

УДК 667.64:678.026

РОЗРОБЛЕННЯ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РЕМОНТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Сапронов О.О.

Херсонська державна морська академія,

Баглюк Г.А.,

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, м. Київ,

Масляк Б.О.

Тернопільський національний економічний університет,

Клевцов К.М.

Херсонський національний технічний університет,

Наговський Д.А., Івченко Т.І.

Херсонська державна морська академія

Досліджено вплив температури на зміну напруги електричного пробою епоксикомпозитних матеріалів, наповнених частками різної дисперсності та природи. Експериментально встановлено, що напруга пробою, а, відповідно, й електрична міцність епоксикомпозитів суттєво залежить від температури навколишнього середовища. Найкращі характеристики вказаної залежності встановлені для композитних покриттів з частками карбідної шихти (50 мас.ч.) та колоїдної сірки (50 мас.ч.). Доведено, що обробка феромагнітних наповнювачів високочастотним імпульсним магнітним полем не суттєво впливає на електричну міцність покриттів. Додатково показано, що суттєве зниження напруги пробою усіх досліджуваних епоксикомпозитів спостерігали у діапазоні температур 333...353 К, що зумовлено явищем переходу епоксикомпозитного покриття з твердого у високоеластичний стан.

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

Постановка проблеми. На сьогодні розвиток морського та річкового транспорту потребує зниження витрат на відновлення та ремонт суднового енергетичного устаткування. Нагальною проблемою при ремонті генераторів є просочення обмоток статора та ротора ізоляційним матеріалом. Водночас, особливу увагу приділяють заливці ізоляційним матеріалом високовольтних трансформаторів, ремонту кабелів. Тому на сьогодні розробка та використання нових матеріалів із високими показниками електрофізичних характеристик є актуальним завданням. Слід зауважити, що діелектричні властивості епоксикомпозитних полімерних матеріалів як в рідкому стані, так і після склування визначають їх широке застосування у вигляді ізоляційних покриттів. Як правило, діелектричні матеріали мають здатність до поляризації, що передбачає наявність у них електростатичного поля. Епоксидні композити, як технічні діелектрики, наповнені різними порошковими добавками, можна розглядати як ідеальний діелектрик. При зменшенні питомої електропровідності такі матеріали погано піддаються поляризації, що пов'язано з утворенням теплової та розсіюванням електричної енергії. Зазначене, на наш погляд, буде впливати на діелектричні властивості епоксикомпозитів і цей вплив буде яскравіше виражений при підвищеній температурі навколишнього середовища. Відповідно, за підвищених температур у епоксикомпозитах, як діелектричних матеріалах, зменшується величина електричної міцності і, відповідно, будуть відзначатись меншою напругою електричного пробою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових публікацій, стосовно електричної міцності полімерних матеріалів, що мають діелектричні властивості, вказує на достатньо велику кількість наукових досліджень посвячених електричному пробою діелектриків [1–3]. Щодо результатів досліджень електричної міцності епоксикомпозитів, наповнених феромагнітними порошковими матеріалами різної дисперсності, зокрема залізним суриком (ЗС) та частками Сталь 45, а також дисперсними

порошками карбідної шихти (КбШ) та колоїдної сірки (КС), можна констатувати про їх невеликий обсяг.

Показано [2], що при збільшенні напруги, прикладеної до діелектричного матеріалу, останній може набувати провідних властивостей. У такому випадку спостерігають пробій матеріалу. Типовим для пробою є те, що він відбувається миттєво, локалізовано та призводить до руйнування матеріалів. Швидке вивільнення значної кількості електричної енергії, внаслідок високої напруги, як правило, призводить до вигорання матеріалу в області пробою між електродами.

Напрямок пробою, зазвичай, визначається наявними локальними дефектами або неоднорідністю інгредієнтів в матеріалі. Максимальна напругу, яку ізолятор може витримувати впродовж тривалого часу до виходу з ладу, характеризується електричною міцністю діелектрика. Остання характеризується напругою пробою, яка співвідноситься з товщиною ізолятора, тобто максимальною напруженістю електричного поля, яку матеріал може витримувати необмежений час. Власна електрична міцність однорідного твердого тіла, зазвичай, більша від $100 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$. Вона ж є при цьому основною, але невизначеною властивістю. Однією з причин цього є недостатня відтворюваність результатів, отриманих для серії зразків. Майже завжди спостерігається велике розсіювання досліджуваної величини. Іншими словами, процес пробою, а також особливості його оцінювання, за своєю природою є майже неорганізованими процесами, і, головним чином, залежать від статистичної нерівномірності складу та структури досліджуваного зразка. Друга причина полягає в тому, що електричний пробій діелектричного епоксикомпозитного покриття суттєво залежить від фізичного стану зразка, чистоти і типу використовуваного електрода. Саме ці причини, зазвичай, лімітують ефективну міцність ізолятора в реальних обставинах і повністю усунути їх, у процесі дослідження, не вдається. Таким чином, пошук значень власної електричної міцності матеріалів має, в основному, теоретичний характер. У цих обставинах слід з обережністю ставитися до стандартних тестів щодо визначення електричної міцності матеріалів. В дійсності за їх допомогою не вимірюють власне значення величини напруги пробою для діелектричних матеріалів, оскільки можливі передчасні розряди в навколишньому газовому або рідкому середовищі.

Враховуючи зазначене, у промисловості для оцінки характеристик пробою матеріалів при розробці конкретних виробів доцільно використовувати спеціально створені тести, що імітують умови експлуатації. Також старіння і спрацювання матеріалів впродовж певного терміну експлуатації, наприклад, хімічне розкладання під дією сонячного випромінювання і розтріскування під впливом механічних навантажень, набувають важливого значення, тому що такі зміни майже завжди призводять до появи електрично нестабільних ділянок у композитах. До того ж, під дією енергетичних полів відбувається поступове кумулятивне старіння, яке зрештою, приводить до електричного пробою ізоляційного покриття.

Мета роботи – встановити залежність напруги електричного пробою епоксикомпозитних покриттів від температури.

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 імпульсним магнітним полем (ВМП) феромагнітних наповнювачів (Сталь 45 та 3С) проводили на розробленій установці [4]. Установку налаштовували на такі параметри ВМП: 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 та 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 ГОСТ 6433.3-71 [5]. Для цього використовували випробувальний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50). Випробувальний діодний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50) призначений для випробування ізоляції силових кабелів і твердих діелектриків випрямленою Гц [6], електричною напругою до 70 кВ, а також для випробування твердих діелектриків синусоїдальною електричною напругою до 50 кВ з частотою 50

Досліджуваний зразок у вигляді захисного покриття товщиною $h = 0,5$ мм наносили на мідний субстрат з розмірами 50×50 мм. Температуру дослідження змінювали в межах $\Delta T = 293 \dots 393$ К.

Результати досліджень та їх обговорення. Важливим фактором, що впливає на електричну міцність епоксикомпозитів, наповнених дисперсними порошковими матеріалами різної природи, як показали попередньо проведені дослідження [7], є температура навколишнього середовища. На початковому етапі досліджували залежність електричної міцності епоксидної матриці від температури (рис. 1). Аналогічно досліджували електричну міцність модифікованих і необроблених ВМП покриттів із дисперсними наповнювачами. Результати експериментальних досліджень для покриттів однакової товщини наведено на рис. 2 та рис. 3.

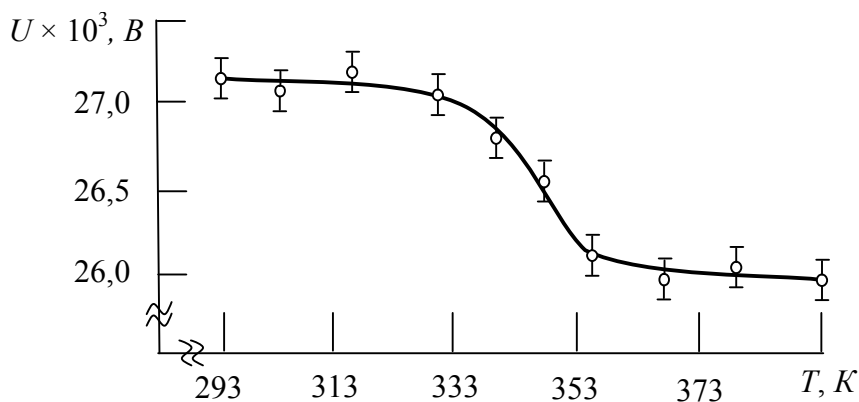


Рисунок 1 – Залежність напруги пробію покриття з епоксидної матриці від температури (за товщини покриття $h = 0,5$ мм)

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на їх ідентичність. Зокрема встановлено, що підвищення температури середовища, в якому поміщено досліджувані

покриття, призводить до монотонного зниження їх електричної міцності в межах 1,5...2,0%. На початковому етапі дослідження при збільшенні температури від $T = 293$ К до $T = 343$ К електрична міцність матеріалів майже не змінюється і лише за температур $\Delta T = 343...353$ К спостерігається зниження напруги пробою захисних покриттів.

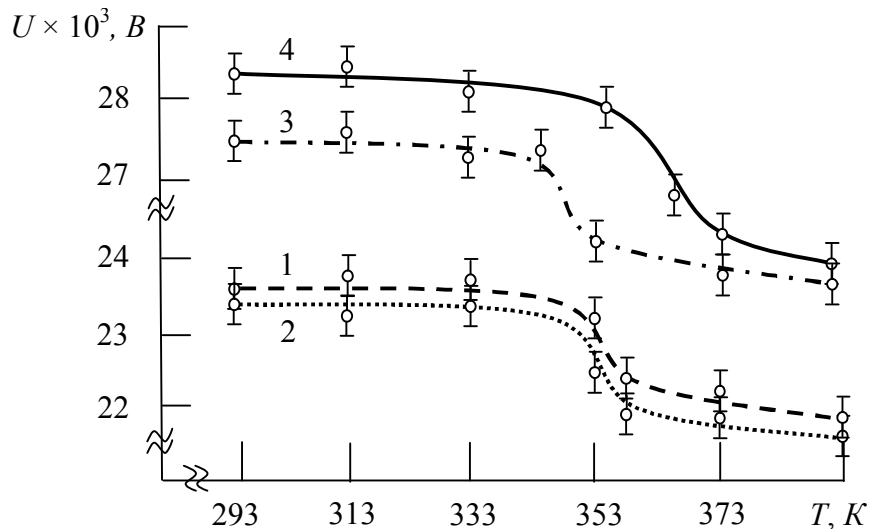


Рисунок 2 – Залежність напруги пробою захисних покриттів з дрібнодисперсними (10...20 мкм) наповнювачами від температури (за товщини покриття $h = 0,5$ мм): 1 – ЗС; 2 – ЗС (після обробки ВМП); 3 – КС; 4 – КБШ

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що напруга пробою, як характеристика електричної міцності ізоляційних епоксидних композитних матеріалів (КМ), залежить не тільки від температури, але і від фізичної природи наповнювача та його дисперсності. Встановлено (рис. 1–3), що найкращі показники електричної міцності КМ у температурному діапазоні $\Delta T = 293...343$ К має композит, наповнений дрібнодисперсним наповнювачем – карбідною шихтою (КБШ). При цьому величина напруги пробою у зазначеному діапазоні складає для даного композиту $U = 28,4$ кВ. Це на 3...4% перевищує величину напруги пробою для епоксидної матриці.

Деякі менші значення напруги пробою спостерігали при дослідженні вихідних і модифікованих ВМП зразків. Зокрема, напруга пробою у діапазоні температур $\Delta T = 293...343$ К для епоксикомпозиту з частками ВШ складає $U = 26,3$ кВ. Для КМ із частками пермалою 45Н напруга пробою складає $U = 8,8$ кВ. Для КМ з колоїдною сіркою величина напруги пробою складає $U = 27,5$ кВ.

Крім того, напруга пробою для вихідних і модифікованих магнітним полем КМ із дисперсним наповнювачем порошком сталі 45 становить $U = 8,3$ кВ та $U = 7,5$ кВ відповідно. Аналогічні результати спостерігали для КМ з частками залізного сурику (ЗС). У зазначених діапазонах температури для вихідних і модифікованих КМ, наповнених дрібнодисперсними частками залізного сурику, складає відповідно $U = 23,4$ кВ і $U = 23,6$ кВ, а тенденція залежності напруги пробою від температури майже однакова.

Можна констатувати, що відбувається деяке зниження величини напруги пробою модифікованих магнітним полем, порівняно з необробленими, КМ, наповнених феромагнітними наповнювачами: залізним суриком та сталлю 45. Це явище, на наш погляд, можна пояснити орієнтацією доменів феромагнітного матеріалу, упорядкуванням його структури і, що найважливіше, зміною як поверхневого, так і об'ємного електроопору досліджуваних епоксикомпозитних матеріалів.

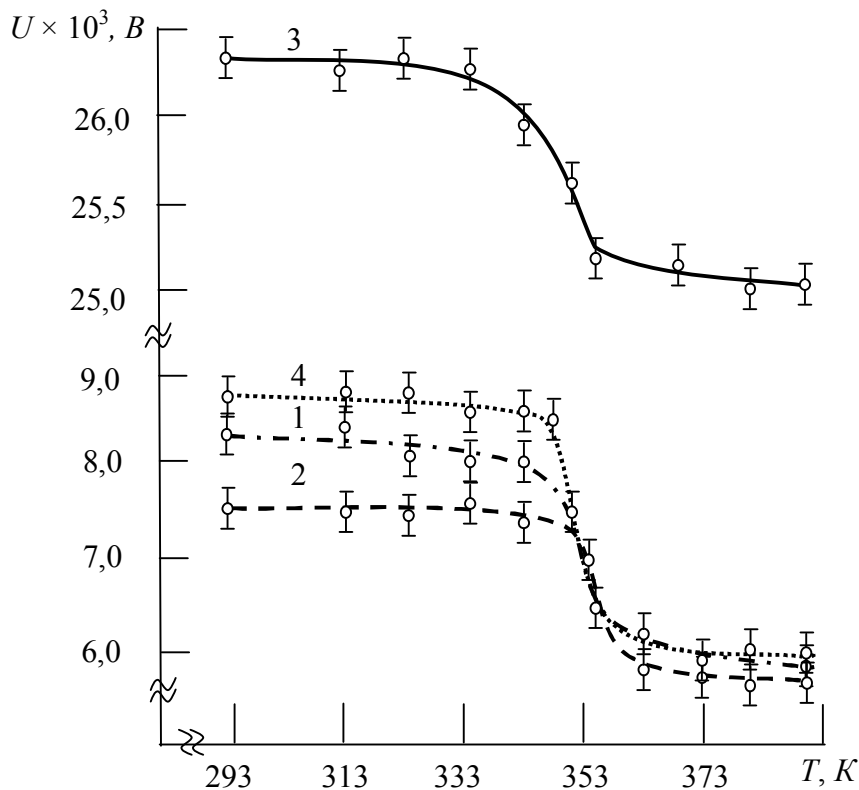


Рисунок 3 – Залежність напруги пробою захисних покриттів з дисперсними (63...120 мкм) наповнювачами від температури (за товщини покриття $h = 0,5$ мм): 1 – Сталь 45; 2 – Сталь 45 (після обробки ВМП); 3 – ВШ; 4 – пермалой 45Н.

Висновки. Результати проведених експериментальних досліджень дозволяють констатувати наступне:

1. Дослідження електричної міцності епоксикомпозитів з діелектричними властивостями є складним процесом як з точки зору підготовки необхідних зразків, так і матеріально-технічного оснащення досліджень. При цьому необхідно дотримуватись сталих значень характеристик, що впливають на зміну умов проведення досліджень (атмосферний тиск, вологість, рівномірність температурного поля, забрудненість поверхні зразків).

2. Найкращими показниками електричної міцності у вибраному діапазоні матеріалів відзначаються епоксикомпозити, наповнені карбідною шихтою та колоїдною сіркою. Напруга пробою таких матеріалів становить $U = 28,4$ кВ та $U = 27,5$ кВ відповідно. Зазначені композити доцільно використовувати як ізоляційні матеріали при експлуатації суднового енергетичного устаткування (електротехніка або зрощуванні струмопровідних частин електроустаткування високої напруги, що працюють при температурі, яка не перевищує $T = 350$ К).

3. Величина напруги пробою, а, відповідно, і електричної міцності досліджуваних епоксикомпозитів пов'язана з їх теплостійкістю. При температурі, що наближається до температури переходу твердого стану зразків у високоеластичний, величина напруги пробою зменшується і, наприклад, для матеріалів з КбШ зменшується від $U = 28,5$ кВ до $U = 25,0$ кВ. Для композитів з іншими досліджуваними наповнювачами спостерігали аналогічне зменшення напруги пробою в межах $\Delta U = 2,0 \dots 3,5$ кВ.

4. Можна констатувати, що відбувається деяке зниження величини напруги пробою модифікованих магнітним полем, порівняно з необробленими, КМ, наповнених феромагнітними наповнювачами: залізним суриком і сталлю 45. Це явище, на наш погляд, можна пояснити орієнтацією доменів феромагнітного матеріалу, упорядкуванням його

структури і, що найважливіше, зміною як поверхневого, так і об'ємного електроопору досліджуваних епоксикомпозитних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тхір І. Г. Фізико-хімія полімерів : навч. посібник / І. Г. Тхір, Т. В. Гуменецький – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
2. Блайт Э. Р. Электрические свойства полимеров / Э. Р. Блайт, Д. Блур. – Д. : Физматлит, 2008. – 376 с.
3. Бартнев Г. М. Курс физики полимеров / Г. М. Бартнев, Ю. В. Зеленов. – Л. : Химия, 1976. – С. 252-254.
4. Букетов А. В. Установка для высокочастотного электромагнитного опромінювання / 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 р., м. Херсон). – Херсон : 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.
7. Букетов А. В. Дослідження впливу наповнювачів на індекс трекінгостійкості модифікованих високочастотним електромагнітним імпульсним полем епоксидних композитів / А. В. Букетов, В. О. Скирденко, Д. В. Румянцев // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2014. – Випуск 47. – С. 6-11.

REFERENCES

1. 1. Tkhir I. G. Fiziko-khimiya polimeriv : navch. posibnik / I. G. Tkhir, T. V. Gumenecjkiy – Ljviv : Vidavnictvo Nacionaljnogo universitetu «Ljvivsjka politehnika», 2005. – 240 s.
2. 2. Blayjt Eh. R. Ehlektricheskie svoystva polimerov / Э. Р. Blayjt, D. Blur. – D. : Fizmatlit, 2008. – 376 s.
3. 3. Bartenev G. M. Kurs fiziki polimerov / G. M. Bartenev, Yu. V. Zelenev. – L. : Khimiya, 1976. – S. 252-254.
4. 4. Buketov A. V. Ustanovka dlya visokochastotnogo elektromagnitnogo oprominyuvannya / A. V. Buketov, V. O. Skirdenko // Materiali Vseukraïnsjkoï naukovo-praktichnoï konferencii «Suchasni energetichni ustanovki na transporti i tekhnologii ta obladnannya dlya ikh obslugovuvannya (SEUTTOO-2012)», (10-12 zhovtnya 2012 r., m. Kherson). – Kherson : KhDMA, 2012. – S. 226-227.
5. 5. Materialih ehlektroizolyacionnihe tverdihe. Metodih opredeleniya ehlektricheskoyj prochnosti pri peremennom (chastotih 50 Gc) i postoyannom napryazhenii : GOST 6433.3-71. – [Data vvedeniya 01.07.71]. – M. : Izd-vo standartov, 1994. – 22 s.
6. 6. Ehlektrooborudovanie i ehlektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vihshe. Obthie metodih ispihtaniyj ehlektricheskoyj prochnosti izolyacii : GOST 1516.2-97. – [Data vvedeniya 25.04.1997]. – M. : Izd-vo standartov, 1997. – 35 s.
7. 7. Buketov A. V. Doslidzhennya vplivu napovnyuvachiv na indeks trekingostiyjnosti modifikovanikh visokochastotnim elektromagnitnim impuljsnim polem epoksidnikh kompozitiv / A. V. Buketov, V. O. Skirdenko, D. V. Rummyancev // Naukovi notatki. – Lucjk : LNTU, 2014. – Vipusk 47. – S. 6-11.

Сапронов А.А., Баглюк Г.А., Масляк Б.О., Клевцов К.Н., Наговский Д.А., Ивченко Т.И.
РАЗРАБОТКА ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

Исследовано влияние температуры на изменение напряжения электрического пробоя эпоксикомпозитных материалов, наполненных частицами различной дисперсности и природы. Экспериментально установлено, что напряжение пробоя, а, соответственно, и электрическая прочность эпоксикомпозитов существенно зависит от температуры окружающей среды. Наилучшие характеристики указанной зависимости установлены для композитных покрытий с частицами карбидной шихты (50 мас.ч.) и коллоидной серы (50 мас.ч.). Доказано, что обработки а ферромагнитных наполнителей высокочастотным импульсным магнитным полем не существенно влияет на электрическую прочность покрытий. Дополнительно показано, что существенное снижение напряжения пробоя всех исследуемых эпоксикомпозитов наблюдали в диапазоне температур 333 ... 353 К, что обусловлено явлением перехода эпоксикомпозитного покрытия из твердого в высокоэластичное состояние.

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

Sapronov A.A., Bagliuk G.A., Maslyyak B.O., Klevtsov K.N., Nahovsky D.A., Ivchenko T.I.
DEVELOPMENT EPOKSYKOMPOZYTYNYH INSULATION MATERIALS FOR THE REPAIR ELEMENTS EMS MARITIME TRANSPORT

The effect of temperature on the electrical breakdown voltage change epoxy composites material filled with particles of different nature and dispersion. Experimentally that the breakdown voltage, and, respectively, and the dielectric strength epoxy composites essentially depends on the ambient temperature. Top specified characteristics depending established for composite coatings with particles of carbide mixture (50 mas.ch.) and colloidal sulfur (50 mas.ch.). Proved that treatment ferromagnetic fillers pulsed high-frequency magnetic field is not substantially affect the electric strength coatings. Additionally, it is shown that a significant reduction in breakdown voltage of all investigated epoxy composites observed in the temperature range 333 ... 353 K, due to the phenomenon of transition epoxy composites coverage in highly solid state.

Keywords: epoxycomposite, ferromagnetic fillers, insulators, breakdown voltage, dielectric strength.

© Сапронов О.О., Баглюк Г.А., Масляк Б.О., Клевцов К.М., Наговський Д.А., Івченко Т.І.

Статтю прийнято
до редакції 23.10.2015