

dr inż. Bartłomiej Sawicki
Institute of Structural Design (ITE), Technische Universität Braunschweig
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT
Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)

Druk Betonu 3D w praktyce i normach

Concrete 3D Printing in practice and standards

Streszczenie

Druk betonu 3D to technologia przyszłości, jednak to już dziś kształtują się pierwsze praktyki oraz normy dotyczące jego stosowania.

Poniższy artykuł w zwięzły i przeglądowy sposób opisuje podstawy klasyfikacji metod zaliczanych do grupy technologii druku betonu 3D, ich zastosowanie w praktyce, oraz pierwsze próby ujęć normatywnych. Szczególny nacisk położony jest na projektowanie i certyfikację konstrukcji, rozumianą jako ich jakość, wytrzymałość, oraz trwałość. W artykule rozważone są zwłaszcza przykłady niemieckie, holenderskie i amerykańskie, ponieważ będą one miały zapewne największy wpływ na przyszłe uwarunkowania dla zastosowania metod addytywnych w Polsce i w Europie.

Jak udowadniają przedstawione tu przykłady, podczas gdy na świecie wprowadzane są rekomendacje nakierunkowane głównie na elementy i budowle powstające przy użyciu techniki ekstruzji oraz o bardzo ograniczonym zakresie, przy odpowiednim nastawieniu inwestora oraz urzędów certyfikujących już obecnie obowiązujące normy pozwalają na zapewnienie bezpieczeństwa i użyteczności konstrukcji powstałych w technologii wytwarzania przyrostowego. Co ciekawe, nawet obecnie powstające normy osadzone są w dobrze znanych, „analogowych” standardach budowlanych i nie wykorzystują pełni możliwości zapewnionych przez digitalizację procesu wytwarzania, takich jak zautomatyzowana kontrola materiału, procesu produkcji, czy ostatecznej jakości produktu.

Abstract

3D concrete printing is a technology of the future. However, the first practical applications and regulatory frameworks are already taking their shape today. This article provides a concise and comprehensive overview of the classification of concrete 3D printing technologies, their practical applications, and initial attempts at standardization. Particular emphasis is placed on the design and certification of structures in terms of their quality, resistance, and durability. The study focuses primarily on examples from Germany, the Netherlands, and the United States, as these are expected to have the greatest influence on the future regulatory landscape for additive manufacturing of concrete in Poland and Europe.

As demonstrated by the cases presented here, while global recommendations primarily address structures and elements produced using extrusion-based techniques and are very limited in their scope, existing standards—when appropriately interpreted by investors and certification bodies—can already ensure the safety and serviceability of additively manufactured structures. Interestingly, even the emerging standards remain embedded within conventional, "analogue" construction norms and do not yet fully leverage the potential offered by the digitalization of structural design, such as automated control of the materials, manufacturing processes, and quality of the final product.

1 Wstęp

Druk 3D betonu (lub mieszanką betonową), jak potocznie nazywa się wytwarzanie przyrostowe elementów z kompozytów cementowych, jest stosunkowo nową i niszową metodą. Rozwija się ona jednak w niesamowitym tempie, z jednej strony poprzez badania nad procesami i materiałami, a z drugiej poprzez działania wdrożeniowe. Główną przeszkodą dla szerszego zastosowania tej metody produkcji w budownictwie wydaje się być brak stosownych rozwiązań normatywnych, co utrudnia komunikację i współpracę, oraz wydłuża czas i zwiększa koszt realizacji inwestycji. Dlatego w kilku krajach, w tym w Polsce, trwają obecnie intensywne działania które mają na celu stworzenie warunków dla szerokiego zastosowania druku 3D betonu w praktyce.

Ten artykuł przybliży tematykę druku betonu 3D ze szczególnym uwzględnieniem powstających rozwiązań normowych oraz standaryzacyjnych, a także przedstawia strategie wykorzystywane obecnie przy realizacji konstrukcji budowlanych wykorzystujących metody przyrostowe.

2 Klasyfikacje procesów wytwarzania

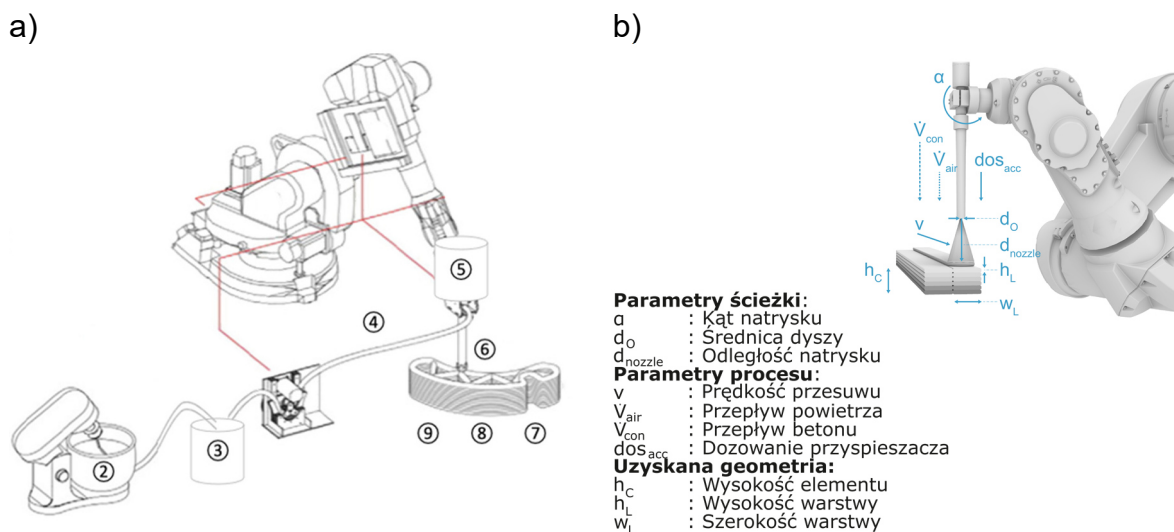
Wytwarzanie cyfrowe elementów betonowych (Digital Fabrication with Concrete, DFC) to bogata rodzina sterowanych cyfrowo procesów pozwalających na formowanie betonu [1]. Obejmuje ona wytwarzanie: 1) przyrostowe, tzw. druk 3D; 2) subtraktywne, głównie przy pomocy obróbki ubytkowej zarówno betonu świeżego jak i stwardniałego; oraz 3) formatywne, takie jak druk 3D szalunków czy slip-forming. W tym ujęciu druk betonu 3D, rozumiany jako przyrostowe wytwarzanie elementów betonowych, obejmuje trzy typy procesów: 1) metodę ekstruzji materiału (material extrusion), 2) metodę wiązania złoża cząstek (particle bed binding), i 3) metodę

natryskiwania materiału (material jetting). Ponadto wyróżnia się bardzo wiele procesów pozwalających na integrację zbrojenia.

2.1 Metoda ekstruzji

Metoda ekstruzji jest obecnie najszerzej stosowaną metodą druku 3D betonu. Polega na warstwowym nakładaniu kompozytu cementowego podawanego przez pompę poprzez dyszę drukującą. Pompa tłocząca może być zamontowana w głowicy wraz z dyszą lub zewnętrznie, podając mieszankę poprzez wąż. Wyróżnia się dwie metody: 1K oraz 2K, charakteryzowane przez odpowiednio jedno- lub dwukomponentową mieszankę (Rysunek 1 a)). W procesie druku 3D metodą ekstruzji kluczową rolę odgrywa dostosowanie parametrów reologicznych materiału [2], który zapewnia podstawę stabilności drukowanego elementu. Dlatego też większość wysiłku badawczego skierowane jest na badania materiałowe oraz cyfrową kontrolę właściwości materiałowych.

Metoda ekstruzji charakteryzuje się stosunkowo łatwym do kontrolowania procesem oraz względnie niskim kosztem – do badań materiałowych i druku w małej skali wystarczą stosunkowo proste urządzenia z tłokiem lub pompą ślimakową. Wyzwaniem jest jednak dobranie materiału, jego stabilność i zdolność do przenoszenia ciężaru kolejnych warstw, a także szczepność międzywarstwowa [3]. Elementy drukowane metodą ekstruzji charakteryzują się wysoce ortotropowymi właściwościami materiałowymi spowodowanymi ich warstwowością. W efekcie, ma to negatywny wpływ na ich trwałość [4].



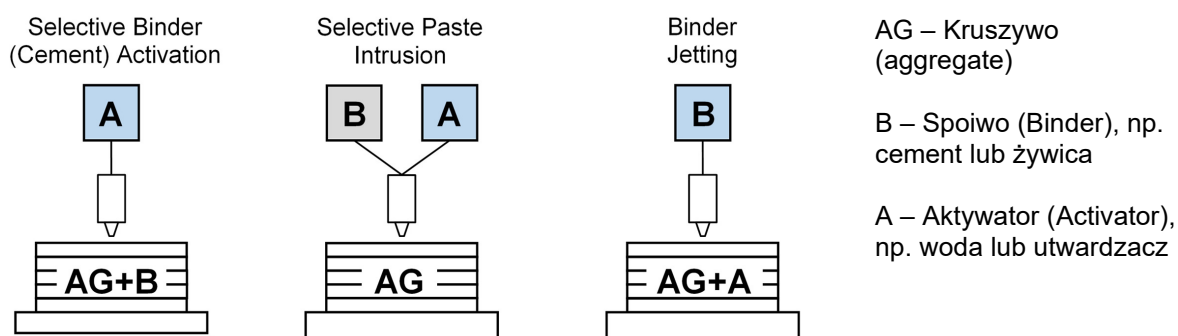
Rysunek 1. a) Schemat systemu wytwarzania przyrostowego metodą ekstruzji: 2. Przygotowanie kompozytu, 3. Tymczasowe przechowanie, 4. Transport mieszanki, 5. Dodanie domieszki przyspieszającej wiązanie (aktywatora) w przypadku systemu 2K, 6. Wytłaczanie przez dyszę; Na podstawie [2]; b) najważniejsze parametry procesu druku 3D betonem natryskowym

2.2 Metoda wiązania złoza cząstek

Metoda ta oparta jest na odpowiednim wiązaniu luźnych cząstek w kolejnych warstwach [5]. Luźne cząstki deponowane są warstwami, a następnie głowica dostarcza materiał w odpowiednich miejscach, pozwalający na wiązanie cząstek w odpowiednich strefach danej warstwy. Następnie kolejna warstwa luźnych cząstek jest deponowana i cały proces powtarzany aż do osiągnięcia końcowej objętości elementu. Po czasie pozwalającym na związanie spoiw, luźny materiał jest usuwany,

odslaniając gotowy element. Wyróżnia się trzy rodzaje procesów, jak schematycznie przedstawiono na Rysunek 2.

Metoda ta wyróżnia się bardzo wysoką rozdzielczością otrzymanego elementu oraz różnorodnym kształtem i rozmiarem otworów, które jednak muszą być połączone z powierzchniami zewnętrznymi, aby umożliwić usunięcie luźnego materiału. Ponadto właściwości mechaniczne stwardniałego materiału są zależne od penetracji aktywatora lub spoiwa w każdej warstwie, oraz pomiędzy warstwami. Rozmiary elementów ograniczone są kubaturą złoża cząstek, co bezpośrednio wiąże się z kosztem maszyn.



Rysunek 2. Schemat obrazujący trzy rodzaje procesu w metodzie wiązania złoża cząstek, odpowiednio od lewej 1) Selektowna aktywacja spoiwa (cementu), 2) Selektowna intruzja zaczynu, 3) Natryskiwanie spoiwa; na podstawie [5]

2.3 Metoda natryskiwania

Metoda ta oparta jest na technologii betonu natryskowego, tzw. shotcretu lub torkretu. Druk 3D betonu natryskowego (Shotcrete 3D Printing, SC3DP) umożliwiony jest poprzez cyfrową kontrolę procesu natryskiwania betonu, pozwalając na aktywną kontrolę geometrii uzyskiwanej w dynamicznym procesie wytwarzania [6]. Zwykle używa się tzw. metody mokrej natryskiwania betonu, tj. płynna mieszanka betonowa pompowana jest do dyszy, w której następuje jej przyspieszenie przy pomocy sprężonego powietrza. Pozwala ona na aplikację materiału liniami, warstwami oraz na powierzchniach pod każdym kątem. Dzięki skalowalnemu procesowi dostosowanemu do charakterystyki betonu, SC3DP pozwala na konstrukcję pełnowymiarowych elementów [7] przy użyciu spektrum materiałów [8], pozwalając na uzyskanie niemal anizotropowego materiału o właściwościach przewyższających te osiągnięte przez beton zwykły układany tradycyjnie o tej samej kompozycji [9].

2.4 Integracja zbrojenia

Jak każdy beton, także ten drukowany najczęściej współpracuje ze zbrojeniem. Beton zwykły tworzy wolumetryczną masę uwięzioną w szalunku, a zatem integracja zbrojenia następuje albo poprzez jego ułożenie przed ułożeniem betonu, albo po związaniu betonu i zdjęciu szalunku, np. poprzez sprężenie. Jednakże w przypadku betonu drukowanego szalunek nie jest potrzebny. Otwiera to nowe możliwości relacji zbrojenia, procesu wytwarzania i uzyskanej strukturalnej formy, otwierając przestrzeń nowych możliwości produkcji i projektowania. Dla ułatwienia dyskusji, zaproponowany został niedawno model ramowy współzależności zbrojenia, procesu i formy (Reinforcement – Process – Form Interaction framework) [10]. Pierwszą cechą charakterystyczną jest zależność procesu integracji zbrojenia względem procesu kształtowania betonu. Sklasyfikowano je następująco:

a) wprowadzenie zbrojenia jako składnika materiału (np. włókien); b) integracja synchroniczna z procesem aplikacji betonu – odpowiednio: w obrębie warstwy, pomiędzy warstwami lub przez kolejne warstwy, przy zastosowaniu mechanizmu otulenia bądź przebicia; c) umieszczenie zbrojenia przed uformowaniem betonu, przy czym może ono pełnić lub nie pełnić funkcji podparcia; oraz d) dodanie zbrojenia po uformowaniu elementu – odpowiednio: przed lub po stwardnieniu betonu, na jego powierzchni, wewnątrz materiału bądź w charakterze elementu montażowego.

Drugą cechą charakterystyczną jest zależność zbrojenia i uzyskanej formy konstrukcyjnej, gdzie odpowiednio beton lub zbrojenie może być materiałem kształtującym formę. Zbrojenie może być rozproszone, ułożone zgodnie z warstwami lub na wskroś, czy też niezależnie od warstw betonu, tworząc odpowiednio, liniową, płaską, lub przestrzenną geometrię zbrojenia w gotowym elemencie.

Naturalnie, wszelkie procesy hybrydowe także są możliwe, dodając do swobody formy elementów. Skutkuje to potrzebą dopasowania procesu i materiału do formy, którą projektant chce uzyskać. Ta różnorodność procesów sprawia, że wysiłki normatywne są niezwykle trudne, a normy albo są zbyt ogólne, albo możliwe do zastosowania tylko dla wąskiej grupy materiałów i procesów.

3 Praktyka

Pomimo iż druk betonu jest technologią relatywnie nową, istnieją już przykłady jego zastosowania. W praktyce wykorzystuje się głównie cztery strategie walidacji konstrukcji drukowanych w 3D dla uzyskania pozwolenia na budowę i użytkowanie: 1) zastosowanie betonu 3D dla elementów niekonstrukcyjnych, 2) walidacja przy pomocy istniejących norm, 3) walidacja przy pomocy prototypów, oraz 4) stosowanie norm skrojonych dla betonu w druku 3D [11]. Trzy pierwsze strategie pokrótce omówione są poniżej na wybranych przykładach, podczas gdy normy dla betonu 3D omówione są w następnej sekcji.

3.1 Beton 3D jako element niekonstrukcyjny

Jest to chyba najprostsza ścieżka walidacji konstrukcji zawierającej elementy betonowe produkowane w technologii druku 3D. Elementy te sprawują zwykle funkcję ściany nienośnej lub szalunku traconego dla tradycyjnego żelbetu.

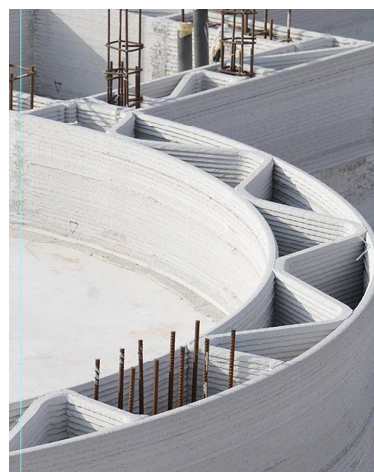
W ten sposób zalegalizowany został pierwszy obiekt wydrukowany w Polsce, budynek techniczny w Wyszku wybudowany przez firmę REbuild. Jego ściany zostały wydrukowane na miejscu przy użyciu wielkoskalowej autorskiej ramy portalowej oraz głowicy, w technologii ekstruzji. Po osiągnięciu pełnej wysokości ścian tj. około 3 m, w pozostawionych pustkach zainstalowana została prefabrykowana konstrukcja stalowa złożona ze słupów oraz konstrukcji dachu, formalnie stanowiąca konstrukcję nośną.

Podobna filozofia przyświecała konstrukcji większości istniejących obiektów na całym świecie wykonanych w technologii ekstruzji, gdzie dzięki odpowiedniemu zaplanowaniu ścieżki druku pozostawione są zamknięte pionowe kieszenie. Po ukończeniu druku ścian, w kieszenie te wsuwane jest tradycyjne zbrojenie oraz układany jest beton zwykły. W ten sposób uzyskiwana jest wewnętrzna słupowa żelbetowa konstrukcja nośna, na podstawie projektu której uzyskiwane są pozwolenia na budowę i użytkowanie pod względem bezpieczeństwa konstrukcji. Przykładem takiego rozwiązania jest dwupiętrowy budynek w Dubaju o powierzchni 640 m² i wysokości 9.5 m (Rysunek 4), który w momencie ukończenia w 2019 był

największą budowlą powstałą w technologii druku 3D. Na przygotowanej płycie żelbetowej wydrukowany został obrys ścian, pozostawiając pionowe przestrzenie na żelbetowe słupy wylewane na miejscu. Po ukończeniu danego piętra wykonywane były żelbetowe wieńce, na których opierano prefabrykowane żelbetowe stropy. W ten sposób utworzono tradycyjną konstrukcję nośną w „wydrukowanym” budynku.



Rysunek 3. Pierwszy obiekt budowlany wykonany w technologii druku betonu 3D w Polsce, w trakcie wytwarzania in-situ (po lewej) oraz po ukończeniu (po prawej), © Rebuild sp. z o.o.



Rysunek 4. Dwupiętrowy budynek biurowy w Dubaju wydrukowany przez Apis Cor w 2019; z lewej widoczne kosze zbrojeniowe kolumn wsunięte w kieszenie i gotowe do zalania betonem; © Apis Cor

3.2 Na podstawie istniejących norm

Część projektantów wykorzystuje podobieństwa betonu drukowanego do tradycyjnych materiałów budowlanych, posilając się tradycyjnymi normami materiałowymi i budowlanymi.

Na przykład firma Mobbob w latach 2021/22 na podstawie badań wytrzymałościowych oraz parametrów trwałości oznaczonych na próbkach pobranych z gotowych elementów, uzyskała atest zgodności z normami dla odpowiednich klas betonu, zależnych od kompozycji materiału [8]. Na tej podstawie przy realizacjach używano norm Europejskich (Eurokodów) do projektowania konstrukcji.

Podobna strategia została przyjęta przez projektantów pierwszego domu w Niemczech wydrukowanego w 2020 roku metodą ekstruzji [12]. Aby uzyskać indywidualne pozwolenie na budowę, przeprowadzono badania ścian. Na poziomie materiałowym zostało wykorzystane podobieństwo do betonu (EC2 i normy

towarzyszące), zaś na poziomie konstrukcyjnym podobieństwo do elementów murowanych (EC6). Dom w Beckum wykorzystał metodę zespoloną, gdzie drukowane ściany nośne wypełnione są częściowo klasycznym betonem, pozwalając na optymalizację kosztów materiału. Oba materiały współpracują, przenosząc część obciążeń; ponadto materiał drukowany służy jako otulina niezbędna dla zapewnienia trwałości. Dlatego oba materiały, drukowany i układany, zostały przetestowane w stanie świeżym (rozpływ, czas początku i końca wiązania) oraz stwardniałym (wytrzymałość na ściskanie i zginanie, moduł sprężystości, szczepność między warstwami, odporność na cykle zamrażania i odmrażania, testy pull-out i push-out kotew). Na poziomie elementów pełnowymiarowych przetestowano stabilność drukowanego konturu ściany pod ciśnieniem hydrostatycznym układanego betonu, a także wytrzymałość zespolonego elementu na ściskanie, zginanie oraz udarność.

3.3 Na podstawie prototypu

Kolejną ścieżką walidacji konstrukcji, zapewniającą dużą swobodę działania jednak wiążącą się ze zwiększonymi nakładami czasowymi i finansowymi [12], jest ta na podstawie prototypu.

Interesującym przykładem jest 29 metrowy, pięcioprzęsłowy most w Nijmegen (Holandia) [13]. Do celów badań pełnoskalowych zidentyfikowano dwa kluczowe, powtarzalne elementy: przęsło i podporę. Ponadto wykonano zestaw badań na próbkach materiałowych pobranych z drukowanych elementów. Podczas druku kontrolowano także geometrię warstw oraz całych elementów.

Wybrany element przęsłowy o długości i szerokości około 6.5 m na 3.5 m składał się z sześciu elementów wykonanych jedynie w druku 3D, oraz dwóch bloków kotwiących wykonanych w druku 3D i wypełnionych żelbetem. Dodatkowo wypełnienie żelbetem pozwoliło na transfer naprężeń z części przęsłowej do podpory. Elementy połączono poprzez sprzężenie. Wykonano dwa identyczne prototypy przęseł, a następnie przetestowano w teście czteropunktowego zginania o dwóch różnych odstępach pomiędzy punktami przyłożenia sił wyznaczając odpowiedni balans pomiędzy zginaniem i ścinaniem. Wyniki wykazały dobrą zgodność z modelami numerycznymi (FEM), oraz bardzo duży zapas nośności sięgający trzykrotności stanu granicznego (SGN).

Po pozytywnej weryfikacji przystąpiono do produkcji docelowych elementów oraz instalacji na budowie, po czym wykonano obciążenia próbne. W związku z dużym zapasem nośności, most obciążono do stanu granicznego nośności, przy którym konstrukcja pozostała w zakresie odkształcenia sprężystego i nie zidentyfikowano żadnych uszkodzeń. Po tej próbie wydano pozwolenie na użytkowanie.

Jak widać na tym przykładzie, metoda walidacji na podstawie prototypu wiąże się z wysokimi kosztami. W tym przypadku nie tylko należało wyprodukować siedem przęseł zamiast docelowych pięciu, ale też cały most jest około trzykrotnie przeprojektowany biorąc pod uwagę wymagany stan graniczny nośności. Dlatego też rozwiązania normowe są niezwykle wyczekiwane przez środowisko.

4 Normy

Poniżej pokrótce opisane są najważniejsze normy i standardy dotyczące druku betonu 3D. Co istotne, większość z nich opracowana jest pod kątem dostosowania do procesu ekstruzji, który jest znacznie bardziej popularny od procesów natryskiwania materiału oraz wiązania złoza cząstek.

4.1 ISO/ASTM 52939

Celem normy PN-EN ISO/ASTM 52939 „Wytwarzanie przyrostowe w budownictwie — Zasady kwalifikacji — Elementy konstrukcyjne i infrastrukturalne”, która w roku 2024 uzyskała status normy polskiej, jest wprowadzenie jednolitego słownictwa oraz ustrukturyzowanie proces projektowania i konstrukcji obiektów wykonanych w druku 3D jak zaprezentowano na Rysunek 5. Jest to norma jakościowa, która wspomaga proces konstrukcji przyrostowej wykorzystującej dowolny typ procesu.

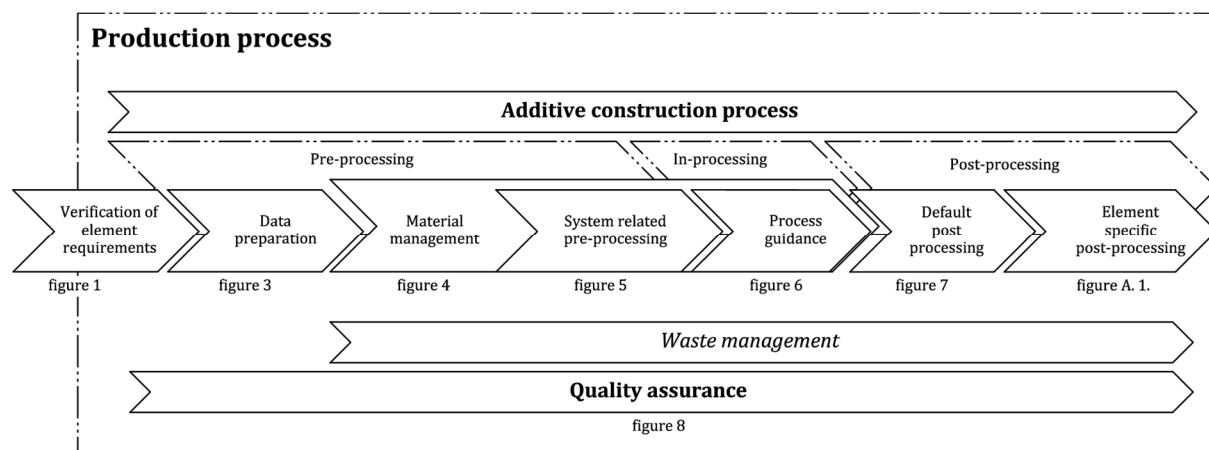
Zgodnie z normą, proces konstrukcji przyrostowej poprzedzony jest weryfikacją wymagań produkowanego elementu odnośnie możliwości wytworzenia, uzyskanej dokładności i wymiarów, a także spodziewanych właściwości materiałowych.

Po pozytywnej weryfikacji, rozpoczyna się właściwy proces wytwarzania. Odbyna się to w sześciu krokach: 1) Przygotowanie danych wejściowych oraz symulacja procesu wydruku w środowisku wirtualnym, a jeśli to konieczne produkcja małoskalowych prototypów; 2) Zarządzanie materiałem ze szczególnym naciskiem na fakt, że jakość i właściwości materiału wbudowanego zależne są zarówno od materiału dostarczonego, jak i od procesowania materiału; 3) Przygotowanie właściwe dla systemu, obejmujące zarówno przygotowanie i inspekcję systemu, jak i próbę wydruku „na sucho” celem weryfikacji danych, kolizji, itp. 4) Prowadzenie procesu, czyli produkcję, kontrolę jakości, oraz rejestrowanie parametrów procesu; 5) Domyślne zabiegi po procesie, czyli np. archiwizacja danych czy przygotowanie systemu do następnego etapu produkcji; oraz 6) Zabiegi po procesie właściwe dla elementu, np. instalacja elementów czy pakowanie.

Ponadto, norma opisuje wybrane metody zarządzania jakością produkcji i gotowego elementu, czy wymaganą dokumentację na każdym etapie. Schemat działania opisany w normie wskazuje, że proces musi być dynamiczny i interdyscyplinarny.

Chociaż został podzielony na poszczególne kroki, jasnym jest, że kontrola projektu, proces wytwarzania, właściwości materiału i wszystkie inne kroki są ze sobą ściśle powiązane i prowadzą do wielu iteracji lub negocjacji w czasie rzeczywistym.

Ciekawym jest, że przygotowanie ścieżki wydruku pojawia się dopiero jako pierwszy krok procesu budowlanego, podczas gdy doświadczenia wskazują, że ważnym jest, aby ograniczenia produkcyjne i sam proces wytwarzania były brane pod uwagę już na etapie projektowania. Norma ta wyraźnie pokazuje, że proces konstrukcji metodą przyrostową będzie wymagał znacznie bliższej współpracy branż, i przeddefiniuje proces budowlany i wynikającą z niego strukturę całego sektora budowlanego.



Rysunek 5. Kontrola jakości procesu konstrukcji przyrostowej wg. ISO/ASTM 52939.

Harcourt Technologies Ltd (HTL.tech), firma aktywnie zaangażowana w rozwój technologii druku 3D w budownictwie w Irlandii i Wielkiej Brytanii, osiągnęła kamień milowy jakim jest pierwsza w Europie realizacja zgodna z normą ISO/ASTM 52939:2023 [14]. Korzystając z drukarki BOD2 3D firmy COBOD, firma ta pokazała w jaki sposób druk 3D w budownictwie może sprostać wymaganiom mieszkaniowym, jednocześnie przestrzegając rygorystycznych norm bezpieczeństwa i wydajności.

4.2 ICC-ES AC509 oraz ICC 1150

Jednym z dokumentów które znacznie przyspieszyły proces walidacji elementów, zwłaszcza w Ameryce Północnej oraz na Bliskim Wschodzie, są Kryteria Akceptacji dla zautomatyzowanej technologii budownictwa 3D w zakresie betonowych ścian 3D (ICC-ES AC509 Acceptance Criteria for 3D automated construction technology for 3D concrete walls) wydane przez International Code Council. Dotyczą one dopuszczenia określonego procesu wytwarzania wraz z określonym materiałem oraz finalną formą produkowanego elementu, ale ogranicza się jedynie do pionowych ścian. Dokument ten określa podstawowe badania i warunki które muszą być spełnione, a także definiuje zawartość i strukturę raportu, który stanowi swoisty certyfikat zgodności. Jest on osadzony w normach International Building Code (IBC) oraz International Residential Code (IRC) i bazuje na pkt. 104.11 IBC stwierdzającym: „(standard ten) nie ma na celu uniemożliwienie stosowania jakichkolwiek materiałów ani zakazania jakiegokolwiek projektu lub metody budowy (...) jeżeli urzędnik nadzoru budowlanego uzna, że proponowane rozwiązanie jest satysfakcjonujące i zgodne z intencją przepisów”. Taką podstawę zapewnia AC509. Dokument został opublikowany w 2019 roku i od tego czasu wielokrotnie modyfikowany, głównie celem zwiększenia jego zakresu odnośnie możliwych rozwiązań konstrukcyjnych. Zasadniczo jednak ogranicza się do ścian z betonowym rdzeniem wylewanym pomiędzy drukowanymi powierzchniami zewnętrznymi, tworząc układ warstwowy tzw. sandwich. W takim ujęciu elementy zewnętrzne wykonane w procesie ekstruzji są traktowane głównie jako warstwa osłonowa z betonu zapewniająca trwałość i częściowe przenoszenie obciążeń.

Co ciekawe, certyfikaty wydane na podstawie AC509 są niezwykle wąskie w swym zakresie. Odnoszą się one do konkretnego modelu maszyny (drukarki), mieszanki materiałowej, ale też konfiguracji ściany wyrażonej poprzez jej grubość, geometrię warstw, układ zbrojenia czy opóźnienia pomiędzy deponowaniem kolejnych warstw. Zmiana każdego z tych parametrów wymaga wydania kolejnego świadectwa akceptacji na podstawie osobnych badań zarówno w skali materiałowej, jak i elementu. Demonstruje to znowu niezwykle powiązanie materiału, procesu i formy konstrukcyjnej w wytwarzaniu przyrostowym.

Dokument ten odzwierciedla postęp wiedzy i praktyki w zakresie druku betonu 3D. Podczas gdy w pierwszej wersji ograniczono się do konstrukcji parterowych, obecnie dopuszcza się zastosowanie w konstrukcjach wielopiętrowych. Co więcej, pierwszej wersji przyjęto arbitralny współczynnik bezpieczeństwa w zakresie nośności elementu wyrażonej jako siła przyłożona na danej długości ściany równy 3, bez jakiegokolwiek analizy naprężeń. Nowsze edycje wprowadziły już możliwość stosowania częściowych współczynników bezpieczeństwa, czy dopuściły uwzględnienie zmniejszonego współczynnika zmienności właściwości materiału na podstawie badań. Jednakże AC509 wciąż nie pozwala na uwzględnienie np. zwiększonej precyzji geometrii elementów produkowanych w procesie

kontrolowanym cyfrowo celem dalszego zmniejszenia współczynnika bezpieczeństwa. A zatem, poniekąd, filozofia kryteriów oparta jest na badaniu prototypu ściany, który później może być wielokrotnie powtarzany w wielu budynkach. Szczegółowe informacje znaleźć można w pracy Sikora i inni [15]. W związku ze złożonością procesu kryteriów akceptacji, w lipcu 2023 r. powołano zespół mający na celu opracowanie normy ICC 1150 umożliwiające wypracowanie konsensu i wprowadzenie normy łączącej założenie ICC-ES AC509 oraz UFC-3-301-01, które omówione zostaną w kolejnej sekcji. Obecne normy znajdują się w drugiej turze recenzji i jej publikacja planowana jest na koniec roku 2025.

4.3 UFC 3-301-01

W ramach Unified Facilities Criteria (UFC, Zunifikowane Kryteria Obiektowe), będących zestawem wytycznych stosowanych przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych przy projektowaniu, eksploatacji i utrzymaniu infrastruktury wojskowej i rządowej, dopuszczono stosowanie druku 3D do budowy ścian nośnych. Warunki te są w większości analogiczne do AC509, opierają się na podejściu warstwowym (sandwich method) i bazują na zestawie tych samych metod laboratoryjnych. Jednakże, w przeciwieństwie do AC509, wytyczne te dopuszczają tworzenie sieciowatej struktury wytworzonej przez druk betonu 3D (filament webbing) jako wypełnienia ściany, zamiast wymaganego pierwotnie przez AC509 rdzenia z wylewanego betonu [16]. Wytyczne przedstawiły kilka możliwości geometrii tej sieciowatej struktury. Zwiększa to znacznie możliwość dostosowania formy elementu, a co za tym idzie zużycia materiału, w zależności od obciążeń. Co ważne, obecnie rozwiązanie to może być obecnie akceptowane również dla ścian nośnych zgodnie z AC509, ponieważ w zakresie zastosowania dodano sformułowanie „lecz nie ograniczając się do” (*but not limited to*) ścian z dwiema drukowanymi zewnętrznymi powłokami wypełnionymi betonem wylewanym by stworzyć monolityczną ścianę. Otworzyło to możliwość zatwierdzania również alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych.

4.4 CROW-CUR 5:2023

Holenderskie centrum regulacji i badań w dziedzinie inżynierii lądowej, wodnej i transportu CROW zainicjowało powstanie dokumentu podsumowującego dotychczasowe lokalne doświadczenia z drukiem 3D betonu. Wytyczne, powstałe przy współpracy badaczy, projektantów, wykonawców i innych osób i jednostek biorących udział w rozwoju i implementacji tej technologii w Holandii. W efekcie w przystępny sposób przedstawiają podstawową wiedzę i doświadczenia w szerokim zakresie: od zarysu konstrukcji drukarek, poprzez podstawowe informacje dotyczące materiału w stanie świeżym i stwardniałym, zbrojenia, badań, aż po próby obciążeniowe i analizę śladu węglowego. Dokument ten, pomyślany jako żyjący i zmieniający się wraz z rozwojem kompendium wiedzy, służy jako krótkie wprowadzenie dla wszystkich członków procesu budowlanego, i nie jest normą lub wiążącymi wytycznymi.

W związku z ograniczeniem do doświadczeń Holenderskich, które są mimo wszystko jednymi z pionierskich zwłaszcza w dziedzinie budownictwa mostowego, dokument ten omawia jedynie proces ekstruzji betonu, oraz wybrane metody integracji zbrojenia.

4.5 . Obecny stan prac normalizacyjnych w Stanach Zjednoczonych

Stany Zjednoczone wiodą prym w działaniach związanych ze standaryzacją aspektów związanych z technologią wytwarzania przyrostowego poprzez silną interakcję i współpracę wielu organów. Ze względu na aktywny rozwój opracowywanych aktów zdecydowano się w tej sekcji stosować oryginalne nazwy dokumentów, co może umożliwić czytelnikom śledzenie aktualnych postępów prac. Z inicjatywy Narodowego Instytutu Standaryzacji i Technologii (NIST), w roku 2023 powołane do życia zostało „Additive Construction by Extrusion (ACE) Consortium”. Powstało ono we współpracy z Centrum Badawczo-Rozwojowym Inżynierii Armii Stanów Zjednoczonych (ERDC) aby umożliwić współpracę w celu zidentyfikowania i rozwiązania luk w obecnych normach dotyczących materiałów, metod, optymalizacji procesów i projektowania, a finalnie zaproponowanie nowych norm.

Jednocześnie Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów (ASTM) powołało do życia „Additive Manufacturing Center of Excellence (AM CoE)” łączące przedstawicieli rządu, nauki i przemysłu, mające na celu prowadzenie strategicznych prac badawczo-rozwojowych wspierających proces standaryzacji we wszystkich aspektach wytwarzania przyrostowego. Natomiast ramach samego ASTM komitet F42 odpowiedzialny jest za wszelkie aspekty wytwarzania przyrostowego. Istotnym dokumentem będącym rezultatem prac AM CoE jest Mapa Drogowa [17] zawierająca szereg informacji związanych z aktualnym stanem technologii, planem prac, zdefiniowaniem potrzeb a także oceny wyzwań i kierunków rozwoju konsorcjum.

Materiał ten stanowić może cenną podstawę i inspirację do prac na krajowym odpowiednikiem mapy drogowej rozwoju technologii przyrostowej w Polsce.

W ramach prac podkomitetu ASTM F42.07.07 (Construction)) opracowywane są obecnie 4 normy typowo związane z aspektami materiałowymi: 1) WK90347 Additive Manufacturing - Curing and Extraction of Sample from Additively Constructed Concrete and Mortar Components; 2) WK89706 Additive Manufacturing - Fresh and Very Early Age properties of concretes used for Additively Constructed Concrete by Means of Extrusion; 3) WK89707 Additive Manufacturing - Construction and Documentation of Additively Constructed Concrete and Mortar Components; 4) WK90348 Additive Manufacturing- Determination of Hardened Mechanical Properties of Additively Constructed Concrete and Mortar.

Natomiast w ramach komitetu F42.07 wspólnie z ISO realizowane są zadania związane z opracowaniem dwóch norm: 1) WK81114 - New Practice for Additive Manufacturing - General Principles - Design Process of Additively Manufactured Building Elements, oraz 2) WK84415 - New Practice for - Additive Construction – General Principles – Standard Practice for the Evaluation of Structural Printed Elements. Ponadto, realizowane są prace nad aktualizacją wydanej i omówionej powyżej normy ISO/ASTM 52962.

Aktywną działalność normalizacyjną podejmuje także komitet Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI) nr 564 - 3-D Printing with Cementitious Materials, w ramach którego powołanych zostało 5 podkomitetów: 1) 564-0A Emerging Technology Report; 2) 564-0B Structural Design and Testing; 3) 564-0C Material Testing and Formulation; 4) 564-0D Modeling and Performance Prediction; oraz 5) 564-0E Codes and Standard Review.

4.6 Obecny stan prac normalizacyjnych w Chinach

Już w roku 2020 wydana została przez Chińskie Stowarzyszenie Standaryzacji Inżynierii i Budownictwa (CECS) pierwsza norma krajowa (T/CECS 786-2020) poświęcona procesowi projektowania mieszanek betonowych stosowanych w technologii 3D. Znaleźć można w niej wymagania oraz rekomendacje dotyczące składów mieszanek, zawartości dodatków mineralnych, wymaganej konsystencji oraz minimalnych wymagań mechanicznych. Istotną rolę odgrywają w normie wymagania związane z wytrzymałością mechaniczną, a w szczególności minimalne wymagania dotyczące szczepności międzywarstwowej. Ze względu na gwałtowny rozwój technologii druku 3D i znaczącego poszerzenia stanu wiedzy i rozwoju technologii niektóre aspekty, w szczególności związane z metodyką projektowania mieszanek, wydają się być częściowo zdezaktualizowane.

W efekcie, w roku 2022 Chińska Federacja Materiałów Budowlanych (CBMF) wydała dwie normy poświęcone metodom badań świeżego oraz stwardniałego betonu. Znacząco rozbudowują one metody badawcze przedstawione w normie z roku 2020. W obydwu przypadkach normy nie określają minimalnych wymagań stawianych elementom, lecz opisują techniki badawcze w oparciu, o które należy wykonać badania celem raportowania rezultatów badań. Norma T/CBMF 184-2022 zawiera metodyki badawcze pozwalające na określenie wybranych parametrów mieszanek tj.: 1) stabilność geometryczna drukowanych elementów, 2) konsystencja i urabialność mieszanki, 3) czas wiązania i czas odpowiedniej urabialności (przydatności mieszanki, 4) wytrzymałość na ściskanie niestwardniałej mieszanki oraz moduł odkształcalności podłużnej oraz 5) oznaczenie parametrów związanych z wytłaczalnością i drukowalnością materiału. Szczegółowe informacje nt. zakresu normy i metod badawczych znaleźć można w pracy Sikora i inni [18].

W przypadku normy T/CBMF 183-2022 określone zostały metody badawcze związane z odpowiednią preparatyką próbek badawczych (w tym: minimalne wymiary próbek, sposób preparatyki próbek w zależności od kierunku badania, kondycjonowanie próbek) oraz oznaczeniem parametrów mechanicznych. Istotnym wnioskiem płynącym z normy jest fakt, że badania na próbkach drukowanych (wycinanych z większego wydrukowanego elementu) wykonuje się tylko na kierunku, zgodnie z projektowanym rozkładem naprężeń w konstrukcji.

Według informacji dostępnych w doniesieniach medialnych w ramach prac CECS, CCPA lub Ministerstwa Przemysłu i Technologii Informacyjnych opracowywanych jest ok. 20 norm związanych ze standaryzacją mieszanek, opracowaniu metod badawczych (np. pomiaru skurczu lub mrozoodporności), projektowaniem konstrukcji (np. prefabrykowanych lub technologii szalunków traconych), projektowaniem konstrukcji oporowych, obiektów mostowych oraz elementów architektonicznych. Wydaje się rozsądnym, aby śledzić poczynania normalizacyjne na rynku chińskim, które ze względu na barierę językową wydają się być marginalizowane. Doniesienia medialne wskazują na znakomitą ilość firm oraz obiektów realizowanych w tej technologii. Przykładem może być realizacja wielokondygnacyjnego budynku w którym zastosowano beton wykonany w technologii ekstruzji zawierający kruszywo recyklingowe jako m.in. szalunek tracony [19].

5 Dyskusja i wnioski

Jak widać na przedstawionych przykładach, prace normalizacyjne i wdrożeniowe dotyczące metod przyrostowych w budownictwie betonowym nabrały znacznego przyspieszenia w ostatnich latach. Obrazuje to doskonale jak szerokie jest zainteresowanie rynku nowymi technologiami. Działania te skupione są jednak w większości na metodzie ekstruzji.

Ponadto istnienie ogólnie pojęty brak koncepcji w jaki sposób wykorzystać cyfrowość metod przyrostowych. Jak pokazują badania, możliwa jest obecnie kontrola i rejestracja parametrów wytwarzania elementów [6], [20], co w przyszłości pozwoli na zastosowanie metod niezawodności przy projektowaniu i weryfikacji konstrukcji w miejsce deterministycznych i często arbitralnych współczynników bezpieczeństwa. Dziś jednak wszystkie normy osadzone są w technologii analogowej i ich filozofia nie różni się znacznie od tej znanej z klasycznego budownictwa.

Można się jednak spodziewać, że wraz z rozwojem badań oraz poprzez działalność wdrożeniową metody druku betonu 3D doprowadzą do zmiany paradygmatów projektowania [21], co wymusi również zmiany w jaki działa cały sektor budownictwa, demonstrując potrzebę aktywności mających na celu intensyfikację świata nauki i biznesu.

6 Literatura

- [1] R. A. Buswell *et al.*, 'A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete', *Cem. Concr. Res.*, vol. 134, p. 106068, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106068.
- [2] T. Wangler, R. Pileggi, S. Gürel, and R. J. Flatt, 'A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup', *Cem. Concr. Res.*, vol. 155, p. 106782, May 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106782.
- [3] S. Skibicki *et al.*, 'The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements', *J. Build. Eng.*, vol. 87, p. 109093, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109093.
- [4] P. Sikora *et al.*, 'Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens', *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01320, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01320.
- [5] D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, and B. Dillenburger, 'Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges', *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, pp. 50–65, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
- [6] L. Lachmayer *et al.*, 'A Spatial Multi-layer Control Concept for Strand Geometry Control in Robot-Based Additive Manufacturing Processes', in *Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, and F. Herding, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 119–126. doi: 10.1007/978-3-031-70031-6_14.
- [7] N. Hack and H. Kloft, 'Shotcrete 3D Printing Technology for the Fabrication of Slender Fully Reinforced Freeform Concrete Elements with High Surface Quality: A Real-Scale Demonstrator', in *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, F. P. Bos, S. S. Lucas, R. J. M. Wolfs, and T. A. M. Salet, Eds., in RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1128–1137. doi: 10.1007/978-3-030-49916-7_107.

- [8] A. Favier and A. Petit, 'Strategies for Reducing the Environmental Footprint of Additive Manufacturing via Sprayed Concrete', in *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, R. Buswell, A. Blanco, S. Cavalaro, and P. Kinnell, Eds., in RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 105–110. doi: 10.1007/978-3-031-06116-5_16.
- [9] H. Kloft *et al.*, 'Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP)', *Cem. Concr. Res.*, vol. 134, p. 106078, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106078.
- [10] H. Kloft *et al.*, 'Interaction of reinforcement, process, and form in Digital Fabrication with Concrete', *Cem. Concr. Res.*, vol. 186, p. 107640, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107640.
- [11] F. P. Bos *et al.*, 'The realities of additively manufactured concrete structures in practice', *Cem. Concr. Res.*, vol. 156, p. 106746, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106746.
- [12] V. Mechtcherine *et al.*, 'Additive Fertigung mit Beton – Leitfaden für die Planung und die Durchführung von Projekten', *Beton- Stahlbetonbau*, vol. 119, no. 4, pp. 290–310, 2024, doi: 10.1002/best.202400005.
- [13] Z. Ahmed, R. Wolfs, F. Bos, and T. Salet, 'A Framework for Large-Scale Structural Applications of 3D Printed Concrete: the Case of a 29 m Bridge in the Netherlands', *Open Conf. Proc.*, vol. 1, pp. 5–19, Feb. 2022, doi: 10.52825/ocp.v1i.74.
- [14] Qualified AM GmbH, 'Certificate of conformity no. 20241015'. Oct. 15, 2024. Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: https://static1.squarespace.com/static/615e077e74d72b4d244bbd2c/t/67915647403a424a44212381/1737578056598/Copy+of+QualifiedAM_AC-CERTIFICATE_HTML.pdf
- [15] P. Sikora *et al.*, 'Pierwszy krok w kierunku normalizacji konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D', *Przegląd Bud.*, vol. R. 95, nr 5, 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.7216.
- [16] M. Kreiger *et al.*, 'Additive construction in practice – Realities of acceptance criteria', *Cem. Concr. Res.*, vol. 186, p. 107652, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107652.
- [17] S. Mansour and M. Seifi, 'Advanced Technologies for Digitalization of Construction Industry Roadmap', ASTM International, Oct. 2023. doi: 10.1520/amcoe-roadmap-construction.
- [18] P. Sikora, S. Skibicki, and G. Lin, 'Metody badania mieszanek betonowych stosowanych w technologii druku 3D w świetle chińskich norm', *Inż. Budownictwa*, vol. 7/8, no. (W trakcie procesu wydawniczego), 2025.
- [19] H. Zhang *et al.*, 'Comparative eco-efficiency assessment of 3D-printed recycled aggregate concrete structure for mid-rise residential buildings', *J. Build. Eng.*, vol. 95, p. 110349, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.110349.
- [20] R. Wolfs *et al.*, 'On-line and in-line quality assessment across all scale levels of 3D concrete printing', *Cem. Concr. Res.*, vol. 185, p. 107646, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107646.
- [21] R. Dörrie *et al.*, 'From Digital to Real: Optimised and Functionally Integrated Shotcrete 3D Printing Elements for Multi-Storey Structures', *Buildings*, vol. 15, no. 9, p. 1461, Jan. 2025, doi: 10.3390/buildings15091461.