

Joanna IZBICKA¹
Janusz MICHALSKI²

Możliwości zastosowań kompozytów polimerowych w urządzeniach elektroenergetycznych

1. Wstęp

Kompozyty polimerowe, polimery wzmocnione, tworzywa napelnione; laminaty poliestrowe lub epoksydowe, tłoczywa - to różne nazwy nowych materiałów, otrzymywanych nowymi sposobami (technologiami), spełniających coraz lepiej wymagania wielu konstrukcji i urządzeń. Cechy charakterystyczne kompozytów polimerowych to niejednorodność, anizotropia i lepkosprężystość.

Kompozyty polimerowe mają różnorodne właściwości w zależności od:

- postaci wzmocnienia : proszki, włókna ciągle, cięte, maty, tkaniny,
- rodzaju wzmocnienia: włókna szklane, metalowe, organiczne, węglowe, naturalne; (rys.1)
- ilości składników,
- stosunku ilościowego osnowy polimerowej do wzmocnienia/ napelnienia.

Na właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych i mechanizm ich zniszczenia zasadniczy wpływ mają: duża wytrzymałość włókien, sztywność osnowy polimerowej oraz wytrzymałość połączenia między włóknem (napelniaczem) i polimerem.

Często mówi się, że kompozyty są przyszłością i rezerwą rozwijającej się techniki, wobec wymagań coraz lepszych materiałów.

Kompozyty polimerowe stosowane są od ponad 60 lat w różnych konstrukcjach, w różnych gałęziach przemysłu. Samochody, samoloty, maszyny, sprzęt sportowy, zbiorniki paliwowe itp. – to przykłady zastosowań wysokowytrzymałych kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami.

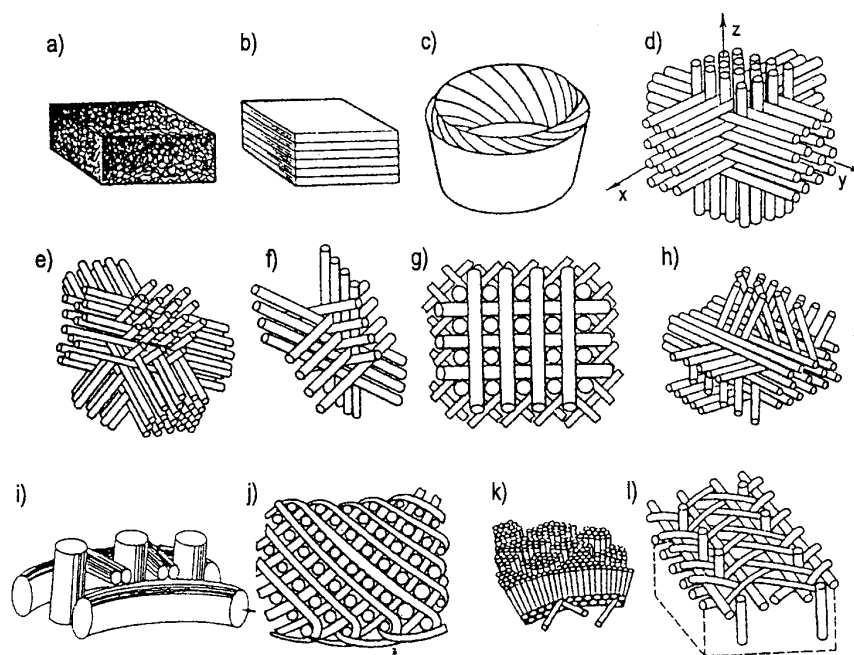
W elektrotechnice, poliestry i epoksydy wzmocnione, znane są od ponad 35 lat, także w Polsce. Podkładki i przekładki izolacyjne, skrzynki i obudowy, elementy silników, wentylatorów, rękojeści narzędzi, zbiorniki, pojemniki, przekładnie sprzętu AGD. Dane z lat 90-tych podają prawie 10% udział wyrobów elektrotechnicznych i elektronicznych w całej przemysłowej produkcji kompozytów poliestrowych w USA (rys. 2).

Kompozyty polimerowe są w większości izolatorami, mają wysoką rezystywność skrośną, dobrą odporność na łuk elektryczny, a ich właściwości zmieniają się w

¹ Instytut Polimerów (PAN filia Szczecin)

² Instytut Elektrotechniki Politechnika Szczecińska

zależności od zastosowanych wzmocnień i/lub napelnaczy. Np. nawet niewielki dodatek włókna węglowego poprawia wskaźniki wytrzymałościowe kompozytu polimerowego a jednocześnie pozwala otrzymać tworzywo o właściwościach antystatycznych lub nawet przewodzących.



Rysunek 1.1. Struktury wzmocnień: a) chaotyczna, b) warstwowa, c) spiralna, d) ortogonalna 3k – w trzech kierunkach, e) 4k, f) 4k, g) 5k, h) 5k, i) promieniowo-obwodowo-wzdłużna, j) wzdłużno-spiralna, k) promieniowo-spiralna, l) osiowo-promieniowo-spiralna [6]

Rys. 1 Struktury wzmocnień

Kompozyty polimerowe są na ogół materiałami jednorodnymi także - anizotropowymi. Oznacza to, że właściwości tych materiałów są różne w różnych kierunkach przyłożonych obciążeń. Stwarza to (prawie) nieograniczone możliwości konstruowania nowych wyrobów (urządzeń) o z góry zaplanowanych właściwościach (rys. 3). Zastosowanie włókna ciągłego (roving, tkaniny) w miejsce włókna ciętego (mata), pozwala otrzymywać kompozyty o 2-3 krotnie wyższych wskaźnikach wytrzymałościowych i prawie 10-krotnie w porównaniu z kompozytami proszkowymi.

Kompozyty zawierające więcej niż jeden rodzaj wzmocnienia nazywamy hybrydowymi. Stosując w kompozycie hybrydowym wybrane rodzaje i postacie wzmocnień, możemy przygotować kompozyt o żądanych/zaplanowanych właściwościach wytrzymałościowych (tab. 1).

Tab.1. Statyczne właściwości mechaniczne kompozytów

Wzmocnienie	wł.węgl. 0/90	Tkanina węglowa	Tkanina aramidowa	Tkanina hybrydowa
Właściwości				
Wytrzymałość na rozciąg.MPa	850	645	490	
Moduł sprężystości GPa	78	68	30	
Odształcenie niszczące ϵ	0,013	0,009	0,0166	0,0096

2. Właściwości kompozytów

Jedną z głównych zalet kompozytów polimerowych jest ich lekkość w porównaniu z metalami i ich stopami.

Różnorodne polimery, żywice chemo- lub termoutwardzalne, czy też termoplasty pozwalają otrzymać materiały o następujących właściwościach:

- odporne na różne czynniki środowiskowe,
- odporne na korozję i gnicie,
- o dobrych właściwościach mechanicznych,
- o małym ciężarze,
- stosunkowo niskiej cenie.

Wyroby z kompozytów polimerowych można otrzymywać na drodze łatwego formowania nawet dużych wyrobów o skomplikowanych kształtach, za pomocą prostego oprzyrządowania a ponadto można regulować właściwości, tak mechaniczne jak i elektryczne w szerokim zakresie, w zależności od ściśle określonych wymagań.

Ciężar właściwy kompozytów polimerowych to 1,5 do 1,9 g/cm³ podczas gdy stal to 8,0 g/cm³; przy wytrzymałości porównywalnej z wytrzymałością stali konstrukcyjnej.

Stosowane krajowe żywice poliestrowe – np. *Polimal*, dostępne są w kilkunastu rodzajach, do różnych zastosowań:

- konstrukcyjne, ogólnego przeznaczenia,
- tiksotropowe,
- elastyczne o zwiększonej udarności,
- chemoodporne,
- samogasnące.

Dobre właściwości dielektryczne, pozwalają stosować je jako materiały elektrotechniczne, jako dielektryczne materiały elektroizolacyjne. Charakteryzują się bowiem rezystywnością właściwą w granicach $10^{11} \div 10^{17} \Omega$, co odpowiada poziomowi rezystywności właściwej miki (średnio $10^{14} \Omega$), zaliczanej do bardzo dobrych materiałów elektroizolacyjnych [2]. Podstawowe właściwości dielektryczne krajowych żywic typu *Polimal* przedstawiono w tab.2.

Przykładowe wskaźniki wytrzymałościowe kompozytów o 50% zawartości (wagowej) włókna pokazują, jakiej klasy to materiały.

Trwałość zmęczeniowa kompozytów poliestrowo-szklanych lub poliestrowo-węglowych wynosi 10 milionów cykli zarówno przy rozciąganiu, ścisaniu, jak i zginaniu. Udarność kompozytów epoksydowo-szklanych 2-3 krotnie większa niż udarność stali, a epoksydowo-keklarowych 10-15 krotnie większa (rys. 5).

Wytrzymałość na zginanie 175- 250 MPa.

Wytrzymałość na rozciąganie 850 do 2100 MPa wzdłuż włókien, 90 MPa poprzecznie.

W przypadku konieczności wykonywania kompozytów w postaci płyt o większej grubości często wykonuje się laminaty tzw. przekładkowe (ang. sandwich), które składają się z dwóch zewnętrznych okładek laminatów o małej grubości i lekkiej przekładki (pianka, plaster miodu, recyklat) w środku.

Przekładka, mimo małej wytrzymałości zapewnia laminatowi wysoką sztywność i pozwala wykonywać wyroby o znacznej grubości przy niewielkim zużyciu laminatu polimerowego z wzmocnieniem włóknistym.

W zakresie częstotliwości $10^3 \div 10^5$ współczynnik strat dielektrycznych $\tan \delta$ żywicy *Polimal 109*, w temp. 20^0 C , wykazuje charakterystyczne minimum wartości, dla częstotliwości 10^7 Hz wartość jego wzrasta do ok. $5 \cdot 10^{-3}$; podwyższanie temperatury

powoduje zwiększenie wartości współczynnika strat. Przenikalność dielektryczna ϵ , badana przy różnych częstotliwościach i temperaturach oraz po długotrwałej próbie wilgoci, wykazuje bardzo podobny charakter przebiegu zmian; wartości przenikalności mieszczą się w granicach $4 \div 7,5$. We wszystkich badanych przypadkach, minimum wartości przenikalności znajduje się przy częstotliwości około 10^5 Hz . Rezystywność skrośna w normalnych warunkach atmosferycznych utrzymuje się powyżej $10^{14} [\Omega \cdot \text{cm}]$, ze wzrostem temperatury jej wartości maleją, natomiast po długotrwałej próbie wilgoci nie wykazuje większych zmian. Wartość wskaźnika odporności na prądy pełzające (WOPP,CTI) utrzymuje się na poziomie 500 V, co czyni z tych żywic interesujący materiał elektroizolacyjny, podatny na dalsze modyfikacje.

Do wzmocniania tworzyw sztucznych stosowanych jest szereg włókien, o różnym charakterze chemicznym i różnym pochodzeniu. W początkowym okresie rozwoju tworzyw wzmocnionych stosowane były włókna szklane, niektóre włókna organiczne naturalne (sizal, juta), włókna azbestowe, próbowano również stosować włókna stalowe [3]. Napełniacze włókniste mogą mieć postać włókien ciągłych, ciętych, tkanin i mat o różnej budowie oraz linek. Ich wspólną cechą jest wielokrotnie większa długość w stosunku do grubości. Włókna stosuje się bez apretury lub z apreturą a niekiedy też z impregnatami, modyfikującymi powierzchnię w sposób ułatwiający adsorpcję polimeru i reakcje chemiczne między napełniaczem włóknistym a matrycą polimerową [4].

Zastosowanie różnego rodzaju włókien pozwala na dowolne optymalizowanie sztywności i twardości kompozytu w celu otrzymania z góry zadanych właściwości, co można osiągnąć przez zastosowanie odpowiedniej kombinacji włókien węglowych i szklanych [4,5], których udział, jako materiału wzmacniającego, może dochodzić do 68 % [6].

Tablica 2. Podstawowe właściwości dielektryczne żywic Polimal ogólnego przeznaczenia I 2 I

Właściwości Dielektryczne	Polimal			
	100	103	108	109
Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg } \delta$	0,008	0,0057	0,005	0,005
Rezystywność powierzchniowa [Ω]	$1 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$
Rezystywność skrośna [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$
Wytrzymałość dielektryczna [kV/mm]	19	19	19	17,5

Wytrzymałość długotrwała kompozytów polimerowych (należących do grupy materiałów lepkosprężystych) zależy od czasu obciążenia i zmian temperatury. Nasze badania z lat 80-tych wykazały odporność na zmienne obciążenia zginające (kompozytów ze wzmocnieniem hybrydowym WS + WW + WAramid.) do 70 tys. cykli. Woda (o temp. pokojowej) obniżała bardzo nieznacznie właściwości kompozytów w czasie ich 9 miesięcznego sezonowania. Spadek wytrzymałości na rozciąganie, zginanie, udarność wyniósł ok. 3-5% wytrzymałości pierwotnej [7].

Pracujące w różnych warunkach rurociągi, zbiorniki z PWS tracą 10-12% wytrzymałości pierwotnej w ciągu 15 –20 lat eksploatacji. Stosowane do najbardziej agresywnych środowisk, różnorodnych substancji chemicznych, po 20-25 latach są nadal w dobrej kondycji. Znany jest przypadek okrętów wojennych (produkowanych jeszcze w latach 80-tych także w Gdyni i Ustce) z PWS, które po 30-latach pływania w wodzie morskiej, w różnych temperaturach, służyły jako cel w ćwiczeniach artyleryjskich na morzu, bo choć jeszcze sprawne, traciły założone przy budowie okresy użyteczności. Podobnie sprawa ma się ze zbiornikami nawijanymi produkowanymi od 1971r w Toruniu. Wiele z nich nadal nie wykazuje znaczącego obniżenia właściwości, mimo stosowania ich w przemyśle chemicznym, papierniczym, do przechowywania najbardziej agresywnych substancji, paliw. Każdy, kto spotkał się z metalowym i kompozytowym urządzeniem, po działaniu kwasu lub zasady, nie ma wątpliwości co do długotrwałej odporności wzmocnionych kompozytów polimerowych na chemikalia i podwyższone temperatury.

3. Wyroby o właściwościach antyelektrostatycznych

Wiele polimerowych związków z racji swojej budowy i wynikających z tej budowy określonych wartości stałej dielektrycznej i rezystywności skrośnej, ma tendencję do gromadzenia na swojej powierzchni ładunków elektrycznych, co w efekcie powoduje łatwą elektryzację materiału. W praktyce materiały takie nie nadają się do zastosowania wszędzie tam, gdzie mogą mieć kontakt z materiałami łatwopalnymi. Wyklucza to wykorzystanie takich materiałów w takich zastosowaniach, w których inne właściwości są bardzo pożądane [7].

Dodawane do tworzyw sztucznych środki antyelektrostatyczne stanowią ważną grupę środków, przyczyniających się do poszerzenia zakresu ich stosowania. Duża rezystywność powierzchniowa i skrośna utwardzalnych kompozycji poliestrowych (rzędu odpowiednio - 10^{17} [Ω] i 10^{18} [$\Omega \cdot \text{cm}$]) powoduje gromadzenie się ładunku elektrycznego na powierzchni kompozytu, co może doprowadzić w sprzyjających warunkach do wyładowania iskrowego o napięciu nawet do kilkunastu tysięcy voltów; konsekwencją takiego wyładowania jest zapłon gazów palnych i/lub pyłów na powierzchni kompozytu, mogący doprowadzić do rozprzestrzenienia się ognia oraz do wybuchu [8].

Uzyskanie kompozytów o zwiększonym przewodnictwie elektrycznym uzyskuje się przez:

- użycie polimerów o specyficznej budowie chemicznej, które przewodzą prąd elektryczny (np. jonomery),
- wprowadzenie do elektroizolacyjnej matrycy polimerowej rozdrobnionych napełniaczy przewodzących,
- naniesienie na gotowy wyrób elementu konstrukcyjnego warstwy przewodzącej,
- użycie antyelektrostatyków wewnętrznych i / lub zewnętrznych [9].

Wśród napełniaczy przewodzących, ważną grupę stanowią napełniacze metaliczne takie, jak: płatki aluminiowe, metalizowane włókna szklane, włókna stalowe, posrebrzane kulki szklane, itp. Do tej samej grupy napełniaczy przewodzących należą również środki, zmniejszające rezystywność kompozytów takie, jak: różne rodzaje sadzy przewodzącej, grafit, włókna węglowe i grafitowe. Odpowiedni dobór napełniaczy przewodzących i ich odpowiednia ilość pozwalają optymalizować koszty, w celu uzyskania kompozytów o bardzo zróżnicowanym zakresie rezystywności oraz właściwości mechanicznych. W przypadku niepożądanego zjawiska gromadzenia się ładunku elektrostatycznego na powierzchni tworzywa, można tak dobrać odpowiednią ilość i rodzaj wypełniaczy, aby obniżyć rezystywność kompozytu nawet do wartości 10^5 [Ω], czyli otrzymać tworzywa antyelektrostatyczne [4,10]. Można tak dobrać rodzaje oraz ilości napełniaczy, aby zgodnie z [13] otrzymać tworzywa:

- elektroizolacyjne, gdzie $R_s > 10^9$ [Ω],
- antyelektrostatyczne, gdzie 10^6 [Ω] $< R_s \leq 10^9$ [Ω],
- elektroprzewodzące, gdzie $R_s \leq 10^6$ [Ω] [9].

Ostatnie lata to ekspansja tworzyw PWS do zastosowań w elektrotechnice i energetyce, głównie do wyrobu rozdzielnic [14], ze względu na:

- dobre parametry dielektryczne,
- możliwość tworzenia obudów na zamówienie w konkretnych, ściśle określonych gabarytach,
- brak zjawiska korozji, co powoduje
- gwałtowny spadek ilości wypadków przy montażu, kontroli bądź naprawie urządzeń, zamontowanych w obudowach z PWS, z czego część decydentów jeszcze sobie nie zdaje sprawy.

Kompozyty polimerowe dają szansę obniżenia ciężaru urządzeń np. trakcji kolejowej, poprzez zmniejszenie masy elementów i wyrobów elektro-energetycznych; możliwość wyeliminowania gabarytowo dużych i ciężkich wyrobów porcelanowych (izolatory) oraz metalowych (łączniki).

Rachunek ekonomiczny wymusi na producentach wdrażanie nowych opracowań, w tym również tworzywo o właściwościach antyelektrostatycznych i elektroprzewodzących, co doprowadzi w niedługim czasie do całego szeregu zmian konstrukcji energetycznych, mechanicznych, nośnych itp.

4. Literatura

- [1] Królikowski W. - *Żywice i laminaty poliestrowe*. WNT, W-wa 1986 (II wyd)
- [2] Izbicka J., Michalski J., NOE, Zakopane 1999
- [3] Królikowski W. - *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające*. Wyd. PS Szczecin 1984
- [4] Izbicka J. - *Kompozyty hybrydowe*. Mat. konf. Ogólnopolskiej Szkoły Kompozytów „Podstawy Mechaniki Kompozytów Polimerowych”, Szklarska Poręba 1997, wyd. Pol. Warszawskiej 1998
- [5] Partridge I.K. - *Advanced composites*. Elsevier Applied Science, London 1989
- [6] Vasilew V.V., Tarnopolski J.M. i in. – *Kompozycjonnyje Materiały*, Moskwa, Masinostrojenie 1990.
- [7] Mallick P.K. (wyd.) – *Composites engineering handbook*, N.York, Basel, 1997
- [8] Patent RP 160452 (1990,1993), Politechnika Szczecińska
- [9] Stańkowska-Walczak D. - *Kompozyty poliestrowe przewodzące prąd elektryczny*. Praca doktorska Szczecin, 1991
- [10] Izbicka J., Żurawczyk P. - *Kompozyty poliestrowe o właściwościach antyelektrostatycznych*. Dokumentacja Techniczna Inst. Polimerów Pol. Szczecińskiej dla Nordcap Plastic Gdańsk, 1988
- [11] Ochelski S.-*Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*. WNT, 2004.
- [12] Gipple K.L., Hoyns D., Measurements of the out-of-plane shear .J.Comp.Mater. 6. 1994.
- [13] PN-92/E – 05203 – Ochrona przed elektrycznością statyczną. Materiały i wyroby stosowane w obiektach oraz strefach zagrożonych wybuchem. Metody badania oporu elektrycznego właściwego i oporu upływu.
- [14] Balski L., Michalski J., Nawos-Wysocki L., - *Badania środowiskowe niepełne skrzynki – złącza pomiarowo – bezpiecznikowego typu ZPB-1*. Dokumentacja Techniczna DT 042-7981/6-6-2-35 dla Polimat – Nowogard, 1997

II. Zastosowanie kompozytów poliestrowych wzmocnionych włóknami szklanymi w różnych gałęziach przemysłu w USA w 1990r, w mln ton, wg I7I.

Transport lądowy 319,3 (27,4 %); Konstrukcje 211,9 (18,2 %); Przemysł morski 170 (14,6 %)

Farby i lakiery 158,5 (15,5 %); Elektrotechnika i elektronika 109,2 (9,3 %);

Wyposażenie biur 69,1 (5,9 %); Produkty konsumentów 75,0 (6,4 %);

Lotnictwo i astronautyka 17,6 (1,5 %); inne 35,8 (3,1 %)

III. $\varphi = 0^\circ$ $E = 16,4$ GPa $R_g = 263$ MPa $\varepsilon = 0,021$

$\varphi = 90^\circ$ $E = 13,45$ GPa $R_g = 232$ MPa $\varepsilon = 0,0218$

$\varphi = 45^\circ$ $E = 7,72$ GPa $R_g = 175$ MPa $\varepsilon = 0,032$

Wyniki badań kompozytów poliestrowo-szklanych zginanych wg [11]

V. kompozyt wł.szkłane/epoksyd a/ jednokierunkowy (0) $\tau = 39,75$ MPa, $G = 7,05$ GPa

b/ krzyżowy (0, 90) $\tau = 90,89$ MPa $G = 6,38$ GPa

kompozyt wł.węgl./ epoksyd a/ 32,45 ,, 3,14 ,,

b/ 91,37 ,, 3,91 ,,

Wyniki wytrzymałości i modułu poprzecznego
