

Innowacyjna głowica do podawania materiału w drukarkach przyrostowych. Cz. 1. Koncepcja

The innovative 3D printer head. Part 1. Concept

ANNA RĘBOSZ-KURDEK
WACŁAW GIERULSKI
ARTUR SZMIDT*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.77>

W artykule przedstawiono koncepcję innowacyjnej głowicy do podawania materiału w drukarkach przyrostowych, wyposażonej w układ mieszający i system osłony gazowej, wykorzystywanej m.in. w budownictwie. Rozwiązanie jest objęte ochroną praw własności intelektualnej w postaci zgłoszenia wynalazku w Urzędzie Patentowym RP [1]. Omówiono wybrane osiągnięcia w zakresie zastosowania technologii druku 3D w branży budowlanej oraz innowacyjność głowicy jako wynalazku. Zaprezentowano rozwiązania konstrukcyjne jej poszczególnych elementów wraz z opisem ich działania. Koncepcja stanowi podstawę do wykonania prototypu głowicy oraz przeprowadzenia badań potwierdzających skuteczność jej działania.

SŁOWA KLUCZOWE: druk 3D, głowica, układ mieszający, system osłony gazowej, branża budowlana

The article presents the concept of 3D printer head equipped with a mixing system and a gas shield system. The solution has the protection of intellectual property rights in the form of application of the invention in the Polish Patent Office [1]. Currently used solutions and innovativeness of the head according to the invention were discussed. Constructional solutions of individual components of the head including a description of their operation were presented. The concept is the basis for research on the construction of a prototype of this head and verification of the effectiveness of its operation and functionality in laboratory conditions.

KEYWORDS: 3D print, printer head, mixing system, gas shield system, construction industry

Drukowanie 3D (drukowanie przestrzenne) jest procesem, w którym obiekty fizyczne są tworzone na podstawie modelu cyfrowego przez warstwowe nakładanie materiałów. Pierwszą oficjalną metodę druku 3D – stereolitografię (SLA) – opatentowała w 1986 r. firma 3D Systems, której założycielem był Charles Hull [2]. Przez ostatnie dekady druk 3D stał się jedną z najszybciej ewoluujących technologii. W początkowym okresie rozwoju była to technologia droga i zarezerwowana do zastosowań profesjonalnych. Korzystały z niej jedynie wielkie firmy przemysłowe lub ośrodki naukowo-badawcze. Wraz z upływem czasu druk 3D stał się zdecydowanie tańszy i bardziej dostępny dla szerokiego grona indywidualnych użytkowników. W 2006 r. zaprezentowano pierwszy prototypowy model drukarki przestrzennej do użytku domowego [3], co spowodowało, że na rynku zaczęło się pojawiać coraz więcej podmiotów wytwarzających niedrogo drukarki 3D. Dzięki stałemu rozwojowi technologia druku przestrzennego jest coraz bardziej zaawansowana i znajduje kolejne obszary zastosowania – od wytwarzania przedmiotów codziennego użytku [4, 5] i prototypów [6] po wyroby końcowe dla

branży lotniczej [4, 7, 8], motoryzacyjnej [4, 9] czy medycznej [10, 11]. Technologia druku 3D wkracza również do branży budowlanej, gdzie jest wykorzystywana zarówno na etapie tworzenia projektu architektonicznego, jak i realizacji obiektu [12]. Druk 3D staje się niezbędnym narzędziem w pracy architektów, umożliwiającym odpowiednie zaprezentowanie projektów potencjalnym klientom. Na drukarce 3D można w szybki i tani sposób przygotować fizyczny model obiektu w odpowiedniej skali i zgodnie z dokumentacją techniczną (z precyzyjnym odtworzeniem wszystkich detali). Technologia ta przydaje się także w fazie realizacji obiektu budowlanego – przy tworzeniu monolitycznych konstrukcji bezpośrednio na placu budowy [13] oraz prefabrykatów w hali produkcyjnej, które następnie są przewożone na miejsce budowy w formie gotowej do montażu [14]. Wykorzystanie drukarek 3D w tym zakresie może znacznie usprawnić proces inwestycji dzięki skróceniu czasu wykonania obiektu, a to przekłada się na niższe koszty. Ponadto dzięki tej metodzie w procesie budowy wytwarza się mniej odpadów i pyłu w porównaniu z tradycyjnymi metodami. Jest to niezwykle istotny aspekt, ponieważ we współczesnym, innowacyjnym budownictwie duży nacisk kładzie się właśnie na opracowywanie rozwiązań sprzyjających ochronie środowiska.

Niezależnie od metody druku czy obszaru jej zastosowania każdy proces drukowania 3D wymaga zapewnienia trzech kluczowych elementów: sprzętu, materiałów i oprogramowania. W związku z tym prowadzone są prace naukowo-badawcze w zakresie opracowywania nowych bądź doskonalenia istniejących urządzeń [15, 16] i materiałów [17, 18], które pozwolą na polepszenie procesu drukowania.

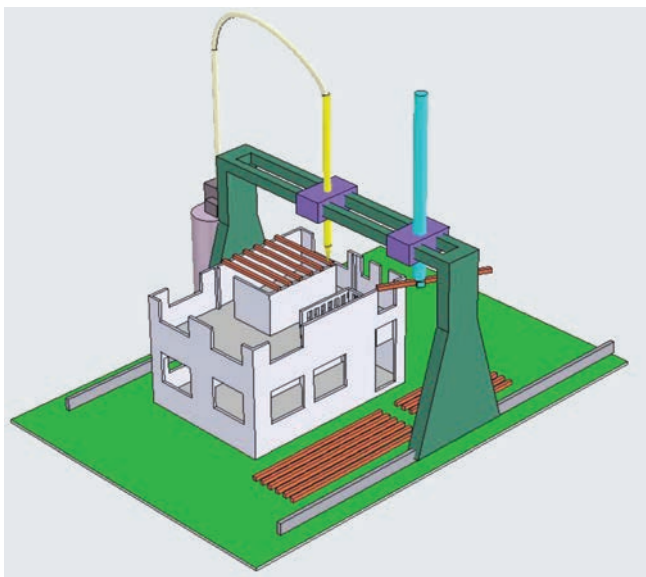
W niniejszym artykule przedstawiono model innowacyjnej głowicy do podawania materiału w drukarkach przyrostowych, wyposażonej w układ pozwalający na mieszanie dwóch składników (płynnego materiału budowlanego i płynnego dodatku poprawiającego właściwości materiału tworzącego wydruk) oraz w system osłony gazowej.

Druk 3D w budownictwie – przykładowe osiągnięcia

Spośród technologii druku 3D w branży budowlanej najczęściej wykorzystuje się technologię Contour Crafting, opracowaną przez zespół naukowców z Uniwersytetu w Południowej Kalifornii [19]. Polega ona na szybkim nakładaniu przez ogromną drukarkę kolejnych warstw mieszanki betonowej do momentu uzyskania elementów o dużych rozmiarach.

Konstrukcja drukarki opiera się na suwnicy, nieco szerszej niż wznoszony budynek, po której porusza się sterowane komputerowo ramię z zamocowaną głowicą (rys. 1). Urządzenie wylewa masę betonową za pomocą dyszy, a poszczególne warstwy są nakładane na siebie zgodnie z komputerowym wzorem.

* Dr inż. Anna Rębosz-Kurdek (arebosz@tu.kielce.pl); dr hab. inż. Wacław Gierulski, prof. PŚK (gierulski@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Produkcji Politechniki Świętokrzyskiej; dr inż. Artur Szmidt (szmidt@tu.kielce.pl) – Laboratorium Prototypowania Politechniki Świętokrzyskiej



Rys. 1. Schemat drukarki 3D wykorzystywanej w technologii Contour Crafting [19]

Ściany są lekką konstrukcją, która wewnątrz ma formę zygzaka (rys. 2). Wolne przestrzenie pomiędzy konturami ściany stanowią miejsce do wypełnienia izolacją termiczną. W ten sposób powstaje budynek w stanie surowym, gotowy do dalszego wykańczania.

Technologia Contour Crafting jest wykorzystywana m.in. przez chińską firmę WinSun, która przoduje pod względem budowlanych zastosowań druku 3D. Skonstruowana przez firmę drukarka 3D nakłada kolejne warstwy betonowej mieszanki, powstałej z różnego rodzaju odpa-



Rys. 2. Ściany tworzone w technologii Contour Crafting [14]



Rys. 3. Parterowy budynek wykonany przez firmę WinSun w technologii druku 3D [20]

dów przemysłowych i budowlanych – tak są wytwarzane pojedyncze prefabrykaty, które następnie są transportowane i składane bezpośrednio na miejscu budowy. Odpowiednią stateczność i wytrzymałość konstrukcji zapewnia stalowe zbrojenie wykonane tradycyjnymi metodami. W 2014 r. firma wykonała w ciągu doby 10 jednokondygnacyjnych, wolnostojących budynków, które znajdują się w parku technologicznym w Szanghaju, gdzie służą jako pomieszczenia biurowe (rys. 3). Rok później na terenie Parku Przemysłowego Suzhou zaprezentowała dwa wielokondygnacyjne budynki (rys. 4). Miały one charakter demonstracyjny, ukazujący możliwości wykorzystania druku 3D w branży budowlanej.



Rys. 4. Wielokondygnacyjne budynki wykonane przez firmę WinSun w technologii druku 3D [21]

W 2017 r. amerykańska firma Apis Cor przedstawiła pierwszy dom mieszkalny o powierzchni 38 m², który powstał w zaledwie 24 godziny w Stupinie k. Moskwy (rys. 5). Wykonano go bezpośrednio na placu budowy z wykorzystaniem mobilnej drukarki. Budynek ma niestandardowy kształt – w ten sposób twórcy podkreślili, że drukarki 3D mogą służyć do wykonywania obiektów uniikatowych, o nietypowej geometrii.



Rys. 5. Dom wykonany według projektu firmy Apis Cor w technologii druku 3D [13]

W kwietniu 2018 r. we francuskiej miejscowości Nantes zaprezentowano dom zbudowany według opatentowanej metody drukowania 3D o nazwie BatiPrint 3D, opracowanej przez naukowców z Uniwersytetu w Nantes (rys. 6a). Obiekt ten, podobnie jak budynek firmy Apis Cor, powstał bezpośrednio na placu budowy, lecz ma większą powierzchnię – 95 m². Za pomocą mobilnej drukarki w ciągu 18 dni z poliuretanowej pianki wykonano szkielet ścian, a następnie puste przestrzenie wypełniono betonem (rys. 6b). Ramy na okna i drzwi wejściowe zostały wstawione w trakcie tworzenia podstawowej konstrukcji.



Rys. 6. Dom wykonany według projektu naukowców z Uniwersytetu w Nantes w technologii druku 3D: a) gotowy budynek, b) szkielet ścian [22]

Koncepcja innowacyjnej głowicy

■ **Innowacyjność rozwiązania.** Największymi wyzwaniami w zastosowaniu technologii druku 3D w budownictwie są zarówno konstrukcja drukarki, jak i opracowanie mieszanki budulcowej, która musi spełniać specyficzne wymagania. Obecnie prowadzone są intensywne prace

nad znalezieniem materiału o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych i wystarczająco płynnej konsystencji, który bez problemu da się ekstrudować z głowicy drukującej, a jednocześnie będzie się na tyle szybko utwardzał, aby umożliwić nakładanie kolejnej warstwy.

Znane konstrukcje głowic pozwalają na dostarczanie jedynie jednorodnego materiału – gdy masa budulcowa jest mieszaniną kilku składników, jej przygotowanie następuje wcześniej poza głowicą. Problem pojawia się wtedy, gdy jeden ze składników mieszaniny przyspiesza proces wiązania masy. Wcześniejsze mieszanie składników może bowiem doprowadzić do sytuacji, że utwardzanie rozpocznie się jeszcze przed opuszczeniem głowicy, co uniemożliwi wykonanie wydruku lub pogorszy jego jakość.

Przedstawione w niniejszym artykule rozwiązanie stanowi głowica z wbudowanym układem pozwalającym na mieszanie dwóch składników, z których jeden ulepsza właściwości mieszanki lub pełni rolę utwardzacza. Tworzenie mieszaniny bezpośrednio przed opuszczeniem głowicy eliminuje wspomniane problemy związane z potrzebą magazynowania utworzonej wcześniej mieszaniny. Dodatkową cechą głowicy jest zastosowanie dyszy wraz z króćcem doprowadzającym gaz osłonowy, który przyspiesza utwardzenie mieszanki wytłaczanej z głowicy. Przegląd stanu techniki, wykonany w ramach przygotowania wniosku patentowego, który został złożony w Urzędzie Patentowym RP, potwierdził oryginalność pomysłu i brak konkurencyjnych rozwiązań.

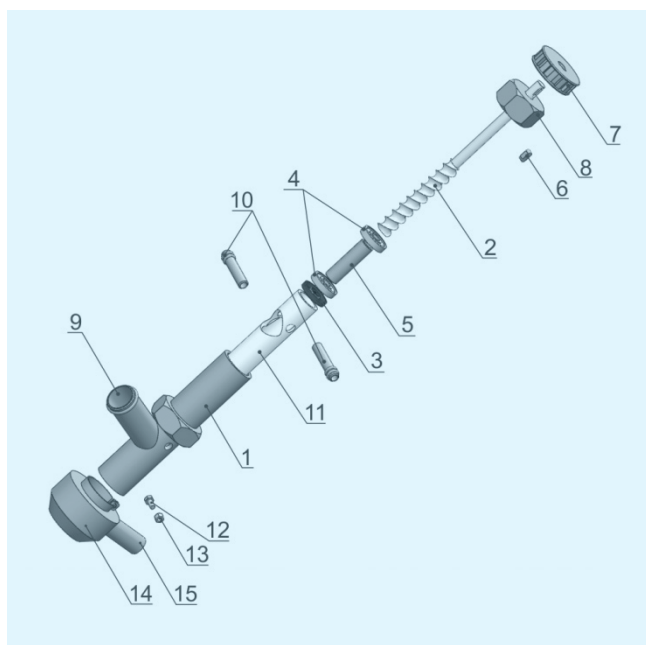
Uniwersalność głowicy pozwala na dostarczanie oraz wymieszanie różnych płynnych mas budulcowych, a także wszelakich płynnych dodatków poprawiających właściwości mieszanki. Badania prowadzone obecnie w Laboratorium Prototypowania Politechniki Świętokrzyskiej dotyczą materiałów budowlanych. Mają one potwierdzić przydatność zastosowania proponowanej głowicy w produkcji elementów budowlanych.

Istotnym aspektem w przemyśle budowlanym jest ekologiczność oraz naturalność materiałów. Przykładem może być planowany do zastosowania w niniejszym rozwiązaniu materiał nazywany silikatem, niezawierający szkodliwych domieszek, którego produkcja nie powoduje zanieczyszczenia ani degradacji środowiska. Dodatkowo do masy silikatowej zostanie dodany ulepszczonej w postaci krzemianu litu. Gotowa masa budulcowa będzie wytłaczana w osłonie dwutlenku węgla, który zapewni odpowiednie utwardzenie mieszanki, a urządzenie wykonawcze będzie tworzyć obiekt budowlany warstwa po warstwie. To rozwiązanie może być szczególnie atrakcyjne w przypadku produkcji elementów o niestandardowych kształtach, które muszą spełniać określone wymagania wytrzymałościowe, ponieważ zapewnia jednocześnie oszczędność czasu i kosztów (nie trzeba budować specjalnych form).

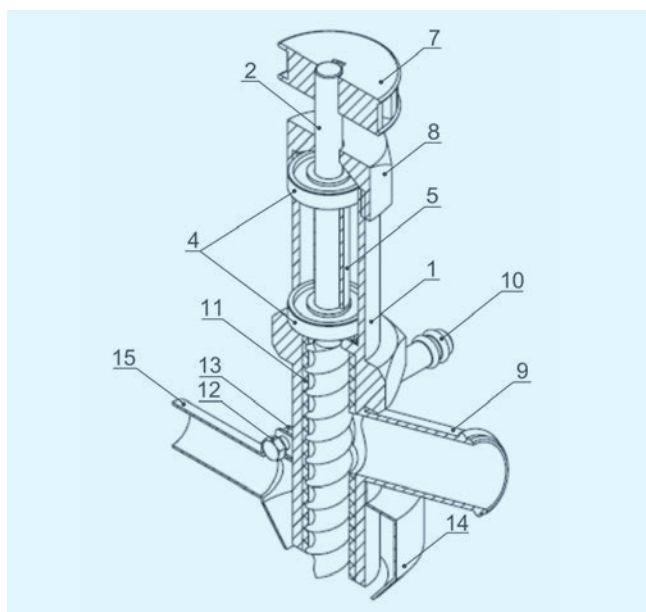
■ **Model głowicy.** Model głowicy został przedstawiony na rys. 7–9. Głowica ma obudowę 1 o zarysie tulei, w której osadzone jest obrotowo mieszadło 2, uszczelnione przez pierścień uszczelniający 3. Do łożyskowania obracającego się mieszadła wykorzystano dwa łożyska kulkowe 4, oddzielone tuleją dystansową 5, opierającą się swymi czołowymi płaszczyznami o czołowe płaszczyzny wewnętrznych bieżni łożysk 4. Górna część obudowy 1 zamknięta jest nakrętką 8. Z mieszadłem 2 jest połączone – za pomocą wypustu 6 – zębate koło pasowe 7, służące do przeniesienia napędu. Głowica jest wyposażona w króciec 9, którym do jej wnętrza podawana jest płynna masa budulcowa, oraz w króciec 10 do podawania płynnych

dodatków. Wewnątrz obudowy 1 głowicy na wysokości ślimaka mieszadła znajduje się wymienny teflonowy wkład 11, którego obrót blokowany jest króćcami 10. Ten wkład umożliwia lepszy poślizg masy budulcowej wewnątrz głowicy i jednocześnie zabezpiecza głowicę oraz mieszadło przed nadmiernym zużyciem. Na dolnej części obudowy 1 zamocowana jest – za pomocą śruby 12 z nakrętką 13 – dysza 14, obejmująca wylot obudowy 1. Dysza 14 jest wyposażona w króciec 15, służący do dostarczania gazu osłonowego, który jest podawany wraz z płynną masą budulcową.

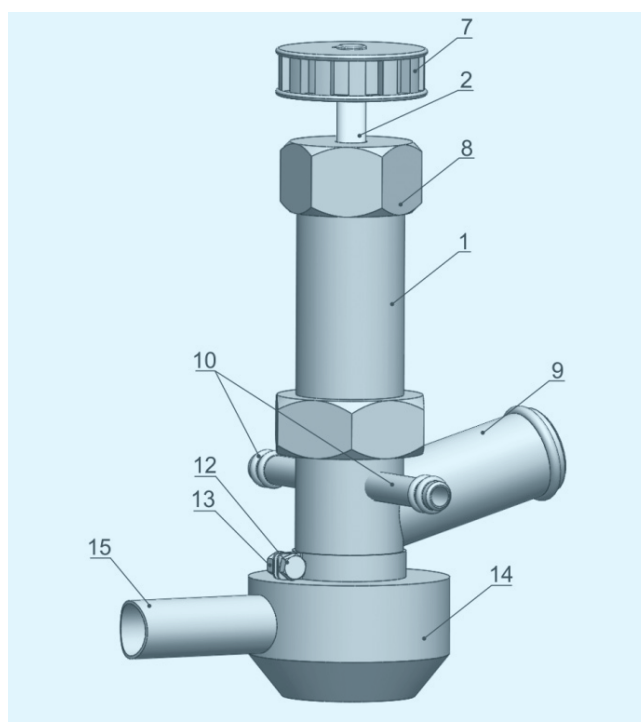
Z wykorzystaniem obracającego się mieszadła 2 w komorze obudowy 1 głowicy następuje wymieszanie płynnej masy budulcowej z płynnymi dodatkami, wpływającymi na właściwości mieszanki. Gotowa masa budulcowa jest wytłaczana z obudowy 1 w osłonie gazu dostarczanego do dyszy 14 króćcem 15. Mieszadło 2 jest wymienne, a jego kształt dobiera się w zależności od zastosowanej masy budulcowej.



Rys. 7. Głowica – widok z rozsuniętymi elementami składowymi



Rys. 8. Głowica – przekrój osiowy w rzucie aksonometrycznym



Rys. 9. Głowica – widok perspektywiczny

Przedstawiona koncepcja stanowi podstawę do wykonania prototypu głowicy oraz weryfikacji skuteczności jej działania i funkcjonalności w warunkach laboratoryjnych.

Planowane badania doświadczalne

Badania prototypu głowicy, będące elementem procesu komercjalizacji, będą obejmowały cztery etapy.

■ **Budowa prototypu.** Prototyp głowicy według wynalazku zostanie zbudowany w Laboratorium Prototypowni Politechniki Świętokrzyskiej. Główne elementy (części korpusu, dysza) zostaną wykonane w technologiach przyrostowych, z wykorzystaniem drukarki ProJet 3510SD, stanowiącej wyposażenie laboratorium. Pozostałe części głowicy to elementy dostępne na rynku (np. tuleje, śruby, nakrętki). Pozwoli to na szybkie i tanie zbudowanie prototypu oraz umożliwi modyfikacje zapewniające należytą skuteczność działania.

■ **Budowa stanowiska badawczego.** Zostanie utworzone stanowisko badawcze, umożliwiające przeprowadzenie testów prototypu, polegających na weryfikacji poprawności konstrukcji głowicy, identyfikacji oraz doborze krytycznych parametrów, aby zapewnić odwzorowanie docelowego systemu w warunkach laboratoryjnych. Do uzyskania odpowiednich ruchów głowicy zostaną wykorzystane zmodyfikowane elementy istniejącego stanowiska – drukarki 3D własnej konstrukcji. Dobudowane zostaną: układ napędu mieszadła znajdującego się w głowicy oraz układy dostarczania mieszanych składników. Na etapie badań laboratoryjnych planowane jest podawanie masy silikatowej oraz płynnego dodatku w postaci krzemianu litu, poprawiającego wytrzymałość materiału na ściskanie. Budowany układ dostarczania będzie dostosowany właśnie do tych składników. Będzie on możliwie najprostszy, aby umożliwić badania jedynie w skali laboratoryjnej. Uzupełnieniem będzie instalacja doprowadzająca dwutlenek węgla, który przyspiesza proces utwardzania masy budulcowej.

■ **Weryfikacja układu mieszania.** Celem tego etapu badań będzie analiza skuteczności mieszania płynnej masy budulcowej z płynnym dodatkiem modyfikującym właściwości mieszanki. Wymaga to określenia krytycznych parametrów geometrycznych – takich jak: wymiary i kształty króćców dostarczających składniki, kształt i długość mieszadła – oraz parametrów kinematycznych, w tym prędkości obrotowej mieszadła, natężenia przepływu składników czy prędkości wypływu materiału z głowicy. Aby uzyskać odpowiednie parametry pracy, będzie można modyfikować wymiary elementów głowicy, co jednak wiąże się z wytwarzaniem ich kolejnych wersji. Jest to stosunkowo łatwe do realizacji dzięki zastosowaniu drukarki 3D.

■ **Weryfikacja systemu utwardzania gazem.** Ostatnim etapem badań będzie dobór parametrów w procesie utwardzania dwutlenkiem węgla. Metodą kolejnych prób wspomaganych analizami zostaną dobrane ciśnienie oraz odpowiednie natężenie wypływu gazu. Konieczna może się również okazać zmiana kształtu i wymiarów dyszy, co będzie się wiązało z wytwarzaniem kolejnych wersji głowicy.

Podsumowanie

Nowoczesne budownictwo wymaga stosowania ekologicznych materiałów o odpowiednich parametrach technicznych, a także nowatorskich rozwiązań technologicznych, usprawniających proces inwestycji i pozwalających m.in. na realizację niestandardowych, złożonych projektów, które nie mogłyby być wykonane tradycyjnymi metodami. Naprzeciw tym wyzwaniom wychodzi technologia druku 3D. Projekty zrealizowane z jej użyciem pokazują, że branża budowlana zaczyna w coraz większym stopniu doceniać możliwości drukarek 3D w zakresie automatyzacji i robotyzacji pracochłonnych robót budowlanych. Trudno sobie jednak wyobrazić, by ta technologia zupełnie wyparła tradycyjne metody budowania. Bardziej prawdopodobne jest to, że będzie pełniła funkcje wspomagające, zwłaszcza przy tworzeniu elementów wyróżniających się nietypową geometrią, co wymaga zastosowania materiału budulcowego o odpowiednich parametrach technicznych, zapewniających wystarczającą jakość wydruku.

Przedstawiona w artykule głowica może być atrakcyjnym komponentem drukarek 3D stosowanych w branży budowlanej. Znamionymi cechami głowicy są:

- możliwość mieszania różnych płynnych mas budulcowych z dodatkami wpływającymi na właściwości mieszanki,
- drukowanie w osłonie gazu.

W ten sposób łączone są zadania realizowane w innych rozwiązaniach przez oddzielne układy. Przedstawiono funkcjonalną koncepcję głowicy oraz określono jej możliwe zastosowanie, co odpowiada rozwojowi technologii na poziomie drugiego stopnia skali gotowości technologicznej TRL (*technology readiness level*). Obecne badania obejmują budowę prototypu głowicy wraz z układem zasilania w materiały budulcowe oraz eksperymenty w skali laboratoryjnej. Pozwoli to na doświadczalną weryfikację koncepcji oraz identyfikację i dobór krytycznych parametrów, aby zapewnić odwzorowanie docelowego systemu w warunkach laboratoryjnych i tym samym ulokować technologię powyżej czwartego stopnia w skali gotowości technologicznej.

Wyniki badań zostaną przedstawione w następnej części artykułu.

Dalsze działania powinny obejmować proces komercjalizacji, by głowica, która jest przedmiotem zgłoszenia patentowego, stała się wyrobem dostępnym na rynku.

Niniejsza publikacja jest finansowana ze środków przeznaczonych na realizację projektu badawczego pn. „Prototyp głowicy do podawania materiału w drukarkach przyrostowych, wyposażonej w układ mieszający i system osłony gazowej” w ramach grantu uzyskanego z projektu „Inkubator Innowacyjności+”, współfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego.

LITERATURA

1. Gierulski W., Rębosz-Kurdek A., Stępień A., Szmidt A., Bajor T., Frydrych S., Furgał B., Kowalski S., Kwiatkowski J., Wojciechowski B. „Głowica do podawania materiału w drukarkach przyrostowych”. Zgłoszenie wynalazku: P.423351, Warszawa 2017.
2. Siemiński P., Budzik G. „Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015.
3. <http://centrumdruku3d.pl/historia-druku-3d-czesc-3-projekt-repar-i-narodziny-niskobudzetowej-branzy-druku-3d-na-swiecie/> (dostęp: 15.05.2018 r.).
4. <https://drukarki3d.pl/wdrozenia/> (dostęp: 27.04.2018 r.).
5. <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/useful-3d-printed-household-items/> (dostęp: 29.04.2018 r.).
6. Fudali P., Miechowicz S., Kudasik T. „Koncepcja systemu podparcia wózka dla osób z niepełnosprawnością ruchową – prezentacja rozwiązania z zastosowaniem druku 3D”. *Mechanik*. 5–6 (2017): s. 450–452.
7. Moon S.K., Tan Y.E., Hwang J., Yoon Y.J. „Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 1, 3 (2014): s. 223–228.
8. Kumar L.J., Nair C.G.K. „Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry”. W: Wimpenny D.I., Pandey P.M., Kumar L.J. (eds.), *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2017.
9. <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-automotive-industry-2-82838/> (dostęp: 27.04.2018 r.).
10. Domański J., Skalski K., Grygoruk R., Mróz A. „Rapid prototyping in the intervertebral implant design process”. *Rapid Prototyping Journal*. 21, 6 (2015): s. 735–746.
11. Murphy S.V., Atala A. „3D bioprinting of tissues and organs”. *Nature Biotechnology*. 32 (2014): s. 773–785.
12. Major M., Minda I. „Zastosowanie druku przestrzennego w budownictwie”. *Budownictwo*. 22 (2016): s. 238–247.
13. <http://apis-cor.com/en/about/blog/features-and-perspectives-of-3d-printing> (dostęp: 10.05.2018 r.).
14. <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-technique-currently-challenging-global-construction-industry-77432/> (dostęp: 15.04.2018 r.).
15. Aroca R.V., Ventura C.E.H., De Mello I., Pazelli T.F.P.A.T. „Sequential additive manufacturing: automatic manipulation of 3D printed parts”. *Rapid Prototyping Journal*. 23, 4 (2017): s. 653–659.
16. Szmidt A., Rębosz-Kurdek A. „Sposoby doskonalenia druku 3D w technologii FDM/FFF”. *Mechanik*. 3 (2017): s. 258–261.
17. Adamczak S., Bochnia J., Kaczmarska B. „Estimating the uncertainty of tensile strength measurement for a photocured material produced by additive manufacturing”. *Metrology and Measurement Systems*. 21, 3 (2014): s. 553–560.
18. Khoshnevis B., Yuan X., Zahiri B., Zhang J., Xia B. „Construction by Contour Crafting using sulfur concrete with planetary applications”. *Rapid Prototyping Journal*. 22, 5 (2016): s. 848–856.
19. Khoshnevis B. „Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies”. *Automation in Construction*. 13, 1 (2004): s. 5–19.
20. <http://spectra3d.com/3d-design/amazing-house-building-3d-printer/> (dostęp: 28.04.2018 r.).
21. <http://www.3ders.org/articles/20160331-winsun-3d-prints-two-gorgeous-concrete-chinese-courtyards-inspired-by-the-ancient-suzhou-gardens.html> (dostęp: 28.04.2018 r.).
22. <https://3dprint.com/207936/3d-printed-yhnova-house-done/> (dostęp: 10.05.2018 r.).