

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr inż. Mateusz Techman

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

inż. Paweł Koszyk

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

dr inż. Karol Federowicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr inż. Szymon Skibicki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

inż. Aleksandra Ludwiczak-Sarżała

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

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

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

Streszczenie

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

1. Wstęp

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Materiał i Metoda

2.1 Materiały

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

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

Tabela 1. Skład badanych mieszanek

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

2.2. Badania laboratoryjne

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

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

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

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

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

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

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

2.3. Wielkoformatowy obiekt

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

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

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

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



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

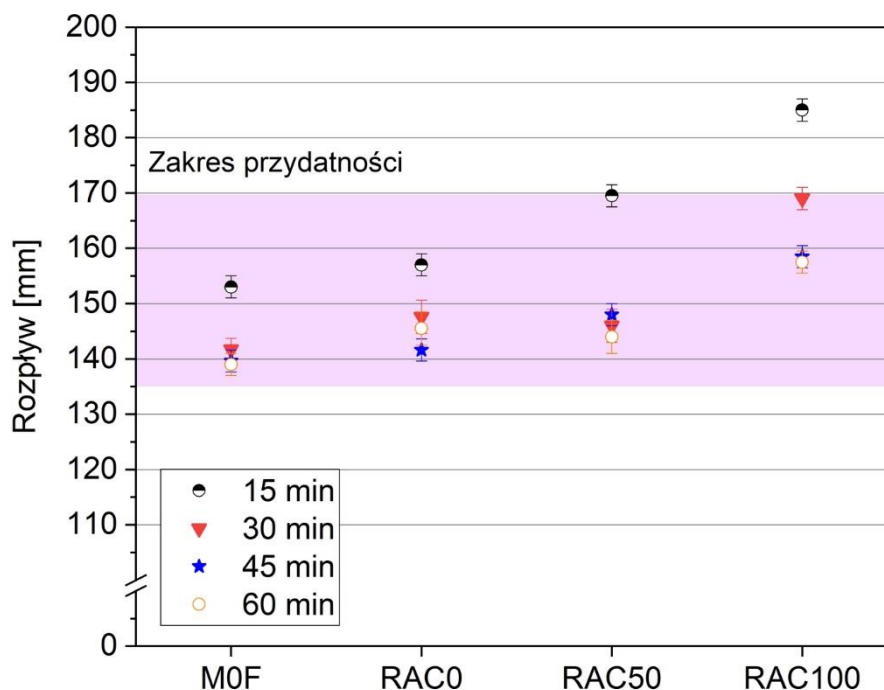


Rys. 2. Wykonywanie prac pomiarowych przy pomocy georadaru (po lewej) oraz przygotowanie ściany do badania sklerometrem (po prawej).

3. Wyniki i dyskusja

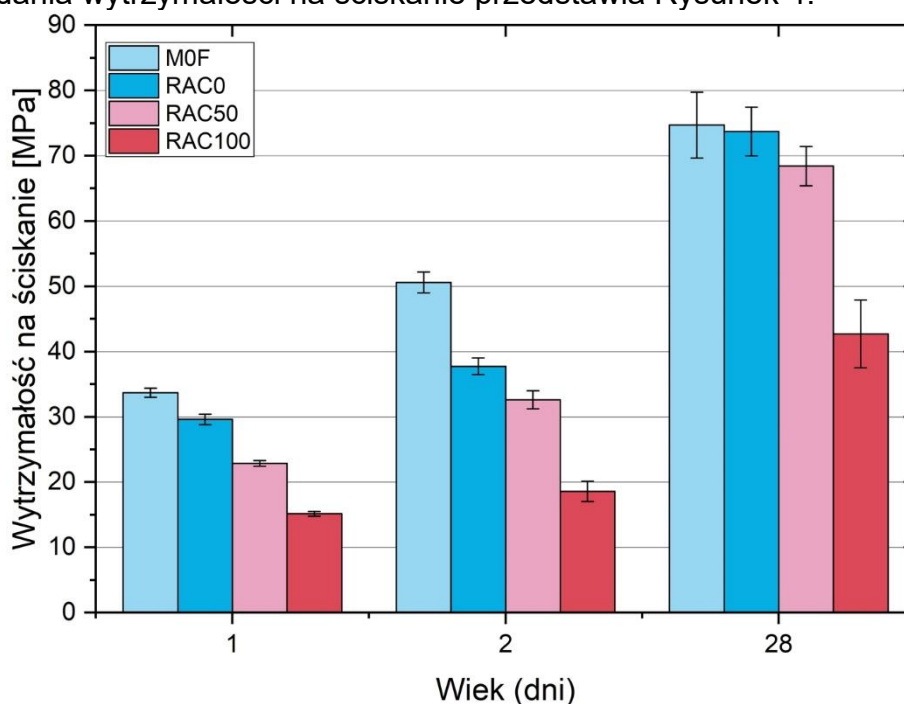
Wyniki badania rozptyłu mieszanek do druku 3D przedstawia Rysunek 3.

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



Rys. 3. Wyniki badania rozptywu badanych mieszanek

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawia Rysunek 4.



Rys. 4. Wyniki wytrzymałości badanych kompozytów cementowych

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

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

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

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

Tabela 2. Wyniki badania pull-off przygotowanych kompozytów cementowych

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

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

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



Rys.5. Przykład badania pull-off

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

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

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

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

*pęknienie płytki badawczej



Rys. 6 Badanie pull-out betonu drukowanego

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

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

Wyniki badania młotkiem Schmidta przedstawia Tabela 4.

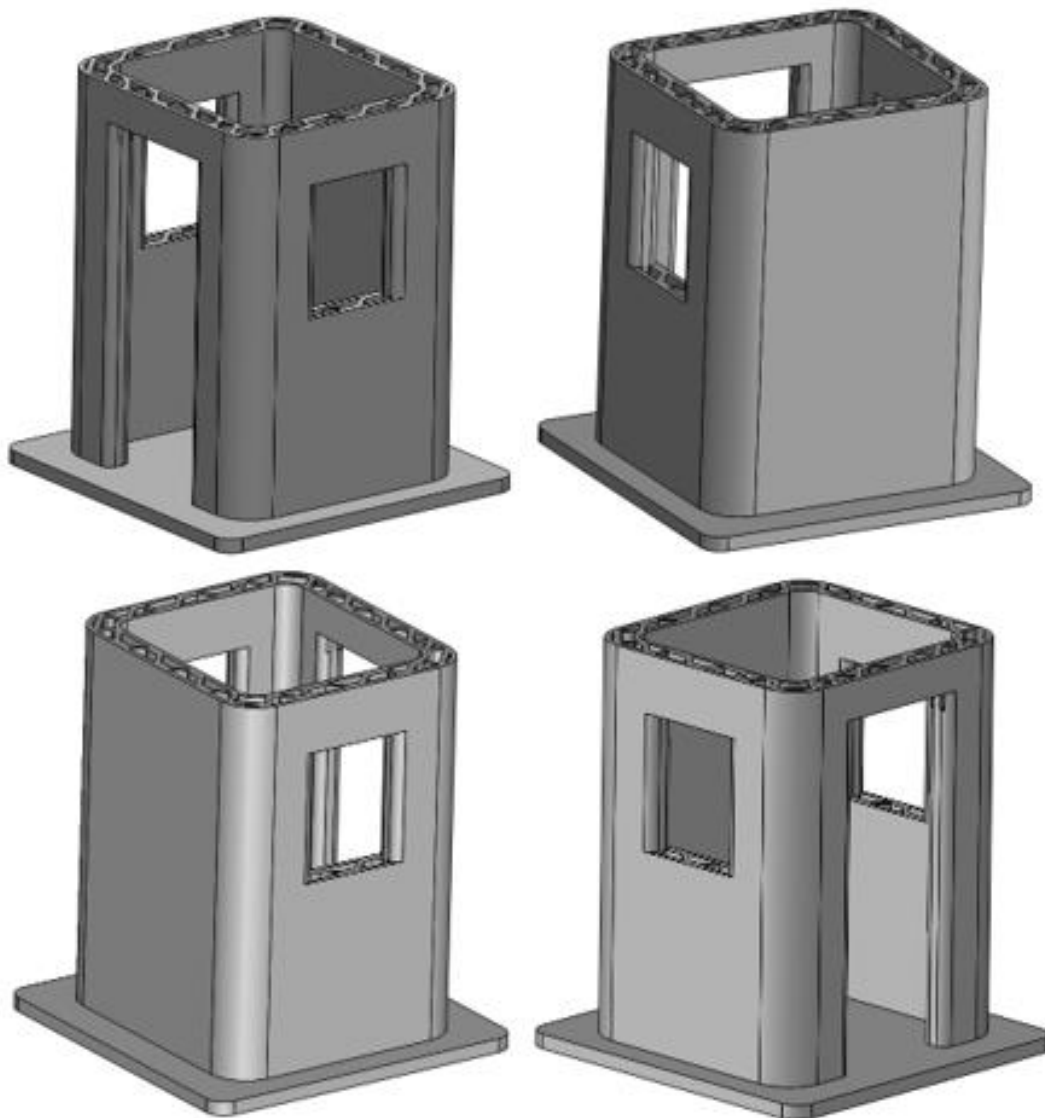
Tabela 4. Wyniki pomiarów młotkiem Schmidta

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

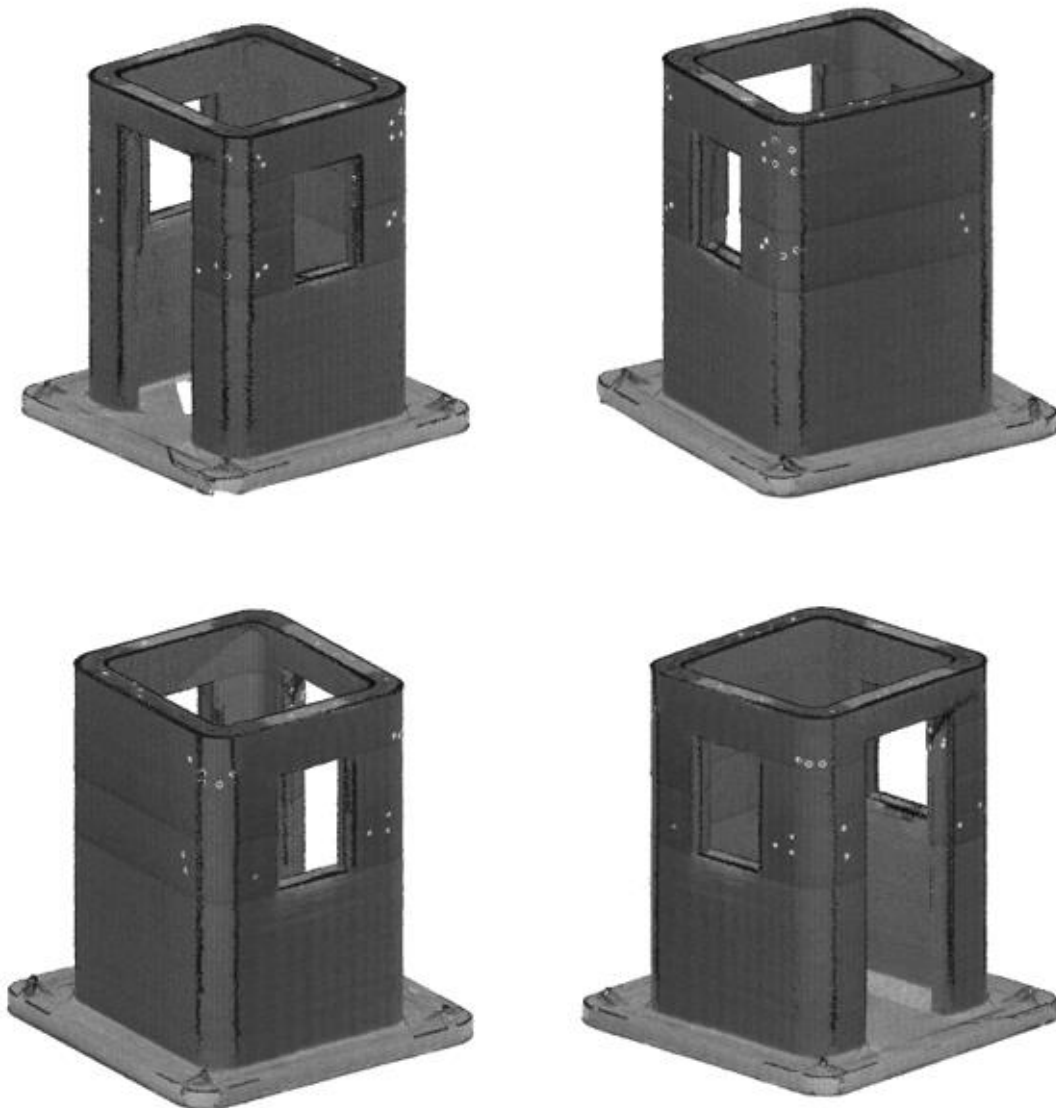
Wyniki badania wskazały na różnicę między wartościami wytrzymałości na ściskanie określonej na podstawie liczby odbicia między punktami o grubości

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

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



Rys. 7. Model komputerowy wydrukowanego obiektu



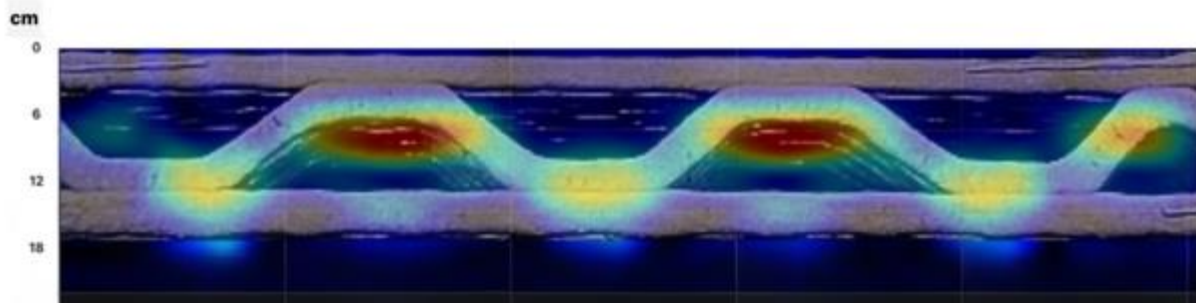
Rys. 8. Skan obiektu z wykorzystaniem LiDAR

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

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

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

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



Rys. 9. Badanie georadarem ściany obiektu

Wnioski

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

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

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

Literatura

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