

Metody badania mieszanek betonowych stosowanych w technologii druku 3D w świetle chińskich norm

Barierę dla rozwoju technologii druku 3D betonem stanowi w Polsce brak odpowiednich przepisów prawnych, norm i wytycznych. Chcąc zmienić ten stan rzeczy, warto sięgnąć po doświadczenia Chin. To światowy lider standaryzacji procesów i metod związanych z badaniem mieszanek wykorzystywanych w technologii druku 3D.



**dr hab. inż.
Paweł Sikora, prof. ZUT**

Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie
Polskie Stowarzyszenie Druku
3D w Budownictwie (PL-3DPC)



dr inż. Szymon Skibicki

Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie
Polskie Stowarzyszenie
Druku 3D w Budownictwie
(PL-3DPC)



prof. dr Guan Lin

Southeastern University
of Science and Technology,
Shenzhen, Chiny

Technologia druku 3D betonem, mimo że obiecuje rewolucję w budownictwie, nie osiągnęła jeszcze w Polsce poziomu standaryzacji, który pozwalałby na wykonywanie obiektów w tej technologii. W naszym kraju nie istnieją jasne uwarunkowania prawne – przede wszystkim ze względu na ograniczenia związane z użyciem nowego rodzaju betonu stosowanego do druku 3D – umożliwiające tworzenie konstrukcji z tego materiału. Aby mógł u nas powstać pierwszy na świecie zbiornik na wodę wydrukowany w technologii 3D, wykorzystano m.in. procedurę dopuszczenia do jednostkowego zastosowania materiału budow-

lanego [1]. Brakuje także jednolitych europejskich lub krajowych norm i wytycznych, które regulowałyby procesy związane z metodyką badania mieszanek i stwardniałego betonu oraz projektowaniem obiektów. Stanowi to istotną przeszkodę dla wdrożenia tej technologii na masową skalę. Kraje członkowskie UE dopiero podjęły działania, których efektem ma być opracowanie odpowiednich regulacji [2]. Dla porównania, w Stanach Zjednoczonych już od kilku lat są dostępne tzw. kryteria akceptacji ICC-ES AC509 [3], przygotowane przez Międzynarodową Radę Przepisów (International Code Council),

które umożliwiają wytwarzanie ścian betonowych w technologii druku 3D [4]. A w 2025 r. ma zostać wprowadzona pełnoprawna norma będąca znaczącym rozwinięciem wspomnianych kryteriów akceptacji. Równocześnie komitet F42 ASTM podjął działania, których celem jest opracowanie serii norm badawczych poświęconych oznaczaniu właściwości świeżego i stwardniałego betonu wykorzystywanego w technologii druku.

Na obecnym etapie mieszanki stosowane w technologii druku 3D, ze względu na swoją specyfikę, nie spełniają wymagań podstawowych norm odnoszących się do produkcji betonów zwykłych [5].

Są to m.in.:

- PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność [6];
- PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku [7];
- PN-EN 197-5:2021-07 Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI [8].

Komitet doradczy CEN/TC 104/SC 1 zaproponował niedawno, by wprowadzić dodatkowe wymagania dotyczące specyfikacji i zgodności betonu wykonywanego w technologii przyrostowej. W efekcie rozpoczęły się prace nad załącznikiem do normy EN 206 [6]. Warto wspomnieć, że w 2024 r. norma ISO/ASTM 52939 [9] uzyskała status normy polskiej (PN-EN ISO/ASTM 52939:2024-06 Wytwarzanie przyrostowe w budownictwie – Zasady kwalifikacji – Elementy konstrukcyjne i infrastrukturalne [10]). Jednak wciąż jest dostępna tylko w języku angielskim. To o tyle znamienne, że właśnie ona zawiera komplet podstawowych definicji, które umożliwiłyby wprowadzenie odpowiedniej nomenklatury w języku polskim.

Technologia druku 3D betonem rozwija się dynamicznie w różnych krajach świata. Jednym z liderów, którzy wiodą prym w standaryzacji, są Chiny. To właśnie tam w 2020 r. opracowano pierwszą normę (T/CECS 786-2020 [11]) dotyczącą procesu projektowania mieszanek stosowanych w technologii wytwarzania przyrostowego. W 2022 r. Chińska Federacja Materiałów Budowlanych (CBMF) opublikowała dwie normy poświęcone badaniu właściwości świeżego i stwardniałego betonu wykorzystywanego w technologii druku 3D. Normy te oznaczono odpowiednio: T/CBMF 184-2022 [12] i T/CBMF 183-2022 [13].

Celem tej publikacji jest przybliżenie polskim czytelnikom metod badawczych stosowanych w Chinach. Mogą one być pretekstem do dyskusji na temat opracowania krajowych metod badania mieszanek wykorzystywanych w technologii druku 3D. Ponieważ, jak już wspomniano, w języku

polskim brakuje ustandaryzowanej terminologii, autorzy tego opracowania będą się posługiwać nazewnictwem zarówno przyjętym w literaturze krajowej, jak i w języku angielskim. Dodatkowym argumentem, który za tym przemawia, jest to, że terminów opisujących wybrane parametry mieszanki używa się często niepoprawnie (zamiennie) [14–16]. Dla uproszczenia autorzy będą się posługiwać skrótowymi pojęciami „mieszanka 3D” lub „beton 3D”, co jest normą w literaturze międzynarodowej publikowanej w języku angielskim. Warto zaznaczyć, że w obu przypadkach, niezależnie od rozmiaru ziaren wykorzystywanego kruszywa (do lub powyżej 5 mm), w normie T/CBMF 184-2022 [12] jest stosowany termin „beton 3D”.

ZAKRES NORMY T/CBMF 184-2022

Norma T/CBMF 184-2022 [12] jest poświęcona ocenie parametrów mieszanek betonowych wykonywanych w technologii 3D. Opisuje ona podstawowy zakres testów, które należy wykonać, aby sporządzić raport określający właściwości niestwardniałego materiału przeznaczonego do druku 3D (rys. 1). Dla większości badanych cech norma nie wyznacza granicznych wymagań, które musi spełniać mieszanka przeznaczona do druku, lecz jedynie wskazuje sposób badania i oceny wyników, umożliwiając porównanie różnych badanych mieszanek. Podejście to wydaje się słuszne, zważywszy na fakt, że charakterystyka mieszanki musi być dostosowana do infrastruktury drukującej. W przypadku wszystkich prowadzonych badań oznaczenie właściwości mieszanki powinno być wykonywane w temperaturze otoczenia $20 \pm 5^\circ\text{C}$, przy wilgotności względ-

nej nie mniejszej niż 50%. Czas rozpoczęcia testów nie powinien być dłuższy niż 15 min od chwili pobrania mieszanki po zakończeniu procesu mieszania.

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ WEDŁUG T/CBMF 184-2022

1. Konsystencja/urabialność mieszanki (ang. flowability/workability)

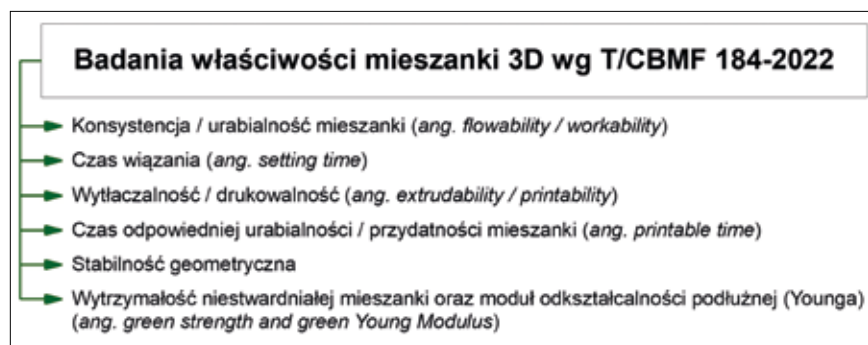
Badanie konsystencji betonu wykonuje się w zależności od maksymalnego rozmiaru ziaren kruszywa stosowanych w betonie. W przypadku kruszywa o rozmiarze poniżej 5 mm oznaczenie należy przeprowadzić zgodnie z normą GB/T2419-2005 [17–18], która odpowiada metodzie stolika rozplwy (PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplwy) [19]). Natomiast w mieszanekach, które zawierają kruszywo o rozmiarze powyżej 5 mm, badane są parametry opadu stożka i rozplwy mieszanki według normy GB/T 50080-2016 [20].

2. Czas wiązania (ang. setting time)

Czas wiązania mieszanki jest określany w zależności od składu kompozytu stosowanego do druku 3D. Gdy nie ma w niej kruszywa grubego, czas wiązania jest wyliczany metodą zgodną z GB/T 1346-2011 [21] (odpowiednik badania aparatem Vicata). W przeciwnym wypadku czas wiązania wyznacza się za pomocą penetrometru do betonu, przewidzianego przez normę GB/T 50080-2016 [20].

3. Wytłaczalność/drukowalność (ang. extrudability/printability)

Badanie wytłaczalności służy ocenie jednorodności i ciągłości betonu wytłaczanego



Rys. 1. Graficzne przedstawienie zakresu badawczego mieszanek 3D według T/CBMF 184-2022 [12]

z dyszy drukującej. Test wykonuje się przy identycznych parametrach, tożsamy z ustawieniami systemu drukującego w trakcie drukowania obiektu, czyli prędkości wytłaczania/drukowania (ang. extrusion rate/printing rate) i szerokości dyszy drukującej (W). Prędkość wytłaczania/drukowania to stała w jednostce czasu objętość materiału wytłoczonego przez dyszę przy założonej prędkości (np. 1,3 l mieszanki jest wytłaczane przez 1 min przy prędkości 50 mm/s). Odpowiedni dobór prędkości wytłaczania/drukowania jest kluczowy dla uzyskania oczekiwanego wydruku.

Badanie wytłaczalności jest prowadzone poprzez ciągły wydruk jednej warstwy o długości równej bądź dłuższej niż 100 W. W pierwszej kolejności wydruk ocenia się wizualnie pod kątem jakości wykonanej powierzchni, a wszystkie nieciągłości, defekty powierzchniowe lub niejednorodności wydrukowanej struktury

powinny zostać zaraportowane (rys. 2). Następnie mierzy się szerokość zewnętrzną wydrukowanej warstwy w pięciu punktach pomiarowych, w odległości nie mniejszej niż 10 W od każdego pomiaru, z dokładnością do 1 mm. W ten sposób wyznacza się średnią szerokość z pięciu punktów pomiarowych. Podobnie wykonuje się pomiar wysokości drukowanej warstwy. Odchyłki na kierunku zarówno poziomym, jak i pionowym nie powinny przekraczać $\pm 5\%$. Podobne założenia oceny jakości drukowanej ścieżki były stosowane również przez inne zespoły badawcze [22].

4. Czas odpowiedniej urabialności/przydatności mieszanki (ang. printable time)

Czas odpowiedniej urabialności/przydatności mieszanki służy wyznaczeniu końcowego czasu, w którym można stosować mieszankę 3D od momentu dodania do niej wody, pozwalającego na wydruk ciągłego elementu (bez nieciągłości i znaczących defektów powierzchniowych).

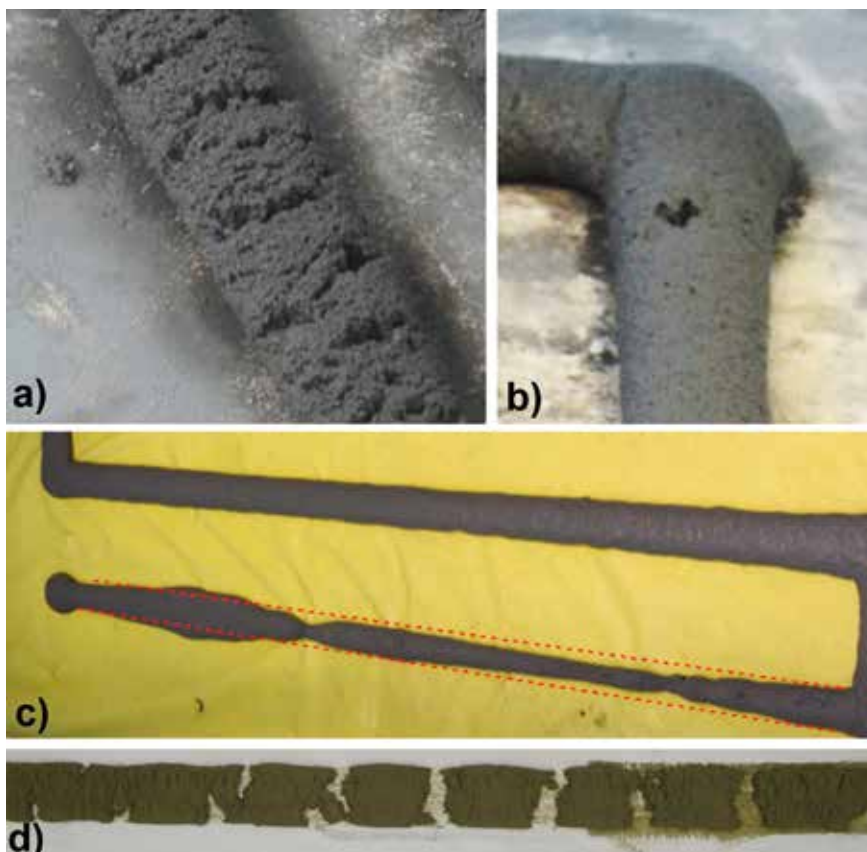
Podobnie jak w przypadku testu opisanego w pkt 3 parametry wydruku powinny być zgodne z tymi stosowanymi w trakcie rzeczywistego wydruku. Mieszanka musi być drukowana w sposób powtarzalny poprzez wydruk pojedynczych warstw o długości równej lub dłuższej niż 100 W, co 5 lub 10 min. Wynik badania to czas liczony od momentu dodania wody do mieszanki do chwili wydruku warstwy, w której zaobserwowano nieciągłości albo znaczne defekty powierzchniowe (w tym przerwy) w drukowanych warstwach.

5. Stabilność geometryczna

Stabilność geometryczna mieszanki 3D jest oznaczana za pomocą dwóch metod testowych. Pierwszy test służy określeniu zdolności mieszanki do zachowania kształtu pod obciążeniem własnym. Jest ona oznaczana poprzez zaformowanie próbki cylindrycznej (walcowej) o średnicy i wysokości równej $100 \pm 0,5$ mm. Przed zaformowaniem, po zwilżeniu wewnętrznej powierzchni cylindra, próbka jest układana w trzech warstwach i zagęszczana dziesięć- lub piętnastokrotnie za pomocą ubijaka. Proces kształtowania cylindra do momentu podniesienia formy powinien trwać nie dłużej niż 150 s. Po wyrównaniu powierzchni walca formę należy unieść w ciągu 3–7 s. Pomiar różnicy wysokości między wierzchem formy a najwyższym punktem walca mierzy się po 30 s lub gdy walec przestaje się rozpylić/opadać.

Drugi test przeprowadza się w celu oceny zachowania stabilności geometrycznej mieszanki w trakcie procesu nakładania na siebie kolejnych jej warstw. W zależności od szerokości stosowanej dyszy wykonuje się struktury składające się z min. 10 warstw, z których każda ma długość co najmniej 50 W. W przypadku gdy dysza ma szerokość lub średnicę mniejszą niż 50 mm, drukuje się element, którego szerokość nie powinna przekraczać 100 mm. Gdy dysza ma szerokość lub średnicę większą niż 50 mm, drukowany jest element o szerokości 1 warstwy (rys. 3).

Jeżeli podczas samego drukowania lub w krótkim czasie po jego zakończeniu

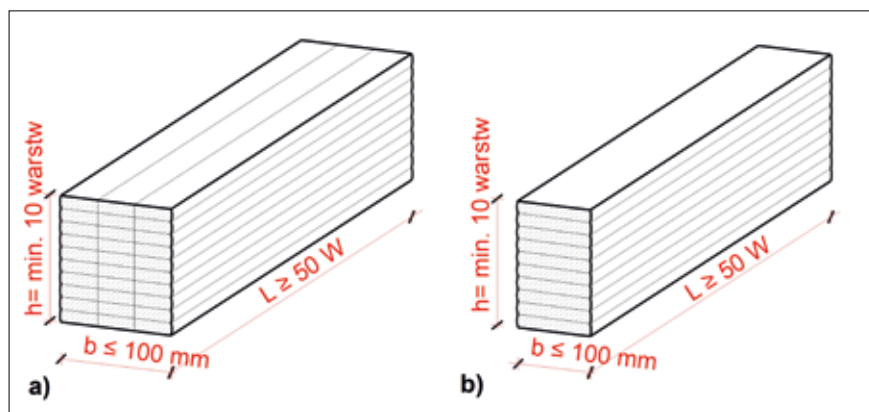


Rys. 2. Przykłady defektów powierzchniowych i niejednorodności wydrukowanej struktury: a) defekty występujące na próbce, b) defekt lokalny, c) niejednorodność szerokości drukowanej ścieżki, d) przykład nieciągłości drukowanej ścieżki

wystąpi niestabilność albo zniszczenie drukowanej konstrukcji, uznaje się, że osiągnięto stan graniczny stabilności drukowanego obiektu, i raportuje się liczbę warstw w momencie zniszczenia elementu oraz czas, w którym wydrukowano tę ostatnią. W przypadku skutecznego wydrukowania 10 warstw wykonuje się 2 pomiary za pomocą miarki o dokładności 1 mm. Najpierw mierzy się szerokość pierwszej warstwy i porównuje ją z wymiarami ostatniej. Odchylenie między uzyskanymi wynikami powinno wynosić mniej niż 5%. Następnie dokonuje się pomiaru całej wydrukowanej struktury i porównuje go z projektowaną wysokością struktury, która uwzględnia liczbę warstw, czyli 10, pomnożoną przez założoną wysokość warstwy. Różnica między projektowaną wysokością elementu a jego wydrukiem powinna być mniejsza niż 5%.

6. Wytrzymałość niestwardniałej mieszanki i moduł odkształcalności podłużnej (Younga)

Badanie to prowadzi się na próbkach cylindrycznych (walcowych) o stosunku średnicy do wysokości równej 1:2 (próbka o średnicy $d = 100 \pm 0,5$ mm i wysokości $h = 200 \pm 0,5$ mm). Probka jest przygotowywana i rozformowywana w sposób analogiczny jak opisany w pkt 5. Do oznaczenia parametrów mieszanki stosuje się prasę do badań wytrzymałościowych o maksymalnej sile nacisku 300 kN i dokładności 0,1 N. Zakres pomiarowy czujnika przemieszczeń powinien wynosić 50 mm, a jego dokładność – 0,01 mm. Pod dolną powierzchnią i na górze walca należy umieścić płytę z tworzywa sztucznego, której zadaniem jest redukcja zjawiska tarcia. Badanie przeprowadza się, obciążając próbkę w prasie do badań wytrzymałościowych ze stałą prędkością przesuwu tłoka równą 30 mm/min. Norma dopuszcza zmianę prędkości przesuwu tłoka tak, aby w szczególnych przypadkach zoptymalizować strategię druku. Jest to zgodne z tym, o czym możemy przeczytać w literaturze naukowej [23–26]. Badanie należy prowadzić aż do zniszczenia próbki lub do momentu osiągnięcia maksymalnej siły. Za zniszcze-



Rys. 3. Koncepcja wydruku elementów do testu oznaczenia stabilności geometrycznej próbki: a) dla szerokości lub średnicy dyszy ($W \leq 50$ mm), b) dla szerokości lub średnicy dyszy ($W > 50$ mm)

nie norma uznaje pęknięcie próbki podczas badania, czyli w praktyce – jej ścięcie (ang. shear failure) [23, 26]. Pozornie może się wydawać, że moment osiągnięcia maksymalnej siły jest tożsamy ze zniszczeniem próbki. Jednak w przypadku niestwardniałej mieszanki betonowej jej ścięcie może nie nastąpić. Zamiast tego mogą znacznie wzrosnąć odkształcenia boczne i może zmienić się jej wysokość. Siła oddziałująca na próbkę będzie wówczas rosła do pewnego momentu, by potem zacząć spadać. Norma wskazuje przyjęcie siły maksymalnej. Dodatkowo zawiera zapis, że jeśli maksymalna siła uzyskana podczas badań nie jest oczywista, należy przyjmując siłę odpowiadającą odkształceniu osiowemu wynoszącemu 20% (fluktuacja siły w przypadku znacznego wzrostu odkształceń bocznych).

Norma przedstawia precyzyjny sposób obliczenia zarówno wytrzymałości niestwardniałej mieszanki do druku 3D, jak i modułu odkształcalności podłużnej (Younga). Parametry mechaniczne wylicza się, korzystając ze wzorów (1)–(4). Wszystkie wskazane w nich parametry dotyczą momentu uzyskania na maszynie wytrzymałościowej maksymalnej siły. Norma nakazuje, aby obliczać pole powierzchni próbki A_a (2) w sposób zależny od jej pionowych odkształceń, z przeliczeniem na odkształcenia poziome (nawiązując do współczynnika Poissona). Sposób ten może pomóc w bardziej precyzyjnym określeniu realnych naprężeń.

$$f_c = \frac{F}{A_a} \quad (1)$$

gdzie:

f_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa] z dokładnością do 0,01 MPa,
 F – maksymalna siła [N],
 A_a – pole powierzchni przekroju próbki [mm²].

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0,01 \varepsilon_1} \quad (2)$$

gdzie:

A_0 – powierzchnia początkowa próbki [mm²],
 ε_1 – odkształcenie osiowe [%].

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

gdzie:

Δh – zmiana wysokości próbki podczas badania [mm],
 h_0 – początkowa wysokość próbki [mm].
 Norma określa moduł odkształcalności podłużnej (Younga) niestwardniałej mieszanki betonowej przeznaczonej do druku 3D dla odkształceń równych 0,05 (4).

$$E_{0,05} = \frac{\sigma_{0,05}}{0,05} \quad (4)$$

gdzie:

$E_{0,05}$ – moduł odkształcalności podłużnej (Younga) niestwardniałej [MPa],
 $\sigma_{0,05}$ – naprężenia w momencie osiągnięcia przez próbkę odkształceń równych 0,05, podane z dokładnością do 0,01 MPa.

Analogiczne badania dotyczące mechanicznych właściwości niestwardniałej mieszanki betonowej opisuje literatura przedmiotu [25–27]. Należy zwrócić uwagę,



że norma częściowo adaptuje te rozwiązania, przez co stają się one bardziej inżynierskie niż naukowe, co zdecydowanie ułatwi ich implementację w przemyśle.

PODSUMOWANIE

Metody badawcze zaproponowane przez normę [12] w znacznym stopniu pokrywają się i odzwierciedlają metody stosowane przez wiele międzynarodowych ośrodków badawczych [23, 27]. Ze względu na inżynierskie podejście, jakie prezentuje norma [12], pewne aspekty pomiarowe, np. badanie wytrzymałości niestwardniałej mieszanki czy modułu odkształcalności podłużnej, zostały uproszczone (pominięto m.in. różnice w modelu zniszczenia próbek [24, 26]). Chodziło o to, by umożliwić wykonywanie pomiarów z wykorzystaniem klasycznych pras wytrzymałościowych. W tym kontekście interesujące jest też stosowanie próbek o znacznych wymiarach, np. cylindrycznych o średnicy $d = 100$ mm i wysokości $h = 200$ mm. Wiele doniesień naukowych mówi o wykorzystywaniu mniejszych próbek, o stosunku rozmiaru 1:2 (np. 75×150 mm [24], 60×120 mm [28] czy 70×140 mm [27]). I choć w ten sposób można określić podobne parametry mechaniczne, to jednak norma chińska [12] – zalecając stosowanie większych próbek – zakłada podejście bardziej konserwatywne, w którym maksymalna siła będzie mniejsza niż ta uzyskana na próbkach o mniejszych gabarytach. ■

Literatura

1. Pierwszy na świecie zbiornik na wodę wydrukowany w technologii 3D w Polsce, „Budownictwo, Technologie, Architektura” nr 1/2025, s. 73.
2. R. Wolfs, *The status quo of 3D concrete printing: Are we there yet?*, „RILEM Tech Lett” nr 8/2023, s. 182–189, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.197>.
3. ICC-ES AC509 – 3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls.
4. P. Sikora, K. Federowicz, S. Skibicki, M. Techman, M. Hoffmann, A. Ludwiczak-Sarzała, *Pierwszy krok w kierunku normalizacji konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D*, „Przegląd Budowlany” nr 5/2024, s. 146–52, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7216>.
5. K. Vasilic, *Standardization Aspects of Concrete 3D Printing*, „RILEM Tech Lett” nr 9/2024, s. 98–105, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2024.201>.
6. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
7. PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
8. PN-EN 197-5:2021-07 Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI.
9. M. Hoffman, P. Sikora, K. Federowicz, S. Skibicki, M. Techman, D. Sibera, *Navigating the future of additive construction: implementing ISO 52939 standards for enhanced building quality*, 22nd International Conference Modelling in Mechanics 2024, 23 i 24 maja 2024 r.
10. PN-EN ISO/ASTM 52939:2024-06 Wytwarzanie przyrostowe w budownictwie – Zasady kwalifikacji – Elementy konstrukcyjne i infrastrukturalne.
11. T/CECS 786-2020 Technical specification for concrete 3D printing.
12. T/CBMEF 184-2022 Test Methods for Printability of 3D Printing Fresh Concrete.
13. T/CBMEF 183-2022 Test methods for basic mechanical properties of 3D printed concrete.
14. S. Skibicki, M. Kaszyńska, *Problemy w technologii druku 3D kompozytów cementowych*, „Budownictwo, Technologie, Architektura” nr 2/2022, s. 56–59.
15. S. Skibicki, *Ocena jakości ściany wykonane w technologii druku 3D za pomocą systemu analizy obrazu*, „Inżynieria i Budownictwo” nr 3–4/2022, s. 124–127.
16. S. Skibicki, M. Kaszyńska, K. Federowicz, M. Techman, A. Zieliński, N. Olczyk, *Druk 3D kompozytów betonowych metodą przyrostową – doświadczenia zespołu szczecińskiego*, „Inżynieria i Budownictwo” nr 7/2021, s. 328–333.
17. G. Ma, Z. Li, L. Wang, *Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing*, „Construction and Building Materials” nr 162/2018, s. 613–627, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>.
18. GB/T 2419-2005 Test method for fluidity of Performance on Ordinary Fresh Concrete.
19. PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozprylu).
20. BG/T 50080-2016. Standard for Test Method of Performance on Ordinary Fresh Concrete.
21. GB/T 1346-2011 Test Methods For Water Requirement Of Normal Consistency, Setting Time And Soundness Of The Portland Cement.
22. A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis, *Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture*, „Construction and Building Materials” nr 145/2017, s. 639–647, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.
23. Y.A. Al-Noaimat, M. Chougan, A. Albar, S. Skibicki, K. Federowicz, M. Hoffman, *Recycled brick aggregates in one-part alkali-activated materials: Impact on 3D printing performance and material properties*, „Developments in the Built Environment” nr 16/2023, 100248, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100248>.
24. T. Ding, J. Xiao, F. Qin, Z. Duan, *Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages*, „Construction and Building Materials” nr 248/2020, 118654, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118654>.
25. B. Panda, J.H. Lim, M.J. Tan, *Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction*, „Composites Part B: Engineering” nr 165/2019, s. 563–571, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.040>.
26. S. Skibicki, P. Jakubowska, M. Kaszyńska, D. Sibera, K. Cendrowski, M. Hoffmann, *Early-Age Mechanical Properties of 3D-Printed Mortar with Spent Garnet*, Materials (Basel) 2021;15(1), <https://doi.org/10.3390/ma15010100>.
27. R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing*, „Cement and Concrete Research” nr 106/2018, s. 103–116, <https://doi.org/10.1016/j.jcemconres.2018.02.001>.
28. L. Casagrande, L. Esposito, C. Menna, D. Asprogne, F. Auricchio, *Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete*, „Construction and Building Materials” nr 245/2020, 118286, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118286>.