Робота Р 19:

Створення полімерних матеріалів та конструкцій з них під дією фізичних полів

Подана на здобуття Державної премії України у галузі науки і техніки у 2019 році

Автори:

Мамуня Є.П., Букетов А.В., Стухляк П.Д., Черваков О.В., Сімбіркіна А.М., Юрженко М.В., Демченко В.Л.

Авторський колектив

МАМУНЯ Євген Петрович	доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України
БУКЕТОВ Андрій Вікторович	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Херсонської державної морської академії
СТУХЛЯК Петро Данилович	доктор технічних наук, професор, професор кафедри Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ЧЕРВАКОВ Олег Вікторович	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»
СІМБІРКІНА Анжеліка Миколаївна	заступник начальника комплексу нових матеріалів і перспективних технологій ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля
ЮРЖЕНКО Максим Володимирович	кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України
ДЕМЧЕНКО Валерій Леонідович	кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України

Географія авторів роботи

Актуальність роботи:

Прогрес у різних областях науки і техніки, швидкий розвиток нових технологій потребує створення нових матеріалів, які мають комплекс необхідних властивостей. Ефективним способом формування функціональних полімерних матеріалів з новими властивостями є їх модифікація під дією фізичних полів, що надає нових підходів до технології переробки полімерів у вироби. Це також стосується багатокомпонентних композиційних систем із наповнювачами мікро- та нанорозмірного діапазону. Ці методи можуть бути легко реалізовані в рамках діючих промислових технологічних схем для надання полімерним матеріалам нових властивостей, що надає можливостей для розширення гами полімерних виробів та відбивається у підвищенні економічного ефекту виробництва.

Мета роботи:

- комплексне вивчення впливу фізичних полів різної природи на полімерні матеріали різної хімічної природи, їх суміші, мікро- та нанокомпозити на їх основі, в процесі їх формування та виготовлення виробів з них;
- розробка технологій спрямованого регулювання властивостей полімерів та композиційних матеріалів обробкою в фізичних полях для отримання матеріалів і виробів цільового призначення з підвищеними експлуатаційними характеристиками;
- впровадження у високотехнологічних галузях промисловості України та створення обладнання, яке реалізує нові підходи у промислових умовах підприємств.

Наукова новизна роботи:

- отримано нові фундаментальні знання про механізм впливу фізичних полів різної природи на термопластичні та реактопластичні полімерні й композиційні матеріали;

- створено наукову концепцію та знайдені шляхи спрямованого керування структурою полімерних та полімерних композиційних матеріалів;

- розроблено нові технології формування полімерних і композиційних матеріалів під дією фізичних полів.

Практичне значення роботи:

- створення широкого спектру полімерних матеріалів, мікро- та нанокомпозиційних матеріалів різноманітного призначення з поліпшеними (порівняно з існуючими в Україні та світі аналогами) властивостями, сформованих під дією різноманітних фізичних полів,

- створення інноваційних технологій їх обробки фізичними полями, розробка обладнання, яке реалізує ці технології, для вирішення нагальних проблем високотехнологічних галузей промисловості України.

- впровадження нових полімерні матеріалів, покриттів та конструкцій з них, сформованих під дією фізичних полів, проведення випробувань в промислових умовах на численних підприємствах України.

В роботі використовували широкий спектр полімерних матеріалів і наповнювачів, а також гаму різноманітних фізичних полів:

Полімерні матеріали:

поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полівініліденфторид, політетрафтор-етилен, полістирол, поліметилметакрилат, полікапроамід, кополіамід, епоксидна смола, полісульфон, поліфеніленсульфід, поліетеркетон, поліетеретеркетон, поліамідімід, поліетерімід, поліуретанові і акрилові полімери.

Наповнювачі:

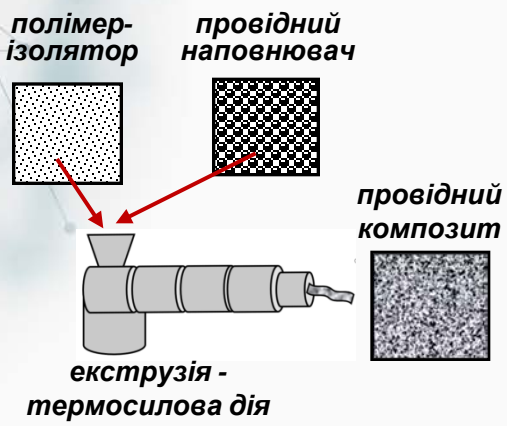
дисперсні нікель, нанонікель, наносрібло, залізо, оксид заліза (магнетит), ферити, мідь, оксид міді, оксид хрому, електрокорунд, сланець, графіт, сажа, карбонові нанонаповнювачі – графен, нанотрубки, терморозширений графіт, скляні та полімерні мікросфери.

Фізичні поля:

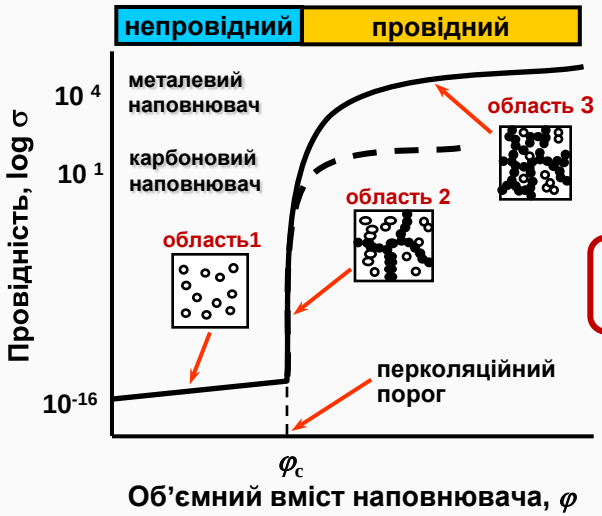
магнітне, електричне високочастотне, теплове, термосилове, термоімпульсне, термомагнітне, електроіскрове, ультразвукове, обробка ультрафіолетовим випромінюванням.

Формування електропровідних композитів під дією термосилового поля

Електропровідні композити - двофазні неупорядковані системи

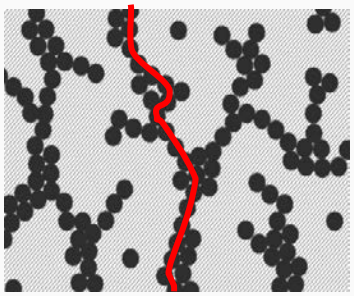


Перколяційна поведінка електропровідності



$$\sigma = \sigma_m (\varphi - \varphi_c)^t$$

Resistivity (Ω·cm)		Applications & Products
10^{14}, 10^{12}	Insulating	Insulators
10^{10}, 10^{8}, 10^{6}	Electrostatic Dissipative	Anti-static Materials: fuel tanks, Mining pipes, anti-static storage containers, electrostatic paintable compounds, electronics connectors, microscope housing materials etc.
10^{4}, 10^{2}, 10	Conductive	Sensors & EMI Shielding: self-regulated heating elements, strain sensing materials, Electronic-nose devices, over-current protector, organic liquid sensing devices etc.
10^{-2}, 10^{-4}	Highly Conductive	Conductors: metal replacements, conducting adhesives and coatings, bipolar plates, resistors, thermoelectric materials, busbars, etc.

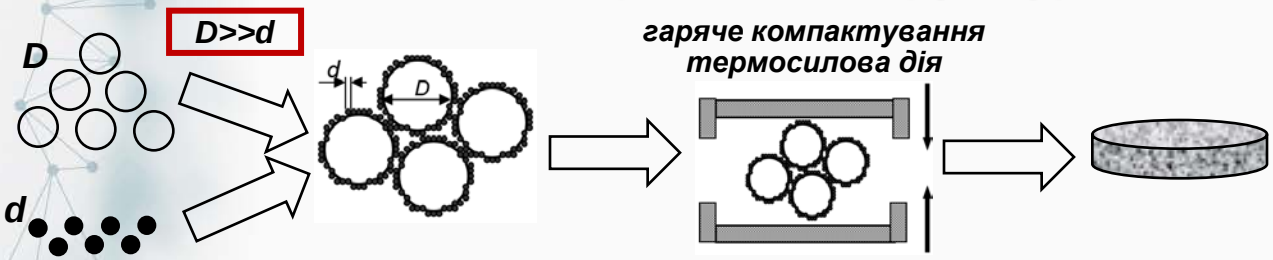


Провідний скелет вміщує від 1 до 10 % усіх частинок, решта є непровідними, які входять в мертві кінці і ізольовані кластери

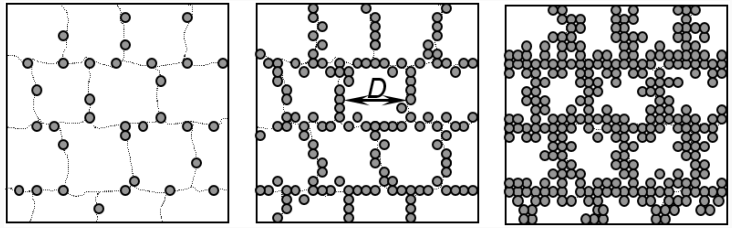
Збільшення вмісту наповнювача погіршує механічні властивості і умови переробки композиту

Величина порогу перколяції є ключовою характеристикою провідного композиту і визначає вміст наповнювача, який забезпечує контакт частинок одна з одною і перехід ссистеми в провідний стан.

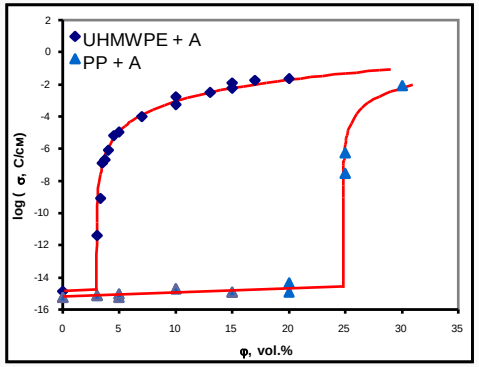
Композити з упорядкованим розподілом наповнювача
Сегреговані структури



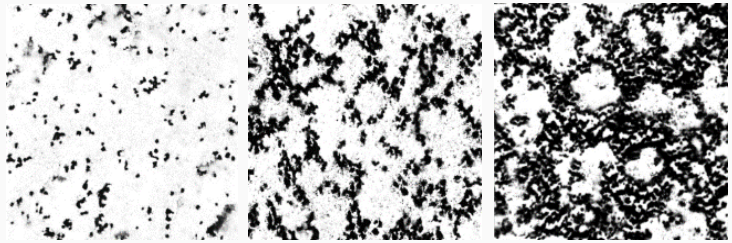
Модельне зображення еволюції сегрегованої системи при збільшенні вмісту наповнювача



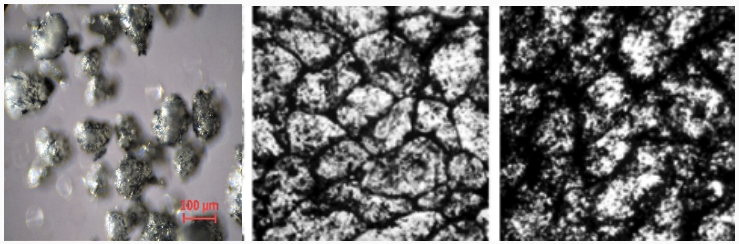
$\varphi < \varphi_c$ $\varphi = \varphi_c$ $\varphi > \varphi_c$



ПВХ/Ni



НВМПЕ/А



Пороги перколяції композитів, об.%

Карбонові наповнювачі:

КНТ	Гр	ТРГ	ГНП	А	
0,04	0,21	0,49	0,79	2,95	*сегрег.*
1,5	3,0	3,0	9,0	25,0	*статист.*

Металеві наповнювачі:

Cu	Ni	Fe	
5,0	4,0	7,0 *сегрег.*	25-30 *статист.*

Наповнювач утворює провідний каркас в об'ємі полімерної матриці.

Сегреговані композити можуть бути охарактеризовані двома значеннями концентрації

$$\varphi_{loc} > \varphi$$

φ_{loc} – локальна концентрація наповнювача в стінці каркасу наповнювача, яка визначає електрофізичні властивості композиту;

φ – середня концентрація наповнювача, яка визначає кількість наповнювача в композиті зразка

МАТЕРІАЛИ

Полімери з високою в'язкістю розплаву:

Провідні наповнювачі:

Карбонові:

антрацит (А), графен (Гр), терморозширений графіт (ТРГ), графітові нанопластини (ГНП), сажа (С), карбонові нанотрубки (КНТ)

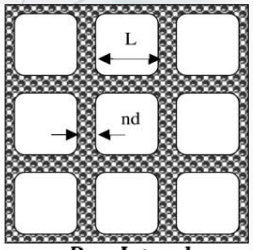
Металеві:

мікронікель (мNi), нанонікель (нNi), мідь (Cu), залізо (Fe)

Моделювання

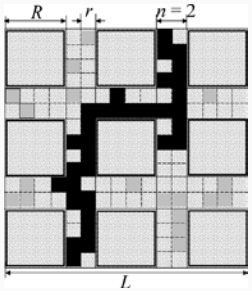
Моделювання сегрегованих систем

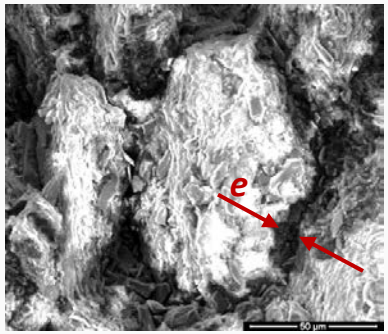
геометрична модель



$D = L + nd$

комп'ютерне моделювання





Товщина стінки провідного каркасу

$$e = nd = D\left[1 - \left(1 - \frac{\varphi_c}{\varphi_{cr}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]$$

Поріг перколяції за геометричною моделлю

$$\varphi_{c,segr} = \varphi_{c,rand}\left[1 - \left(1 - \frac{nd}{D}\right)^{3}\right]$$

Поріг перколяції за комп'ютерним моделюванням

$$x_*(\lambda, n) = p_*^{\infty}\left\{1 - \left[1 + n_{eff}(n)/\lambda\right]^{-d}\right\}$$

$$\lambda = D/d$$

Розрахунки параметрів сегрегованої системи за моделями

Параметри	Розрахунок	Експеримент
Товщина каркасу	4.14 мкм	~ 5 мкм
Поріг перколяції за геометричною моделлю	3.53 об.%	2.95 об.%
Поріг перколяції за комп'ютерним моделюванням	3.37 об.%	

Моделювання перколяційної поведінки електропровідних композитів

$\sigma = \sigma_m (\varphi - \varphi_c)^t$ - рівняння перколяційної теорії

Mamunya model

$$\sigma = \sigma_p + (\sigma_m - \sigma_p)[(\varphi - \varphi_c)/(F - \varphi_c)]^t \quad (1)$$

$$\log\sigma = \log\sigma_p + (\log\sigma_m - \log\sigma_p)(\varphi - \varphi_c)^k \quad (2)$$

$k \sim K = A + B\gamma_{pf}$ $\quad \gamma_{pf} = \gamma_p + \gamma_f - 2(\gamma_p^d \cdot \gamma_f^d)^{0,5} - 2(\gamma_p^p \cdot \gamma_f^p)^{0,5}$

$$\log\sigma = \log\sigma_p + (\log\sigma_m - \log\sigma_p)[(\varphi - \varphi_c)/(F - \varphi_c)]^k \quad (3)$$

Параметри рівнянь:

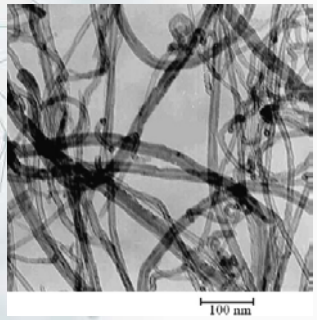
φ – вміст наповнювача
φ_c – поріг перколяції
t – критичний експонент
F – щільність пакування наповнювача
σ_p – провідність композиту
σ_p – провідність полімеру
σ_m – провідність фази наповнювача
A, B – емпіричні коефіцієнти
γ_{pf} – міжфазний поверхневий натяг
γ_p – поверхневий натяг полімеру
γ_f – поверхневий натяг наповнювача

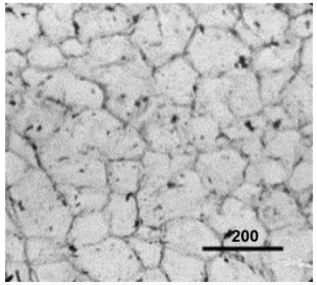
E.P. Mamunya et al. Composite Interface, 4 (1997) 169-176.

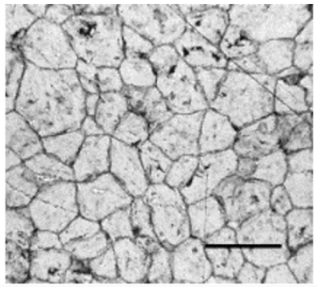
Ye.P. Mamunya et al. European Polymer J., 38 (2002) 1887-1897.

Екрануючі властивості сегрегованих композитів

Композит на основі ПЕ і карбонових нанотрубок (КНТ)





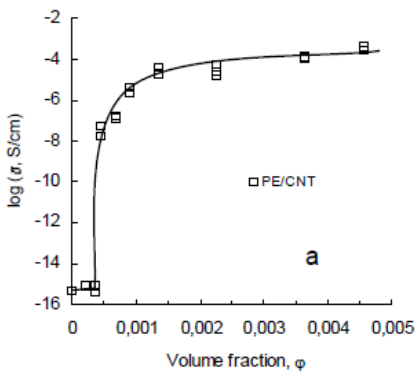


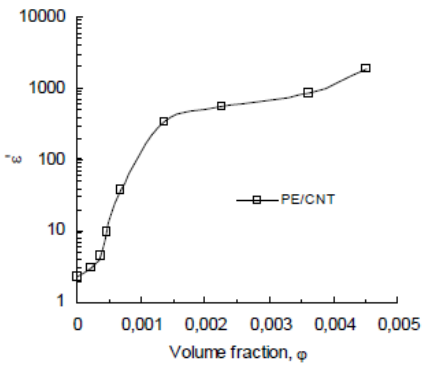
$$\varphi_c^s \approx \frac{3n}{\frac{l}{2r}\cdot\frac{D}{d}}$$

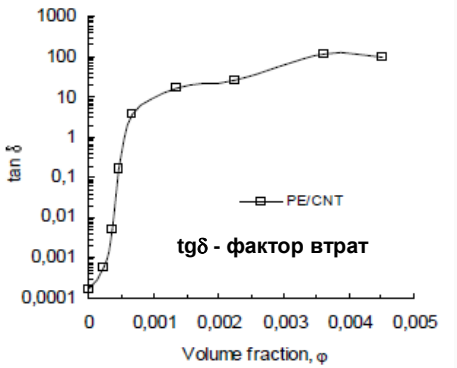
розрахунок порогу перколяції за моделлю

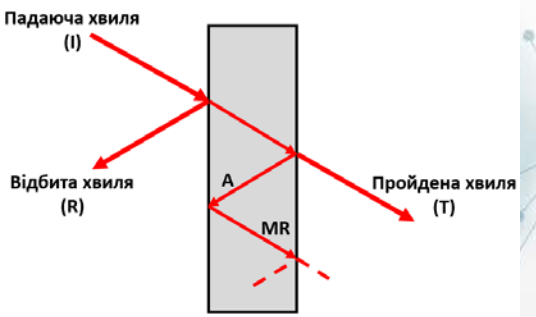
Досягнутий ультранизький порог перколяції φ_c^s=0,0004=0,04 об.%

Синергізм форм-фактору КНТ і сегрегованого розподілу КНТ



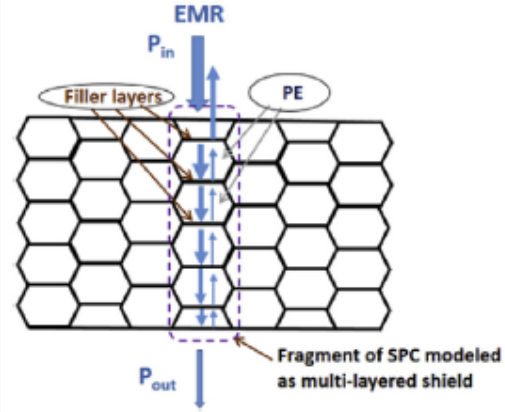






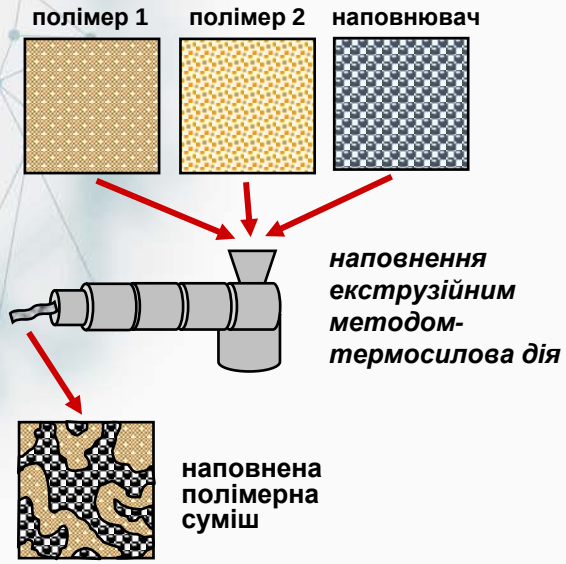
Композит	σ, См/см	SE_T, (-дБ)	SE_R, (-дБ)	SE_A, (-дБ)	SE_A/SE_R
ПП+20А статист.	$2.0\cdot10^{-15}$	7.2	4.32	2.9	0.7
ПЕ+20А сегрег.	$3.0\cdot10^{-2}$	33.0	5.69	27.3	4.8
ПЕ+20Cu сегрег.	$2.3\cdot10^{-1}$	37.7	6.4	31.3	4.9
ПЕ+5ТРГ сегрег.	$2.6\cdot10^{-2}$	37.0	5.53	31.5	5.7
ПЕ+5 ГНП/КНТ сег.	$4{,}2\cdot10^{-2}$	42,5	4,5	37,8	8,4

-40 дБ = 0,0001



геометрична модель, яка показує роль множинних внутрішніх відзеркалень

Композити з упорядкованим розподілом наповнювача
Наповнені полімерні суміші



Концепція спрямованого керування морфологічною структурою наповненої полімерної суміші з ціллю формування матеріалів з необхідними електрофізичними характеристиками

Три фактори визначають морфологію наповнювача в полімерній суміші :

Термодинамічний фактор → **Співвідношення між міжфазними поверхневими натягами полімер 1 – наповнювач (γ_{p1-f}), полімер 2 – наповнювач (γ_{p2-f}) і полімер 1 – полімер 2 (γ_{pp})**

Кінетичний фактор → **Співвідношення між в'язкостями полімеру 1 (η_{p1}) і полімеру 2 (η_{p2})**

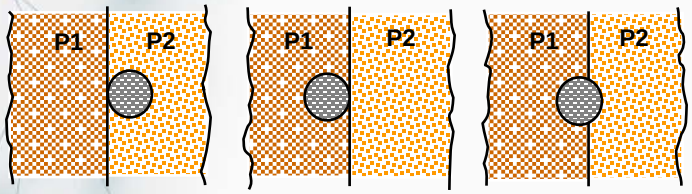
Технологічний фактор → **Методи введення наповнювача в двокомпонентну гетерогенну полімерну матрицю**

Електричні властивості композитів залежать від просторового розподілу провідного наповнювача в гетерогенній полімерній матриці

Вплив термодинамічного та кінетичного факторів на морфологію наповнювача в полімерній суміші

Термодинамічний фактор

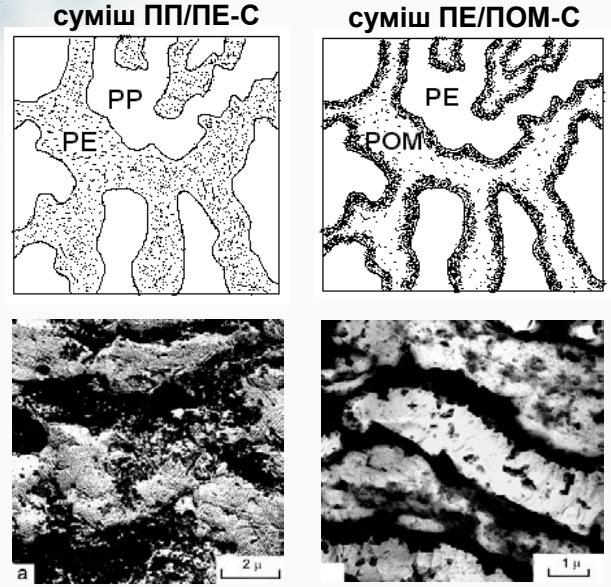
Вплив міжфазних взаємодій



$\gamma_{p1f} > \gamma_{p2f} + \gamma_{pp}$ $\gamma_{p2f} > \gamma_{p1f} + \gamma_{pp}$ $\gamma_{p1f} < \gamma_{p2f} + \gamma_{pp}$

$\gamma_{p2f} < \gamma_{p1f} + \gamma_{pp}$

суміш ПП/ПЕ-С **суміш ПЕ/ПОМ-С**



Пороги перколяції

ПП/ПЕ-С $\rightarrow \varphi_c = 5{,}0$ **об.%;** **ПЕ-С** $\rightarrow \varphi_c = 9{,}0$ **об.%**

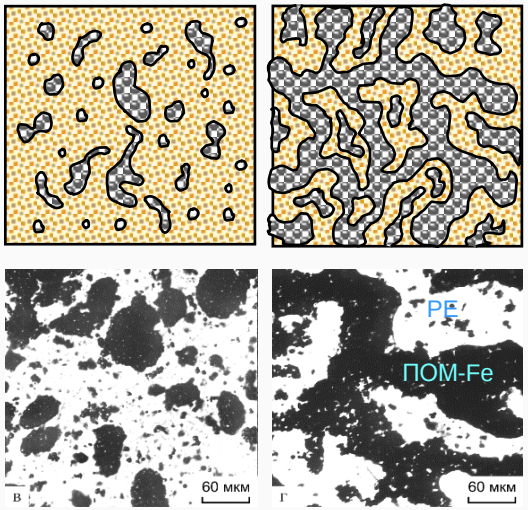
ПЕ/ПОМ-С $\rightarrow \varphi_c = 3{,}0$ **об %** **ПОМ-С** $\rightarrow \varphi_c = 12$ **об %**

Кінетичний фактор

Велика різницю у значеннях в'язкості полімерних компонентів, $\eta_{p1} >> \eta_{p2}$.

При екструдуванні під дією зсувних зусиль наповнювач локалізується в полімерному компоненті з меншою в'язкістю.

$\varphi < \varphi_c$ $\varphi > \varphi_c$



Показник текучості розплаву полімерів ПТР, г/10 хв.

ПЕ – 1.6
ПОМ – 10.9

$\eta_{ПЕ} >> \eta_{ПОМ}$

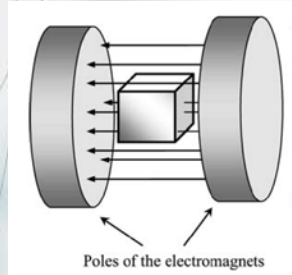
Пороги перколяції

ПЕ/ПОМ-Fe $\rightarrow \varphi_c = 9{,}0$ **об %** **ПЕ-Fe** $\rightarrow \varphi_c = 21$ **об.%**

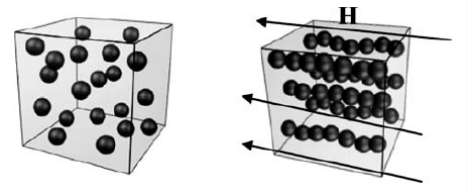
ПОМ-Fe $\rightarrow \varphi_c = 24$ **об %**

Формування композитів під дією магнітного поля

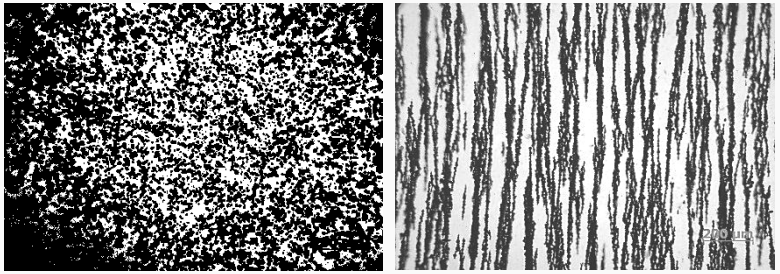
Під дією магнітного поля феромагнітний наповнювач (Ni, Fe, Co, оксиди) утворює упорядковану одновимірну 1D структуру



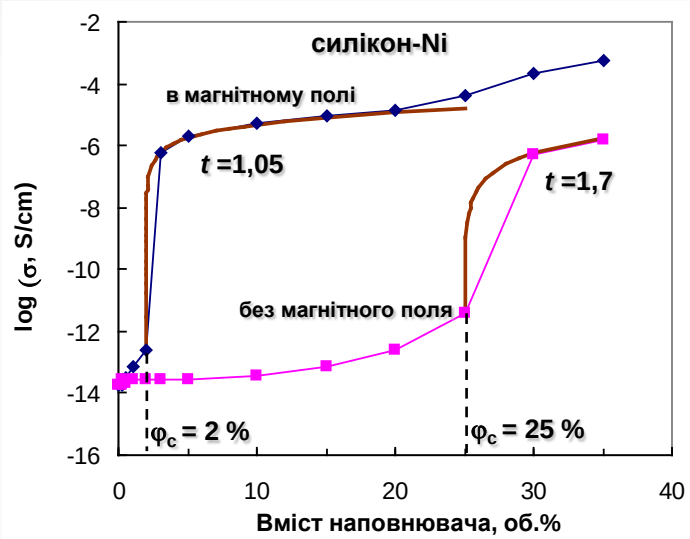
Ni частинки в рідкому полімерному зв'язуючому



Тверднення композиту в магнітному полі, фіксація 1D розподілу наповнювача



Морфологія композиту силікон-Ni до і після дії магнітного поля



Суцільні товсті лінії – розрахунок за рівнянням перколяції з відповідним значенням параметру *t*

Вплив розмірності системи на значення параметрів рівняння перколяції

$$\sigma = \sigma_0 (\varphi - \varphi_c)^t$$

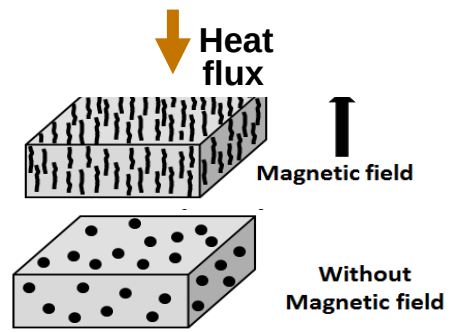
t = 1.0	1D
t = 1.3	2D
t = 2.0	3D

Кореляція величини критичного експоненту *t* з розмірністю системи

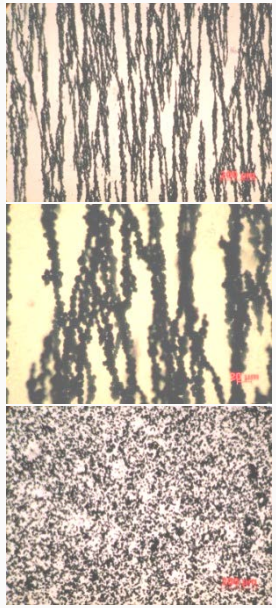
Пороги перколяції

при дії МП → φ_c = 2,0 об %
без дії МП → φ_c = 25 об %

Вплив магнітного поля на теплопровідність композитів з нікелевим наповнювачем



Композит силікон-Ni



Криві 1, 4 описуються модифікованим рівнянням суміші:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_p \cdot (1-\varphi) + C \cdot \lambda_f \cdot \varphi$$

Криві 2, 3 описуються рівнянням Ліхтенекера:

$$\log \lambda = \log \lambda_p (1-\varphi) + \log \lambda_f \cdot \varphi$$

λ_p = 0,25 W/(m K)

λ_f = 19 W/(m K)

λ_m = 90 W/(m K)

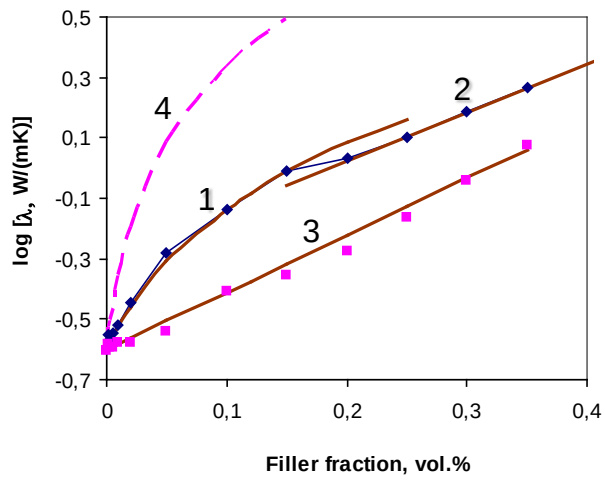
λ_m/λ_f = 4.7

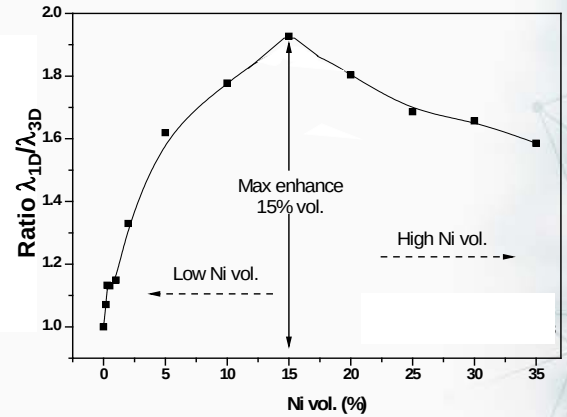
C = 0.25

Параметр λ_f характеризує теплопровідність фази наповнювача і є набагато менше за теплопровідність блочного металу λ_m,

λ_m/λ_f = 4.7

Великий тепловий опір на контактах частинка-частинка веде до низької теплопровідності композиту і відсутності перколяційних ефектів





Відношення теплопровідностей композиту з 3D структурою і після дії магнітного поля (1D)

Сенсорні властивості композитів з упорядкованою в магнітному полі 1D структурою металевого наповнювача

П'єзорезистивний ефект – зміна електричного опору композиту при дії механічного зусилля

Gauge фактор

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0}$$

Чутливість

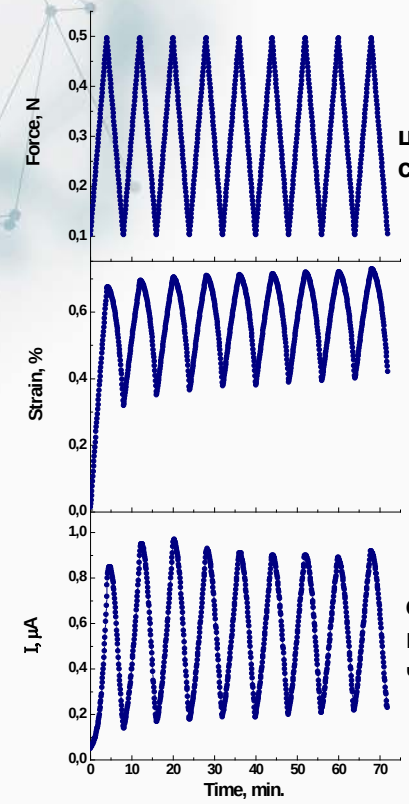
$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta F/F_0}$$

для силікон-Ni композиту

***GF* = 230, *S* = 2·10^{-1}**

звичайні значення параметрів

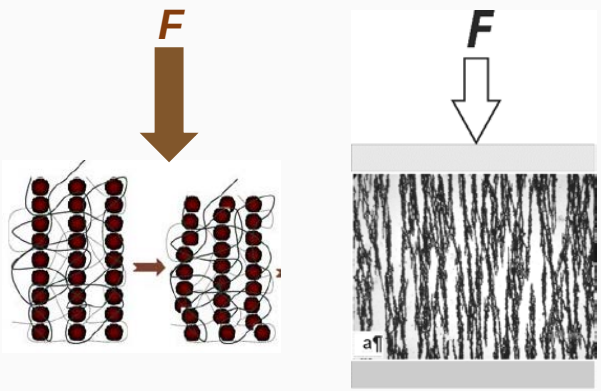
***GF* = 1-50, *S* = 10^{-3}-10^{-4}**



циклічна дія сила-релаксація

електричний відклик – струм через зразок

Композит силікон -11%μNi-4%nNi сформований в магнітному полі



Схематичне зображення акселерометру деформаційного типу

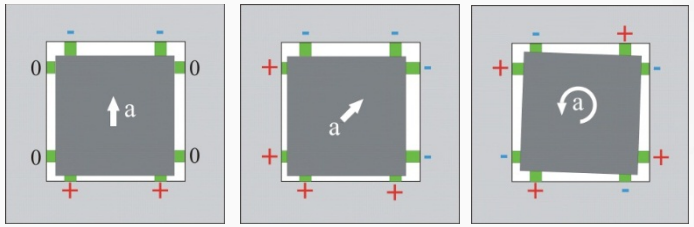
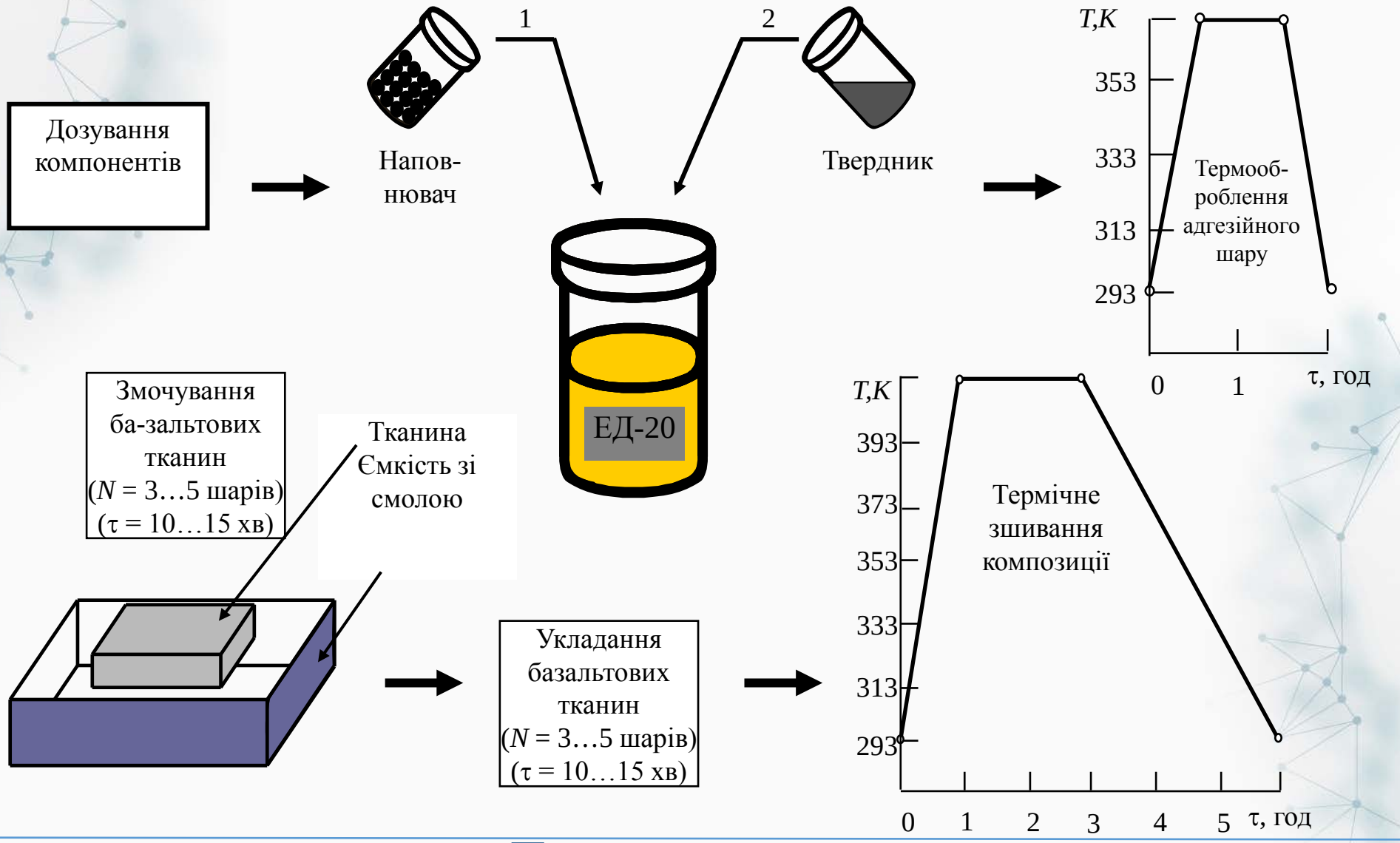
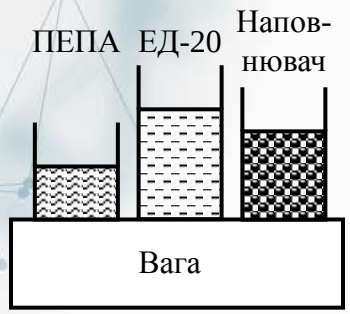


Схема формування епоксикомпозицій

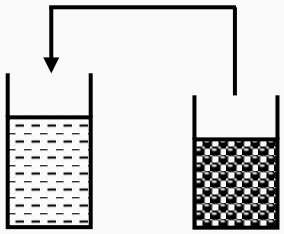


Технологічна схема формування захисних покриттів на основі епоксикомпозицій

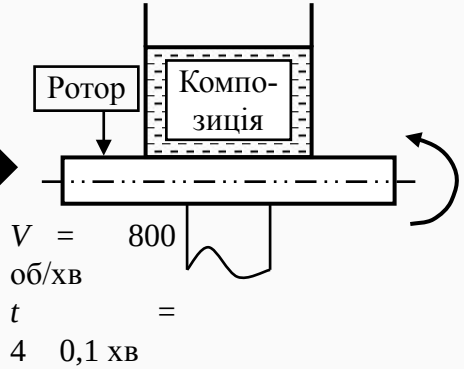
Дозування компонентів



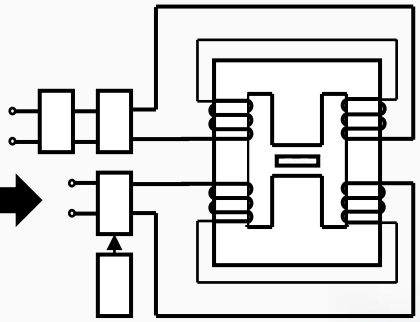
Введення наповнюва--- ча у епоксидну смолу



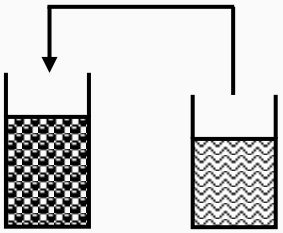
Гідродинамічне суміщення компонентів



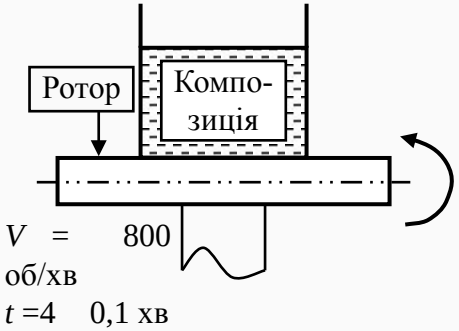
МО композиції



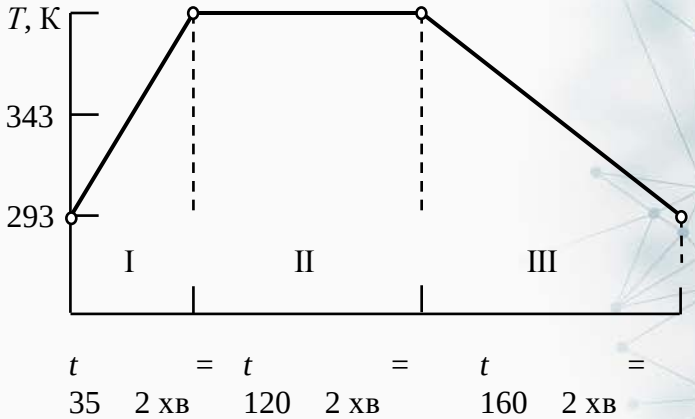
Введення твердника ПЕПА у композицію



Гідродинамічне суміщення компонентів

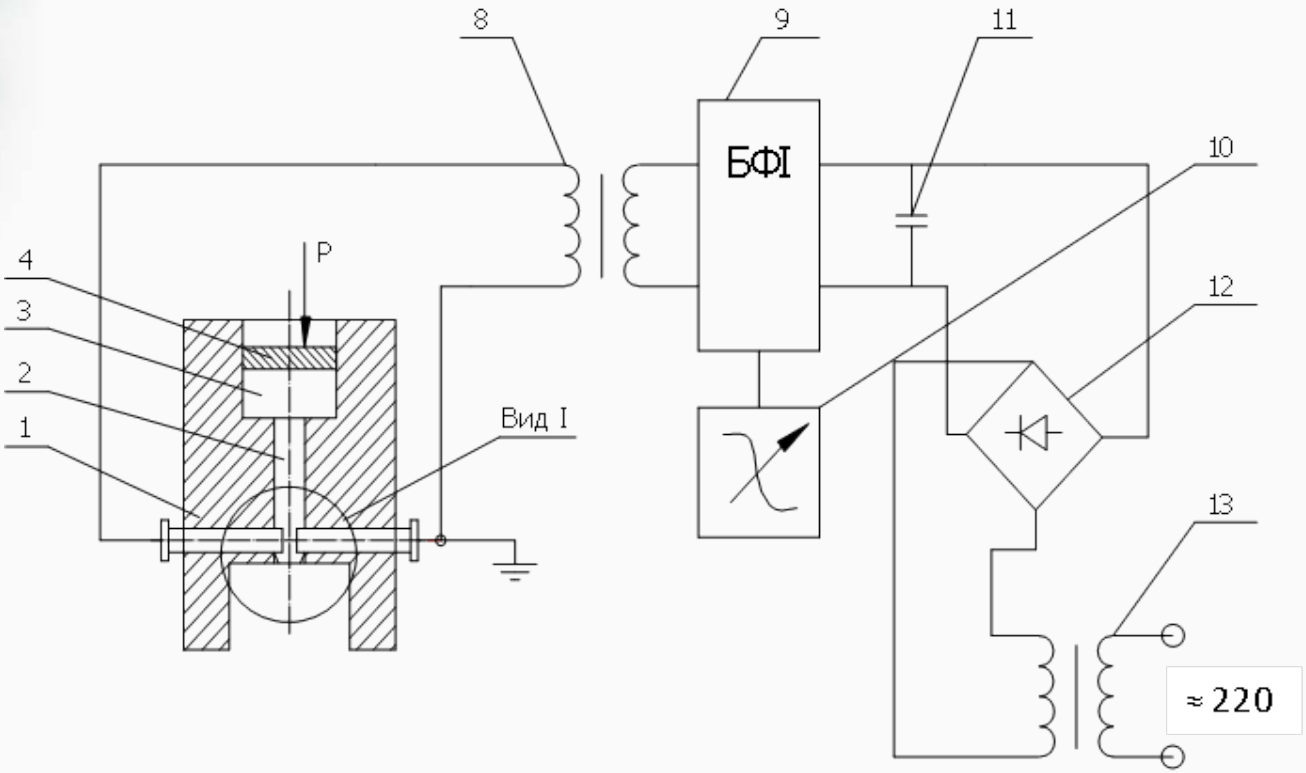


Нанесення і термічне зшивання покриття



Епоксикомпозитні покриття з матеріалів, що модифіковані електроіскровою обробкою (активація гідроударом)

Схема приладу для формування електроіскрового гідроудару

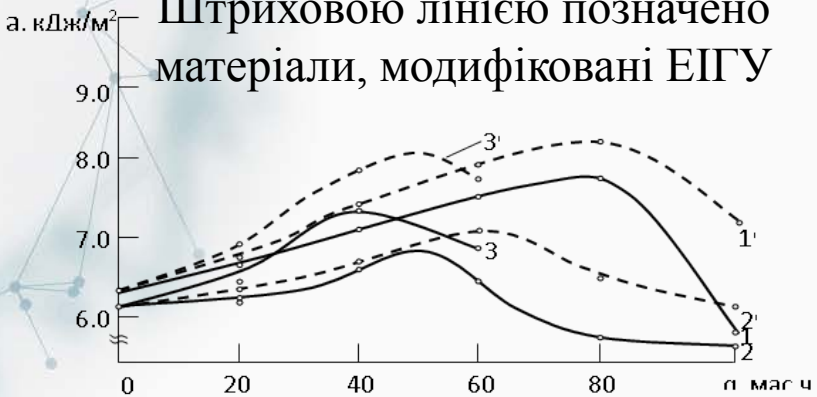


1 – корпус; 2 – канал; 3 – резервуар; 4 - поршень; 5, 7 – вікна; 6 – електроди; 8 – трансформатор підсилення; 9 – блок формування імпульсів; 10 – генератор імпульсів; 11 – конденсатор фільтра; 12 – діодний місток; 13 – високовольтний трансформатор.

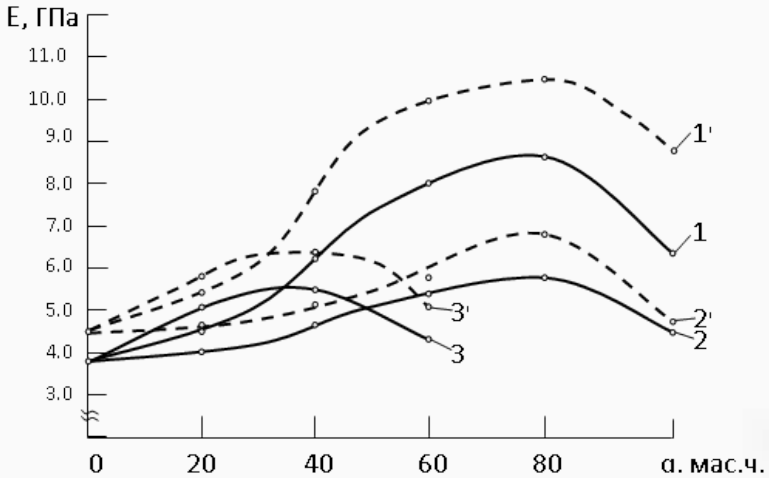
Електрогідравлічна обробка композитів

УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ КОМПОЗИТІВ

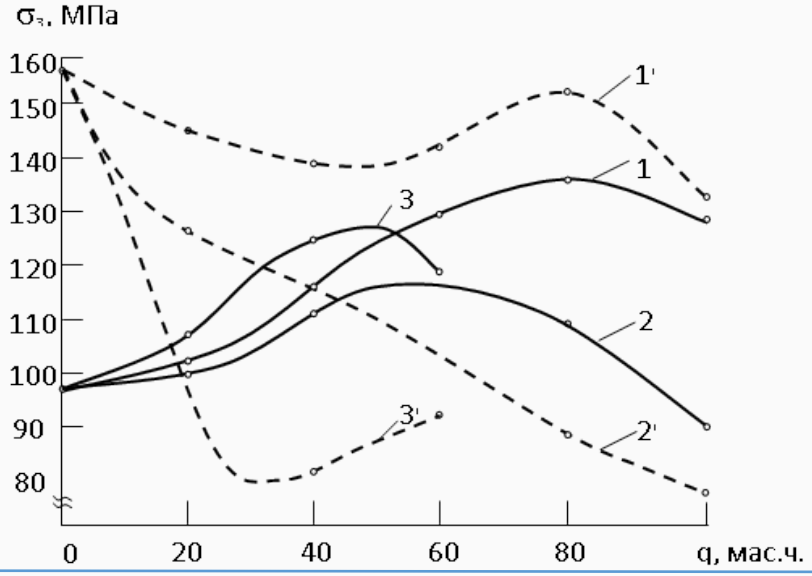
Штриховою лінією позначено матеріали, модифіковані ЕІГУ



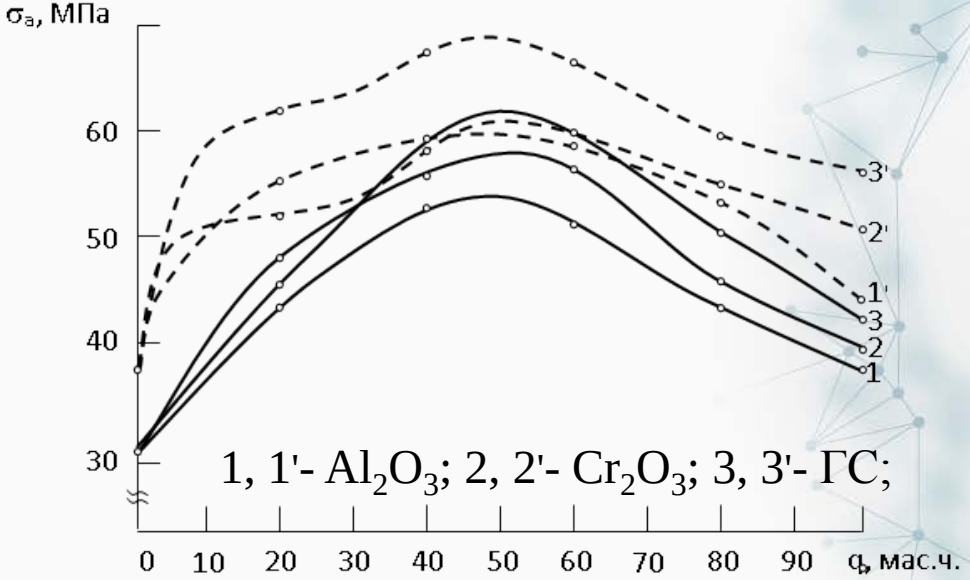
МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ ПРИ ЗГИНАННІ



РУЙНІВНЕ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЗГИНАННІ



АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ



1, 1'- Al_2O_3; 2, 2'- Cr_2O_3; 3, 3'- ГС;

Порівняльні показники властивостей захисних покриттів

Показник	ПКП 1	ПКП 2	ПКП 3	КЕП	УР41	ГЕС1
Ударна в'язкість, кДж/м^2	11,22	11,54	12,08	7,81	6,59	–
Руйнівне напруження при стисканні, МПа	292	361	412	–	218	186
Внутрішні напруження, МПа	5,21	6,12	6,24	8,16	7,86	–
Адгезійна міцність, МПа	70,44	78,12	77,60	48,8	39,1	24,6
Теплостійкість, К	412	388	401	–	354	–
Корозійна тривкість в 3%-розчині NaOH, Ом×см^2	5,84	6,18	6,92	4,38	4,02	2,57
Електроопір при Т=413К Ом×м	109,4	118,9	102,2	41,18	65,27	71,18

Впровадження покриттів дозволяє:

-підвищити корозійну тривкість обладнання у 2,2…2,4 рази;

-збільшити міжремонтний період роботи у 3,5…4,0 разів

Ультрафіолетова обробка

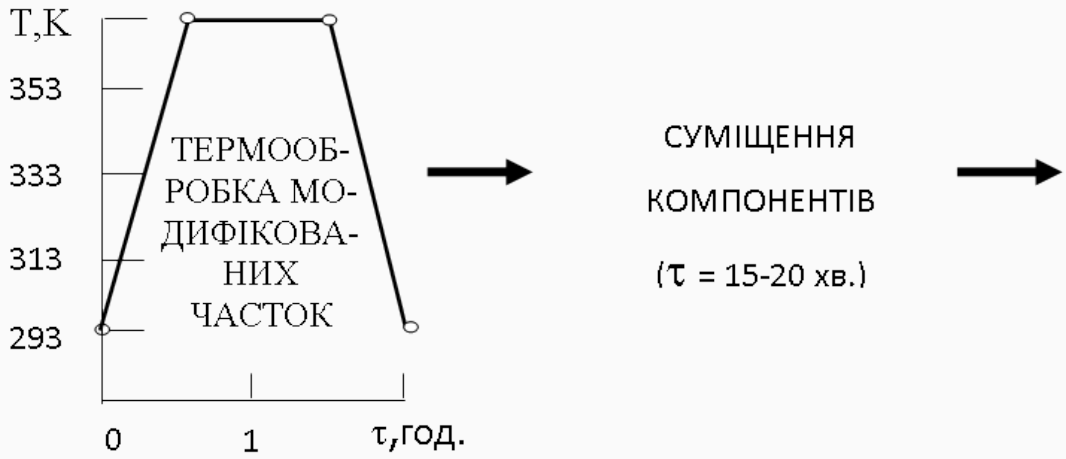
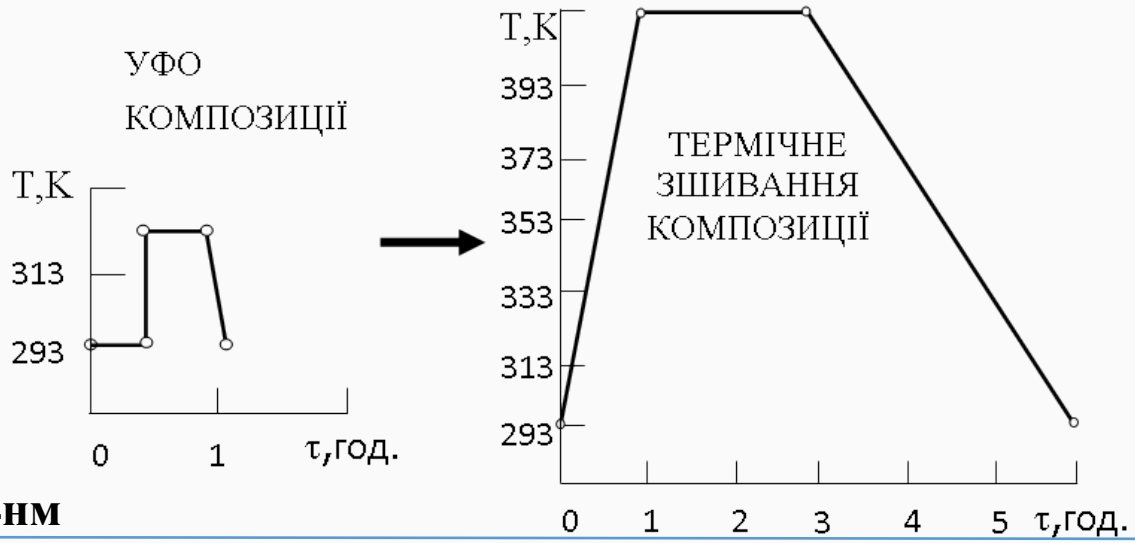
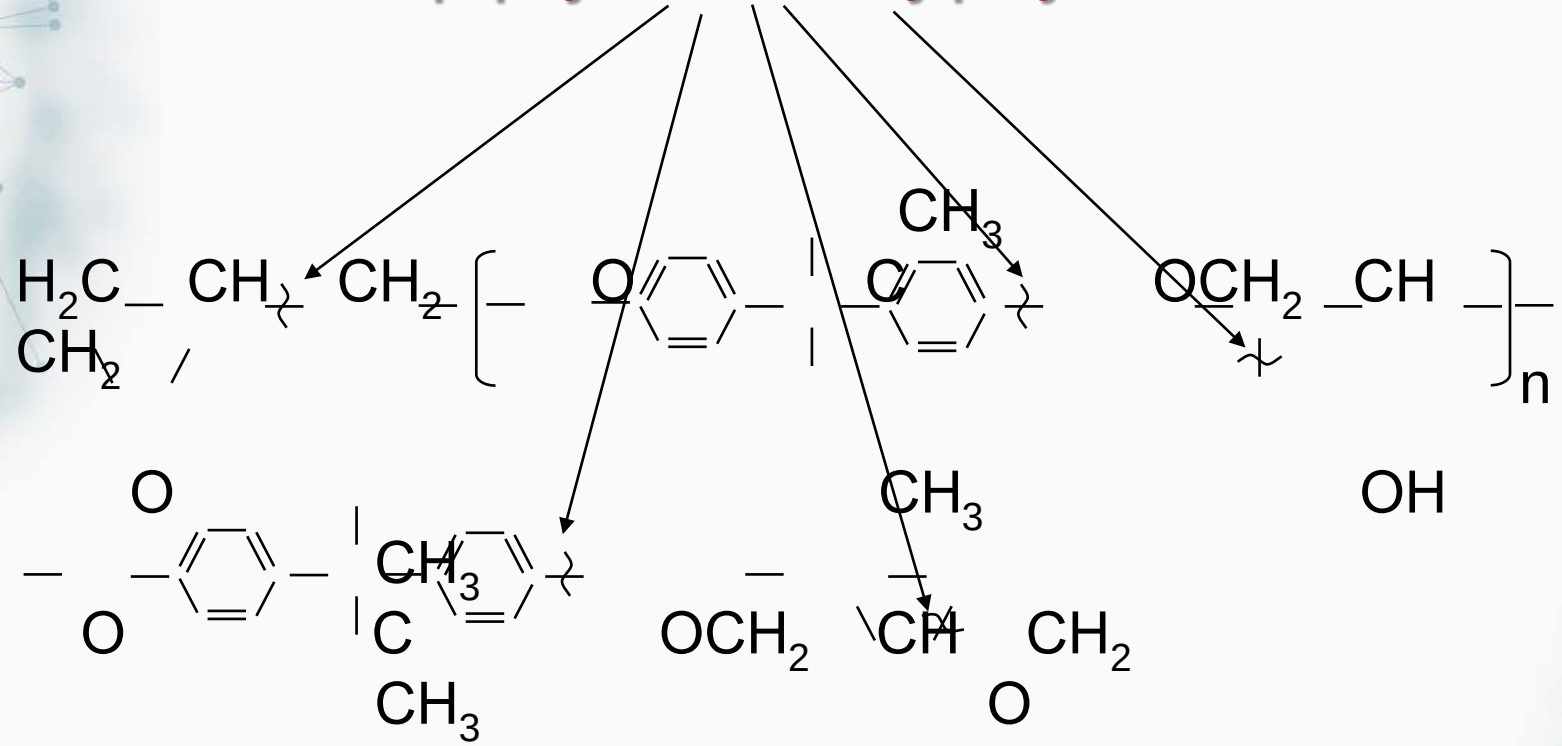


Схема режимів формування композицій і її складових



P=15V/A, Lхв=254нм

Схема формування ЗПШ у результаті УФО



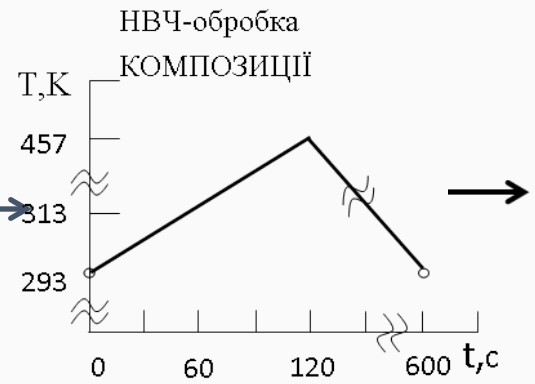
Далі проводили аналогічні дослідження функційних характеристик матеріалів і покриттів як і при електроіскровій обробці.

Особливістю УФО є те, що можна обробляти пошарово покриття по мірі їх нанесення, а надалі формувати конструкцію багатошарового покриття.

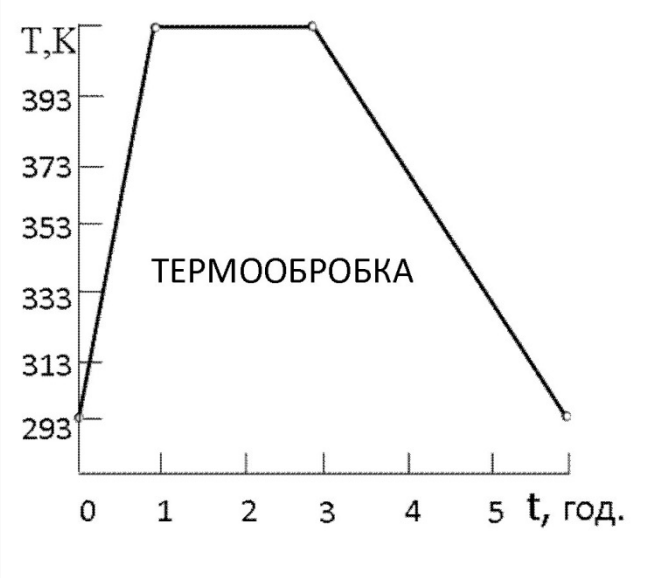
НВЧ- та магнітна обробка

Технологічна схема формування композиту

СУМІЩЕННЯ ЕД-20 і ПДЕА-4 (t=10-15хв) → ДОДАВАННЯ НАПОВНЮВАЧА ТА ПОДАЛЬШЕ СУМІЩЕННЯ КОМПОНЕНТІВ (t=5-10 хв) →



→ ДОДАВАННЯ ПЕПА ТА ПОДАЛЬШЕ СУМІЩЕННЯ КОМПОНЕНТІВ (t=10-15 хв) → ФОРМОУТВО-РЕННЯ ТА ВИТРИМКА МАТЕРІАЛУ ЗА НОРМАЛЬНИХ УМОВ (t=24 год) →



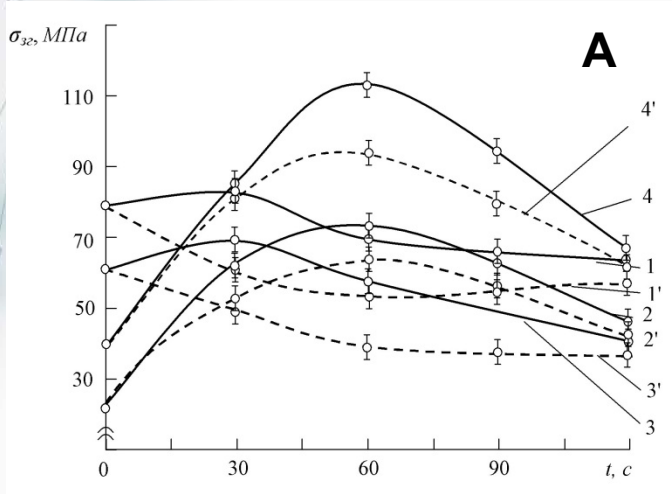
Параметри оброблення:

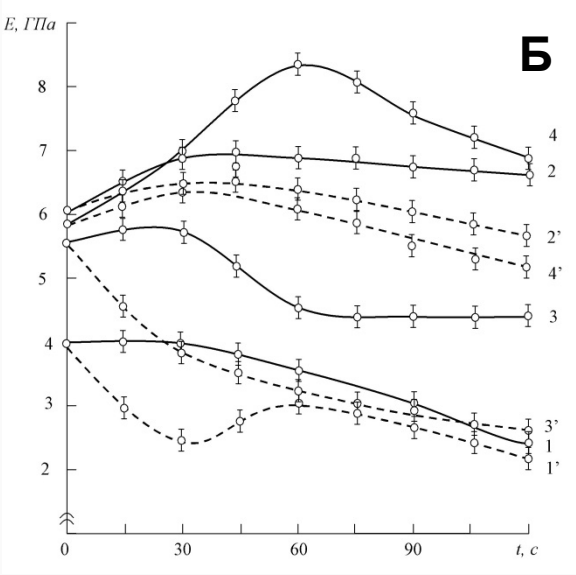
Робоча напруга – 220 В, Частота струму – 50 Гц

Частота випромінювача - 2450МГц, Довжина хвилі - 0,1225 м

Тривалість опромінення композицій від 0 с до 120 с

Фізико-механічні властивості епоксикомпозитів оброблених НВЧ-полем та при додатковому нагріві



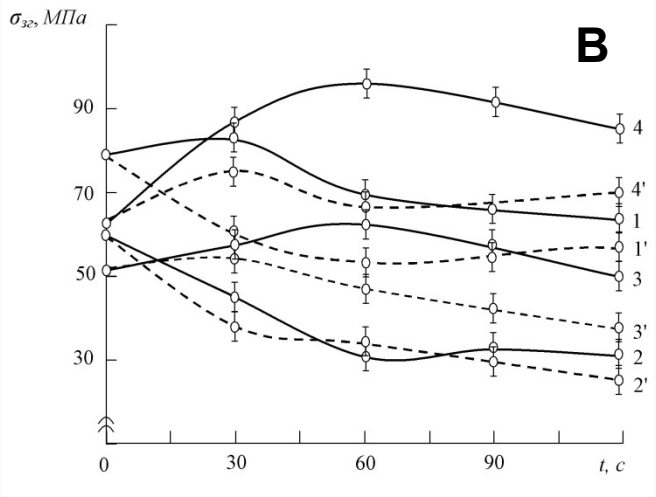


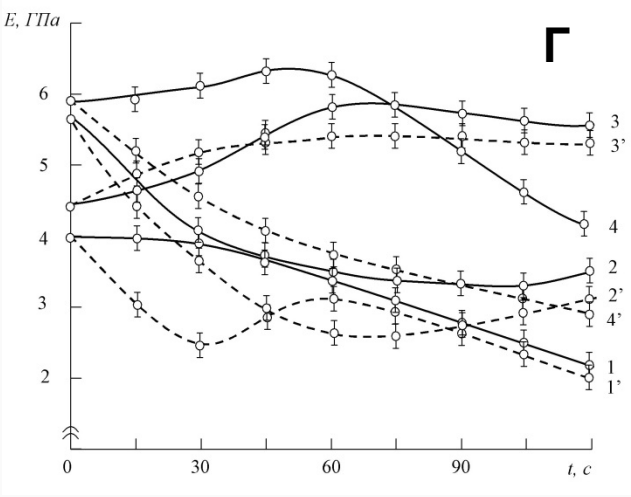
Залежність руйнівного напруження при згинанні (А) та модуля пружності при згинанні (Б) від тривалості НВЧ-обробки та додаткового нагріву (5 – 10мкм)

1, 1’ – Епоксидна матриця;
2, 2’ – ЧШ;
3, 3’ – Cr_2O_3;
4, 4’ – TiB_2.

НВЧ-обробка.

Додатковий нагрів.





Залежність руйнівного напруження при згинанні (В) та модуля пружності при згинанні (Г) від тривалості НВЧ-обробки та додаткового нагріву (63мкм)

1, 1’ – Епоксидна матриця;
2, 2’ – Лускати графіт;
3, 3’ – B_4C;
4, 4’ – SiC.

Діаграма температурно-часових режимів формування нанокомпозитів з використанням УЗО

I - нагрівання незалежно наповнювача і епоксидного олігомера до T = 353 2К (τ = 20 0,1 хв);

II - витримка епоксидного олігомера і наповнювача у пічці (τ = 20 0,1 хв);

III - гідродинамічне суміщення олігомера ЕД-20 і нанонаповнювача (τ = 1 0,1 хв);

IV – МО, УЗО композиції (τ = 1,5 0,1 хв), електроіскровий гідроудар, УФ-опромінення (18…20хв);

V - охолодження композиції до кімнатної температури (τ = 60 1хв);

VI - введення твердника і перемішування композиції (τ = 5 0,1 хв);

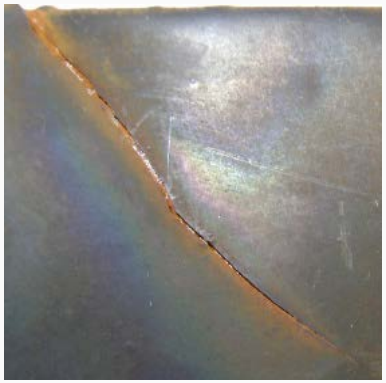
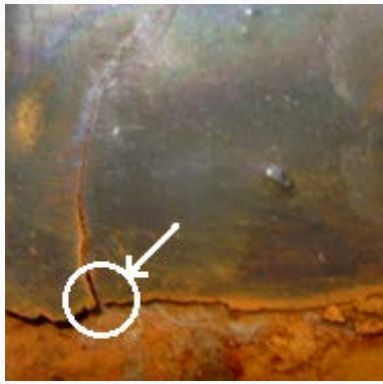
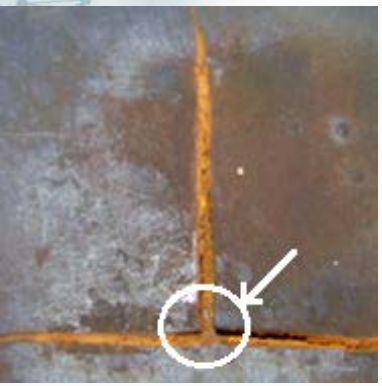
VII - витримка композиції (τ = 12 год);

VIII - нагрівання композиції до температури зшивання T = 393 2К (τ = 35 2 хв);

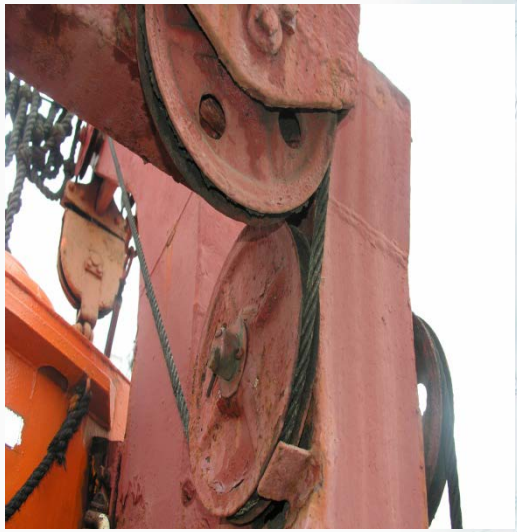
IX - термічне зшивання композиції (τ = 120 2 хв);

X - охолодження композиту у пічці (τ = 160 0,5 хв).

Дослідження дефектів у покриттях при корозійному руйнуванні в природних умовах

Види пошкоджень палубних механізмів внаслідок корозійного руйнування на суховантажних суднах

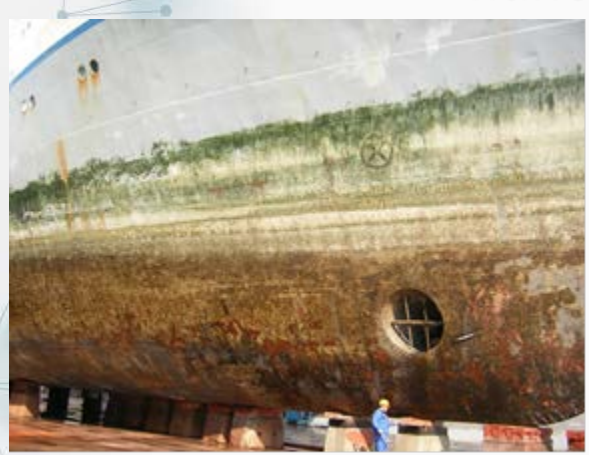


Об’єкти впровадження захисних покриттів

Дифузійний апарат

Тепломагістраль

Корозійне руйнування корпусу судна і його елементів та нанесення захисного покриття



а

б

в

г

д

е

а – корозійне руйнування корпусу судна; б – підготовка поверхні піскоструменевим методом перед нанесенням захисного покриття; в – заслінка підготовлена до нанесення захисного покриття; г – нанесення шару полімерного покриття на корпус судна; д, е – вигляд заслінки із нанесеним полімерним покриттям

Порівняльні показники властивостей розробленого і відомих захисних покриттів

Показник	ЗП 1	ЗП 2	ЗП 3	ЗП 4
Адгезійна міцність, σ_a, МПа	35,9	5…15	22…24	–
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зг}$, МПа	102,2	34…36	65…68	24…32
Модуль пружності при згинанні, E, ГПа	3,2	2,6	2,2	1,8…2,0
Ударна в'язкість, W, Дж/см^2	1,1…1,8	0,2…0,5	0,4…0,9	0,1…0,4
Товщина плівки, мкм	0,1…0,2	0,1…0,2	0,1…0,3	0,2…0,5
Час повної полімеризації, год	72	168	124	92
Вартість покриття, у.о./кг	6,3	12,4	10,2	9,6

ЗП 1 – Розроблене нанкомпозитне покриття; ЗП 2 – Покриття фірми Kronocoat universal (Великобританія); ЗП 3 – Покриття фірми Marine service jaroszewicz (Польща); ЗП 4 – Покриття фірми Thordon bearings (Канада)

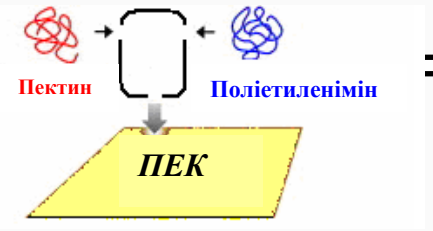
Порівняльні показники властивостей розроблених і відомих композитних матеріалів

Показник	ЕКМ	Капролон*	Тордон XL*
Модуль пружності при згинанні, E, ГПа	–	2,0	0,5
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зг}$, МПа	–	–	–
Теплостійкість, (Робоча температура) T, К	–	213…380	273…. 318
Робочий коефіцієнт тертя без змащування, f	0,20…0,22	0,30…0,40	0,32…0,38
Робочий коефіцієнт тертя у агресивному середовищі (морська вода), f	0,038…0,045	0,05...0,20	0,18…0,25
Інтенсивність зношування в умовах сухого тертя, I_m, мг/км	0,4…0,5	0,5…0,7	0,5…0,6
Інтенсивність зношування в умовах впливу морської води, I_m, мг/км	0,05…0,07	0,15…0,28	0,35…0,40

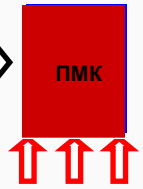
Примітка. Дослідження проводили в умовах сухого тертя при питомому навантаженні p = 1 МПа, а в умовах впливу морської води – p = 2,7 МПа, при швидкості ковзання v = 1,0 м/с.
*матеріали, які застосовують при формуванні дейдвудних підшипників у суднобудуванні.

Формування срібловмісних нанокомпозитів під дією теплового поля

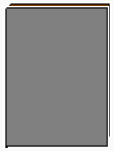
Поліелектролітні комплекси



ПМК
Пектин–Ag^+–ПЕІ



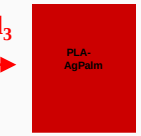
Нанокомпозит
ПЕК–Ag



пектин$^-$ - ПЕІ$^+$
Na-КМЦ$^-$ -β-CD$^+$-Ag
крохмаль$^-$ - крохмаль$^+$- Ag
пектин$^-$-крохмаль$^+$-Ag
пектин$^-$-хітозан$^+$-Ag

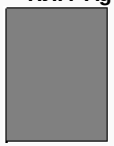
Біорозкладний полімер полілактид

ПЛА+AgПальмітат+ПЕІ(Хітозан) $\xrightarrow{CHCl_3}$



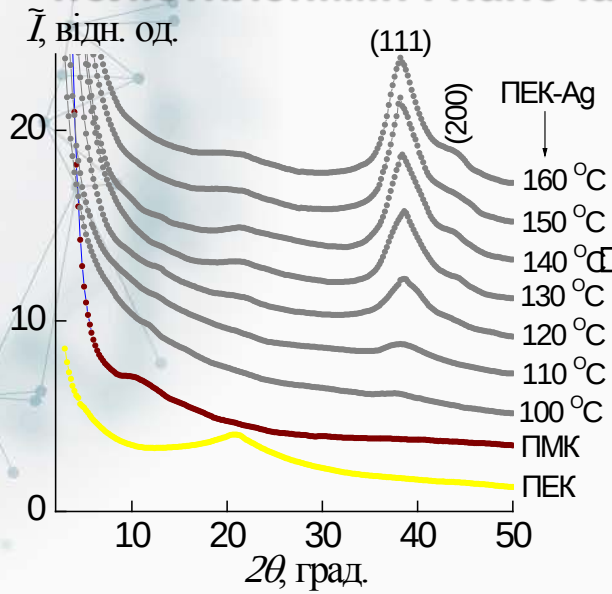
T =160 С
t =5 хвилин

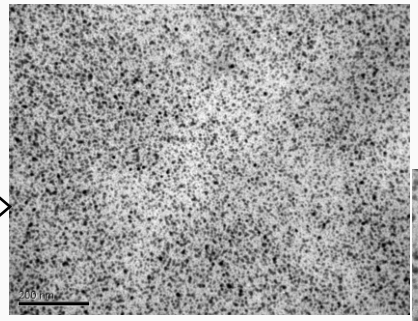
Нанокомпозит
ПЛА–Ag

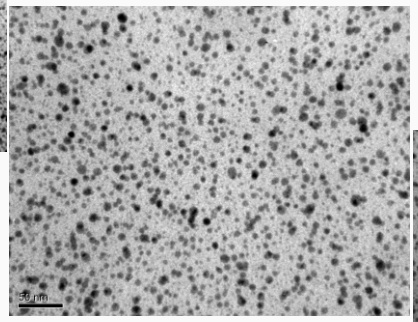


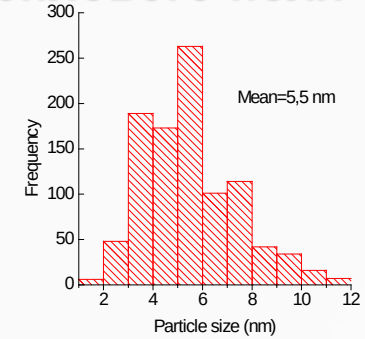
розчини срібловмісних нанокомпозитів | **порошки срібловмісних нанокомпозитів** | **плівки срібловмісних нанокомпозитів** | **покриття, що містять наночастинки срібла**

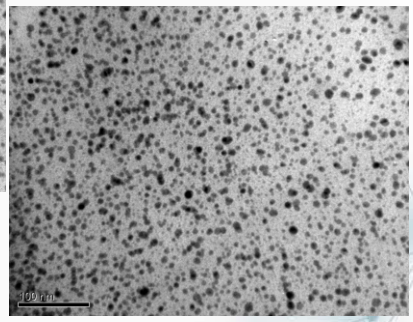
Нанокомпозити на основі поліелектролітних комплексів пектин-поліетиленімін і наночастинок Ag, сформованих під дією теплового поля

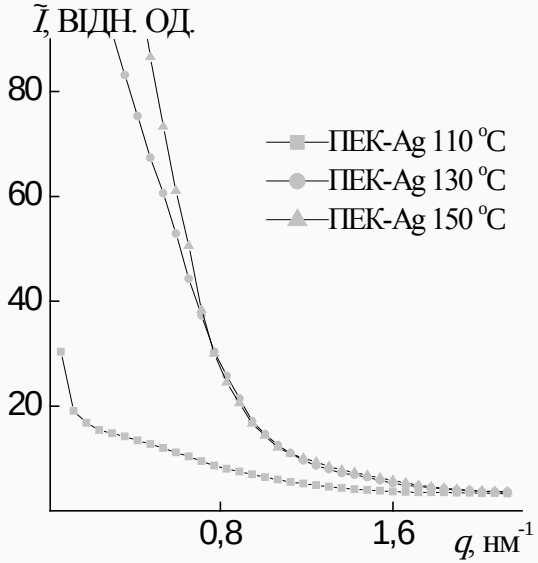








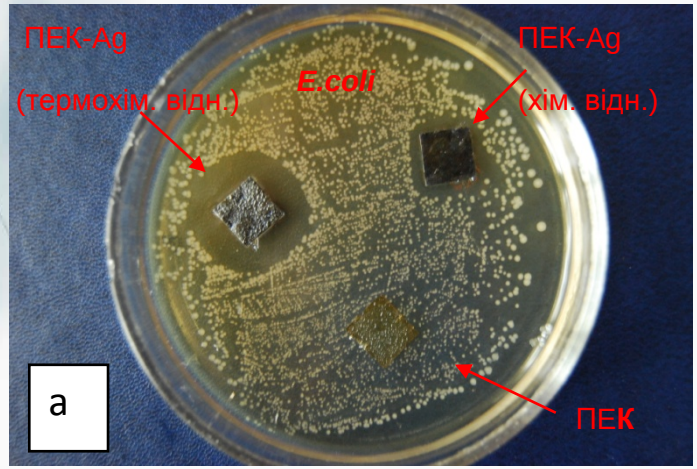


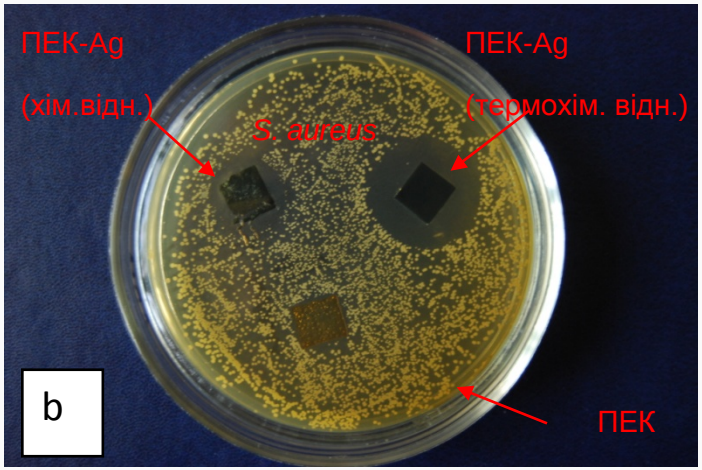


Структурні параметри досліджуваних полімерних систем

Полімерна система	l_p, нм	Q', відн. од.
ПЕК–Ag (110 ˚C)	7,7	11
ПЕК–Ag (130 ˚C)	5,5	31
ПЕК–Ag (150 ˚C)	6,1	36

Антимікробні властивості досліджуваних нанокомпозитів (пектин-ПЕІ-Ag)





Фізичне поле, під дією якого отримано нанокомпозит	Діаметр зони затримки, мм	
	Staphylococcus aureus	*Escherichia coli*
Теплове поле	ПЕК–Ag 27.6±1.2	ПЕК–Ag 26.6±1.2
Хімічне відновлення	ПЕК–Ag 18.2±0.8	ПЕК–Ag 17.6±0.6
Контрольний зразок	ПЕК 0	ПЕК 0

Формування полімерних матеріалів для космічної техніки під дією теплового поля

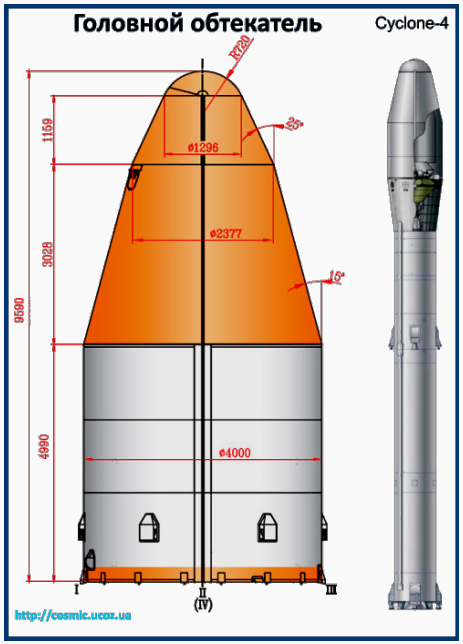
В роботі розроблено та з використанням теплових полів створено:

- ✓ терморегулюючого лакофарбового покриття для захисту корпусів РКТ;
- ✓ тонкошарового теплозахисного покриття для зовнішнього теплового захисту перспективної РКТ, проектованої ДП “КБ “Південне”, від дії теплових полів в процесі експлуатації.

АКТИВНІ

комплекс засобів, що забезпечують регулювання теплообміну і передачу тепла за допомогою теплообмінних пристроїв і спеціальних агрегатів.

Недоліки: Активні системи терморегулювання занадто громіздкі, важкі і вимагають додаткових пристроїв для управління космічним апаратом.

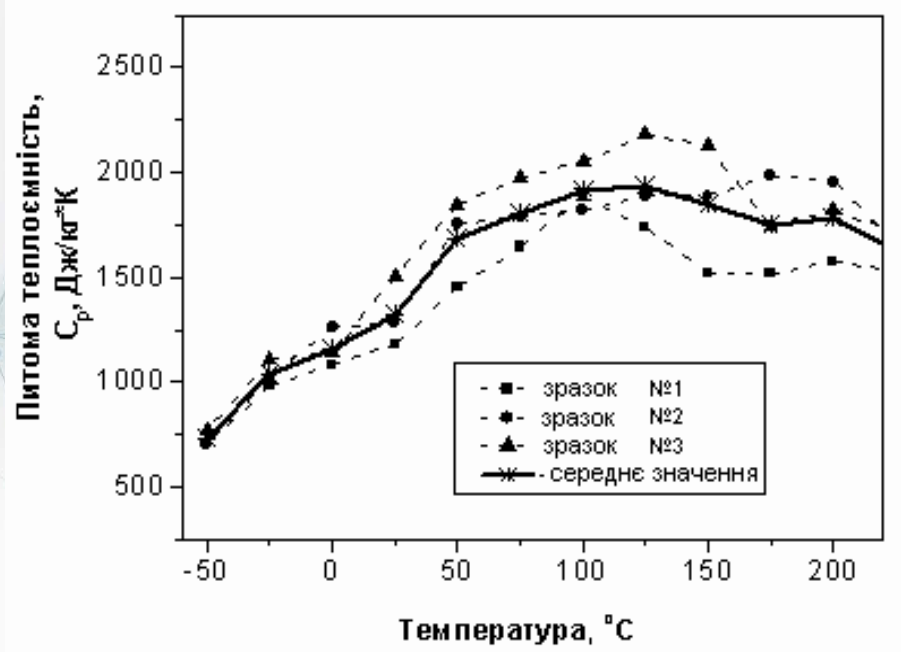


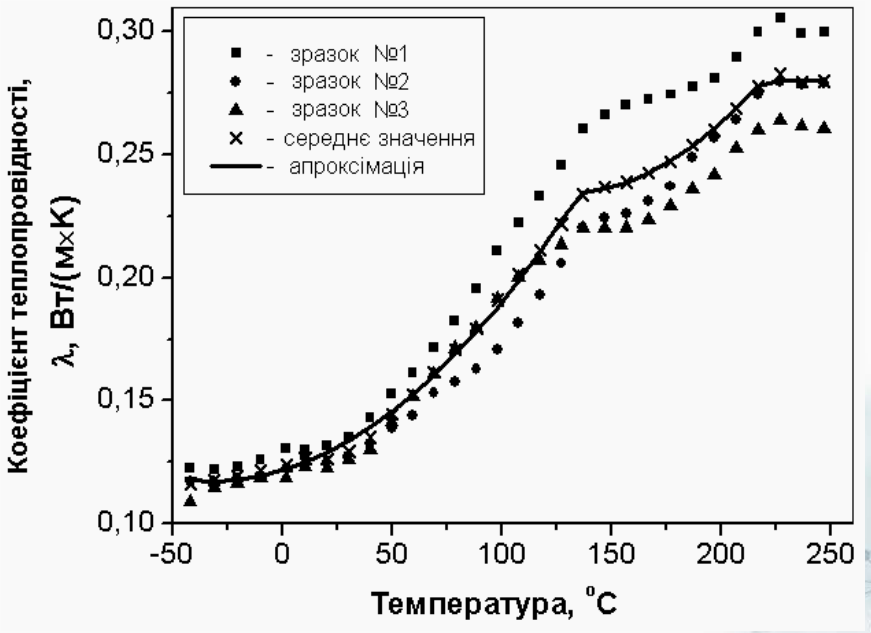
ПАСИВНІ

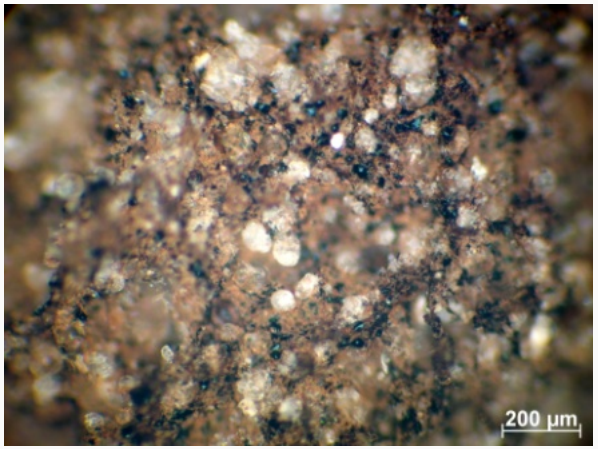
теплоізоляційні матеріали, покриття і нерегульовані низькотемпературні теплові труби.

Переваги: Пасивна система терморегулювання може бути представлена Терморегулюючі покриття наноситься безпосередньо на поверхню космічного апарату.

Теплозахисне покриття для зовнішнього теплового захисту РКТ

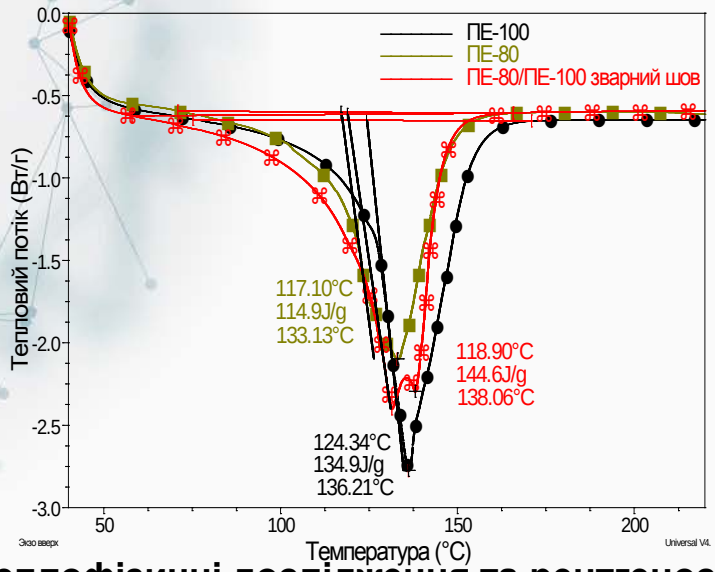


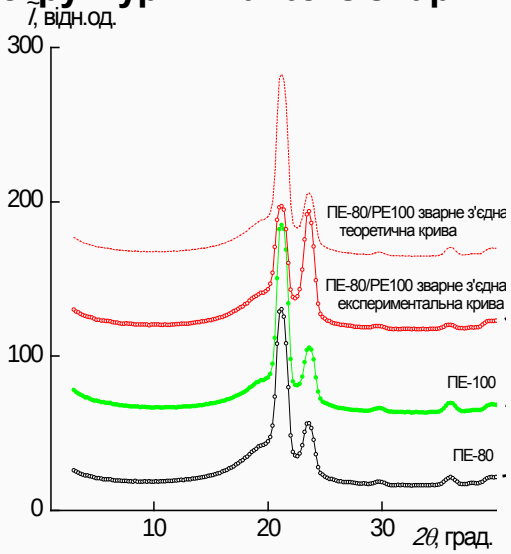


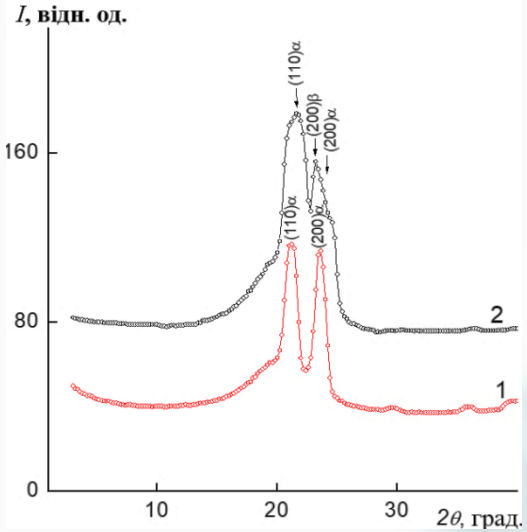


Процеси зварювання полімерних матеріалів і виробів з них під дією фізичних полів

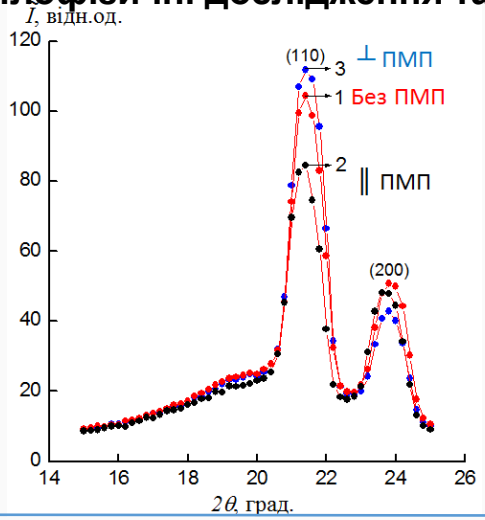
Теплофізичні дослідження та рентгеноструктурний аналіз зварних з'єднань (термосилове поле)

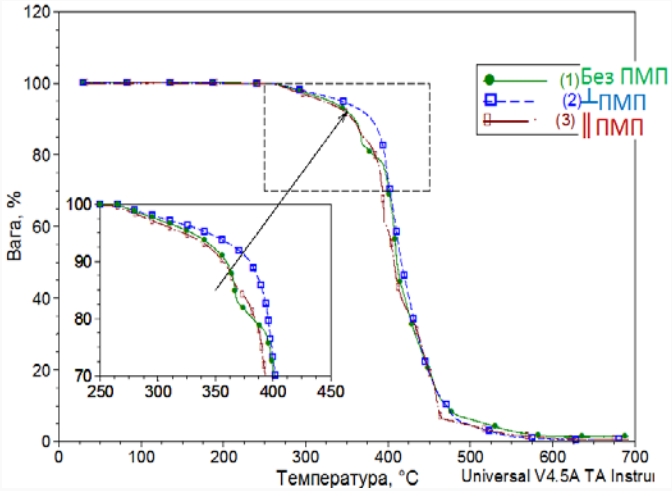


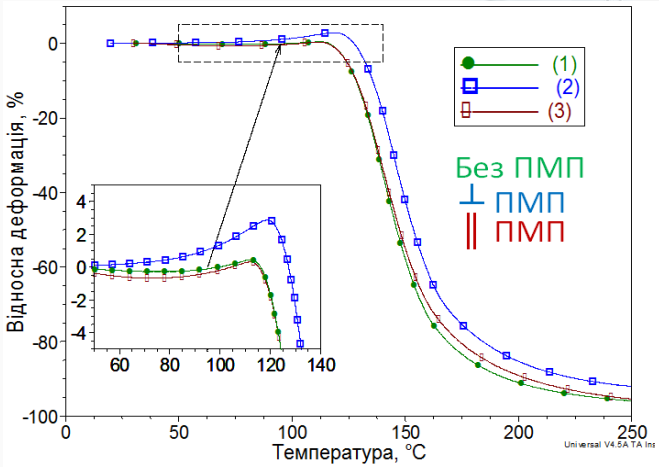




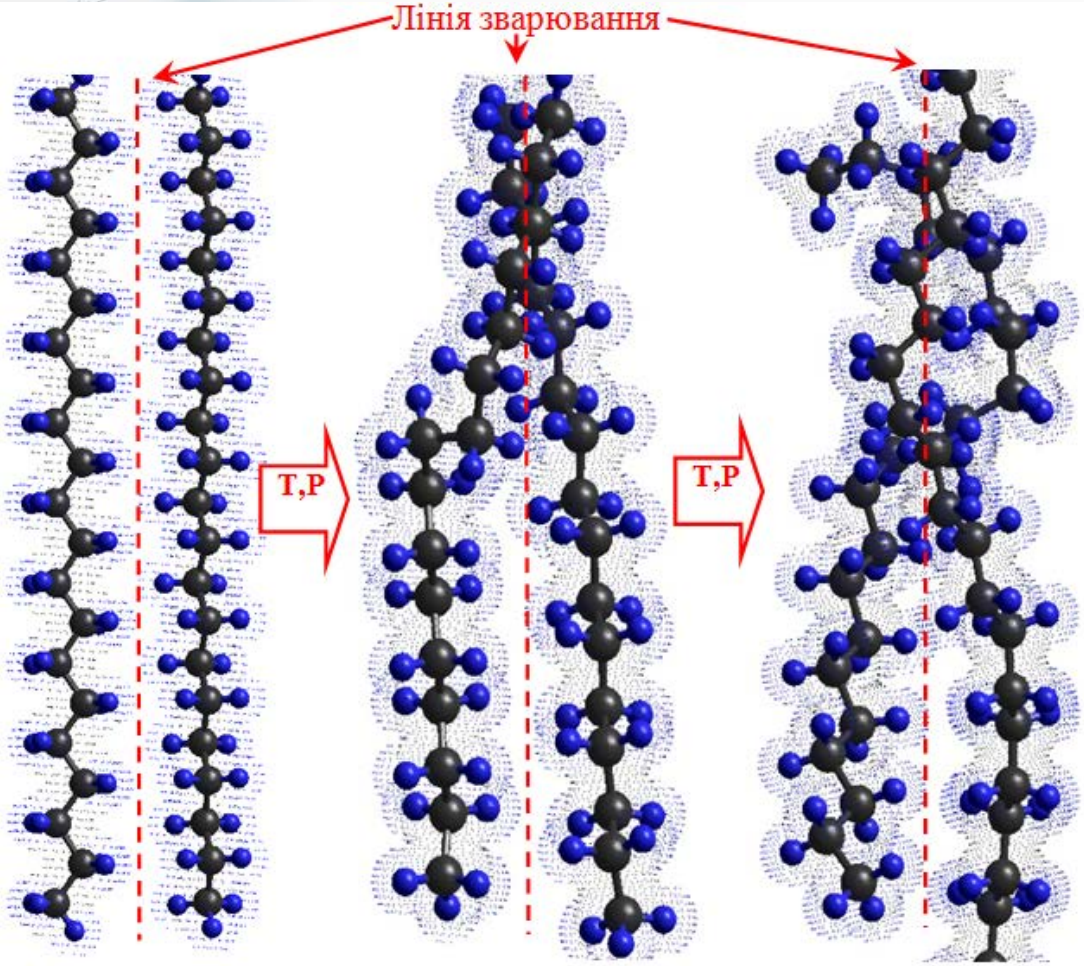
Теплофізичні дослідження та рентгеноструктурний аналіз зварних з'єднань,сформованих під ПМП

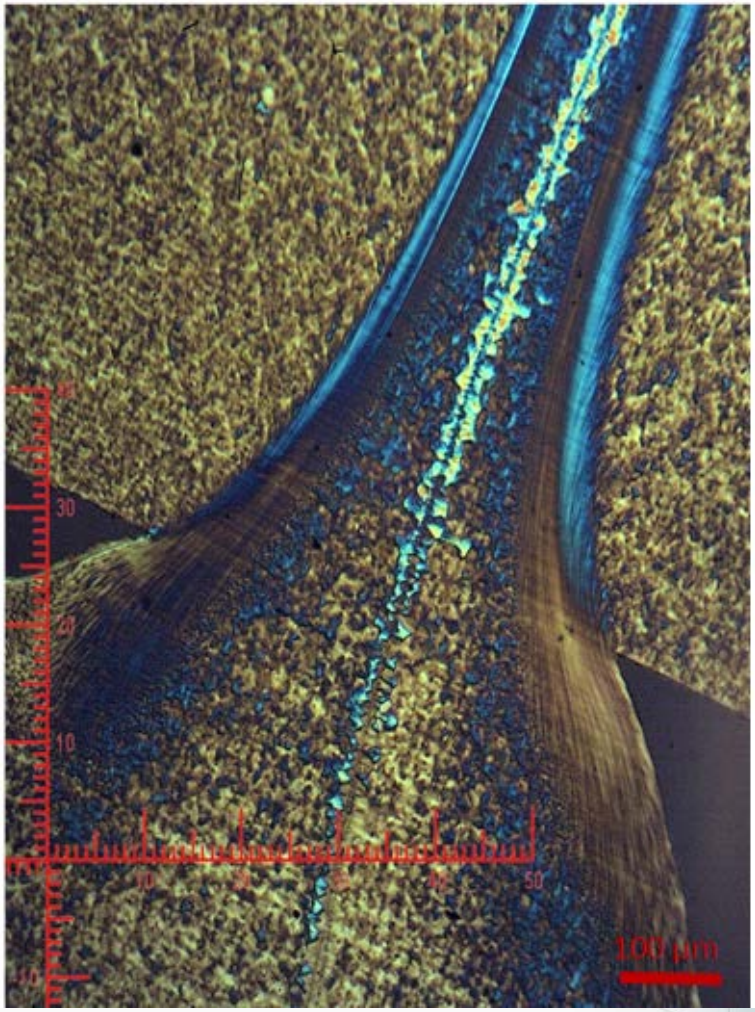




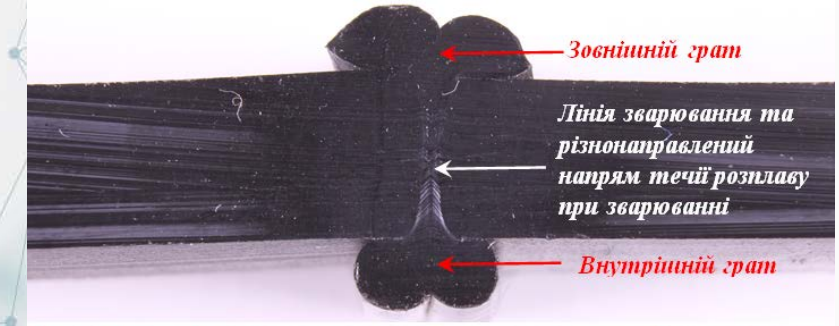


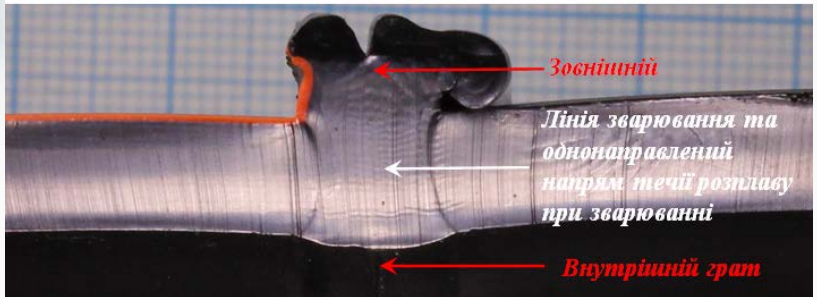
Концепція щодо механізмів зварювання під дією термосилового поля та природи зварних з'єднань полімерних матеріалів

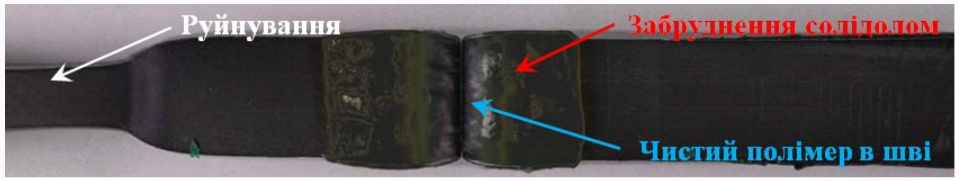


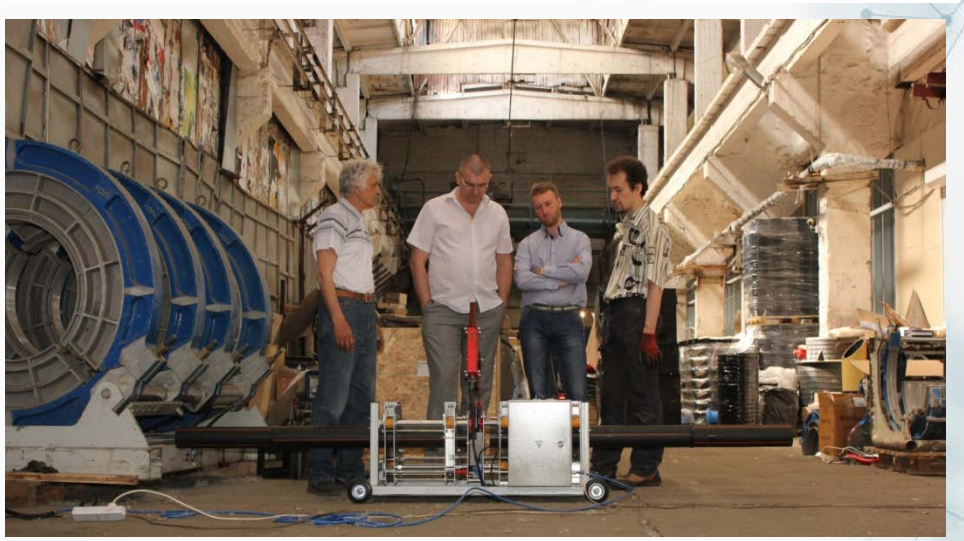


Інноваційні технологія та обладнання для зварювання полімерних труб під дією термосилового поля

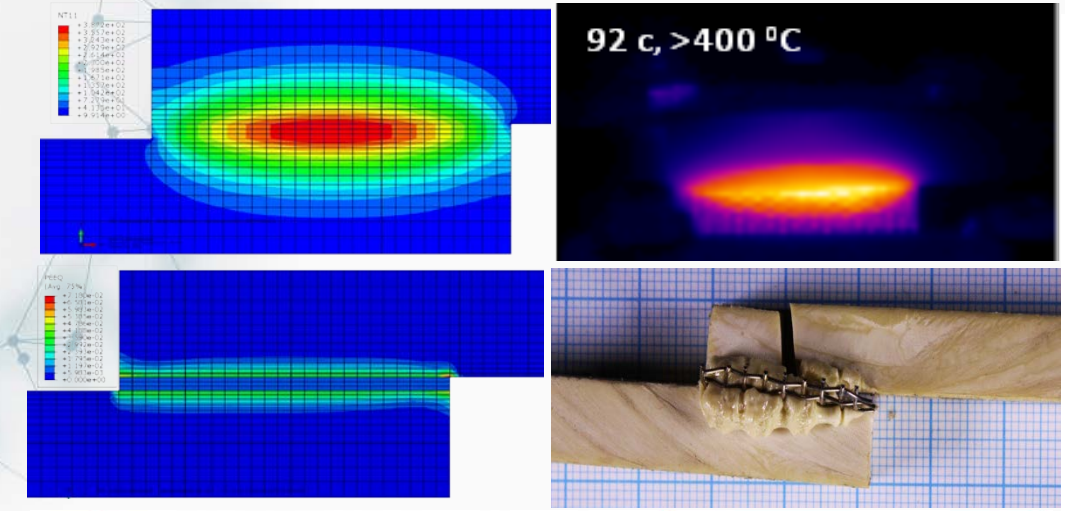


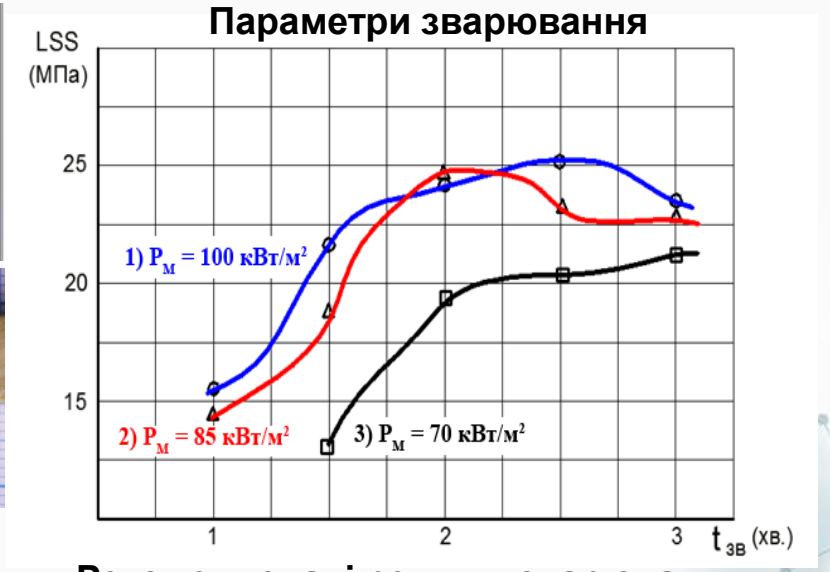






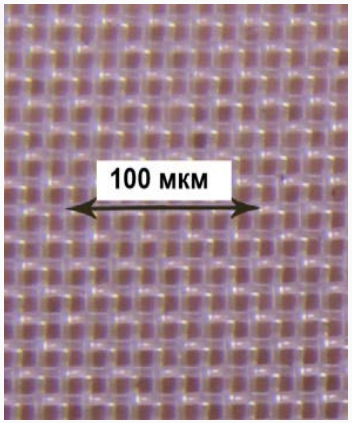
Технологія зварювання листових виробів зі складною геометрією поверхні з'єднання під дією електричного та термосилового полів

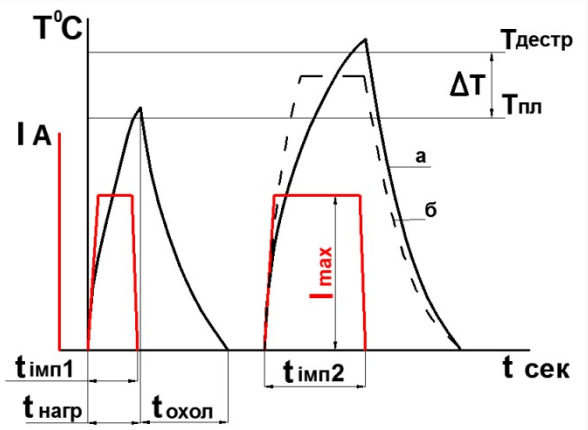


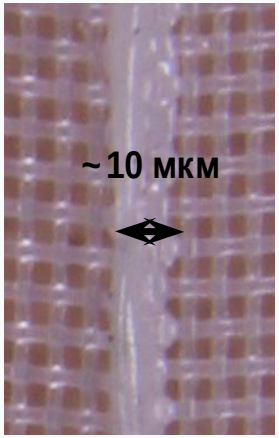


Технології зварювання тонких та надтонких полімерних плівок під дією термоімпульсного та ВЧ електричного полів

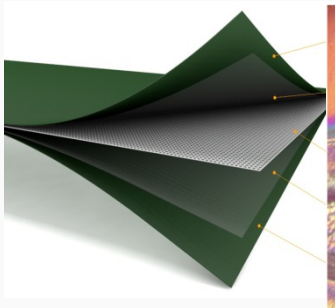
Розробка технології та обладнання для виробництва фільтрів тонкої фільтрації

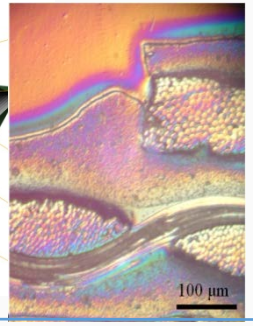






Розробка конструкцій та технології виробництва ІПШ медичного призначення





Використання наукових результатів роботи та публікації

За результатами роботи:

опубліковано 298 наукові публікації, з них:

- 14 монографій
- 7 глав у книгах
- 277 статей у міжнародних та фахових виданнях України.

одержано 156 патентів, з них:

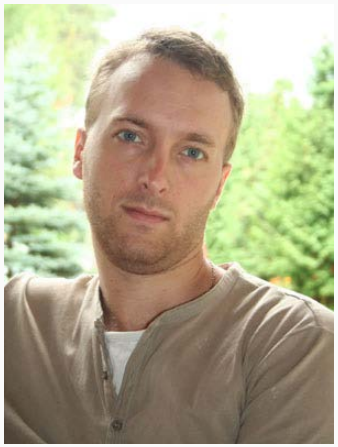
- 12 авторських свідоцтв
- 14 патентів на винахід
- 130 патентів на корисну модель

підготовлено і захищено:

- 3 докторських дисертації
- 19 кандидатських дисертацій,

За статистикою Scopus індекс Хірша наведених публікацій становить 19, а кількість цитувань – 1879.

Впровадження прикладних результатів роботи



Дякуємо за Ваш час та увагу!!!