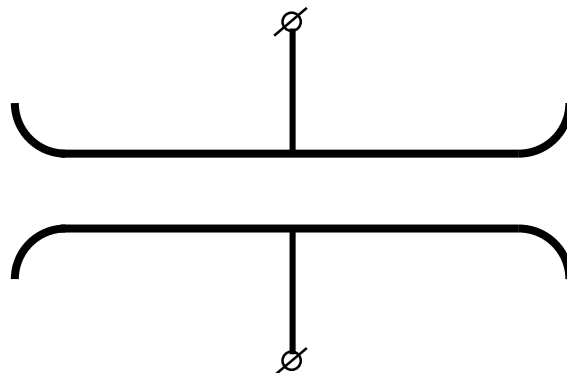


MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE - PODZIAŁ

DIELEKTRYKI GAZOWE

- w układach izolacyjnych wielu urządzeń elektrycznych
- współpracują z elementami izolacyjnymi z materiałów stałych
- stosowane dielektryki gazowe są jedno- lub wieloskładnikowe
- rezystywność $\rho = 10^{17} \dots 10^{18} \Omega\text{m}$
- praktycznie pomijalna stratność $\text{tg} \delta = 10^{-8} \dots 10^{-7}$
- przenikalność elektryczna powietrza $\epsilon_r = 1,00059$
- różnią się wytrzymałością elektryczną
- miara wytrzymałości elektrycznej gazu - napięcie przeskoku iskry między równoległymi elektrodami płaskimi o odstępnie 1 cm



Powietrze atmosferyczne

- 78 % N₂, 21 % O₂, 1 % CO₂ + H₂ + gazy szlachetne
- $p_n = 1013 \text{ hPa}$, $T_n = 293 \text{ K}$ i $w_n = 8,5 \text{ g}$ wody w 1 m^3 powietrza
- gęstość powietrza $1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- wytrzymałość elektryczna $\cong 32 \text{ kV}$ (elektrody płaskie, odstęp 1 cm)
- istotne czynniki: zanieczyszczenia, mgła, deszcz, śnieg, grad

Wydzielone składniki powietrza

azot N₂

- niepalny, nietoksyczny, tani, obojętny (do około 60 °C)
- własności elektryczne zbliżone do własności powietrza
- stosowany pod ciśnieniem do kilkunastu atmosfer

Gazy syntetyczne

sześćciofluorek siarki (SF_6)

- bezbarwny, bezwonny, niepalny i nietoksyczny
- chemicznie obojętny i trwały do temperatury prawie 800 K
- gęstość pięciokrotnie większa niż powietrza
- najważniejsza własność - elektryczność
- wytrzymałość elektryczna 89 kV (elektrody płaskie, odstęp 1 cm)
- temperatura skraplania $-63\text{ }^\circ\text{C}$
- izolacja urządzeń WN: kable, transformatory, łączniki, kompletne rozdzielnice elektroenergetyczne

DIELEKTRYKI CIEKŁE

Oleje mineralne

- otrzymuje się z wybranych gatunków ropy naftowej
- destylacja frakcyjna ropy
- od 8 do 12 atomów węgla w cząsteczkach węglowodorów
- rafinacja olejów - reagenty (H_2SO_4) wiążą niepożądane składniki
- oczyszczane z reagentów i produktów rafinacji - ługowanie, przemywanie wodą, filtrowanie
- oleje mineralne (ciecze izolacyjne) - mieszanina węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych
- np.: 45 % parafinowych, 50 % naftenowych i 5 % aromatycznych
- parafinowe - proste łańcuchy węglowe, C_nH_{2n} ($n = 8...12$)
- naftenowe - pierścieniowe, np. dekalina, $\text{C}_{10}\text{H}_{18}$
- aromatyczne - pierścieniowe - pochodne benzenu

podstawowe parametry elektryczne olejów mineralnych:

- $\rho = 10^8 \dots 10^{12} \Omega\text{m}$
- $\varepsilon_r = 2,1 \dots 2,5$
- $\text{tg} \delta = 0,001 \dots 0,01$
- $U_p = 100 \dots 150 \text{ kV}$ (elektrody płaskie w odległości 1 cm)

Oleje syntetyczne

- chlorowane dwufenyle (wycofywane z eksploatacji)
- oleje silikonowe (mieszanki krzemowodorów)
- trudniej zapalne niż oleje mineralne
- wysoka wytrzymałość cieplna (do 200 °C)
- niska temperatura krzepnięcia (do -90 °C)
- nieco mniejsza wytrzymałość elektryczną niż oleje mineralne
- rzadko stosowane - wysoka cena

inne syntetyczne ciecze izolacyjne (o niewielkim zastosowaniu)

- syntetyczne węglowodory aromatyczne
 - mała wartość stratności ($\operatorname{tg} \delta \cong 10^{-4}$)
- estry
 - stosunkowo duża przenikalność elektryczna ($\epsilon_r = 3 \dots 6$)

DIELEKTRYKI STAŁE NIEORGANICZNE

Materiały stapiane (szkła)

- podział szkieł (skład chemiczny - temperatura mięknięcia)
 - składniki szklotwórcze i modyfikujące
- 1) szkło o bardzo niskiej temperaturze mięknięcia $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
np. szkło ołowiowo-borowe (90 % PbO , 10 % B_2O_3)
szkliwo wiążące, spoiwo do innych szkieł
 - 2) szkło miękkie ołowiowo-krzemowe, temp. mięk. $< 550\text{ }^{\circ}\text{C}$
izolatory, części konstrukcyjne elektrycznych źródeł światła
 - 3) szkło miękkie wapniowo-alkaliczne, temp. mięk. $550\text{...}700\text{ }^{\circ}\text{C}$
(składniki podstawowe: 70 % SiO_2 , 16 % Na_2O , 6 % CaO)
żarówki, świetlówki i klosze lamp
 - 4) szkło półtwarde borowo-krzemowe, temp. mięk. $700\text{...}750\text{ }^{\circ}\text{C}$
(20 % B_2O_3 , 73 % SiO_2), mała stratność elektryczna, mała rozszerzalność cieplna, elementy izolacyjno-konstrukcyjne urządzeń w.cz., na szczelne połączenia z metalami

- 5) szkło twarde glinowo-borowo-krzemowe, temp. mięk. 750...950 °C
(20 % Al_2O_3 , 9 % B_2O_3 , 56 % SiO_2)
złącza z metalami, elementy odporne na zmiany temperatury
- 6) szkło kwarcowe (minimum 96 % SiO_2) i kwarc topiony
temp. mięk. do 1660 °C, elementy o małej stratności elektrycznej
i dużej wytrzymałości mechanicznej

włókno szklane

- zawiera około 54 % SiO_2 i mniej niż 0,8 % tlenków alkalicznych
- wytrzymałość mechaniczna większa niż większości włókien naturalnych i syntetycznych
- współczynnik wydłużalności cieplnej, około $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- rodzaje włókien szklanych:
 - ultracienkie o średnicy mniejszej od 1 μm
 - mikronowe o średnicy od 1 do 3 μm
 - normalne o średnicy od 3 do 9 μm
 - roving o średnicy od 9 do 12 μm

zastosowanie włókna szklanego:

- oploty izolacyjne drutów nawojowych
- materiały tkane o różnej jakości i grubości (jedwab szklany, tkaniny szklane, maty szklane), składnik:
 - materiałów izolacyjnych złożonych, tzw. laminatów
 - izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych

parametry elektryczne szkieł (wartości orientacyjne):

- $\varepsilon_r > 3,9$ (dla szkieł ołowiowych $\varepsilon_r = 16,5$)
- $\operatorname{tg} \delta$ dochodzi do 0,1 (czysty kwarc $\operatorname{tg} \delta = 0,0001$)
- $\rho_v = 10^8 \Omega\text{m}$ dla szkieł alkalicznych
- $\rho_v = 10^{18} \Omega\text{m}$ dla czystego kwarcu

Materiały wypalane (ceramika)

- bogaty zbiór materiałów o różnorodnych właściwościach
- osiem grup materiałów ceramicznych:
 - porcelana elektrotechniczna
kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), krzemionka (SiO_2)
i skaleń ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$)
 - ceramika steatytowa - talk ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
 - ceramika kondensatorowa - $\epsilon_r = 10$ do 160
 - ceramika kordierytowa i celsjanowa - łuko- i żaroodporna
 - ceramika porowata - materiały szamotowe
 - ceramika alundowa - 90...98 % Al_2O_3
 - ceramika korundowa - Al_2O_3 powyżej 98 %
 - ceramika tlenkowa - BeO , MgO , ZrO_2

Mika

- nieorganiczny materiał kopalny o strukturze warstwowej
- mika potasowa, *muskowit*, $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- mika magnezowa, *flogopit*, $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- muskowit - lepszy: $\rho_v \cong 10^{14} \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r \cong 7$, $\text{tg} \delta \cong 0,0004$
- E_p muskowitu około $1300 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ (płytką o grubości 0,05 mm)
- wydobywa się metodami górniczymi w postaci bloków
- oczyszczanie i dzielenie na płytki o grubości od 0,05 do 0,17 mm
- dalszy podział - mika łuszczona
- najcieńsze uzyskiwane płytki miki mają grubość około $0,2 \mu\text{m}$
- odpad po oczyszczeniu stanowi 90 % materiału wyjściowego
- *mika syntetyczna* (fluoroflogopit) $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{F}_2$
- mikę syntetyczną wytapia się w piecach elektrycznych

DIELEKTRYKI STAŁE ORGANICZNE

Materiały łatwo topliwe

- trzy podgrupy:
 - żywice
 - asfalty
 - woski
- większość materiałów jest pochodzenia naturalnego
- modyfikacja chemiczna materiałów naturalnych
- temperatura mięknięcia: kilkadziesiąt - sto kilkadziesiąt stopni Celsjusza
- materiały hydrofobowe (duża rezystywność powierzchniowa)
- duża plastyczność większości materiałów

Niskotopliwe żywice naturalne i syntetyczne

kalafonia - naturalna żywica pochodzenia roślinnego uzyskiwana w procesie destylacji frakcyjnej żywicy sosnowej

kopale - naturalne żywice uzyskiwane z pewnych gatunków drzew

szelak - żywica naturalna pochodzenia zwierzęcego

żywice syntetyczne - wielkocząsteczkowe produkty polimeryzacji różnych związków organicznych

Asfalty naturalne, ponaftowe i węglowe

asfalty naturalne - mieszanina węglowodorów z dodatkiem siarki, tlenu i azotu - materiały kopalne

asfalty ponaftowe - asfalty sztuczne - pozostałość po destylacji ropy naftowej bezparafinowej

asfalty węglowe - najcięższe frakcje suchej destylacji węgla

Woski

parafina - z ropy naftowej parafinowej, C_nH_{2n+2} n około 30

cerezyna - podobna do parafiny - z ozokerytu (wosku ziemnego)

wosk karnauba - z liści rosnącej w Brazylii palmy Carnauba

woskol - wosk syntetyczny - produkt chlorowania naftalenu ($C_{10}H_8$)

Materiały włókniste

- materiały naturalne pochodzenia roślinnego
- materiały sztuczne (materiały roślinne przetworzone chemicznie)
- materiały naturalne pochodzenia zwierzęcego
- materiały syntetyczne (otrzymane z żywic syntetycznych)

Materiały naturalne pochodzenia roślinnego

- podstawowy składnik: celuloza ($C_6H_{10}O_5$)_n
- surowiec: drewno (bibułki, papiery, preszpany), bawełna, len, konopie i juta

bibułka celulozowa - najcieńszy wyrób papierowy

papier izolacyjny - grubość rzędu 0,05...0,1 mm

preszpan - twardy (zwykły), miękki (formowalny)

sznury, taśmy, tkaniny - z bawełny, lnu, konopi i juty

Materiały roślinne przetworzone chemicznie

bawełna acetylowana (kotopa) - otrzymywanie: reakcja zawartego w celulozie błonnika z chlorkiem kwasu octowego

jedwab octanowy - produkt przeróbki chemicznej celulozy

jedwab wiskozowy - produkt przeróbki chemicznej celulozy

Materiały naturalne pochodzenia zwierzęcego

jedwab naturalny - dobre własności izolacyjne i mechaniczne

Materiały syntetyczne

włókna poliamidowe (nylon, stylon, kapron, perlon) - dobre własności izolacyjne i duża wytrzymałość mechaniczna

Elastomery (gumy)

- polimery organiczne
- cząsteczki mają kształt spiralny lub zygzakowaty
- surowiec: kauczuki naturalne i syntetyczne
- wulkanizacja - sieciowanie (wiązania międzyatomowe poprzeczne)
- odkształcenie elastyczne w granicach 100...1000 %

kauczuk butadienowy - najbardziej rozpowszechniony - produkt polimeryzacji butadienu (C_4H_6)

kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy - produkt kopolimeryzacji butadienu i akrylonitrylu

kauczuk butadienowo-styrenowy - produkt kopolimeryzacji butadienu i styrenu (C_8H_8)

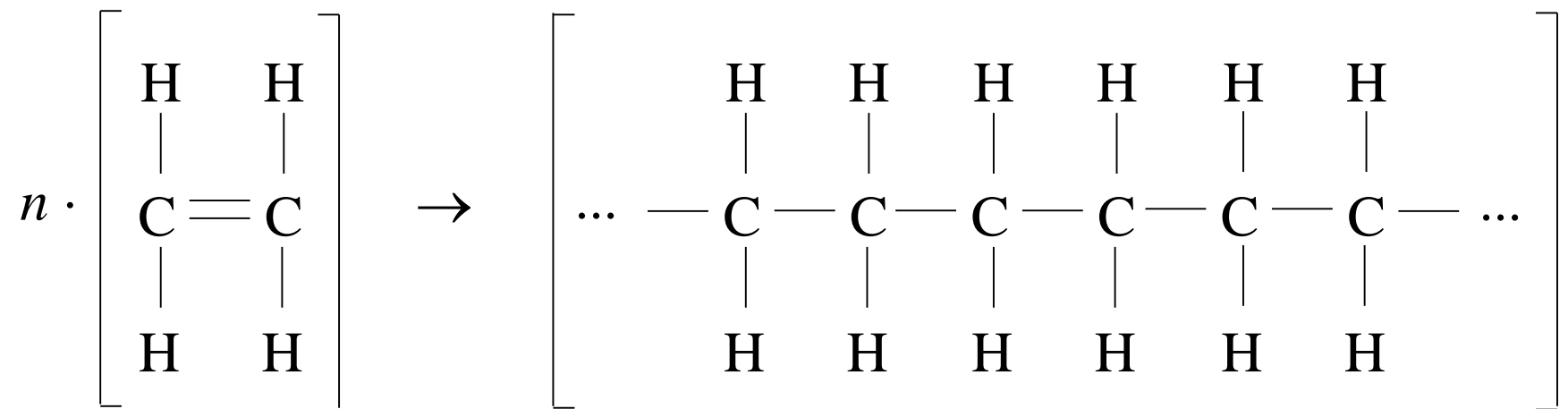
kauczuk butylowy - produkt kopolimeryzacji izobutyleny (C_4H_8) i izoprenu (C_5H_8)

kauczuk silikonowy - łańcuch cząsteczek z połączonych na przemian atomów krzemu i tlenu

Termoplasty

- materiały syntetyczne składające się z polimerów organicznych
- cząsteczki mają najczęściej kształt liniowy niekiedy rozgałęziony
- makrocząsteczki powiązane słabymi wiązaniami międzycząsteczkowymi
- możliwości wielokrotnego topienia lub zmiękczenia
- należą do najlepszych materiałów izolacyjnych
- $\rho_v = 10^{16} \Omega\text{m}$, $\text{tg } \delta = 0,0001$ (polietylen, polipropylen)
- $\epsilon_r \cong 2,2 \dots 2,7$
- E_p do $1000 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ (warstwa około 0,1 mm)
- łatwe formowanie przez: wtryskiwanie, wytłaczanie, wyciąganie, prasowanie, odlewanie
- proces sieciowania - połączenie wiązaniami międzyatomowymi makrocząsteczek metodą chemiczną lub przez napromieniowanie
- większa wytrzymałość mechaniczna, odporność cieplna i odporność na starzenie

polietylen (PE)



- polimeryzacja etylenu:

- metoda wysokociśnieniowa - PE o gęstości (0,91...0,92 g·cm⁻³)

- metoda średniociśnieniowa - PE o gęstości 0,93...0,94 g·cm⁻³

- metoda niskociśnieniowa - PE o gęstości i 0,95...0,96 g·cm⁻³

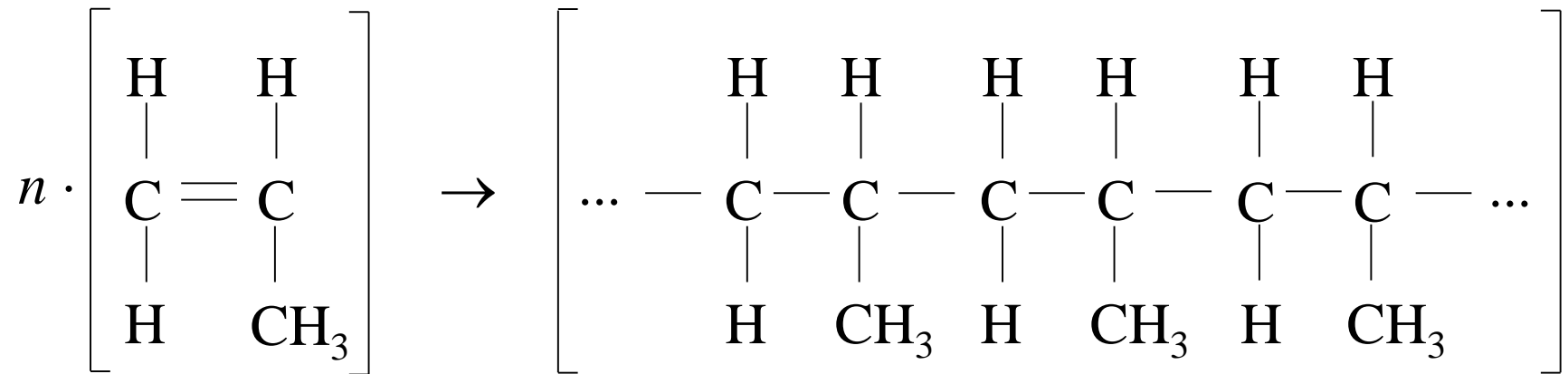
- krystality i sferolity - udział objętościowy 40...95 %

- polietylen o małej gęstości usieciowany (XLPE)

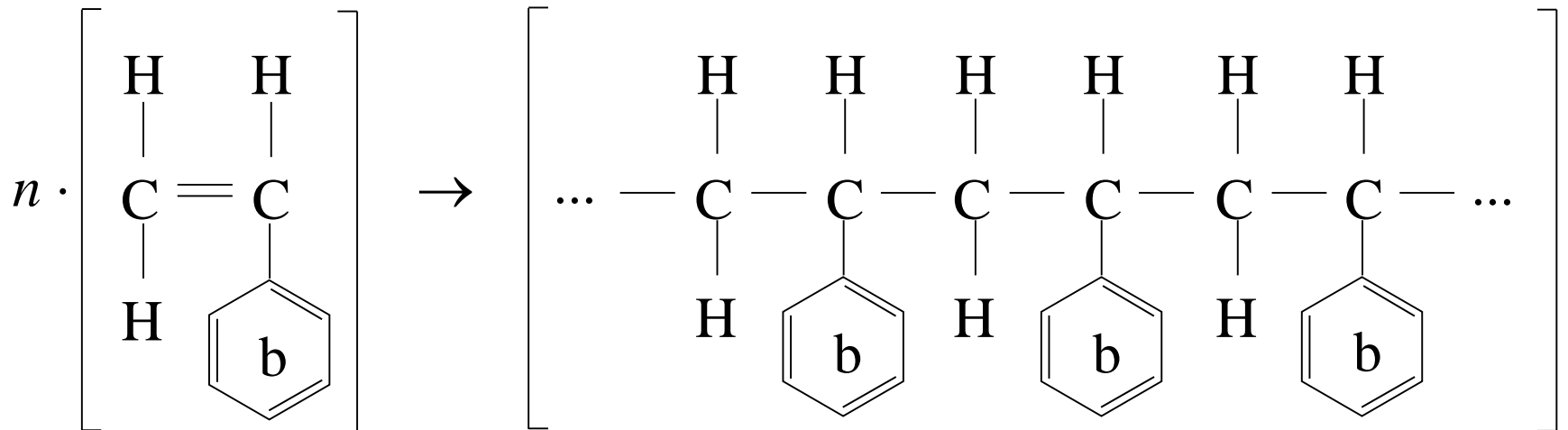
- dopuszczalna temperatura pracy ciągłej do 90 °C

- szerokie zastosowanie izolacyjne

polipropylen (PP)

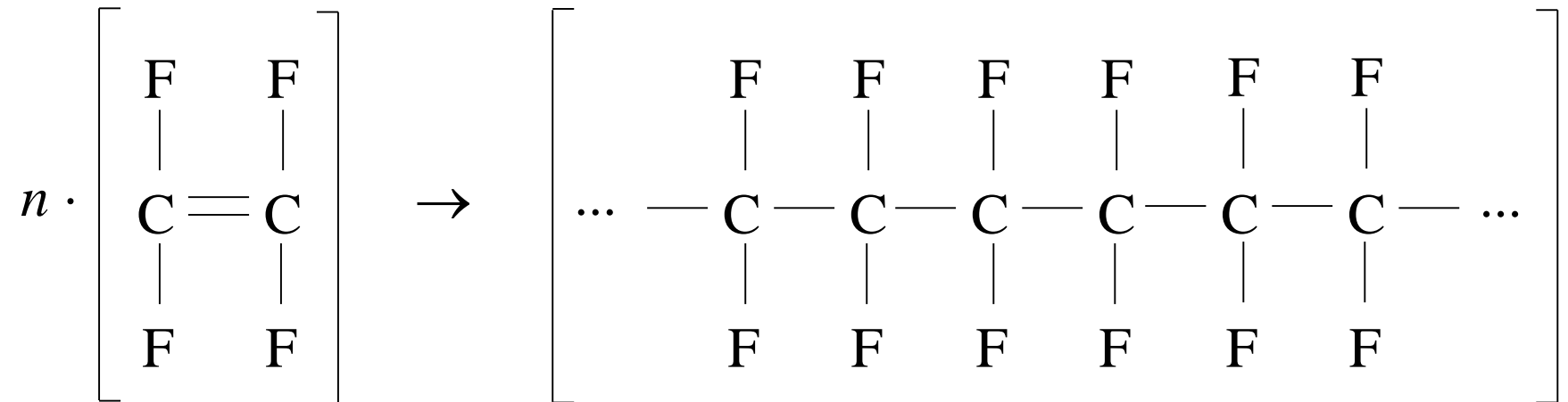


- lepsze własności mechaniczne od polietylenu
- gęstość 0,90...0,91 g·cm⁻³
- dopuszczalna temperatura pracy ciągłej do 140 °C

polistyren (PS)

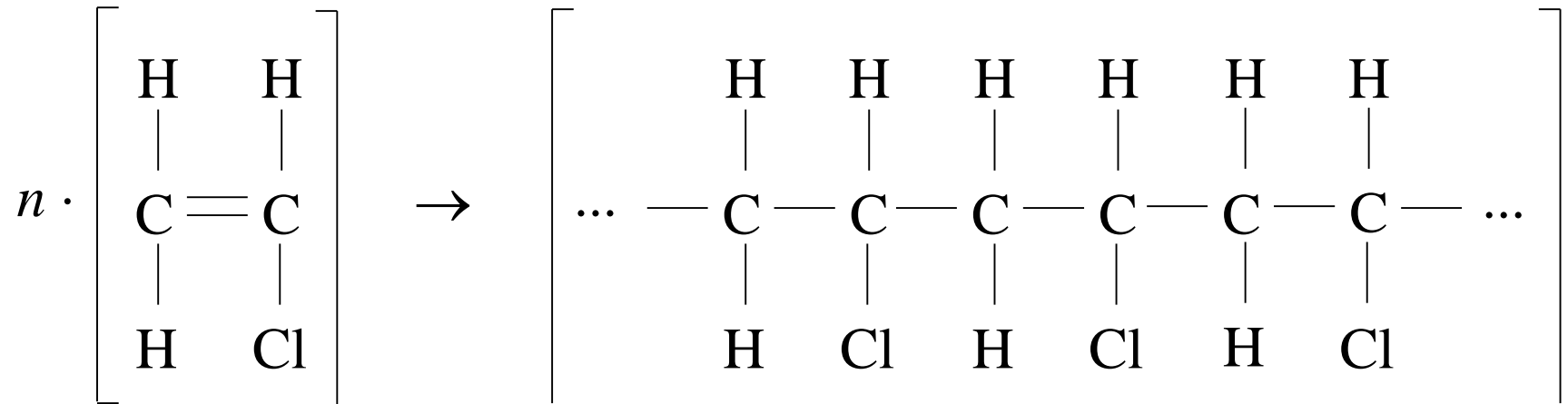
- twardy, duża wytrzymałość mechaniczna
- niska temperatura dopuszczalna pracy ciągłej, 75 °C
- dielektryk w kondensatorach pracujących przy w.cz.

policzterofluoroetylen (PTFE) teflon



- krystality i sferolity 45...80 %
- duża odporność cieplna i chemiczna
- niepalny, może pracować w zakresie od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$
- drogi i trudny w produkcji

polichlorek winylu (PCW)



- mierne własności elektryczne
- odporny na działanie czynników chemicznych
- stosunkowo niska temperatura mięknięcia, 85 °C
- tani i łatwy w otrzymywaniu
- dwie podstawowe odmiany:
 - PCW twardy, tzw. winidur
 - PCW miękki, tzw. polwinit

Duroplasty

- syntetyczne polimery organiczne
- uzyskiwane w procesie polikondensacji
- formowanie i utwardzanie
- utwardzanie, proces nieodwracalny:
 - przez podgrzanie
 - przez zastosowanie, tzw. utwardzaczy
- element izolacyjny jest w całej objętości usieciowany
- $\rho_v = 10^7 \dots 10^{14} \Omega\text{m}$
- $\text{tg } \delta = 0,001 \dots 0,01$
- $\epsilon_r = 3,5 \dots 10$
- $E_p = 120 \dots 350 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
- żywice lane, tłoczywa, lakiery, kleje

tworzywa fenolowo-formaldehydowe

- produkt polikondensacji formaldehydu z fenolami
- tłoczywa z różnymi wypełniaczami (bakelity, tekstolity)
- bardzo dobre własności mechaniczne
- słabe własności elektryczne

tworzywa melaminowo-formaldehydowe

- produkt polikondensacji formaldehydu z melaminą
- stosuje się z napełniaczami nieorganicznymi
- odporne na wyładowania elektryczne (komory łukowe)

tworzywa epoksydowe

- makrocząsteczki liniowe - sieciowanie w procesie utwardzania
- dobra przyczepność do materiałów nieorganicznych
- wytrzymałe laminaty na bazie np. tkaniny szklanej

tworzywa silikonowe

- łańcuch makrocząsteczki - atomy krzemu i tlenu
- boczne obiekty: grupy metylowe (CH_3) lub fenyłowe (C_6H_5)
- mogą być kwalifikowane jako elastomery lub jako duroplasty, zależnie od stopnia usieciowania i zastosowanych wypełniaczy
- hydrofobowe, niezbyt dobre własności elektryczne i mechaniczne
- temperatury pracy do $180\text{...}250\text{ }^\circ\text{C}$
- przy zastosowaniu wypełniaczy ceramicznych do $300\text{...}400\text{ }^\circ\text{C}$