

Zaprawa modyfikowana cementem glinowym jako alternatywa dla standardowych materiałów używanych do druku 3D



dr inż.
NORBERT OLCZYK
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0002-4261-4946



inż.
NATALIA GIERSZEWSKA
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0009-0008-8863-7976



dr inż.
SZYMON SKIBICKI
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0002-2918-7759

Artykuł dotyczy możliwości potencjalnej modyfikacji spoiwa mieszanki do druku 3D za pomocą cementu glinowego (HAC – ang. *high-alumina cement*). Badania wykazały, że odpowiednia kompozycja zaczynu i superplastyfikatora może być odpowiednia dla betonów drukowanych.

Wraz z rosnącą popularnością drukowania 3D elementów betonowych do budowania budynków i struktur intensywnie pracuje się nad usprawnianiem i automatyzacją tego procesu. Receptury mieszanki betonowej są również stale doskonalone w celu osiągnięcia optymalnych parametrów powstałych elementów i poprawy jakości druku [1–4]. Procedura drukowania 3D polega na wykorzystaniu robota karteżńskiego z założoną głowicą drukującą. Mieszanka betonowa jest pompowana do układu, a następnie warstwa po warstwie układana zgodnie z wcześniej zaprogramowaną geometrią, tworząc trójwymiarowy element. Ze względu na wrażliwość procesu podawania mieszanki betonowej kluczowe jest, aby miała ona odpowiednią konsystencję, umożliwiającą swobodny przepływ przez pompę, układ i głowicę drukującą, oraz parametry, które zapewnią utrzymanie określonego kształtu po wytłoczeniu przez głowicę systemu drukującego.

Celem przeprowadzonych badań było zaprojektowanie mieszanki betonowej odpowiedniej do drukowania smukłych elementów, gdzie długość jednej warstwy jest stosunkowo niewielka. Przykładem takiego elementu może być słup betonowy lub ściana o niewielkiej długości. Szybkość poruszania

się głowicy drukującej może wynosić nawet do 0,5 m/s [5]. Ważne jest, aby drukowany element zachował stateczność i kształt, dlatego wydrukowane warstwy muszą szybko uzyskać odpowiednią wczesną wytrzymałość (*green strength*) [6].

W przypadku wykorzystania kompozytów cementowych w metodach addytywnych mieszanka musi mieć odpowiednie parametry reologiczne [7]. Granica plastyczności oraz lepkość mieszanki muszą pozwalać na jej wytłoczenie oraz jednocześnie muszą zapewnić odpowiednią jej wytrzymałość, pozwalającą na utrzymanie ciężaru kolejnych warstw oraz zapewnienie dostatecznej stateczności [8]. Potencjalnym rozwiązaniem powyższego problemu jest zastosowanie cementów glinowych, które mogą przyspieszyć czas twardnienia mieszanki. W tym zakresie badania dotyczące druku 3D są bardzo ograniczone. Das et al. [9] wykonał próby wykonania betonów drukowanych na cemencie glinowo-wapniowym (CAC – *Calcium Alumina Cement*) w ilości do 20% spoiwa i uzyskał dość dobre rezultaty, jednak wymagane było stosowanie technik opóźniających wiązanie w celu możliwości przeprowadzenia wydruku.

W pracy opisano możliwość potencjalnej modyfikacji spoiwa mieszanki do druku 3D za pomocą cementu glinowego (HAC – ang.

high-alumina cement). Badania wykazały, że odpowiednia ilość dodatku cementu glinowego i superplastyfikatora może być właściwa dla betonów drukowanych.

Metodyka Materiały i zaprojektowane mieszanki betonowe

Zaprojektowano mieszanki na spoiwie cementowym CEM I 42,5R modyfikowane cementem o dużej zawartości glinu GÓRKAL 70 (HAC – *high alumina cement*). Jako mieszankę bazową o potwierdzonej możliwości wydruku zastosowano mieszankę MO o zredukowanej ilości spoiwa, wykonaną wcześniej przez zespół ZUT [7, 10].

Badania wykonano na dwóch etapach. Pierwszy etap badań polegał na określeniu optymalnej zawartości cementu glinowego, na podstawie określenia czasu wiązania zaczynu, natomiast drugi etap miał na celu optymalizację konsystencji mieszanki potencjalnie pozwalającej na jej wydruk. Do pierwszego etapu badań przyjęto cztery zaczyny (ZO_HACO_SPO5, Z1_HAC10_SPO5, Z2_HAC15_SPO5, Z3_HAC20_SPO5) oraz cztery zaprawy (HACO_SPO5, HAC10_SPO5, HAC15_SPO5, HAC12_S05). Na pierwszym etapie modyfikowano zawartość cementu glinowego w zakresie od 0% do 20% spoiwa

Celem przeprowadzonych badań było zaprojektowanie mieszanki betonowej odpowiedniej do drukowania smukłych elementów, gdzie długość jednej warstwy jest stosunkowo krótka.

(cementem glinowym zastępowano cement CEM I 42.5R), zawartość superplastyfikatora (SP) pozostawała bez zmian. Wszystkie zaprojektowane mieszanki miały stały wskaźnik wodno-spoiwowy równy 0,4, zastosowano dwa rodzaje kruszywa: naturalne kruszywo kwarcowe o uziarnieniu do 2 mm [11] oraz mikrowypętniacz w postaci niereaktywnej mączki wapiennej. Szczegółowe składy mieszanek przedstawiono w tab. 1. oraz tab. 2.

Na drugim etapie badań wybrano mieszanekę z 15% dodatkiem cementu glinowego ze względu na potencjalnie najlepszy czas odpowiedniej urabialności (*open time*) [6], która pozwala na wydruk. Następnie ze względu na konieczność uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki modyfikowano ilość superplastyfikatora w mieszance w zakresie od 0,5 kg/m³ do 3 kg/m³ (tab. 2.).

Metodyka badawcza

Badanie czasu wiązania dla zaczynów przedstawionych w punkcie *Wyniki badań i ich analiza* wykonano przy użyciu aparatu Vicata. Badanie prowadzono zgodnie z normą PN-EN 196-3 [12]. Za początek czasu wiązania uznaje się moment, w którym odległość igły od płytki bazowej wynosi 6±3 mm [12]. Koniec wiązania wskazuje zagębnienie igły w zaczynie na głębokość nie większą niż

Tab. 1. Skład zaczynów cementowych

Lp.	Zaczyn	Spoiwo [kg]		SP [kg]
		CEM I 42.5R	HAC 70	
1	Z0_HACO_SP05	600	0	0,5
2	Z1_HAC10_SP05	540	60	
3	Z2_HAC15_SP05	510	90	
4	Z3_HAC20_SP05	480	120	

Tab. 2. Skład zapraw cementowych

Lp.	Mieszanka	Spoiwo [kg]		Kruszywo [% obj]		SP [kg]	
		CEM I 42.5R	HAC 70	kruszywo 0-2mm	mączka wapienia		
1	HACO_SP05	600	0	80%	20%	0,5	
2	HAC10_SP05	540	60				
3	HAC15_SP05	510	90				
4	HAC20_SP05	480	120				
5	HAC15_SP15	510	90			1,5	
6	HAC15_SP22						2,25
7	HAC15_SP30						

0,5 mm. Pomiaru dokonywano z częstotliwością co 5 minut, mierząc czas od momentu dodania wody do spoiwa do czasu końca wiązania zaczynu.

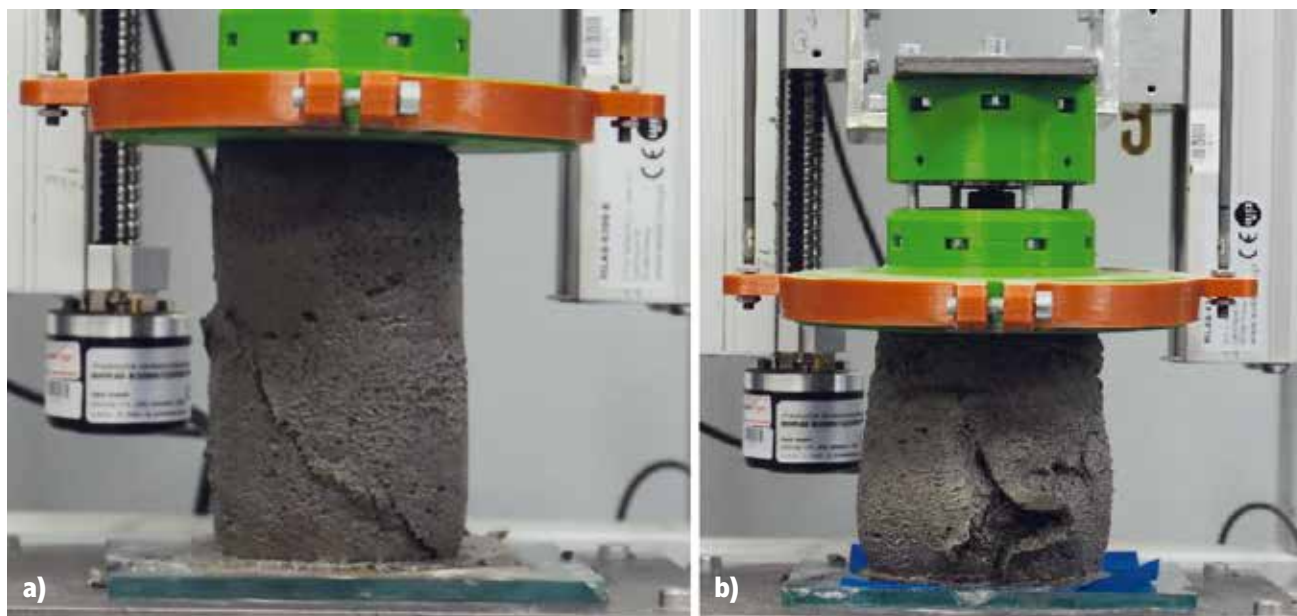
Badanie konsystencji metodą stolika rozptywowego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12350-5 [13].

W celu odniesienia wyników do badań związanych bezpośrednio z drukiem 3D kompozytów cementowych dla wybranych zapraw wykonano badania ściskania osiowego zaprawy wg zaleceń [14, 15], podczas którego określono wczesną wytrzymałość na ściskanie (*green strength*) [6]. Badanie umożliwia uzyskanie zależności naprężenie – odkształcenie dla badanej mieszanki. Takie podejście pozwala określić nośność mie-

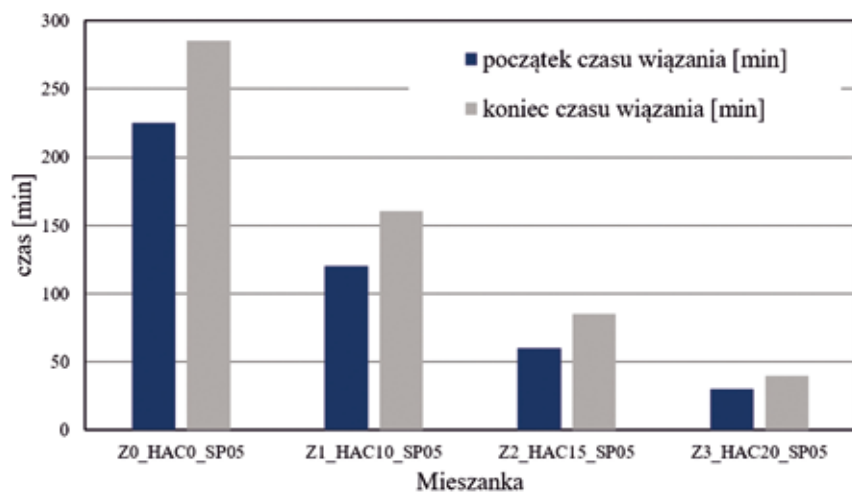
szanki, symulując proces druku [16]. Badania przeprowadzono przy stałej prędkości przemieszczania się tłoka prasy wynoszącej 30 mm/min. Test wykonano 15 oraz 30 minut po dodaniu wody do suchych składników. Próbkę podczas badania przedstawiono na fot. 1.

Wyniki badań i ich analiza

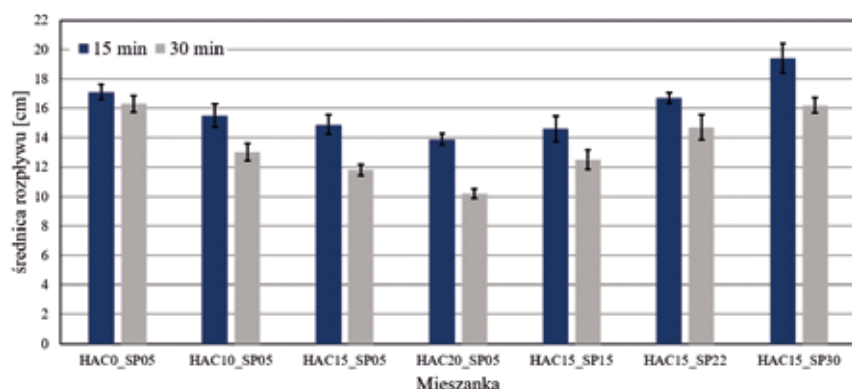
Na rys. 1. przedstawiono porównanie czasów wiązania dla przebadanych zaczynów. Początek i koniec czasu wiązania dla zaczynu referencyjnego (Z0_HACO_SP05) oscyluje w przedziale 3,75–4,75 h. Mieszanka referencyjna HACO_SP05 zgodnie z [7, 10] ma czas odpowiedniej urabialności (*open time*) wynoszący 50–80 minut. Dodatek cementu



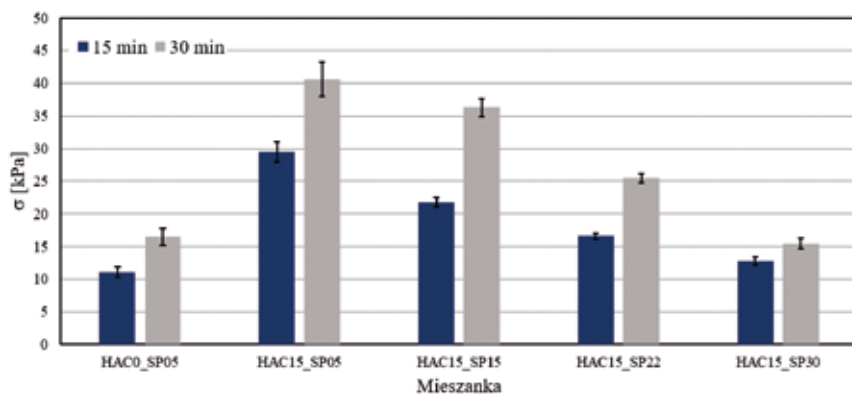
Fot. 1. Badanie wczesnej wytrzymałości na ściskanie (*green strength*): a) próbka w trakcie badania; b) próbka po zakończeniu badania



Rys. 1. Wyniki badania czasu wiązania zaczynów cementowych



Rys. 2. Wyniki badania zaprawa na stoliku rozptywu – rozptyw po 15 i 30 minutach od dodania wody do suchych składników



Rys. 3. Wyniki badania wczesnej wytrzymałości na ściskanie *green strength* badanych mieszanek

glinowego drastycznie skrócił początek czasu wiązania dla mieszanek z dodatkiem 10%, 15% oraz 20%, odpowiednio o 46,7%; 73,3% oraz 86,7%.

Wspomniany problem także znacząco oddziałuje na konsystencję określoną na stoliku rozptywu (rys. 2.). Na podstawie przeprowadzonych badań oraz literatury optymalny rozptyw pozwalający na wydruk określono na 160 ± 10 mm [10, 14, 17]. Jak widać na rys. 2., dodatek cementu glinowego do badanych mieszanek znacznie zmniejsza średnicę rozptywu mieszanki. Należy zwrócić uwagę,

że istotnym zagrożeniem jest zbyt szybkie twerdnienie mieszanki, co może doprowadzić nawet do uszkodzenia systemu pompującego mieszankę. Dla mieszanki referencyjnej (HAC0_SP05) różnica między rozptywem po 15 minutach a 30 minutach wynosi 0,8 cm, podczas gdy dla mieszanki z 20% dodatkiem cementu glinowego (HAC20_SP05) wynosi aż 3,7 cm i drugi rozptyw jest niewiele większy niż średnica stożka pomiarowego. Dla mieszanek z 10% i 15% dodatkiem cementu glinowego różnica między analizowanymi wartościami jest porównywalna.

Zastąpienie części cementu portlandzkiego cementem glinowym powoduje istotne skrócenie czasu wiązania.

W odniesieniu do czasu wiązania zaczynów, zaczyny Z1_HAC10_SP05 oraz Z3_HAC20_SP05 charakteryzują się odpowiednio początkiem i końcem czasu wiązania na poziomie 120–160 minut oraz 30–40 minut, co byłoby zbyt wolno lub zbyt szybko zachodzącym procesem. Na podstawie powyższych wniosków wskazano mieszankę z 15% dodatkiem cementu glinowego (HAC15_SP05) i to tę mieszankę wybrano do dalszej optymalizacji składu.

Wybraną mieszankę z 15% dodatkiem cementu glinowego modyfikowano superplastyfikatorem w celu uzyskania wymaganego rozptywu. Badania wykazały, że dodatek plastyfikatora w ilości $2,25 \text{ kg/m}^3$ pozwolił na uzyskanie rozptywu równego 16,7 cm po 15 minutach od dolania wody do suchych składników. Dodatkowo wykonano badania wczesnej wytrzymałości na ściskanie (rys. 3.). Uzyskane wyniki wykazały, że dodatek w postaci 15% cementu glinowego znacząco wpływa na wczesną wytrzymałość (wzrost o 165,8% w stosunku do mieszanki bazowej). Ponadto dodatek superplastyfikatora pozwala na regulację wartości wczesnej wytrzymałości. Należy zauważyć, że dla mieszanki modyfikowanej cementem glinowym i jednocześnie spełniającej wymagania dotyczące rozptywu wg normy [13] (HAC15_SP22) wartość wczesnej wytrzymałości (*green strength*) jest o 49,5% większa niż dla mieszanki bazowej.

Przeprowadzono kontrolne badania wczesnej wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach. Wyniki nie wykazywały statycznie istotnych różnic między zbadanymi zaprawami i mieściły się w granicach $55 \pm 5 \text{ MPa}$, co odpowiada wytrzymałości stwardniałej mieszanki bazowej.

Wnioski

Badania wykazały możliwość wykorzystania cementu glinowego w technologii druku 3D, z przeprowadzonych doświadczeń wynika szereg wniosków:

- Zastąpienie części cementu portlandzkiego cementem glinowym powoduje istotne skrócenie czasu wiązania (o 86,7% w przypadku zastąpienia cementu portlandzkiego cementem glinowym w ilości 20%). Takie skrócenie czasu wiązania ogranicza możliwość stosowania tych mieszanek do druku 3D ze względu na problem z ich pompowością.
- Wykazano, że optymalna mieszanka ze względu na czas wiązania i stosunkowo niewielki spadek właściwości

reologicznych w czasie to mieszanka zawierająca 15% dodatku cementu glinowego (HAC15_SP05). Dalsza modyfikacja mieszanki plastyfikatorem w celu uzyskania rozptywu 160 ± 10 mm zalecanego przez literaturę [10, 14, 17] i doświadczenia własne spowodowała konieczność zwiększenia ilości superplastyfikatora o 450%.

- Dla wybranych mieszanek modyfikowanych cementem glinowym potwierdzono, że wartość wczesnej wytrzymałości (*green strength*) jest odpowiednia dla możliwości wydruku i większa niż dla mieszanki bazowej. Dla potencjalnie najlepszej mieszanki do druku HAC15_SP22 wartość wczesnej wytrzymałości jest o 49,5 % wyższa niż dla stwardniałej mieszanki referencyjnej.
- Zmiana spoiwa na HAC w ilości do 20% nie powoduje istotnych statystycznie zmian wczesnej wytrzymałości zaprawy na ściskanie po 7 dniach względem stwardniałej mieszanki referencyjnej stosowanej do druku 3D [10].

- Zastosowanie metod pompowania opisanych przez zespół ZUT [5, 7, 10] przy stosowaniu mieszanek z dodatkiem HAC mogłoby spowodować rozpoczęcie procesu twardnienia w mieszalniku pompy. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być zmiana sposobu podawania mieszanki (zastosowanie dozowania wody podczas podawania suchego materiału).

Przedstawione w artykule prace stanowią wstępne badania dotyczące użycia cementu glinowego w kompozytach do druku 3D. Ta metoda modyfikacji kompozytów przeznaczonych do druku 3D może być zastosowana w przypadku wydruków smukłych struktur w krótkim czasie. Dalsze badania zakładają weryfikację możliwości zastosowania mieszanek do realnego wydruku smukłych kolumn.

Bibliografia

- [1] Hoffmann M., Żarkiewicz K., Zieliński A., Skibicki S., Marchewka Ł., Foundation Piles-A New Feature for Concrete 3D Printers. „Materials” 2021;14(10). <https://doi.org/10.3390/ma14102545>.
- [2] Puzatova A., Shakor P., Laghi V., Dmitrieva M., Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. „Buildings” 2022;12(11):2023. <https://doi.org/10.3390/buildings12112023>.
- [3] Ma G., Wang L., A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. „Front. Struct. Civ. Eng.” 2017;22(6):673. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0430-x>.
- [4] Skibicki S., Ocena jakości ściany wykonanej w technologii druku 3D za pomocą systemu analizy obrazu. „Inżynieria i Budownictwo” 2022;3-4:124-7.
- [5] 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>.
- [6] Skibicki S., Kaszyńska M., Federowicz K., Techman M., Zieliński A., Olczyk N. et al. Druk 3D kompozytów betonowych metodą przyrostową – doświadczenia zespołu szcześcińskiego. „Inżynieria i Budownictwo” 2021;7(7):328–33.
- [7] Kaszyńska M., Hoffmann M., Skibicki S., Zieliński 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>.
- [8] Skibicki S., Kaszyńska M., Problemy w technologii druku 3D kompozytów cementowych. „Budownictwo, Technologie, Architektura” 2022;2(98):56–9.

[9] Das A., Reiter L., Mantellato S., Flatt R.J., Early-age rheology and hydration control of ternary binders for 3D printing applications. „Cement and Concrete Research” 2022;162(1):107004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107004>.

[10] Skibicki S., Kaszyńska M., Wahib N., Techman M., Federowicz K., Zieliński A. et al. Properties of Composite Modified with Limestone Powder for 3D Concrete Printing. In: Bos FP, Lucas SS, Wolfs R.J.M., Salet TAM, editors. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing; 2020, p. 125–134.

[11] Skibicki S., Putorak M., Kaszyńska M., Hoffmann M., Ekiert E., Sibera D., The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar. „Construction and Building Materials” 2022;335(2):127443. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127443>.

[12] PN-EN 196-3: 2016. Metody badania cementu. Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości.

[13] PN-EN 12350-2:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[14] Casagrande L., Esposito L., Menna C., Asprone D., Aurichio F., Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete. „Construction and Building Materials” 2020;245:118286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118286>.

[15] Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M., Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modeling and experimental testing. „Cement and Concrete Research” 2018;106:103–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>.

[16] Ivanova I., Mechtcherine V., Possibilities and challenges of constant shear rate test for evaluation of structural build-up rate of cementitious materials. „Cement and Concrete Research” 2020;130:105974. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105974>.

[17] Cho S., Kruger J., Bester F., van den Heever M., van Rooyen A., van Zijl G., A Compendious Rheo-Mechanical Test for Printability Assessment of 3D Printable Concrete. In: Bos FP, Lucas SS, Wolfs R.J.M., Salet TAM, editors. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing; 2020, s. 196–205.

DOI: 10.5604/01.3001.0053.8467

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Olczyk Norbert, Gierszewska Natalia, Skibicki Szymon, 2023, Zaprawa modyfikowana cementem glinowym jako alternatywa dla standardowych materiałów używanych do druku 3D, „Builder” 9 (314). DOI: 10.5604/01.3001.0053.8467

Streszczenie: Druk 3D betonu to innowacyjna technologia, która rewolucjonizuje branżę budowlaną. Ten zaawansowany proces pozwala na precyzyjne i zautomatyzowane wytwarzanie trwałych struktur z betonu, wykorzystując spoiwa na bazie cementu do druku. Druk 3D betonu oferuje wiele zalet. Po pierwsze, dzięki temu procesowi możliwe jest tworzenie niestandardowych kształtów i wzorów, które są trudne do osiągnięcia tradycyjnymi metodami budowlanymi. Ponadto, dzięki precyzyjnemu sterowaniu drukiem 3D można zminimalizować zużycie materiałów, co przekłada się na oszczędność kosztów i ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Cement glinowy jako składnik spoiwa powoduje znaczne przyspieszenie czasu wiązania, co może być przydatne w technologii druku 3D. Przedstawione w artykule badania analizują możliwość wykorzystania cementu glinowego do modyfikacji mieszanki betonowej przeznaczonej do druku. Badania wykazały, że przy odpowiedniej kompozycji superplastyfikatora i spoiwa możliwe jest osiągnięcie wymaganych czasów wiązania.

Słowa kluczowe: druk 3D, beton, zaprawa, cement glinowy, beton drukowany

Dodatek cementu glinowego znacznie zwiększa wczesną wytrzymałość mieszanki (green strength).

Abstract: 3D PRINTED MORTAR WITH HIGH ALUMINA CEMENT AS ALTERNATIVE SOLUTION FOR STANDARD MATERIALS USED FOR 3D PRINTING. 3D printing of concrete is an innovative technology that is revolutionizing the construction industry. This advanced process allows for the precise and automated production of durable concrete structures using cement-based binders for printing. 3D concrete printing offers many advantages. Firstly, thanks to this process, it is possible to create custom shapes and patterns that are difficult to achieve with traditional construction methods. Additionally, through precise control of 3D printing, the use of materials can be minimized, resulting in cost savings and a reduced negative environmental impact. Moreover, alumina cement as a binder component significantly accelerates the setting time, which can be useful in 3D printing technology. The research presented in the article analyzes the possibility of using alumina cement to modify the concrete mix intended for printing. Studies have shown that with the appropriate composition of superplasticizer and binder, it is possible to achieve the required setting times.

Keywords: 3DCP, 3D concrete, 3D mortar, high alumina cement, calcium alumina cement