

Zastosowanie nowoczesnych tworzyw sztucznych do budowy wysokoobrotowych maszyn przepływowych

The use of modern plastics for the construction of high speed fluid-flow machinery

GRZEGORZ ŻYWICA
TOMASZ Z. KACZMARCZYK
EUGENIUSZ IHNATOWICZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.67>

Omówiono zagadnienia związane z doбором tworzyw sztucznych na wybrane elementy wysokoobrotowych maszyn przepływowych. Oprócz kryteriów stosowanych przy doborze materiału przedstawiono przykład analizy wytrzymałościowej tarczy wirnikowej z tworzywa sztucznego. Celem tych prac było zastąpienie powszechnie stosowanych stopów metali nowoczesnymi tworzywami sztucznymi, co może się przełożyć na skrócenie czasu produkcji i obniżenie kosztów.

SŁOWA KLUCZOWE: budowa maszyn, tworzywa sztuczne, polimery wysokotemperaturowe, maszyny przepływowe, mikroturbiny

Discussed are issues related to the selection of plastics for manufacturing chosen components of high-speed fluid-flow machinery. In addition to discussing the criteria used for material selection, an exemplary strength analysis of a rotor disk made of plastic was presented. The work carried out was aimed at replacing commonly used metallic alloys with modern plastics, which in turn may shorten production time and reduce costs.

KEYWORDS: mechanical engineering, plastics, heat-resistant polymers, fluid-flow machines, microturbines

Intensywny rozwój nauki i techniki umożliwił w ostatnich dekadach opracowanie wielu nowych rozwiązań materiałowych, przewyższających swoimi właściwościami wcześniej stosowane materiały konstrukcyjne i funkcjonalne. Jest to szczególnie widoczne w przypadku tworzyw sztucznych, z których coraz częściej wykonywane są części dotychczas produkowane wyłącznie ze stopów metali.

O ile we wcześniejszych latach wybrane tworzywa sztuczne były wykorzystywane na lekko obciążone części maszyn [1], to ostatnio z powodzeniem są one stosowane również na bardziej odpowiedzialne podzespoły [2, 3] oraz powłoki ochronne pracujące w trudnych warunkach [4]. Świadczy o tym chociażby coraz szersze zastosowanie tworzyw sztucznych w branży samochodowej i lotnictwie [5, 6].

Takie materiały pozwalają obniżać masę pojazdów i statków powietrznych oraz ułatwiają tłumienie niepożądanych drgań i hałasu [6]. Oprócz elementów karoserii, zawieszania oraz wyposażenia wnętrza pojazdów, odpowiednio dobrane tworzywa sztuczne są stosowane również w obrębie komory silnikowej [7].

Omawiając nowe zastosowania tworzyw sztucznych, warto wspomnieć o technikach szybkiego prototypowania [8] wykorzystujących drukarkę 3D, które w dużej mierze opierają się na różnego rodzaju materiałach polimerowych.

Rosnące zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne wynika z ich licznych zalet, z których najważniejsze to: lekkość (mała gęstość właściwa), odporność chemiczna, łatwość formowania i barwienia oraz niska cena. Nowoczesne tworzywa sztuczne, które bardzo często są kompozytami zawierającymi różne dodatki metaliczne i niemetaliczne [6], mogą osiągać bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe i długotrwałe pracować w podwyższonej temperaturze. Cechy te umożliwiają ich użycie w różnego typu mikroturbinach energetycznych, stosowanych coraz częściej w kogeneracji rozproszonej [9].

W dalszej części artykułu przedstawiono przykład doboru tworzywa sztucznego na wybrane części mikroturbiny parowej, która za pośrednictwem układu ORC (*organic Rankine cycle*) będzie współpracowała z kotłem stosowanym w domach jednorodzinnych do celów grzewczych [10]. Ze względu na dość niski poziom temperatury, przy której zazwyczaj pracują mikroturbiny ORC, wykorzystanie do ich budowy odpowiednio dobranych tworzyw sztucznych może być bardzo korzystnym rozwiązaniem.

Określenie parametrów pracy

Przy doborze materiałów na części maszyn konieczne jest precyzyjne zdefiniowanie parametrów, w których będą one pracowały. W omawianym przypadku tworzywa sztuczne będą zastosowane do budowy turbogeneratora pracującego w układzie ORC. Ze względu na wysokie koszty wykonania oraz długi czas obróbki części wchodzących w skład układu łopatkowego mikroturbiny (tj. tarczy wirnikowej i kierownicy), największe korzyści można osiągnąć z wyprodukowania z tworzywa sztucznego właśnie tych elementów. Dobrym rozwiązaniem może być również wytworzenie z nich niektórych elementów korpusu turbogeneratora.

W zaprojektowanym w IMP PAN turbogeneratorsze najbardziej wymagające warunki pracy występują w przypadku układu łopatkowego mikroturbiny. Zgodnie z parametrami pracy zaprojektowanej instalacji ORC para świeża czynnika niskowrzącego jest dostarczana na łopatkę turbiny pod ciśnieniem ok. 10 bar i ma temperaturę ok. 150°C. Czynnikiem roboczym obiegu ORC mogą być różne substancje organiczne, takie jak np. metanol, etanol, SES36, HFE-7100, MDM i wiele innych. Ze względu na zakres temperatur roboczych oraz docelowe miejsce pracy instalacji (domy jednorodzinne) czynniki roboczebrane pod uwagę w tym przypadku obejmowały jedynie rozpuszczalniki nowej generacji, np. takie jak HFE-7100.

Dostępne termoodporne tworzywa sztuczne

Z uwagi na docelowe warunki pracy obszar możliwych do zastosowania tworzyw sztucznych został ograniczony do takich materiałów, które mogą być stale użytkowane

* Dr inż. Grzegorz Żywica (gzywica@imp.gda.pl), dr inż. Tomasz Z. Kaczmarczyk (tkaczmarczyk@imp.gda.pl), dr inż. Eugeniusz Ihnatowicz (gieihn@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

w temperaturze wynoszącej co najmniej 150°C. Maksymalna temperatura długotrwałego użytkowania większości wysokotemperaturowych tworzyw sztucznych wynosi ok. 120°C. Przy wyższych temperaturach mogą one pracować tylko krótkookresowo.

W tabelicy zestawiono kilka wybranych tworzyw sztucznych łatwo dostępnych na rynku, dla których długotrwała temperatura użytkowania wynosi co najmniej 150°C.

TABLICA. Zestawienie wybranych wysokotemperaturowych tworzyw sztucznych

Oznaczenie	Nazwa	Temperatura użytkowania °C	Temperatura chwilowa °C
PTFE	Teflon	260	290
PEEK	Polietereketon	250	310
PVDF	Polifluorek winylidenu	150	150
PPS	Polisiarczek fenylenu	240	270
PFA	Polimer perfluoroalkoksyloy	150	240
PSU	Polisulfon	150	180

Zgodnie z zestawieniem niektóre materiały mogą być długotrwale użytkowane w temperaturze przekraczającej nawet 200°C (PTFE, PEEK, PPS). Powyżej tej temperatury dopuszczalna jest również chwilowa praca elementów wykonanych z materiału o oznaczeniu PFA.

Kryteria doboru materiału

Oprócz odporności na działanie wysokich temperatur materiały wykorzystywane na części maszyn muszą spełniać szereg innych wymagań, które zależą od parametrów użytkowych. W przypadku materiałów stosowanych na tarczy wirnikowej mikro turbin duże znaczenie mają również właściwości wytrzymałościowe oraz rozszerzalność cieplna.

Rozszerzalność cieplna jest w tym przypadku istotna ze względu na konieczność zachowania przez łopatki turbiny złożonych kształtów i tolerancji wymiarowych oraz wymagane bardzo małe luzy nadłopatkowe. Oczywiście wymogiem jest również odporność chemiczna na działanie czynników roboczych. Materiał służący do wykonania układu łopatkowego powinien odznaczać się także dobrymi właściwościami technologicznymi. Najważniejsze kryteria, które uwzględniono przy wyborze tworzywa sztucznego na tarczę wirnikową, to:

- odporność termiczna,
- kompatybilność chemiczna,
- właściwości wytrzymałościowe,
- rozszerzalność cieplna,
- właściwości technologiczne (np. dobra skrawalność),
- odporność na erozję spowodowaną przepływem,
- lekkość (mała gęstość właściwa),
- cena i dostępność materiału.

Na podstawie tak określonych kryteriów wybrano trzy tworzywa sztuczne, które zostały poddane dalszej analizie. Dla wytypowanych tworzyw zostały przeprowadzone własne badania odporności chemicznej oraz sprawdzono wytrzymałość na rozciąganie po długotrwałym kontakcie z czynnikami roboczymi.

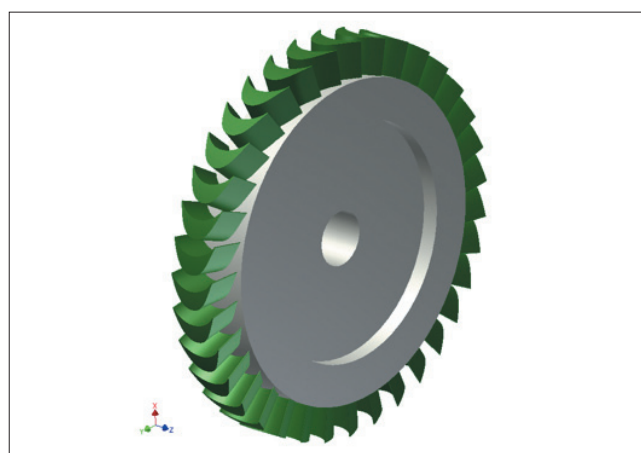
Sprawdzająca analiza wytrzymałościowa

Kolejnym etapem selekcji materiału na tarczę wirnikową mikro turbin ORC było przeprowadzenie analiz wytrzymałościowych. Celem tych analiz było przede wszystkim

sprawdzenie maksymalnych naprężeń i odkształceń tarczy oraz przemieszczeń końców łopatek. Analiza wytrzymałościowa została wykonana tylko dla tworzyw, które spełniły wszystkie wcześniej omówione kryteria oraz pomysłnie przeszły samodzielnie przeprowadzone badania odporności chemicznej na działanie czynników niskotemperaturowych.

Geometria tarczy wirnikowej została opracowana za pomocą parametrycznego programu typu CAD. W modelu uwzględniono trójwymiarową geometrię łopatek turbiny, która została zoptymalizowana z wykorzystaniem technik CFD, pod kątem uzyskania maksymalnej sprawności przepływowej.

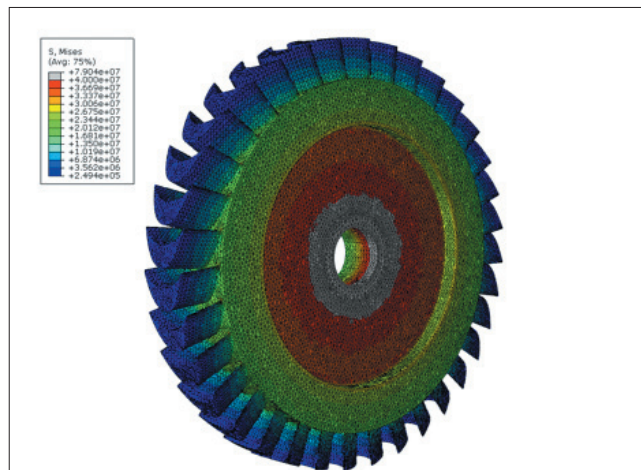
Średnica tarczy wynosiła $\varnothing 36$ mm, a wysokość łopatki była równa 3 mm. Nominalna prędkość obrotowa wirnika turbogeneratora wynosiła 100 000 obr/min. Z jednej strony tarczy wykonane było podtoczenie, a w osi tarczy znajdował się otwór przelotowy (rys. 1).



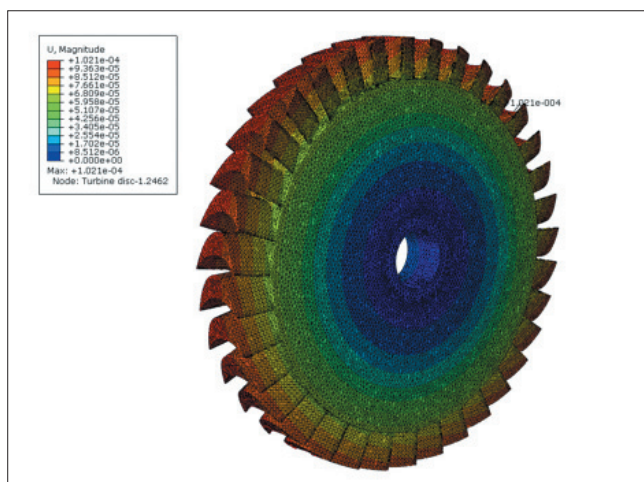
Rys. 1. Trójwymiarowa geometria tarczy wirnikowej mikro turbin

Ze względu na wstępny charakter obliczeń do dyskretyzacji modelu zastosowano czworosienne elementy skończone. Model MES tarczy wirnikowej składał się łącznie z 686 000 elementów skończonych. Tarcza była utwierdzona w środkowym otworze, przy czym na powierzchni walcowej ograniczono przemieszczenia w kierunku promieniowym, a na jednej krawędzi otworu po gładkiej stronie tarczy zablokowano przemieszczenia w kierunku osiowym. Podczas obliczeń uwzględniono siłę odśrodkową działającą na tarczę wirnikową przy prędkości nominalnej.

Wyniki obliczeń wytrzymałościowych w postaci rozkładów naprężeń zredukowanych oraz rozkładu przemieszczeń zostały przedstawione na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Naprężenia w tarczy wirnikowej przy prędkości nominalnej



Rys. 3. Przemieszczenia w tarczy wirnikowej przy prędkości nominalnej

Wyniki obliczeń symulacyjnych wykazały, że w pewnych obszarach tarczy wirnikowej przekroczone zostały naprężenia dopuszczalne, które dla analizowanego materiału zostały określone na poziomie 40 MPa. Obszar ten jest zaznaczony na rys. 2 kolorem szarym.

Przekroczenie naprężeń dopuszczalnych występowało tylko po jednej stronie tarczy, po której wykonane było podtoczenie. W pozostałych częściach tarczy wirnikowej uzyskane naprężenia zredukowane nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych. Można więc założyć, że po likwidacji podtoczenia tarczy oraz lepszym, precyzyjniejszym odwzorowaniu utwierdzenia naprężenia maksymalne w żadnym jej miejscu nie powinny przekroczyć wartości dopuszczalnych. Potwierdziły to późniejsze obliczenia.

Odnosząc się do uzyskanych rozkładów przemieszczeń (rys. 3), można stwierdzić, że zgodnie z oczekiwaniami maksymalne wartości zostały uzyskane na końcówkach łopatek. Dochodziły one do 102 μm , ale w kierunku promieniowym wynosiły zaledwie 56 μm . Większe przemieszczenie końca łopatki w kierunku osiowym wystąpiło ze względu na niesymetryczność tarczy, spowodowaną jednostronnym podtoczeniem. Był to kolejny argument przemawiający za rezygnacją z podtoczenia w ostatecznej wersji tarczy wirnikowej.

Oszacowana wartość przemieszczenia końca łopatki, spowodowanego samą rozszerzalnością cieplną tworzywa sztucznego, w najgorszym przypadku nie powinna przekraczać 60 μm . Oznacza to, że całkowite przemieszczenie końca łopatki w kierunku promieniowym podczas pracy turbogenerатора nie powinno przekraczać 120 μm . Zważywszy na typowe luzy nadłopatkowe w mikro-turbinach osiowych ze stopniem akcyjnym można stwierdzić, że są to wartości akceptowalne.

Wykonane na późniejszym etapie projektowania sprawdzające obliczenia wytrzymałościowe uwzględniły zmienioną geometrię tarczy wirnikowej (m.in. zrezygnowano z jednostronnego podtoczenia) oraz obciążenia przepływowe i termiczne tarczy wirnikowej uzyskane jako wyniki obliczeń przepływowych z wykorzystaniem oprogramowania CFD.

Wyniki tych obliczeń wykazały, że zarówno naprężenia, jak i przemieszczenia w tarczy wirnikowej były mniejsze niż wykazały to wstępne analizy. Maksymalne naprężenia zredukowane nie przekraczały 20 MPa przy maksymalnych przemieszczeniach promieniowych końca łopatki na poziomie 80 μm . Potwierdziło to możliwość zastosowania wybranego tworzywa sztucznego.

Poza analizą właściwości wytrzymałościowych, za pomocą metody elementów skończonych sprawdzono również właściwości dynamiczne tarczy wirnikowej wykonanej z tworzywa sztucznego. Analiza ta wykazała, że pomimo zastosowania materiału o gorszych właściwościach wytrzymałościowych, tarcza charakteryzowała się bardzo dużą sztywnością.

Pierwsza postać drgań własnych całej tarczy występowała przy częstotliwości powyżej 3000 Hz, a drgania pojedynczych łopatek pojawiały się dopiero przy częstotliwości bliskiej 25 000 Hz. Można więc podsumować, że w analizowanym układzie występuje bardzo małe prawdopodobieństwo wzbudzenia drgań własnych tarczy wirnikowej i jej łopatek podczas pracy turbogeneratora.

Podsumowanie

Omówiono zastosowanie nowoczesnych tworzyw sztucznych do produkcji elementów maszyn przepływowych. Problematyka ta została zaprezentowana na przykładzie wysokoobrotowego turbogeneratora ORC. Możliwość zastosowania tworzyw sztucznych rozważano w odniesieniu do tarczy wirnikowej, jako jednego z najbardziej pracochłonnych i kosztownych elementów.

Przedstawiono parametry pracy tarczy wirnikowej, przykłady wysokotemperaturowych tworzyw sztucznych oraz wybrane kryteria wyboru tworzywa. W przypadku tarczy wirnikowej najważniejszymi kryteriami były: odporność termiczna i chemiczna oraz właściwości wytrzymałościowe. Istotne były również mała rozszerzalność cieplna oraz gęstość materiału.

Przedstawiono przykład analizy wytrzymałościowej tarczy wirnikowej z tworzywa sztucznego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że po dostosowaniu konstrukcji tarczy wirnikowej odpowiednio dobrane tworzywa sztuczne będą mogły zastąpić tradycyjne materiały konstrukcyjne.

Artykuł zawiera wyniki prac dofinansowanych przez PARP w ramach projektu nr POIR.02.03.02-22-0009/15, realizowanego przez spółkę SARK z Gdyni we współpracy z IMP PAN w Gdańsku.

LITERATURA

1. Matusiak-Szaraniec A. „Analiza konstrukcyjna i technologiczna korpusów maszyn i urządzeń technicznych”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. 27, 2 (2007): s. 121–129.
2. Mao K., Langlois P., Hu Z., et al. „The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears”. *Wear*. 332–333 (2015): s. 822–826.
3. Krawczyk J., Stryczek J. „Układ hydrauliczny z elementami wykonanymi z tworzyw sztucznych”. *Górnictwo Odkrywkowe*. LIV, 3–4 (2013): s. 52–57.
4. Żywica G., Bagiński P., Banaszek S. „Experimental studies on foil bearing with a sliding coating made of synthetic material”. *Journal of Tribology*. 138 (2016): s. 011301.
5. Głowacz J., Kaczmarski J.W., Nakonieczny L. „Zastosowanie kompozytów polimerowych i tworzyw sztucznych w przemyśle samochodowym”. *Mechanik*. 78, 7 (2005): s. 609–612.
6. Mayer P., Pach J. „Zastosowanie nowoczesnych kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi i szklanymi w motoryzacji”. *Przegląd Mechaniczny*. 9 (2010): s. 30–34.
7. Bielefeldt K., Walkowiak J., Papacz W. „Wzmocnione tworzywa sztuczne w motoryzacji”. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*. 1, 97 (2014): s. 71–80.
8. Andrearczyk A., Żywica G. „Techniki szybkiego prototypowania w budowie maszyn”. *Mechanik*. 89, 7 (2015, CD): s. 13–20.
9. Kiciński J., Żywica G. „Steam microturbines in distributed cogeneration”. Springer International Publishing, 2014.
10. Klonowicz P., Witanowski Ł., Jędrzejewski Ł. „A turbine based domestic micro ORC system”. *Energy Procedia*. 129 (2017): s. 923–930.