

Procesy degradacji w elementach tekstolitowych ograniczników przebieg

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań próbek tekstolitowych elementów osłonowo-centrujących z eksploatowanych ograniczników przebieg SN. Prądy wyladowcze (zwarciove) o zróżnicowanym natężeniu i czasie trwania spowodowały w tworzywie elementów efekty degradacji o różnym stopniu zaawansowania, które badano z wykorzystaniem metod mikroskopowych i mikroanalizy rentgenowskiej EDS. Udokumentowano zmiany w składzie elementarnym (zawartości pierwiastków) warstwy wierzchniej tworzyw tekstolitowych - w miarę postępu efektów degradacji. Wykazano, że tworzywa te posiadają niewystarczającą odporność na skutki awaryjnej pracy ogranicznika przy jego zawilgoceniu, które jest konsekwencją rozszczelnienia osłony.

Abstract. The work describes degradation effects in the structure of textolite shield-centering elements of operated MV surge arresters. As a result of acting inner partial discharges of diverse duration and power - the material underwent degradation of different degree of advancement. Using microscopic research techniques and EDS analysis, the authors found and documented changes of structure and chemical composition of the material surface, with the increasing degree of degradation. It has been shown that textolite materials have insufficient resistance to the effects of emergency operation of the arresters after moisture ingress, which is a consequence of unsealing of the housing. (**Degradation processes in textolite elements of surge arresters**).

Słowa kluczowe: ogranicznik przebieg, tekstolit szklany TSE, prąd wyladowczy (zwarciovy), metoda EDS.

Keywords: surge arrester, TSE glass textolite, discharge (short circuit) current, EDS method.

Wstęp

Zagadnienia ochrony przeciwprzebiegowej systemów, sieci oraz urządzeń elektroenergetycznych i elektronicznych należą do szczególnie istotnych. Przebiegia prowadzą do uszkodzeń izolacji urządzeń i innych elementów sieci elektroenergetycznej oraz powodują zakłócenia w ich działaniu. Wiąże się to z poważnymi kosztami ekonomicznymi.

Systemy elektroenergetyczne i urządzenia wspomagające, do których należą ograniczniki przebieg, są podczas eksploatacji narażone na działanie przebieg. Jest to spowodowane wzrostem napięcia powyżej napięcia znamionowego. Niekontrolowany wzrost napięcia może być wynikiem zakłóceń środowiskowych – wyladowań atmosferycznych, generowanych w systemie przebieg łączeniowych i dorywczych, jak również innych zakłóceń podczas pracy systemu. Niekontrolowanych wzrostów napięcia nie można przewidzieć i uniknąć [1,2]. Tymczasem aparatura zainstalowana w stacjach elektroenergetycznych powinna pracować bezawaryjnie także w warunkach zakłóceń. Szczególnie wrażliwymi urządzeniami na działanie przebieg są transformatory, które pełnią kluczową rolę w systemie elektroenergetycznym. Zagrożone są one kosztownym w naprawie przebiegiem izolacji uzwojeń.

Stosuje się różne metody ograniczania przebieg, w zależności od parametrów występujących przebieg i właściwości chronionych urządzeń. Przede wszystkim powszechnie stosowane są ograniczniki przebieg – do ochrony systemów przesyłowych i dystrybucyjnych. Najpopularniejszym typem urządzeń są beziskiernikowe ograniczniki przebieg zawierające warystory metalowo-tlenkowe ZnO (ang. MOSAs – Metal Oxide Surge Arresters). Warystory ZnO są w istocie rezystorami o silnie nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej. Z tego względu są one bardzo skuteczne, zwłaszcza że wykazują szybką reakcję przewodzenia na przebiegia o wysokim napięciu [3,4].

Typowe ograniczniki przebieg posiadają konstrukcję zamkniętą i mają jednolitą obudowę polimerową wokół zespołu elementów wewnętrznych. Stos warystorowy

zamknięty jest w elemencie osłonowo-centrującym w formie rury, wykonanej najczęściej z tekstolitu szklanego [3 - 5]. Konsekwencją takiego rozwiązania jest ryzyko narażenia polimerowego materiału na działanie wyladowań niezupełnych, mogących wystąpić między wewnętrzną ścianą elementu osłonowego, a stosem warystorów. Może to nastąpić pod wpływem zewnętrznych zanieczyszczeń, a zwłaszcza zawilgocenia wnętrza. Wieloletnia praktyka eksploatacyjna dowodzi, że prądy zwarciove mogą prowadzić do uszkodzeń, które sprzyjają później rozwojowi wyladowań niezupełnych. W wyniku tego dochodzi wewnątrz urządzeń do lokalnych wysokich wzrostów temperatury. Powoduje to przede wszystkim degradację tekstolitu szklanego, z którego zbudowane są elementy osłonowo-centrujące.

Istnieje szereg przyczyn uszkodzeń ograniczników przebieg podczas eksploatacji [3,6]. Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne, jak również praktyka autorów dowodzą, że utrata szczelności i zawilgocenie jest zdecydowanie najczęstszą przyczyną degradacji i uszkodzeń ograniczników przebieg. Wnikanie wilgoci do wnętrza ogranicznika przebieg może wynikać z wad produkcyjnych lub materiałowych uszczelnień, niewłaściwego montażu, uszkodzeń lub postępującej z czasem degradacji materiałów uszczelniających - jak guma. Od lat prowadzone są liczne badania dotyczące negatywnego wpływu wilgoci na funkcjonowanie ograniczników przebieg. Szeroko badane są również efekty degradacji warystorów, w czym udział mieli również autorzy pracy [7,8].

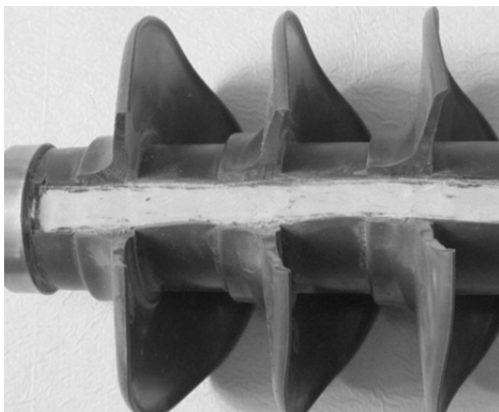
O ile jednak problemy związane z funkcjonowaniem warystorów są dobrze rozpoznane, o tyle brak jest pogłębionych badań efektów degradacji elementów wewnętrznych ograniczników przebieg, wykonanych z laminatu szklano-epoksydowego - jak tekstolit szklany TSE. Badania takie prowadzone są przez autorów od lat i koncentrują się na analizie wpływu wyladowań niezupełnych na powierzchni różnych elementów wykonanych z tekstolitu [9]. Efekty degradacji, spowodowane takimi wyladowaniami, spotykane są często przy uszkodzeniach ograniczników przebieg. Wydaje się to

być konsekwencją właściwości samego tekstolitu, który wykazuje niewystarczającą odporność na skutki awaryjnej pracy ogranicznika po wniknięciu wilgoci, w konsekwencji rozszczelnienia osłony. Właściwości tworzyw tekstolitowych mają wpływ na ograniczenie trwałości i niezawodności urządzeń, co niestety nie jest brane pod uwagę przez producentów ograniczników przepięć. W opinii autorów należy znaleźć środki zaradcze, które ograniczą procesy degradacji elementów tekstolitowych spowodowanych przepływem prądów wyładowczych (wyładowań pełnych).

Przedmiot i metodyka badań

W pracy przedstawiono wyniki badań procesów degradacji tworzywa elementów osłonowo-centrujących ograniczników przepięć, pod wpływem przepływu dużych prądów zwarciovych. Badania stanowią kontynuację prac prowadzonych od 2012 r. [9]. Badane elementy pochodziły z ograniczników przepięć średniego napięcia (SN) i wykonane były z laminatu szklano-epoksydowego, jakim jest tekstolit szklany TSE. Elementy te zostały wymontowane z różnych zdemontowanych z eksploatacji ograniczników, które uległy uszkodzeniu lub działały niewłaściwie. Przez urządzenia płynęły prądy wyładowcze (zwarciove) o zróżnicowanym natężeniu i czasie trwania. Spowodowały one w tworzywie elementów osłonowo-centrujących możliwe do obserwacji i udokumentowania efekty degradacji o różnym stopniu zaawansowania.

W badaniach wykorzystywano mikroskopię optyczną (MO), skaningową mikroskopię elektronową (SEM) oraz technikę mikroanalizy rentgenowskiej EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy). Metoda EDS służyła do rejestracji i dokumentowania zmian w jakościowym i ilościowym składzie elementarnym (zawartości pierwiastków) wierzchniej warstwy tworzyw tekstolitowych w miarę wzrostu efektów degradacji. Aby wyniki badań były miarodajne i mogły być porównywalne, analizy dokonywano na takich samych obszarach powierzchni - $4,0 \text{ mm}^2$ - dla wszystkich próbek, niezależnie od stopnia degradacji.



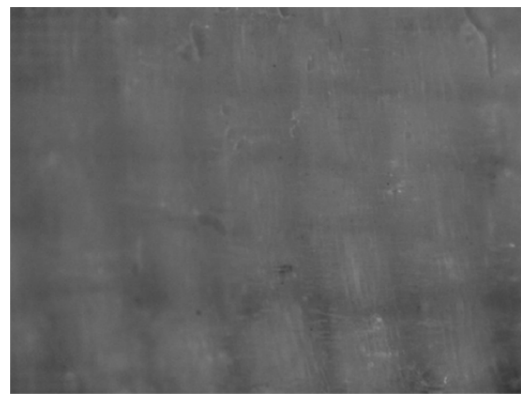
Rys.1. Nieksploatowany ogranicznik przepięć SN. Wycięty fragment rurowego elementu osłonowo-centrującego posłużył jako próbka referencyjna

Tkanina nośnika tworzywa tekstolitowego wykonana została z wiązek włókien ze specjalnego szkła typu ECR. Szkło tego rodzaju odznacza się dobrymi właściwościami elektrycznymi oraz odpornością chemiczną. Typowe szkło ECR zawiera około 60% SiO_2 , ponad 20% CaO oraz kilkanaście procent Al_2O_3 i innych dodatków (ZnO , MgO , TiO_2 etc.) [10]. Obecny w składzie elementarnym wapń pochodzi z CaCO_3 - topnika i stabilizatora, natomiast będący źródłem glinu Al_2O_3 , poprawia odporność chemiczną. Oba związki wykorzystuje się w zestawie szklarskim. Stosowane są włókna szklane o średnicy w

zakresie od 3 do $20 \mu\text{m}$ [11]. Tekstolit TSE odznacza się ogólnie stosunkowo wysoką odpornością na działanie podwyższonej temperatury - w granicach około 180°C .

Na rysunku 1 przedstawiono ogranicznik, którego element osłonowo-centrujący posłużył za odniesienie - jako stan referencyjny tworzywa.

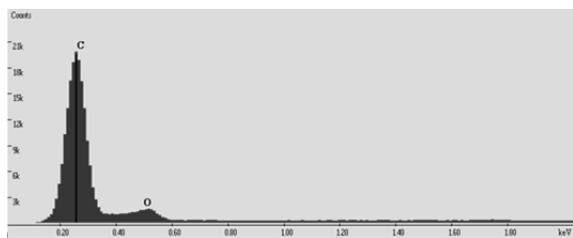
Na rysunku 2 przedstawiono stan referencyjny materiału, który był przedmiotem badań. Włókna tkaniny nośnika były przykryte warstwą przezroczystej żywicy epoksydowej i znajdowały się pod powierzchnią tworzywa tekstolitowego. Wyniki badania EDS powierzchni wyjściowego materiału, z wyznaczonym składem elementarnym (pierwiastkowym) zaprezentowano na rysunku 3. Żywica epoksydowa obecna na wierzchu materiału - lepiszcze laminatu - zawierała wagowo 76,6% węgla (C) oraz 23,4% tlenu (O), z pominięciem zawartości wodoru (H) - która nie może być rejestrowana przy użyciu techniki EDS. Pierwiastki obecne w tkaninie nośnika z włókien szklanych - krzem (Si) i metale (gl. Ca i Al) - nie zostały zarejestrowane, gdyż pozostawały przykryte warstwą organicznej żywicy.



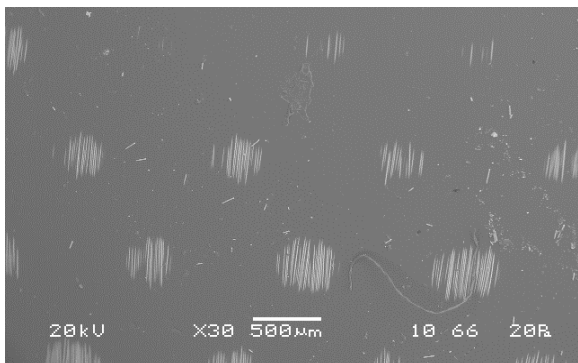
Rys.2. Obraz MO powierzchni tworzywa tekstolitowego z nieeksploatowanego ogranicznika przepięć, w powiększeniu 40 razy. Widoczne są wiązki tkaniny nośnika szklanego pod przezroczystą warstwą żywicy

Przepływy prądów wyładowczych powodują lokalny wzrost temperatury wewnątrz ograniczników przepięć. Wielokrotne przepływy takich prądów prowadzą, w niektórych obszarach elementów osłonowo-centrujących, do narastających efektów degradacji laminatu. Oczekiwano, że w szczególności dotyczy to organicznej żywicy epoksydowej. W trakcie badań elementów pozyskanych z eksploatowanych ograniczników przepięć znaleziono wiele obszarów, w których występują efekty degradacji. Jednak w zależności od nasilenia i czasu działania prądów wyładowczych - a zatem wytworzonej temperatury - występowały znaczne różnice w obrazach mikrostruktur i stopniu degradacji laminatu.

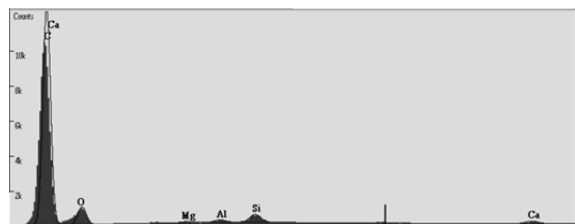
Przepływ prądów wyładowczych i lokalny wzrost temperatury, powodował przede wszystkim topienie i zwęglanie organicznego lepiszcza - żywicy epoksydowej. W efekcie nadtopienia wierzchniej warstwy żywicy, na powierzchni materiału pojawiły się wiązki włókien z tkaniny nośnika - rysunek 4. Na rysunku 5 przedstawione zostały wyniki analizy EDS powierzchni tworzywa w obszarze lekkiej degradacji, z wyznaczonym składem elementarnym. Wierzech materiału zawierał wagowo obok węgla (78,0%) i tlenu (18,6%), także 1,6% krzemu oraz 1,0% wapnia, które pochodziły z włókien szklanych, które znalazły się na powierzchni laminatu. Także drobne domieszki glinu (Al) i magnezu (Mg) pochodziły ze szkła. Stopień degradacji tworzywa był jednak jeszcze nieduży i wynikał stąd niewielki udział krzemu oraz domieszek szkła.



Rys.3. Widmo EDS zarejestrowane dla powierzchni próbki referencyjnej. Obecne są jedynie węgiel i tlen, pochodzące z organicznej żywicy epoksydowej



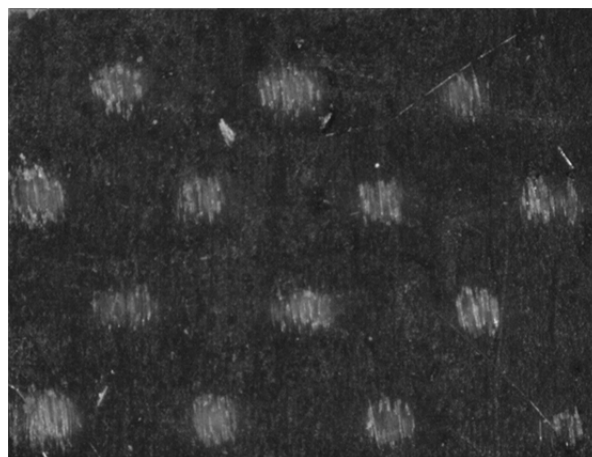
Rys.4. Obraz SEM powierzchni tworzywa tekstolitowego z lekkimi efektami degradacji, w powiększeniu 30 razy. Widoczne są wiązki jasnych włókien tkaniny nośnika, które pojawiły się na powierzchni laminatu w wyniku nadtopienia wierzchniej warstwy żywicy epoksydowej



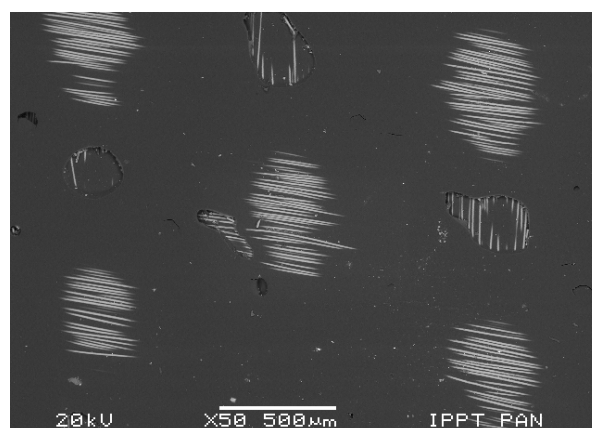
Rys.5. Widmo EDS zarejestrowane dla tworzywa tekstolitowego ze słabymi efektami degradacji w postaci niewielkiej zawartości pierwiastków obecnych w nośniku szklanym (krzem, wapń, glin i magnez)

W miarę postępu efektów degradacji, w wyniku działania prądów wyładowczych, coraz więcej obserwowanych było obszarów zwęglenia żywicy epoksydowej – rysunek 6. Zajmowały one coraz większą powierzchnię, a stopień karbonizacji fazy organicznej ulegał intensyfikacji. Nawet tam, gdzie żywica nie uległa jeszcze silniejszemu zwęgleniu, jej wierzchnia warstwa została stopiona w takim stopniu, że na powierzchni pojawiało się coraz więcej odsłoniętej tkaniny nośnika. Szczególnie dobrze wiązki włókien widoczne są na obrazach SEM – rysunek 7.

Analiza EDS tworzywa tekstolitowego, o zaawansowanych efektach degradacji – rysunki 6 i 7, wskazywała na wyraźny już udział szklanej tkaniny nośnika w składzie elementarnym powierzchni materiału. Zawartości węgla (74,1%) oraz tlenu (16,9%) uległy obniżeniu o kilka punktów procentowych. Dowodzi to znaczącego ubytku fazy organicznej - żywicy epoksydowej w wierzchniej warstwie materiału tekstolitowego. Jednocześnie ilość pierwiastków obecnych w szkle odpowiednio wzrosła - krzemu do 4,6%, wapnia do 2,9% oraz glinu do 1,4% - rysunek 8. W sumie stanowiły one około 9% wagowych powierzchni laminatu, nie licząc części tlenu. Wzrost temperatury w wyniku przepływu prądów wyładowczych w niektórych obszarach elementów osłonowo-centrujących musiał być zatem duży i przekraczać 200°C.

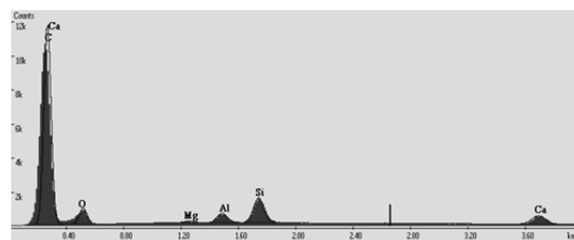


Rys.6. Obraz MO powierzchni tworzywa tekstolitowego z dobrze zaznaczonymi efektami degradacji, w powiększeniu 30 razy. Nastąpiło wyraźne zwęglenie materiału próbki. Wiązki włókien tkaniny nośnika, po stopieniu wierzchniej warstwy żywicy, znalazły się na powierzchni tworzywa



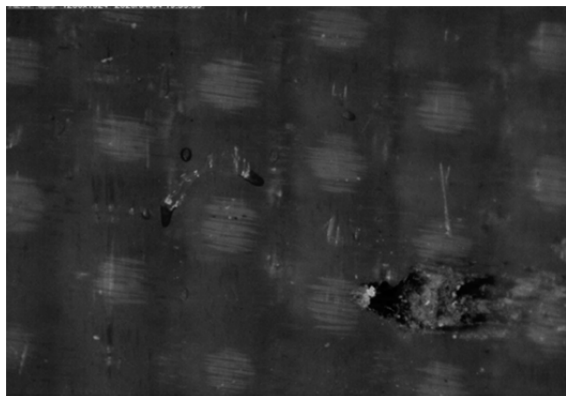
Rys.7. Obraz SEM powierzchni tworzywa tekstolitowego z zaawansowanymi efektami degradacji, w powiększeniu 50 razy. Widoczne jest znaczące nadtopienie żywicy na wierzchniej warstwie materiału. Spod niej wyłaniają się wiązki jasnych włókien tkaniny nośnika. Są też wytopione wgłębienia w żywicy

W wyniku przepływu, zwłaszcza długotrwałego, silnych prądów wyładowczych lokalnie dochodzić musiało do dużego wzrostu temperatury - nawet około 300°C. W konsekwencji, w niektórych obszarach elementów osłonowo-centrujących wystąpił nasilony efekt degradacji organicznego lepiscza epoksydowego. Na rysunku 9 przedstawiono obraz MO tworzywa tekstolitowego z eksploatowanego ogranicznika przepięć, w którym zwęglenie żywicy osiągnęło wysoki poziom. Nastąpiła zmiana koloru tekstolitu na znacznie ciemniejszy.



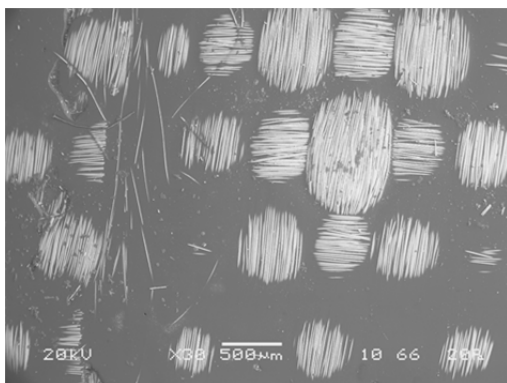
Rys. 8. Widmo EDS zarejestrowane dla tworzywa tekstolitowego z zaawansowanymi efektami degradacji, w postaci znacznego udziału pierwiastków obecnych w nośniku szklanym – krzemu i metali na powierzchni próbki

Poszczególne fragmenty materiału wykazywały jednak duże zróżnicowanie stopnia degradacji. Wysoki wzrost temperatury występował tylko w określonych obszarach elementów osłonowo-centrujących. W tych strefach zaobserwowano silne lub nawet bardzo silne efekty degradacji laminatu. Wielokrotne przepływy dużych prądów wyładowczych doprowadziły do silnego stopienia organicznej żywicy epoksydowej, zwłaszcza w wierzchniej warstwie, znaczącego jej zwęglenia, a nawet wypalenia. W efekcie, na obrazach SEM dobrze widoczne są liczne wiązki włókien z tkaniny nośnika – rysunek 10. W wyniku tego, pierwiastki ze szkła stanowią znaczący komponent w składzie elementarnym wierzchniej warstwy materiału.



Rys.9. Obraz MO powierzchni tworzywa tekstolitowego z silnymi efektami degradacji, w powiększeniu 30 razy. Nastąpiło duże zwęglenie fragmentu materiału próbki, na powierzchni widoczne są jasne wiązki włókien tkaniny nośnika oraz wgłębienia po wypalanej żywicy

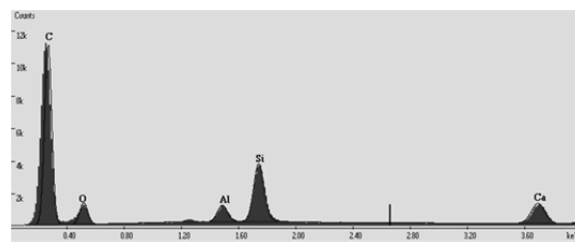
Na rysunku 11 przedstawiona została analiza EDS przykładowej silnie zdegradowanej powierzchni tworzywa tekstolitowego. Zawartość węgla pozostała na poziomie 68,0%, w stosunku do wyjściowej wartości 76,6%. Ilość pierwiastków obecnych w szkłe znacząco wzrosła - krzemu do 8,4%, wapnia do 5,5% oraz glinu do 2,6% - stanowiąc łącznie 16,5% (nie licząc części tlenu). Nastąpiło przetopienie oraz częściowe zwęglenie i wypalenie żywicy epoksydowej z wierzchniej warstwy laminatu.



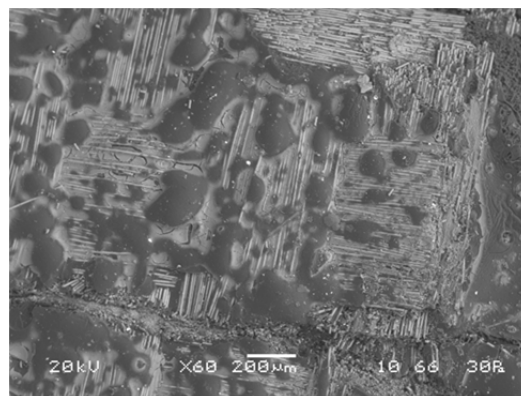
Rys.10. Obraz SEM powierzchni tworzywa tekstolitowego z bardzo silnymi efektami degradacji, w powiększeniu 30 razy. Żywica na wierzchniej warstwie materiału uległa silnemu stopieniu. Widoczne są na powierzchni liczne jasne wiązki, jak również pojedyncze włókna szklane z uszkodzonej miejscami tkaniny nośnika

Jak wspomniano, wysoki lokalny wzrost temperatury prowadzi w niektórych obszarach elementów osłonowo-centrujących urządzeń do nawet bardzo silnych efektów degradacji laminatu. Dochodzi do stopienia i silnego zwęglenia, popękania a nawet wypalenia organicznej

żywicy epoksydowej. Uszkodzeniom ulega również tkanina nośnika laminatu. Przykład bardzo silnej degradacji struktury tworzywa i odsłonięcia uszkodzonej tkaniny nośnika przedstawiono na rysunku 12.



Rys.11. Widmo EDS zarejestrowane dla tworzywa tekstolitowego z bardzo silnymi efektami degradacji. Występuje znaczący udział pierwiastków obecnych w nośniku szklanym – krzemu, wapnia i glinu. Tlen obecny jest zarówno w fazie organicznej, jak i nieorganicznej



Rys.12. Obraz SEM powierzchni tworzywa tekstolitowego z bardzo silnymi efektami degradacji, w powiększeniu 60 razy. Żywica na wierzchniej warstwie materiału uległa w przeważającej mierze stopieniu, zwęgleniu i wypaleniu. W wyniku tego, w dużym stopniu uwidoczniła została uszkodzona tkanina nośnika

Podsumowanie i wnioski

Termiczne efekty wyładowań niepełnych wewnątrz ograniczników przepięć bardzo silnie wpływają na stan elementów tekstolitowych. Ich degradacja o zróżnicowanym natężeniu spotykana jest często przy uszkodzeniach ograniczników przepięć. Z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania urządzeń, za szczególnie niepożądanym uważać należy efekt zwęglania żywicy epoksydowej – lepiszcza laminatu o właściwościach dielektrycznych. Osłonowe, dystansowe, czy centrujące elementy ograniczników przepięć muszą mieć właściwości elektroizolacyjne. W przypadku rozszczelnienia ogranicznika przepięć, obecność wilgoci wewnątrz powoduje powstawanie wyładowań pełnych na jego elementach wewnętrznych. W wyniku tego dochodzi do zwęglenia i wypalenia fragmentów powierzchni tekstolitu. Zwęglona żywica tworzy ścieżki przewodzące, często w dodatku przy powierzchni stosu warystorów. Skutkuje to efektem bocznikowania warystorów. Następuje istotne pogorszenie pracy stosu warystorów - rośnie wartość prądu płynącego przez ogranicznik i zwiększona jest zawartość parzystych harmonicznych. Dochodzi do obniżenia parametrów pracy urządzenia – jak napięcie stałej pracy i napięcie znamionowe [3, 4]. Prowadzi to do nieprawidłowej pracy ogranicznika przepięć, a następnie jego uszkodzenia.

W tabeli 1 zilustrowano zmiany w składzie elementarnym - zawartości pierwiastków wierzchniej warstwy tworzywa tekstolitowego w procentach wagowych,

dla kolejnych etapów postępującej degradacji materiału. Zestawione dane uzyskano na podstawie mikroanalizy rentgenowskiej EDS, bez uwzględnienia wodoru. Z uwagi na ograniczoną ilość pomiarów wyniki należy traktować jako przybliżone, niemniej dobrze oddają one występującą tendencję. Widoczna jest malejąca zawartość węgla i tlenu, które wchodzi w skład żywicy epoksydowej. Jednocześnie rośnie ilość krzemu, wapnia i glinu, które są składnikami szklanej tkaniny nośnika laminatu. Jest ona w miarę degradacji organicznej żywicy coraz silniej odślaniana na powierzchni tworzywa.

Wyniki badań oraz wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne wskazują na to, że dosyć powszechnie stosowane tworzywa tekstolitowe wykazują niewystarczającą odporność na skutki awaryjnej pracy ogranicznika przy jego zawilgoceniu, które jest konsekwencją rozszczelnienia osłony. Właściwości tworzyw tekstolitowych mają zatem wpływ na ograniczenie trwałości i niezawodności urządzeń. Fakt ten niestety nie jest brany

pod uwagę przez producentów ograniczników przepięć. Autorzy proponują zastosowanie dodatkowego zabezpieczenia ograniczników przepięć w postaci pokrycia ich wnętrza materiałem hydrofobowym typu RTV (wulkanizowany w temperaturze pokojowej). Jest to elastomer silikonowy o niskiej energii powierzchniowej, co w przypadku zawilgocenia zapobiega powstawaniu na jego powierzchni ciągłej ścieżki zwilżania, a tym samym ogranicza powstawanie niebezpiecznego dla ogranicznika prądu upływu. Powłoka ta jest powszechnie stosowana jako dodatkowa ochrona izolatorów wysokiego napięcia. Jej ważnym składnikiem jest trihydrat tlenku glinu (ATH - $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), którego zadaniem jest obniżanie temperatury spowodowanej występowaniem miejscowych wyładowań powierzchniowych. Zdaniem autorów takie rozwiązanie skutecznie ograniczyłoby problemy związane z degradacją struktur tekstolitowych powodowaną przepływem dużych prądów wyładowczych, jak też i małych prądów upływu.

Tabela. 1. Zmiany w składzie elementarnym - zawartości pierwiastków wierzchniej warstwy tworzywa tekstolitowego w procentach wagowych, dla kolejnych etapów postępującej degradacji materiału. Dane na podstawie mikroanalizy rentgenowskiej EDS, bez uwzględnienia wodoru

Zaw. wag. pierw. [%]	Stan referenc.	Wstępna degrad.	Słaba degrad.	Wyraźna degrad.	Średnio zaawans.	Mocno zaawans.	Bardzo silna
Węgiel C	76,6	80,0	78,0	76,6	74,1	66,6	68,0
Tlen O	23,4	18,2	18,6	19,0	16,9	17,8	15,5
Krzem Si	-	1,0	1,6	2,4	4,6	7,8	8,4
Wapń Ca	-	0,9	1,0	2,0	2,9	5,5	5,5
Glin Al	-	-	0,5	~1	1,4	2,3	2,6

Autorzy: mgr inż. Hubert Śmietanka, Instytut Energetyki – Instytut Badawczy, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: hubert.smietanka@ien.com.pl; dr hab. Krzysztof Wieczorek – Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27 50-370 Wrocław, E-mail: krzysztof.wieczorek@pwr.wroc.pl; dr hab. Przemysław Ranachowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, E-mail: pranach@ippt.pan.pl; prof. Zbigniew Ranachowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, E-mail: zranach@ippt.pan.pl; mgr inż. Adam Brodecki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, E-mail: abrodec@ippt.pan.pl.

LITERATURA

- [1] Working Group Report, Calculating the lightning performance of distribution lines, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 5, July (1990), 1408-1417
- [2] Anderson E., Przepięcia wewnętrzne w sieciach średnich napięć i ich ograniczanie, Zagadnienia wybrane związane ze sposobem uziemienia punktu zerowego przemysłowych i elektroprzemysłowych sieci 6 kV. *Postępy techniki wysokich napięć*, Zeszyt 22, Instytut Energetyki Warszawa (1997)
- [3] CIGRE Publication no. 544, MO Surge arresters, stress and test procedures, August (2013)
- [4] Chrzan K. L., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław (2003)
- [5] Poradnik ABB Ograniczniki przepięć wysokiego napięcia, poradnik dla kupującego, High-voltage surge arresters, the buyer's guide ABB (2012)
- [6] Korycki P., Zagrożenie pożarem i eksplozją beziskiernikowych ograniczników przepięć (część 1), *elektro.info.pl*, 10/2008, dostępny: <https://www.elektro.info.pl/artukul/instalacjelektroenergetyczne/1477,zagrozenie-pozarem-i-eksplozja-beziskiernikowych-ogranicznikow-przepiec-czesc-1>
- [7] Papiński P., Wańkiewicz J., Ranachowski P., Ranachowski Z., Doświadczenia z eksploatacji wysokonapięciowych liczników zadziałań oraz badania degradacji mikrostruktury pochodzących z nich warystorów ZnO, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94, 10 (2018), 1-7
- [8] Papiński P., Wańkiewicz J., Śmietanka H., Ranachowski P., Ranachowski Z., Kúdela S. Jr, Aleksiejuk M., Comparative studies on degradation of varistors subjected to operation in surge arresters and surge arrester counters, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol.65, No.1 (2020), 367-374
- [9] Papiński P., Ranachowski P., Badania powierzchni elementów wewnętrznych ograniczników przepięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88, 5a (2012), 73-76
- [10] Plesa I., Notingher P.V., Schlögl S., Sumereder Ch., Muhr M., Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications, *Polymers*, 8 (5), 173 (2016), 1-91
- [11] PN-EN ISO2078:2011, Tekstylnia szklane - Nitki – Oznaczenia. Glass textiles - Threads – Markings