

Jan Mikoś

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

PRZEGLĄD TECHNOLOGII DRUKU 3D JAKO PRODUKCJI DODATKOWEJ (PRZYROSTOWA) DO WYKONYWANIA PROTOTYPÓW MAŁYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

3D PRINTING TECHNOLOGY USED AS AN ADDITIVE MANUFACTURING FOR MAKING PROTOTYPES OF SMALL ELECTRICAL MACHINES

Streszczenie: Celem artykułu jest przegląd literatury oraz zebranie najważniejszych osiągnięć druku 3D w dziedzinie maszyn elektrycznych. Technologia druku 3D wykorzystywana jako produkcja addytywna (przyrostowa, dodatkowa) w przemyśle 4.0 może znacznie ułatwić wykonywanie prototypów nowych, skomplikowanych geometrycznie elementów, skrócić czas ich produkcji, dzięki czemu zmniejszą się nakłady finansowe. Druk 3D umożliwi drukowanie dowolnych geometrii zaprojektowanych w środowisku CAD z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych, tak jak i elektrycznych, czy magnetycznych, których wykonanie konwencjonalnymi metodami zajęłoby znacznie więcej czasu. W technologii druku 3D należy zwrócić szczególną uwagę podczas obróbki końcowej, czy element nie jest nigdzie zdeformowany lub pęknięty. W przemyśle maszyn elektrycznych w wielu aplikacjach wymagane są skomplikowane struktury, których wykonanie na etapie projektowania jest bardzo kosztowne. Technologia druku 3D może przyspieszyć etap wykonywania prototypów specjalnych maszyn elektrycznych, przez wydrukowanie modelu rzeczywistego lub pom-niejszonego i sprawdzenie jego parametrów z wykonanymi wcześniej analizami.

Abstract: 3D printing technology used as additive manufacturing (incremental, additional) in industry 4.0 can significantly facilitate making new prototypes, which are geometrically complicated, reduce their production time, and can reduce the financial overhead 3D printing technology can print any geometric designs in a CAD environment with materials characterized by different mechanical, electrical or magnetic properties, which performance using standard methods would take much more time. In 3D printing technology, it should be taken into account during finishing that the element is not deformed or cracked anywhere. In the field of electrical machines, many applications require complex structures that are very expensive in conventional process. 3D printing technology can accelerate the stage of making prototypes of electrical machines, by printing a real or reduced model, and perform its parameters with previously performed analyses.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, technologia druku 3D, produkcja addytywna*

Keywords: *electrical machines, 3D printing technology, additive manufacturing*

1. Wstęp

Przemysł 4.0 wymaga coraz większej wydajności, produkcji, logistyki i zarządzania personelem. Wytwarzanie nowych prototypów oraz elementów konwencjonalnymi metodami, może wymagać nowych rozwiązań technologicznych, których wdrożenie może ciągnąć się przez wiele miesięcy lub nawet kilka lat. Produkcja addytywna (ang. additive manufacturing - AM) to termin nadany wszystkim technologiom, które mogą produkować funkcjonalne elementy z modelu komputerowego, dodając materiał warstwa po warstwie. Początkowo technologie AM były ograniczone do produkcji modeli i prototypów prowadząc do powszechnie akceptowanego terminu RP (rapid prototyping), który przez wiele lat określał wszystkie procesy wytwarzania addytywnych warstw. Umożliwiło to

zastosowanie technologii addytywnych do produkcji komponentów końcowych, co doprowadziło do określenia ich jako rapid manufacturing (RM), w celu odróżnienia w pełni funkcjonalnego charakteru produkowanych części z poprzednich modeli RP i prototypów. RM to wciąż rozwijający się paradygmat produkcji, który doprowadził do rozległych obszarów badawczych w środowisku akademickim i przemysłowym.[1] Teraz AM to ogólny termin RP i RM, który używany jest do opisania odpowiedniego zastosowania technologii AM. Postępy w materiałach, procesach i sprzęcie sprawiły, że elementy wytwarzane za pomocą AM posiadają właściwości mechaniczne wystarczające do produkcji funkcjonalnych elementów. Wytwarzanie addytywne może zapewnić

fizyczne wytworzenie projektowanych komponentów na podstawie modeli 3D utworzonych w oprogramowaniu CAD takim jak Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge itd., dzięki którym możemy skrócić godziny pracy i czas prototypowania urządzenia czy elementu w stosunku do konwencjonalnej produkcji. AM jest bardzo popularny w branży medycznej, a w ostatnich latach zyskał popularność w drukowaniu silników elektrycznych do zastosowań dronów, małych samolotów i turbin wiatrowych. Technologia druku 3D w projektowaniu maszyn elektrycznych również stoi w obliczu wielu różnych wyzwań, które należy rozwiązać w przyszłości. Może w tym pomóc szybka ewolucja w zakresie technologii projektowania i prototypowania. W szczególności wykazano, że AM pomaga obniżyć koszty produkcji komponentów, które byłyby wyjątkowo kosztowne przy produkcji konwencjonalnymi metodami. [3] [10]. Budowanie nowych złożonych systemów dla wytwarzania i prototypowania maszyn elektrycznych jest znacznie droższe i wymaga znacznie więcej zasobów ludzkich. Technologia druku 3D jest szybko rozwijającą się dziedziną, a wykonywanie maszyn elektrycznych za pomocą druku 3D może zapewnić bardzo ciekawe kształty, struktury i geometrie. Drukowanie maszyn elektrycznych to sposób, aby tworzyć nowe różne typy maszyn bez stosowania nowych procesów technologicznych. Głównym problemem związanym z technologią drukowania 3D jest przetwarzanie końcowe, przez co maszyny elektryczne wydrukowane z drukarki 3D wymagają dodatkowych procedur, ze względu na wąskie tolerancje montażu części ruchomych oraz ze względu na budowę maszyny, która składa się z wielu różnych materiałów. Maszyny elektryczne do prawidłowego działania wymagają materiału diamagnetycznego o wysokiej przewodności elektrycznej (cewki), materiału diamagnetycznego/ dielektrycznego (izolacja), materiału ferromagnetycznego o niskiej przewodności elektrycznej (rdzeń) i dużej permeancji, a także elektromagnesów/magnesów trwałych do generowania pola magnetycznego. Wszystkie te materiały mają różne właściwości termiczne i wymagają metod druku hybrydowego z różnych stopów, aby można je było zmontować.

Celem artykułu jest przegląd literatury oraz zebranie najważniejszych osiągnięć druku 3D w dziedzinie maszyn elektrycznych. Opisane zostały obecnie stosowane rodzaje druku 3D,

krok po kroku został objaśniony sposób realizacji elementu/obiektu podczas wykonywania go za pomocą druku 3D. W ostatniej części przedstawiono wydrukowane dotychczas maszyny elektryczne w sposób hybrydowy oraz bez jakichkolwiek przerw w drukowaniu. Wykonywanie maszyn elektrycznych za pomocą druku 3D przyspieszy proces prototypowania i wykonywania niekonwencjonalnych struktur i geometrii maszyn elektrycznych oraz zmniejszy nakłady finansowe mało seryjnych maszyn elektrycznych do zastosowań specjalnych, gdzie często wymagane są skomplikowane geometrie kadłubów, których odlewy są drogie i trudne w wykonaniu.

2. Rodzaje i możliwości druku 3D

2.1. Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling służy do modelowania, prototypowania i produkcji urządzeń wykonanych z materiału termoplastycznego. Jako dodatek technologia wykorzystuje materiał, który może zostać wykonany ze stopionej tworzywa sztucznego, służący podczas druku jako materiał wspierający (tzw. rusztowanie). Materiał jest stały w postaci drutu, umieszczany na trójwymiarowej przestrzeni w ruchomej głowicy, która topi warstwę i przygotowuje niezbędne elementy, zgodnie z pożądanymi przekrojami wzoru. Do druku w tej technologii można wykorzystywać różne tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe, których materiałami składowymi mogą być również miękkie metale, np. brąz.

2.2. Direct Ink Writing (DIW)

Direct Ink Writing (z ang. bezpośrednio pisanie atramentem) to technologia drukowania obiektów 3D, gdzie wykorzystywanym materiałem do druku jest atrament, który jest wytłaczany przez ruchomą trójwymiarową dyszę. Podczas procesu drukowania, materiał jest wyciskany z dyszy, która porusza się po platformie, gdzie część drukowana jest formowana warstwa po warstwie. Technologia DIW jest bardzo podobna do Fused Deposition Modeling w ich właściwościach i procesach. Główną różnicą w przypadku modelowania metodą bezpośredniego pisania atramentem jest to, że włókno wychodzi z dyszy w stanie ciekłym, po czym nabiera pożądanego kształtu z powodu pseudo-plastyczności.

2.3. Stereolithography (SLA)

Stereolitografia zwana także wytwarzaniem optycznym, drukiem żywicznym lub krzepnięciem fotograficznym. Jest to technologia drukowania laserowego 3D, która wykorzystuje wrażliwą na ultrafiolet ciekłą żywicę lub ciecz polimerową. Laser ultrafioletowy skanuje powierzchnię żywicy i selektywnie utwardza materiał drukowany, z odpowiednio narysowanego modelu 3D. Pożądany szczegół uzyskuje się warstwami przez zestalenie matrycy zgodnie z przekrojem obiektu. Pożądany szczegół uzyskuje się warstwami przez zestalenie matrycy zgodnie z przekrojem obiektu. Część drukowana jest wytwarzana warstwa po warstwie od dołu do góry, o grubości warstwy 0,025 - 0,15 mm, laser na każdym poziomie utwardza warstwę żywicy w zbiorniku i odsłania nową warstwę cieczy, gotową do przetworzenia.

2.4. Inkjet 3D Printing

Atramentowe drukowanie 3D to bardzo podobna technologia do technologii drukowania atramentowego (DIW). Proces drukowania jest wykonany przy użyciu dwóch różnych materiałów: materiału konstrukcyjnego i materiału mocującego. Warstwa proszku z lepiszczem jest umieszczana na platformie i drukuje wymagany kształt obiektu 3D na pierwszej warstwie. Po zakończeniu pierwszej warstwy proszek topi się i zaczyna budować następną warstwę. Gdy obiekt jest już gotowy, utwardza się go pod wpływem ciepła. Na koniec materiał mocujący jest stopiony, tak że tylko zbudowany obiekt pozostaje stały. Materiałami drukarskimi mogą być również polimery lub metale. Do drukowania atramentowego 3D można stosować różne materiały, a kluczową właściwością jest temperatura topnienia, która jest ważna dla procesu utwardzania drukowanego obiektu.[4]

2.5. Electron Beam Melting (EBM)

Electron Beam Melting to innowacyjna technologia projektowania addytywnego. W tej technologii, materiał drukarski jest topiony za

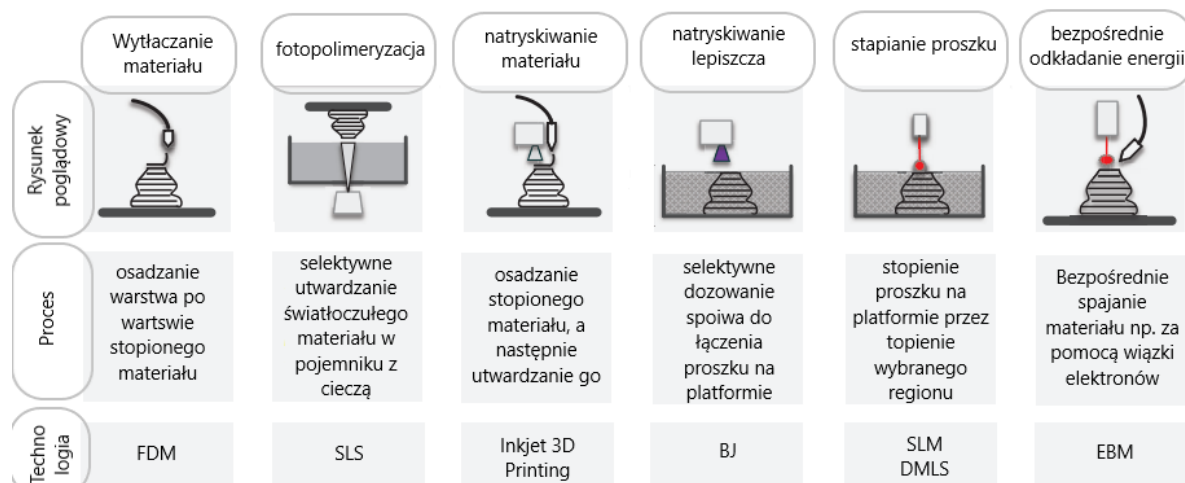
pomocą wiązki elektronów. Stosowanym materiałem jest metaliczny proszek stopowy. Drukowanie odbywa się w próżni, aby zapobiec odbiciu elektronów od molekuł gazu. W komorze próżniowej można stosować metale reaktywne, takie jak tytan, bez obawy o utlenienie. Ta technologia, ze względu na wykorzystanie stopów tytanu jako surowca, jest szeroko stosowana w branży medycznej

2.6. Selective Laser Melting (SLM)

W tego typu technologii metal lub proszek ceramiczny umieszcza się na platformie, gdzie wiązka lasera służy do podgrzewania (spajania) materiału drukarskiego, energia do przetwarzania warstw jest zwykle pomiędzy od 100 do 1000 W. Laser porusza się szybko po powierzchni warstwy proszku, podgrzewając proszek dzięki czemu spiekany (topiony) przekrój obiektu jest wykonywany w formie stałej. Nowa warstwa proszku o grubości 0,1 mm jest umieszczana na ukończonej warstwie, a laser podgrzewa kolejne warstwy przekroju modelu 3D. W rezultacie wszystkie warstwy obiektu są spiekane do siebie. Po zakończeniu procesu drukowane obiekty zazwyczaj wymagają niewielkiej końcowej obróbki np. szlifowanie po zakończeniu procesu drukowania. co jest zaletą tej metody.

2.7. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Bezpośrednie spiekanie laserowe metali to prawie taka sama technologia, co SLM, w których proszek metaliczny jest stosowany jako materiał drukujący. Obiekty wykonane w technologii DMLS są z aluminium lub tytanu. Podobnie jak w przypadku selektywnego topienia laserowego, laser spieka niezbędne punkty przekroju zgodnie z modelem 3D obiektu. W tej technologii, energia lasera jest mocniejsza, a warstwy drukowane są cieńsze, co pozwala na drukowanie mocniejszych, trwalszych przedmiotów o wysokiej precyzji.



Rys. 1. Proces osadzania kolejnych części maszyny podczas przerwy w druku 3D

2.8. Proces produkcji addytywnej

Procesy produkcji addytywnej są bardzo dobrze znane pod względem technologii drukowania 3D i strategii osadzania warstw, dzięki czemu można rozbić procedurę wszystkich technologii warstw addytywnych w 7 podstawowych krokach[2]:

1) Stworzenie modelu cyfrowego.

Jest to proces tworzenia obiektu, który ma zostać wydrukowany. Model cyfrowy jest przygotowywany przy użyciu oprogramowania CAD. Ponieważ model jest tworzony warstwa po warstwie, niektóre projekty obiektu, wymagają optymalizacji schematów, ze względu na złożoność obiektu mogą być wykonane na etapie projektowania.

2) Konwersja modelu CAD do formatu Standard Tessellation Language (.STL).

Operację konwersji można wykonać za pomocą dowolnego standardowego oprogramowania CAD. Konwersja polega na zastąpieniu powierzchni modelu siatką trójkątów. Kiedy zaprojektowany obiekt jest przekonwertowany na format STL, model jest zorientowany na układ współrzędnych platformy drukarki i obsługiwany model STL jest podzielony na liczbę warstw.

3) Ładowanie modelu STL do środowiska drukarki.

Kiedy model STL został sczytany, zorientowany i pocięty na poziome warstwy, to można załadować go do środowiska obsługiwanego przez maszynę produkcyjną. Inne części mogą być dodawane do obiektu umieszczonego na platformie podczas przerw druko-

wania, w celu zachowania ciągłości produkcji elementu.

4) Ustawienie parametrów procesu.

Parametry procesu, takie jak moc cieplna, prędkość, wysokość platformy itp. są ustawiane w stosunku do właściwości budowanego komponentu. Optymalne parametry są unikalne dla każdego przetwarzanego materiału i zależą od sposobu druku oraz geometrii wykonywanego elementu. Etap optymalizacyjny powinien zostać wykonany przed drukowaniem właściwego elementu.

5) Etap budowy.

Na etapie budowy rozpoczyna się główny proces, tzn. część jest tworzona warstwa po warstwie, przez upuszczenie proszku lub drutu (zależy od technologii AM), zgodnie z modelem CAD.

6) Usunięcie komponentu końcowego przeznaczenia z platformy.

Po ukończeniu drukowaniażądanego obiektu należy usunąć element z platformy oraz jeśli zostały zastosowane, usunąć konstrukcje wsporcze.

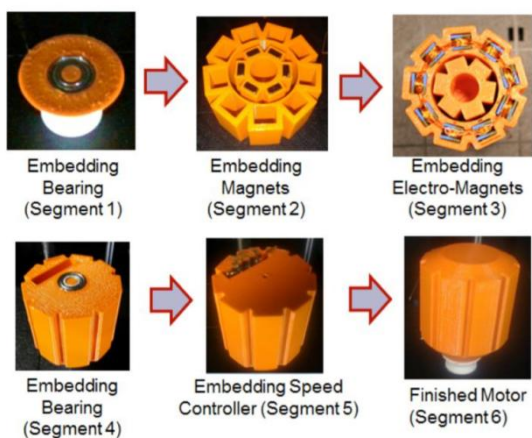
7) Przetwarzanie końcowe.

Ostatni etap procesu dotyczy szeregu procedur wykończeniowych niezbędnych, aby wykonany element był użyteczny. Mogą to być: frezowanie, polerowanie, termiczne i / lub zabiegi mechaniczne.

3. Wydrukowane silniki

Druk 3D jest bardzo wymagającą technicznie procedurą dla maszyn elektrycznych, ze

względem wąskich tolerancji dla montażu części ruchomych i ich strukturalnego wykonania z wielu różnych materiałów. Maszyny elektryczne wymagają zarówno wzbudzenia do kontrolowania wytworzonego wewnątrz maszyny pola magnetycznego, jak i „przewodnic” strumienia ferromagnetycznego (rdzenia) do wzmocnienia oddziaływań magnetycznych wewnątrz maszyny. Materiały te wykazują jednak niekompatybilne właściwości termiczne i wymagają hybrydowych metod drukowania wielomateriałowego do równoczesnego drukowania lub ostatecznego montażu półfabrykatów. W tym przypadku łożyska, magnesy i elektromagnesy są osadzone w maszynie podczas przerw w drukowaniu [9].:



Rys. 2. Proces osadzania kolejnych części maszyny podczas przerwy w druku 3D [9]

Dotychczas tylko kilka rodzajów maszyn elektrycznych wydrukowano za pomocą drukarek 3D. Na Chemnitz University of Technology jako pierwszemu zespołowi badawczemu udało się wydrukować maszynę elektryczną z różnych materiałów bez przerw w drukowaniu. Innowacyjność technologii jest dopiero sprawdzana, ale pokazuje ona, że technologia druku 3D ma wielki potencjał w dziedzinie maszyn elektrycznych [14].

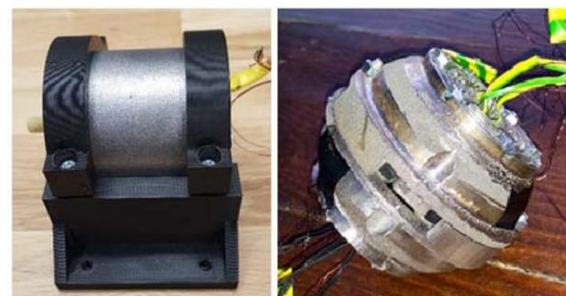


Rys. 3. Pierwszy silnik elektryczny wydrukowany metodą druku wielomateriałowego [14]

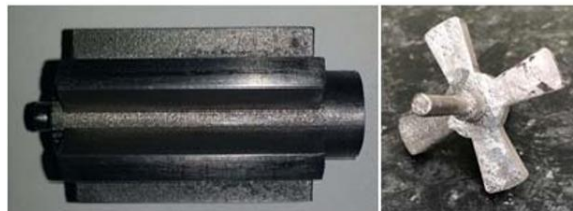
Najpopularniejszymi i najprostszymi technologicznie maszynami wydrukowanymi w technologii druku 3D jest silnik reluktancyjny przełączalny. Atrakcyjność tej maszyny wynika z bardzo prostej konstrukcji, gdzie wirnik jest wykonany tylko z materiału ferromagnetycznego, a jego kształt jest wykonany w sposób, aby mógł wytworzyć reluktancyjny moment obrotowy. Rdzeń z tworzywa sztucznego jest nieoptymalny dla tego typu maszyny (rys.3). Znacznie lepszym rozwiązaniem będzie rdzeń ferromagnetyczny, w którym gęstość strumienia magnetycznego wewnątrz maszyny ulegnie znacznej poprawie. Na rys 4 i 5 zaprezentowane zostały wydrukowane silniki reluktancyjne na Tallinn University of Technology za pomocą technologii SLM.



Rys. 4. Silnik reluktancyjny wydrukowany w technologii SLM [9]



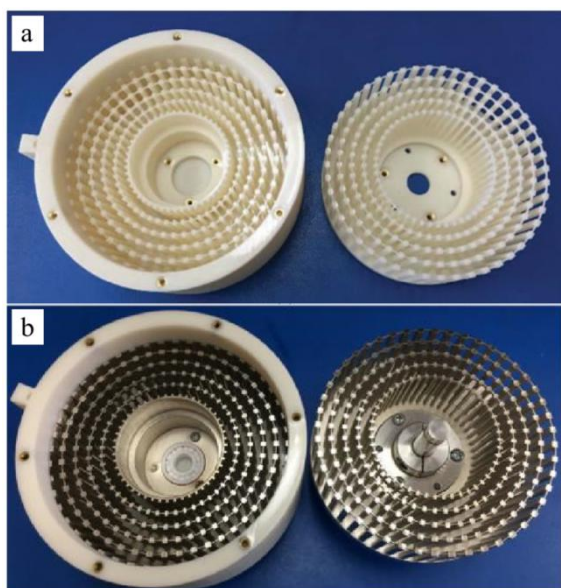
Rys. 5. Silnik reluktancyjny z a) promieniowym b) osiowym rozkładem pola [10]



Rys. 6. Wirniki wydrukowane w technologii SLM a) promieniowy b) osiowy [10]

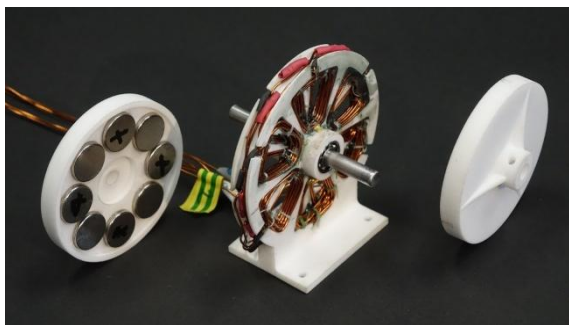
Przy użyciu Fused Deposition Modeling na University of Wisconsin-Madison wydrukowano silnik elektrostatyczny, który działa poprzez

przyciąganie i odpychanie ładunku elektrycznego, rys. 7. Silniki nie wymagają cewek ani przewodników magnetycznych. Cechują się prostą konstrukcją, niskim kosztem, wysoką wydajnością i niewielką wagą. [11] Często stosuje się je w systemach mikroelektromechanicznych (MEMS), w których naładowane płyty w łatwiejszy sposób generują pole elektryczne, niż cewki i rdzenie żelazne.



Rys. 7. Silnik elektrostatyczny wydrukowany w technologii FDM na University of Wisconsin-Madison[4][9]

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wykonane „garażowe” projekty. Za pomocą komercyjnie dostępnych drukarek 3D wydrukowano bezrdzeniowe maszyny z tworzywa sztucznego. Taka maszyna posiada gorsze parametry elektromagnetyczne oraz cieplne w porównaniu do maszyny z rdzeniem ferromagnetycznym, natomiast tego typu maszyny mogą zostać wykorzystane w specjalnych aplikacjach, gdzie np. gabaryty maszyny lub cena odgrywają główną rolę.



Rys. 8. Silnik tarczowy [15]

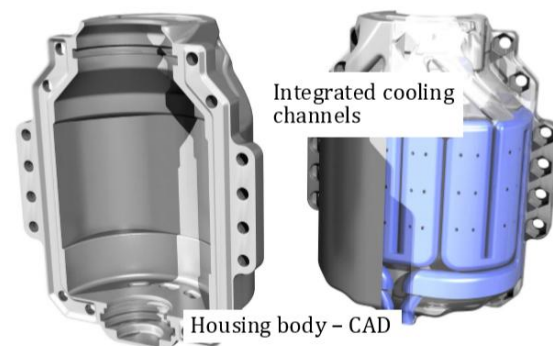


Rys. 9. Silnik BLDC [13]

Na Technical University of Munich i University of Nottingham wykonano obudowy maszyn elektrycznych do zastosowań w pojazdach elektrycznych.



a)



Rys. 10. Obudowa silnika elektrycznego ze zintegrowanymi kanałami do chłodzenia cieczą, a) model CAD oraz wykonana obudowa – Technical University of Munich, b) model CAD – University of Nottingham[6],[7]

Na rys. 10 przedstawiono projekty wykonane w oprogramowaniu CAD i prototypowy sprzęt. W obu przypadkach w obudowie zastosowano unikalną zintegrowaną konstrukcję kanałów do chłodzenia cieczą, co zmniejsza ogólną liczbę części i poprawia ogólną wydajność systemu zarządzania temperaturą [6],[7]. Silnik na rys. 10a, według autorów, ma o 31% wyższy całkowity przepływ i 20% większe przewodzenie ciepła i wydajność układu chłodzenia w porównaniu z konwencjonalną konstrukcją [6]. Autorzy nie podają szczegółów dotyczą-

cych stopu metalu użytego do wykonania obudowy, ale biorąc pod uwagę przewodność cieplną dostępnych stopów, najprawdopodobniej jest to stop aluminium.

4. Podsumowanie

Drukowanie maszyn elektrycznych za pomocą technologii druku 3D obecnie jest we wstępnej fazie i wymaga wiele testów dotyczących samego drukowania jak i obróbki końcowej ze względu na niskie tolerancje elementów maszyn elektrycznych. Obecnie wydrukowane elementy wykazują chropowatości, ubytki, pęknięcia. Pełna produkcja maszyny elektrycznej musi być jeszcze osiągnięta bez żadnego montażu lub obróbki końcowej podczas lub po drukowaniu. Technologia może okazać się szczególnie korzystna przy wytwarzaniu stopów o słabej ciągliwości i przewodności cieplnej, takich jak stal o wysokiej zawartości krzemu.

Druk 3D może znacznie przyspieszyć prototypowanie nowych geometrii i struktur maszyn elektrycznych, których wykonanie konwencjonalnymi metodami byłoby bardzo kosztowne. Przy optymalnej technologii produkcji maszyn elektrycznych za pomocą druku 3D znacząco zmniejsza się czas wytwarzania maszyny, jak również istnieje możliwość zredukowania wymaganych zasobów ludzkich. Metaliczny druk 3D ma bardzo duże możliwości poprawy parametrów magnetycznych rdzeni ze względu na łatwą możliwość domieszkania.

Technologia druku 3D bardzo dobrze mogła by sprawdzić się podczas drukowania kadłubów maszyn elektrycznych, gdzie nie są wymagane aż tak niskie tolerancje konstrukcyjne (większe możliwości przy obróbce końcowej).

5. Literatura

- [1]. D. Thomas "The Development of Design Rules for Selective Laser Melting", PhD.
- [2]. M. Garibaldi "Laser Additive Manufacturing of Soft Magnetic Cores for Rotating Electrical Machinery: Materials Development and Part Design", PhD in Mechanical Engineering.
- [3]. F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, S. Biamino, M. Lombardi, E. Atzeni, A. Salmi, P. Minetola, L. Iuliano, and P. Fino, „Overview on Additive Manufacturing Technologies,” Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 4, 2017, pp. 593-612.
- [4]. J. A. Lewis, „Direct Ink Writing of 3D Functional Materials,” Advanced Functional Materials, vol. 16, no. 17, 2006, pp. 2193-2204.
- [5]. E. Aguilera et al., "3D Printing of Electro Mechanical Systems," in International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2013, pp. 950–961.

- [6]. "Additive Manufacturing moves TUFast," [Online], Available: <https://additivenews.com/additive-manufacturing-moves-tufast/>. -0.7.2019
- [7]. "Nottingham PhD student wins Additive World Design Challenge award," [Online], Available: <https://www.nottingham.ac.uk/engineering/news-events/newslit/nottingham-phd-student-wins-additive-world-design-challenge-award.aspx>. - 07.2019
- [8]. R. Wrobel, B. Mecrow "Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines –A Review".
- [9]. H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, A. Rassõlkin, T. Vaimann, "Challenges of Additive Manufacturing of Electrical Machines".
- [10]. H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, A. Rassõlkin, T. Vaimann "Technologies for Additive Manufacturing of Electrical Machines".
- [11]. B. Ge, D. C. Ludois, A. N. Ghule, "A 3D Printed Fluid Filled Variable Elastance Electrostatic Machine Optimized with Conformal Mapping".
- [12]. U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagha, U. Yamana, M. Dolena, "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0".
- [13]. 600W 3D printed BLDC "https://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/"-0.7.2019.
- [14]. Fully 3D-printed electric motors "https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/8718/en" - 07-2019.
- [15]. 3D printed axial brushless motor for drones. "https://www.youtube.com/watch?v=JkwLpAAfBVI" - 07.2019.