

Pierwszy krok w kierunku normalizacji konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D

The first step towards standardization of additively manufactured (3D printed) structures using concrete mixture

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT (ORCID: 0000-0003-1092-1359), dr inż. Karol Federowicz (ORCID: 0000-0002-6622-4539), dr inż. Szymon Skibicki (ORCID: 0000-0002-2918-7759), dr inż. Mateusz Techman (ORCID: 0000-0001-7809-9280), dr inż. Marcin Hoffmann (ORCID: 0000-0003-2418-4759), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, inż. Aleksandra Ludwiczak-Sarzała, Laboratorium Budowlano-Drogowe Betotest Polska Sp. z o.o., dr Mehdi Chougan (ORCID: 0000-0002-7851-8665), Department of Civil and Environmental Engineering, Brunel University London, Uxbridge UB8 3PH, UK, dr Joao Pacheco (ORCID: 0000-0001-9348-1226), c5Lab – Sustainable Construction Materials Association Linda-a-Velha, Portugal

DOI: 10.5604/01.3001.0054.7216

Streszczenie: Technologia wytwarzania przyrostowego (druku 3D) z kompozytów cementowych znajduje zastosowanie w prefabrykacji elementów budowlanych oraz w konstrukcji całych obiektów, takich jak domy i mosty. Ta nowatorska metoda przyczynia się do redukcji kosztów produkcji i skrócenia czasu budowy. Kluczowa jest jednak normalizacja i standaryzacja procesów, by w pełni wykorzystać potencjał technologii. Artykuł omawia amerykańskie kryteria akceptacji ICC-ES AC509, które ustalają wytyczne do projektowania, badania i wykonania ścian drukowanych 3D. Dokument ten określa kryteria akceptacji, uwzględniając właściwości materiałowe, trwałość, analizę statyczną i kontrolę jakości. Przedstawiono również wymagania dotyczące mieszanki cementowej, takie jak konsystencja, czas przydatności do druku, wytrzymałość, mrozoodporność i skurcz. Kryteria zawierają także wskazówki dotyczące współczynnika bezpieczeństwa w projektowaniu, rodzajów badań wytrzymałościowych dla ścian oraz stosowanego zbrojenia. Ponadto obejmuje kwestie związane z badaniem połączenia ściany drukowanej ze stropem, co jest kluczowe dla zapewnienia integralności strukturalnej budynków.

Słowa kluczowe: druk 3D, beton, standaryzacja, wymagania.

Abstract: Additive manufacturing technology (3D printing) with cement composites is applied in the prefabrication of building elements and in constructing entire structures, such as houses and bridges. This innovative method contributes to reducing production costs and shortening construction time. However, the normalization and standardization of processes are crucial to fully exploit the technology's potential. The article discusses the American acceptance criteria ICC-ES AC509, setting guidelines for designing, testing, and executing 3D printed walls. This document defines acceptance criteria, considering material properties, durability, static analysis, and quality control. It also presents requirements for the cement mixture, such as consistency, printability, strength, freeze-thaw resistance, and shrinkage. The standard includes safety factor guidelines for design, types of strength tests for walls, and reinforcement application. Additionally, it covers issues related to testing the connection between the printed wall and the ceiling, vital for ensuring the structural integrity of buildings.

Keywords: 3D printing, concrete, standardization, requirements.

1. Wprowadzenie

Technologia wytwarzania przyrostowego (druku 3D) kompozytami cementowymi przechodzi dynamiczny rozwój w krajach rozwiniętych gospodarczo, gdzie liczne obiekty budowlane zostały oddane już do użytku [1]. Technologia druku 3D wykorzystywana była do wytwarzania elementów już w latach 80. XX wieku (technologia drukowania tworzywami sztucznymi), lecz dopiero niedawno znalazła swoje

miejsce w przemyśle budowlanym [2]. Wykorzystanie technologii druku 3D betonem oferuje wiele korzyści, w tym obniżenie kosztów, zmniejszenie zapotrzebowania na siłę roboczą oraz eliminację konieczności stosowania szalunków, co przekłada się na skrócenie całkowitego czasu budowy [2, 3]. Według opracowania [4] U.S. Department of Housing and Urban Development technologia druku 3D może zostać wykorzystana do budowy przystępnych cenowo mieszkań dla osób potrzebujących. Efektywniejsze wykorzystanie

materiałów i generowanie mniejszej ilości odpadów sprzyja również ekologii i może potencjalnie zmniejszyć negatywne oddziaływanie na środowisko kompozytów na spoiwie cementowym w budownictwie [5–7].

Literatura anglojęzyczna dotycząca technologii druku 3D kompozytami cementowymi zwyczajowo nazywa materiał drukowany betonem 3D (ang. *3D printed concrete*, 3DPC), pomimo braku kruszywa grubego w składzie (w zdecydowanej większości przypadków). Stąd też w polskojęzycznych opracowaniach zaleca się stosowanie tego określenia. Pomimo dynamicznego rozwoju tej technologii w ostatnich latach do dzisiaj nie przygotowano spójnych wytycznych do projektowania konstrukcji wykonywanych w technologii druku 3D. Brakuje usystematyzowanej metodologii badawczej wykorzystywanych w niej kompozytów, a także spójnej terminologii. Problem ten zauważalny jest także w Polsce, gdzie nie ma jednoznacznie przyjętych polskich odpowiedników określeń charakterystycznych dla technologii druku 3D [2]. Mowa tutaj przede wszystkim o właściwych polskich odpowiednikach opisujących podstawowe właściwości materiału, tj.: *printability* (drukowalność), *pumpability* (pompowalność), *extrudability* (wytlaczalność), *buildability* (budowalność) oraz *open time* (czas przydatności) [8, 9]. W nawiasach podano propozycje tłumaczeń anglojęzycznych określeń, uwzględniając ich znaczenie oraz prostotę nazewnictwa.

Wspomniane braki w ustawodawstwie, normalizacji oraz wytycznych do projektowania spowalniają dalszy rozwój tej technologii. Obecnie prowadzone realizacje bazują na jednorazowych pozwoleniach i dopuszczeniach do użytku. Każdy projekt wymaga indywidualnej dokumentacji technicznej, specjalistycznych przeglądów oraz innych dokumentów zgodnych z prawem miejscowym, aby zostać dopuszczonym do użytku. Taka sytuacja występuje również w Stanach Zjednoczonych, lidera w dziedzinie druku 3D betonem, w których do tej pory nie przygotowano załączników do *International Building Code* (Międzynarodowy Kodeks Budowlany, MKB), czyli odpowiednika polskiego Prawa budowlanego. By umożliwić realizację inwestycji w technologii druku 3D, *International Code Council* (Międzynarodowa Rada Przepisów) opracował tak zwane kryteria akceptacji (ang. *acceptance criteria*). Są to wymagania dla ścian wykonanych w technologii druku 3D, pozwalające na ich dopuszczenie do zastosowań konstrukcyjnych w oparciu o MKB oraz *International Residential Code* (Międzynarodowy Kodeks Mieszkaniowy). Dokument ten otrzymał nazwę ICC-ES AC509 – *3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls* (AC509) [10]. Określa metody oceny właściwości materiału, jego trwałości, wytrzymałości konstrukcyjnej drukowanych elementów, potencjalnego bezpieczeństwa pożarowego oraz trwałości materiału. Definiuje również wymagania dotyczące próbek produktu i jakości, które muszą być spełnione, aby uzyskać potwierdzenie zgodności z przepisami budowlanymi.

Celem niniejszej publikacji jest zaprezentowanie polskim czytelnikom kluczowych informacji dotyczących wymagań stawianych konstrukcjom wykonanym w technologii 3D, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów związanych z metodami weryfikacji właściwości mieszanek oraz elementów konstrukcyjnych zgodnie z dokumentem ICC-ES AC509 [10].

2. Kryteria akceptacji ICC-ES AC509

Pierwsza wersja kryteriów akceptacji ICC-ES AC509 [10] została opublikowana w 2019 roku. Jej aktualizacja została następnie wydana w październiku 2022 roku. Jest to obecnie najbardziej aktualny zbiór wytycznych technicznych do projektowania i badania konstrukcyjnych elementów ściennych wykonanych w technologii druku 3D betonem.

Kryteria akceptacji swoim zakresem obejmują cztery główne zagadnienia związane z: właściwościami materiałowymi (mieszkanką betonową i jej składnikami), trwałością, analizą statyczną oraz kontrolą jakości. Dodatkowo dokument obejmuje zagadnienia związane z badaniem połączenia ściany drukowanej ze stropem. Sposób połączenia tak wykonanej ściany z fundamentami czy z dachem znajduje się już poza zakresem przedmiotowego kryterium. W kryteriach akceptacji AC509 nie znajdziemy informacji co do wytycznych wykonania lub analizy pozostałych elementów konstrukcyjnych budynku.

Zgodnie z definicją przedstawioną w AC509 [10] „ściana betonowa 3D” (*3D concrete wall*) to: element wykonany warstwa po warstwie przy użyciu technologii druku 3D betonem, posiadający dwie zewnętrzne powłoki. Opcjonalnie możliwe jest wykonanie między nimi betonowego rdzenia i utworzenie ściany monolitycznej. Kryteria akceptacji dopuszczają zbrojenie rdzenia betonowego tradycyjnymi prętami stalowymi.

Według AC509 [10] mieszanka do druku 3D (ang. *3D concrete*) to: kompozyt cementowy (zaprawa lub beton) zawierający cement i kruszywo (drobne lub/i grube), a także opcjonalnie zbrojenie rozproszone w postaci włókien, domieszki chemiczne oraz dodatki mineralne. Dopuszczalne jest stosowanie kilku domieszek chemicznych o zróżnicowanym działaniu w celu zapewnienia odpowiedniego czasu wiązania, mrozoodporności oraz konsystencji mieszanki.

Kryteria akceptacji przygotowano z myślą o ścianach nośnych zbrojonych i niezbrojonych, nienośnych oraz usztywniających (*shear-wall*) w jednopiętrowych i wielopiętrowych budynkach jednorodzinnych. Ściany budynków, zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne, powinny być wykonywane w technologii powłoka-rdzeń, gdzie warstwy zewnętrzne wykonywane są w technologii druku 3D, natomiast wewnątrz ściany wykonane może zostać w technologii tradycyjnej z tej samej lub innej mieszanki betonowej spełniającej wymagania AC509. Projektowanie konstrukcji w oparciu o AC509 [10] nie wymaga uwzględnienia zagadnień odporności pożarowej ścian.

Głównym założeniem druku 3D w budynkach niepodlegających dodatkowym warunkom p.poż. W przypadku konieczności oceny odporności ogniowej tak wykonanej przegrody należy wykonać dodatkowe badania w oparciu o normę ASTM E119 [11] lub UL263 [12].

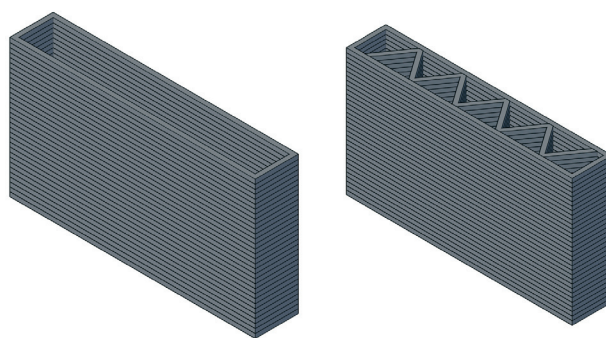
Badania wytrzymałościowe zaprojektowanej ściany drukowanej powinny być przeprowadzone dla każdej użytej mieszanki. Osobno należy przeanalizować wpływ różnego sposobu zbrojenia elementów, jeśli takie będzie stosowane. Badaniom i analizom należy poddać każdy typ geometrii, w tym różną grubość i szerokość drukowanych ścieżek, sposób wykratowania czy ściany o różnej szerokości. Niezależnie należy przeanalizować wszystkie sposoby połączeń typu ściana-strop występujące w budynku. Ostatnim aspektem wymagającym testów jest określenie maksymalnych i minimalnych interwałów pomiędzy wydrukami kolejnych warstw. Dokładne procedury badawcze oraz zalecane wartości mierzonych parametrów omówiono w dalszej części artykułu.

AC509 porusza również kwestie współczynników obliczeniowych stosowanych w trakcie projektowania konstrukcji. Częściowy współczynnik materiałowy dla elementów wykonanych w technologii druku 3D z wykorzystaniem betonu zaleca się przyjmować $\gamma_M = 3$. Wartość ta jest zdecydowanie większa niż współczynnik materiałowy przyjmowany dla betonu zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1 [13] ($\gamma_M = 1,5$ według Tablicy 2.1N, zmienione na $\gamma_M = 1,4$ na podstawie załącznika krajowego). W odniesieniu do współczynników częściowych według normy murowej, proponowaną wartość można uznać za zbliżoną. Zgodnie z uwagą do punktu 2.4.3 PN-EN 1996-1-1 [14] wynosi nawet do $\gamma_M = 2,7$, załącznik krajowy ogranicza tę wartość do $\gamma_M = 2,5$. Wysoki współczynnik częściowy stosowany w PN-EN 1996-1-1 [14] wynika z ograniczenia kontroli sposobu wykonania muru. W związku z powyższym można uznać, że autorzy AC509 przyjęli podobne założenia i wprowadzili bardzo wysoki współczynnik częściowy ze względu na brak pełnej kontroli wykonania ścian w tej nowej technologii.

Autorzy dokumentu zostawiają jednak projektantowi ostateczną decyzję co do wartości przyjętego współczynnika redukcyjnego, dopuszczając stosowanie wartości podanych w innych normach amerykańskich. Nie jest sprecyzowane jednak dokładnie, o których normach mowa. W przypadku złożonych stanów naprężeń autorzy AC509 [10] zalecają, aby łączny efekt obciążeń poprzecznych i osiowych nie przekraczał jedności, co do zasady jest również spójne z podejściem stosowanych w obecnie powszechnie używanej metodzie stanów granicznych (prezentowanej także w normach europejskich).

Ponieważ kryteria akceptacji AC509 [10] obecne są już na rynku amerykańskim od kilku lat, istnieją już firmy oferujące wykonywanie i projektowanie konstrukcji w oparciu o jej zapisy. Jedną z największych i najbardziej rozpoznawalnych jest firma Black Buffalo 3D, oferująca wykonanie ścian w technologii druku 3D z zastosowaniem zarówno izolacji termicznej

oraz konwencjonalnego zbrojenia [15]. Założenie tego systemu polega na wykonaniu ażurowej (lita drukowana powłoka zewnętrzna z ewentualnym usztywnieniem w środku) ściany, której puste przestrzenie wypełniane są sybkim materiałem izolacyjnym (np. wermikulitem) lub wykorzystywane są jako szalunek dla tradycyjnych elementów żelbetowych. Dzięki współpracy z firmą Dur-O-Wal opracowano również technologię ciągłego zbrojenia układanego w zautomatyzowany sposób pomiędzy kolejno drukowanymi warstwami betonu [15]. Przy odpowiednio zaprojektowanej topologii drukowanej ściany możliwe jest wykorzystywanie wszystkich trzech rozwiązań równolegle, co pozwala wytworzyć element zarówno o wysokiej nośności, jak również izolacyjności termicznej [15]. Przykładowe modele ścian produkowanych przez firmę Black Buffalo 3D przedstawia rysunek 1.

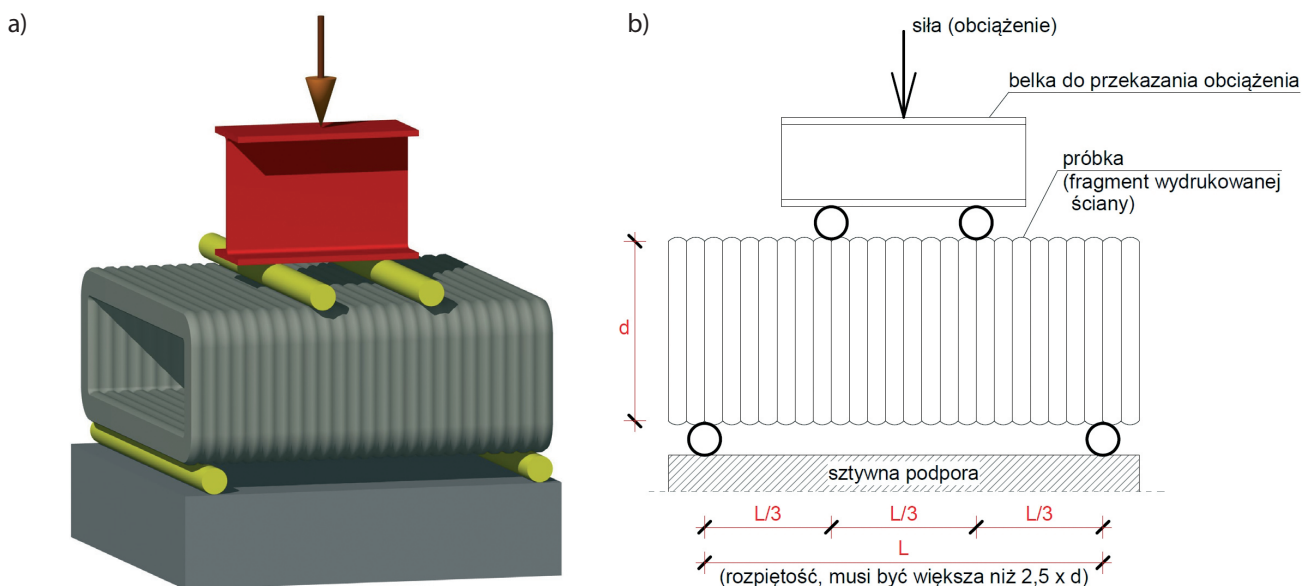


Rys. 1. Przykładowe topologie drukowanych ścian przez firmę Black Buffalo 3D [15]

3. Wymagane właściwości betonów 3D

Zgodnie z wymaganiami Sekcji 4.1 AC509 [10] pełną serię badań należy przeprowadzić dla każdej użytej w konstrukcji mieszanki betonowej. W związku z tym każda modyfikacja lub optymalizacja ilości i rodzaju zbrojenia rozproszonego w mieszance wymaga ponownego przeprowadzenia kompletu badań. Do obowiązkowego zestawu badań należy zaliczyć określenie wytrzymałości na ściskanie (według ASTM C39 [16] lub ASTM C109 [17]), badanie konsystencji (według ASTM C143 [18] lub ASTM C1611 [19]), ocenę mrozoodporności mieszanki (według ASTM C666 [20]), pomiar skurczu i zmian objętościowych materiału (według ASTM C157 [21]) oraz określenie czasu przydatności mieszanki do druku (z wykorzystaniem normy ASTM E518 [22]).

Dokładny zestaw wymaganych badań wraz ze szczegółowymi wytycznymi przedstawiono w sposób zbiorczy w tabeli 1. Warto w tym miejscu podkreślić, że nie licząc badania czasu przydatności do druku, pozostałe badania wykonywane są na tradycyjnych próbkach formowanych, a nie drukowanych. Nie jest ustalona jednoznaczna zależność między próbkami drukowanymi a formowanymi tradycyjnie. Jednak wiele prac wykazało, że próbki drukowane mają zdecydowanie niższą wytrzymałość na ściskanie niż próbki formowane tradycyjnie (m.in. Lee i inni [23], Wolfs i inni [24] czy też Shakor



Rys. 2. Schemat badania próbki drukowanej do oznaczenia czasu przydatności mieszanki do druku poprzez badania wg normy ASTM E518 [22]; przedstawiono wariant próbki bez wypełnienia rdzenia

Tabela 1. Podsumowanie wymaganych badań materiałowych do raportowania w ramach ICC-ES AC 509 [10]

Rodzaj badania	Liczba próbek	Norma	Minimalne wymagania	Typ/rodzaj próbki
Konsystencja	Wg normy	ASTM C143 [18] ASTM C1611 [19] ASTM C1437 [26]	brak	Opad stożka lub rozplływ raportowany w celu kontroli jakości i określenia konsystencji
Określenie czasu przydatności	Min. 3 próbki dla każdego interwału	ASTM E518 [22] (Sekcja 5.2.) metoda A	Uzyskane wyniki wytrzymałości na zginanie (szepności) dla skrajnych interwałów badawczych nie powinny mieć statystycznych różnic. Jeśli różnice takie wystąpią należy je uwzględnić w raporcie z badań	Drukowane próbki wielowarstwowe o takiej samej geometrii powłoki (warstw zewnętrznych) jak w elemencie ściennym
Wytrzymałość na ściskanie	Min. 5 próbek	ASTM C39 [16] ASTM C109 [17]	Minimalna wytrzymałość po 28 dniach – 17,2 MPa, CoV ≤ 10%	Formowana próbka sześcienna (50×50×50 mm) lub cylindryczna (proporcje h/d = 2/1, średnica od 50 do 200 mm)
Mrozoodporność	Min. 3 próbki	ASTM C666 [20] procedura A	Min. 300 cykli (współczynnik trwałości min. 80). Określenie zawartości powietrza w mieszance do raportu (brak wartości granicznych)	Tradycyjna próbka prostokątowa lub cylindryczna (wymiar poprzeczny między 75 mm a 125 mm, wymiar podłużny w zakresie 275 mm do 405 mm)
Skurcz całkowity	Min. 3 próbki	ASTM C157 [21]	Odształcenia skurczowe po 28 dniach nie większe niż 500 μm/m (lub 650 μm/m dla betonu z włóknami)	Formowana próbka prostokątowa (25×25×285 mm, 75×75×285 lub 100×100×285 mm)

i inni [25] udowodnili, że te różnice w wytrzymałości mogą sięgać nawet ponad 30%). Oznacza to, że uzyskiwane wyniki dotyczą samego materiału bez uwzględnienia wpływu technologii wykonania i warunków dojrzewania wydrukowanych struktur, co też uzasadnia wysoką wartość współczynnika częściowego zaproponowanego w kryteriach akceptacji. Wspomniane wcześniej badanie czasu przydatności poprzez określenie maksymalnego i minimalnego interwału wydruku kolejnych warstw przeprowadza się na podstawie normy ASTM E518 [22] przeznaczonych dla konstrukcji murowych. Badanie to polega na określeniu wytrzymałości na zginanie dla skrajnych interwałów między wydrukiem poszczególnych

warstw, a dokładny opis znajduje się w tabeli 1. Schemat próbki badawczej w trakcie określania wytrzymałości na zginanie elementu ściennego przedstawiono na rysunku 2.

4. Wymagania konstrukcyjne ścian drukowanych w technologii 3D

Oprócz opisanych powyżej badań materiałowych według kryteriów akceptacji AC509 [10] wymagane jest przeprowadzenie testów elementów konstrukcyjnych w pełnej skali. Dla każdego rodzaju ściany, użytej mieszanki czy sposobu wypełnienia należy przeprowadzić niezależny komplet badań.

W kryterium wymieniono 4 rodzaje testów niszczących:

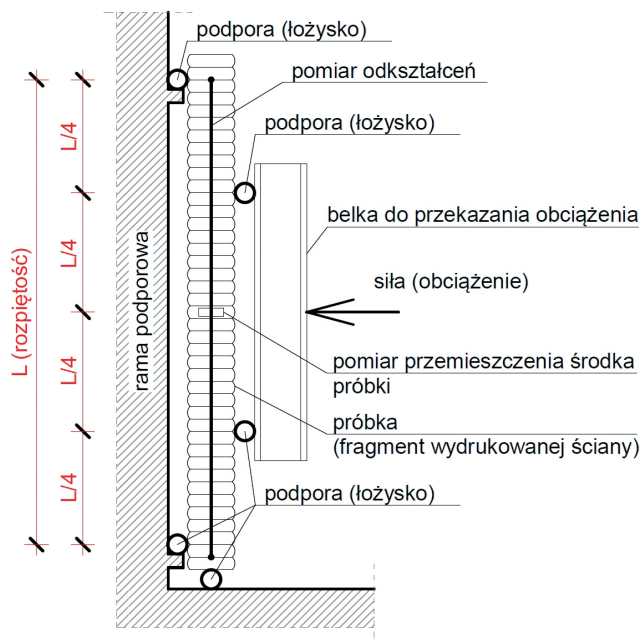
- badanie wytrzymałości na ściskanie osiowe drukowanego elementu ściennego;
- badanie wytrzymałości na zginanie drukowanego elementu ściennego;
- badanie wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie drukowanego elementu ściennego;
- badanie współpracy elementu ściennego i stropowego przy przenoszeniu obciążeń.

Badania elementów ściennych należy przeprowadzić aż do pełnego zniszczenia, czyli osiągnięcia stanu granicznego nośności. W raporcie z badań należy podać wartość średnią z uzyskanych pomiarów. Natomiast każdy pojedynczy wynik nie może różnić się o więcej niż 15% od wartości średniej, w przeciwnym wypadku do projektowania należy przyjąć najniższy wynik z przebadanych próbek. W analizie uzyskanych wyników można uwzględnić zjawisko wybożenia oraz odprysku warstw powłoki drukowanej, decyzję o uwzględnieniu tych zjawisk podejmuje projektant. W AC509 [10] nie doprecyzowano sytuacji, gdy taka analiza jest zalecana.

Badanie wytrzymałości drukowanej ściany należy przeprowadzić na podstawie głównych założeń normy ASTM E72 [27]. Jest to dokument określający w sposób ogólny warunki badań elementów ściennych, stropowych i paneli elewacyjnych. Próbką badawczą powinna być identyczna w stosunku do docelowego elementu, a jej rozmiar dobrany tak, aby umożliwić symulację rzeczywistej pracy w konstrukcji. Zalecaną szerokością badanego elementu jest 120 cm oraz wysokość równa rzeczywistym wymiarom elementu ściennego w budynku. Badanie należy przeprowadzić pomiędzy 25 a 31 dniem dojrzewania betonu. Zgodnie z kryterium AC509 [10] konieczne jest przebadanie minimum 6 próbek. Jeden zestaw (trzy próbki) ma odpowiadać maksymalnej wysokości projektowanej ściany, przy jej minimalnej grubości. Obciążenie należy przykładać na mimośrodzie wynoszącym co najmniej 1/6 grubości ściany.

Badanie wytrzymałości na zginanie drukowanej ściany również wykonuje się na podstawie normy ASTM E72 [27]. Podobnie jak w przypadku badania osiowego należy wykonać minimum sześć próbek badawczych dla różnych konfiguracji szerokości i wysokości. W przypadku badania wytrzymałości na zginanie całej ściany należy stosować czteropunktowe zginanie zgodnie z rysunkiem 3.

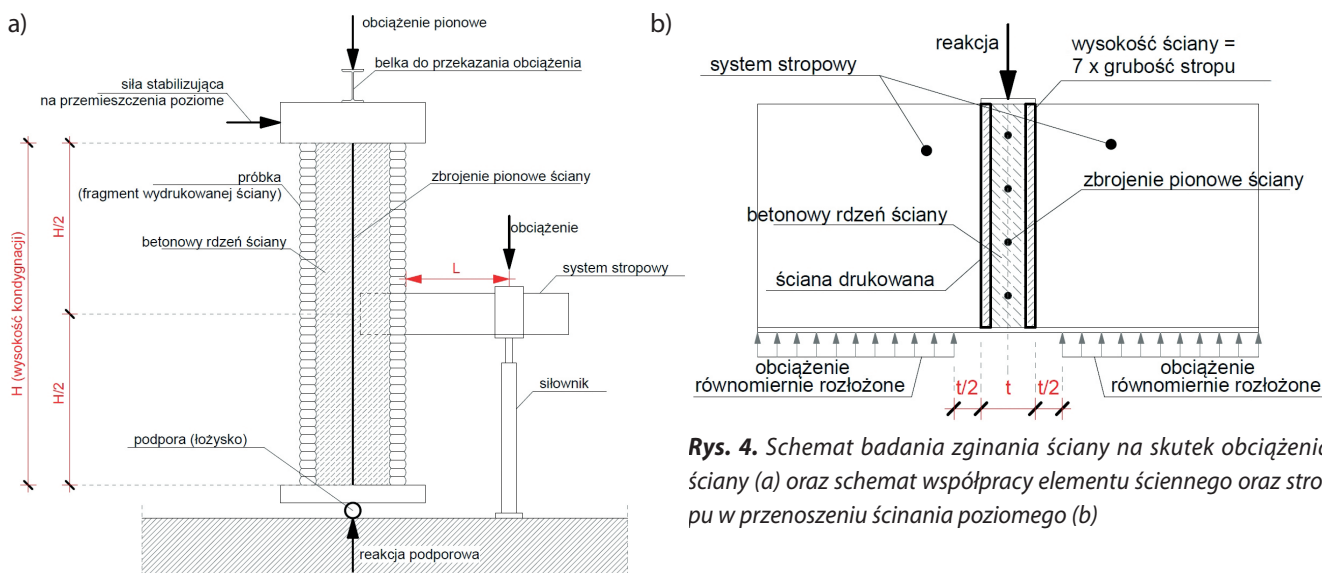
Badanie wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie ściany również wykonywane jest na podstawie normy ASTM E72 [27], jednak dla ścian z litym wypełnieniem betonem można stosować normę ASTM E519 [28]. Do badań należy przygotować zestaw 3 elementów o najmniejszej projektowanej grubości całkowitej ściany. Jeśli w projekcie występują ściany o różnej grubości, należy dodatkowo przebadać zestaw 3 próbek reprezentujących element ścienny o największej grubości. Badany element ścienny należy zamocować w podłożu tak, aby się nie przesunął, jednocześnie zamocowanie nie powinno wpływać na sztywność elementu. Dodatkowo



Rys. 3. Schemat badania wytrzymałości na zginanie drukowanej ściany

należy zabezpieczyć badany element przed momentem obracającym powstającym na skutek przyłożenia obciążenia ścinającego. Warto zaznaczyć, że obciążenie to przykładane ma być do górnej powierzchni ściany w sposób równomierny na całej długości próbki poprzez pomocniczy element stalowy lub żelbetowy. Nie jest sprecyzowane, jak połączyć element pomocniczy z badanym fragmentem ściany, odwołując się do rozwiązań powszechnie stosowanych w praktyce inżynierskiej. W przypadku stosowania metodyki badawczej opisanej w normie ASTM E518 [22] badana próbka powinna mieć wymiary 120x120 cm i być obciążana w kierunku swojej przekątnej. W przypadku ścian nośnych zaleca się badać próbkę w złożonym stanie naprężeń (jednoczesne ściskanie i ścinanie).

Badanie współpracy elementu ściennego ze stropem należy przeprowadzić w przypadku budynków wielokondygnacyjnych. Dla każdego rodzaju stropu należy przebadać minimum 3 elementy ścienne o najmniejszej grubości całkowitej. AC509 [10] sugeruje wykonanie dwóch badań: zginania nieosiowego drukowanego elementu ściennego z uwzględnieniem ścinania pionowego oraz współpracę stropu i ściany przy ścinaniu poziomym. Wartość średnia wyników uzyskanych w trakcie badań może zostać wykorzystana przy projektowaniu tylko, gdy wszystkie pojedyncze wyniki nie różnią się od niej o więcej niż 15%. W pozostałych przypadkach do projektowania należy przyjąć najmniejszą wartość uzyskaną w trakcie badań. Schemat badania zginania ściany na skutek obciążenia stropem przedstawiono na rysunku 4a. Wymiar L należy dobrać tak, aby proporcje momentu zginającego w stropie oraz siły ścinającej były zbliżone do rzeczywistych warunków pracy. Obciążenie przykładane jest w sposób liniowy aż do zniszczenia stropu lub ściany. Ideą badania współpracy elementu ściennego oraz stropu



Rys. 4. Schemat badania zginania ściany na skutek obciążenia ściany (a) oraz schemat współpracy elementu ściennego oraz stropu w przenoszeniu ścinania poziomego (b)

w przenoszeniu ścinania poziomego przedstawiono na rysunku 4b. Obciążenie przykładane jest liniowo do elementu stropowego o minimalnej długości 120 cm. Badany element ścienny powinien mieć wysokość przynajmniej 7-krotnie większą niż grubość ściany.

5. Badania mieszanki betonowej na placu budowy

Według wytycznych AC509 [10] wymagana jest dodatkowa kontrola właściwości mechanicznych betonu w trakcie procesu drukowania elementów ściennych do badań. Stosując analogię do pobierania próbek mieszanki betonowej na budowie w trakcie wykonywania elementów betonowych, także w trakcie druku ścian 3D z betonu, należy wykonywać stosowne próbki. Próbki cylindryczne należy wykonać i przechowywać na podstawie wytycznych normy ASTM C31 [29]. Wymagane jest przygotowanie zestawu próbek zarówno z betonu drukowanego (powłoki), jak również wypełniającego (rdzenia). Badania próbek referencyjnych (na podstawie normy ASTM C39 [16]) w odstępie czasu nie dłuższym niż 24 h od badania elementów konstrukcyjnych. Minimalna całkowita wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie elementu ściennego przyjęta w końcowym raporcie z badań nie może przekraczać średniej wytrzymałości na ściskanie betonu powłoki ani rdzenia.

6. Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji

Projektowanie konstrukcji wykonywanej w ramach AC509 [10] nie zakłada cech odporności przeciwpożarowej obiektu, natomiast dopuszczalne jest przeprowadzenie dodatkowych badań związanych z bezpieczeństwem pożarowym konstrukcji:

- w przypadku stosowania elementu drukowanego bez warstwy wykończeniowej (np. tynku), w którym mieszanka stosowana do wydruku powłoki zawiera w składzie włókna

syntetyczne niezbędne jest przeprowadzenie badań zgodnie z wymaganiami ASTM E84 [30] lub UL 723 [31];

- w przypadku zastosowania ściany jako elementu ochronnego przed potencjalnym działaniem ognia należy przeprowadzić badania na podstawie normy ASTM E119 [11] lub UL 263 [12].

Jeśli powyższe badania nie są prowadzone, elementy drukowane z betonu 3D należy klasyfikować jako tak zwane *non-fire rated*, czyli elementy niebadane pod kątem odporności ogniowej.

7. Podsumowanie

Kryteria akceptacji ICC-ES AC509 [10] stanowiąc mogą doskonałą bazę do dalszych dyskusji na temat standaryzacji wymagań dotyczących projektowania betonem. Interesującym aspektem jest relatywnie ograniczony zakres badań trwałości elementów oraz badań cech typowych dla druku 3D mieszankami cementowymi. Zwłaszcza ograniczone są wymagania w kontekście przyczepności międzywarstwowej, która jest badana jedynie pośrednio w trakcie zginania elementu ściennego. Wiele publikacji naukowych potwierdziło, że przyczepność międzywarstwowa, a także struktura porów mają znaczący wpływ na trwałość elementów wykonanych w technologii druku 3D. To zagadnienie stanowi istotny element prac prowadzonych w komitetach *fib* oraz RILEM, które podejmują się obecnie tematu standaryzacji technologii druku 3D.

Zastanawia również bardzo ograniczona liczba badań przeprowadzonych na próbkach typowo drukowanych, mowa tutaj przede wszystkim o badaniach trwałościowych, takich jak mrozoodporność czy skurcz elementów drukowanych. Dostępnych jest wiele publikacji naukowych podkreślających, że pomiary wspomnianych cech na typowych próbkach badawczych (formowanych tradycyjnie) w oparciu o normowe metody dotychczas stosowane prowadzą do statystycznie istotnych rozbieżności rezultatów względem próbek drukowanych. Próbki formowane nie uwzględniają np. anizotropii

mechanicznej i strukturalnej drukowanego materiału. Wpływ warunków dojrzewania, brak tradycyjnego deskowania czy wytycznych dotyczących pielęgnacji drukowanych elementów sprawia, że ich trwałość może znacząco różnić się w stosunku do wyników badań normowych. W kryteriach akceptacji AC509 [10] brakuje również wytycznych czy sugestii praktycznych dotyczących procesu wykonywania elementów ściennych. Przede wszystkim brak wytycznych dotyczących momentu wypełniania ścian ażurowych potencjalnym betonem rdzeniowym, wymagań wobec niego, zaleceń dotyczących zagęszczania takiego materiału czy sposobu układania tradycyjnego zbrojenia. Zastanawiać może także brak wymagań stawianych jakości drukowanych warstw, tj. maksymalne odchyłki w szerokości i grubości między kolejno drukowanymi warstwami. Z drugiej strony proponowane w AC509 [10] badania skupiają się na wielkoformatowych badaniach całych elementów ściennych, co znacznie ogranicza możliwości dokonywania szybkich zmian w opracowanych już mieszankach/typach ścian.

Kryterium akceptacji AC509 [10] stanowi ważną próbę ujęcia technologii druku 3D w ramy norm i standardów wykonania. Należy pamiętać, że ze względu na cały czas stosunkowo niewielkie doświadczenie związane z wykorzystaniem technologii druku 3D w branży budowlanej opracowanie to będzie zapewne aktualizowane, bazując na dokonaniach i doświadczeniu firm z tego sektora. Wyznacza natomiast kierunek, w którym Komitety Normalizacyjne powinny zmierzać, wykorzystując już opracowane metody badawcze i dostosowując je do zmieniających się technologii w budownictwie.

Finansowanie

Publikacja została sfinansowana 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)). The funding provided by FCT – the Portuguese Foundation for Science and Technology, is acknowledged: references UIDB/04625/2020 (CERIS research centre) and ERA-MIN3/0001/2021 (ERA-NET Cofund ERA-MIN3).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bici A., Yunitsyna A., Analysis of 3D printing techniques for building construction: A review. *Constr Robot* 7(2)2023, str. 107–123, <https://doi.org/10.1007/s41693-023-00108-4>
- [2] Skibicki S., Kaszynska M., Federowicz K., Techman M., Zielinski A., Olczyk N. et al, Druk 3D kompozytów betonowych metodą przyrostową – doświadczenia zespołu szczecińskiego, *Inżynieria i Budownictwo* 7/2021, str. 328–333
- [3] Skibicki S., Ocena jakości ściany wykonanej w technologii druku 3D za pomocą systemu analizy obrazu. *Inżynieria i Budownictwo* 3–4/2022, str. 124–127
- [4] Rekhi J., Stern A., 3D Concrete Printed Construction: Building the Future of Housing, *Layer-by-Layer. Cityscape, A Journal of Policy Development and Research* 24(2)2022
- [5] Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K. F., Tan M. J. et al, A systematical review of 3D printable cementitious materials, *Construction and Building Materials* 207, 2019, str. 477–490, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>
- [6] Skibicki S., Żygadło A., Górnostaj D., Łabecka M., Orzelski K., Projektowanie i analiza mieszanki betonowej zawierającej kruszywo po obróbce strumieniowo-ściernej (garnet)w technologii druku 3D. *Builder* 314(9)2023, str. 16–19, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7760>
- [7] Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T., Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual and Physical Prototyping* 11(3)2016, str. 209–225, <https://doi.org/10.1016/j.vpp.2016.12.009>
- [8] Skibicki S., Ocena właściwości kompozytu na spoiwie cementowym do druku 3D, rozprawa doktorska, Szczecin, 2020
- [9] Federowicz K., Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D, rozprawa doktorska, Szczecin, 2023
- [10] ICC-ES AC509 – 3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls
- [11] ASTM E119-20: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials
- [12] UL 263: Fire Tests of Building Construction and Material
- [13] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [14] PN-EN 1996-1-1:2010. Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych
- [15] Bello N. D., Memari A. M., Comparative Review of the Technology and Case Studies of 3D Concrete Printing of Buildings by Several Companies, *Buildings* 13(1)2023, str. 106, <https://doi.org/10.3390/buildings13010106>
- [16] ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- [17] ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
- [18] ASTM C143/C143M-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- [19] ASTM C1611/C1611M-21. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete
- [20] ASTM C666-97: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- [21] ASTM C157-75: Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete
- [22] ASTM E518-03: Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry
- [23] Lee H., Kim J.-H. J., Moon J.-H., Kim W.-W., Seo E.-A., Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar, *Materials* 12(24)2019, <https://doi.org/10.3390/ma12244104>
- [24] Wolfs R. J. M., Bos F. P., Salet T. A. M., Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, *Cement and Concrete Research* 119, 2019, str. 132–140, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
- [25] Shakor P., Nejadi S., Sutjipto S., Paul G., Gowripalan N., Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar, *Additive Manufacturing* 32, 2020, str. 101069, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101069>
- [26] ASTM C1437-20: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- [27] ASTM E72-15: Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction
- [28] ASTM E519-07: Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages
- [29] ASTM C31/C31M-22: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- [30] ASTM E84-21a: Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials
- [31] UL 723: Standard for Safety Test for Surface Burning Characteristics of Building Materials