WPŁYW PARAMETRÓW WYDRUKU MODELU WIRNIKA W TECHNOLOGII FDM

na parametry energetyczne prototypu pompy normowej

mgr inż. Mikołaj Sitniewski
dr inż. Witold Lorenz
dr inż. Marcin Janczak
Hydro-Vacuum S.A., Dział Badawczo-Rozwojowy

W artykule przestawiono krótki przegląd technologii szybkiego prototypowania elementów do budowy w pełni funkcjonalnych modeli i prototypów hydraulicznych maszyn przepływowych. Przedstawiono wyniki badań energetycznych prototypu pomp z wirnikami powstałymi w technologii FDM o różnych parametrach wydruku oraz podjęto próbę wyjaśnienia przyczyn zmian parametrów pompy w odniesieniu do prototypu z wirnikiem wykonanym w docelowej technologii wytwarzania.

Ciągłe dążenie do doskonalenia konstrukcji pomp wirowych, w szczególności ukierunkowane na osiągnięcie maksymalnej możliwej sprawności, przy zachowaniu dobrych własności ssawnych powoduje, że podczas wdrażania nowych typoszeregów rola konstruktora bardzo często polega na podniesieniu sprawności pompy o 2-3% w odniesieniu do istniejących rozwiązań. Wymusza to na zespołach projektowych sięganie po coraz bardziej wyszukane metody badawcze. Jedną z nich są symulacje numeryczne przepływu (CFD), które umożliwiają, na etapie tworzenia wirtualnego modelu pompy, przeprowadzenie analizy struktur przepływu pod kątem znalezienia i zminimalizowania stref dyssypacji energii. Ocena uzyskanego wyniku zapewnia również możliwość zweryfikowania obliczeń analitycznych dotyczących przewidywanych parametrów energetycznych.

Dokładność uzyskanego wyniku symulacji CFD zależy od bardzo wielu czynników, które leżą zarówno po stronie samej konstrukcji, jak i zakresu, typu i sposobu oraz metody przeprowadzenia symulacji CFD. Komercyjne metody prowadzenia obliczeń CFD wymagają relatywnie wysokiej dokładności, ale i jednocześnie względnie szybkiego uzyskania precyzyjnego wyniku. Zadanie to wymusza na obliczeniowcach zastosowanie szeregu uproszczeń, takich np. jak:

- przygotowanie geometrii oraz wynikające z tego zagadnienia dot. wyznaczania sprawności wolumetrycznej, wykorzystanie wysokich jakościowo ustawień dyskretyzacji modeli, odpowiednich dla danej konstrukcji modeli obliczania turbulencji,
- sposobu wyznaczania przepływu w warstwie przyściennej oraz uwzględnienie lub pominięcie strat tarcia tarcz wirujących i sprawności mechanicznej.

Możliwa jest budowa bardzo dokładnego modelu numerycznego wraz z uwzględnieniem wyszczególnionych zagadnień, jednakże powoduje to bardzo silne jego rozbudowanie i wydłużenie czasu prowadzenia analizy, co w warunkach prac badawczych prowadzonych w działach badawczo-rozwojowych przy fabrykach pomp staje się zbyt wysokim kosztem. Po-

Projekt jest współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020

wyższe sprawia, że symulacje CFD wykorzystuje się do oceny różnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów hydraulicznych pompy, a w przypadku konieczności uzyskania wyniku pozbawionego zagadnień dotyczących symulacji numerycznych, buduje się rzeczywisty prototyp pompy, badany na stanowiskach testowych. Istotnym jest, aby prototyp bardzo dokładnie odzwierciedlał pompę wykonaną w docelowej technologii wytwarzania (w większości jako odlewy), a dodatkowo jego produkcja trwała szybko i nie generowała nadmiernych kosztów.

Techniki tworzenia prototypów

W ostatnich latach bardzo dużą popularność zdobył termin „druk 3D", którego bardziej ścisłym określeniem jest wytwarzanie przyrostowe (wytwarzanie addytywne). To technika wytwarzania części, polegająca na tworzeniu trójwymiarowych obiektów z pliku cyfrowego bezpośrednio na podstawie modelu komputerowego. Terminem podobnym, stosowanym w celu opisania grupy technologii, jest szybkie prototypowanie (RP – rapid prototyping), które określa wytwarzanie modeli lub prototypów w szybki, niewymagający żadnych przygotowań sposób. Charakterystyczną cechą technologii przyrostowych jest warstwowy charakter uzyskiwanych części, który wpływa na efekty końcowe.

> Dokładność uzyskanego wyniku symulacji CFD zależy od bardzo wielu czynników, które leżą zarówno po stronie samej konstrukcji, jak i zakresu, typu i sposobu oraz metody przeprowadzenia symulacji CFD

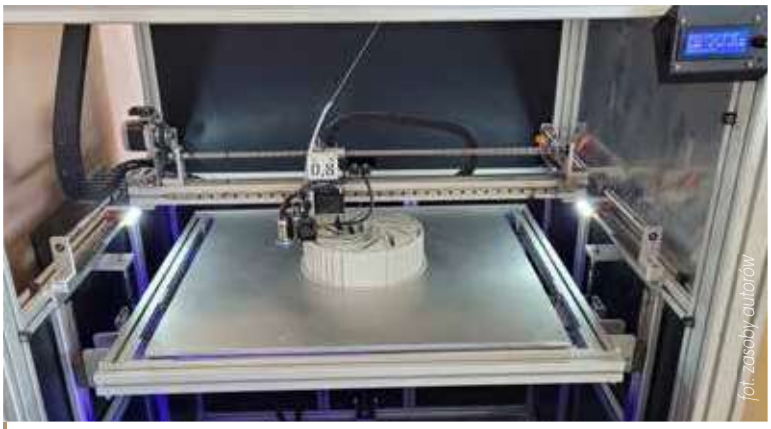
Do druku 3D należy wiele różnych technologii, termin ten jednak nie opisuje jednej konkretnej metody. Poniżej opisano trzy różne sposoby szybkiego prototypownia wykorzystywane najczęściej do budowy prototypów pomp i turbin wodnych, z czego pierwsze dwa mogą być wykorzystywane do budowy w pełni funkcjonalnych maszyn.

Addytywne wytwarzanie form odlewniczych

Technologiami druku 3D umożliwiającymi wykonanie form do odlewu wirników, korpusów spiralnych lub innych elementów konstrukcyjnych maszyny jest BJ (binder jetting – rozpryskiwanie spoiwa) oraz SLS (selective laser sintering – selektywne spiekanie laserowe). Niemal wszystkie techniki wytwarzania przyrostowego wykorzystują jakiś rodzaj materiału podstawowego, w przypadku form odlewniczych jest to piasek. Pewne właściwości, takie jak kształt, wielkość i typ używanego piasku odlewniczego wpływają na możliwe do uzyskania chropowatości. Druk 3D form odlewniczych polega na precyzyjnym rozprowadzeniu cienkiej warstwy piasku odlewniczego, a następnie połączeniu go przy pomocy spoiwa – w przypadku BJ, lub spiekaniu laserem w celu zestalenia – w przypadku SLS. Rozprowadzanie piasku i łączenie warstw odbywa się cyklicznie, aż do osiągnięcia gotowej formy odlewniczej. Obróbka końcowa to usunięcie pozostałego, niespojonego piasku oraz ewentualnie pokrycie formy powłokami, które pozwalają na poprawę chropowatości odlewów i zwiększenie wytrzymałości mechanicznej form odlewniczych. Wykonane formy odlewnicze zalewa się ciekłym metalem i następnie detal obrabia tradycyjnymi metodami wytwarzania. Warto zauważyć, że koszt powstania niewielkich

TŁO ARTYKUŁU

Prezentowane wyniki badań stanowią część prac realizowanych w ramach projektu pt. „Prace badawcze nad opracowaniem zintegrowanej innowacyjnej konstrukcji miniturbin i pomp normowych". Projekt współfinansowany jest z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój – konkurs: Szybka Ścieżka. Celem projektu jest opracowanie i wdrożenie do produkcji zintegrowanego typoszeregu innowacyjnych pomp i miniturbin bazujących na wspólnych, produkowanych seryjnie podzespołach, co ma zapewnić dużą dostępność miniturbin i ich relatywnie niską cenę, w porównaniu do projektowanych i produkowanych indywidulanie turbin. Realizacja projektu obejmuje opracowanie nowego, wysokosprawnego typoszeregu 12 pomp oraz miniturbin ze specjalnie opracowanymi wirnikami typu Francisa wraz z kierownicami o następujących parametrach w pracy turbinowej: przełyk Q wynoszący od 100 do 1000 m^3/h (0,0278 – 0,278 m^3/s) oraz spad H od 10 do 60 m.



FOT. 1
Wirnik modelu turbiny wykonywany w technologii FDM

rdzeni odlewniczych jest na tyle niski, że technologia ta stosowana jest do produkcji masowej np.: wirników pomp głębinowych z łopatkami o przestrzennej krzywiźnie.

Obróbka hybrydowa

Do jednostkowego wytwarzania wirników o znacznym gabarycie, np.: do turbin wodnych, nierzadko łopatki wykonuje się z litego materiału poprzez frezowanie na obrabiarkach pięcioosiowych i następnie łączy z tarczami poprzez spawanie lub połączenie mechaniczne. Ciekawą alternatywą dla tej metody jest obróbka hybrydowa, która łączy zabiegi technologii przyrostowej oraz ubytkowej. Technologia przyrostowa umożliwia dodawanie materiału w warstwach przy użyciu napawania łukowego, mocy światła laserowego lub energii kinetycznej rozpędzonych cząsteczek metalu. Materiałem podstawowym w tym przypadku jest drut lub proszek. Napawanie materiału charakteryzuje się ograniczoną dokładnością wymiarową oraz chropowatością, stąd po napawaniu warstwy lub kilku warstw następuje ich obróbka ubytkowa, najczęściej w formie frezowania przestrzennego. Obróbka ubytkowa pozwala na uzyskanie odpowiedniej chropowatości powierzchni, a także dokładności wymiarowych. Aby zmniejszyć ilość materiału, który musi być napawany, początkowy kształt uzyskiwany jest poprzez obróbkę ubytkową z surowego półfabrykatu takiego jak pręt lub tarcza. Opisana powyżej obróbka charakteryzuje się wysoką jakością powierzchni, której nie można uzyskać innymi metodami i co najważniejsze – detal wykonywany jest z drutu lub proszku całej gamy metali, co zapewnia odpowiednią wytrzymałość i odporność na środowisko pracy.

Niestety, taki sposób obróbki wymaga skomplikowanych, dedykowanych obrabiarek oraz zaawansowanych sposobów programowania procesów napawania i frezowania, co znacząco podnosi koszt produkcji. Wytwarzanie wirników przy wykorzystaniu opisanej powyżej metody może jednak stanowić sposób produkcji zarówno prototypów wirników pomp oraz turbin, jak i części maszyn produkowanych jednostkowo lub w małych seriach.

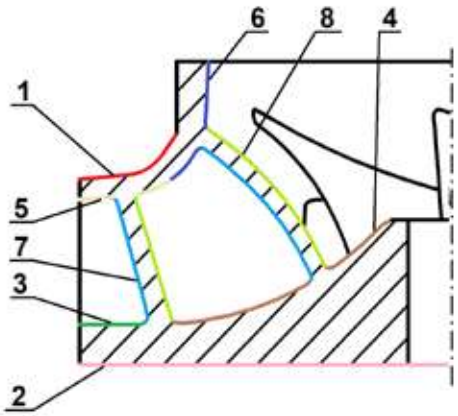
Technologia FDM wydruku 3D

Na szczególną uwagę spośród technologii umożliwiających zrealizowanie idei szybkiego prototypowania w przygotowaniu wirników pomp wirowych zasługuje metoda FDM (FDM – Fused Deposition Modelling) lub FFF (Fused Filament Fabrication). Wykorzystywanymi materiałami w tej metodzie są termoplastyczne tworzywa polimerowe, takie jak: PLA, ABS oraz PET-G. Metoda FDM polega na wyciskaniu termoplastycznego tworzywa poprzez rozgrzaną dyszę, poruszającą się po zaplanowanej ścieżce. Wyciskane tworzywo polimerowe przechodzi w stan półpłynny, a następnie wypływa poprzez dyszę i po ochłodzeniu ulega zestaleniu. Uzyskane w ten sposób części mają charakter warstwowy, co wpływa w dużym stopniu na właściwości otrzymanych elementów. Wykonane części charakteryzują się anizotropowością, która jest tego konsekwencją. Oznacza to, że własności mechaniczne części są uzależnione od kierunku ich badania, np. wytrzymałość na rozciąganie w poprzek warstw jest niższa niż wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż warstw.

Chropowatość elementów wykonanych przy użyciu technologii FDM jest znacząco ograniczona poprzez istnienie warstw w wydruku, parametry ich nakładania (wysokość warstwy, średnica dyszy, prędkość wydruku) oraz w szczególności kierunku ich nakładania względem tworzonych kanałów przepływowych, np.: łopatek wirnika, a także konieczność stosowania podpór w trakcie drukowania silnie pochylonych lub całkowicie zamkniętych przestrzeni. Zazwyczaj chropowatość wydruków FDM wynosi od 80 do około 10 µm, natomiast chropowatość odlewów: od 40 do 25 µm. Wirniki wykonane w technologii FDM wykorzystuje się jedynie do badań energetycznych i kawitacyjnych

TAB. 1 Spósób oceny chropowatości zastępczej

Wirnik:		W1	W2	W3	W4	Udział pow. %
	Pow.					
Tarcze boczne	1	25	80	60	8	41,3
	2	5	22	20	10	58,7
Zastępcze Ra:		13,5	46	36,5	9,2	
Kanał hydr.	3	25	32	20	5	9,8
	4	25	80	40	28	15,4
	5	25	80	60	40	7,3
	6	25	80	40	9	12,3
	7	25	80	36	7	26,9
	8	25	80	36	7	28,2
Zastępcze Ra:		25	75,3	37,3	12,7	



TAB. 2
Przedmiot badań

Nr wirnika	Opis	Zdjęcie wirnika od strony wlotu	Zbliżenie na powierzchnie styku łopatki i tarczy tylnej
1	Wirnik wykonany w technologii odlewniczej • Materiał: ZI-250 • Pokryty powłoką antykorozyjną • Chropowatość kanałów hydraulicznych: Ra(kh) ~25 • Chropowatość tarcz bocznych: Ra(tb) ~13,5		
2	Wirnik wykonany w technologii FDM • Średnica dyszy: 1 mm • Wysokość warstwy: 0,7 mm • Materiał: PET-G • Czas wydruku: 22 h • Chropowatość zastępcza kanałów hydraulicznych Ra(kh) ~75 • Chropowatość zastępcza tarcz bocznych: Ra(tb) ~46		
3	Wirnik wykonany w technologii FDM • Średnica dyszy: 0,6 mm • Wysokość warstwy: 0,3 mm • Materiał: PET-G • Czas wydruku: 36 h • Chropowatość zastępcza kanałów hydraulicznych: Ra(kh) ~37 • Chropowatość zastępcza tarcz bocznych: Ra(tb) ~37		
4	Wirnik wykonany w technologii FDM • Średnica dyszy: 0,4 mm • Wysokość warstwy: 0,2 mm • Materiał: PLA • Czas wydruku: 43 h • Chropowatość zastępcza kanałów hydraulicznych: Ra(kh) ~ 13 • Chropowatość zastępcza tarcz bocznych: Ra(tb) ~9 mm		

pomp, natomiast ze względu na odporność materiału i jego strukturę nie mogą być przeznaczone do gotowych wyrobów.

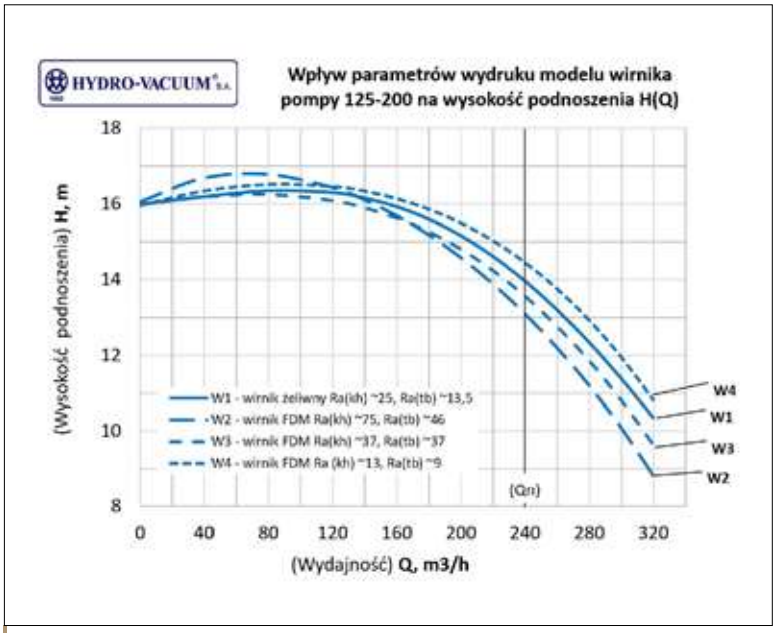
Moc dotychczas zbudowanych i przetestowanych przez autorów pomp i miniturbin z wirnikami wykonanymi w tej technologii wyniosła do 90 kW; obroty do 2950 1/min; maksymalna średnica do 494 mm. Warto zauważać, że koszt drukarki 3D w technologii FDM zaczyna się od kilku tysięcy złotych, a koszt 1 kg wydruku to ~100 zł, co powoduje bardzo wysoką przystępność tej technologii. Problem może jedynie stanowić czas wydruku, który przykładowo dla wirnika miniturbiny o średnicy 494 mm i masie ~5,6 kg wynosi ~150 h.

Cel i przedmiot badań

Celem prowadzonych badań było określenie zmiany podstawowych parametrów energetycznych pompy zaprojektowanej zgodnie z normą PN-EN 733 o oznaczeniu 125-200 w postaci oceny zmiany przebiegu charakterystyki wysokości podnoszenia, poboru mocy i sprawności dla prototypu z wirnikiem odlewanym (żeliwo szare) i wykonanym w technologii FDM dla trzech różnych parametrów wydruku. Nominalne parametry pomp 125-200 wynoszą: wydajność Qn =2 40m^3/h, wysokość podnoszenia Hn = 14 m.

> Istotnym jest, aby prototyp bardzo dokładnie odzwierciedlał pompę wykonaną w docelowej technologii wytwarzania

Jednym z trudniejszych aspektów prowadzonych prac była ocena chropowatości wirników w technologii FDM ze względu na fakt uwarstwienia wydruku, który bardzo silnie wpływa na chropowatość w przypadku mocno pochylonych kanałów wirnika.

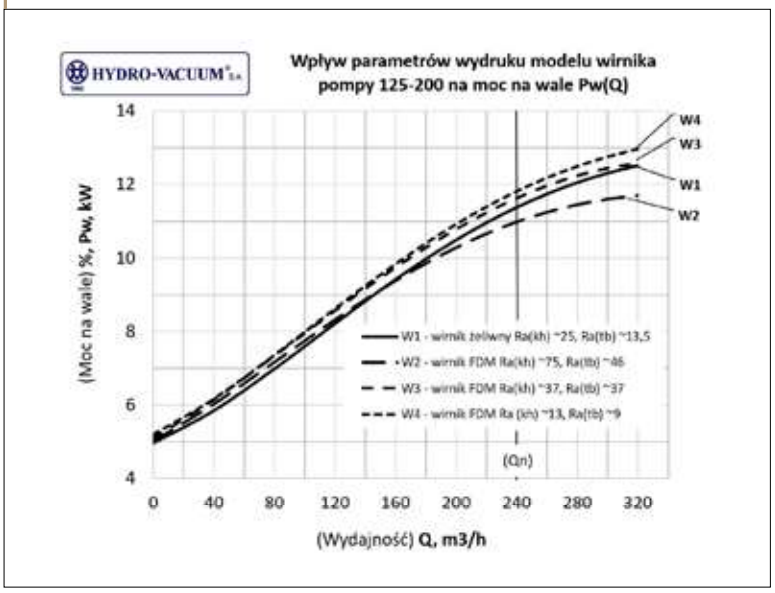


RYS. 1
Wpływ parametrów wydruku modelu wirnika pompy 125-200 na wysokość podnoszenia H(Q)

W związku z powyższym autorzy podzielili wirnik na kilka stref, w których oceniano stan powierzchni na podstawie płytek wzorcowych, a następnie wyliczono zastępczą chropowatość biorąc pod uwagę udział danego pola powierzchni o oszacowanej chropowatości w całym kanale hydraulicznym wirnika. Próbę oceny chropowatości sporządzono osobno dla zewnętrznych tarcz bocznych wirnika oraz kanałów hydraulicznych. Szczegółowe wyniki oraz schematyczny zakres ocenianych powierzchni zestawiono w tabeli 1.

Parametry wydruku oraz cechy charakterystyczne pokazano w tabeli 2.

RYS. 2
Wpływ parametrów wydruku modelu wirnika pompy 125-200 na moc na wale Pw(Q)



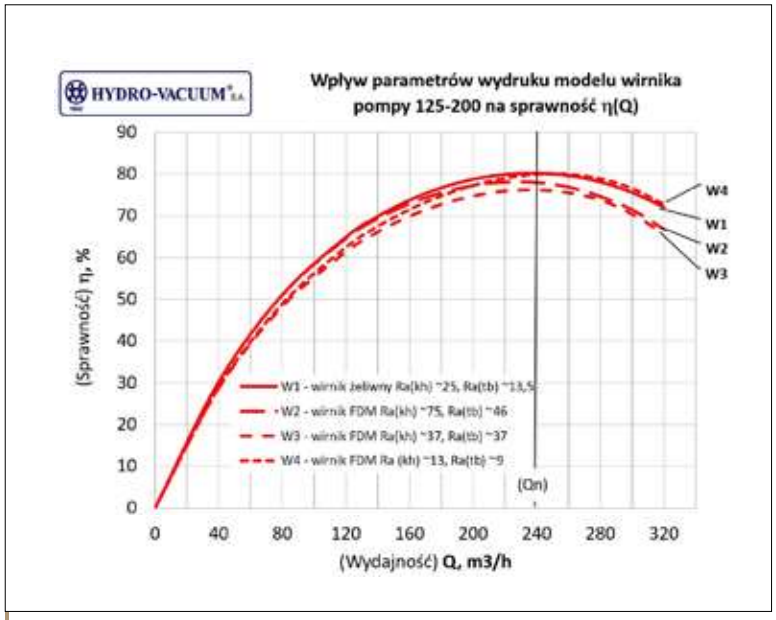
Wyniki pomiarów energetycznych

Badania pomiarów energetycznych prototypu pompy 125-200 z różnymi modelami wirników zostały wykonane zgodnie z normą ISO 9906 w klasie 2B. W celu ułatwienia analiz wyniki zestawiono w postaci graficznej, na których linią ciągłą zamieszczono wyniki dla modelu wirnika (W1) wykonanego w technologii odlewu, natomiast linie przerywane o różnej wielkości prezentują wyniki dla wirników drukowanych z oceną chropowatości od najwyższej (W2) do najniższej (W4).

> Charakterystyczną cechą technologii przyrostowych jest warstwowy charakter uzyskiwanych części, który wpływa na efekty końcowe

Najbardziej zbliżoną wysokość podnoszenia (H) do wirnika żeliwnego wykazuje wirnik W3, dla którego osiągnięto podobny kształt charakterystyki H(Q), natomiast dostrzega się wyraźny wpływ zwiększenia strat hydraulicznych w kanale międzyłopatkowym już po przekroczeniu 30% wydajności nominalnej (Qn) pompy. Odchyłka H dla W3 w Qn wynosi 2,8%. Znacznie silniejszy spadek wysokości podnoszenia notuje się dla wirnika W2, wykonanego z najgorszymi parametrami wydruku, dla którego odchyłka H w Qn wynosi 6,2% (dodatkowo wykazuje on dość silną niestateczność charakterystyki w zakresie wydajności: 0-55% Qn). Dla wirnika W4 i najniższej chropowatości osiągnięto większą wysokość podnoszenia niemal w całym zakresie pracy pompy niż dla wirnika odlewanego. Wzrost H dla wydajności nominalnej wynosi 3,5% i wydaje się rosnąć wraz ze wzrostem wydajności pompy, co naturalnie należy powiązać ze zmniejszaniem strat przepływu w kanałach łopatkowych wirnika.

Podobnie jak dla wysokości podnoszenia, tak również moc pobierana (Pw) przez wirnik W3 jest najbardziej zbliżona do Pw wirnika odlewanego i wykazuje względnie stałą wartość wzrostu wynoszącą ~0,3 kW w zakresie 15-115% Qn, co można tłumaczyć wzrostem strat tarcia tarcz wirujących związanych z uwarstwieniem tarcz wirnika i ich wyższą chropowatością. Wpływ zwiększonych strat tarcia W3 na pobór mocy w wydajności nominalnej wynosi 2,2%. Nieco odmienny charakter zmian poboru mocy notuje się dla wirnika W4, charakteryzującego się chropowatością tarcz wirnika zbliżoną do wirnika odlewanego. Podwyższony pobór mocy W4 względem W1 wykazuje tendencję rosnącą wraz z wydajnością, uzyskując wzrost o: 0,24 kW dla 0% Qn, 0,44 kW dla Qn i 0,45 dla



RYS. 3
Wpływ parametrów wydruku modelu wirnika pompy 125-200 na sprawność η(Q)

130% Qn. Biorąc pod uwagę podobny charakter wzrostu wysokości podnoszenia wirnika W4 względem W1, należy wzrost poboru mocy powiązać ze wzrostem generowanej w wirniku wysokości podnoszenia. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że zmniejszenie chropowatości kanałów hydraulicznych wpływa korzystnie nie tylko na straty przepływu, ale również na ilość przekazywania do cieczy energii w obrębie palisady łopatkowej wirnika. Tezę tę potwierdzają wyniki uzyskane dla wirnika W2, dla którego moc pobierana przez wirnik w zakresie wydajności powyżej 60% Qn jest wyraźnie mniejsza od wszystkich innych badanych wirników, przy czym trzeba zaznaczyć, że wirnik W2 w tym zakresie generuje najniższą wysokość podnoszenia.

Naturalną konsekwencją zmiany chropowatości kanałów wewnętrznych wirnika związanych z uwarstwieniem powierzchni wydruku wydaje się zmiana sprawności pompy. W dotychczas przeprowadzonych przez autorów badaniach pomp i mniturbin z wirnikami drukowanymi zazwyczaj notowano średnio 2% negatywnego wpływu tej technologii wykonania na ostateczną sprawność pompy, przy zachowaniu parametrów wydruku zbliżonych do tych użytych podczas wytwarzania W3. W tym przypadku, dla W3 wpływ na sprawność jest znacznie wyższy i wynosi 5,1%. Pewnym wytłumaczeniem tak dużego spadku sprawności jest dość wysoki wyróżnik szybkobieżności badanego wirnika (ns = 52,6), dla którego udział strat przepływu w kanale wirnika może stanowić wysoką wartość w odniesieniu do niskiej generowanej wysokości podnoszenia. Przeczy temu jednak fakt uzyskania wyższej sprawności dla relatywnie gorszego wirnika W2; z tego względu należałoby podobne badania przeprowadzić w jeszcze bardziej systematyczny sposób i na szerszej grupie wirników o różnych wartościach wyróżnika szybkobieżności. Dla wirnika W4 wartość sprawności jest zbliżona do W1, przy czym można zauważyć przesunięcie się maksymalnej sprawności w kierunku większej wydajności.

***

Wybór technologii wykonania wirników i kierownic do budowy modelu funkcjonalnego nowo projektowanej maszyny hydraulicznej jest kluczowy w celu umożliwienia określenia parametrów energetycznych najbardziej zbliżonych do tych uzyskiwanych w docelowej technologii wykonania (zazwyczaj odlew). W technologii produkcji hybrydowej oraz wydruku FDM o bardzo niskich wartościach przyrostu warstwy, chropowatość kanału może być nienaturalnie niska, zawyżając tym samym zmierzoną wysokość podnoszenia i nierzadko również sprawność. Pogorszenie parametrów wydruku w technologii FDM, które wpływa korzystnie na skrócenie produkcji, powoduje bardzo wysokie uwarstwienia powierzchni, co nie tylko wpływa negatywnie na straty przepływu, ale również powoduje nienaturalny kształt krzywych. Najlepszym sposobem produkcji prototypów jest drukowanie form piaskowych i zalewanie ich metalem, jednakże ze względu na dostępność tej technologii i jej koszt, wciąż najbardziej popularnym procesem pozostaje wydruk FDM. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na parametry wydruku oraz po zakończonym procesie badawczym określić wpływ tej technologii na ostateczne parametry pracy, tak aby podczas oceny wyników kolejnej projektowanej pompy mieć świadomość niepewności, z jaką możemy mieć do czynienia.

Literatura

[1]. Dey A, Roan Eagle IN, Yodo N. A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. ("Nita Yodo - Google Scholar") Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021.
[2]. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M.: Additive Manufacturing Technologies, Springer Cham, 2021.
[3]. Jeyaprakash, N. & Cheepu, Murali Mohan & Yang, Che-Hua. (2021). Advances in Additive Manufacturing Processes. 10.2174.
[4]. Polak R.; Sedlacek, F., Raz K. (2017). Determination of FDM Printer Settings with Regard to Geometrical Accuracy, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.0561-0566, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.
[5]. Mohammad S. Alsoufi, and Abdulrhman E. Elsayed, "How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ is Influenced by Measuring Direction." American Journal of Mechanical Engineering, vol. 5, no. 5 (2017):
[6]. Kristiawan, Ruben Bayu, Imaduddin, Fitrian, Ariawan, Dody, Ubaidillah, and Arifin, Zainal. „A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters" Open Engineering, vol. 11, no. 1, 2021.