

Problemy w technologii druku 3D kompozytów cementowych

Streszczenie

Druk 3D kompozytów cementowych to nowa technologia, która w ostatnich latach rozwija się bardzo szybko. Artykuł porusza główne wady i zalety technologii druku 3D kompozytów cementowych wraz z oceną możliwości jej zastosowania w praktyce.

Słowa kluczowe:

kompozyt cementowy, druk 3D, metoda przyrostowa, mieszanka betonowa

Abstract

3D printing of cement composites is a new technology that has developed rapidly in recent years. The paper discusses the main advantages and disadvantages of the 3D printing technology of cement composites, including assessment of its applicability in practice.

Keywords:

cement composite, 3D printing, additive manufacturing, concrete mix

Wprowadzenie

Druk 3D przy wykorzystaniu materiałów cementowych stał się w ostatnich latach tematem wielu opracowań naukowych [1-3]. Koncepcja tej technologii oraz pierwsze prace badawcze powstały już w połowie lat dziewięćdziesiątych (Pegna [4]). Na początku XXI wieku technologię tę zaczął rozwijać Khoshnevis z Uniwersytetu Południowej Kalifornii [5]. Jednak prawdziwy rozkwit badań w tym zakresie rozpoczął się dopiero od początku drugiej dekady XXI wieku i skutkowało ogólnosiwiatowym przyrostem badań w tej dziedzinie m. in. [6-8], a ponadto w tym czasie firmy zaczęły komercjalizować technologię (m.in. TotalKustom [9], WinSun [10]). W niniejszym artykule omówione będą wyniki prac badawczych prowadzonych od lat przez autorów, dotyczących druku 3D kompozytów cementowych metodą wytłaczania (ang. *Extrusion*). W metodzie tej mieszanka jest wytłaczana bezpośrednio przez dyszę połączoną z węzłem (rys. 1a). Dysza drukująca może posiadać dodatkowe funkcje, np. dodatkowy zawór kontrolujący wypływ mieszanki. Metoda ta bazuje na metodzie FDM (ang. *fused deposition modeling*) wykorzystywanej w wydrukach tworzyw sztucznych (polimerów). W zakresie druku 3D kompozytów cementowych istnieją także inne metody, m.in. *Slipforming* czy *Particle Bed Fusion* [11]. Idea technologii druku 3D wydaje się być bardzo prosta: do pompy dostarczamy odpowiednią mieszankę betonową, następnie zostaje ona przetłoczona przez wąż zakończony specjalną dyszą. Sam wąż jest sterowany przez robota w celu uzyskania pożądanego kształtu. Teoretycznie wszystkie wy-

mienione wyżej rozwiązania są znane: pompy do betonów istnieją od wielu lat (zarówno tłokowe jak i ślimakowe). Roboty używane do druku 3D kompozytów to głównie roboty kartezyjańskie o trzech stopniach swobody, jeśli chodzi o ruch (3 kierunki przesuwu) lub też manipulatory o 6 stopniach swobody (3 przesuwu i 3 obroty). Roboty kartezyjańskie są używane od wielu lat w większości drukarek 3D do tworzyw sztucznych. Manipulatory są bardzo popularne we wszelkiego rodzaju zakładach produkcyjnych (np. produkcji samochodowej). Oznacza to, że technologia sterowania robotem też jest znana. Pomimo powszechnie znanych składowych tej technologii dostosowanie ich do wydruku kompozytów na spoiwie cementowym stanowi istotny problem techniczny. Obejmuje on problemy związane ze sterowaniem całym systemem, ale przede wszystkim z zagadnieniami materiałowymi.

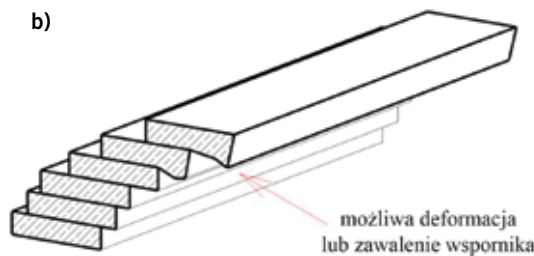
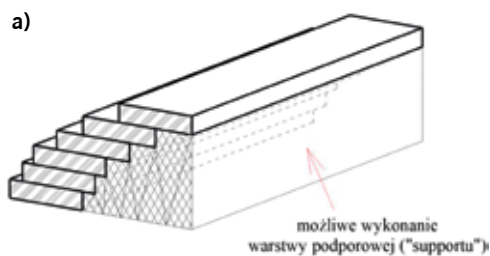
Teoria sterowania a praktyka druku 3D kompozytów cementowych

Tradycyjne drukarki do tworzyw sztucznych (polimerów) oraz obrabiarki CNC, niezależnie od kinematyki ruchu, mogą być sterowane za pomocą bardzo popularnego języka programowania przeznaczonego dla maszyn CNC, tzw. G-Code. Rozwój tego języka został przez wiele lat ściśle dostosowany do wydruku tworzyw sztucznych, których utwardzanie następuje stosunkowo szybko. Ponadto wytłaczany materiał może być aktywowany za pomocą temperatury, co ułatwia rozpoczęcie procesu wydruku. W przypadku materiałów cementowych pierwszy wypływ z dyszy nie może być tak precyzyjnie kontrolowany, jak przy tworzywach sztucznych (rys. 1b). Ponadto w większości przypadków drukowany materiał zmienia swoje właściwości w czasie, ponieważ trwa proces wiązania, co utrudnia jego wytłaczanie. Dodatkowo druk 3D przy wykorzystaniu kompozytów cementowych ma dużo większą bezwładność niż kontrolowany, zazwyczaj termicznie, druk materiałów sztucznych (polimerów).

Kolejnym istotnym problemem jest wydruk konstrukcji wspornikowych lub nawet z małym nadwieszeniem. W przypadku druku 3D tworzyw sztucznych (polimerów) istnieje możliwość wykonania warstw podpierających, tzn. suportów (rys. 2a), w przypadku druku 3D kompozytów ce-

Rys. 1. Przykłady druku 3D kompozytu cementowego metodą wytłaczania
a) wydruk ścieżki wielowarstwowej
b) zgrubienie na początku ścieżki – efekt wypływu kompozytu z dyszy bez zaworu





Rys. 2. Problemy wydruku konstrukcji wspornikowej
 a) wydruk wspornika przy technologii wytwarzania przyrostowego polimerów
 b) wydruk wspornika przy technologii wytwarzania przyrostowego kompozytów na spoiwie cementowym

mentowych jest to bardzo trudne (rys. 2b). W zasadzie przy większości technologii druku 3D kompozytów na spoiwie cementowym istnieje ryzyko znacznej deformacji drukowanej ścieżki lub nawet zawalenia się konstrukcji wsporników. Istnieją zespoły badawcze, które problem ten próbowały rozwiązać, np. Cesaretti et al. 2014 [12], ale idea ta powoduje konieczność pracochłonnego usuwania warstw podpierających.

Kompozyty cementowe jako główny problem

Technologia druku 3D materiałów na spoiwie cementowym wymaga wielu zmian w stosunku do wykonywania tradycyjnych betonów i zapraw. Problemy dotyczą zarówno projektowania budynków, które mogą być wykonane w tej technologii, jak i ich wykonawstwa. Podczas wydruku materiał cementowy wytłaczany przez dyszę musi utrzymać pewne niezmiennie właściwości reologiczne, żeby umożliwić jego wytłoczenie. Ponadto mieszanka podczas wydruku musi posiadać niezbędną wytrzymałość, która pozwoli na utrzymanie jej kształtu pod ciężarem własnym oraz kolejnych warstw. Określenie wszystkich właściwości świeżej mieszanki betonowej stało się nowym wyzwaniem technologii materiałów na spoiwie cementowym [6, 7, 13-15]. Do tej pory analiza „nośności” mieszanki betonowej przed czasem wiązania nie była w ogóle potrzebna. Jednak dla druku 3D to podstawowa właściwość analizowana w wielu publikacjach, m.in. [6, 8, 11, 16-20]. W przypadku zbyt małej wytrzymałości mieszanki drukowana struktura może ulec zniszczeniu już podczas wydruku. Zdolność mieszanki do utrzymania wymaganych wymiarów pod ciężarem kolejnych warstw w technologii druku 3D kompozytów cementowych nazywamy terminem *Buildability* [1,8]. Bardzo istotnym problemem jest przyjęcie odpowiedniego czasu wydruku, aby mieszanka nie zaczęła wiązać w węzlu drukującym, co uniemożliwi dalszy wydruk. Czas odpowiedniej urabialności w nomenklaturze wytwarzania przyrostowego określa się mianem *Open Time* [11]. Podsumowując, z jednej strony mieszanka musi mieć szybki przyrost wytrzymałości, z drugiej strony zbyt szybkie wiązanie będzie powodować jej skurcz oraz może osłabić szczepność międzywarstwową (ang. *in-trelayer adhesion*), co w przypadku wydruku struktur, przy których dysza wraca na miejsce startowe, po dłuższym czasie może spowodować istotną redukcję cech wytrzymałościowych i trwałościowych drukowanej struktury [21-23].

Należy podkreślić, że dokładny skład kompozytu na spoiwie cementowym, który jest przeznaczony do druku 3D, nie zawsze jest publikowany. Analizy dostępnych źródeł i doświadczenia własne pokazały, że jedną z popularnych metod dostosowania betonów i zapraw o wskaźniku $w/s \approx 0,4 \div 0,5$ do druku 3D jest odpowiednia ich modyfikacja za pomocą domie-

szek chemicznych, takich jak: domieszki regulujące lepkość (VMA), superplastyfikatory, przyspieszacze i opóźniacze wiązania [3,13]. Tego typu kompozyty uzyskują wytrzymałość na ściskanie do 60 MPa po 28 dniach dojrzewania. Inną popularną metodą jest stosowanie zapraw o bardzo dużej zawartości spoiwa [7,26], które polepsza właściwości reologiczne. Materiały tak wytworzone mogą posiadać wytrzymałość na ściskanie nawet do 130 MPa po 28 dniach dojrzewania. Uzyskanie wymaganych właściwości reologicznych możliwe jest też przez odpowiednią modyfikację spoiwa i / lub kruszywa. Zamiana części kruszywa materiałem niereaktywnym mogącym modyfikować lepkość może dodatkowo wpisywać się w rozwiązanie proekologiczne [28]. Możliwa jest także utylizacja kruszyw odpadowych czy sztucznych w sposób, który wpływa korzystnie na parametry kompozytu [20]. Idea zrównoważonego rozwoju będzie wymagała w przyszłości modyfikacji kompozytów cementowych w taki sposób, żeby ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, z tego też powodu opisane wyżej podejście polegające na modyfikacji spoiwa i kruszywa stanie się głównym celem badań wielu ośrodków naukowych.

Można stwierdzić, że odpowiednia kompozycja i pielęgnacja mieszanki jest kluczowa w całym procesie druku 3D kompozytów cementowych. Dotychczas wykonane wydruki w skali technicznej realizowane były jako prefabrykaty wykonane w hali prefabrykacji ze sterowanymi warunkami ciepłno-wilgotnościowymi, np. WinSun [24], lub pod namiotami [25], co ograniczało wpływ warunków atmosferycznych na wydruk.

Zalety technologii wytwarzania przyrostowego kompozytów cementowych

Pomimo wielu problemów badawczych druk 3D kompozytów cementowych jest technologią, która ma wiele zalet. Jedną z głównych jest ograniczenie ilości osób, które należy zatrudnić przy budowie [27, 28]. Robot drukujący może być obsługiwany przez jedną osobę, w przyszłości możliwe będzie także ograniczenie udziału głównego operatora robota. Istotne w technologii druku 3D jest ograniczenie kosztów wykonania konstrukcji związane z redukcją kosztów wykorzystania szalunków, które mogą stanowić aż między 35% a 54% całkowitych kosztów wykonania konstrukcji betonowych [26-31]. Dodatkowo cały proces wydruku może skrócić czas wykonania budynków, choć obecny stan wiedzy pokazuje, że ze względu na różne procesy technologiczne nie jest to wciąż takie proste [32]. Największa redukcja kosztów budowy i czasu wykonania obiektu wystąpi przy elementach o skomplikowanej geometrii (np. ścian zakrzywionych, łukowych itp.). W takiej sytuacji przy metodach tradycyjnych koszty i czas wykonania znacznie rosną, natomiast w technologii druku

3D kształt drukowanej struktury nie ma większego wpływu na koszt całego obiektu. Przykłady obiektów o skomplikowanej geometrii wykonanych na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie przedstawiono na rys. 3.

Bardzo ważną zaletą wytwarzania przyrostowego kompozytów cementowych z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju jest optymalizacja zużycia materiałów. Technologia druku 3D pozwala na wykorzystanie dokładnie takiej ilości materiału, jaka jest potrzebna do wykonania obiektu budowlanego. Ponadto ze względu na wysokie parametry mechaniczne kompozytów możliwe jest wykonanie ścian przy mniejszym zużyciu betonu, co bezpośrednio przekłada się na redukcję wykorzystania surowców do jego produkcji [28].

Istotną zaletą tej technologii jest możliwość wykorzystania robotów drukujących w miejscach szczególnie niebezpiecznych dla ludzi. W tym zakresie druk 3D kompozytów cementowych może być w przyszłości wykorzystany do budowy osłon przed ciepłem czy niebezpiecznym promieniowaniem jonizującym bez udziału ludzi (np. w rafineriach naftowych czy niektórych elektrowniach).

Podsumowanie

Druk 3D kompozytów cementowych to nowa technologia, której podstawową zaletą jest stworzenie dowolnych, nawet bardzo skomplikowanych kształtów bez zmiany kosztów i czasu budowy. Jednak nawet w przypadku prostych geometrii może ona zoptymalizować koszty i czas wykonania obiektu budowlanego. Ponadto technologia ta oszczędza zużycie surowców naturalnych, co jest korzystne dla środowiska.

Poza głównymi zaletami, druk 3D kompozytów cementowych to w dalszym ciągu wiele wyzwań, zarówno w zakresie systemów sterowania i podawania mieszanki, jak i w zakresie technologii kompozytów na spoiwie cementowym. Ta nowa technologia poza sprawami technicznymi wymaga też zmian przepisów i norm, które uwzględnią możliwość jej stosowania w szeroko pojmowanym budownictwie. Innym istotnym problemem jest znajomość tej technologii przez jednostki projektowe. Wymagania projektowe są tutaj zupełnie inne niż te przy stosowaniu technologii tradycyjnych, począwszy od architektury obiektu poprzez wymagania konstrukcji, a kończąc na samym przygotowaniu plików sterowania dla robota, czy to zadanie będzie mógł wykonać architekt czy jednak będzie potrzebna zatrudniania specjalistycznych firm. Podsumowując, technologia druku 3D to obiecujący system, który w przyszłości może stać się codziennością na placach budów. W tym jednak momencie ta technologia wymaga jeszcze wielu usprawnień zarówno w kontekście rozwiązań technicznych, jak i w zakresie formalnoprawnym, żeby móc w pełni wykorzystać jej potencjał. Wzmocnione prace badawcze prowadzone na całym świecie powinny w ciągu kilku lat przyczynić się do dużo większej liczby zastosowań komercyjnych tej technologii.

dr inż. Szymon Skibicki

(ORCID: 0000-0002-2918-7759)

prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska

(ORCID: 0000-0002-8867-6974)

**Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie**

Rys. 3. Elementy o skomplikowanej geometrii wykonane w technologii druku 3D na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie
a) słup o skomplikowanym kształcie
b) doniczka



BIBLIOGRAFIA

1. Wangler T, Roussel N, Bos FP, Salet TAM, Flatt RJ. Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research* 2019;123:105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>.
2. Nguyen-Van V, Panda B, Zhang G, Nguyen-Xuan H, Tran P. Digital design computing and modelling for 3-D concrete printing. *Automation in Construction* 2021;123(4):103529. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103529>.
3. Buswell RA, Leal de Silva WR, Jones SZ, Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A road-



- map for research. *Cement and Concrete Research* 2018;112:37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
4. Pegna J. Exploratory investigation of solid free-form construction. *Automation in Construction* 1997;5(5):427–37. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
 5. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction* 2004;13(1):5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.
 6. Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Gibb AGF, Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance. *Materials and Structures* 2012;45:1221–32.
 7. Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R, Gibb AGF et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 2012;42(3):558–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
 8. Perrot A, Rangeard D, Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Mater Struct* 2016;49(4):1213–20. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>.
 9. Minnesota Man 3D Prints a Real Castle – On to Printing a Full Size House Next. <https://3dprint.com/10723/3d-printed-castle-house/>. Data dostępu: 07.08.2018.
 10. China: Firm 3D prints 10 full-sized houses in a day. <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-27156775>. Data dostępu: 03.10.2018.
 11. 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* 2021;77(7):328–33.
 12. Cesaretti G, Dini E, Kestelier XD, Colla V, Pambaguian L. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica* 2014;93:430–50. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.
 13. Wangler T, Lloret E, Reiter L, Hack N, Gramazio F, Kohler M et al. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Letters* 2016;1:67–75.
 14. 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* 2016;11(3):209–25. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
 15. Kazemian A, Yuan X, Cochran E, Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials* 2017;145:639–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.
 16. Kruger J, Zeranka S, van Zijl G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. *Construction and Building Materials* 2019;224:372–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>.
 17. Arunothayan AR, Nematollahi B, Ranade R, Bong SH, Sanjayan J. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials* 2020;257(3):119546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119546>.
 18. Chougan M, Ghaffar SH, Sikora P, Chung S-Y, Rucinska T, Stephan D et al. Investigation of additive incorporation on rheological, microstructural and mechanical properties of 3D printable alkali-activated materials. *Materials & Design* 2021;202:109574. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109574>.
 19. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research* 2018;112:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.
 20. Skibicki S, Jakubowska P, Kaszyńska M, Sibera D, Cendrowski K, Hoffmann M. Early-Age Mechanical Properties of 3D-Printed Mortar with Spent Garnet. *Materials (Basel)* 2021;15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010100>.
 21. Panda B, Noor Mohamed NA, Paul SC, Bhagath Singh GVP, Tan MJ, Šavija B. The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. *Materials* 2019;12(13):2149. <https://doi.org/10.3390/ma12132149>.
 22. Marchment T, Sanjayan JG, Nematollahi B, Xia M. Interlayer Strength of 3D Printed Concrete. In: Sanjayan J, Nazari A, Nematollahi B, editors. *3D Concrete Printing Technology*. Elsevier; 2019, p. 241–264.
 23. Zareyan B, Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. *Automation in Construction* 2017;83:212–21. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.019>.
 24. WinSun <http://www.winsun3d.com/En/About/> (data dostępu: 03.04.2019).
 25. German Innovation Award goes to first 3D-printed house, <https://www.heidelbergcement.com/en/pr-18-05-2021>, data dostępu: 15.04.2022.
 26. Kaszynska M, Hoffmann M, Skibicki S, Zielinski A, Techman M, Olczyk N et al. Evaluation of suitability for 3D printing of high performance concretes. *MATEC Web Conf.* 2018;163:1002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301002>.
 27. Hoffmann M, Skibicki S, Pankratow P, Zieliński A, Pajor M, Techman M. Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper. *Materials* 2020;13(8):1800. <https://doi.org/10.3390/ma13081800>.
 28. Kaszyńska M, Skibicki S, Hoffmann M. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. *Energies* 2020;13(23):6351. <https://doi.org/10.3390/en13236351>.
 29. Paul SC, van Zijl GPAG, Tan MJ, Gibson I, Campbell RI. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal* 2018;23(4):0. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0154>.
 30. Jha KN. *Formwork for Concrete Structures*. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited; 2012.
 31. Hager I, Golonka A, Putanowicz R. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering* 2016;151:292–9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>.
 32. Diggs-McGee BN, Kreiger EL, Kreiger MA, Case MP. Print time vs. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete. *Additive Manufacturing* 2019;28:205–14. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.008>.