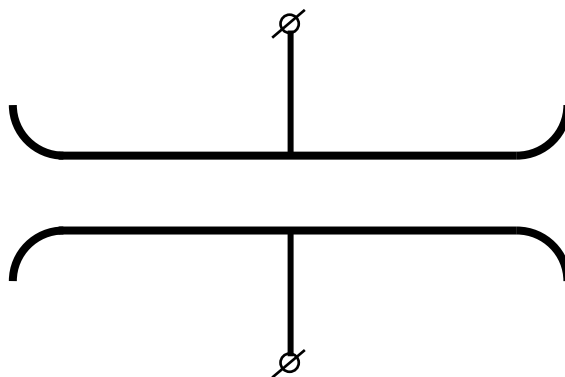


# MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE - PODZIAŁ

## 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 % N<sub>2</sub>, 21 % O<sub>2</sub>, 1 % CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + gazy szlachetne
- $p_n = 1013 \text{ hPa}$ ,  $T_n = 293 \text{ K}$  i  $w_n = 8,5 \text{ g}$  wody w 1 m<sup>3</sup> powietrza
- gęstość powietrza 1,25 kg·m<sup>-3</sup>
- wytrzymałość elektryczna  $\cong 32 \text{ kV}$  (elektrody płaskie, odstęp 1 cm)
- istotne czynniki: zanieczyszczenia, mgła, deszcz, śnieg, grad

## Wydzielone składniki powietrza

### **azot N<sub>2</sub>**

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

## Gazy syntetyczne

### sześciofluorek siarki ( $\text{SF}_6$ )

- bezbarwny, bezwonny, niepalny i nietoksyczny
- chemicznie obojętny i trwały do temperatury prawie 800 K
- gęstość pięciokrotnie większa niż powietrza
- najważniejsza własność - elektroujemność
- 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 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 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,  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$  ( $n = 8...12$ )
- 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 %  $\text{PbO}$ , 10 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ )  
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 %  $\text{SiO}_2$ , 16 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 6 %  $\text{CaO}$ )  
żarówki, świetlówki i klosze lamp
  - 4) szkło półtwarde borowo-krzemowe, temp. mięk.  $700\text{...}750\text{ }^{\circ}\text{C}$   
(20 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 73 %  $\text{SiO}_2$ ), 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 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 9 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 56 %  $\text{SiO}_2$ )  
złącza z metalami, elementy odporne na zmiany temperatury
- 6) szkło kwarcowe (minimum 96 %  $\text{SiO}_2$ ) i kwarc topiony  
temp. mięk. do 1660 °C, elementy o małej stratności elektrycznej  
i dużej wytrzymałości mechanicznej

## włókno szklane

- zawiera około 54 %  $\text{SiO}_2$  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  $\mu\text{m}$
  - mikronowe o średnicy od 1 do 3  $\mu\text{m}$
  - normalne o średnicy od 3 do 9  $\mu\text{m}$
  - roving o średnicy od 9 do 12  $\mu\text{m}$



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 ( $\text{SiO}_2$ )  
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 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$
  - ceramika korundowa -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powyżej 98 %
  - ceramika tlenkowa -  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$

## 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:  $\rho_v \cong 10^{14} \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r \cong 7$ ,  $\text{tg} \delta \cong 0,0004$
- $E_p$  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 ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>
- 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 ( $C_5H_8$ )

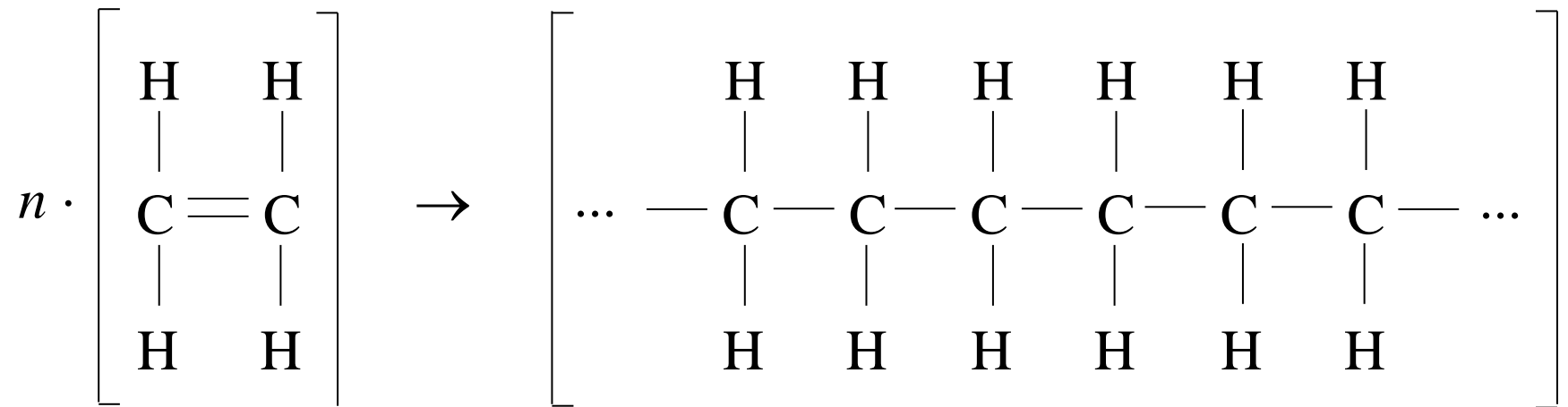
*kauczuk silikonowy* - łańcuch cząsteczek z połączonych na przemian atomów krzemu i tlenu



## 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<sup>-3</sup>)

- metoda średniociśnieniowa - PE o gęstości 0,93...0,94 g·cm<sup>-3</sup>

- metoda niskociśnieniowa - PE o gęstości i 0,95...0,96 g·cm<sup>-3</sup>

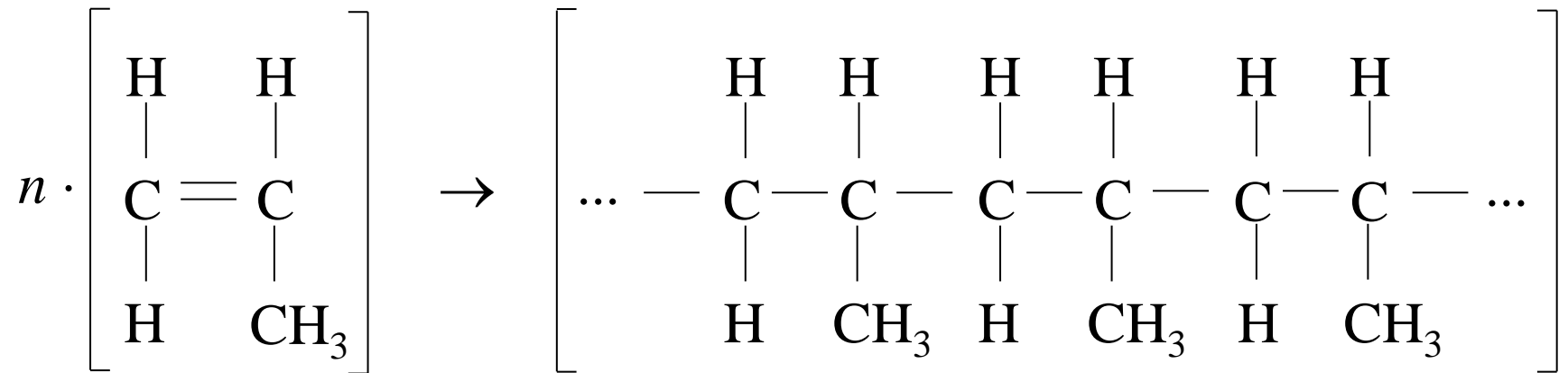
- krystality i sferolity - udział objętościowy 40...95 %

- polietylen o małej gęstości usieciowany (XLPE)

- dopuszczalna temperatura pracy ciągłej do 90 °C

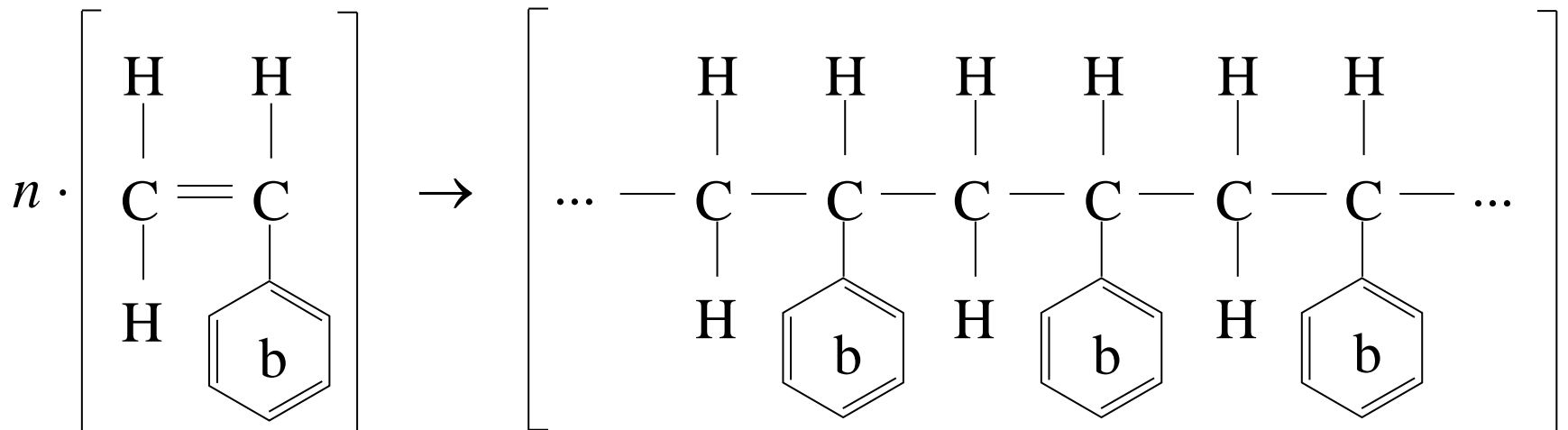
- szerokie zastosowanie izolacyjne

## polipropylen (PP)



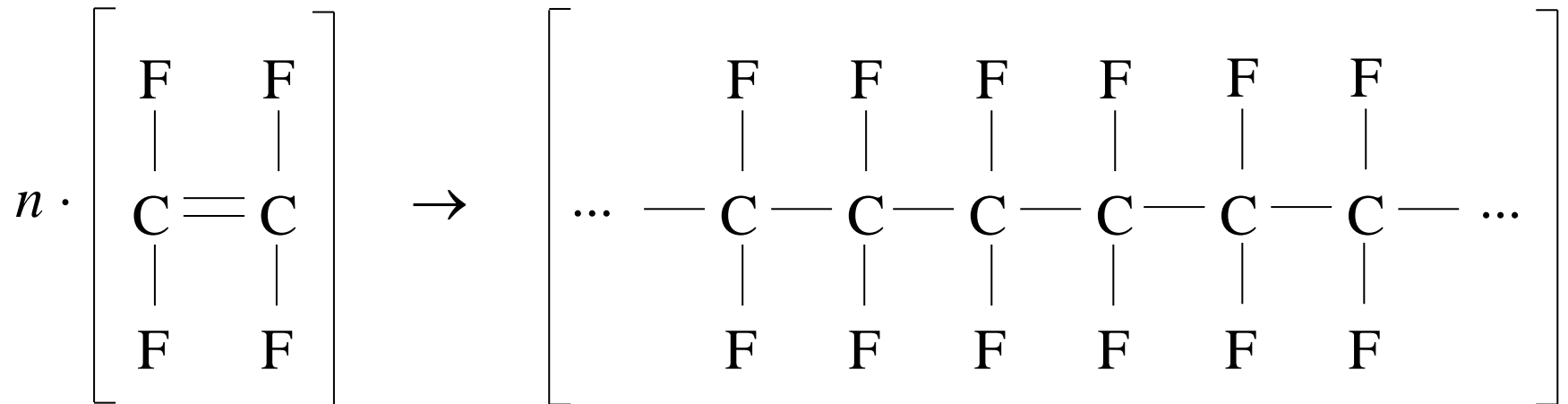
- lepsze własności mechaniczne od polietylenu
- gęstość 0,90...0,91 g·cm<sup>-3</sup>
- dopuszczalna temperatura pracy ciągłej do 140 °C

## polistyren (PS)



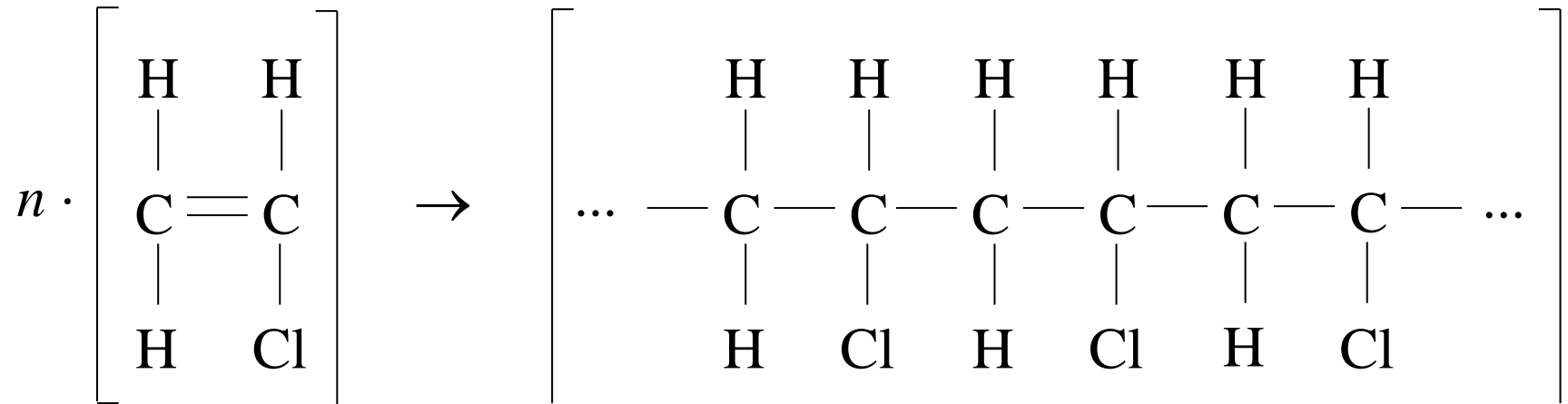
- twardy, duża wytrzymałość mechaniczna
- niska temperatura dopuszczalna pracy ciągłej, 75 °C
- dielektryk w kondensatorach pracujących przy w.cz.

## 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 ( $\text{CH}_3$ ) lub fenyłowe ( $\text{C}_6\text{H}_5$ )
- 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  $300\text{...}400\text{ }^\circ\text{C}$