

# Sposoby doskonalenia druku 3D w technologii FDM/FFF

## New approaches of improving FDM/FFF printing technology

ARTUR SZMIDT  
ANNA RĘBOSZ-KURDEK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.46>

W artykule przedstawiono rozważania dotyczące zwiększenia efektywności technologii druku 3D poprzez wprowadzenie modyfikacji postaci materiału budulcowego (filamentu) oraz mechanizmu jego podawania w drukarkach typu FDM/FFF. Omówiono obecnie stosowane rozwiązania oraz innowacyjność proponowanych koncepcji, pozwalających m.in. na uzyskanie skalibrowanego przekroju filamentu oraz zredukowanie liczby części napędowych i tym samym masy ekstrudera, co przyczyni się do poprawy jakości drukowanego detalu i przyspieszy proces drukowania. W formie opisowej i graficznej zaprezentowano sposób modyfikacji postaci filamentu do druku w technologii FDM/FFF. Ponadto zaproponowano rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych części składowych opatentowanego mechanizmu podawania filamentu wraz z opisem jego działania (patent PL 224144 B1, autorzy: Artur Szmidt, Szymon Kowalski, Krzysztof Sokółowski).

**SŁOWA KLUCZOWE:** szybkie prototypowanie, drukarki 3D, technologia FDM/FFF, filament, ekstruder

*This article presents new approaches of increasing the efficiency of FDM/FFF printing technology through the introduction of modifications to the form of filament and to the feeding mechanism. Currently used solutions and innovativeness of proposed concepts are discussed in the paper. A new approach concerning the modification of the filament form was presented in descriptive and graphic way. Moreover, constructional solutions of individual components of the patented (patent PL 224144 B1) filament feeding mechanism including a description of its operation were proposed.*

**KEYWORDS:** rapid prototyping, 3D printers, FDM/FFF technology, filament, extruder

Wśród czynników warunkujących rozwój przedsiębiorstw na rynku krajowym i zagranicznym szczególne miejsce zajmują innowacje. Pełnią one istotną rolę w procesie zarządzania przedsiębiorstwem w warunkach gwałtownie zmieniającego się otoczenia, w tym preferencji nabywców. To wymaga od menedżerów podejmowania szybkich działań, mających na celu poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań, dających szansę wykreowania i utrzymania przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa [1]. Aktualne tendencje wskazują, że rynek zmierza w stronę wyrobów idealnie dostosowanych do potrzeb klienta. Ich wytwarzanie jest dzisiaj znacznie łatwiejsze dzięki zastosowaniu m.in. technologii przyrostowych (np. drukowania 3D). Druk 3D jest skutecznym narzędziem w procesie opracowywania innowacyjnych wyrobów oraz modyfikacji tych istniejących. Dostępne na rynku drukarki 3D znajdują zastosowanie nie tylko w przygotowaniu modeli poglądowych, lecz także funkcjonalnych prototy-

pów oraz pełnowartościowych wyrobów końcowych, co otwiera przed użytkownikami tych urządzeń niezwykle zachęcające perspektywy. Mogą oni elastyczniej i szybciej reagować na wymagania odbiorców swoich wyrobów. Zastosowanie technologii druku 3D znacznie skraca proces wykonywania prototypu nowego wyrobu, ułatwia jego modyfikowanie na wczesnych etapach rozwoju, jak również zapewnia możliwość uzyskania skomplikowanej struktury zewnętrznej i wewnętrznej, co w przypadku konwencjonalnych technik kształtowania (głównie kształtowania ubytkowego) byłoby niewykonalne [2]. Ponadto możliwe jest wytwarzanie kolorowych modeli (np. na drukarce Zcorp Z450), które mogą służyć do wizualizacji wyników obliczeń uzyskanych metodą elementów skończonych. Kolorowy wydruk 3D pozwala na szybką analizę modelu pod kątem rozkładu naprężeń, odkształceń, przemieszczeń czy wreszcie przebiegu deformacji [3].

Ze względu na liczne zalety technologia druku 3D zdobyła w ciągu ostatnich kilkunastu lat dużą popularność. Znajduje zastosowanie w wielu obszarach działalności inżynierskiej, głównie w zakresie szybkiego prototypowania części maszyn i urządzeń [4–6]. Druk w technologii przestrzennej w spektakularnym tempie zdobywa również takie dziedziny, jak biomechanika czy medycyna [7–10].

W celu osiągnięcia wysokiej precyzji i powtarzalności drukowanych elementów prowadzi się prace polegające na doskonaleniu istniejących rozwiązań i tym samym na zwiększaniu obszarów zastosowań drukarek 3D. Znajduje to przede wszystkim wyraz w nowych konstrukcjach urządzeń i ulepszeniu ich możliwości wytwórczych [11, 12], jak również rozszerzaniu palety materiałów dostępnych do druku i badaniach prowadzących do poprawy ich własności wytrzymałościowych [13, 14]. To pozwala na tworzenie coraz bardziej urozmaiconych i złożonych wyrobów. W niniejszym artykule przedstawiono innowacyjne rozwiązania dotyczące postaci materiału budulcowego do druku w technologii FDM/FFF (*fused deposition modelling/fused filament fabrication*) oraz mechanizmu podawania tego materiału.

### Dotychczasowe rozwiązania

Technologia FDM/FFF to technologia druku 3D, w której materiał bazowy, nazywany filamentem, jest wprowadzany za pomocą ekstrudera do głowicy drukującej. Filament ma zwykle postać żyłki wykonanej z tworzywa termoplastycznego (np. ABS, PLA) o średnicy nominalnej 1,75 mm, 2,85 mm lub 3 mm. W głowicy jest on podgrzewany do temperatury 190÷280°C, a następnie w półpłynnej formie jest rozprowadzany przez dysze głowicy, warstwa po warstwie, tworząc drukowany obiekt. Szczegółowy opis technologii FDM/FFF można znaleźć m.in. w pracy [15].

\* Dr inż. Artur Szmidt (szmidt@tu.kielce.pl), dr inż. Anna Rębosz-Kurdek (arebosz@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Produkcji Politechniki Świętokrzyskiej

■ **Produkcja filamentu do drukarek 3D.** Proces produkcyjny filamentu polega na zamianie granulatu tworzyw polimerowych ABS lub PLA w żyłkę o ustalonej średnicy i zabarwieniu go na pożądaną kolor. Granulat wsypywany jest do specjalnego miksera, gdzie ulega wymieszaniu z barwnikiem oraz różnego rodzaju uszlachetniczami. Tworzywo, przed podaniem do zespołu uplastyczniającego, poddawane jest procesowi suszenia. W dalszej kolejności mieszanka trafia do ekstrudera, który przetapia ją i formuje w ciekłą żyłkę. Stamtąd trafia do pojemników z ciepłą i zimną wodą, gdzie następuje proces owalizacji filamentu. Ciepła woda (o temperaturze 40÷80°C w zależności od tworzywa) zapobiega niekontrolowanym i gwałtownym skurczom. Zadaniem pojemnika z zimną wodą jest ostateczne schłodzenie filamentu. Na koniec filament jest nawijany na rolkę. W celu uzyskania wymaganej średnicy filamentu (1,75 mm, 2,85 mm lub 3 mm) należy go ekstrudować z określoną prędkością. Im większa jest prędkość procesu, tym mniejsza średnica filamentu. Do jej pomiaru wykorzystuje się mierniki laserowe. W przypadku wystąpienia istotnych odchyłek średnicy następuje przerwanie procesu do momentu wykrycia źródła problemu [16].

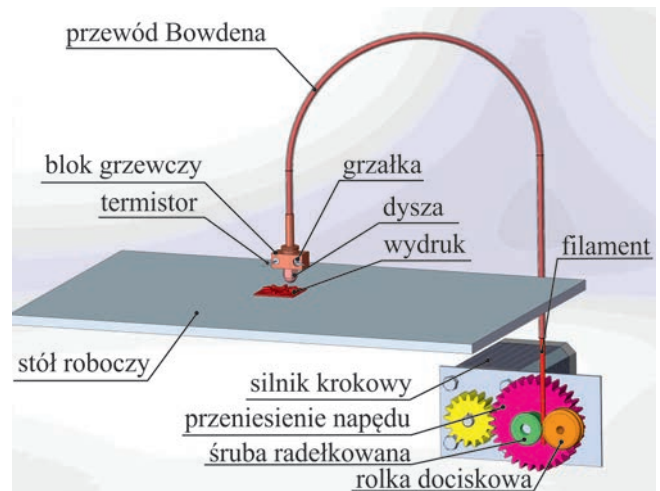
Aby przeprowadzić cały proces produkcji filamentu, niezbędne są – oprócz specjalistycznej linii produkcyjnej – odpowiednie warunki zewnętrzne (temperatura otoczenia, zapylenie, cyrkulacja powietrza, wilgotność), mające wpływ na trwałość filamentu. Przykładowo, wszelkie zanieczyszczenia dostające się do filamentu (np. kurz i pył) mogą spowodować, że będzie on zapychał głowicę.

■ **Rodzaje ekstruderów stosowanych w drukarkach 3D.** Ekstrudery w poszczególnych modelach drukarek znacznie się różnią i stale prowadzone są prace mające na celu doskonalenie konstrukcji tej części drukarki. Wyróżnia się dwa rodzaje ekstruderów: ekstruder Wade'a i ekstruder Bowdena.

Schemat działania drukarki z ekstruderem Wade'a przedstawiono na rys. 1. Ekstruder znajduje się w tym samym miejscu co głowica drukująca i jest zamontowany na wózku ruchomym w osiach X i Y (przód–tył i lewo–prawy). Głównym elementem napędowym ekstrudera jest silnik krokowy. Na wale silnika znajduje się małe koło zębate współpracujące z dużym kołem zębatym, na którym zamocowana jest śruba radełkowana z nacięciami na trzonie. W miejscu nacięcia śruby umieszczono filament, dociskano do niej za pomocą rolki osadzonej na regulowanym

elementie sprężystym. Przeniesienie napędu z silnika przez koła zębate na śrubę umożliwia realizację ruchu obrotowego trzonu z nacięciami i wprowadzanie filamentu do głowicy, rozgrzanej do temperatury pozwalającej na upłynnienie tworzywa filamentu. Oprócz funkcji właczania ekstruder ma również za zadanie wyciągać filament z głowicy. Ten proces, nazywany retrakcją, zapobiega samoczynnemu wypływaniu materiału z dyszy w momencie, gdy głowica przemieszcza się w inne miejsce drukowania. W przypadku gdy filament ma postać gładkiej żyłki, może wystąpić poślizg względem powierzchni prowadzącej, co spowoduje podanie mniejszej objętości materiału budulcowego.

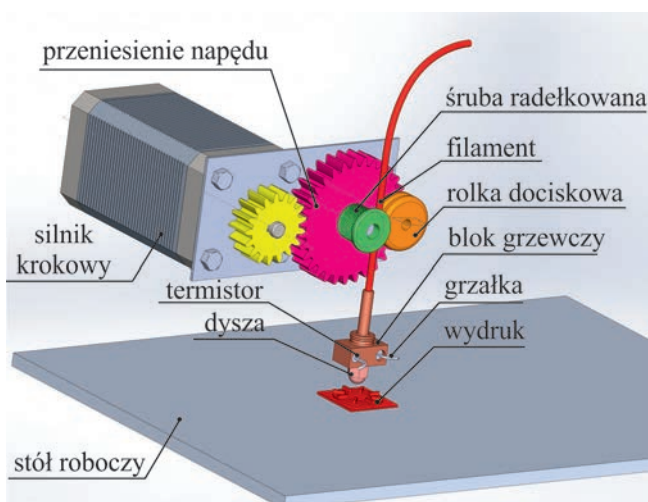
Ekstruder Bowdena zamontowany jest na nieruchomej części drukarki 3D lub niezależnie od niej oraz jest połączony specjalnym przewodem (przewodem Bowdena) z ruchomą głowicą drukującą (rys. 2). Takie rozwiązanie pozwala na redukcję masy głowicy, dzięki czemu jest ona znacznie szybsza. W systemie Bowdena możliwe są jednak zatory w przewodzie łączącym ekstruder z głowicą. Dodatkowym problemem może być także duże tarcie przy wprowadzaniu filamentu do przewodu, dlatego w tego typu drukarkach nie są zalecane materiały charakteryzujące się znaczną elastycznością.



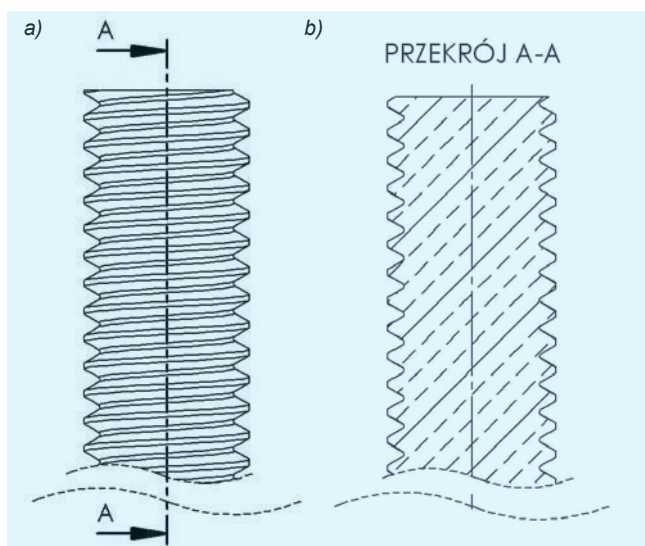
Rys. 2. Schemat działania drukarki z ekstruderem Bowdena (źródło: opracowanie własne)

### Nowatorskie rozwiązania w zakresie technologii FDM/FFF

■ **Postać filamentu do druku.** W trakcie procesu produkcyjnego filamentu gorący materiał po wyjściu z głowicy wykazuje tendencję do puchnięcia i odkształcania się, czego konsekwencją jest brak zachowania idealnie okrągłego kształtu żyłki. Ten efekt nielato jest kontrolowany ze względu na znaczny wpływ temperatury pomieszczenia i warunków atmosferycznych. Dodatkowa obróbka kalibracyjna jest kosztowna i trudna do przeprowadzenia. Z punktu widzenia uzyskania stałej objętości materiału bazowego przy jednym obrocie silnika (i tym samym zagwarantowania odpowiedniej dokładności kształtu drukowanych wyrobów) ważne jest zminimalizowanie odchyłki wymiaru średnicy filamentu. Zmiana objętości powoduje bowiem błędy kształtu wydruku, co wpływa na pogorszenie jakości drukowanego detalu. Przykładowo, odchyłka wymiaru średnicy filamentu o wartości  $-0,25$  mm w stosunku do wymiaru nominalnego 3 mm prowadzi na długości 10 mm do zmniejszenia objętości materiału o  $11,29$  mm<sup>3</sup>, co stanowi 15,98% objętości nominalnej.



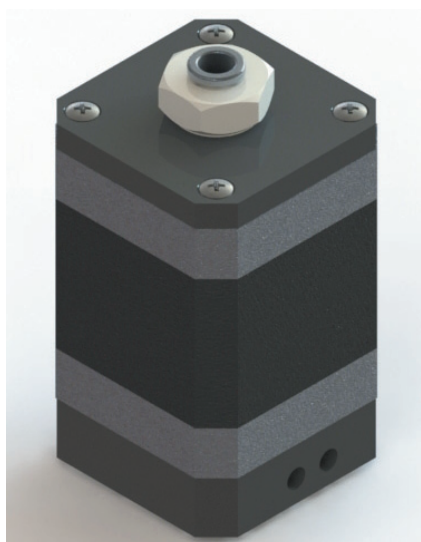
Rys. 1. Schemat działania drukarki z ekstruderem Wade'a (źródło: opracowanie własne)



Rys. 3. Zmodyfikowana postać filamentu: a) powierzchnia zewnętrzna, b) przekrój A-A

W celu uzyskania skalibrowanego, a więc również bardziej jednorodnego przekroju materiału budulcowego zaproponowano modyfikację, polegającą na utworzeniu na zewnętrznej powierzchni filamentu linii śrubowej (rys. 3). Nacinanie linii śrubowej następuje z użyciem narzynki, która spełnia rolę narzędzia kalibrującego. Spuchnięcia materiału zostaną zeskrawane, natomiast jego niedobór będzie mniejszy, gdy średnica nominalna filamentu będzie równa średnicy podziałowej gwintu. Taki zabieg zwiększa jednocześnie chropowatość materiału w kierunku wzdłużnym, przez co zmniejsza się ryzyko poślizgu filamentu w ekstrudrze. Przeprowadzenie operacji nacinania linii śrubowej można wykonać u producenta filamentu albo samodzielnie, przed procesem drukowania lub w jego trakcie, za pomocą narzynki napędzanej silnikiem elektrycznym.

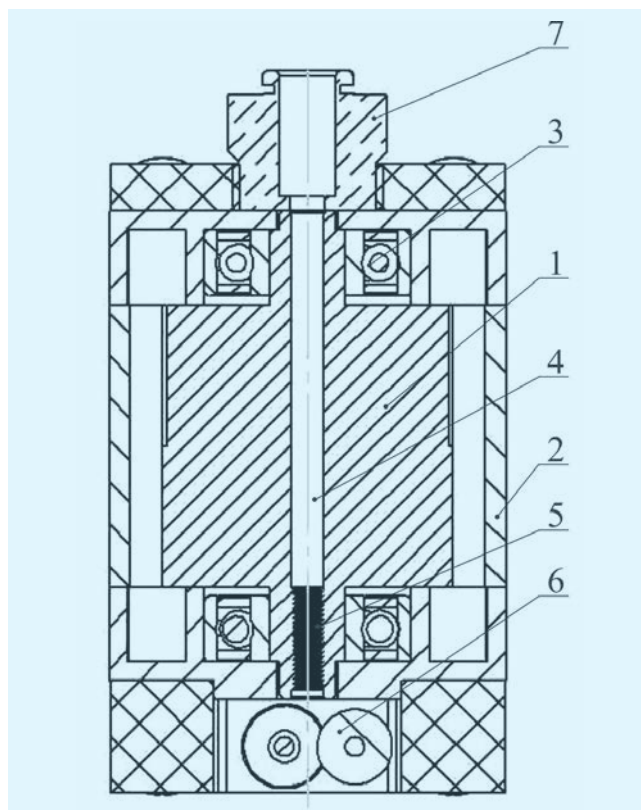
■ **Mechanizm podawania filamentu.** Proces wprowadzania filamentu do głowicy wymaga dużego momentu obrotowego, który uzyskuje się poprzez redukcję prędkości za pomocą różnego rodzaju przekładni. Przekładnie zwiększają jednak znacząco gabaryty ekstrudera oraz jego masę. Wiele silników krokowych typowych dla konstrukcji ekstruderów osiąga maksymalny moment obrotowy przy prędkości ok. 120 obr/min, przy czym prę-



Rys. 4. Model ekstrudera z wałem drążonym – złożenie (źródło: opracowanie własne)

kość wyciskania materiału budulcowego z dyszy jest ograniczona oraz proporcjonalna do temperatury dyszy i odwrotnie proporcjonalna do jej średnicy. Tego typu ekstruder ma dużą masę bezwładności, co przy dużych prędkościach wydruku może generować błędy położenia głowicy, a w konsekwencji niekorzystnie wpływać na jakość wydruku.

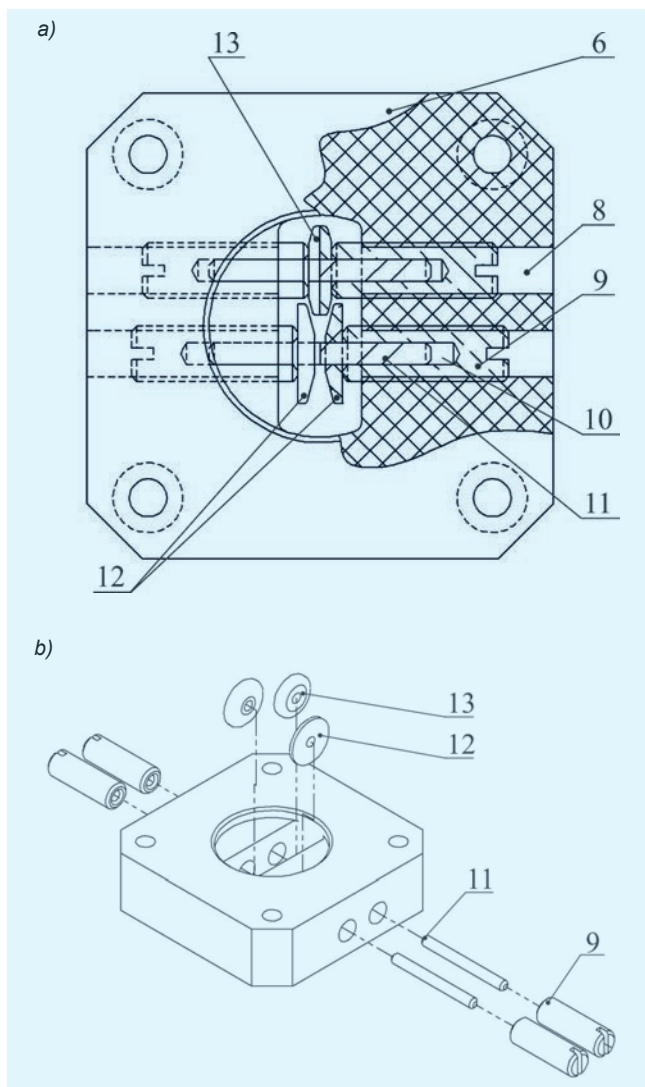
Aby zwiększyć efektywność procesu podawania materiału budulcowego do głowicy drukującej, zaprojektowano innowacyjny mechanizm. Charakteryzuje się on tym, że wał silnika posiada nagwintowany w dolnej części wzdłużny otwór, przez który prowadzony jest filament, a do obudowy silnika jest dołączony system blokady obrotu filamentu. Model ekstrudera z wałem drążonym przedstawiono na rys. 4, a mechanizm podawania filamentu wewnątrz ekstrudera – na rys. 5. Wał silnika 1 osadzony jest w obudowie 2 na łożyskach 3. Wał ma wzdłużne wydrążenie 4, zakończone częścią gwintowaną 5. Część gwintowaną może stanowić odrębny element w postaci tulei zespolonej z wałem 1. W takim rozwiązaniu odrębny element może być wymienny, o różnym wymiarze gwintu, dostosowanym do średnicy filamentu z linią śrubową. Z uwagi na możliwość obracania filamentu w ekstrudrze konieczne jest zastosowanie systemu zabezpieczającego przed tym ruchem. System blokady obrotu filamentu 6 jest przymocowany do obudowy 2 silnika, z którą zespolona jest także prowadnica 7 filamentu.



Rys. 5. Przekrój osiowy mechanizmu podawania filamentu wewnątrz ekstrudera (źródło: opracowanie własne)

System blokady obrotu filamentu 6 (rys. 6) ma postać prostopadłościenną bryłę z dwoma równoległymi, nagwintowanymi otworami 8 oraz wkręconymi w nie śrubami 9. Śruby te posiadają wzdłużne, osiowe otwory, w których osadzone są osie 11 z rolkami 12 i 13. Rolki utrzymywane są na osiach w otworze mechanizmu prostokątne do osi podstawy, przy czym na jednej osi osadzone są dwie talerzowe rolki 12, a na drugiej – jedna stożkowa rolka 13,

tak że filament jest wprowadzany w przestrzeń utworzoną przez współpracujące rolki 12 i 13. Położenie rolek ustala się za pomocą śrub 9, aby filament nie obracał się razem z wałem 1. Obracający się wał 1 oraz rolki 12 i 13 umożliwiają podawanie filamentu do głowicy drukarki ze stałą, ustaloną prędkością.



Rys. 6. System blokady obrotu filamentu: a) powiększony widok z częściowym przekrojem, b) widok perspektywiczny po rozłożeniu na części (źródło: opracowanie własne)

Zastosowanie silnika z wałem drążonym wewnątrz wirnika pozwala na zmniejszenie masy głowicy drukującej. Filament z naciętą linią śrubową jest podawany w sposób o wiele bardziej efektywny w porównaniu z metodą standardową. To rozwiązanie eliminuje konieczność stosowania przekładni oraz skomplikowanych mechanizmów podawania filamentu, a jednocześnie wyklucza zupełnie jego poślizg. Ponadto uzyskuje się duże przełożenie bezpośrednio między samym filamentem a wałem silnika.

## Podsumowanie

Przedstawione w artykule modyfikacje postaci filamentu oraz mechanizmu jego podawania opracowano z myślą o zastosowaniu w drukarkach 3D wykorzystujących technologię FDM/FFF. Obecnie we wszystkich głowicach drukarek FDM/FFF produkcji krajowej i zagranicznej stosowane są skomplikowane i ciężkie mechanizmy podawania materiału, co ogranicza prędkość i dokładność wydruków.

Zastosowanie nowatorskiej koncepcji opatentowanego mechanizmu wprowadzania materiału budulcowego do głowicy drukującej prowadzi – poprzez zredukowanie liczby części napędowych – do znacznego uproszczenia konstrukcji ekstrudera. Dzięki temu uzyskuje się możliwość zastosowania mniejszych i lżejszych silników, co wpływa na zwiększenie przyspieszeń osi szybkich maszyny FDM, a w rezultacie – na zwiększenie prędkości procesu drukowania. Możliwe jest także wykorzystanie filamentu o większej średnicy (na rynku standardowo dostępne są filamenty o średnicy 1,75 mm, 2,85 mm i 3 mm) bez konieczności stosowania przekładni i utraty rozdzielczości liczonej według objętości podawanego materiału. Ponadto w wyniku naniesienia linii śrubowej na powierzchni zewnętrznej filament ma znormalizowaną średnicę, co ma znaczenie z punktu widzenia dokładnego rozprowadzenia warstwy materiału.

Przedstawione w artykule koncepcyjne rozwiązania techniczne w obszarze procesu drukowania detalu w technologii FDM/FFF wymagają dalszych analiz oraz testów w celu potwierdzenia i zweryfikowania przyjętych założeń projektowych.

## LITERATURA

1. Kaczmarska B., Gierulski W. "Innovation map in the process of enterprise evaluation". *Key Engineering Materials*. 669 (2016): s. 497–513.
2. Oczko K. „Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przystosowanym kształtowaniu wyrobów”. *Mechanik*. 4 (2008): s. 243–257.
3. Bubicz M. „Raport: szybkie prototypowanie cz. I”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*. 4 (2008): s. 14–26.
4. Budzik G., Budzik W., Cygnar M., Janisz K. „Możliwości zastosowania szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wytwarzania elementów pojazdów samochodowych”. *Problemy Eksploatacji*. 1 (2009): s. 7–16.
5. Kundera Cz., Bochnia J. "Investigating the stress relaxation of photopolymer O-ring seal models". *Rapid Prototyping Journal*. 20, 6 (2014): s. 533–540.
6. Przybylski P. „Wykorzystanie technologii druku 3D w projektowaniu chwytaków robotów przemysłowych”. *Mechanik*. 7 (2016): s. 804–805.
7. Chimento J., Highsmith M.J., Crane N. "3D printed tooling for thermoforming of medical devices". *Rapid Prototyping Journal*. 17, 5 (2011): s. 387–392.
8. Melgoza E.M., Vallicrosa G., Serenó L., Ciurana J., Rodríguez C.A. "Rapid tooling using 3D printing system for manufacturing of customized tracheal stent". *Rapid Prototyping Journal*. 20, 1 (2014): s. 2–12.
9. Lehrich K., Lis K., Nawrat Z., Mucha Ł., Rohr K. „Zastosowanie technologii druku 3D w konstrukcji prototypów manipulatorów medycznych”. *Mechanik*. 3 (2016): s. 224–225.
10. Liu Y., Hamid Q., Snyder J., Wang Ch., Sun W. "Evaluating fabrication feasibility and biomedical application potential of in situ 3D printing technology". *Rapid Prototyping Journal*. 22, 6 (2016): s. 947–955.
11. Stopp S., Wolff T., Irlinger F., Lueth T. "A new method for printer calibration and contour accuracy manufacturing with 3D-print technology". *Rapid Prototyping Journal*. 14, 3 (2008): s. 167–172.
12. Kiński W., Nalepa K., Miąskowski W. „Analiza termiczna głowicy drukarki 3D”. *Mechanik*. 89, 7 (2016): s. 726–727.
13. Dimas L.S., Bratzel G.H., Eylon I., Buehler M.J. "Tough composites inspired by mineralized natural materials: computation, 3D printing, and testing". *Advanced Functional Materials*. 23, 36 (2013): s. 4629–4638.
14. 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.
15. Siemiński P., Budzik G. „Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D”. Warszawa: Politechnika Warszawska, 2015.
16. centrumdruku3d.pl (dostęp: 20.01.2017 r.).