

Aleksander BARTOSIK

Grzegorz KAZIMIERSKI

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy  
Przemysłu Urządzeń Klimatyzacyjno-Wentylacyjnych  
i Odpylających  
"BAROWENT"

## DEELEKTRYZACJA LAMINATÓW STOSOWANYCH NA ŁOPATY WENTYLATORÓW OSIOWYCH

**Streszczenie:** W pracy dokonano przeglądu prac, których efektem było opracowanie technologii wytwarzania laminatowych łopat antystatycznych. Opisano własności elektrostatyczne, mechaniczne i chemiczno-warstwowych tworzyw sztucznych nieprzewodzących ładunków elektrycznych i laminatów antystatycznych.

### 1. Wstęp

W produkcji przemysłowej utwardzalne tworzywa sztuczne zbrojone włóknem szklanym pojawiły się ok. 1943 r. /St. Zjednoczone/. W Polsce po licznych próbach laboratoryjnych uruchomiono w roku 1956 produkcję żywic w Instytucie Tworzyw Sztucznych. Następnie w 1960 r. uruchomiono produkcję żywic w Zakładach Chemicznych - Sarzyna. Jednakże poważnym czynnikiem ograniczającym wówczas wykorzystanie laminatów w przemyśle na szerszą skalę był brak krajowego włókna szklanego. Obecnie również nie produkuje się w Polsce włókna szklanego nadającego się do wytwarzania laminatów. Z drugiej strony jednak laminaty epoksydowo-szklane i poliestrowo-szklane cechujące się głównie dużą wytrzymałością przy małym ciężarze właściwym i znaczną odpornością chemiczną, znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle i świadczą o nowoczesności rozwiązań konstrukcyjnych.

### 2. Laminaty

Laminaty to tworzywa sztuczne warstwowe, w których nośnik jest ułożony w postaci równoległych warstw związanych żywicą utwardzalną. Tworzywa te ze względu na dużą wytrzymałość przy niewielkim ciężarze właściwym znajdują coraz szersze zastosowanie dla celów konstrukcyjnych. Ich własności mechaniczne zależą od rodzaju włókna i struktury wzmocnienia, składu spoiwa i jego lepkości. Zależnie od rodzaju żywicy laminaty dzielimy na epoksydowe, poliestrowe, fenolowe i inne. Największe zastosowanie mają obecnie laminaty epoksydowe i poliestrowe wzmocnione włóknem szklanym występującym w postaci różnego rodzaju tkanin, mat i rovingu. Te materiały szklane zbudowane są z elementarnych włókien o średnicy  $\phi$  9  $\mu$ m, nieskręconych, ze szkła niskoalkalicznego, pokrytych odpowiednią, chemicznie czynną

preparacją. Drugim, głównym składnikiem laminatów są żywice cechujące się znaczną adhezją do szkła - pełnią rolę spoiwa włókien szklanych. W kraju 80 % wyrobów jest wytwarzanych metodą laminowania ręcznego - kontaktowego, pozostały procent natomiast - głównie metodą natryskową niskociśnieniową i przez nawijanie.

### 3. Zastosowanie laminatów w budowie wentylatorów

W konstrukcjach wentylatorów zasadniczą rolę spełnia zespół wirujący a w szczególności łopatki koła wirnikowego.

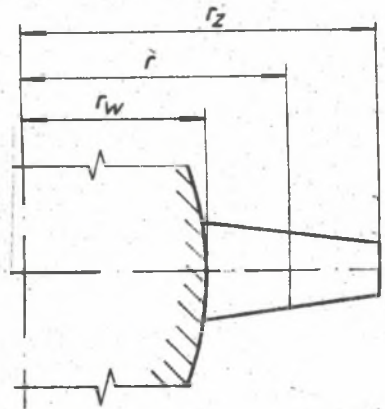
O przydatności laminatów w zastosowaniu na elementy maszyn wirujących decyduje parametr stosunku wytrzymałości na rozciąganie do gęstości. Znaczenie tego parametru wynika z faktu, że wielkość powstających masowych sił odśrodkowych jest ściśle zależna od gęstości materiału.

Zależność ta ujęta jest wzorem:

$$P = \omega^2 g \int_{r_w}^{r_z} F/r dr$$

gdzie:

- P - całkowita siła odśrodkowa,
- $\omega$  - prędkość kątowna,
- F/r/ - pole powierzchni przekroju łopatki na r-tym promieniu.



W celu osiągnięcia dalszego obniżenia masy budowa łopat winna być skrupowa, tzn. wewnątrz łopaty puste lub wypełnione lekkim materiałem np. spienionym poliuretanem.

Dla przykładu masa stosowanych łopat wykonywanych powszechnie ze stopu aluminium /SILUMIN/ jest wyższa ok. 3-5 razy od masy łopat laminatowych.

### 4. Własności elektrostatyczne laminatów

W dotychczas stosowanej technologii wytwarzania łopat laminatowych otrzymywane wyroby nie mogły być zastosowane w wentylatorach pracujących w środowiskach zagrożonych wybuchem gazów i par cieczy palnych.

Widomo bowiem powszechnie, że jedną z wad tworzyw sztucznych jest możliwość gromadzenia się na ich powierzchni elektryczności statycznej. Wynika to z faktu, że stosowane tworzywa - kompozyty są dobrymi izolatorami.

Problem deslektryzacji laminatów na łopaty wentylatorów wywołany został rosnącym zapotrzebowaniem na chłodnice powietrza stosowane głównie w rafineriach ropy, tzn. w tych środowiskach, gdzie stawiane są wyższe wymogi bezpieczeństwa.

Ogólnie uważa się, że oporność powierzchniowa tworzywa sztucznego wynosząca max.  $10^6 \Omega$  wystarczająco zabezpiecza przed gromadzeniem się elektryczności statycznej.

Natomiast laminaty szklano-epoksydowe oraz szklano-poliestrowe posiadają opór powierzchniowy powyżej  $10^6 \Omega$  do  $10^{15} \Omega$ , w zależności od rodzaju żywicy.

Znanych jest kilka metod usuwania elektryczności statycznej.

Jednym z najprostszych i najskuteczniejszych sposobów jest odprowadzanie ładunków na drodze uziemiania tworzywa.

Jest to metoda podwyższania przewodnictwa elektrycznego poprzez zbrojenie tworzywa szt. materiałem o dużej przewodności np. siatką metalową, siatką wykonaną z tkaniny miedzianej czy szklano-miedzianej na osnowie nici nylonowej. Siatka ta właminowana jest w wierzchnią warstwę laminatu /tuż pod powierzchnią cienkiej warstwy żelkotu/.

Inną metodą deelektryzacji tworzyw sztucznych jest zastosowanie środków antyelektrostatycznych, naniesionych powierzchniowo lub wprowadzonych do masy żywicy. Środki te nie mogą powodować zniszczenia struktury sieci.

#### 5. Deelektryzacja laminatów stosowanych na łopaty wentylatorów

Pierwszym etapem stanowiącym punkt wyjścia do prac nad deelektryzacją stosowanego laminatu było wykonanie próbek /technologia ich wykonania odpowiadająca technologii wytwarzania łopat/ i poddanie ich badaniom: oporności powierzchniowej. Przeprowadzono również próby zapalenia mieszaniny wybuchowej wodoru podczas rozładowania naelektryzowanej powierzchni próbki.

Pomiar oporności powierzchniowej próbek z laminatu szklano-epoksydowego polegał na przyłożeniu napięcia w dwóch punktach badanego tworzywa. Pomiar przepływającego prądu oraz wielkość napięcia pozwolił znaleźć rezystancję powierzchniową badanego tworzywa wyliczoną wg wzoru:

$$R_p = \frac{U}{J} - R [k\Omega],$$

gdzie:

U - wartość napięcia pomiarowego	/V/ ,
J - zmierzone natężenie prądu	/mA/ ,
R - wartość rezystancji rezystora ograniczającego	/kΩ/ ,

W wyniku przeprowadzonych badań określono rezystancję powierzchniową laminatu szklano-epoksydowego, która wyniosła  $R_p = 2,22 \cdot 10^{14} \Omega$ .

W celu stwierdzenia, czy ładunki elektrostatyczne utworzone na powierzchni próbek zapalają mieszaninę wybuchową wodoru z powietrzem o koncentracji 22 %  $H_2$ , bombardowano powierzchnię cząstkami rdzy unoszonymi w strumieniu sprężonego powietrza. Wytworzony ładunek elektrostatyczny sprowadzono na elektrody iskiernika wypełnionego

mieszanią wybuchową wodoru. Próbę powtarzano 10-krotnie stwierdzając każdorazowo zapalenie mieszaniny wybuchowej na iskierniku.

W wyniku powyższych badań stwierdzono, że łopatkki wentylatorów wykonane z laminatu epoksydowo-szklanego nie nadają się do stosowania w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem gazów i par cieczy palnych należących do IIIA klasy wybuchowości.

### 5.1. Kompozycja antystatyczna poliestersadza acetylenowa

Najbardziej skuteczną metodą deelektryzacji elementów z tworzyw sztucznych jest nie tyle deelektryzacja powierzchni zewnętrznej, co modyfikacja żywicy w całej ich objętości. Problemami deelektryzacji tworzyw sztucznych od wielu lat zajmuje się Instytut Fizyki Politechniki Gdańskiej, którego pracownicy są autorami wielu patentów z tej dziedziny. W innych opracowali oni sposób deelektryzacji żywicy poliestrowych. Efekt takiej uzyskano dodając do żywicy niewielką ilość sadzy acetylenowej. Kompozyt taki cechuje się przewodnością elektryczną podobną w swym charakterze do przewodności metali. Znamienny dla laminatów otrzymywanych na bazie tego kompozytu jest fakt, że już przy dodaniu 0,4 % sadzy przewodnictwo utwardzonego laminatu poliestrowego wzrasta o kilka rzędów. Tak znaczną zmianę przewodnictwa elektr. przy tak małym dodatku sadzy przypisuje się powstawaniu wiązań chemicznych między cząsteczkami sadzy i makrocząsteczkami polimeru podczas kopolimeryzacji. Wiązania te umożliwiają ruch nośników ładunku wzdłuż fragmentów makrocząsteczek. Ponadto stwierdzono znaczny wpływ warunków kopolimeryzacji, tzn. temperatury i stężenia przyspieszacza /naftianu kobaltu/ na własn. elektryczne tych kompozycji.

Stosowana dla uzyskania antystatycznego kompozytu sadza ma ponadto tę zaletę, że jest całkowicie obojętna wobec stabilizatorów.

W sposobie wytwarzania kompozycji antystatycznych z żywicy poliestrowych istotny jest wpływ zawartości inicjatora i przyspieszacza polimeryzacji na czas żelowania. W charakterze inicjatora użyto nadtlenu metylo-etylowego /ketonox/ ze względu na dużą łatwość mieszania się z żywicami poliestrowymi.

Ciepła żywica poliestrowa charakteryzuje się ponadto znacznym napięciem powierzchniowym. W związku z tym skład warstwy zewnętrznej kompozycji żywica-sadza nie odpowiada składowi całej kompozycji. Zawartość sadzy jest mniejsza na powierzchni niż w głębszych warstwach.

W celu wyeliminowania tego zjawiska do kompozycji dodano parafinę, która w procesie polimeryzacji "wypaca się" na powierzchni tworząc warstwę chroniącą przed działaniem tlenu.

Powoduje to obniżenie napięcia powierzchniowego żywicy, co umożliwia uzyskanie w miarę jednorodnego składu tworzywa.

W procesie wytwarzania kompozycji antystatycznej bardzo ważne jest również dokładne roztrącenie sadzy w masie żywicy.

### 5.2. Własności elektrostatyczne przewodzącej kompozycji antystatycznej

W celu określenia własności elektrostatycznych kompozycji przewodzącej wykonano 2 partie próbek i poddano je badaniom w Instytucie Bezpieczeństwa Górniczego Kop. Doświadczalnej "BARBARA".

Pierwsza partia to próbki powlekane powierzchniowo kompozycją przewodzącą o zawartości sadzy 1 % - 2 %.

Druga partia to próbki całkowicie wykonane z kompozycji przewodzącej o zawartości sadzy - 3 % - 8 %.

Zastosowano sadzę francuską Y-70 oraz sadzę polską o nazwie SAGAL 3. Pomiar rezystancji powierzchniowej i zdolności zapalającej iskrowych wyładowań ładunku elektrostatycznego w mieszaninie wybuchowej przeprowadzone zostały w sposób opisany wcześniej przy omawianiu własności elektr. czystego kompozytu szklano-epoksydowego.

W wyniku badań stwierdzono, że rezystancja powierzchniowa próbek z pierwszej partii wynosi  $5,4 \times 10^6 - 5,3 \times 10^{14} \Omega$ . Natomiast próby zdolności zapalającej iskrowych wyładowań ładunku elektrostatycznego w mieszaninie wybuchowej wodoru wykazały, że przy elektryzowaniu próbek materiału odizolowanych od ziemi następuje każdorazowo zapalenie mieszaniny wybuchowej, a przy uziemionych próbkach zapalenie mieszaniny wybuchowej nastąpiło tylko przy elektryzowaniu próbki o rezystancji  $5,3 \times 10^{14} \Omega$ .

Po badaniach próbek z drugiej partii /zawartość sadzy 3 % - 8 %/ stwierdzono, że próbki te ze względu na własn. elektr. mogą być zaliczone do materiałów elektrostatycznie przewodzących. Były one w bardzo małym stopniu podatne na elektryzację a powstające ładunki elektryczne nie posiadały zdolności zapalania mieszaniny wybuchowej.

Zmierzone wartości rezystancji powierzchniowej i skrośnej były rzędu  $10^3 \Omega$ .

Otrzymane wyniki badań kompozycji poliestrowo-sadza pozwoliły określić skład chemiczny oraz technologię wytwarzania łopat antystatycznych do wentylatorów chłodniczych wykonywanych na bazie żywicy Polimal 109 i sadzy produkcji krajowej SAGAL 3.

Wykonane w oparciu o wyżej przedstawione wyniki łopaty antystatyczne uzyskały pozytywne orzeczenie JBG Kop. "Barbara".

### 6. Własności mechaniczne i odporność chemiczna kompozycji antystatycznej

Po uzyskaniu osłu zasadniczego, jakim było otrzymanie przewodzącego laminatu poliestrowo-szklanego /orzeczenie Instytutu Bezpieczeństwa Górniczego/ należało określić następnie wpływ sadzy na własności mechaniczne i odporność chemiczną laminatu.

6.1. Własności mechaniczne laminatów poliestrowo-szklanych i epoksydowo-szklanych dla zawartości szkła 45 % - 72 % podawane przez literaturę wynoszą:

1. Gęstość  $q = 1500 - 1900 \text{ kg/m}^3$ ,
2. Moduł sprężystości podłużnej  $E = 1600 - 2500 \text{ MPa}$ ,
3. Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 320 - 650 \text{ MPa}$ .

Jednym z etapów bardziej szczegółowego określenia własności mechanicznych laminatów stosowanych na części wentylatorów było opracowanie "Metodyka i wyniki wstępnych badań własności materiałowych powłok laminatowych" autorstwa Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej przy współudziale Zakładu Doświadczalnego Wentylatorów w Chorzowie Śląskim. [5].

Celem tego opracowania było określenie:

- modułu spr. podłużnej  $E$ ,
- modułu spr. poprzecznej  $G$ ,
- wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ ,
- wytrzymałości na skręcanie  $R_s$ ,
- gęstości  $q$ ,

laminatu wykonanego z żywicy epoksydowej EPI-DIAN 53 zbrojonej m.in. innymi tkaniną szklaną STR-47/110. Równocześnie zamiarem autorów było określenie wpływu ilości warstw tkaniny w laminacie na ww. parametry.

Przeprowadzone badania obejmowały próbki o ilości warstw tkaniny szklanej 1-8, co odpowiada stosowanej technologii wytwarzania łopatek wentylatorów.

Uzyskano następujące wyniki:

1. Moduł Younga  $E = 2500 - 5000 \text{ MPa}$ ,
2. Moduł sprężystości poprzecznej  $G = 2000 - 3000 \text{ MPa}$ ,
3. Gęstość  $q = 1100 - 1500 \text{ kg/m}^3$ ,
4. Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 150 - 250 \text{ MPa}$ ,
5. Wytrzymałość na skręcanie  $R_s = 20 - 32 \text{ MPa}$ .

Oceniając otrzymane wyniki autorzy opracowania stwierdzili m.in. następujące:

- wraz ze wzrostem udziału szkła w laminacie wzrasta jego gęstość, zaś własności wytrzymałościowe podwyższają się wraz ze wzrostem zawartości szkła do czasu uzyskania nasycenia optymalnego, później następuje spadek tych własności,
- własności wytrzymałościowe kompozytu żywica - szkło uzyskane w wyniku badań odbiegają od uzyskanych na podstawie obliczeń teoretycznych, co wynika głównie z następujących powodów:
  - włókna szklane mają zawsze pełną ilość karbów i uszkodzeń powierzchni,
  - skłerec polimeryzacji powoduje powstanie w laminacie nieciągłości wynikającej z odrywania się włókien,
  - częste pęknięcie włókien już w czasie formowania laminatu /miejsca skrzyżowań włókien/

- zapowietrzenie materiału w czasie laminowania /większa il. korbów.  
Dla określenia wytrzymałości na rozciąganie antystatycznego laminatu poliestrowo-szklanego wykonano 5-warstwowe próbki i poddano je zrywan-  
niu. Próbki te pod względem składu i technologii wykonania odpowiada-  
ły próbkom przeznaczonym do pomiaru własności elektrostatycznych.  
W wyniku przeprowadzonych badań określono średnią wartość wytrzymałości  
na rozciąganie 5-warstwowego laminatu antystatycznego

$$R_m = 121 \text{ MPa}$$

Porównując otrzymany wynik z danymi literaturowymi stwierdzić można,  
że dodatek sadzy acetylenowej do laminatu poliestrowego wpływa na ob-  
niżenie wytrzymałości na rozciąganie i fakt ten należy uwzględnić przy  
projektowaniu elementów wentylatorów z tworzywa antystatycznego.

## 6.2. Odporność chemiczna laminatów poliestrowo-szklanych

Odporność laminatów poliestrowych na działanie środków chemicznych  
zależy w znacznym stopniu od rodzaju i stężenia substancji agresywnej,  
czasu jej działania i temperatury.

Odporność ta w przypadku laminatów poliestrowych jest dość dobra, jed-  
nak na ogół gorsza od odporności laminatów epoksydowych i zależy głów-  
nie od typu żywicy poliestrowej i budowy laminatu.

Jednym ze sposobów określania odporności chemicznej laminatu jest przy-  
jęcie kryterium spadku wytrzymałości na zginanie laminatu poddanego  
wcześniej działaniu substancji agresywnych chemicznie.

Przyjmuje się przy tym, że spadek wytrzymałości na zginanie  $R_g$ :

- do 30 % - laminat odporny,
- do 50 % - laminat średnio odporny,
- powyżej 50 % - laminat nieodporny.

Odporność chemiczną określoną powyższą metodą szczegółowo ujmuje lite-  
ratura np. [1].

Dla określenia odporności chemicznej kompozycji antystatycznej  
/Polimal 109 + tkanina szklana + sadza acetylenowa - sagal 3/ przepro-  
wadzono badania polegające na zanurzeniu próbek na okres 7 dni w róż-  
nych roztworach czynników chemicznie agresywnych. Badania te przepro-  
wadzono w skali laboratoryjnej na próbkach wykonanych wg normy  
ASTM D 543-43. Temperatura roztworów, w których były zanurzone próbki  
wynosiła 25°C i 40°C.

Próbki umieszczono w następujących środowiskach:

- ług sodowy /1 %, 10 %, 20 %, 30 %/,
- kwas siarkowy /3 %, 10 %, 20 %, 30 %/,
- alkohol etylowy /30 %, 50 %, 95 %/,
- kwas octowy /5 %, 10 %/,
- ksylen,
- woda utleniona /30 %/,
- czterotlenek węgla
- benzyna ekstrakcyjna.

Dla określenia odporności tworzywa na działanie [w środowisk przyjęto kryterium zmiany ciężaru próbki i tak np.

- |                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| - 98 % - 102 % wagi początkowej | - zupełnie odporne, |
| - 90 % - 110 %        "-        | - odporne,          |
| - 85 % - 115 %        "-        | - dost. odporne,    |
| poniżej 85 % lub powyżej 115 %  | - nieodporne.       |

Ponadto uznano, że pojawienie się rozwarstwień, napęczniania, zmiany kształtu i koloru, pęknięć, uznać należy również za oznakę niedostatecznej odporności chemicznej tworzywa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że próbki zanurzone w temp. 25°C były odporne na działanie roztworu kwasu siarkowego, alkoholu etylowego, kwasu octowego i wody utlenionej.

Próbki zanurzone w czynnikach o temp. 40°C okazały się odporne na działanie kwasu siarkowego o stężeniu 3 % i 10 %, alkoholu etylowego /30 %/, wody utlenionej, czterochlorku węgla i benzyny ekstrakcyjnej.

Biorąc jednak pod uwagę fakt, że badania te były prowadzone w skrajnie agresywnych warunkach /7 dni, silne stężenie/ - ich wyniki nie mogą być bezpośrednio odnoszone do zastosowania przemysłowego badanego tworzywa antystatycznego np. do łopat wentylatorów osiowych.

Porównując wyniki przeprowadzonych badań oraz odporność chemiczną laminatów poliestrowo-szklanych bez domieszki sadzy stwierdzić można, że dodatek sadzy nie wpływa negatywnie na odporność chem. laminatu.

## 7. Podsumowanie

Przedstawiliśmy w sposób skrócony przebieg prac, których efektem było uzyskanie antystatycznego tworzywa sztucznego posiadającego dobre własności mechaniczne i odpornego w dużym stopniu na działanie środowisk chemicznie agresywnych.

Opracowana technologia otrzymania laminatów poliestrowo-szklanych stanowiła podstawę rozpoczęcia w naszym Ośrodku prac mających na celu uruchomienie produkcji wentylatorów chłodzonych typu MOH przeznaczonych głównie dla przemysłu rafineryjnego.

Dotychczas tego typu wentylatory były importowane z II obszaru płatniczego /w. innymi Włochy, W. Brytania, Francja, Belgia/.

Pierwsze wentylatory tego typu będą wyprodukowane przez OBR BAROMENT już w 1985 r.



Literatura

1. Kłosowska-Wałkiewicz Z., Królikowski W., Penczek P.: "Żywice i laminaty poliestrowe". NT Warszawa 1969.
2. Schreyer G.: "Konstruowanie z tworzywami sztucznymi". Wydawnictwo Carl Hanser Monachium 1981.
3. Patent PRL nr 121914. "Sposób deelektryzacja żywic poliestrowych".
4. Patent PRL nr 89357. "Sposób wytwarzania masy oporowej".
5. Chmielniak T., Kosman G., Werbowski T.: "Obliczenia wytrzymałościowe łopatek z tworzyw sztucznych do wentylatorów osiowych - etap II". Gliwice 06.1975.
6. Miesięcznik branżowy nr 4/1976. "Polimery - tworzywa wielkocząstkowe".

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Gerard Kosman

Wpłynęło do redakcji, maj 1985 r.

ДЕЛЕКТРИЗАЦИЯ ЛАМИНАТОВ ПРИМЕНЕННЫХ НА ЛОПАТКИ  
ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Р е з ю м е

Представлено обзор работ, которых результатом является разработка технологии изготовления ламинатных антистатических лопастей. Описано электрические, механические и химические свойства пластмасс непроводящих электрических зарядов и антистатических ламинатов.

DE -ELECTRIZATION OF LAMINATED BLADES IN AXIAL FANS

S u m m a r y

The review of various works has led to elaborate the process engineering of laminated antistatic axial fan blades. The electrostatic, mechanical and chemical purposes of laminated plastics undudile as well as antiatatic avre given.