

УДК 667.64:678.026

## ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАПОВНЮВАЧАМИ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ТА ПРИРОДИ

*Букетов А.В., Скирденко В.О., Моїсеєнко Л.Л.*

*Херсонська державна морська академія*

*Аналіз проведених досліджень дозволяє констатувати, що обробка високочастотним електромагнітним імпульсним полем епоксидного олігомеру несуттєво впливає на електричну міцність матриці. Серед досліджуваних композитів з дрібнодисперсними наповнювачами (10...20 мкм) найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками карбідної шихти. Серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм найвищими значеннями електричної міцності характеризуються матеріали з добавками вугільного шлаку. Проведені дослідження можуть мати широке практичне значення у напрямку застосування епоксикомпозитних покриттів з високими діелектричними характеристиками.*

*Ключові слова:* епоксидний композит, феромагнітні наповнювачі, діелектрики, напруга пробою, електрична міцність.

**Постановка проблеми.** Розвиток нових технологій у виробництві вимагає розробки перспективних напрямків створення нових композитних матеріалів (КМ) для різних галузей приладобудування, суднобудування, машинобудування, електрорадіопромисловості та будівництва. Відповідно застосування технологічних прийомів формування композитів вимагає наявності об'єктивної науково-практичної інформації стосовно прогнозованого регулювання показників фізико-механічних та електротехнічних характеристик полімерних КМ.

Зокрема, дослідження електричних властивостей полімерних КМ, що мають властивості діелектриків, мають велике значення для електротехнічної та радіоелектронної галузей виробництва. При цьому слід зазначити, що застосування енергетичних методів модифікації структури і властивостей епоксикомпозитів значно розширюють межі їх використання.

Відомо [1], що епоксидні смоли – це велика група матеріалів, для яких характерна наявність макромолекул з полярними епоксидними групами. Виходячи з цього, епоксикомпозити є полярними діелектриками. Найбільш розповсюдженим видом епоксидних смол є діанові олігомери, які отримують шляхом поліконденсації епіхлоргідрину з діокси-дифеніл пропаном у присутності лугів. Усі епоксидні смоли у незатвердженному стані добре розчинні в ацетоні та в інших полярних розчинниках. При додаванні твердника відбувається затвердження макромолекул діанових олігомерів, внаслідок чого отримують тривимірний зшитий полімер. При цьому затвердіння епоксидних олігомерів проводять твердниками за кімнатної температури (холодне зшивання) або за підвищених температур (100...150 °С) (гаряче зшивання). Твердники ангідридного типу застосовують при гарячому зшиванні. Це дає можливість отримувати епоксикомпозитні матеріали з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Як правило, вони відзначаються поліпшеними механічними, електротехнічними властивостями, а з точки зору безпечності – є не такими токсичними, порівняно з КМ, затвердженими амінами при холодному зшиванні.

Епоксикомпозити на основі епоксидної смоли широко застосовують в електро- та радіотехніці як герметизуючі та електроізоляційні матеріали, що мають поліпшену адгезію до металів, кераміки, неорганічного скла. Слід зазначити, що поряд з поліпшеними механічними властивостями, композити на основі епоксидних смол мають також високі показники хімічної та атмосферної стійкості.

Серед основних діелектричних властивостей епоксикомпозитів найважливішими є: поверхнева і питома електропровідність, діелектричні втрати, трекінгостійкість та електрична міцність (електропробій). Електрична міцність – одна з найважливіших характеристик діелектрика, позаяк виникнення пробою може призвести до виходу з ладу

електричного обладнання, виникнення пожежі, займання електроустаткування та інших небажаних наслідків [2].

Явище, при якому матеріал втрачає електроізоляційні властивості, називають пробоем діелектрика. За умови підвищення напруги ізоляції напруженість електричного поля буде перевищувати критичне значення наскрізного струму в діелектрику, внаслідок чого останній миттєво зростає. При цьому опір діелектрика зменшується до значення, яке спричиняє коротке замикання між електродами. Напругу, яка діє в момент пробую, називають пробивною, а напруженість електричного поля – електричною міцністю [3]. Залежно від властивостей ізоляції та потужності джерела електричної енергії, за допомогою якого подають напругу на зразок, після пробую в ізоляції спостерігають наступні перетворення:

- у зоні пробую виникає іскра або електрична дуга (при великій потужності джерела напруги), що зумовлює розтріскування, обгорання та плавлення матеріалу;
- у зоні пробую, як правило, спостерігають його наслідки у вигляді пробитих, проплавлених або пропалених отворів. При повторній подачі напруги пробій зразків спостерігають при значно менших її величинах, порівняно з початковим варіантом.

Зазначене вище вказує на необхідність розробки нових епоксикомпозитних матеріалів, які б за рахунок наявності відповідних наповнювачів забезпечували протидію явищу виникнення пробую в ізоляційному покритті. З іншого боку, навпаки, цікавим з практичного погляду є створення струмопровідного покриття, яке б відзначалося екрануючими властивостями. Це, у свою чергу, дозволить захищати конструкції установок та приладів від руйнування за рахунок своїх провідних властивостей (тобто, у них виникають струми розряду).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поряд з електричним, тепловим і електрохімічним пробоем діелектриків відомі також іонізаційний, електромеханічний та електротермічний складові пробую. Відомо [2], що незалежно жоден із зазначених механізмів пробую на практиці не зустрічається.

Електричний пробій зумовлений руйнуванням діелектрика внаслідок його ударної іонізації електронами і йонами. Як правило, його спостерігають впродовж експозиції зразків в межах часу від  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  с. Тепловий пробій передбачає руйнування зразка за рахунок локального енерговиділення при наявності струму в середовищі діелектрика.

Електротермічний пробій є характерним для крихких діелектриків, що мають порожнини. Він виникає в результаті утворення мікротріщин під дією розрядів у газових включеннях та дислокаціях. Як правило, в таких областях структури діелектриків спостерігають підвищення температури.

Електромеханічний пробій є механічним руйнуванням полімеру при високій нарузі, що передбачає його перехід до високоеластичного стану. У результаті електричного старіння спостерігають зміну структури діелектрика і його хімічного складу. У такому випадку можна стверджувати про електрохімічний пробій полімерного матеріалу. Його, як правило, спостерігають при нарузі, яка значно менша від електричної міцності діелектрика. Електрохімічний пробій спостерігають при експозиції зразка впродовж часу  $10^3 \dots 10^8$  с.

Як зазначено вище, мінімальна прикладена до діелектрика напруга, яка спричиняє утворення в ньому струмопровідного каналу, є напругою пробую. Пробій може бути повним, неповним або частковим. Показано [2], що для твердих діелектриків характерне виникнення поверхневого пробую. У такому випадку руйнується поверхня полімерного матеріалу, утворюючи трекінг.

Залежність пробивної напруги від часу її дії називають «кривою життя» електричної ізоляції. Зниження напруги пробую від часу зумовлено електричним старінням ізоляції, а саме внаслідок дії на діелектрик тепла, світла, ультрафіолетового випромінювання та електричного поля. Електричну міцність, тобто напругу електричного поля при пробі ізоляції в однорідному електричному полі, можна регулювати за рахунок

використання епоксидних композитів з наперед заданими і прогнозованими властивостями.

**Мета роботи** – встановити залежність напруги пробою епоксикомпозитних матеріалів з різними за природою та дисперсністю наповнювачами, а також дослідити вплив обробки феромагнітного наповнювача і композицій вцілому у високочастотному магнітному полі на електричну міцність епоксикомпозитів.

**Матеріали та методика дослідження.** При формуванні КМ як зв'язувач використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Твердник вводили у епоксидний олігомер відповідно до загальноприйнятих рекомендацій [1] за співвідношення: ЕД-20 : ПЕПА – 10 : 1. Як наповнювач використовували дисперсні (63...120 мкм) порошки: сталі (Сталь 45 ГОСТ 1050-88), пермалою (45Н ГОСТ 10994-74) та вугільного шлаку (ВШ), що є продуктом згорання кам'яного вугілля з подрібненням його механічним способом.

Як дрібнодисперсні наповнювачі (10...20 мкм) використовували порошки: колоїдної сірки (КС) (ГОСТ 127.5-93), залізного сурику (ЗС), що складається із суміші мікроелементів і оксиду заліза ( $Fe_2O_3$ ) (ГОСТ 8135-74) та карбідної шихти (КБШ). Карбідна шихта є побічним продуктом при виробництві ацетилену.

Вміст часток у епоксидних композиціях становив – 50 мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. Обробку високочастотним електромагнітним імпульсним полем (ВЕІП) феромагнітних наповнювачів (Сталь 45 та ЗС) проводили на розробленій установці [4]. Установку налаштовували на такі параметри ВЕІП: напруженість електромагнітного поля –  $H = 1265$  А/м, частота –  $f = 2,25$  МГц, тривалість обробки  $\tau = 900$  с.

Епоксидні композити формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 і наповнювача, введення часток в епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсних часток; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 300 \pm 10$  с. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 0,05$  К/с до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год з подальшим їх охолодженням разом з термошафою до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Електричну міцність отриманих КМ визначали згідно з ГОСТ 6433.3-71. Для цього використовували випробувальний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50) (рис. 1). Випробувальний діодний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50) призначений для випробування ізоляції силових кабелів і твердих діелектриків випрямленою електричною напругою до 70 кВ, а також для випробування твердих діелектриків синусоїдальною електричною напругою до 50 кВ з частотою 50 Гц [5, 6].



Рис. 1 – Зовнішній вигляд діодного приладу АВД-70/50 (HVTS-70/50):  
1 – блок високої напруги; 2 – виносний блок керування

Прилад HVTS-70/50 складається з блока високої напруги (БВН), принципову схему якого наведено на рис. 2. Він забезпечує подачу високої напруги на об'єкт дослідження через клеми X9, X10 і окремого блока керування, який під'єднано до клем X1...X7. Останній здійснює:

- керування блоком високої напруги, а також контроль струму витоку;
- високу точність вимірювання і підтримання випробувальної напруги на заданому рівні;
- корегування струму витоку при роботі із зовнішнім додатковим конденсатором при випробуванні випрямленою напругою;
- вимірювання напруги безпосередньо на навантаженні, що дозволяє отримати реальне уявлення про напругу на об'єкті випробування і контролювати його з високою точністю.

Прилад HVTS-70/50 відзначається можливістю програмування необхідного для проведення конкретного випробування значення максимального струму, а також напруги для спрацьовування схем захисту. Необхідну інформацію про параметри і результати випробувань виведено на графічному дисплеї. Зокрема, у процесі дослідження на дисплеї відображаються значення напруги, струму і таймера часу проведення експерименту. Додатково отримують значення амплітуди напруги, коефіцієнт форми для змінної напруги або коефіцієнт амплітуди для випрямленої напруги.

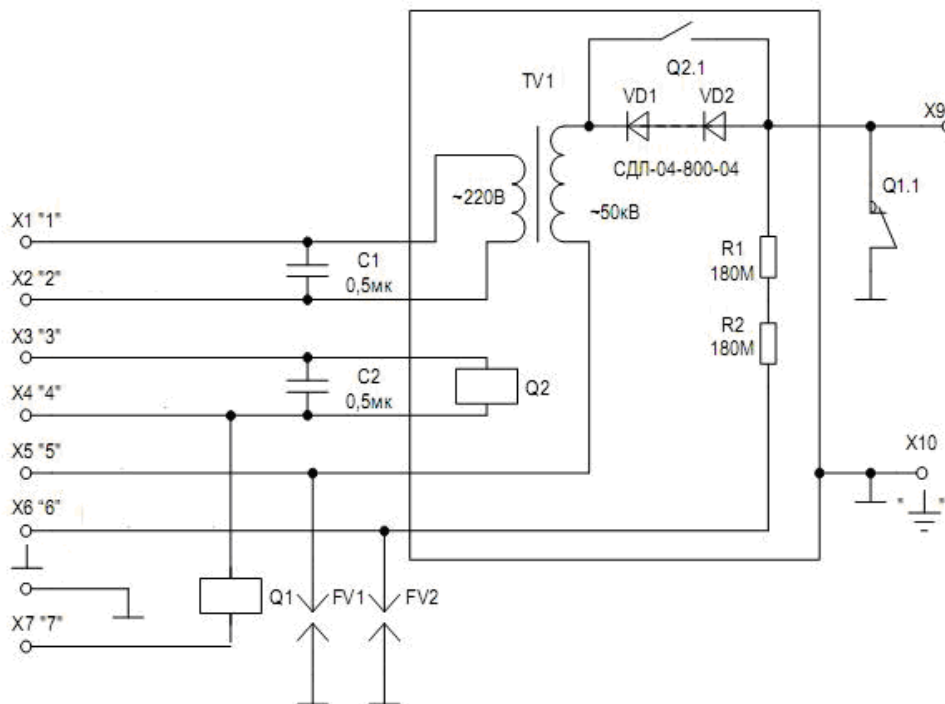


Рис. 2 – Принципова електрична схема блока високої напруги (БВН) приладу АВД-70/50: X1«1», X2«2» – клеми живлення високовольтного трансформатора; X3«3», X4«4», X7«7» – клеми керування реле Q1,Q2; X5«5» – клема вимірювання струму пробою; X6«6» – клема вимірювання напруги пробою; X9, X10 – клеми для під'єднання електродів; TV1 – високовольтний трансформатор; Q1,Q2 – керуючі реле; FV1, FV2 – захисні розрядники

Дослідження діелектриків на пробій проводять в однорідному і неоднорідному електричних полях. У газоподібних і рідких діелектриках однорідність поля забезпечують, зазвичай, шляхом формування поверхні електродів певної форми, наприклад, сферичної з радіусом  $R$ , що значно перевищують відстань  $h$  між їх найближчими точками. Крім того, використовують електроди Роговського, форма яких відповідає еквіпотенціальній поверхні і забезпечує однорідність електричного поля в середній частині між електродами. Також однорідне поле в твердих діелектриках можна отримати, піддаючи їх

механічній обробці шляхом видавлювання або висвердлювання в них лунок зі сферичною поверхнею. Така обробка може порушити структуру діелектрика, тому необхідно контролювати якість зразків.

У дослідженні на електропробі використовують такі типи електродів: площина – площина (верхній електрод – торець циліндра у вигляді площини із закругленими краями); сфера великого і малого радіусу – площина; вістря – площина. Для встановлення закономірностей і механізму пробою діелектриків дослідження проводять в однорідному і неоднорідному електричних полях. Для отримання неоднорідного поля використовують електроди типу вістря – вістря або вістря – площина. Значення  $U_{пр}$  в неоднорідному полі є значно меншим, ніж в однорідному, в результаті підвищення середнього значення напруженості поля поблизу електроду з малим радіусом кривизни.

Для проведення дослідження пробою і електричної міцності КМ проводили підготовку експериментальних зразків. Останні формували у вигляді покриття з товщиною  $h = 0,5$  мм, нанесене на мідний субстрат з розмірами  $100 \times 100$  мм. Вимірювання товщини зразків і безпосередньо покриття проводили до проведення досліджень.

Металеві натискні електроди виготовляли з бронзи й міді. Такі циліндричні електроди мають різні діаметри: діаметр нижнього електроду повинен у три рази перевищувати діаметр верхнього електроду. У проведених дослідженнях було застосовано електроди з розмірами: діаметр верхнього електроду  $d = 25$  мм, діаметр нижнього електроду  $d = 75$  мм, радіус закруглення країв електродів  $R = 3$  мм. Питомий тиск електроду на досліджуване покриття, згідно з вимогами стандарту [5], становив  $P = 10$  кПа. Дана умова стосується проведення досліджень з твердими діелектричними матеріалами в широкому діапазоні температур  $\Delta T = 213 \dots 523$  К. На рис. 3 показано світліну, яка ілюструє закріплення досліджуваного зразка між електродами для проведення дослідження електричної міцності КМ.

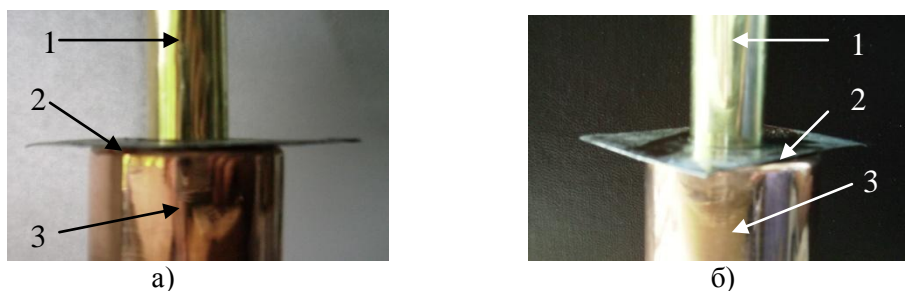


Рис. 3 – Схема закріплення зразка (а) і його розташування між електродами (б) установки під час дослідження: 1 – верхній бронзовий електрод; 2 – досліджуваний зразок з нанесеним покриттям; 3 – нижній мідний електрод

Електричну міцність КМ розраховували за формулою:

$$E_{пр} = U_{пр} / h,$$

де  $E_{пр}$  – електрична міцність, В/м;  $U_{пр}$  – напруга пробою, В;  $h$  – товщина покриття, м.

Досліджувана величина електричної міцності залежить від товщини нанесеного покриття діелектрика, форми та площі електродів, а також від швидкості зростання та часу дії прикладеної напруги. Значення електричної міцності при постійному струмі відрізняється від аналогічного її значення, отриманого при змінному струмі. Тому порівняння характеристик діелектриків і контроль їх якості необхідно проводити за однакових умов експерименту.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Експериментальні дослідження полягали у визначенні електричної міцності епоксикомпозитних матеріалів в результаті прикладання до зразків напруги синусоїдальної форми за частоти струму живлення  $f = 50$  Гц. Позаяк залежність величини електричної міцності від товщини епоксикомпозитних матеріалів є доволі суттєвою, тому порівнювали результати дослідження для зразків однієї товщини.

Слід врахувати, що однією з найважливіших залежностей, яку використовують на практиці, є залежність прикладеної напруги від часу експозиції досліджуваного зразка. Виконання вказаних досліджень передбачає необхідність проведення пошукових експериментів з метою попереднього визначення максимальної напруги пробою при мінімальному часі експозиції (від  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  с) досліджуваних КМ. Попередньо встановлено, що випробування слід починати за напруги, яка становить 40 % значення максимальної напруги пробою. Надалі значення напруги збільшували до максимальної величини.

Зазначене вище регламентувало проведення досліджень в шести характерних точках, напругу пробою в яких встановлювали на рівні:  $0,4 U_{пр}$ ;  $0,5 U_{пр}$ ;  $0,6 U_{пр}$ ;  $0,7 U_{пр}$ ;  $0,8 U_{пр}$ ;  $1,0 U_{пр}$ . Тривалість експозиції зразків на кожному із зазначених рівнів напруги складала  $t = 20$  с. Якщо впродовж зазначеного часу пробою зразка не спостерігали, тоді проводили дослідження, збільшуючи напругу на 10 %. Збільшували напругу впродовж часу  $t = 1 \dots 2$  с. Якщо впродовж цього часу відбувався пробій, тоді напругою пробою вважали напругу попереднього рівня.

Результати дослідження залежності величини напруги пробою від часу експозиції зразків наведені на рис. 4–6.

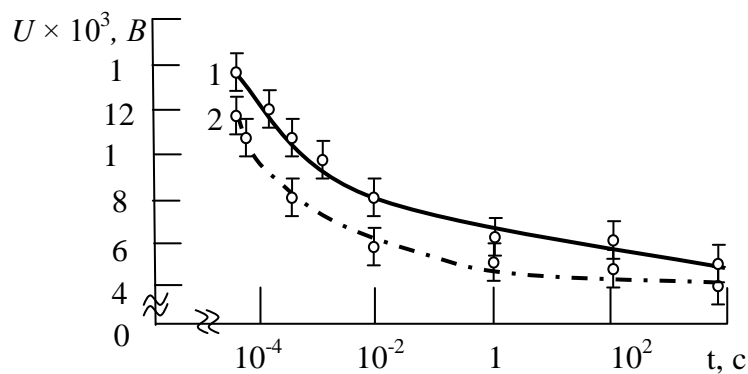


Рис. 4 – Залежність напруги пробою покриттів від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм): 1 – необроблена матриця; 2 – матриця після обробки ВЕІП

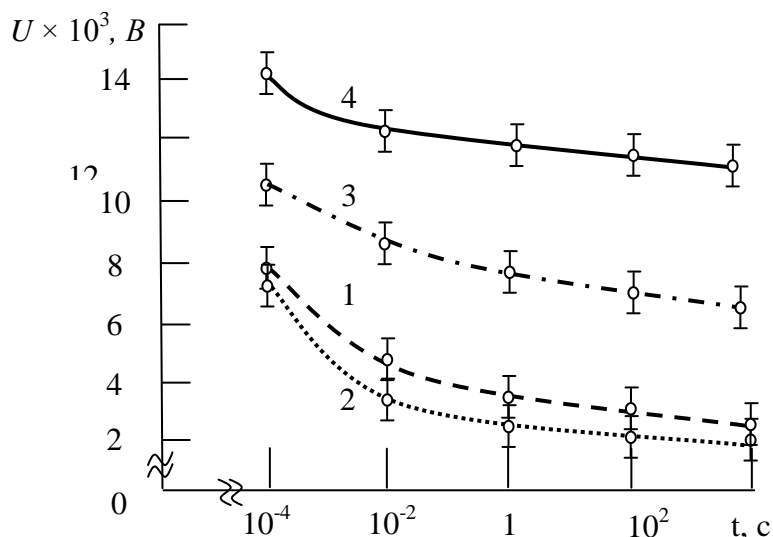


Рис. 5 – Залежність напруги пробою покриттів на основі КМ з дисперсними наповнювачами (10...20 мкм) від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм і вмісту часток  $q = 50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20): 1 – КМ з частками ЗС; 2 – модифікований ВЕІП КМ з частками ЗС; 3 – КМ з частками КС; 4 – КМ з частками пермалюю КбШ

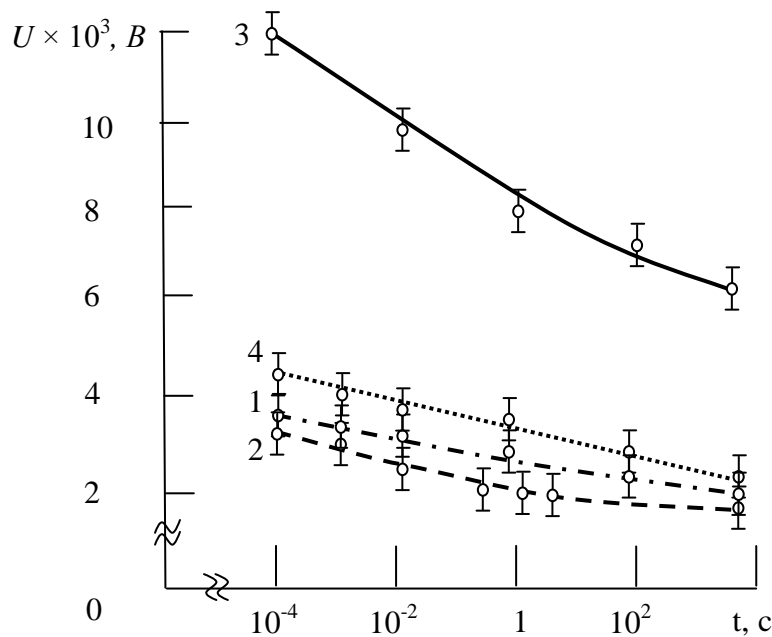


Рис. 6 – Залежність напруги пробою покриттів на основі КМ з дисперсними наповнювачами (63...120 мкм) від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм і вмісту часток  $q = 50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20): 1 – КМ з частками сталі (Сталь 45); 2 – модифікований ВЕП КМ з частками сталі (Сталь 45); 3 – КМ з частками ВШ; 4 – КМ з частками пермалою 45Н

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на те, що для усіх досліджуваних покриттів з епоксикомпозитних матеріалів спостерігали зменшення величини напруги пробою при збільшенні тривалості витримки зразків у електричному полі високої напруги.

Для порівняння було досліджено електричну міцність вихідної і модифікованої ВЕП епоксидної матриці. Отримані результати дають можливість стверджувати, що обробка ВЕП епоксидного олігомеру суттєво не впливає на електричну міцність матриці. Спостерігали зменшення величини електричної міцності для обробленої композиції, порівняно з вихідною, з  $U = 8,3$  до  $U = 6,1$  кВ/мм за час експозиції зразків  $t = 10^{-2}$  с (рис. 4).

Експериментально встановлено (рис. 5), що серед досліджуваних КМ з дрібно-дисперсними наповнювачами найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками КБШ. Такий композит за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с відзначався напругою пробою  $U = 12,4$  кВ/мм. Крім того, обробка ВЕП, яку проводили для композицій з феромагнітним наповнювачем залізним суриком (крива 1, крива 2, рис. 5), не приводить до суттєвої зміни показників електричної міцності КМ (зміну значень, залежно від часу експозиції зразків спостерігали в межах 5...8 %).

Доведено (рис. 6), що серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм, найвищими значеннями електричної міцності  $U = 10,0$  кВ/мм за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с характеризуються матеріали з добавками ВШ. Збільшення часу експозиції таких зразків до  $t = 10^4$  с спричиняє зменшення напруги пробою до  $U = 6,4$  кВ/мм. Додатково встановлено, що обробка ВЕП композицій, зокрема з частками сталі сприяє зменшенню електричної міцності КМ з  $U = 3,6$  кВ/мм до  $U = 2,8$  кВ/мм за часу експозиції  $t = 10^{-2}$  с. Отже можна констатувати, що зниження електричної міцності з часом експозиції зразків доцільно регулювати не магнітною обробкою, а вибором часток наповнювача і шляхом оптимізації його вмісту у діелектричному матеріалі. Сама ж обробка ВЕП епоксикомпозитів з феромагнітними наповнювачами, як і для епоксидної матриці, несуттєво впливає на величину напруги пробою.

**Висновки.** Результати проведених експериментальних досліджень дозволяють констатувати наступне:

1. Обробка ВЕШ епоксидного олігомеру несуттєво впливає на електричну міцність матриці. Спостерігали зменшення величини електричної міцності для обробленої композиції, порівняно з вихідною, з 8,3 до 6,1 кВ/мм за час експозиції зразків  $t = 10^{-2}$  с.

2. Серед досліджуваних КМ з дрібнодисперсними наповнювачами (10...20 мкм) найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками КБШ. Такий композит за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с відзначався напругою пробою  $U = 12,4$  кВ/мм. Серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм найвищими значеннями електричної міцності  $U = 10,0$  кВ/мм за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с характеризуються матеріали з добавками ВШ.

3. Проведені дослідження можуть мати широке практичне значення у напрямку застосування епоксикомпозитних покриттів з високими діелектричними характеристиками. Зокрема, епоксикомпозити з дрібнодисперсним наповнювачем карбідною шихтою можна використати для внутрішнього захисного шару електричного обладнання. Покриття з низькими значеннями діелектричної міцності (у нашому випадку це композити з частками сталі) можна використовувати для створення зовнішньої захисної оболонки електричного устаткування.

При проведенні експериментів додатково було з'ясовано, що для більшості досліджуваних епоксидних композитних матеріалів домінуючим є тепловий електропробій. З'ясування впливу температури на величину напруги пробою, а, відповідно, й електричної міцності композитів є необхідним завданням подальших досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стухляк П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, І. Г. Добротвор. – Тернопіль : Збруч, 2008. – 208 с.
2. Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В. М. Андреева – М. : Радио и связь, 1989. – 277 с.
3. Тхір І. Г. Фізико-хімія полімерів : навч. посіб. / І. Г. Тхір, Т. В. Гуменецький. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
4. Букетов А. В. Установка для высокочастотного электромагнитного опроміювання / А. В. Букетов, В. О. Скирденко // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2012)», (10-12 жовтня 2012 року, м. Херсон). – Херсон : Видавництво ХДМА, 2012. – С. 226-227.
5. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении: ГОСТ 6433.3-71. – [Дата введения 01.07.71]. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 22 с.
6. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции : ГОСТ 1516.2-97. – [Дата введения 25.04.1997]. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 35 с.

### **Букетов А.В., Скирденко В.А., Моисеенко Л.Л. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ И ПРИРОДЫ**

*Анализ проведенных исследований позволяет констатировать, что обработка высокочастотным импульсным электромагнитным полем эпоксидного олигомера несуттєво влияет на электрическую прочность матрицы. Среди исследуемых композитов с мелкодисперсными наполнителями (10...20 мкм) лучшие диелектрические свойства наблюдали для материала с частицами карбидной шихты. Среди исследуемых образцов с наполнителями дисперсностью 63...120 мкм высокими значениями электрической прочности характеризуются материалы с добавками угольного шлака. Проведенные исследования могут иметь широкое практическое значение в направлении применения епоксикомпозитных покрытий с высокими диелектрическими характеристиками.*



**Ключевые слова:** *эпоксидный композит, ферромагнитные наполнители, диэлектрики, напряжение пробоя, электрическая прочность.*

**Buketov A.V., Skirdenko V.O., Moiseenko L.L.** ELECTRIC STRENGTH OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS WITH FILLERS OF DIFFERENT GRANULARITY AND NATURE

*Analysis of the conducted research allows to state that the processing of epoxy oligomer with high-frequency pulsed electromagnetic field does not significantly affect the electrical strength of the matrix. Among the investigated composites with fine fillers (10...20 micron) the best dielectric properties were observed for the material with particles of carbide mixture. Among the samples with fillers having dispersion of 63...120-micron materials with additives of coal slag have high values of electric strength. The conducted research can have practical value in applying epoxy composite coatings with high dielectric characteristics.*

**Keywords:** *epoxy composite, ferromagnetic fillers, dielectrics, breakdown voltage, dielectric strength.*

© Букетов А.В., Скирденко В.О., Моїсеєнко Л.Л.

Статтю прийнято  
до редакції 27.10.14