kołowym; b) o przekroju poprzecznym w kształcie 1. i 2. iteracji Cesaro Polyflake; c)o kształcie 3. iteracji Cesaro Polyflake, 3. i 4. iteracji gwiazdy Kocha [opracowanie własne] 36
Rysunek 14. Obrazy próbek po badaniu [opracowanie własne] 37
Rysunek 15. Wytrzymałość na ściskanie badanych słupów betonowo-plastikowych [opracowanie własne] 38

Rysunek 16. Schemat przedziałów odkształceń, dla których obliczono energię [opracowanie własne] 39
Rysunek 17. Energia potrzebna do uzyskania określonego odkształcenia badanych słupów betonowo-plastikowych [opracowanie własne] 40
Rysunek 18. Zależności obciążenie–odkształcenie dla słupów SFRC–plastik: (a) (próbki od 1 do 6) o przekrojach kwadratowych; (b) (próbki od 7 do 12) o przekrojach kołowych [opracowanie własne] 42
Rysunek 19. Zależności obciążenie-odkształcenie słupów SFRC-plastik: (a) (próbki od 13 do 18) z przekrojem w kształcie 1. iteracji Cesaro Polyflake; (b) (próbki od 19 do 24) z przekrojem w kształcie 2. iteracji Cesaro Polyflake; (c) próbki od 25 do 29) z przekrojem w kształcie 3. iteracji Cesaro Polyflake; (d) (próbki od 31 do 36) o przekroju poprzecznym w kształcie 3. iteracji Gwiazdy Kocha; (e) (próbki od 37 do 42) o przekroju poprzecznym w kształcie 4. iteracji Gwiazdy Kocha [opracowanie własne] 45
Rysunek 20. Wytrzymałość na ściskanie słupów SFRC-plastik [opracowanie własne]. 46
Rysunek 21. Obliczona energia rozproszona przy osiągnięciu określonego odkształcenia [opracowanie własne] 47
Rysunek 22. Relacje obciążenie–odkształcenie dla słupów SFRC–plastik o przekroju poprzecznym w kształcie iteracji Cesaro Polyflake charakteryzujących się CFI = 6 i NS = 4 [opracowanie własne] 50
Rysunek 23. Wytrzymałość na ściskanie słupów SFRC-plastik II [opracowanie własne] 51
Rysunek 24. Geometria cyfrowo skonstruowanych przestrzennych elementów zbrojeniowych [opracowanie własne] 53
Rysunek 25. Wydrukowane przestrzenne elementy zbrojące [opracowanie własne]..... 53
Rysunek 26. Relacje obciążenie-ugięcie graniastosłupów matrycy cementowej z wewnętrznymi elementami zbrojeniowymi [opracowanie własne]..... 54
Rysunek 27. (a) Zbrojenie stalowe; (b)wydrukowane strzemiona, pręty; (c) przygotowane zbrojenie plastikowe belki [opracowanie własne] 63

Spis tabel:

Tabela 1 Skład matrycy cementowej [opracowanie własne] 27
Tabela 2 Właściwości mechaniczne stwardniałych matryc [opracowanie własne]..... 28
Tabela 3 Kluczowe właściwości filamentu *ABS* [opracowanie własne]..... 28
Tabela 4 Uproszczona ocena wydajności słupów SFRC-plastik [opracowanie własne] 49