

Szybkie prototypowanie łopatek wentylatorów

Andrzej Drwięga
Michał Szelka
Andrzej Turewicz

Rapid prototyping axial fan blades

Streszczenie:

W artykule omówiono dotychczasowe prace rozwojowe, realizowane przez ITG KOMAG, w ramach projektu europejskiego INESI, których celem jest zwiększenie efektywności wentylatorów stosowanych w podziemiach kopalń. Cel ten może zostać osiągnięty przez polepszenie parametrów eksploatacyjnych wentylatora, poprzez modyfikację łopatek wirnika. Omówiono metodykę szybkiego prototypowania łopatek wentylatora, które zostaną przetestowane, z zastosowaniem druku 3D, przy wsparciu modelowaniem CFD. Przedstawione zostały również wyniki badań wentylatora przed i po modyfikacji łopatek.

Słowa kluczowe: górnictwo, wentylacja, wentylator osiowy, łopatki wentylatora, drukowanie 3D, modelowanie CFD

Keywords: mining, ventilation, axial fan, blades of fan, 3D printing, CFD modelling

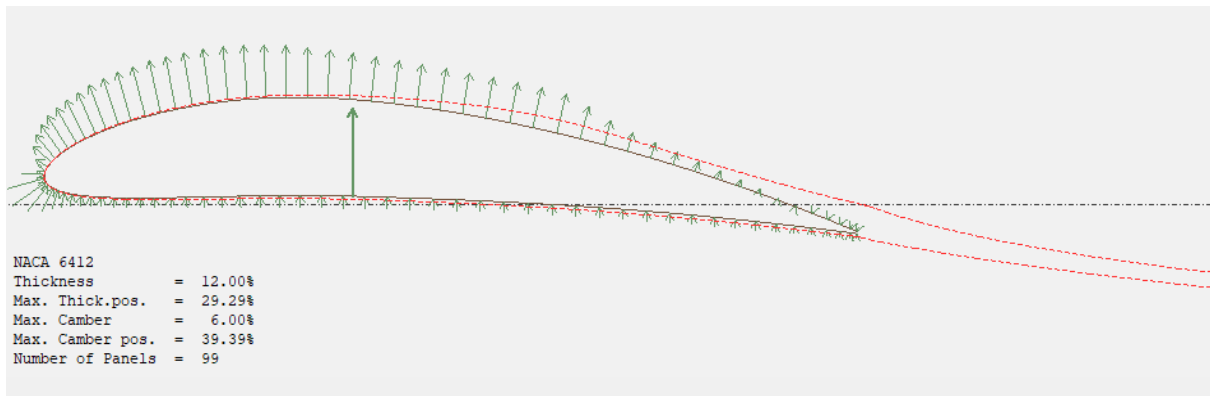
Abstract:

The article discusses previous development works carried out by ITG KOMAG within the framework of the European INESI project, whose aim is to increase the efficiency of fans used in underground mines. This goal can be achieved by improving the operating parameters of the fan, through the modification of the rotor blades. The methodology of rapid prototyping of fan blades which are going to be tested using 3D printing with the support of CFD modeling is discussed. The results of fan tests before and after modification of the blades are discussed.

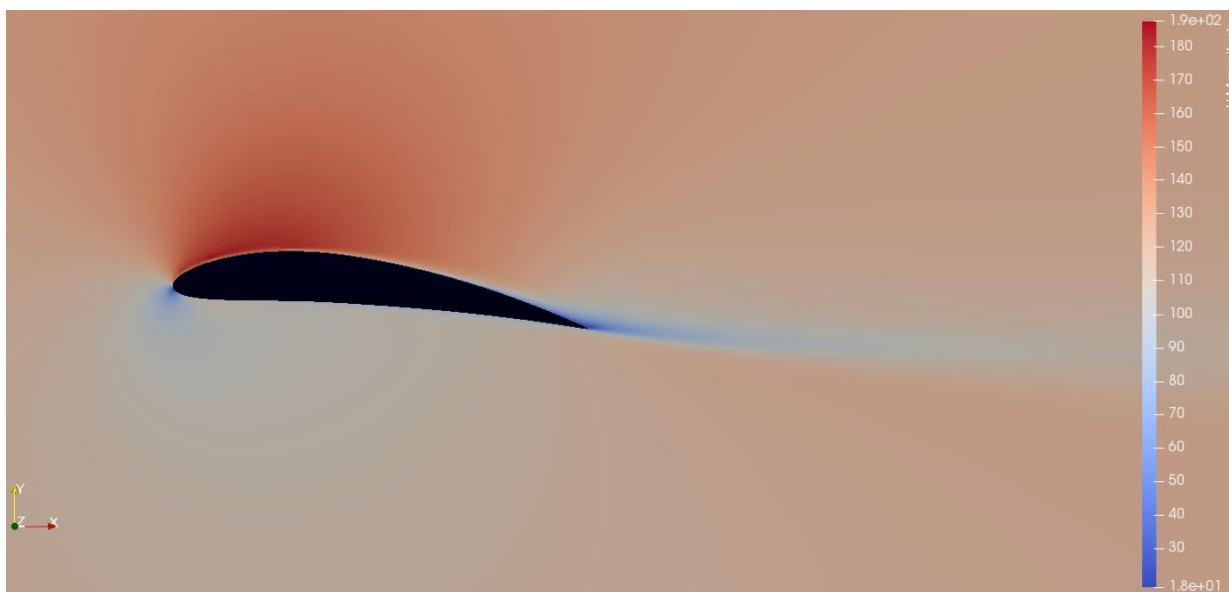
1. Wprowadzenie

W konstrukcjach wirników wentylatorów górniczych do wspomagającego przewietrzania wyrobisk w podziemiach kopalń, stosowane obecnie są łopatki o profilu łukowym wykonane z giętej blachy. Tego typu łopatki ze względu na prosty proces produkcji, jak i wystarczający stosunek kosztu produkcji względem uzyskanej sprawności układu, są dotychczas najczęściej wybieranym rodzajem łopatek. Metody szybkiego prototypowania oparte na obliczeniach CFD oraz druku 3D pozwalają na redukcję czasu jak i kosztu opracowania łopatek o złożonym kształcie powierzchni.

W oparciu o doświadczenia z przeprowadzonych badań wentylatorów w ITG KOMAG można założyć, że w wyniku korekty kształtu łopatek wentylatora można zwiększyć jego sprawność od kilku do kilkunastu procent. W profilach aerodynamicznych typu NACA (rys. 1), drogi opływu powietrza po obu stronach łopatki są wyraźnie zróżnicowane, co powoduje, że powietrze po stronie bardziej wypukłej, umownie „górnej”, podczas przepływu musi obiegać profil szybciej (rys. 2), wskutek czego ulega rozrzedzeniu. Skutkuje to tym, że ciśnienie statyczne po stronie górnej jest mniejsze niż po stronie umownie „dolnej”, co powoduje zasysanie powietrza. Analogicznie, gdybyśmy rozważali nie łopatkę a skrzydło samolotu, w wyniku rozrzedzenia powietrza generowana byłaby siła nośna „unosząca” skrzydło.



Rys. 1. Przykład profilu aerodynamicznego typu NACA 6412 [opracowanie własne]



Rys. 2. Przykładowa mapa prędkości opływu [opracowanie własne]

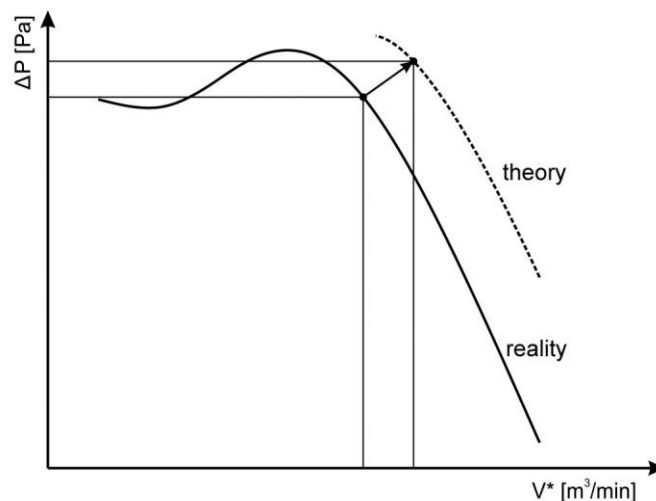
Wirująca łopata generuje nie tylko siłę nośną w wyniku rozrzedzenia powietrza ale również siłę oporu. Istotnym w budowie łopatki jest wskaźnik ilorazu siły nośnej i siły oporu F_y/F_x zwany również bezwymiarowym wskaźnikiem doskonałości aerodynamicznej „k”, który powinien mieć jak największą wartość, zwłaszcza w zakresie nominalnej pracy wentylatora. Generowane siły wytwarzają również niewielki moment siły, który powoduje tendencję do obracania łopatki względem geometrycznego środka przekroju. Na ogół wartości momentu obrotowego mają niewielkie wartości i zmieniają się wraz z kątem natarcia łopatki, dlatego ich wpływ na stabilność zamocowania łopatki jest pomijalny.

2. Zasady projektowania łopatek wentylatora

W celu zwiększenia sprawności wentylatora lub uzyskania korzystniejszego spiętrzenia, przy tej samej pobieranej mocy, łopata powinna mieć opływowy, aerodynamiczny kształt, podobnie jak skrzydło samolotu czy turbiny wiatrowej. Zalecanym kształtem jest profil asymetryczny, z dolną powierzchnią, lekko wklęsłą na 2/3 długości. Profil posiada

pogrubioną część przednią i zwężającą się część tylną, tworząc wyostrzoną krawędź spływu. Powierzchnia górna jest zdecydowanie wypukła, a dolna lekko wklęsła. Strumień powietrza generowany łopatkami powinien mieć jednakową prędkość na każdej wysokości łopatki. Ponieważ ze wzrostem wysokości łopatki liniowa prędkość jest coraz większa, jej przekrój na danej wysokości winien to kompensować. W efekcie łopatka powinna być stopniowo skręcana wraz ze wzrostem odległości od osi obrotu. Wynikowy kształt łopatki i jej skręcenia powinien być ściśle związany z prędkością obrotową wirnika i osiową prędkością przepływu powietrza. Dla doboru właściwego ww. skręcenia łopatek, należy obliczyć wynikowe wektory prędkości powietrza na różnych wysokościach w oparciu o zakładaną wydajność wentylatora i znaną prędkość obrotową napędu. Należy również dobrać kąt natarcia, mający istotny wpływ na wydajność przepływową wentylatora. W warunkach obciążenia większego niż nominalne, wentylator może pracować z efektem tak zwanego „pompażu”. Podobny efekt, nazywany „przeciągnięciem” może wystąpić na skrzydłach samolotu, gdy pilot nadmiernie zwiększy kąt natarcia przy niewystarczającej prędkości samolotu. Brak dostatecznej mocy powoduje zmniejszenie prędkości przy ostrym wznoszeniu, co jeszcze bardziej powiększa kąt natarcia i skrzydła nie generują siły nośnej. W przypadku wentylatora efekt ten polega na odrywaniu się strugi powietrza od powierzchni łopatki, przez co za łopatkami wytwarzają się turbulencje, w wyniku czego wentylator pracuje głośniejsze, a jego sprawność znacznie się obniża.

Niestateczny zakres pracy wentylatora, ze względu na niską sprawność charakteryzuje się pulsacjami przepływającego czynnika, drganiami i zmianą emitowanego dźwięku [2]. Aby tego uniknąć należy dobrać spiętrzenie wentylatora, uwzględniając zakładaną wydajność przewietrzania jak i średnicę oraz długość lutniociągu. Ze względu na różnicę pomiędzy wynikami analitycznymi a rzeczywistymi wynikami badań (rys. 3) należy uwzględnić nadwyżkę mocy oraz spiętrzenia na poziomie 30%.



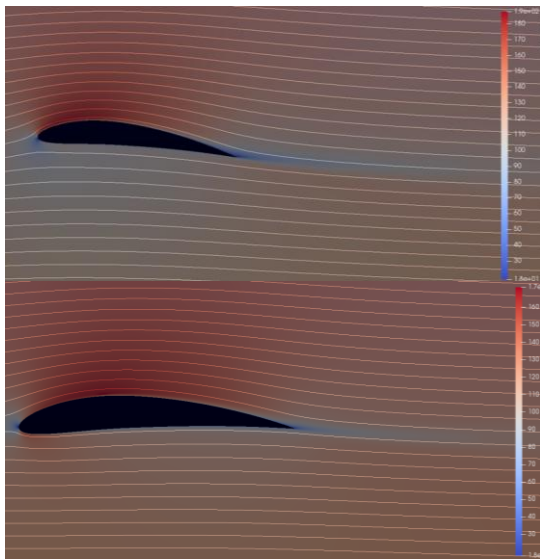
Rys. 3. Porównanie własności wentylatora projektowanego i rzeczywistego [opracowanie własne]

Wirnik wentylatora, abstrahując od parametrów silnika, ma zasadniczy wpływ na jego parametry pracy (spiętrzenie [Pa], wydajność [m^3/min], sprawność [%]). Wirnik można optymalizować w aspekcie jego cech geometrycznych, głównie poprzez dobór odpowiedniego kształtu łopatek oraz ich liczby. Prototypowanie łopatek o aerodynamicznym

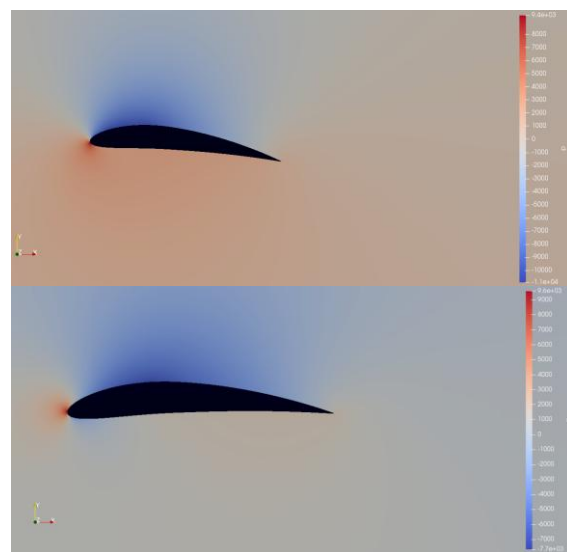
kształcie, tradycyjnymi metodami jak obróbka skrawaniem czy odlewanie, w celu przeprowadzenia testów jest bardzo kosztowne. W związku z tym, podczas realizacji projektu INESI wykorzystano możliwości szybkiego prototypowania, co pozwoliło na znaczącą redukcję kosztu wytworzenia prototypowych łopatek do zrealizowania badań stanowiskowych.

3. Modelowanie CFD

Modele łopatek zostały opracowane w programie Inventor, a następnie poddane analizie CFD. Do analizy wykorzystano program OpenFOAM, który jest oprogramowaniem o otwartym kodzie źródłowym, napisanym w języku C++. Procesor OpenFOAM (solver) rozwiązuje równania różniczek cząstkowych metodą objętości skończonych. Obliczenia dotyczące poszczególnych przekrojów łopatek pozwalają na określenie prędkości opływającego powietrza wzdłuż konturu oraz wyznaczenie linii prądu powietrza (rys. 4.) przy różnych kątach natarcia łopatki oraz dla założonych prędkości liniowych danego konturu, wynikających z prędkości obrotowej wentylatora oraz odległości przekroju od środka obrotu. Obliczenia umożliwiają również na przeanalizowanie rozkładu ciśnienia wokół konturu (rys. 5) i jak można zauważyć, wartościom większych prędkości, odpowiadają proporcjonalnie mniejsze wartości ciśnienia.

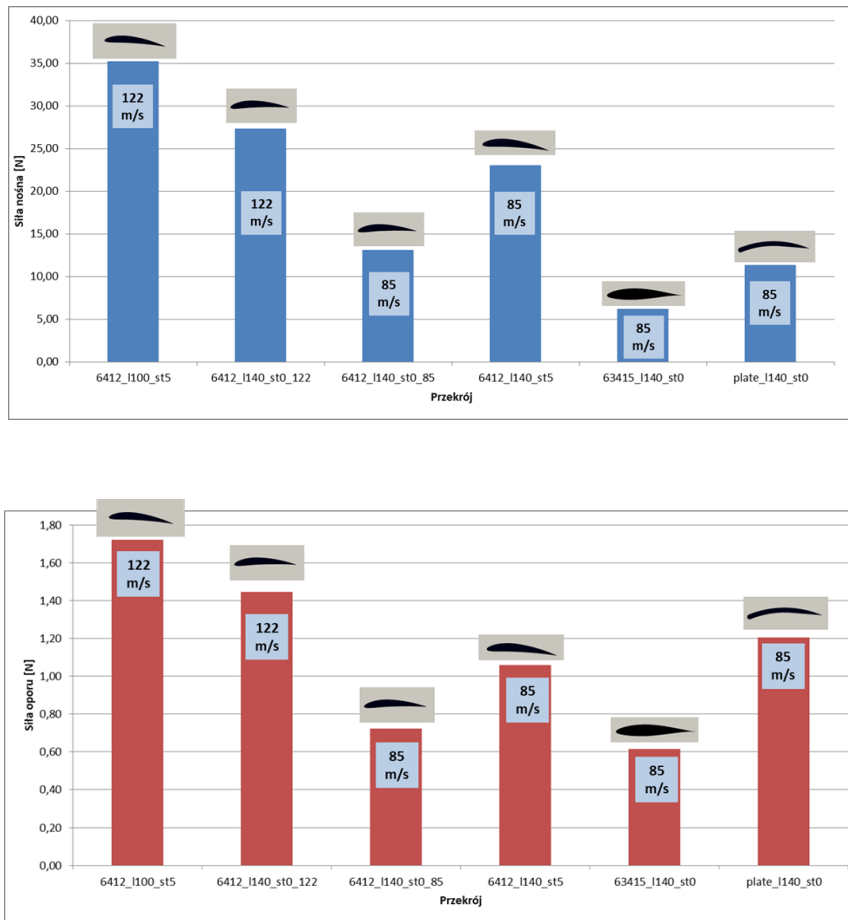


Rys. 4. Mapa prędkości opływu powietrza wokół profilu przy kącie natarcia 5° i 0°
[opracowanie własne]



Rys. 5. Mapa rozkładu ciśnienia powietrza wokół profilu przy kącie natarcia 5° i 0°
[opracowanie własne]

Obliczenia CFD pozwalają również określić wartości siły nośnej F_y , siły oporu F_x oraz momentu siły wynikowej, względem geometrycznego środka przekroju profilu. W celach porównawczych przeanalizowano trzy typy łopatek: NACA 6412, NACA 63415 oraz łopatkę typu single thickness. Łopatkę NACA 6412 przeanalizowano w dwóch przekrojach, odpowiadających liniowym prędkościom wirowania 122 m/s i 85 m/s oraz dla dwóch kątów natarcia: 5° oraz 0°. Pozostałe dwa typy łopatek obliczono dla prędkości 85 m/s przy zerowym kącie natarcia. Wyniki obliczeń siły nośnej, siły oporu i momentu zestawiono na wykresach na rysunku 6.

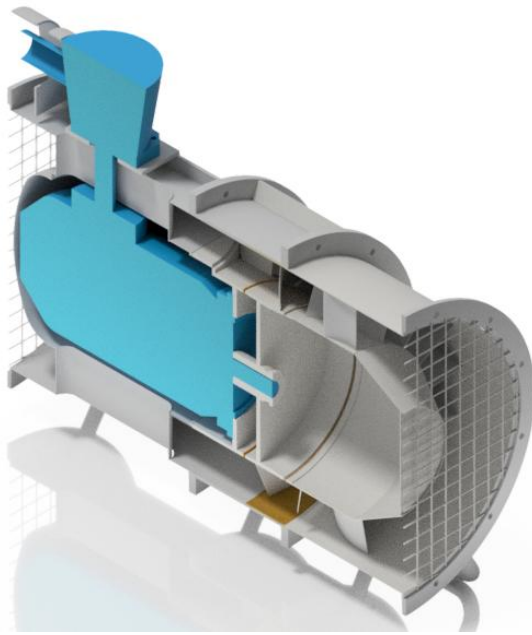


Rys. 6. Od góry: wartości siły nośnej i siły oporu dla różnych przekrojów, dla różnych typów i kątów natarcia łopatek [opracowanie własne]

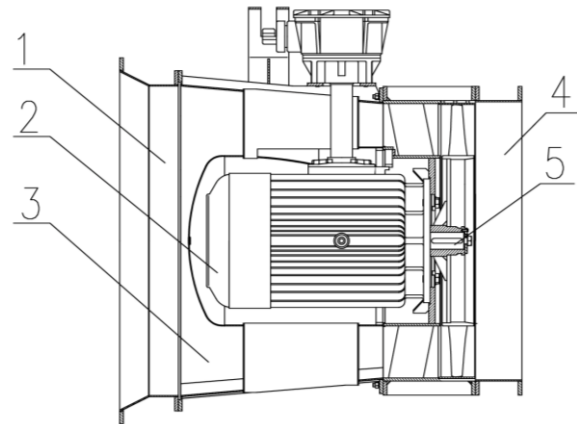
Jak można zaobserwować na podstawie uzyskanych wyników obliczeń, wzrostowi siły nośnej towarzyszy proporcjonalny wzrost siły oporu.

4. Wspomaganie budowy prototypów łopatek drukiem 3D

Analiza łopatki wirnika wykonanej metodą gięcia płatów blach wykazała: niską sprawność w obszarach poza optymalnym punktem pracy. Poszukując eksperymentalnie korzystniejszego zarysu łopatki modyfikowano jej profil poprzez naklejanie nakładek korygujących wykonanych techniką druku 3D. W celu opracowania skutecznej techniki modyfikacji łopatek za pomocą drukowanych nakładek, zrealizowano próby z naklejanymi nakładkami korygującymi łopatek na wentylatorze WLE $\phi 630$ (rys. 7), o mocy 18,5 kW i prędkości wirowania 3000 obr/min.



Rys. 7. Przekrój wentylatora osiowego WLE $\phi 630$
[opracowanie własne]



Rys. 8. Schemat wentylatora osiowego 1 – króciec odcinka ssawnego, 2 – silnik, 3 – obudowa, 4 – króciec odcinka tłoczącego, 5 – wirnik
[opracowanie własne]

Analiza łopatki wirnika wentylatora wykazała, że jej czołowa część, wraz z krawędzią natarcia, ma niejednoznacznie uformowany zarys (podobnie jak krawędź spływu, która nie posiada zdecydowanego wyostrenia). Ponadto, analizując obwodową prędkość łopatki stwierdzono iż jej grubość, mierzona na 1/3 długości od krawędzi natarcia, jest zbyt mała, w porównaniu do grubości stosowanych w profilach typu NACA. Zatem jej praca jest zbliżona do pracy łopatek o stałej grubości uzyskiwanych metodą gięcia płytów blach. Wcześniej wykonano próbę wytrzymałościową połączenia klejonego pomiędzy wydrukowanym materiałem (ABS) a modyfikowaną łopatką (ITAMID). Dwie nakładki próbne przyklejono na dwu przeciwległych łopatkach i poddano próbie wirowania w celu sprawdzenia wytrzymałości połączenia. Nakładki wentylatora poddano próbie wytrzymałościowej przy prędkości obrotowej ok. 3000 obr/min na czas 1 godziny. Po pozytywnej próbie opracowano i wykonano nakładki z ABS na wszystkie łopatki, które po naklejeniu, nadały im cechy charakterystyczne dla profilu typu aerofoil. Prace rozpoczęto od wyznaczenia charakterystyk pracy wentylatora, bez naklejonych nakładek, na stanowisku do badań wentylatorów lutniowych typu „C” wg normy PN-EN ISO 5801:2017-12. W celu umożliwienia porównania parametrów wentylatora przed i po modyfikacji, dla nominalnej prędkości obrotowej $n=3000$ obr/min wyznaczono charakterystyki w postaci krzywych spiętrzenia, sprawności i mocy, w funkcji wydajności.

W kolejnym kroku zeskanowano łopatki wirnika za pomocą skanera 3D, uzyskane dane poddano obróbce w programie 3DS MAX w celu przekonwertowania ich na postać bryłową, za pomocą programu Autodesk Inventor. Nakładki wzorowane były na niesymetrycznym profilu NACA 6412, gdzie maksymalna grubość znajdowała się w zakresie 35-70% jej długości. W komputerowym procesie optymalizacji kształtu, zgodnie z przyjętym profilem

wzorcowym, w łopatkę wyodrębniono 6 przekrojów, w zależności od odległości rozpatrywanego przekroju od podstawy i dla każdego z nich opracowano jego geometrię.

Na podstawie wyników analizy CFD zoptymalizowano i wydrukowano specjalnie zaprojektowane nakładki. Ich naklejenie na istniejące łopatki (rys. 9) nadając jednocześnie nowej krawędzi spływu większego „zaostrenia”, aby w maksymalnym stopniu zapewnić laminarność przepływu również na końcu profilu.

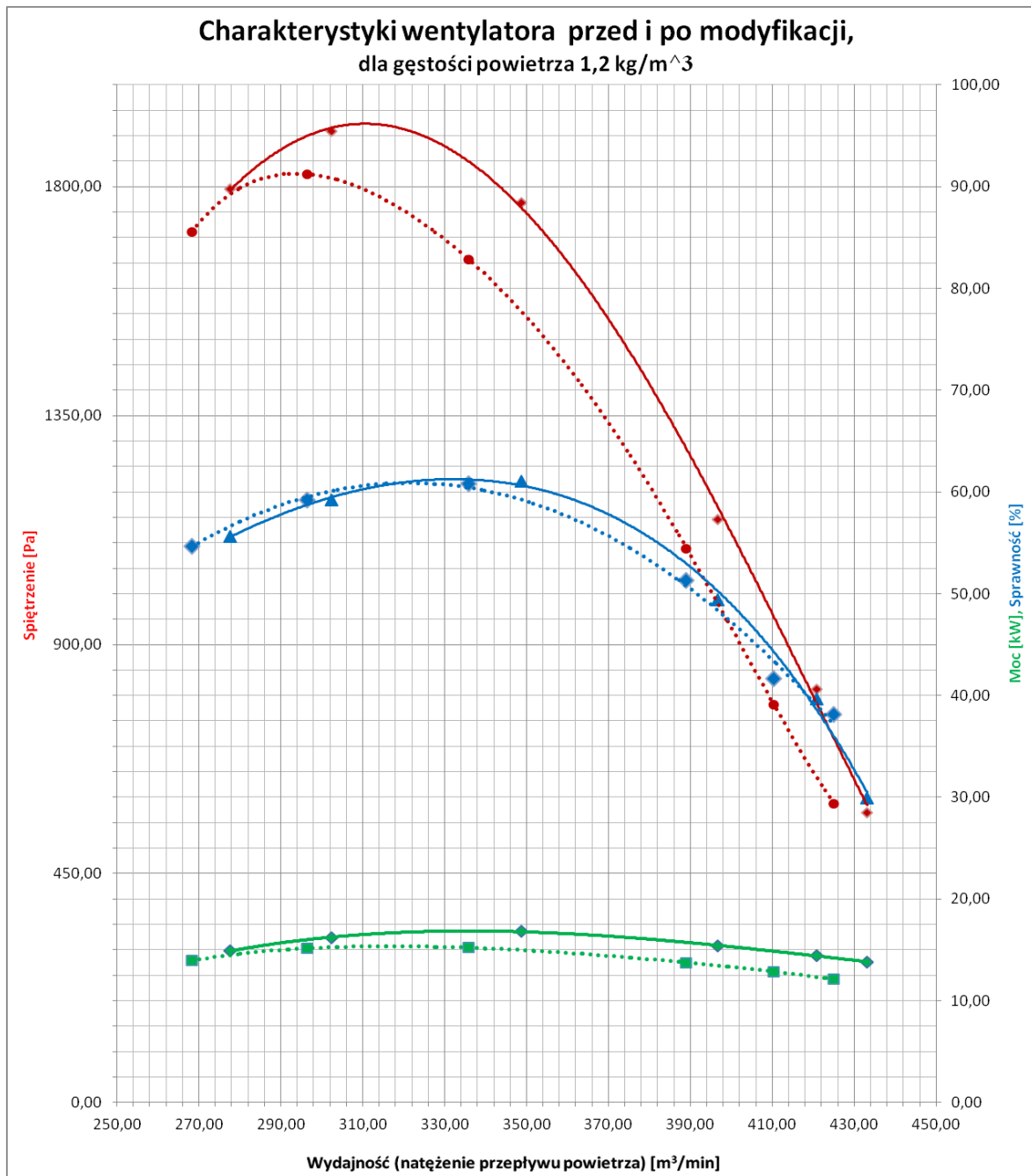


Rys. 9. Łopátka wirnika przed i po naklejeniu nakładki korygującej [opracowanie własne]



Rys. 10. Zmodyfikowany wirnik wentylatora $\phi 630$ po procesie wyważania [opracowanie własne]

Zmodyfikowany wirnik (rys. 10) wyważono i ponownie zabudowano w wentylatorze, który przebadano na stanowisku badawczym. Na wykresie (rys. 11) zestawiono charakterystyki wentylatora przed i po modyfikacji wirnika. Linia ciągłą odnotowano zdecydowany wzrost spiętrzenia, z optymalnym punktem pracy na poziomie 8%, a także, nieznaczną poprawę sprawności w zakresie stabilnej pracy wentylatora. Nieznacznie zwiększył się pobór mocy, a poziom mocy akustycznej w punkcie nominalnej pracy nie zmienił się i wyniósł $118,0 \pm 3,0$ dB.



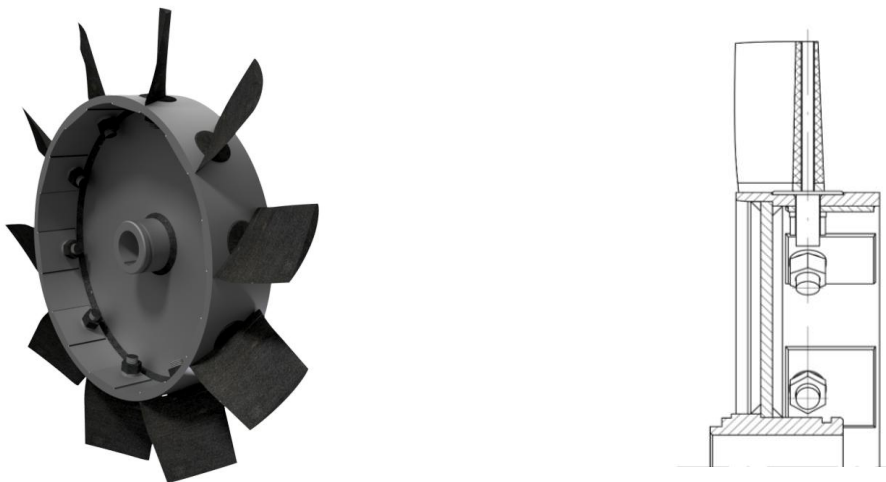
Rys. 11. Porównanie charakterystyki wentylatora przed (linia przerywana) i po modyfikacji (linia ciągła) układu łopatkowego [opracowanie własne]

Badania potwierdziły, że opracowana metoda naklejania nakładek sprawdziła się pod względem wytrzymałościowym, co umożliwi dalsze prace nad wentylatorem docelowym. Obecnie trwają prace nad projektem wirnika docelowego wentylatora $\phi 800$ o zmiennym kącie natarcia łopatek. Możliwość zmiany kąta natarcia wraz ze specjalnie opracowanym profilem łopatek pozwolą na uzyskanie korzystnego wskaźnika aerodynamicznego wirnika tj. maksymalną wartość współczynnika siły nośnej do współczynnika oporu [12]. W układzie wirnik - kierownica tylna, nawet niewielka zmiana kąta natarcia (α) łopatki powinna spowodować wzrost lub spadek spieźnienia.

W pierwszym eksperymencie modyfikacyjnym, oryginalna łopatka stanowiła bazę wraz z systemem zabudowy w wirniku dla nowej wersji łopatki. Eksperyment modyfikacyjny istniejących łopatek metodą naklejania wydrukowanych nakładek korygujących nie stanowił zatem większego wyzwania. Tymczasem, w przypadku uzyskiwania kompletnej łopatki metodą wydruku, problem okazał się bardziej złożony i wymagał zastosowania stalowej bazy z trzema szpilkami wzmocniającymi oraz gwintowanym trzpieniem do zamocowania na wirniku (rys. 12). Wirnik z łopatkami, przeznaczony do eksperymentalnych badań stanowiskowych, pokazano na rysunku 13. Kąt natarcia łopatek można korygować przez poluzowanie i dokręcenie nakrętki.



Rys. 12. Od lewej: baza stalowa z czopem mocującym, wydrukowana łopatka mocowana do bazy, kompletna łopatka gotowa do zamocowania na wieńcu wirnika [opracowanie własne]



Rys. 13. Zaprojektowany nowy wirnik wentylatora [opracowanie własne]

5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki prac badawczo rozwojowych otrzymano w ramach realizacji projektu europejskiego INESI dofinansowanego z funduszu RFCS.

Uzyskano następujące efekty:

- zmodyfikowany wentylator o średnicy $\phi 630$, o podwyższonych o około 8% wartościach spiętrzenia,
- opracowano i sprawdzono metodykę projektowania i drukowania 3D nakładek przeznaczonych do naklejania na szkielet bazowy łopatki,

- zaprojektowano wirnik z regulowanym osadzeniem łopatek, w celu przeprowadzenia badań docelowego wentylatora $\phi 800$,

Kolejnymi etapami prac związanych z wentylatorem, będą:

- budowa eksperymentalnego wirnika dla docelowego wentylatora $\phi 800$ z możliwością zmiany kąta natarcia łopatek,
- badania wentylatora na stanowisku, dla różnych kątów natarcia łopatek oraz odniesienie wyników badań do wyników obliczeń CFD łopatek wentylatora.

Literatura

- [1] Arźnikow N.S.: Aerodynamika.PWN, Warszawa 1959.
- [2] Bieniek C.: Wentylatory osiowe, WNT, Warszawa 1961.
- [3] Bleier F.: Fan handbook. McGraw-Hill Education, New York 1997.
- [4] Dz.U. 2017 poz. 1118 Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, Rozdział 3 Przewietrzanie za pomocą lutniociągów, pomocniczych urządzeń wentylacyjnych lub przez dyfuzje.
- [6] Fortuna S.: Wentylatory. Podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie. Techwent, Kraków 1999.
- [7] "INESI - Increase Efficiency And Safety Improvement In Underground Mining Transportation Routes". Projekt realizowany w ramach funduszu RFCS, umowa nr : 754169. Gliwice 2018.
- [8] Drwięga A, Szelka M, Turewicz A.: Improvement of auxiliary ventilation efficiency in underground workings. Mining of Sustainable Development 2018.
- [9] Kuczewski S.: Wentylatory. WNT, Warszawa 1978.
- [10] Łazarkiewicz S.: Pompy Sprężarki Wentylatory, PWT, 1957.
- [11] Panigrahi D.Ch; CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans, Journal of Sustainable Mining 2014.
- [12] Tuliszka E.: Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT, Warszawa 1969.
- [13] Zbigniew Paturski: „Przewodnik po projektach z Mechaniki Lotu” wyd. 5.2.
- [14] <http://www.uwm.edu.pl/kolektory/silownie/aerodynamika.html> (28.05.2019)

dr inż. Andrzej Drwięga
adrwiega@komag.eu

mgr inż. Michał Szelka
mszelka@komag.eu

mgr inż. Andrzej Turewicz
aturewicz@komag.eu

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice