

ASYMETRYCZNA KRATOWNICA MOSTOWA

Wykonana w technologii druku 3D



mgr inż. Karol Kempski
ORCID: 0000-0002-1764-7869
Politechnika Śląska w Gliwicach
and Universitat Politècnica
de València

Artykuł prezentuje nowoczesną technologię druku 3D z betonu i jego integrację z *Building Information Modelling* (BIM). Technologia druku 3D została rozpowszechniona po wynalezieniu drukarki 3D.

Drukowanie 3D to „proces łączenia materiałów w celu tworzenia obiektów z modelu 3D, zwykle warstwa po warstwie, w przeciwieństwie do subtraktywnych metod produkcji, takich jak tradycyjna obróbka” [1]. Nazwa „druk 3D” często pojawia się zamiennie z *Additive Manufacturing* (AM) lub *Contour Crafting* (CC). Istnieje jednak różnica między tymi definicjami. *Additive Manufacturing* (AM) buduje obiekty 3D poprzez dodawanie warstwa po warstwie materiału: plastiku, metalu lub betonu, natomiast *Contour Crafting* to metoda druku 3D pozwalająca budować konstrukcje w skali architektonicznej. Zazwyczaj drukarki 3D drukują duże obiekty za pomocą dźwigu lub ramienia zrobotyzowanego [1]. Do niedawna drukarki 3D nie były związane z branżą budowlaną i betonem, lecz z materiałami polimerowymi lub ceramicznymi, łatwo dostępnymi dla drukarek w domach. Architekci chcą mieć coraz więcej swobody w kształtowaniu konstrukcji, a budowlancy skarżą się na brak siły roboczej. Okazuje się, że technologia AM może stać się rozwiązaniem tych problemów. Co więcej, jest to tańszy, szybszy oraz bezpieczniejszy sposób budowy niż tradycyjny. Ta innowacyjna technologia jest wciąż w fazie testów i staje w obliczu wielu problemów oraz wyzwań.

Integracja między BIM a technologią druku 3D

Obiekty 3D można drukować przy pomocy technologii BIM. Integracja BIM z drukiem 3D jest nowatorskim pomysłem w branży budowlanej w porównaniu z tradycyjnymi tech-

nikami budowlanymi. Poza wieloma zaletami i korzyściami tej nowej technologii istnieją oczywiście pewne obawy, ponieważ nadal ma ona wiele ograniczeń. BIM jest jądrem przekształcenia modelu CAD w drukowany obiekt, zapewniającym oprogramowanie do modelowania i drukowania. Wpływ BIM na różne fazy zautomatyzowanego budownictwa wymaga wielu ulepszeń oraz modyfikacji. Niektóre z głównych problemów w tej dziedzinie, jakie należy rozwiązać, to brak interoperacyjności danych między BIM a zautomatyzowanymi systemami budowlanymi.

Planning and Operations Control Software for Automated Construction (POCSAC)

Jednym ze sposobów na pojawiające się trudności jest system POCSAC. Rozwiązanie zaproponowane przez amerykańskich badaczy bazuje na kontroli operacji budowlanych. Jest to zintegrowany z BIM system zdolny do interakcji, analizy i sterowania elementami zrobotyzowanego systemu konstrukcyjnego [5]. Aby w pełni wykorzystać potencjał modelowania informacji o budynku w zautomatyzowanej konstrukcji, modele BIM należy rozszerzyć, wprowadzając nowe dane oraz parametry do modeli [5]. Popularny Revit jako platforma BIM nie zapewnia wszystkich parametrów wymaganych w druku 3D.

Sztuczna inteligencja

Kolejny sposób integracji zaprezentował Kang Tan z Dalian University of Technology. Jego rozwiązanie polega na zaangażowaniu sztucznej inteligencji w BIM i technolo-

gię druku 3D, aby rozwiązać problemy związane z tą raczkującą techniką budowania. Sztuczna inteligencja (AI), czasami nazywana inteligencją maszynową, jest formą inteligencji wykonywaną przez maszyny. Maszyny lub roboty wykorzystują logikę do formułowania wniosków z podanych informacji i są w stanie zdobywać, uczyć się oraz wykorzystywać informacje. W rzeczywistości mogą wykonywać skomplikowane zadania. Będzie to doskonałe narzędzie w złożonym procesie druku 3D, a AI poprawi wydajność procesu. Sztuczna inteligencja może usprawnić proces drukowania i uniknąć błędów[6].

Studium badawcze

Podjęty przez autora projekt przewidywał wykonanie asymetrycznej kratownicy mostowej w technologii druku 3D. Inspiracją do zbudowania asymetrycznej kratownicy był most Alfenz Bridge w Lorüns w Austrii. Wybudowany w 2010 roku obiekt ma długość 38,3 m i został zaprojektowany przez Bernharda oraz Stephana Marte. Plan zakładał druk w skali mini (1:19) kratownicy o wymiarach: 200 cm rozpiętości, 40 cm wysokości i 9 cm szerokości. Do projektu został użyty mocny beton HPC, który jest patentem zaprojektowanym w UPV. Ten rodzaj betonu wraz ze szklanymi prętami polimerowymi, służącymi jako wzmocnienie, może stworzyć innowacyjną i trwałą strukturę. Głównym celem badania było przeanalizowanie wydrukowanego obiektu z bardziej zaawansowanym kształtem pod względem wytrzymałości i jakości. Obliczenia analityczne wydrukowanych elementów nośnych nie są



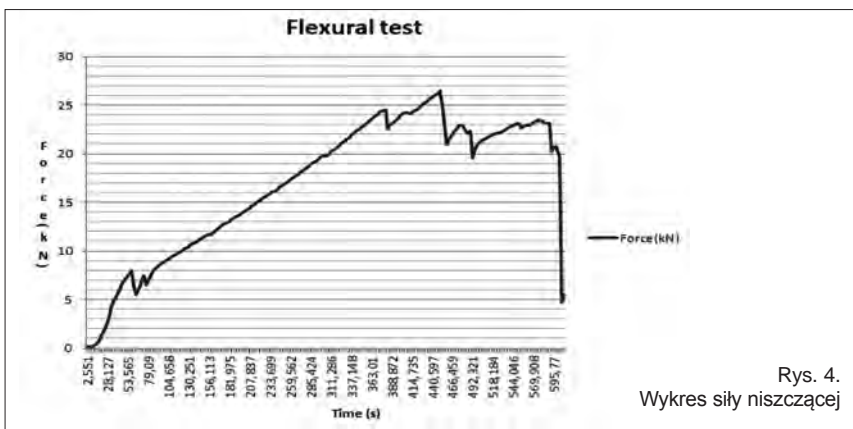
Rys. 1. Proces drukowania



Rys. 2. Mieszanka betonowa musi być poddana ciągłym wibracjom



Rys. 3. Kratownica z dołączonymi sensorami przygotowana do testu wytrzymałości na zginanie



Rys. 4. Wykres siły niszczejcej

opracowane, a porównanie testów laboratoryjnych z wynikami oprogramowania może dać ważne informacje.

Składniki użytego betonu wysokiej wytrzymałości to m.in.:

- włókna szklane – krótkie włókna, mniejsze niż 20 mm długości;
- cement – został użyty cement CEM I Low-Alkali Portland o wytrzymałości klas 42,5 R („R” oznacza Rapid – szybko wiążący, zasadnicze znaczenie ma wysoka odporność na siarczany i niskie ciepło hydratacji (HS/NA) cementu).

Wraz z przygotowaniem mieszanki betonowej i drukowaniem kratownicy utworzono próbki betonu w specjalnych formach do badań. W teście wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach próbki osiągnęły 60 MPa, a po 28 dniach 70 MPa.

Do zbrojenia również wybrano innowacyjny materiał – pręty polimerowe z włókna szklanego (GFRP), Ø10. Obiekty wykonane przez drukarkę 3D mają wyróżniającą się warstwową strukturę, która umożliwi penetrację wody w szczeliny. Jest to realne niebezpieczeństwo korozji w przypadku konwencjonalnego zbrojenia prętami stalowymi, co skutkuje obniżeniem trwałości. Pręty FRP są niekorozyjne i przeważnie mają większą wytrzymałość niż stalowe.

Proces drukowania odbył się 18 stycznia 2019 roku w laboratorium UPV. Oprócz przygotowania mieszanki betonowej, zbrojenia i oprogramowania wykonano również kalibrację drukarki i co ważne, oczyszczono miejsca, w którym miało się odbywać drukowanie 3D. Drukarka 3D musi mieć wolną przestrzeń do poruszania się we wszystkich osiach XYZ. Specjalna laminowana drewniana powierzchnia, najlepiej szalunek, która jest pokryta smarem, powinna znajdować się pod drukarką. Rozsądne i ekonomiczne jest zaimprovizowanie drukowania bez betonu w celu obserwacji, czy robot porusza się prawidłowo. Gdy odpowiednia ilość betonu jest przygotowana, urządzenie może rozpocząć drukowanie. Ze względu na konsolidację mieszanka betonowa musi być stale wibrowana. Betoniarzka nie była dostępna, a ktoś musiał kontrolować drukarkę 3D i wibrator pograżalny, dlatego do wydrukowania obiektu potrzeba co najmniej 2–3 osób.

Badanie zginania kratownicy odbyło się 29 stycznia 2019 r. Wykonano monolityczne betonowe podpory. Głowicę urządzenia badawczego przyłożono 20 cm od środka kratownicy. Maszyna poruszała się z prędkością 1 mm/min. Maksymalna siła ugięcia do momentu zniszczenia wyniosła 26,532 kN po 4,5 min i 7,57 mm.

Ze względu na dużą siłę zewnętrzną, która spowodowała naprężenie, pojawiły się pęknięcia w kratownicy. HPC ma wysokiej poziom wytrzymałości i może przekazywać naprężenia nawet po pęknięciach za

Rys. 5. Zarysowanie górnego pasa



pomocą włókien. Włókna, w ilości około 120 kg/m, pochłaniają energię i spowalniają wzrost zarysowania aż do wyrwania włókien z matrycy.

Stosując pręty GFRP, można zyskać lepszą wydajność na rozciąganie betonu o zdolności do odkształcenia około 0,8% i wytrzymałości na pęknięcie do 19 MPa. Proces pęknięcia rozpoczął się, gdy wartość siły skoncentrowanej osiągnęła 14,3 kN. Zniszczenie rozciąganych elementów HPC występuje głównie wtedy, gdy włókno zaczyna wysuwać się z macierzy HPC. Asymetryczny kształt kratownicy spowodował, że odkształcenie i aglomeracja pęknięć miała miejsce na prawej stronie, podczas gdy po lewej stronie nie było znaczących pęknięć lub deformacji.

Do analizy kratownicy w Robocie został przyjęty niestandardowy model. Założono, że pręty kratownicy mają różne profile. W ścisłanych elementach zaimplementowano profile betonowe, a w rozciąganych pręty GFRP. Obciążenie wyniosło 27 kN i było przyłożone 20 cm na lewo środka symetrii. Właściwości betonu zostały wybrane po 28 dniach, w teście wytrzymałości na ściskanie beton osiągnął 70 MPa. Ten model i wyniki badań pomogły w lepszym zrozumieniu analizy nieliniowej.

Model FE został przygotowany w oprogramowaniu Dlubal RFEM. Dla metody analizy wybrano dużą analizę deformacji. Maksymalne (z laboratorium) obciążenie do złamania wynosiło 27 kN. W analizie zastosowano obciążenie zewnętrzne do kratownicy z betonu mającego 28 dni i utwardzanego przez 7 dni. Ponadto przetestowano różne wysokości warstw, 30 mm i 20 mm, które pomnożone przez 3 warstwy równają się 9 cm i 6 cm szerokości modelu kratownicy. W laboratorium pierwotnie wybrano szerokość 6 cm.

Aby utworzyć model możliwie podobny do tego z laboratorium, szasowano połączenia pasów i krzyżulców.

Kratownica wydrukowana w laboratorium dała nam informacje na temat zastosowania druku 3D jako elementu nośnego. Dokładna analiza statyczna 3D obiektu drukowanego przez konwencjonalne oprogramowanie analityczne jest bardzo trudna. Strukturę zbudowaną z warstw można obliczyć tylko w uproszczeniu. Uproszczenie ma wiele niedoskonałości, na przykład siła wiązania między warstwami. Dwa modele zostały zaprojektowane przez komercyjne oprogramowanie, a wyniki testu na zginanie w laboratorium w Walencji dały nam duże podobieństwo z wynikami ustalonej metody analitycznej. Porównanie modeli z Robota i Dlubal powinno być przeprowadzone bez ignorowania wielkiego uproszczenia, jakim jest model prętowy w Robocie.

W rzeczywistości wyniki analityczne otrzymane z programu Dlubal są zbliżone do rzeczywistego modelu i zniszczenia go w laboratorium. Dodatkowe obliczenia modelu wydrukowanego z wysokością warstwy 20 mm mają bardzo podobne wyniki sił i naprężeń, co wskazuje, jak ważne jest zbrojenie z prętów GFRP.

Istotą druku 3D nie było drukowanie nośnych elementów konstrukcyjnych, ale szybkie i łatwiejsze budowanie domów. Praca z drukarką betonową 3D oraz profesjonalną firmą Bemore3D pokazała potencjał, ale także problemy, które niesie ze sobą ten specyficzny rodzaj budowania. Jakość warstw, właściwości mieszanki betonowej i położenie robota musi być pod stałą kontrolą. Wykonanie odpowiedniej mieszanki betonowej czy ogólnie zaprojektowanie jej to również trudny aspekt druku 3D. Złe umieszczenie zbrojenia przez operatora maszyny lub różni-

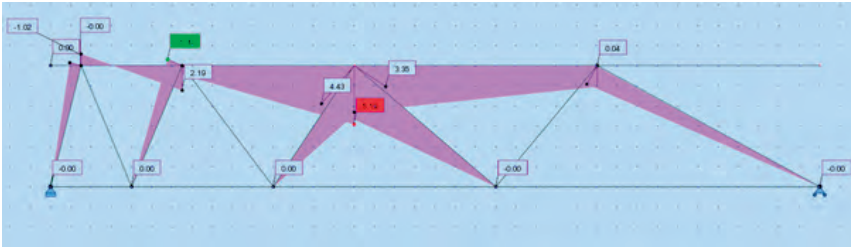
ce w betonie z każdej warstwy może spowodować dodatkowe wyboczenie i niedokładne przenoszenie sił przez brak jednoosiowości. Należy wymyślić lepsze rozwiązanie do dostarczania świeżego betonu do robota i vibracji mieszanki bez wpływu na drukowanie. Godny uwagi jest fakt, że most Alfenz w Lorüns posiada kratownicę o długości około 38,3 m, a chcieliśmy stworzyć jego kopię w skali mikro. Aby wydrukować ten obiekt w rzeczywistym rozmiarze, potrzeba by było kilka ogromnych robotów, bardziej efektywnego dostarczania mieszanki betonowej, dodatkowo wykończenia powierzchni i specjalnego kotwienia pomiędzy warstwami do uzyskania wymaganej nośności. Jediną rozsądną techniką wydaje się prefabrykacja tego elementu. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.4523

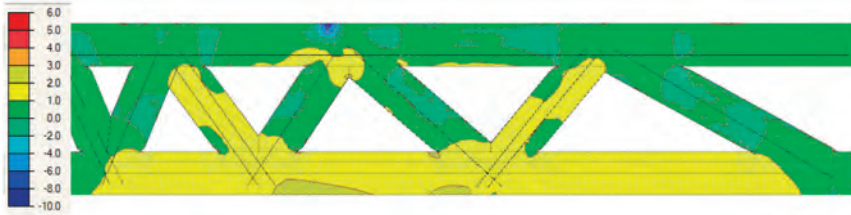
Artykuł naukowy opublikowany w ramach projektu „Wsparcie dla czasopism naukowych” dofinansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (202/WNC2019/1).

Bibliografia

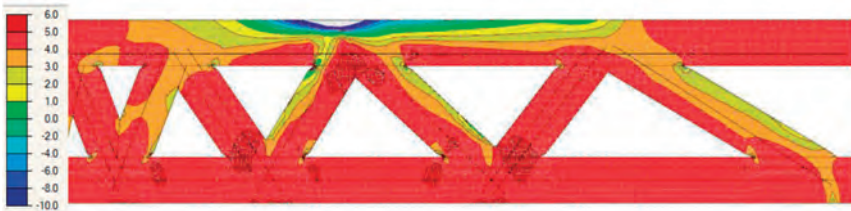
1. ASTM. ASTM F2792-10 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. American Society for Testing and Materials (ASTM).
2. <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/3d-printing-for-construction-what-is-contour-crafting/>.
3. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach Domenico Asprone a, Ferdinando Auricchio b, Costantino Menna, Valentina Mercuri b.
4. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. Bautechnik 95 (2018), Heft 4.
5. Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting Omid Davtalab, Ali Kazemian, Behrokh Khoshnevis, c.
6. <https://www.sculpteo.com/blog/2018/10/24/artificial-intelligence-and-3d-printing-meet-the-future-of-manufacturing/>.
7. https://www.bftinternational.com/en/artikel/bft_Truss_structures_made_of_reinforced-concrete_elements__2504491.html.



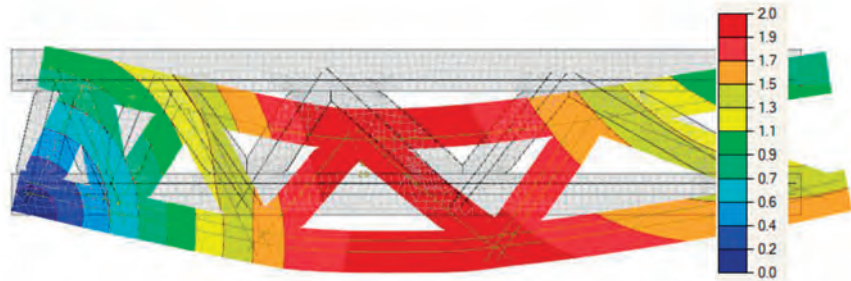
Rys. 6. Diagram M_y



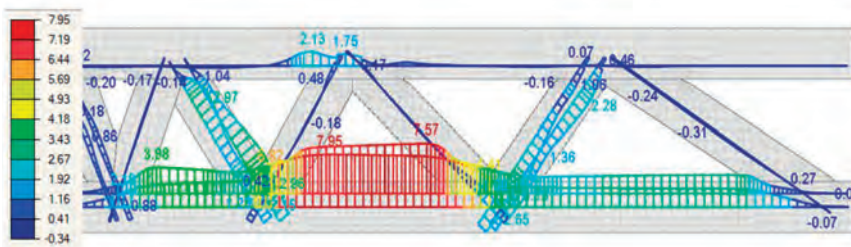
Rys. 7. σ_1 [MPa]. Wiek betonu: 28 dni



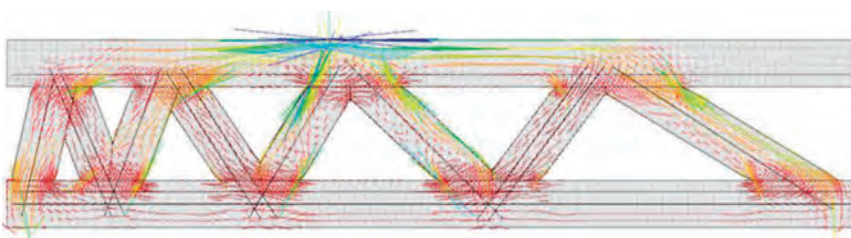
Rys. 8. σ_2 [MPa]. Wiek betonu: 28 dni



Rys. 9. Ugięcie [mm]. Wiek betonu: 28 dni



Rys. 10. Siły osiowe w prętach [kN]. Wiek betonu: 28 dni



Rys. 11. Trajektoria naprężeń

Streszczenie: Asymetryczna kratownica mostowa wykonana w technologii druku 3D. Druk 3D dokonał w ostatnim czasie rewolucji oraz rozwinął się, znajdując zastosowanie również w budownictwie, w szczególności przy budowie domów. Niniejsza praca badawcza przedstawia natomiast proces drukowania betonowego elementu nośnego, dotychczas nieanalizowanego w tej technologii. Kratownica mostowa o wymiarach 200 cm x 40 cm x 9 cm wykonana została z betonu bardzo wysokiej wytrzymałości, zbrojonego prętami polimerowymi z włókna szklanego. Została zniszczona w trzypunktowym teście zginania, a wyniki porównano z przyjętymi modelami w programach RFEM Dlubal oraz Autodesk Robot Structural Analysis. Ten wieloetapowy proces został zintegrowany z oprogramowaniem BIM, które było jądrem całego procesu. Rezultaty uzyskane przy użyciu oprogramowania analitycznego okazały się zbliżone do otrzymanych w wydrukowanym obiekcie, pomimo przyjęcia znacznych uproszczeń. Wysoki stopień skomplikowania procesu sprawia, że na tę chwilę jedyną i najrozsądniejszą techniką wydaje się prefabrykacja betonowych elementów nośnych.

Słowa kluczowe: beton wysokich wytrzymałości, BIM, druk 3D, sztuczna inteligencja, test wytrzymałości na zginanie, włókna szklane

Abstract: ASYMMETRICAL TRUSS CREATED BY THE 3D PRINTER. The 3D printing technology has made significant development in recent years, being used for the first time in the construction industry. However, apart from building households, load-bearing elements are still not tested. This study shows the process of printing the asymmetrical bridge truss out of High Performance Concrete, reinforced with glass fibre polymer bars. Truss was broken in a flexural test and models were created in analytical software. A comparison of the results from RFEM and Robot Autodesk Software and printed object showed, that despite huge simplification in calculation results are close to the real truss. The truss shape reflects on a micro-scale (200 cm x 40 cm x 9 cm) the truss bridge in Austria. The paper presents the complexity of the process and the problem of applying this technology to real conditions of the construction site nowadays. It leads to the conclusion that the prefabrication of load-bearing elements seems to be the only sensible technique.

Keywords: artificial intelligence, BIM, flexural test, glass fiber reinforced concrete, high-performance concrete, 3D printing