

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Електротехнічні матеріали»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою № 10 - Органічні тверді діелектрики на основі полімерів

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.01.2023 № 1

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Протокол від 19.12.2022 № 5

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

Розробник:

1. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, Волканін Є.Є.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, спеціаліст першої категорії, Голованов С.Л.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.;
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Будова і властивості полімерів.
2. Високочастотні лінійні полімери.
3. Низькочастотні лінійні полімери (полярні термопласти).
4. Пластмаси.

Рекомендована література:**Основна:**

1. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.
2. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.
3. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.–344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.

Допоміжна:

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Укладачі: Будицький М.О., Кириленко В.М., Кириленко К.В., Затверджено Вченою радою ФЕА НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 23 червня 2015 р.) К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. – 94 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. <http://electricalschool.info/spravochnik/material/310-klassifikacija-jelektrotekhnicheskikh.html>
2. <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel08E024.pdf>
3. <https://www.twirpx.com/files/science/tek/ematerials/>

Текст лекції

1. Будова і властивості полімерів.

Полімери - високомолекулярні сполуки, молекули яких складаються з великого числа повторюваних ланок, з'єднаних хімічними зв'язками. Багато полімери називають смолами, за аналогією з природними смолами за їх здатність проявляти клейкість при нагріванні.

Полімери отримують з простих речовин шляхом полімеризації або поліконденсації. Основа будови полімеру - макромолекула, в якій розрізняють головний ланцюг і бічні групи. Макромолекула складається з однакових ланок, що повторюються n раз, де n - ступінь полімеризації. При полімеризації збільшується молекулярна вага полімеру, досягаючи значень від 6000 до 10^7 .

За хімічним складом розрізняють органічні і елементоорганічні полімери. В органічних полімерах головний ланцюг складається з вуглецю або комбінації вуглецю з киснем, азотом, сіркою, фосфором, які утворюють з вуглецем органічні сполуки. У елементоорганічних полімерів головна ланцюг утворена неорганічними сполуками з органічними бічними групами. Найбільш поширені полісілоксани, головний ланцюг яких становить СІЛОКСАН група $(-\text{Si}-\text{O}-)$ n . Усі елементоорганічні полімери синтетичні.

За будовою макромолекул розрізняють лінійні і просторові полімери.

В лінійних полімерах відношення довжини макромолекули до поперечнику дуже велике (1000 і більше). Наприклад, довжина макромолекули поліетилену - $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, а поперечний переріз - $1,5 \cdot 10^{-9}$ м, у молекул каучуку і целюлози довжина становить $(4 \dots 8) \cdot 10^{-7}$ м, перетин - $(3 \dots 7) \cdot 10^{-10}$ м. Окремі ділянки макромолекул, звані сегментами, можуть здійснювати теплові рухи. Сегмент зазвичай складається з декількох ланок. Чим менше розмір сегментів, здатних до самостійного переміщення, тим більше гнучкість

макромолекул. Сегментна рухливість є однією з причин релаксаційних діелектричних втрат в полімерах.

Залежно від ступеня впорядкованості розташування

макромолекул в полімері розрізняють аморфну і кристалічну фази. Аморфна фаза характеризується відсутністю далекого порядку в розташуванні макромолекул, кристалічна фаза - впорядкованим розташуванням макромолекул. Найчастіше в полімері існують одночасно обидві фази: кристалічна фаза розміщена в аморфній у вигляді окремих упорядкованих мікроблоків.

Лінійні полімери - термопластичні матеріали, їх властивості зі зміною температури оборотні. Залежно від температури вони можуть перебувати в трьох фізичних станах:

- в склоподібному стані тепловий рух обмежено коливаннями атомів і бічних груп. Під навантаженням полімер поводить себе як пружне тіло, модуль пружності

$E = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$ МПа. При нагріванні ступінь свободи елементів

макромолекули полімеру зростає, і полімер переходить у вискоеластичний стан, при охолодженні - з вискоеластичного стану в склоподібний. Температура переходу називається температурою склування - $T_{ст}$;

- в вискоеластичном стані полімер легко змінює свою форму за рахунок руху ланок головною і бічних ланцюгів. Йому властиві великі оборотні вискоеластичні деформації. При знятті навантаження молекули поступово відновлюють свою рівноважну форму. Модуль пружності вискоеластичного стану $E \approx 10 \text{ МПа}$;

- в в'язкотекучий стані полімер «тече» під навантаженням.

Лінійні молекули легко ковзають щодо один одного. В цьому стані при невеликих навантаженнях полімер виявляє необоротну пластичну деформацію, що використовується для його технологічної обробки.

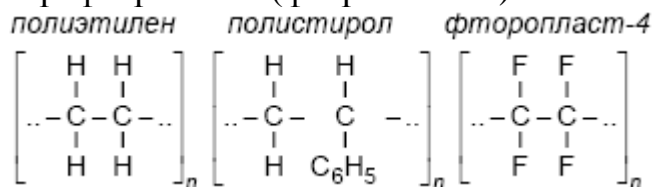
Лінійні полімери через слабке міжмолекулярної взаємодії утворюють з деякими розчинниками в'язкі розчини, з яких отримують міцні плівки і волокна.

В просторових полімери макромолекули пов'язані в загальну просторову сітку, при цьому молекулярний вагу різко зростає. Просторові полімери мають підвищену міцність, твердість, високою температурою плавлення. Просторові полімери є термореактивними матеріалами. Їх властивості мало залежать від температури. Однак при високих температурах (до $T_{пл}$.) Відбуваються незворотні структурні зміни (розтріскування, обвуглювання і т.п.) з втратою електроізоляційних властивостей. Наприклад, фенолформальдегідная смола в стадії бакеліта С, маючи високу механічну міцність, обвуглюється при впливі поверхневих електричних розрядів.

Термореактивні полімери широко використовуються при виробництві композиційних пластмас.

2. Високочастотні лінійні полімери.

До високочастотним діелектриків відносяться неполярні лінійні полімери з електронної поляризацією: поліетилен, полістирол, політетрафторетилен (фторопласт-4):



Вони володіють низькими діелектричними втратами, високим питомим опором, слабкою залежністю властивостей від температури і частоти струму.

Основні властивості неполярних полімерів

Характеристики	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
ρ , Ом·м	10^{15}	10^{16}	10^{16}
ϵ	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$	2...5	2...4	2...3
$E_{\text{пр}}$, МВ/м, (* для пленки)	40...150*	20...110*	40...250*
Нагревостойкость, °C	105...130	75...80	~300

Поліетилен - продукт полімеризації етилену ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$).

Зазвичай застосовують поліетилен низького тиску, його синтезують при $p = 0,5$ МПа і $T = 80$ °C. У отриманого матеріалу ступінь кристалічності становить 80 ... 90%, його механічні властивості:

$\sigma_{\text{в}} = 30$ МПа, $\delta = 50\%$. Поліетилен має високу стійкість до кислот і лугів, його застосовують у вигляді плівки, литих деталей, пресованих панелей для ізоляції високочастотних кабелів, деталей електро- і радіоапаратури.

Полістирол ($-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-$) більш міцний, ніж поліетилен ($\Sigma_{\text{в}} = 60$ МПа), схильний до утворення найтонших тріщин. Шляхом орієнтованої полімеризації кристалічного полістиролу з використанням спеціальних іонних каталізаторів вдається підвищити його температуру плавлення (від 100 °C до 250 °C) і механічну міцність. Полістирол має високу прозорість (95%) і високий коефіцієнт заломлення ($n = 1,6$), що дозволяє його використовувати в якості оптичних стекл. полістирол застосовують для виготовлення деталей високочастотної апаратури, плівок, лаків і т.д.

Фторопласт Ф-4 ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$) має високу енергію зв'язку C-F (450 кДж / моль), в зв'язку з чим володіє винятковою стійкістю до дії хімічних реагентів - концентрованих розчинів усіх відомих кислот і лугів. В цьому відношенні він перевершує всі відомі пластмаси і благородні метали. Фторопласт не горючий, не змочується водою. Діапазон робочих температур для виробів з фторопласту становить від - 270 °C до 300 °C.

Фторопласт має лінійну структуру ($M = 106 \dots 107$), що відрізняється високим ступенем кристалічності (93 ... 97%). При температурі 327 °C Ф-4 переходить в аморфний стан, яке може бути зафіксовано швидким охолодженням. Аморфний Ф-4 більш пластичний. Деталі з фторопласту виготовляють, головним чином, шляхом спікання пресованих порошкових заготовок. Ф-4 випускається також у вигляді рулонної стрічки і плівок. Фторопластовий волокно - Поліфему, фторлон застосовують для виготовлення хімічних і нагревостойких фільтрувальних тканин.

3. Низькочастотні лінійні полімери (полярні термопласти).

До полярних термопластів відносяться полівінілхлорид, поліетилентерефталат, поліметилметакрилат, поліамідні смоли.

Для них характерна дипольно-релаксаційна поляризація, тому вони мають зниженими електроізоляційними властивостями і застосовуються на низьких частотах:

- $\varepsilon = 4 \dots 7$;
- $\rho = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,1$ (при $f = 10^6 \text{ Гц}$);
- $E_{\text{пр}} = 15 \dots 50 \text{ МВ/м}$.

Полівінілхлорид (ПВХ) ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) - продукт полімеризації газоподібного вінілхлориду $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}\cdot\text{Cl}$. Він має високу хімічну стійкість у воді, кислотах і лугах, бензині, гасі, спирті, озоне, але розчинний в діхлоретане, хлорбензолі, частково в ацетоні, бензолі. Для нього характерна невисока морозостійкість і нагревостійкість від -25°C до 70°C . Непластифікований поліхлорвініл володіє високою жорсткістю і йде на виготовлення шляхом лиття під тиском акумуляторних баків, ізоляційних втулок, труб і інших деталей. З нього виготовляють вироби, здатні працювати в хімічно агресивних середовищах.

Полівінілхлорид часто застосовують з різними пластифікаторами, що дозволяє отримувати пластифікований хлорвініл (вініпласт) різного ступеня еластичності (від жорстких до гумоподібних). Вініпласт застосовують для ізоляції проводів і кабелів низької напруги, захисних шлангів, трубок для додаткової ізоляції, липких ізоляційних стрічок, листового і плівкового пластикату. Пластифікований полівінілхлорид набув широкого застосування у виробництві монтажних проводів.

Хлорований поліхлорвініл (перхлорвініла) відрізняється більше легкою розчинністю і застосовується для ізоляційних хімічно стійких лаків і антикорозійного покриття.

Поліетилентерефталат (лавсан) - це термопластичний полімер, отриманий з етиленгліколю і гліфталевій кислоти $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$. Він володіє значною механічною міцністю.

При підвищених температурах лавсан швидко окислюється на повітрі, так що обробку м'якого матеріалу проводять в атмосфері азоту. Лавсан застосовують у вигляді волокон, плівок. Плівки з лавсану використовують в якості несучої основи для магнітної стрічки. Тонкі плівки використовуються для межслойної ізоляції в обмотках трансформаторів, дроселів і подібних виробів, розрахованих на робочу температуру від -60°C до 150°C . Застосовують плівки також в конденсаторах.

Поліамідні смоли (капрон, нейлон та ін.) Відрізняються високою міцністю і еластичністю. Поліаміди, як багато полімери, старіють при тривалому впливі світла, вологи і температури. Їх застосовують у вигляді волокон, плівок і в якості сполучного при виробництві пластмас. Капрон, завдяки хорошим термопластичним властивостям і високій механічній міцності, використовують в радіоапаратурі (корпуси приладів, ручки і кнопки управління, каркаси котушок індуктивності і ін.). На основі поліамідів виготовляють емальлакі, що створюють на металевих дротах міцні, еластичні діелектричні покриття.

Полиметилметакрилат (органічне скло) використовується, в основному, як декоративний матеріал в електро- і радіоапаратурі.

4. Пластмаси.

Пластмаси - це композиційні матеріали на основі полімерів, вироби з яких отримують пластичним деформуванням або литтям під тиском.

Основні компоненти пластмас: наповнювач і сполучна.

Наповнювачі:

- порошкові: каолін, слюда, кварцовий пісок, азбестова борошно, деревне борошно, тальк і ін.;
- волокнисті: бавовняне волокно, скловолокно, углеволокно, асболоволокно;
- шаруваті: папір, бавовняна тканина, склотканина, асботкань.

В якості сполучного використовуються лінійні або просторові полімери - смоли.

Крім того, в пластмаси додають допоміжні речовини: отвердителі, пластифікатори, стабілізатори, барвники тощо.

Пластмаси з порошковим наповнювачем називають пресспорошков, з волокнистих - волокнітах, а із шаруватим - шаруватими пластиками.

Термопластичні пластмаси виготовляють на основі лінійних смол (поліамідних, поліуретанових, поліефірних і ін.).

Вони пластичні, володіють високою технологічністю. Вироби отримують литтям під тиском.

Термореактивні пластмаси виробляють на основі смол з просторової сітчастої структурою (епоксидних, фенолформальдегідних (бакеліт С), анілінформальдегідних, кремнійорганічних та ін.). Термореактивні пластмаси відрізняються підвищеною твердістю і міцністю. Найчастіше вироби виготовляють шляхом гарячого пресування на гідравлічних пресах при тиску 10 ... 12 МПа. Вихідна сировина ретельно подрібнюють і перемішують. Прес-форма підігрівається, так як процес полімеризації і затвердіння пластмаси зазвичай вимагає підвищеної температури (понад 60 ° С).

Властивості пластмас залежать від властивостей пов'язує і наповнювача.

Сполучна має забезпечити хороші адгезионну і когезійну міцність, вологостійкість, теплостійкість і високі електричні властивості. Теплостійкість сполучного визначає допустиму робочу температуру пластмас:

- на епоксидної смолі - до 200°C;
- на фенолформальдегідной смолі - до 250°C;
- на кремнійорганіческой смолі - до 370°C.

Кремнійорганічна смола, володіючи високою теплостійкістю, має слабку адгезію до наповнювача, тому пластмаси на її основі мають невисоку міцність.

Високу термостійкість і міцністю володіють пластмаси на основі суміші кремнійорганіческой і фенолформальдегідной або епоксидної смол. Кращі електричні характеристики (менший tgδ, підвищені ρ і електрична міцність) у пластмас на основі анілінформальдегідной смоли (амінопласти).

Анілінформальдегідную смолу отримують з фенолформальдегідной шляхом заміни фенолу (C_6H_5OH) аніліном ($C_6H_5NH_2$). Полярні властивості анілінформальдегідной смоли виражені слабше, так як група ($-NH_2$) менш полярна, ніж ($-OH$), що сприяє поліпшенню електричних властивостей і зменшення гігроскопічності. Крім того, амінопласти можна фарбувати в будь-який колір, тоді як фенолформальдегідні пластмаси через темно-коричневого кольору самої смоли забарвлюють лише в коричневий або чорний колір.

Для електротехнічних виробів широке застосування знайшли шаруваті пластики:

- гетинакс - смола + папір,
- текстоліт - смола + х / б тканину,
- стеклотекстолит - смола + склотканина.

З смол використовують найчастіше фенолформальдегідная, епоксидну.

Для виробництва гетинакса використовується міцна і Нагревостойкість папір. Її просочують водною суспензією фенолформальдегідной смоли, сушать, збирають в пакети і пресують на гідравлічних пресах при температурі $160^\circ C$ під тиском $10 \dots 12 \text{ МПа}$. Під час пресування смола спочатку розм'якшується, заповнює пори між листами і волокнами, а потім твердне, переходячи в неплавким стадію (бакеліт С). В результаті виходить міцний монолітний матеріал. Текстоліт і стеклотекстолит виробляють аналогічним чином з просочених смолою бавовняної тканини або склотканини.

Електричні характеристики шаруватих пластиків уздовж волокон значно нижче, ніж поперек. Усереднені електричні характеристики гетинакса, текстоліту і стеклотекстолита такі:

- $\epsilon = 6 \dots 8$;
- $\rho = 10^8 \dots 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\text{tg} \delta = 0,02 \dots 0,2$;
- $E_{\text{пр}} = 10 \dots 20 \text{ МВ/м}$.

Текстоліт і стеклотекстолит використовують для виготовлення щитків і панелей. Нагревостойкість гетинакса і текстоліту становить $105^\circ C$, стеклотекстоліти - $200^\circ C$.

Фольгований гетинакс використовують для виготовлення друкованих схем низькочастотних ланцюгів радіоапаратури. Для цієї мети гетинакс облицьовують мідною фольгою товщиною $0,035 \dots 0,05 \text{ мм}$.

Необхідний малюнок отримують шляхом виборчого травлення.

Пресспорошков широко застосовують в радіoeлектроніці. З них виготовляють корпусу радіоприймачів, телевізорів, вимірювальних приладів, навушники, лампові панелі, штепсельні роз'єми, рукоятки, кнопки та ін.