

Próby doświadczalne kompozytowego silnika pneumatycznego

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z doбором tworzyw sztucznych na elementy silnika pneumatycznego. Omówiono aspekty związane z produkcją i eksploatacją podzespołów z tworzyw sztucznych. Zaprezentowano wyniki prób ruchowych silnika pneumatycznego wyposażonego w elementy wykonane z tworzyw sztucznych. Przeprowadzone próby umożliwiły weryfikację założeń projektowych oraz możliwości zastosowania tworzyw sztucznych w budowie silnika pneumatycznego.

Summary

Problems with selection of plastics for the components of pneumatic motor are presented. The aspects of manufacturing and exploitation of sub-assemblies made of plastics are discussed. The results of operational tests of pneumatic motor equipped with plastic components are given. The tests enabled verification of the project assumptions and of possibilities of using the plastics in a pneumatic motor.

1. Wstęp

Tworzywa sztuczne są materiałami stosowanymi obecnie niemal we wszystkich gałęziach przemysłu, jednak zastosowanie ich w budowie maszyn i urządzeń górniczych jest nadal sporadyczne. W początkowych latach rozwoju przemysłu tworzyw sztucznych materiały te uważano za gorsze jakościowo zamienniki tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych. W miarę rozwoju technologicznego tworzywa sztuczne uzyskiwały coraz lepsze własności, co sprawiło że w wielu rozwiązaniach stały się głównym i niezastąpionym materiałem konstrukcyjnym [2].

Wiele gatunków i rodzajów tworzyw sztucznych osiąga stosunkowo dobre właściwości wytrzymałościowe, w tym moduł sprężystości, w porównaniu z tradycyjnymi materiałami konstrukcyjnymi. Sprawia to, że przy wielokrotnie niższej od metali gęstości materiału tworzywa sztuczne charakteryzują się bardzo dobrą tzw. wytrzymałością właściwą (stosunek wytrzymałości do gęstości) [2]. Należy podkreślić, że tworzywa sztuczne są odporne na korozję, charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, mają właściwości samosmarowne, a także są łatwe w obróbce [4].

Mając powyższe na uwadze postanowiono zastosować elementy wykonane z tworzyw sztucznych w procesie optymalizacji silnika pneumatycznego pod kątem minimalizacji jego masy własnej. Przedmiotowy silnik pneumatyczny przewidywany jest do zabudowy we wciągniku łańcuchowym eksploatowanym, między innymi, w podziemnych wyrobiskach górniczych [1]. Z uwagi na fakt, że wciągnik może być przenoszony z jednego miejsca użytkowania w inne, korzystnym jest, aby jego masa własna była jak najmniejsza. Jednym z głównych elementów wciągnika, który w znacznym

stopniu wpływa na masę całego urządzenia jest jego silnik.

W procesie optymalizacji silnika pod kątem zmniejszenia jego masy własnej wytypowano elementy, które mogą być wykonane z tworzyw sztucznych. Określono rodzaje tworzyw możliwych do zastosowania w budowie silnika pneumatycznego, a następnie opracowano postać konstrukcyjną elementów silnika. W celu przeprowadzenia prób ruchowych wykonano prototyp silnika z elementami z tworzyw sztucznych.

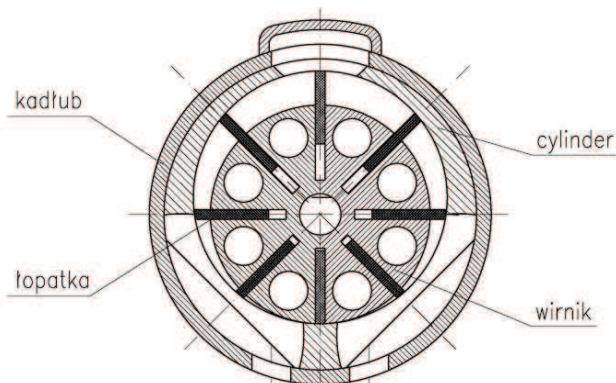
Po próbach ruchowych i analizie otrzymanych wyników wytypowano materiały oraz elementy silnika, które będą mogły być stosowane zamiennie z wykonywanymi ze stali.

2. Dobór materiałów na elementy silnika pneumatycznego

W wyniku analizy konstrukcji silnika pneumatycznego ustalono, że znaczącą część jego masy stanowią wirnik i tuleja mimośrodowa. Założono, że wykonanie powyższych elementów z tworzywa sztucznego, które charakteryzuje się znacznie mniejszą, w odniesieniu do stali, gęstością, wpłynie na zmniejszenie masy silnika.

Wirnik jest jednym z głównych elementów silnika pneumatycznego. W rowkach wykonanych w wirniku montowane są łopatki, które napędzane sprężonym powietrzem obracają wirnikiem. Wirnik jest również elementem, który w trakcie postoju wciągnika jest hamowany. Dlatego zdecydowano, że oś wirnika zostanie wykonana ze stali, a część cylindryczna, w której pracują łopatki będzie wykonana z tworzywa sztucznego.

Założono również, że wykonanie wirnika, tulei i łopatek silnika (rys.1) z materiałów samosmarujących mogłoby wyeliminować konieczność smarowania silnika, co pozwoliłoby dodatkowo zmniejszyć jego masę poprzez wyeliminowanie w rozrządzie silnika zbiornika z olejem.



Rys.1. Model silnika pneumatycznego [3]

Możliwość zastosowania tworzyw sztucznych w budowie silnika pneumatycznego uzależniono od następujących kryteriów:

- wysoka wytrzymałość,
- wysoka twardość oraz odporność na zużycie,
- twardość tulei cylindra powinna być wyższa niż twardość łopatek,
- niski współczynnik tarcia oraz samosmarowność tworzywa,
- wysoka wytrzymałość temperaturowa,
- dostępność półfabrykatów o odpowiednich wymiarach.

Na podstawie powyższych kryteriów przyjęto, że wirnik i tuleja cylindra powinny być wykonane z materiału wytrzymałego, twardego i odpornego na wysoką temperaturę, natomiast łopatki z materiału o bardzo dobrych właściwościach ślizgowych, najlepiej samosmarowego, oraz charakteryzować się odpornością na działanie wysokiej temperatury.

Ostatecznie zdecydowano, że wirnik i tuleja cylindra przeznaczone do prób będą wykonane z trzech różnych tworzyw sztucznych o następujących własnościach [5, 6]:

- materiał I – gęstość 1,15 g/cm³, twardość kulkowa 185 MPa, średnia wartość zużycia 9,6 μm/km, maksymalna temperatura pracy 170 °C,
- materiał II – gęstość 1,75 g/cm³, twardość kulkowa 243 MPa, maksymalna temperatura pracy 180 °C,
- materiał III – gęstość 1,41 g/cm³, twardość kulkowa 150 MPa, średnia wartość zużycia 0,69 μm/km, maksymalna temperatura pracy 140 °C.

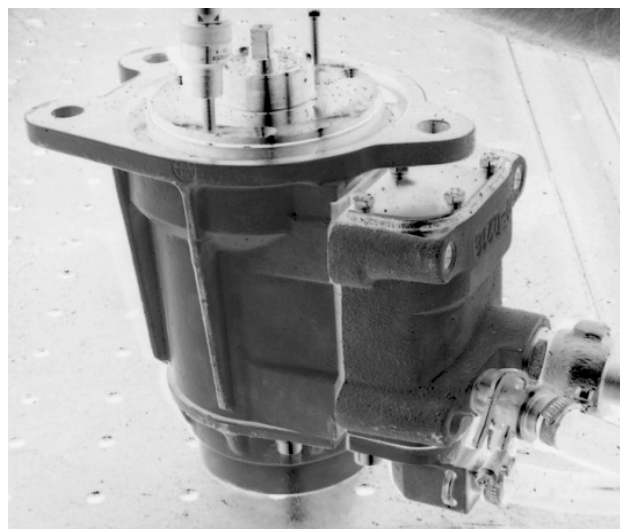
Na wykonanie łopatek przewidziano zastosowanie czterech różnych tworzyw sztucznych o następujących własnościach [5, 6]:

- materiał IV – gęstość 1,5 g/cm³, twardość kulkowa 160 MPa, średnia wartość zużycia 2,61 μm/km, samosmarny, maksymalna temperatura pracy 180 °C,
- materiał V - gęstość 1,75 g/cm³, twardość kulkowa 243 MPa, samosmarny, maksymalna temperatura pracy 120 °C,
- materiał VI - gęstość 1,75 g/cm³, twardość kulkowa 243 MPa, samosmarny, maksymalna temperatura pracy 120 °C,
- materiał VII - gęstość 1,75 g/cm³, twardość kulkowa 243 MPa, samosmarny maksymalna temperatura pracy 120 °C.

Opracowano plan prób ruchowych silnika, w którym, określono poszczególne konfiguracje elementów silnika oraz sposób przeprowadzenia testów.

3. Projekt i wykonawstwo elementów silnika z tworzyw sztucznych

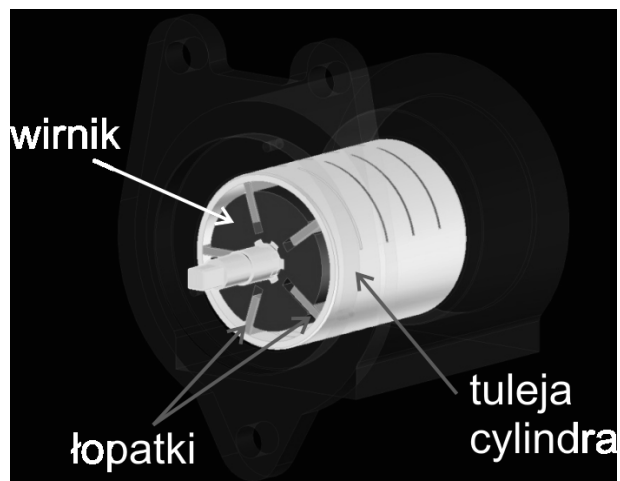
Jako obiekt badawczy wybrano silnik pneumatyczny wciągnika PWŁ-3/6 produkowany seryjnie przez firmę FMIU OMAG Oświęcim Sp. z o.o. (rys. 2).



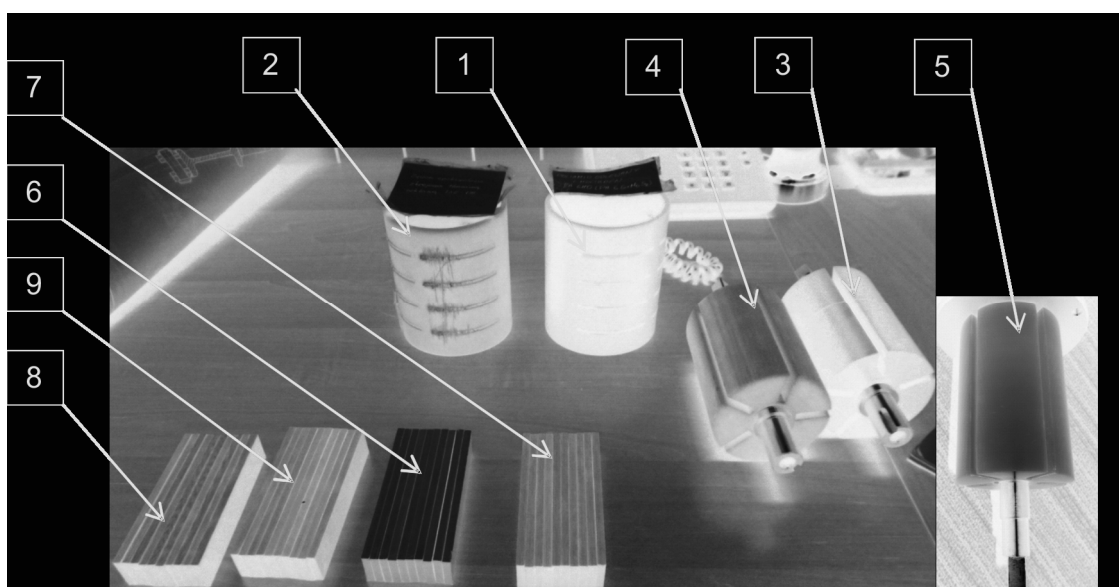
Rys.2. Silnik pneumatyczny wciągnika PWŁ-3/6A [3]

Na podstawie dokumentacji technicznej przedmiotowego silnika pneumatycznego określono postać konstrukcyjną wirnika, tulei cylindra oraz łopatek (rys. 3) wykonanych z tworzyw sztucznych. W wytypowanym do badań silniku, wirnik oraz tuleja cylindra standardowo wykonane są ze stali, z kolei na łopatki stosowane jest tworzywo sztuczne.

Po opracowaniu dokumentacji technicznej wykonano wirniki, tuleje cylindra i łopatki (rys. 4) z wytypowanych tworzyw sztucznych.



Rys.3. Model przestrzenny silnika pneumatycznego z elementami wytypowanymi do badań [3]



Rys.4. Wirniki, tuleje cylindra i łopatki wykonane z tworzyw sztucznych: 1 - tuleja cylindra z materiału I, 2 – tuleja cylindra z materiału II, 3 - wirnik z materiału I, 4 – wirnik z materiału II, 5 – wirnik z materiału III, 6 – łopatki z materiału IV, 7 – łopatki z materiału V, 8 – łopatki z materiału VI, 9 – łopatki z materiału VII [3]

4. Cel i zakres prób

Celem wykonywania prób ruchowych silnika pneumatycznego było zweryfikowanie wytrzymałości i odporności na zużycie elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Zakres prób obejmował testowanie silnika bez obciążenia i pod obciążeniem z zabudowanymi elementami z tworzyw sztucznych w różnych konfiguracjach.

Próby ruchowe silnika pneumatycznego podzielono na dwa etapy (rys. 5). Pierwszy etap miał na celu sprawdzenie poprawności pracy silnika pneumatycznego bez obciążenia z zabudowanymi elementami z tworzyw sztucznych.

Z uwagi na fakt, że do prób wytypowano kilka rodzajów tworzyw sztucznych zaproponowano

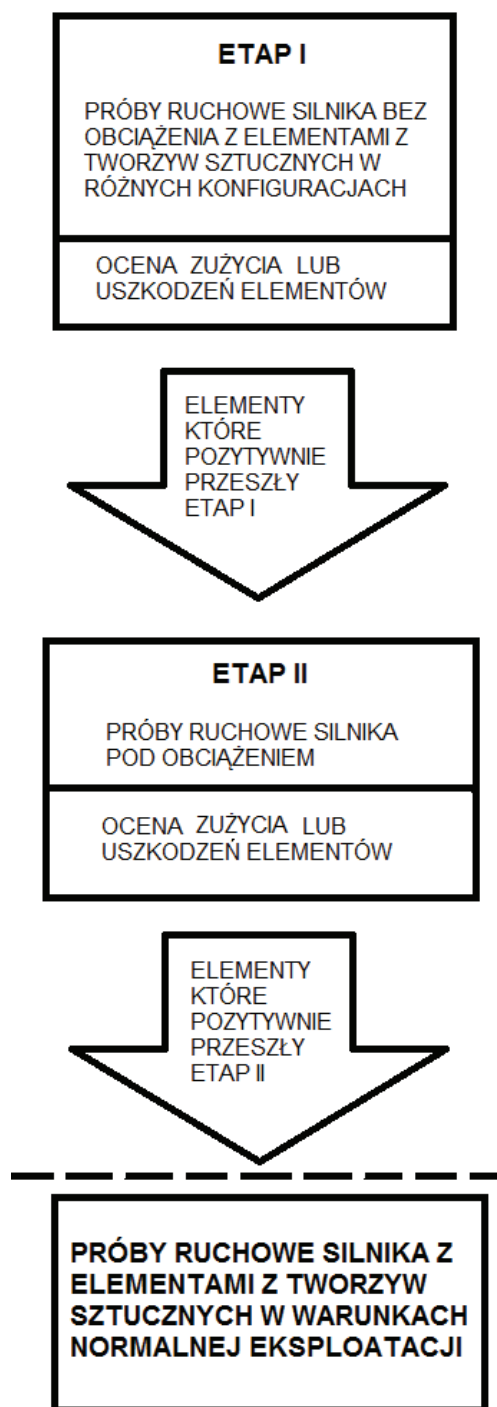
następujące konfiguracje zabudowy elementów w silniku:

- wirnik i tuleja cylindra wykonane z materiału I w połączeniu z różnymi rodzajami łopatek,
- wirnik wykonany z materiału II i tuleja cylindra z materiału I w połączeniu z różnymi rodzajami łopatek,
- wirnik i tuleja cylindra wykonane z materiału III w połączeniu z różnymi rodzajami łopatek.

W drugim etapie prób sprawdzono działanie elementów wykonanych z tworzyw sztucznych zabudowanych w silniku pracującym pod obciążeniem. Do prób wyznaczono elementy wykonane z materiałów, które pozytywnie przeszły pierwszy etap prób, czyli podczas pracy silnika bez obciążenia nie uległy znacznemu zużyciu lub zniszczeniu.

W trakcie prób, zarówno bez, jak i pod obciążeniem, silnik sterowano za pomocą sterownika, standardowo

stosowanego do sterowania pneumatycznych wciągników łańcuchowych (możliwe było zadawanie prawych i lewych obrotów silnika). Gwałtowna zmiana obrotów z prawych na lewe (szczególnie przy pracy silnika bez obciążenia) pozwoliła na zweryfikowanie wytrzymałości elementów z tworzyw sztucznych.



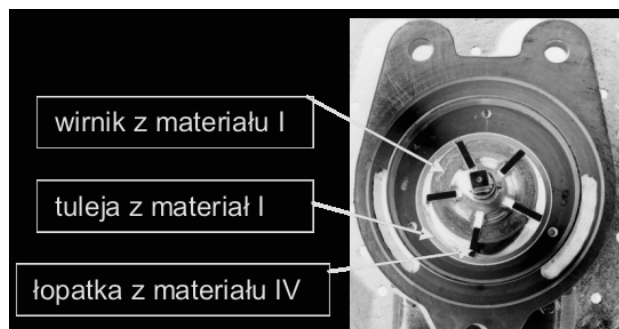
Rys.5. Algorytm postępowania prowadzonych prób ruchowych silnika pneumatycznego [Źródło: opracowanie własne]

5. Próby ruchowe silnika bez obciążenia

W pierwszym etapie prób ruchowych zabudowano i przetestowano poszczególne elementy silnika

wykonane z tworzyw sztucznych w trakcie jego pracy bez obciążenia.

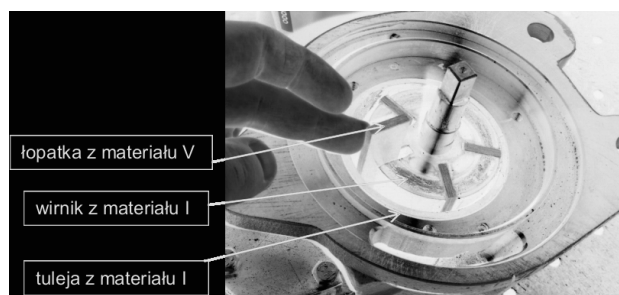
W pierwszej kolejności zabudowano w silniku wirnik i tuleję cylindra wykonane z materiału I oraz łopatkę wykonaną z materiału IV (rys. 6).



Rys.6. Wirnik i tuleja cylindra wykonane z materiału I oraz łopatkę wykonaną z materiału IV zabudowane w silniku pneumatycznym [3]

Po około 30 sekundach pracy zauważono, że z otworu wylotowego silnika wydobywają się białe wióry. Silnik zatrzymano, zdjęto pokrywę i sprawdzono stan poszczególnych elementów. Okazało się, że wióry pochodzą z łopatek, które w kontakcie z tuleją cylindra ścierają się. Zużycie łopatek okazało się na tyle duże, że nie nadawały się do dalszego stosowania. W wyniku zużycia materiał z łopatek częściowo przykleił się do cylindra i wirnika.

Po oczyszczeniu wirnika i tulei cylindra w silniku zabudowano łopatkę wykonaną z materiału V (rys. 7).

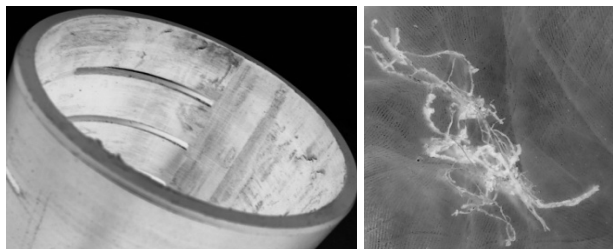


Rys.7. Wirnik i tuleja cylindra wykonane z materiału I oraz łopatkę wykonaną z materiału V zabudowane w silniku pneumatycznym [3]

Po około minucie pracy zauważono wydobywające się z silnika wióry w kolorze czarnym (rys. 8). Po zdjęciu pokrywki zauważono znaczne zużycie tulei cylindra (rys. 8). Okazało się, że materiał łopatek jest zbyt twardy w odniesieniu do materiału, z którego wykonano tuleję cylindra. Powodowało to, że podczas przetaczania się łopatek po wewnętrznej powierzchni tulei cylindra następowało skrawanie materiału tulei. Uszkodzeń wirnika nie stwierdzono.

W celu przeprowadzenia dalszych prób wykonano i zamontowano nową tuleję cylindra. Przeprowadzono próby z łopatkami wykonanymi z materiału VI oraz materiału VII.

Próby te również nie dały pozytywnego wyniku. Łopatki wykonane z wyżej wymienionych materiałów podczas przetaczania się po wewnętrznej powierzchni tulei cylindra skrawały ją, a po dłuższej pracy powodowały uplastycznianie materiału tulei. W efekcie tego zeskrwany materiał tulei był wyrzucany przez otwór wylotowy silnika, a częściowo (uplastyczniony) przywierał do elementów wewnętrznych silnika (rys. 9).

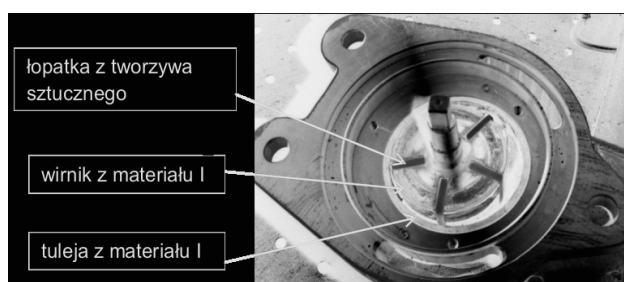


Rys.8. Uszkodzenia tulei cylindra wykonanej z materiału I [3]



Rys.9. Uszkodzona tuleja cylindra oraz wirnik oklejony materiałem z tulei [3]

Mimo uszkodzeń tulei cylindra, wirnik silnika nie został uszkodzony. Pozwoliło to, po zabudowaniu nowej tulei cylindra na przeprowadzenie kolejnej próby z dotychczas stosowanymi łopatkami z tworzywa sztucznego (rys. 10).



Rys.10. Wirnik i tuleja cylindra wykonane z materiału I oraz łopatki wykonane z tworzywa sztucznego zabudowane w silniku pneumatycznym [3]

W tej konfiguracji silnik pracował około 2 minuty, po czym przerwano próbę ze względu na zmniejszającą się prędkość obrotową silnika. Kilkakrotne uruchamianie silnika i zmiana jego kierunku obrotów, za każdym razem kończyły się zmniejszeniem obrotów silnika. Stwierdzono, że mimo doprowadzenia sprężonego powietrza wirnik silnika nie obraca się (sprężone powietrze wydmuchiwane było przez kanał

wylotowy silnika). Po zdjęciu pokrywy silnika okazało się, że materiał tulei cylindra, w wyniku wzrostu temperatury, uplastyczniał się i „skleił” łopatki z wirnikiem oraz tuleją cylindra (rys. 11).



Rys.11. „Sklejone” ze sobą elementy silnika uplastycznionym materiałem tulei cylindra [3]

Demontaż elementów silnika wykazał, że po usunięciu uplastycznionego materiału tulei cylindra, łopatki i wirnik mogą być dalej testowane (nie zauważono na nich uszkodzeń mogących wyeliminować je z dalszych prób).

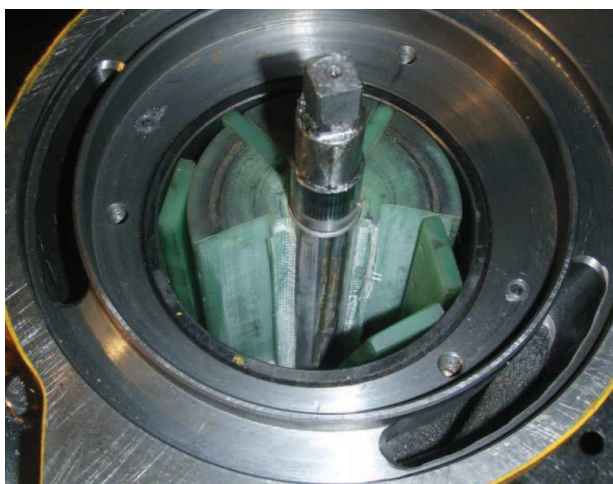
W związku z tym, że dotychczasowe próby ruchowe powodowały niszczenie tulei cylindra, zdecydowano, że do dalszych prób stosowana będzie stalowa tuleja cylindra.

W silniku zabudowano stalową tuleję cylindra, łopatki z tworzywa sztucznego oraz wirnik wykonany z materiału II.

Próba uruchomienia silnika nie powiodła się. Dostarczane sprężone powietrze przepływało przez silnik i było wyrzucane przez kanały wylotowe. Po zdemontowaniu pokrywy silnika, okazało się, że uszkodzeniu uległ wirnik (rys. 12).

Wszystkie poprzednio przeprowadzone próby ruchowe odbywały się bez smarowania łopatek. Zakładając, że smarowanie może zmniejszyć ilość wydzielanego ciepła, postanowiono zabudować w silniku nową tuleję cylindra i wirnik wykonane z materiału I oraz łopatki z tworzywa sztucznego. Wyregulowano również zawór dozujący olej do smarowania wnętrza silnika. Po kolejnym zatrzymaniu silnika zdjęto pokrywę w celu identyfikacji niesprawności. Okazało się, że mimo smarowania materiał z tulei silnika okleił łopatki i wirnik (rys. 13), co

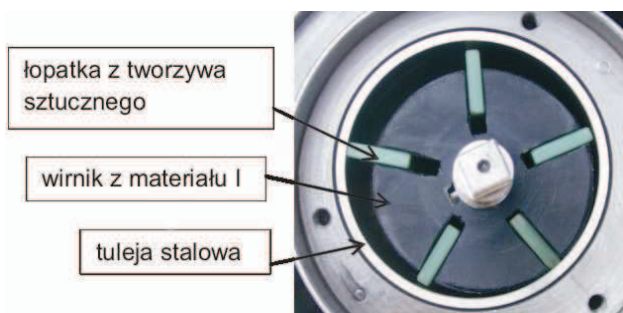
było bezpośrednią przyczyną wzrostu oporów ruchu i zatrzymania silnika.



Rys. 12. Wirnik wykonany z materiału II, stalowa tuleja cylindra oraz łopatki wykonane tworzywa sztucznego zabudowane w silniku pneumatycznym [3]



Rys. 13. Oklejony materiałem tulei cylindra wirnik i uszkodzona tuleja cylindra [3]



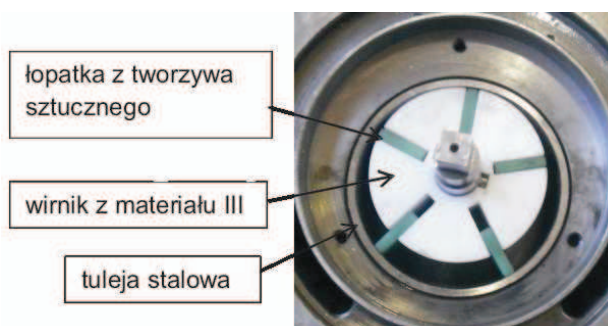
Rys. 14. Wirnik wykonany z materiału I, stalowa tuleja cylindra oraz łopatki wykonane z tworzywa sztucznego zabudowane w silniku pneumatycznym [3]

Kolejną próbę bez obciążenia przeprowadzono w konfiguracji: wirnik z materiału I, tuleja stalowa i łopatki z tworzywa sztucznego zbrojonego włóknem szklanym (rys. 14).

Tym razem silnik pracował około 15 minut. W trakcie ciągłej pracy wielokrotnie zmieniano kierunek obrotów silnika. Po zatrzymaniu silnika i zdjęciu jego pokrywy nie stwierdzono zużycia wirnika i łopatek. Przez cały czas do silnika podawano olej. Próba ta pozwala

domniemywać, że silnik będzie również poprawnie pracował pod obciążeniem.

Ostatnią próbę silnika bez obciążenia przeprowadzono w konfiguracji: wirnik z materiału III, tuleja stalowa, łopatki z tworzywa sztucznego (rys. 15). Próba ta również zakończyła się wynikiem pozytywnym. Po zdemontowaniu silnika nie stwierdzono uszkodzeń wirnika. Wirnik wykonany z materiału III dopuszczono zatem do dalszych badań pod obciążeniem.



Rys. 15. Wirnik wykonany z materiału III, stalowa tuleja cylindra oraz łopatki wykonane tworzywa sztucznego zabudowane w silniku pneumatycznym [3]

6. Próby ruchowe silnika pod obciążeniem

Drugi etap prób ruchowych polegał na sprawdzeniu pracy silnika pod obciążeniem. Do prób pod obciążeniem dopuszczono elementy, które pozytywnie przeszły etap prób bez obciążenia. Ostatecznie do prób ruchowych wytypowano następujące konfiguracje elementów silnika:

- wirnik z materiału I, tuleja stalowa, łopatki z tworzywa sztucznego,
- wirnik z materiału III, tuleja stalowa, łopatki z tworzywa sztucznego.

Próby pod obciążeniem przeprowadzono na stacji prób (rys. 16) zlokalizowanej na jednej z hal producenta wciągników łańcuchowych, tj. FMiU OMAG Oświęcim Sp. z o.o. Próby ruchowe prowadzono z obciążeniem 3,3 tony oraz obciążeniem 6,6 tony.

Podczas prowadzenia badań silnika pod obciążeniem uzyskano następujące wyniki pomiaru prędkości podnoszenia ładunku:

- wirnik z materiału I, obciążenie 3,3 t – prędkość 1,1 m/min,
- wirnik z materiału I, obciążenie 6,6 t – prędkość 0,6 m/min,
- wirnik z materiału III, obciążenie 6,6 t – prędkość 0,7 m/min.

Próby ruchowe wykonywano pod obciążeniem 3,3 tony, a następnie pod obciążeniem 6,6 tony (wielokrotnie podnoszono i opuszczano masę). Wykonywano również gwałtowne zmiany kierunków

obrotów silnika, a tym samym szybkie zmiany podnoszenia i opuszczania ładunku.



Rys. 16. Stanowisko do badań wciągników pod obciążeniem [3]

Po zakończeniu prób ruchowych zdemontowano silnik i poddano go oględzinom. Pracujące w silniku wirniki oraz łopatki pozytywnie przeszły próby ruchowe pod obciążeniem. Nie stwierdzono uszkodzeń wirnika. Również przemieszczające się w rowkach wirnika łopatki nie uległy uszkodzeniu.

7. Podsumowanie

W trakcie prowadzenia prób ruchowych silnika pneumatycznego stosowano szereg materiałów, których zastosowanie w budowie silnika mogłoby zmniejszyć jego masę własną. Próby silnika wyposażonego w elementy wykonane z tworzyw sztucznych przeprowadzono bez obciążenia oraz pod obciążeniem na stacji prób wciągników łańcuchowych zlokalizowanej u producenta górniczych wciągników łańcuchowych, tj. Fabryce Maszyn i Urządzeń OMAG Sp. z o.o.

Próby ruchowe bez obciążenia wykazały, że wykonane z tworzyw sztucznych i zabudowane w silniku tuleje cylindra nie zapewniały poprawnej pracy silnika. Tarcie łopatek o wewnętrzną powierzchnię tulei cylindra było na tyle duże, że powstająca temperatura uplastyczniała materiał tulei. Uplastyczniony materiał powodował oklejanie wszystkich elementów wewnętrznych silnika, co w konsekwencji powodowało jego zahamowanie i brak możliwości uruchomienia.

Przetestowane, w połączeniu z tuleją cylindra wykonaną z tworzywa sztucznego, łopatki również nie dały pozytywnych wyników. W trakcie badań materiał łopatek nadmiernie się zużywał, lub stawał się „nożem skrawającym” powierzchnię tulei cylindra.

Pozytywnie próby ruchowe zarówno bez obciążenia, jak i pod obciążeniem przeszły dwa wirniki wykonane z tworzyw sztucznych. Wirniki te nie uległy uszkodzeniu podczas prób ruchowych. Wciągnik napędzany silnikiem z wymienionymi wirnikami osiągał parametry pracy porównywalne z wciągnikiem wyposażonym w silnik z wirnikiem stalowym (zarówno masa 3,3 t, jak i 6,6 t była podnoszona ze zbliżoną prędkością, jaką uzyskuje wciągnik napędzany silnikiem z wirnikiem stalowym).

Wirnik wykonany z materiału I lub materiału III jest o 3,5 kg lżejszy od wirnika wykonanego ze stali. Uwzględniając, że masa silnika z wirnikiem stalowym wynosi 15,2 kg, zastosowanie wirnika wykonanego z jednego z dobranych tworzyw sztucznych pozwoli na obniżenie masy własnej silnika pneumatycznego o około 23%.

Ostatecznym potwierdzeniem możliwości stosowania tworzyw sztucznych w budowie silnika pneumatycznego będą badania wciągnika w warunkach normalnej eksploatacji.

Literatura

1. Bałaga D., Budzyński Z., Kalita M. Prostański D.: Nowe elektryczne wciągniki łańcuchowe konstrukcji CMG KOMAG. *Maszyny Górnicze* 2007 nr 4 (112), s.36-43.
2. Hyla I.: Tworzywa sztuczne własności – przetwórstwo – zastosowanie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
3. Kalita M.: Projekt i badania elementów silnika pneumatycznego wykonanych z tworzyw sztucznych. ITG KOMAG. Gliwice 2012 (materiały nie publikowane).
4. Łączyński B.: Niemetalowe elementy maszyn. WNT, Warszawa 1988.
5. Penczek P.: Chemia i technologia żywic epoksydowych. WNT, Warszawa 2002.
6. Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.

Artykuł wpłynął do redakcji w sierpniu 2013 r.