

Grzegorz Kondziolka
PPG Polifarb, Cieszyn

POSTĘP W TECHNOLOGII PRODUKCJI LAKIERÓW ELEKTROIZOLACYJNYCH

ADVANCES IN PRODUCTION TECHNOLOGY OF THE ELECTRICAL INSULATING VARNISHES

Streszczenie: Przedstawiono zarys historyczny technologii produkcji syciw oraz lakierów elektroizolacyjnych, postęp ich właściwości wymuszony wzrostem obciążeń maszyn elektrycznych, zmianą wymagań prawnych w zakresie oddziaływania na środowisko, zwiększeniem oczekiwań użytkowników odnośnie wydajności, kosztów impregnacji oraz możliwości eksportu produktów. Omówiono standardy oceny klasy temperaturowej produktów elektroizolacyjnych. Przedstawiono grupy produktów łączących przyjazność dla środowiska z najwyższymi parametrami eksploatacyjnymi.

Abstract: The paper presents the production technology binders and insulating varnishes, the progress of their properties increase in forced load electrical machinery, changing legal requirements in terms of environmental impact, increasing users' expectations regarding the performance, cost impregnation and export opportunities. Discusses evaluation standards temperature class electrical insulation products. It shows a group of products combining environmental friendliness with the highest operating parameters.

Słowa kluczowe: lakiery elektroizolacyjne, technologia produkcji
Keywords: electrical insulating varnishes, production technology

Historycznie elektroizolacyjne lakiery impregnacyjne należy podzielić się na dwie grupy:

Lakiery elektroizolacyjne rozpuszczalniko-
we: Wyroby te stanowią mieszaninę ciekłych żywic poliestrowych, alkidowych, epoxydowych z środkami sieciującymi jak żywice aminowe, fenolowe. Charakterystyczną cechą tych lakierów jest obecność w ich składzie lotnych substancji organicznych (LSO) w ilości ~ 50%, a nawet więcej. Rozpuszczalniki w procesie suszenia lakieru muszą odparować stając się źródłem zanieczyszczenia powietrza, w nowszych instalacjach mogą stać źródłem energii po ich dopaleniu. Klasa temperaturowa tych lakierów to B,F, sporadycznie H. Ich zaletą jest łatwość aplikacji, niska z reguły lepkość, odporność na zanieczyszczenia, bardzo dobra stabilność w czasie przechowywania, dobra elastyczność powłok. Wady to duża emisja LSO, długi czas suszenia, wrzenie w warunkach impregnacji próżniowej. W tej grupie lakierów znajdują się również lakiery wodne, cechujące się niekiedy znakomitymi właściwościami eksploatacyjnymi po ich utwardzeniu, lecz zawsze wymagające zachowania dużego reżimu czystości linii oraz impregnowanych elementów.

Lakiery elektroizolacyjne bezrozs-
zczalniko- nazwę zawdzięczają zastąpieniu typowe-

go rozcieńczalnika wyparowującego w procesie suszenia, rozcieńczalnikiem reaktywnym (RR), wbudowującym się chemicznie w strukturę polimeru w procesie utwardzania lakieru. Ze względu na rodzaj użytego RR lakiery bezrozsztalniko- dzielone bywają na: **lakiery styrenowe** oraz **bezstyrenowe**. W obu przypadkach stanowią one roztwory nienasyconych żywic poliestrowych lub poliestrowo-imidowych w RR. Niezbędnym dodatkowym komponentem tych układów jest inicjator, który może być dodawany przez wytwórcę lakierów – lakiery jednoskładnikowe, lub przez użytkownika – lakiery dwuskładnikowe. Reaktywnym rozpuszczalnikiem w przypadku **bezrozsztalniko-**
czalniko- **wych lakierów styrenowych** jest styren lub nieco cięższe jego pochodne np. winylotoluen. Wobec faktu iż do 20% styrenu zawartego w lakierze uwalnia się do atmosfery w procesie suszenia, klasyfikacja tych produktów jako bezrozsztalniko- jest nadużyciem. Ilość odparowującego w procesie aplikacji lakieru styrenu jest zależna od szybkości narastania temperatury podczas suszenia, stopnia rozwinięcia powierzchni impregnowanego przedmiotu, reaktywności lakieru. W przeciwieństwie do już omówionych, bezrozsztalniko- **lakiery bezstyrenowe** w pełni za-

służą na określenie bezrozpuszczalnikowe. Reaktywnym rozpuszczalnikiem RR w tym przypadku są niskolotne, ciężkie monomery akrylowe, estry kwasu maleinowego, pochodne alkoholu allilowego. Niestety te ostatnie w procesie suszenia emitują toksyczną akroleinę, co nie zmienia faktu iż całkowita emisja LSO z bezstyrenowych lakierów bezrozpuszczalnikowych wynosi zwykle <1% w procesie suszenia lakieru. Odrębną grupę potencjalnie bezrozpuszczalnikowych syciw są **impregnaty epoksydowo-bezwodnikowe**, będące mieszaninami nisko-lepkich żywic epoksydowych z utwardzaczami bezwodnikowymi. Ich aplikacja jest możliwa wyłącznie w instalacjach ciśnieniowo-próżniowych z podgrzewanym autoklawem, zapewniając znakomite wypełnienie uzwojenia syciwem o bardzo dobrej wytrzymałości mechanicznej, odporności chemicznej i cieplnej.

Lakiery styrenowe emitują do 20% wag styrenu, cechują się dużą wrażliwością na warunki przechowywania, są wrażliwe na zanieczyszczenia, niosą z sobą ryzyko niekontrolowanej polimeryzacji, skutkującej nawet utratą instalacji, zwykle wymagają dodawania przed aplikacją inicjatora, manipulowanie którym niesie z sobą ryzyko wybuchu. W zamian wymienionych wad oferują potencjalnie bardzo dużą reaktywność przekładającą się na krótki czas suszenia, niską cenę, dużą siłę wiążącą oraz index TI do 180°C, możliwość uzyskania niskiej lepkości gwarantującej znakomitą penetrację lakieru w głąb uzwojeń.

Wadą lakierów bezstyrenowych jest wysoka cena wynikająca z stosowania unikalnych RR, reaktywność niższa w porównaniu do lakierów styrenowych, lecz dużo większa niż lakierów rozpuszczalnikowych. Zaletą ich jest minimalna emisja LSO najniższa z możliwych do uzyskania <1%, klasa temperaturowa >180°C, bardzo dobra stabilność przechowywania, umiarkowana wrażliwość na zanieczyszczenia, wysoka temperatura zapłonu- likwidacja stref Ex, niskie napięcie powierzchniowe gwarantujące kompatybilność z pozostałymi elementami systemu oraz dobrą penetrację uzwojeń, wysoka siła wiążąca, antyadhezyjna powierzchnia tworzonego filmu, bardzo dobra odporność chemiczna. Lakiery te zwykle dostarczane są w postaci gotowej do użycia niewymagającej żadnych czynności przygotowawczych (za wyjątkiem reaktywnych lakierów do metody kropłowej).

Celem impregnacji uzwojeń maszyn elektrycznych jest ograniczenie oddziaływaniem szeregu niekorzystnych czynników, których źródłem jest praca wykonywana przez urządzenie elektryczne oraz czynniki zewnętrzne. Przepływowi prądu elektrycznego przez uzwojenie w standardowych warunkach towarzyszy wydzielanie ciepła prowadzące do podwyższenia jego temperatury. Uzwojenia narażone są na drgania wywołane pracą pola magnetycznego. Wirniki silników elektrycznych poddawane są działaniu znacznych sił odśrodkowych. Na cewki działają siły bezwładności, naprężenia wewnętrzne. Z zewnątrz wnikają czynniki chemiczne, woda sól, mikroorganizmy żywe. Ograniczeniu negatywnego wpływu na uzwojenie wymienionych narażeń służy ich impregnacja. Celem wykonania impregnacji uzwojeń jest: **Zintensyfikowanie odprowadzania ciepła** z wnętrza uzwojenia: Współczynnik przewodności cieplnej powietrza wynosi 0,003, a lakierów elektroizolacyjnych ok. 0,2 - 0,3, czyli impregnaty przewodzą ciepło ok. 100 razy efektywniej od powietrza. **Mechaniczne wzmocnienie urządzenia**, zapobieżenie przemieszczaniu się uzwojeń pod wpływem: oddziaływania pola magnetycznego, siły odśrodkowej, sił bezwładności, naprężeń zewnętrznych, zmian temperatury. **Ograniczenie penetracji czynników zewnętrznych**, takich jak: alkalia, kwasy, woda, pozostałe czynniki chemiczne rozpuszczalniki, oleje, ograniczenie erozji biologicznej. **Ograniczenie jonizacji gazów** w przestrzeni między przewodami nawojowymi, zastąpienie przestrzeni wypełnionych gazem lakierem elektroizolacyjnym ogranicza występowanie jonizacji i wyładowań niezupełnych. **Poprawa odporności dielektrycznej uzwojenia**: warstwa lakieru elektroizolacyjnego zwiększa grubość izolacji „naprawia” uszkodzenia warstwy izolacji pierwotnej powstałe w trakcie manipulacji przewodem nawojowym. Współcześnie pomimo wielu niedogodności aplikacyjnych dzięki prostocie aplikacji, niskiej cenie, odporności na zanieczyszczenia, w użytku ciągle pozostają lakiery rozpuszczalnikowe, ustępując jednak pola produktom nowocześniejszym spełniającym wzrastające wymogi legislacyjne oraz oczekiwania klientów. Są to dwa główne czynniki wymuszające rozwój lakierów elektroizolacyjnych: Ograniczenie emisji lotnych substancji organicznych (LSO) oraz wzrost parametrów eksploatacyjnych utwardzonych powłok lakierów. Ograniczenie emisji

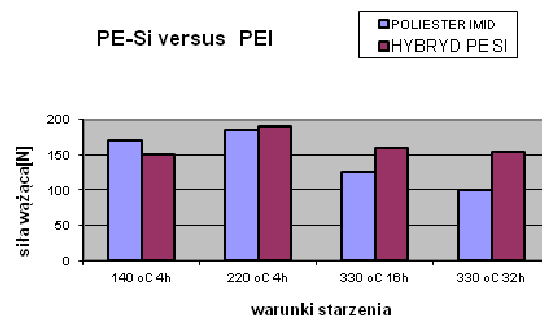
LSO możliwe jest wyłącznie w systemach bez-rozpuszczalnikowych poprzez zastąpienie lekkich monomerów (styren, winylotoluen) trudno-lotnymi, rozpuszczalnikami, jak estry kwasu akrylowego, (akrylany glikoli), estry maleinowe (maleinian dwu butylu); pochodne alkoholu allilowego. Wymienione trudno-lotne związki z powodzeniem zastępują styren w roli rozpuszczalnika nienasyconych żywic poliestrowych lub poliestrowo-imidowych, pozwalając nie tylko wyeliminować emisję LSO lecz również uzyskać wzrost odporności termicznej oraz wytrzymałości mechanicznej (siły wiążącej) lakierów.

Tab. 1. Wybrane właściwości lakierów elektroizolacyjnych na bazie żywicy poliestrowo-imidowej oraz różnych rozpuszczalników [1]

| Rozpuszczalnik | styren | akrylan glikolu diPrOH | maleinian dwubutylu |
|------------------------------------|--------|------------------------|---------------------|
| Temperatura początku rozkładu [°C] | 341 | 352 | 350 |
| Siła wiążąca 20°C [N] | 172 | 188 | 191 |
| Siła wiążąca 180°C [N] | 31 | 42 | 43 |

Wpływ rodzaju reaktywnego rozpuszczalnika na właściwości elektryczne lakierów jest pomijalny. Poliestrowe lub poliestrowo-imidowe żywice rozpuszczone w ciężkich reaktywnych rozpuszczalnikach pozwalają komponować lakiery o niezmiernie szerokich właściwościach aplikacyjnych, dopasowanych do istniejącej linii klienta. Możliwe jest komponowanie jednoskładnikowych, bardzo stabilnych, wysoko lepkich syciw przeznaczonych do impregnacji ciśnieniowo-próżniowej VPI jak i nisko lepkich, bardzo reaktywnych lakierów przeznaczonych do impregnacji kropłowej. W przypadku tych ostatnich możliwe jest osiągnięcie czasu suszenia lakieru poniżej 5 min, co znakomicie wpływa na wydajność linii produkcyjnej. W odróżnieniu od powyższych modyfikacji polegających na zastosowaniu nowocześniejszego rozpuszczalnika reaktywnego (RR), modyfikacje chemiczne bazowej żywicy pozwalają na osiągnięcie głębszego i programowalnego wpływu na poprawę właściwości impregnatów. Zastąpienie żywic poliestrowych, poliestrowo-imidowymi

automatycznie podnosi indeks temperaturowy TI lakieru o 30-50°C. Jeszcze większą odpornością termiczną charakteryzują się lakiery bazujące na żywicach silikonowych. W tym jednakże przypadku znakomite właściwości termiczne, nie rekompensują ich słabych parametrów mechanicznych. Rozwiązaniem okazały się chemiczne hybrydy nienasyconych poliestrów lub poliestroimidów z żywicami silikonowymi, łączące dobre mechaniczne parametry pierwszych z termiczną odpornością tych drugich: Żywice poliestrowo-silikonowe będące rzeczywistymi hybrydami chemicznymi, a nie fizyczną mieszaniną, pozwalają komponować jednoskładnikowe lakiery silikonowe o klasie temperaturowej N-R charakteryzujące się znakomitą zdolnością penetracji uzwojeń oraz kompatybilnością z pozostałymi elementami systemu i jednocześnie dużą siłą wiążącą 140-180 N. Lakiery te cechują się ponadto zdolnością dodatkowego utwardzania, wzmacniania pod wpływem pierwszego udaru termicznego jakiego doznaje zaimpregnowane nimi urządzenie. Kiedy w przypadku konwencjonalnych lakierów i żywic impregnacyjnych w temperaturze około ich klasy temperaturowej rozpoczynają się powolne procesy degradacji spoiny, hybrydy poliestrowo-silikonowe dodatkowo się utwardzają przewyższając wytrzymałością mechaniczną, mocniejsze początkowo żywice tradycyjne [2].



Najwyższy wzrost parametrów odporności termicznej oraz siły wiążącej uzyskuje się poprzez jednoczesne zastosowanie obu modyfikacji: Zastosowanie akrylanów glikoli jako ciężkiego nietlonego rozpuszczalnika reaktywnego modyfikowanych silikonami żywic poliestrowych. Wytrzymałość mechaniczna tych układów dorównuje systemom epoksydowym, znacznie przewyższając je pod względem odporności termicznej. Zastosowanie lakierów bazujących na trudno-lotnych monomerach oraz nowoczes-

nych hybrydowych żywicach pozwala jednocześnie osiągnąć kilka pozytywnych efektów:

- eliminacja emisji lotnych substancji organicznych,
- eliminacja stref zagrożenia wybuchem Ex,
- wzrost wytrzymałości mechanicznej zaimpregnowanych uzwojeń,
- wzrost odporności termicznej uzwojeń,
- uzyskanie znakomitej stabilności w trakcie przechowywania lakieru,
- możliwość dopasowania właściwości impregnatu do indywidualnych wymagań użytkownika.

Literatura

- [1]. Sprawozdanie Instytutu Elektrotechniki we Wrocławiu 504-3236-26-ZM/ML-60/2004.
[2]. Badania własne autora.