

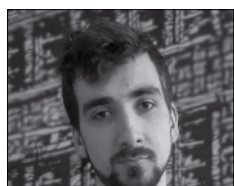
Projektowanie i analiza mieszanki betonowej zawierającej kruszywo po obróbce strumieniowo-ściernej (garnet) w technologii druku 3D



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



ALICJA ŻYGADŁO
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0009-0001-9198-3094



DARIUSZ GÓRNOSTAJ
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0009-0009-0673-3030



MAGDALENA ŁABECKA
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0009-0002-6132-8475



KAMIL ORZELSKI
ZUT w Szczecinie
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0009-0007-2807-2988

Artykuł dotyczy zastosowania odpadów garnetu pochodzących z obróbki strumieniowo-ściernej w mieszance przeznaczonej do druku 3D. Autorzy określili podstawowe parametry mechaniczne zmodyfikowanej mieszanki oraz wydrukowali obiekt małej architektury, który potwierdził możliwość zastosowania nowego materiału do druku 3D.

Druk 3D kompozytów cementowych rozwinął się bardzo mocno w ciągu ostatnich kilku lat [1–5]. Nowe osiągnięcia w zakresie różnych metod drukowania konstrukcji [5, 6] oraz w zakresie modyfikacji materiałowej kompozytu [6] pozwalają na zastosowanie tej technologii do wykonywania nawet bardzo złożonych form geometrycznych. Innym istotnym czynnikiem jest zaprojektowanie mieszanki mogącej wpisać się w ideę zrównoważonego rozwoju. Kompozyty na spoiwie cementowym stosowane w druku 3D ze względu na wysokie wymagania dotyczące reologii mieszanki mają dużą ilość spoiwa [7–9]. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że sam proces pompowania znacząco ogranicza udział kruszywa grubego, co przyczynia się do większego udziału kruszywa drobnego w mieszance [10, 11]. Ten problem wynika z dostępnych pomp, które zapewniają ciągłe podawanie materiału [1, 6]. Duża ilość cementu w mieszankach, którego produkcja powoduje emisję CO₂ [12], oraz konieczność

stosowania drobnego kruszywa naturalnego, którego zasoby się kończą [13], powoduje, że mieszanki przeznaczone do druku 3D w kontekście materiałowym powodują negatywne oddziaływanie na środowisko [7]. W celu zminimalizowania negatywnego wpływu na środowisko kompozytów przeznaczonych do druku 3D możliwa jest modyfikacja spoiwa [14] lub modyfikacja kruszywa [7, 15].

Literatura przedmiotu wskazuje na możliwość wykorzystania odpadów materiałów ściernych do druku 3D. Do badań wykorzystano kruszywo po cięciu strumieniem wody materiałów budowlanych. Badania wykazały, że zastosowane kruszywo może zostać użyte do druku 3D kompozytów cementowych.

Metodyka badań Materiały i zaprojektowane mieszanki betonowe

W badaniach wykorzystano kruszywo z recyklingu stanowiące odpad po obróbce strumieniowo-ściernej (zużyty garnet).

Kruszywo pochodzi od szczecińskiej firmy ORING-GUMY Matgorzata Aneta Matyja. Materiał był wykorzystywany jako ścierniwo do cięcia wodą głównie metali i materiałów z tworzywa sztucznego. Kruszywo miało gęstość równą 4 g/cm^3 oraz uziarnienie w zakresie 0–1 mm. Pierwotny materiał przed poddaniem procesu obróbki strumieniowo-ścierniej klasyfikuje się jako garnet, czyli ścierniwo, które pod względem chemicznym jest kruszywem krzemianowym o ogólnym składzie chemicznym $\text{A}_3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$ (A: Ca, Mg, Fe lub Mn; B: Al, Cr, Fe lub Ti) [16]. Na podstawie badań metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) [15] zastosowany w niniejszych badaniach garnet po zużyciu podczas obróbki strumieniowo-ścierniej zawierał głównie almandyn oraz w mniejszych ilościach andradyt, ilmenit oraz kwarc. Dodatkowe dane na temat zastosowanego materiału zostały przedstawione w pracy [15].

Zaprojektowano trzy mieszanki (tab. 1). M0 jako mieszankę referencyjną bez dodatku kruszywa recyklingowego oraz mieszanki M25 i M50 zawierające odpowiednio 25% oraz 50% kruszywa po obróbce strumieniowo-ścierniej. Ze względu na różnice gęstości między kruszywem naturalnym ($2,65 \text{ g/cm}^3$) oraz kruszywem recyklingowym (4 g/cm^3) zamianę kruszywa wykonano objętościowo. Dla wszystkich mieszanek stosunek wody do spoiwa był stały i wynosił 0,27. W celu uzyskania odpowiednich parametrów reologicznych pozwalających na wydruk mieszanki dodawano superplastyfikator (szczegółowy opis w punkcie *Zakres badań*). Gęstości stwardniałego materiału wynosiły dla M0, M25 oraz M50 odpowiednio 2169 kg/m^3 , 2386 kg/m^3 oraz 2546 kg/m^3 .

Zakres badań

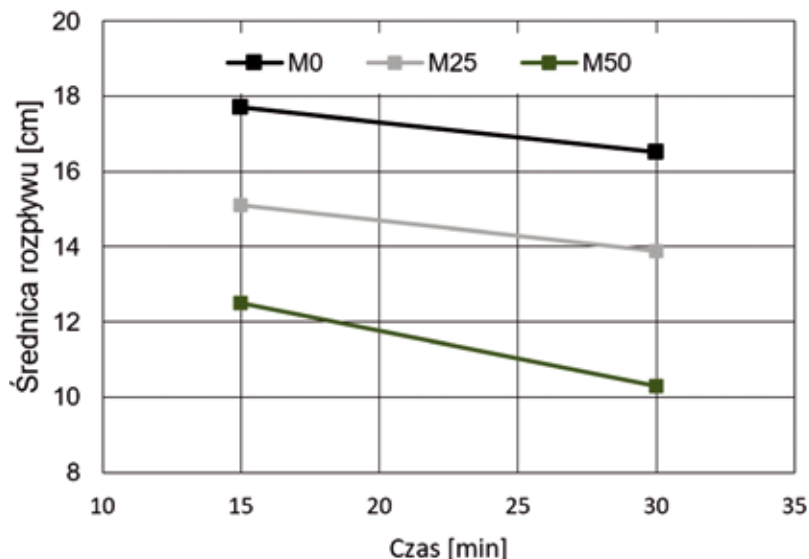
W ramach prac badawczych dotyczących dostosowania mieszanki z kruszywem po obróbce strumieniowo-ścierniej do druku 3D wykonano podstawowe badania reologiczne, badania parametrów mechanicznych, testy pompowności mieszanki, wydruk próbny krzesła oraz obciążenie próbne do 200 kg. Mieszanka M0, która jest znaną mieszanką dostosowaną do druku opracowaną przez szczeciński zespół [1], była modyfikowana zgodnie z tab. 1. Właściwości reologiczne mieszanki są jednymi z kluczowych parametrów pozwalających na wydruk materiału [17]. Najprostszym podstawowym badaniem do kontroli reologii w druku 3D jest rozptyw na stoliku rozptywu. Wszystkie mieszanki zostały zbadane procedurą wg normy EN 1015-3 [18] po 15 oraz 30 minutach od dolania wody do suchych składników. W celu uzyskania pożądanego rozptywu mieszanki odpowiednią modyfikowano superplastyfikatorem. Podobną procedurę zastosowały

Tab. 1. Mieszanki zastosowane w badaniach

Mieszanka	Kruszywo po obróbce strumieniowo-ścierniej [% objętościowo]	Kruszywo naturalne [% objętościowo]	Cement CEM I 42.5R [kg]	Popiół lotny [kg]	Pył krzemionkowy [kg]
M0	0	100	580	166	83
M25	25	75			
M50	50	50			



Fot. 1. Siedzisko z nogami wykonanymi w technologii druku 3D kompozytów cementowych: a) noga do siedziska podczas wydruku; b) prezentacja gotowego siedziska



Rys. 1. Rozptyw na stoliku rozptywu w czasie

inne zespoły badające druk 3D kompozytów cementowych [19, 20]. Dodatkowo w celu potwierdzenia możliwości wydruku dla każdej mieszanki podjęto próbę przepompowania jej przez pompę.

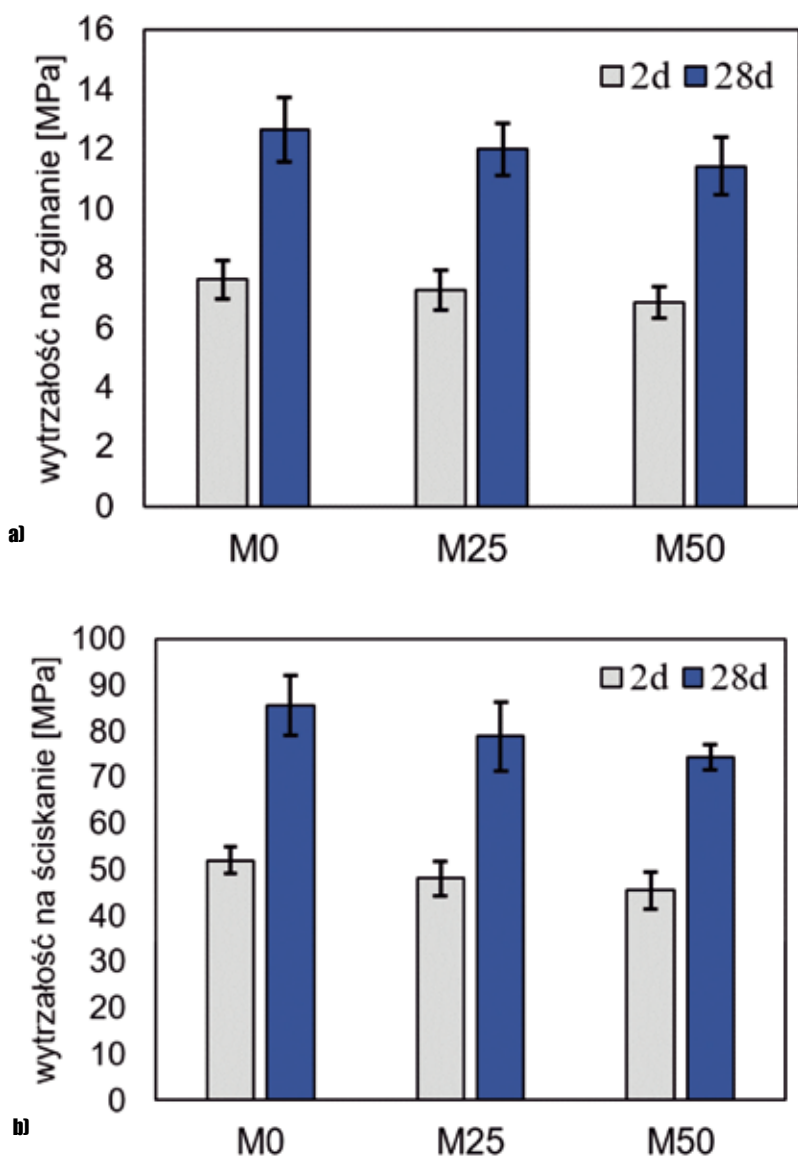
Wykonano podstawowe badania parametrów mechanicznych stwardniałego kompozytu na spoiwie cementowym. Określono wytrzymałość na zginanie na próbkach $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ oraz wytrzymałość na ścisnienie na próbkach $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}$. Badania wykonano zgodnie z procedurą określoną w normie PN-EN 1015-11 [21].

W celu weryfikacji, czy mieszanka modyfikowana kruszywem po obróbce strumieniowo-ścierniej rzeczywiście nadaje się do

druku 3D, zaprojektowano i wykonano wydruk 3D nóg do obiektu małej architektury, którym było małe siedzisko o wysokości 40 cm i wymiarach w rzucie $40 \times 40 \text{ cm}$. Siedzisko składało się z nóg wydrukowanych za pomocą robota kartezjańskiego zespolonego z pompą [17] oraz płyty siedziska wykonanego z tej samej mieszanki betonowej zbrojonej prętami kompozytowymi z włókna szklanego. Wydruk siedziska przedstawiono na fot. 1a), natomiast siedzisko po złożeniu przedstawiono na fot. 1b).

Wyniki badań i ich analiza

W kontekście właściwości reologicznych na postawie doświadczenia własnego oraz



Rys. 2. Podstawowe parametry mechaniczne wykonanych kompozytów: a) wytrzymałość na zginanie; b) wytrzymałość na ściskanie

innych dostępnych źródeł literaturowych określono przydatność do druku mieszanki dla rozptywu na stoliku rozptywu w granicach 160 ± 10 mm [19, 20, 22]. Dla znanej mieszanki bazowej uzyskano wymagany rozptyw po około 30 minutach od dolania wody do suchych składników. Dodatek kruszywa po obróbce strumieniowo-ściernej spowodował spadek rozptywu mieszanki. W celu uzyskania wymaganych właściwości zastosowano iteracyjną modyfikację mieszanki superplastyfikatorem, co jest procedurą często stosowaną dla druku 3D kompozytów cementowych [8, 23]. Dla mieszanki M25 po zwiększeniu superplastyfikatora o 25% (z $2,2 \text{ kg/m}^3$ dla M0 do $2,75 \text{ kg/m}^3$ dla M25) uzyskano satysfakcjonujące rezultaty po 15 minutach. Mieszanka M50 mimo dodatku superplastyfikatora w ilości nawet 7 kg/m^3 nie uzyskała wymaganych właściwości, a dalsza modyfikacja nie przynosiła efektów.

Dodatkowo mieszanki M0 i M25 udało się przepompować przez pompę, mieszanka M50 nie spełniła tego warunku. Rozptyw na stoliku rozptywu w czasie przedstawiono na rys. 1. Rozptyw badany w kolejnych jednostkach czasu (po 15 i 30 minutach od momentu zmieszania składników) dla wszystkich mieszanek maleje, co jest związane z twardzeniem mieszanki na spoiwie cementowym (spowodowanym reakcją hydratacji). Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że mieszanka M50 twardnieje szybciej niż mieszanki M0 i M25 (większe nachylenie krzywej na wykresie).

W kontekście właściwości mechanicznych zastosowanie kruszywa po obróbce strumieniowo-ściernej spowodowało spadek wytrzymałości kompozytu na ściskanie i zginanie po 2 i 28 dniach pielęgnacji w warunkach normowych. Porównanie wyników przedstawiono na rys. 2., gdzie podano wartość średnią

oraz zaznaczono odchylenie standardowe. W przypadku wytrzymałości na zginanie spadek wytrzymałości w stosunku do próbki referencyjnej wynosi 5,4% oraz 9,9% po 28 dniach dojrzewania odpowiednio dla M25 oraz M50. W przypadku wytrzymałości na ściskanie spadek wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania jest nieco większy i wynosi 7,8% oraz 13% odpowiednio dla kompozytów M25 i M50. Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami uzyskanymi przez inne zespoły badawcze (dla mieszanki M0 [17, 24] oraz dla podobnych kruszyw recyklingowych [16, 25]).

Na podstawie przeprowadzonych badań wykonano wydruk weryfikacyjny w technologii druku 3D. Ocenione właściwości reologiczne oraz testy pompowalności nie pozwoliły na wydruk mieszanki z 50% dodatkiem kruszywa po obróbce strumieniowo-ściernej. Do wydruku wybrano mieszankę M25 (25% kruszywa odpadowego), która spełniła warunki związane z reologią oraz miała wystarczające parametry mechaniczne. W celu dobrania parametrów druku zmieniano prędkość druku oraz wydajność pompy do uzyskania odpowiedniej szerokości. Ścieżki testowe wykonane przed docelowym wydrukiem przedstawiono na fot. 2. (dla różnych prędkości dyszy oraz ciśnienia pompy). Ostatecznie element został wykonany przy prędkości posuwu głowicy 3000 mm/min , szerokość warstwy miała 35 mm , a jej wysokość 10 mm . Wybrane ustawienia sprawiły, że proces wydruku przebiegł sprawnie, a wydrukowana mieszanka nie miała defektów jakości powierzchni [26] (fot. 1.).

Wnioski

Badania wykazały możliwość wykorzystania odpadów garnetu pochodzących z obróbki strumieniowo-ściernej w druku 3D jako substytutu kruszywa. Z przeprowadzonych doświadczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zastąpienie kruszywa drobnego kruszywem odpadowym po obróbce strumieniowo-ściernej spowodowało spadek parametrów mechanicznych stwardniałego kompozytu maksymalnie o 9,9% w przypadku wytrzymałości na zginanie oraz o 13% w przypadku wytrzymałości na ściskanie.
- Zastąpienie kruszywa materiałem recyklingowym wpłynęło negatywnie na właściwości reologiczne mieszanki. Badania wykazały, że mimo modyfikacji mieszanki dużą ilością superplastyfikatora niemożliwe było przettoczenie mieszanki, w której zastąpiono 50% kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu.
- Sukcesem zakończył się wydruk nóg do siedziska przy zastosowaniu mieszanki, w której zastąpiono 25% kruszywa naturalnego kruszywem po obróbce strumieniowo-ściernej. Siedzisko przeszło także testy użytkowania (obciążenie próbne do 200 kg).



Fot. 2. Test doboru odpowiednich parametrów druku

• Badania pokazały, że możliwe jest zastąpienie pewnej ilości kruszywa naturalnego kruszywem odpadowym, co stanowi możliwość ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko produkcji tego typu kompozytów.

Przedstawione w artykule prace stanowią wstępne badania dotyczące zastosowania kruszyw z recyklingu w druku 3D kompozytów cementowych. Dalsze badania będą dotyczyły optymalizacji składu mieszanki do druku 3D w celu utylizacji w niej większej ilości kruszywa odpadowego.

Bibliografia

- [1] Skibicki S., Kaszyńska M., Federowicz K., Techman M., Zieliński A., Olczyk N. et al., Druk 3D kompozytów betonowych metodą przystosową – doświadczenia zespołu szczecińskiego, „Inżynieria i Budownictwo” 2021;77(7):328–33.
- [2] 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>.
- [3] Wu P., Wang J., Wang X., A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry, „Automation in Construction” 2016;68:21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>.
- [4] Ibrahim I., Eltarabishi F., Abdalla H., Abdallah M., 3D Printing in Sustainable Buildings: Systematic Review and Applications in the United Arab Emirates, „Buildings” 2022;12(10):1703. <https://doi.org/10.3390/buildings12101703>.
- [5] 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>.
- [6] Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J., 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, „Cement and Concrete Research” 2018;112:37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- [7] Kaszyńska M., Skibicki S., Hoffmann M., 3D Concrete Printing for Sustainable Construction, „Energies” 2020;13(23):6351. <https://doi.org/10.3390/en13236351>.
- [8] 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>.
- [9] 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.
- [10] Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J., Digital Concrete: A Review, „Cement and Concrete Research” 2019;123:105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>.
- [11] Mohan M.K., Rahul A.V., Schutter G. de, van Tittelboom K., Early age hydration, rheology and pumping characteristics of CSA cement-based 3D printable concrete, „Construction and Building Materials” 2021;275(2):122136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122136>.
- [12] Pacheco J., Santos K., Sikora P., Skibicki S., Techman M., Federowicz K. et al., Recycled Aggregates and 3D printing technology: production requirements, printability and way forward (Recycl3D project report D.1.1.) (1.0). Zenodo 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7866197>.
- [13] Safiuddin M., Alengaram U.J., Rahman M.M., Salam M.A., Jumaat M.Z., Use of recycled concrete aggregate in concrete:

a review, „Journal of Civil Engineering and Management” 2013;19(6):796–810. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>.

[14] Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J. et al., A systematic review of 3D printable cementitious materials, „Construction and Building Materials” 2019;207:477–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>.

[15] 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>.

[16] Muttashar H.L., Ariffin M.A.M., Hussein M.N., Hussin M.W., Ishaq S.B., Self-compacting geopolymer concrete with spent garnet as sand replacement, „Journal of Building Engineering” 2018;15(4):85–94. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.10.007>.

[17] 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>.

[18] EN 1015-3:2000. Methods of test for mortar for masonry – part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table).

[19] 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>.

[20] 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 F.P., Lucas S.S., Wolfs R.J.M., Salet T.A.M., editors. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing; 2020, p. 196–205.

[21] EN 1015-11:2020. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

[22] 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 F.P., Lucas S.S., Wolfs R.J.M., Salet T.A.M., editors. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing; 2020, p. 125–134.

[23] Cuevas K., Chougan M., Martin F., Ghaffar S.H., Stephan D., Sikora P., 3D printable lightweight cementitious composites with incorporated waste glass aggregates and expanded microspheres – Rheological, thermal and mechanical properties, „Journal of Building Engineering” 2021;44:102718. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102718>.

[24] Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. et al., Hardened properties of high-performance printing concrete, „Cement and Concrete Research” 2012;42(5):558–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.

[25] Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y., Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand, „Cement and Concrete Composites” 2020;113(3):103724. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103724>.

[26] Skibicki S., Ocena jakości ściany wykonanej w technologii druku 3D za pomocą systemu analizy obrazu, „Inżynieria i Budownictwo” 2022;3-4:124–7.

DOI: 10.5604/01.3001.0053.7760

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Skibicki Szymon, Żygadło Alicja, Górnostaj Dariusz, Łabecka Magdalena, Orzelski Kamil, 2023, Projektowanie i analiza mieszanki betonowej zawierającej kruszywo po obróbce strumieniowo-ściernej (garnet) w technologii druku 3D, „Builder” 9 (314). DOI: 10.5604/01.3001.0053.7760

Streszczenie: Rozwój technologii druku 3D pozwala na zastosowanie go w wielu obszarach budownictwa, w tym w zakresie małej architektury. Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie w technologii druku 3D obiektu małej architektury – siedziska, z zastosowaniem mieszanki betonowej, w której kruszywo naturalne zostało zastąpione odpadem garnetu pochodzącym z obróbki strumieniowo-ściernej. Dotychczasowe prace w zakresie wykorzystania tego kruszywa pokazują, że istnieje możliwość jego utylizacji w druku 3D kompozytów cementowych. W celu realizacji zadania wykonano podstawowe badania materiałowe dla mieszanki o zawartości kruszywa z recyklingu do 50%. Kolejnym krokiem było wykonanie modelu siedziska i ustalenia potrzebnych wymiarów przekrojów dla prawidłowego funkcjonowania elementu. Finalnie wykonano siedzisko w technologii druku 3D. Projekt mieszanki został opracowany z myślą o wykorzystaniu odpadów, jednocześnie uwzględniając wymagania związane z drukiem betonowym w technologii 3D. Wykonanie elementu małej architektury z betonu drukowanego z kruszywem po obróbce strumieniowo-ściernej potwierdziło możliwość stosowania tej technologii. Badania stanowią wstęp do dalszych analiz uwzględniających optymalizację produktu oraz analizę jego trwałości.

Słowa kluczowe: druk 3D, beton, zaprawa, kruszywa recyklingowe, beton drukowany

Abstract: DESIGN AND ANALYSIS OF 3D CONCRETE MIX WITH RECYCLED AGGREGATE. The development of 3D printing technology allows it to be used in many areas of construction. The work is aimed to design and manufacture a small architectural object using 3D printing technology, in the form of a seat. It is going to be made of a concrete mixture with aggregate waste after blasting and abrasive treatment (spent garnet). Previous work on this aggregate shows that it is possible to use it in the 3D printing of cement composites. Basic material tests were carried out for mixtures with recycled aggregate content of up to 50% to carry out the task. The next step was to make a model of the seat and determine the necessary cross-sectional dimensions for the correct functioning of the element. Finally, the seat was made using 3D printing technology. The mix design has been developed with waste in mind while taking into account the requirements of 3D concrete printing. The construction of an element of small architecture made of printed concrete with aggregate after blasting and abrasive treatment confirmed the possibility of using this technology. The research is a prelude to further analysis, including product optimization and durability analysis.

Keywords: 3DCP, 3D concrete, 3D mortar, recycled aggregate