

Stanisław Azarewicz¹, Dominika Gaworska², Jarosław Koniarek³, Bogumił Węgliński⁴

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel.+48 071 320 38 06
e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl, dominika.gaworska@pwr.wroc.pl, jaroslaw.koniarek@pwr.wroc.pl, bogumil.wegliński@pwr.wroc.pl

WPŁYW CIEKŁYCH GAZÓW NA IZOLACJĘ CEWEK SILNIKA WN

Przedstawiono wyniki badań technoklimatycznych i elektrycznych materiałów izolacyjnych zastosowanych do konstrukcji cewek silnika pracującego w środowisku ciekłego gazu naturalnego LNG. Ze względu na środki bezpieczeństwa wybrane materiały izolacyjne, zamiast w atmosferze ciekłego gazu naturalnego, umieszczone były w dwóch środowiskach: ciekłego azotu LN2 - badanie narażeń termicznych oraz gazu LPG - badanie wpływu składu chemicznego. Przeprowadzone badania wykazały, że pod wpływem różnych współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych warstw następuje rozwarstwianie się materiałów izolacyjnych Ergofol NKN i NEN dwustronny FpPuPpa. Rozwarstwienie zauważono również w przypadku materiałów Epoksterm 5, Remikaflex, Conductofol po umieszczeniu ich w LPG. Zmiany te nie powodują zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej na przebicie, jednak zmniejszają wytrzymałość mechaniczną materiałów. Ze względu na słabą adhezję niewskazane jest również stosowanie folii poliestrowej jako izolacji drutów nawojowych. Izolacja przewodów nawojowych stosowanych w urządzeniach pracujących w temperaturach kriogenicznych powinna być trwale zespolona z przewodem, w celu uniknięcia możliwości ich wzajemnego przemieszczania się.

Słowa kluczowe: materiały izolacyjne, temperatury kriogeniczne, badania technoklimatyczne

INFLUENCE OF LIQUID GASES ON INSULATION OF HIGH VOLTAGE MOTOR COILS

The paper presents the results of techno-climatic and electric research of the chosen insulating materials (Table 1) and of coils applied for a motor designed to work in LNG environment. Due to high work safety restrictions, the tests were taken in liquid nitrogen environment (instead of in LNG) which ensures cryogenic temperature, and concurrently in LPG environment, which has similar chemical composition to LNG (as far as the presence of compounds and not their percentage is concerned). The examined materials and coils underwent fixed thermal stress cycles. The run of one thermal stress cycle is presented in Figure 1. The samples were visually tested and the condition of their structure was photographically registered. The structure tests were registered prior to thermal stress cycles and following a certain number of tests. For the sake of insignificant changes in the examined structures after following stress cycles, photographic registration was done before and then after 1st, 10th, 20th, 60th, and 120th thermal stress cycle. No mechanical changes were noticed for most tested materials. The samples did not split, crack or chip; the thermal stress cycles, however, resulted in the change of the color of the insulation. This does not result from the change of their parameters but from multiple change of their environment: liquid nitrogen and air. Additionally, the placing of the samples in temperature of 393 K causes the resin to displace and the partially melted resin to accumulate locally. This phenomenon is particularly visible in Ergofol EW-2 and Ergofol W-2 samples (Fig. 2). Ergofol W-2/E and Ergofol W-2 samples are made from identical materials but they have different resins. In case of the former - epoxy-, while in the later one - polyurethane resin was used. In Ergofol W-2/E sample accumulation effect is unnoticeable, while in Ergofol W-2 - it is significant. It suggests that the selection of suitable resin for the insulating materials is very important. Unfortunately for Ergofol NKN and double sided NEN FpPuPpa materials, subsequent cycles resulted in unfavorable changes of their structure (Fig. 3). Following the 20th temperature stress cycle, the delamination of the laminations is visible, and air bubbles appear, decreasing the mechanical properties of these samples (Fig. 3d). Both Ergofol NKN and double sided NEN FpPuPpa contain Nomex polyamide paper which, following a subsequent number of cycles, undergoes further separation from the other layers in the tested samples. The changes presented did not cause the decrease of electrical strength of the insulating systems working in liquefied gasses but it can influence the mechanical strength significantly. During the test in LPG environment in Epoksterm 5, Remikaflex and Conductofol samples already after 1st cycle, delamination of subsequent layers of the tested materials structure is visible (Fig. 4). Tests in LPG point to the fact that each insulation utilizing epoxy resin will delaminate, if it had not been properly cured. Also, the fragments of coils with two different insulating structures were tested: 1) winding wire with polyester foil insulation, 2) winding wire with polyamide-imide resin (Thermex 200G2 1Daglas). The tests of cured fragments of coils shows that polyester foil is characterized by weak adhesion to copper bar and the next insulating layer (glass fiber braid) what causes its displacing within the coil (Fig. 6). In case of coil No. 2 (with enamel polyamide-imide resin insulation) this phenomenon is not visible (Fig. 7). Within the frame of electrical strength tests, each of the tested insulation samples underwent break-down strength tests, which consisted of a 10 kV voltage being applied to a single insulation layer in blade-plate system of reversed blade polarity. The electrical strength of the tested insulating materials following thermal stress cycles did not drop (resistivities of the examined samples exceed $10^{12} \Omega$). When the fragment of coil No. 1 is concerned, immersing winding in LN2 causes drop of circuit resistance that is probably caused by displacement of winding wire. In case of coil No. 2 the decrease of resistance is not observed.

Keywords: insulating materials, kriogenic temperatures, techno-climatic test

¹ dr inż., ^{2,3} mgr inż., ⁴ prof. dr hab. inż.

WSTĘP

Rosnące wciąż zapotrzebowanie na energię wymusza konieczność poszukiwania nowych jej źródeł. W wyniku opracowania efektywnych i tanich metod skraplania ciekły gaz naturalny (LNG) stał się konkurencyjnym i alternatywnym, w stosunku do ropy naftowej, źródłem energii. Gaz naturalny LNG, ze względu na swój skład chemiczny oraz niską temperaturę, stawia przed konstruktorami urządzeń technologicznych, w których jest on wykorzystywany lub które mają z nim styczność w trakcie transportu i przetwórstwa, określone wymagania. Dotyczy to między innymi silników elektrycznych pracujących w takich urządzeniach, jak np.: pompy pogrążalne stosowane w systemach przepompowywania LNG.

W celu prawidłowego zaprojektowania urządzeń elektrycznych mających styczność z LNG niezbędne jest określenie zmian parametrów podstawowych materiałów czynnych, a także biernych silnika w niskiej temperaturze [1, 2]. Istotnym zagadnieniem jest poznanie wpływu narażeń temperaturowych na właściwości wybranych izolacji oraz zmian ich parametrów w temperaturze ciekłego gazu. Umożliwi to prawidłowe dobranie izolacji i jej struktury w fazie projektowania uzwojeń silników przeznaczonych do pracy w ciekłych gazach.

W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych izolacji, które poddano cyklowi narażeń temperaturowych w celu określenia ich wpływu na strukturę i parametry izolacji.

BADANIA IZOLACJI

Celem badań było określenie zmian w strukturze izolacji wybranych do zastosowania w konstrukcji maszyn elektrycznych pracujących w temperaturach kriogenicznych. Na podstawie doświadczeń oraz danych literaturowych ustalono metody i zakres badań [2]. Ponieważ przeprowadzanie badań w ciekłym gazie LNG wiąże się z koniecznością zachowania rygorystycznych środków ostrożności, wybrane materiały izolacyjne badano zastępczo w dwóch środowiskach: ciekłego azotu (LN₂) oraz gazu LPG. Ponieważ LPG jest powszechnie używany w Polsce, zarówno w transporcie, jak i w urządzeniach grzewczych, istnieją laboratoria przystosowane do prowadzenia badań urządzeń w tym środowisku. Ciekły azot ma temperaturę niższą (77 K) od temperatury gazu naturalnego LNG (112 K), zatem zastosowanie LN₂ pozwalało na schłodzenie badanych materiałów izolacyjnych do temperatury niższej niż miałyby to miejsce w przypadku gazu LNG, a jednocześnie badania nie wymagały dużych nakładów finansowych i zapewnienia środków bezpieczeństwa. Umieszczenie natomiast materiałów izolacyjnych w gazie LPG pozwalało na określenie wpływu składników tego gazu na badane materiały. Uznano, iż na pod-

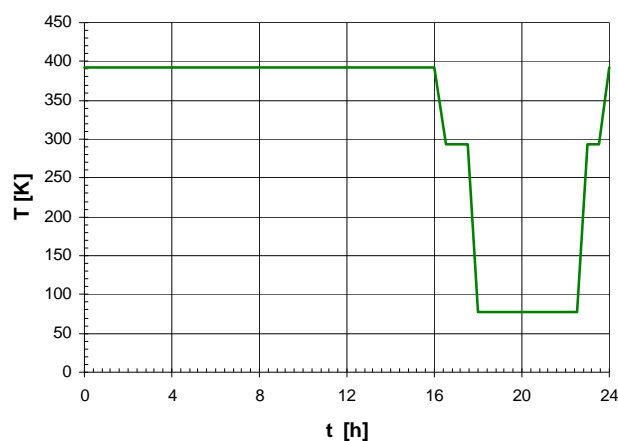
stawie wyników badań wybranych izolacji w LPG można wnioskować o odporności izolacji na gaz LNG, ponieważ główne składniki tych gazów są takie same, chociaż występują w różnych proporcjach.

Badane izolacje (tab. 1) poddano określonej liczbie cykli narażeń temperaturowych. Pojedynczy cykl obejmował: umieszczanie materiałów w suszarce (temperatura 393 K) przez 16 godzin, pozostawienie ich przez 1,5 godziny w temperaturze otoczenia (293 K), zanurzenie próbek w ciekłym azocie (77 K) na 5 godzin i ponowne umieszczenie w temperaturze otoczenia, w której próbki pozostawały przez 1,5 godziny. Graficzny przebieg cyklu narażeń termicznych przedstawiono na rysunku 1.

TABELA 1. Zestawienie badanych materiałów izolacyjnych
TABLE 1. Selected insulating materials

Materiał	Struktura izolacji	Zastosowana żywica
Epoksterm 3	Fp-Pm-Ts-Fp	EP
Epoksterm 5	Fp-Pm-Ts	E
Epoksterm 8 0.15 mm	Fp-Pm-Ts-Fp	Pu
Epoksterm 8 0.12 mm	Fp-Pm-Ts-Fp	Pu
Epoksterm 11	Fp-Pm-Fp	Pu
Ergofol NKN	N-K-N	
Ergofol EW-2	W-Fp-W	E
Ergofol W-2/E	W-Fp-W	E
Ergofol W-2	W-Fp-W	Pu
Ergofol W-1	W-Fp	Pu
Remikaflex		
Relamex		
NEN dwustronny	Fp-N	Pu
Conductofol		
Mylar A	Fp	-
Szkłoflex F dwustronny	Fp-Ts-Fp	Pu

Fp - folia poliestrowa, Pm - papier mikowy, Ts - tkanina szklana, E - żywica epoksydowa, EP - żywica epoksydowo-poliestrowa, Pu - żywica poliuretanowa, N - papier poliamidowy Nomex, K - folia poliimidowa, W - włóknina poliestrowa



Rys. 1. Przebieg cyklu dobowego narażeń termicznych

Fig. 1. 24-hour thermal stress cycle course

Badaniom poddano próbki izolacji oraz struktury izolacyjne odwzorowujące układ izolacyjny cewek przeznaczonych dla silnika pracującego w LNG.

Główne badania dotyczyły określenia zmian wytrzymałości elektrycznej próbek na przebicie oraz struktury mechanicznej izolacji, tj. pęknięcia, rozwarstwianie. Próby wytrzymałości elektrycznej na przebicie wykonywano napięciem stałym o wartościach do 10 kV. Przy pomiarach zastosowano ujemną biegunowość ostrza ze względu na to, iż w jego pobliżu następuje większe wzmocnienie natężenia pola elektrycznego niż miałyby to miejsce w przypadku ostrza dodatniego. Do pomiaru zastosowano miernik Digital H.V. Insulation Tester, model P2685. Badania przeprowadzono przed rozpoczęciem prób, a następnie po wybranych cyklach temperaturowych.

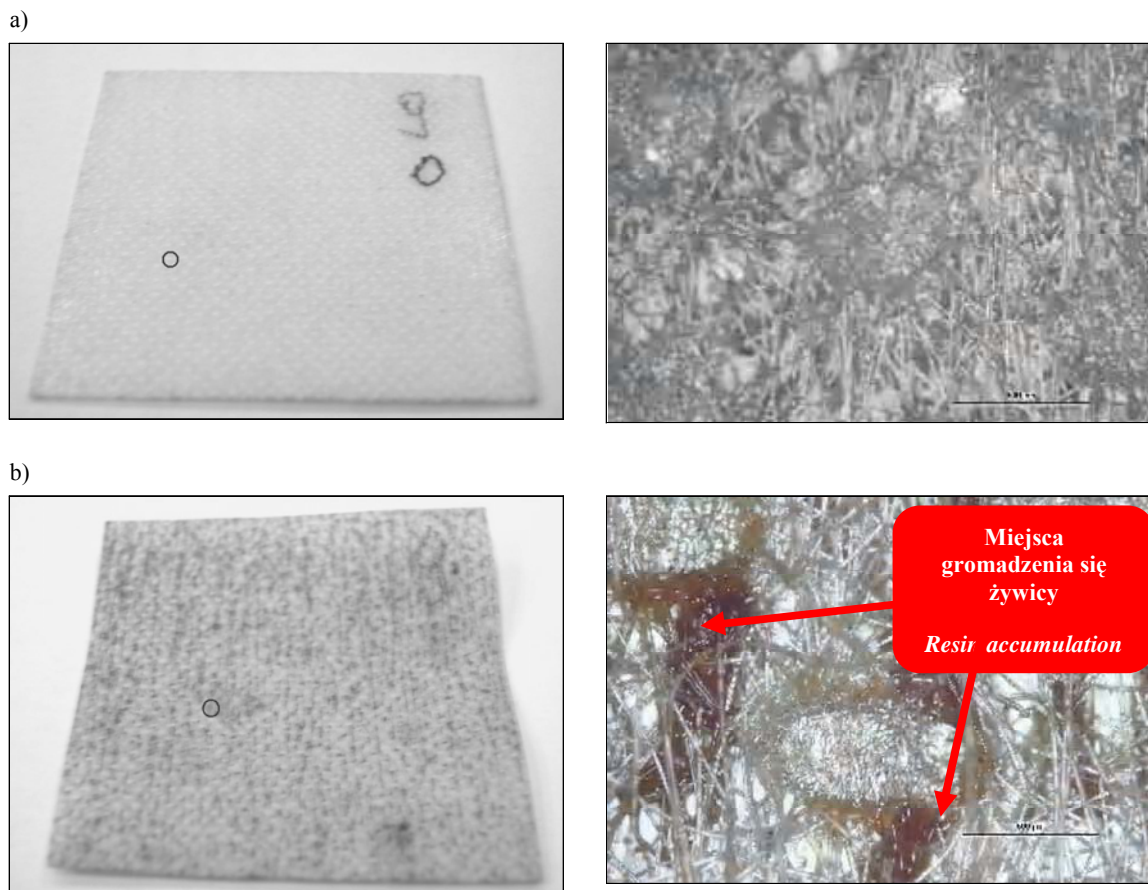
BADANIA ZMIAN MECHANICZNYCH W PRÓBKACH

Badania te przeprowadzono metodą analizy mikroskopowej zmian strukturalnych w badanych próbkach. Zachodzące zmiany rejestrowano fotograficznie. Stan struktury rejestrowano przed rozpoczęciem cykli narażeń temperaturowych oraz po ich określonej liczbie. U większości badanych materiałów i struktur izolacyj-

nych nie zauważono zmian, a jedynie zmianę barwy spowodowaną wielokrotnym umieszczaniem ich w różnych środowiskach i temperaturach (ciekłego azotu oraz powietrza), co pośrednio świadczy o oddziaływaniu narażeń temperaturowych w obszarze powierzchniowym izolacji. Dodatkowo, umieszczanie badanych próbek w temperaturze 393 K spowodowało przemieszczanie i lokalne gromadzenie się nieutwardzonej żywicy. Zjawisko to szczególnie widoczne jest w przypadku próbek Ergofolu EW-2 (rys. 2) i Ergofolu W-2. Sugeruje to konieczność zwrócenia baczonej uwagi na prawidłowe i pełne utwardzenie izolacji cewek podczas ich wykonywania. Warunek ten może mieć mniejsze znaczenie w silnikach pracujących w standardowych temperaturach, gdyż utwardzenie po wcześniejszym równomiernym rozproszczeniu żywicy następuje samoistnie w wyniku nagrzewania się uzwojeń.

W przypadku Ergofolu W-2/E nie zaobserwowano zjawiska gromadzenia się żywicy, a materiał ten różni się od materiału Ergofol W-2 jedynie typem zastosowanej żywicy (Ergofol W-2/E - żywica epoksydowa, Ergofol W-2 - żywica poliuretanowa), zatem istotne jest także dobranie odpowiedniej żywicy do izolacji przeznaczonej do silników „KRIO”.

W przypadku materiałów Ergofol NKN (papier poliamidowy Nomex - folia poliimidowa - papier poliamidowy Nomex), NEN dwustronny FpPuPpa (folia poli-



Rys. 2. Próbką Ergofol EW-2 oraz jej powiększony fragment pod mikroskopem: a) przed, b) po 120 cyklu narażeń termicznych
Fig. 2. Ergofol EW-2 sample and its magnified fragment: a) before, b) after 120th thermal stress cycle

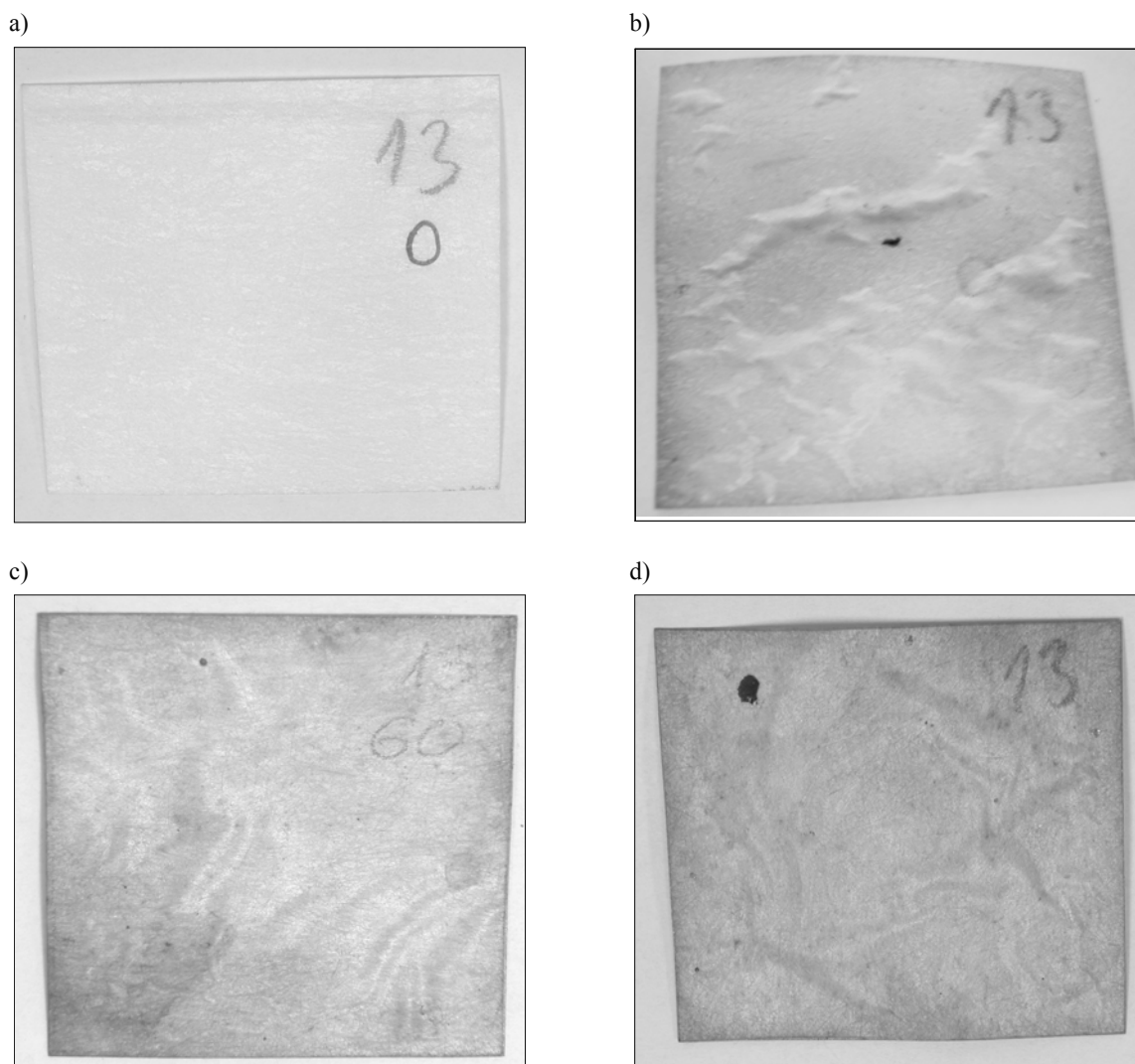
estrowa - papier poliamidowy Nomex) kolejne cykle narażeń termicznych spowodowały wystąpienie niekorzystnych zmian w ich strukturach.

Rysunek 3 przedstawia próbki materiału NEN dwustronny FpPuPpa po kolejnych cyklach narażeń termicznych. Zarówno w przypadku Ergofolu NKN, jak i NEN dwustronnego FpPuPpa pierwsze niekorzystne zmiany w strukturze izolacji są zauważalne po 20 cyklach narażeń termicznych (rys. 3d). W próbkach tych nastąpiło rozwarstwienie się izolacji. Pomiędzy warstwami izolacji tworzą się pęcherzyki powietrza pogarszające właściwości tych próbek. Ergofol NKN, jak i NEN dwustronny FpPuPpa w swoim składzie mają papier poliamidowy Nomex, który to w wyniku kolejnych cykli narażeń termicznych ulega oddzieleniu się od pozostałych warstw w badanych próbkach.

niczną materiałów. W dłuższym okresie czasu osłabienie wytrzymałości mechanicznej izolacji może prowadzić do wzajemnego przemieszczania się jej warstw i pęknięcia.

Jednak bardziej niebezpieczna jest możliwość zasysania wilgoci przez silnik wyjęty z ciekłego gazu. Ponowne jego zanurzenie i schłodzenie spowoduje zamrażanie wody uwieszonej w powstałych porach i możliwość uszkodzenia izolacji lub spowodowania zwarców zwojowych. Dlatego też istotne są działania zapewniające zwartość i mechaniczną odporność izolacji cewek.

Jak wspomiano wcześniej, materiały izolacyjne poddano, przez określony czas, badaniom porównawczym w gazie naturalnym LPG, analizując okresowo zachodzące zmiany w próbkach w porównaniu z próbkami badanymi LN2. W próbkach: Epoksterm 5, Remi-

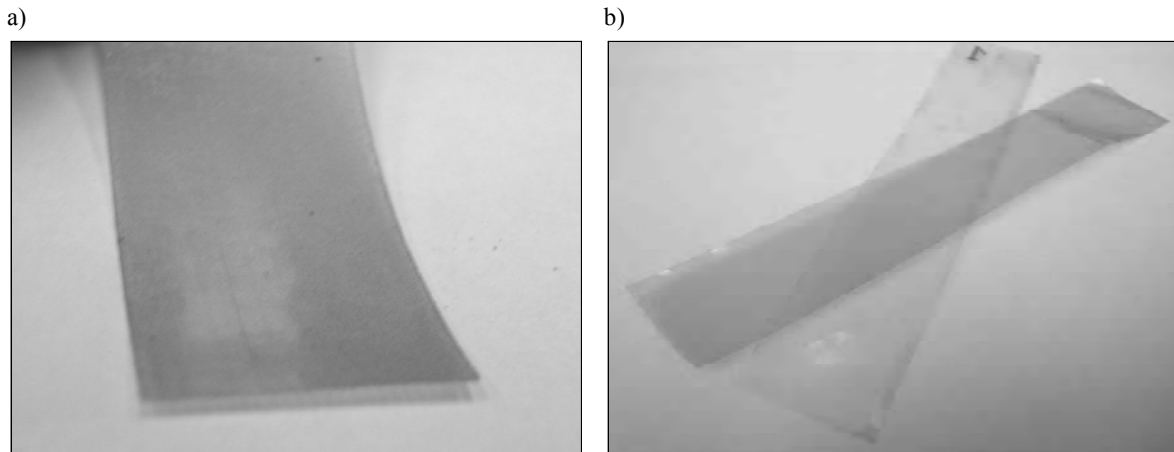


Rys. 3. NEN dwustronny FpPuPpa: a) przed, b) po 20 cyklu, c) po 60 cyklu, d) po 120 cyklu narażeń termicznych

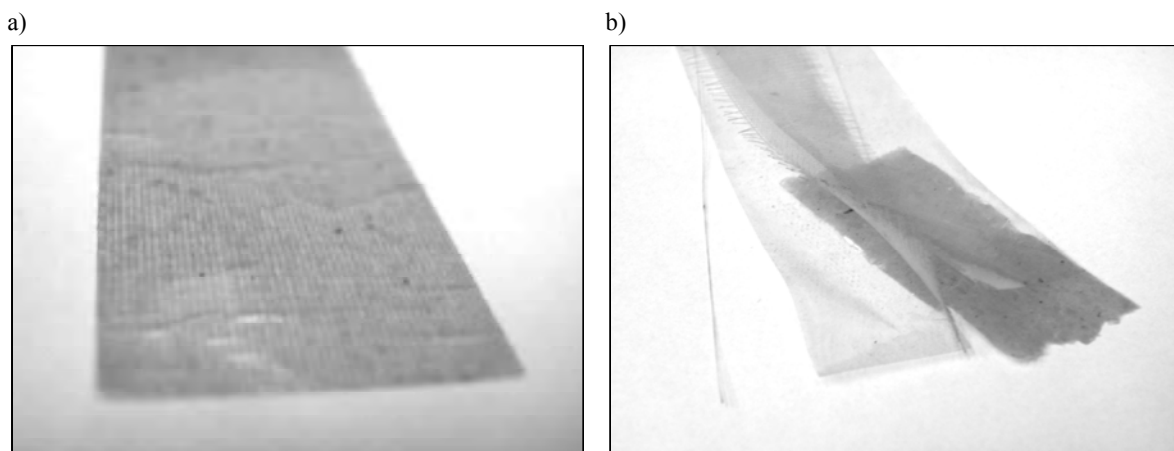
Fig. 3. Double sided NEN FpPuPpa sample: a) before, b) after 20th stress cycle, c) after 60th stress cycle, d) after 120th thermal stress cycle

Przedstawione zmiany, jak wynika z pomiarów elektrycznych, nie powodują zmniejszenia wytrzymałości układów izolacyjnych pracujących w ciekłych gazach, lecz mogą istotnie wpływać na wytrzymałość mecha-

kaflex, Conductofol już po pierwszym cyklu zauważono niekorzystne zmiany w ich strukturach. Wyniki badań pokazały, że w izolacjach nieutwardzonych bądź utwardzonych nieprawidłowo wystąpił szybki proces



Rys. 4. Próbkę izolacji Epoksterm 5: a) przed, b) po umieszczeniu w gazie LPG
 Fig. 4. Epoksterm 5 sample: a) before, b) after LPG treatment



Rys. 5. Próbkę izolacji Remikaflex: a) przed, b) po umieszczeniu w gazie LPG
 Fig. 5. Remikaflex sample: a) before, b) after LPG treatment

degradacji żywicy polegający na jej rozpuszczeniu. W efekcie w badanych materiałach nastąpiło rozdzielanie się kolejnych warstw struktury izolacji. Przykład rozwarstwionych próbek nieutwardzonych wykonanych z materiału Epoksterm 5, Remikaflex oraz Conductofol przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4, 5 oraz 6. Badania w ciekłym gazie LPG wykazują, że każda izolacja zawierająca żywicę epoksydową ulegnie rozwarstwieniu, jeżeli nie będzie dobrze utwardzona. W przypadku złego utwardzenia nastąpi wymywanie żywicy z izolacji. Ze względu na podobny skład chemiczny ciekłych gazów LPG oraz LN założyć można, że również w tym drugim próbki wymienione powyżej ulegną uszkodzeniu.

WYNIKI BADAŃ ZMIAN STRUKTURY MECHANICZNEJ PRÓBEK IZOLACJI

Badaniom poddano fragmenty cewek o dwóch różnych strukturach izolacyjnych: 1) z drutem nawojowym w izolacji z folii poliestrowej, 2) z drutem nawojowym

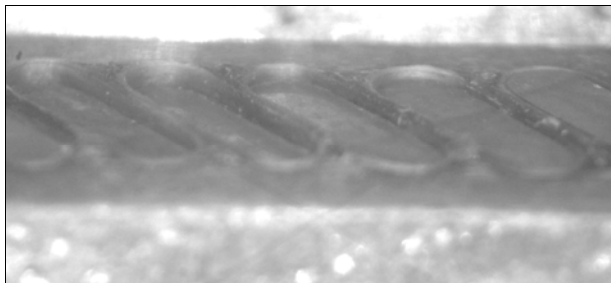
w izolacji Thermex 200G2 1Daglas (żywica poliamidoimidowa).

Badania utwardzonych struktur izolacji stanowiących izolację cewki wykazały, że folia poliestrowa, która stanowi izolację drutu nawojowego użytego do wykonania cewki 1, charakteryzuje się słabą przyczepnością do miedzi i kolejnej warstwy izolacji (opłot z włókna szklanego). Brak sklejenia przewodu z izolacją umożliwia przemieszczanie się drutu względem izolacji (rys. 6), które było widoczne już po 1 cyklu narażeń termicznych.

Właściwości mechaniczne zastosowanych izolacji nie uległy zmianie, ale przemieszczanie się prętów może prowadzić do uszkodzeń ciągłości izolacji międzyzwojowej i w konsekwencji do zwarć międzyzwojowych. Zjawiska przesuwania się prętów miedzianych względem ich izolacji nie wystąpiły w przypadku cewki 2 (rys. 7).

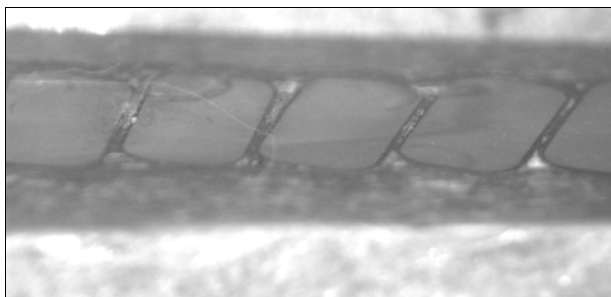
Badania mikroskopowe obu rodzajów cewek wykazały, że w atmosferze ciekłego azotu następuje rozpuszczanie i wypłukiwanie organicznej żywicy zawartej w

taśmach izolacyjnych cewek. Skutkuje to powstawaniem szczelin między warstwami izolacji cewki oraz pomiędzy izolacją drutów nawojowych. Prowadzić to może do zwiększenia higroskopijności układu izolacji, co w warunkach pracy w bardzo niskiej temperaturze ma istotne znaczenie.



Rys. 6. Przekrój próbki cewki z drutem nawojowym izolowanym folią poliestrową po 20 cyklu narażeń termicznych

Fig. 6. Coil's sample section with winding wire insulated polyester foil, after 20th thermal stress cycle



Rys. 7. Przekrój próbki cewki z drutem nawojowym izolowanym żywicą poliamidoimidową po 20 cyklu narażeń termicznych

Fig. 7. Coil's sample section with winding wire insulated polyamide-imide resin, after 20th thermal stress cycle

WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ NA PRZEBICIE

Badania wykonano przed rozpoczęciem cykli narażeń temperaturowych, a następnie po ich określonej liczbie. Po poddaniu izolacji serii cykli narażeń temperaturowych wytrzymałość elektryczna badanych materiałów izolacyjnych się nie zmieniła. Rezystancja badanych próbek w każdym przypadku wynosiła powyżej $10^{12} \Omega$.

W przypadku badanej cewki 1 (rys. 6) zanurzenie uzwojenia w ciekłym azocie powoduje spadek rezystancji układu izolacji, co wynika prawdopodobnie z przemieszczenia drutu nawojowego w uzwojeniu w wyniku skurczów materiałowych w niskich temperaturach. Przemieszczenie to skutkuje zmianą grubości izolacji zwojowej z dwuwarstwowej na jednowarstwową. Po badaniach w ciekłym azocie rezystancja układu izolacji cewki 1 umieszczonej w warunkach pokojowych ($T = 293 \text{ K}$, wilgotność = 55%) po upływie 30 minut znacząco maleje (o około 1500 razy) w wyniku skraplania się wody z otoczenia na powierzchni cewki i

w porach izolacji. Zjawisko to może się nasilać wraz ze zwiększaniem się ilości cykli temperaturowych, wówczas gdy nie zostanie prawidłowo utwardzona cewka i żywica stopniowo będzie wypłukiwana z układu.

W przypadku badanej cewki 2 (z drutem nawojowym w izolacji Thermex 200G2 1Daglas) nie wystąpiło zjawisko zmniejszania się rezystancji izolacji pomiędzy przewodami, co świadczy o prawidłowym doborze izolacji i cewki.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania próbek izolacji wykazały, że pod wpływem różnych współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych warstw podczas głębokiego schładzania następuje rozwarstwianie się materiałów izolacyjnych Ergofol NKN i NEN dwustronny FpPuPpa. Rozwarstwienie zauważono także w przypadku materiałów Epoksterm 5, Remikaflex, Conductofol po umieszczeniu ich w LPG. Związane to jest również z rozpuszczaniem nieutwardzonej żywicy przez LPG. Zmiany te nie powodują, co prawda, zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej na przebicie, jednak zmniejszają wytrzymałość mechaniczną materiałów i ich degradację struktury. Istnieje również niebezpieczeństwo przemieszczania się izolacji, co może prowadzić do przecierania się izolacji pod wpływem drgań zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych, powodowanych przez siły elektrodynamiczne podczas pracy silnika w stanach ustalonych i nieustalonych. Zatem wnioskować można, iż materiały te nie powinny być używane w zastosowaniach kriogenicznych.

Ze względu na słabą adhezję niewskazane jest również stosowanie folii poliestrowej w postaci oplotu jako izolacji drutów nawojowych. Izolacja przewodów nawojowych stosowanych w urządzeniach pracujących w temperaturach kriogenicznych powinna być trwale zespolona z drutem w celu uniknięcia możliwości ich wzajemnego przemieszczania się. Wskazane jest także zastosowanie podwójnej izolacji z dwóch różnych materiałów.

W przypadku pozostałych badanych materiałów izolacyjnych (Epoksterm 3, Epoksterm 5, Epoksterm 8, Epoksterm 11, Ergofol EW-2, Ergofol W-2/E, Ergofol W-2, Ergofol W-1, Relamex, Mylar A, Szkłoflex F dwustronny) nie zauważono zmian w temperaturach kriogenicznych, mogących wpływać na ich właściwości wytrzymałościowe i elektryczne. Zatem mogą one być z powodzeniem użyte w konstrukcji maszyn przeznaczonych do pracy w temperaturach kriogenicznych pod warunkiem prawidłowego utwardzenia tych izolacji.

LITERATURA

- [1] Buniowski A., Gaworska D., Węgliński B., Performance of chosen magnetic materials in cryogenic temperatures, Sixth

International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems 2004.

- [2] Shiveley R., Submerged Cryogenic Motor Materials Development, IEEE Electrical Insulation Magazine, 19, 3, 7-11.

Recenzent
Janusz Braszczyński