

УДК 667.64:678.026

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36978

Досліджено фактори впливу на умови формування адгезійного контакту і методи підвищення міцності адгезійних з'єднань полімерів до металевої основи. Підтверджено ефективність використання надвисокочастотного (НВЧ) електромагнітного оброблення для модифікації композитних матеріалів на основі епоксидного зв'язувача наповненого частками різної природи. Встановлено оптимальний час надвисокочастотного електромагнітного оброблення епоксидних композицій для досягнення максимального міцнісного ефекту

Ключові слова: олігомер, поліетиленполіамін, композит, міцність адгезійних з'єднань, залишкові напруження, дисперсний наповнювач

Исследованы факторы влияния на условия формирования адгезионного контакта и методы повышения прочности адгезионных соединений полимеров к металлической основе. Подтверждена эффективность использования сверхвысокочастотной (СВЧ) электромагнитной обработки для модификации композитных материалов на основе эпоксидного связующего наполненного частицами различной природы. Установлено оптимальное время СВЧ электромагнитной обработки эпоксидных композиций для достижения максимального прочностного эффекта

Ключевые слова: олигомер, полиэтиленполиамин, композит, прочность адгезионных соединений, остаточные напряжения, дисперсный наполнитель

ВПЛИВ НАДВИСОКО- ЧАСТОТНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

П. Д. Стухляк

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: kafedra.kt@gmail.com

О. С. Голотенко

Асистент*

E-mail: golotenko@gmail.com

О. З. Скороход

Кандидат технічних наук

Гомельський інженерний інститут МНС

Республіки Білорусь

вул. Машиностроителей, 25, м. Мінськ,

Республіка Білорусь, 220118

E-mail: mail@kii.gov.by

*Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій

Тернопільський національний технічний

університет ім. І. Пулюя

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001

1. Вступ

Обсяг світового виробництва і споживання усіх видів полімерних матеріалів неухильно зростає. Серед безлічі полімерних конструкційних матеріалів важливе місце займають епоксидні олігомери завдяки цінному комплексу притаманних їм властивостей і універсальності застосування як ливарних і прес матеріалів, склопластиків, конструкційних композитів, клеїв, лакофарбових покриттів, а також як покриттів з епоксикомпозитних матеріалів для деталей машин, приладів і механізмів різного функціонального призначення [1].

Епоксидні олігомери, які містять реакційноздатні епоксидні і гідроксильні групи, широко використовують у вигляді зв'язувачів для формування композитних матеріалів (КМ) з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Поліпшення фізико-механічних властивостей, зокрема адгезійної міцності та залишкових напружень КМ для захисних покриттів на їх основі досягають введенням у епоксидний зв'язувач мінеральних дисперсних наповнювачів різної фізичної природи за оптимального вмісту та обробці зовнішніми фізичними полями [2, 3].

На сьогоднішній день є необхідність у пошуку та використанні альтернативних технологій модифікації полімерів, що пов'язано, в деяких випадках, з багатостадійністю традиційних процесів, високими енерго- і трудовими затратами, екологічною напруженістю виробництва. Інтенсивні дослідження по застосуванню електрофізичних методів обробки матеріалів та виробів показали ефективність використання для цієї мети енергії надвисокочастотних (НВЧ) електромагнітних (ЕМ) коливань [4].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відомо, що полімерні матеріали у більшості випадків застосовують в наповненому вигляді [5–7]. В основі фізичних методів регулювання структури і властивостей полімерних композитів є вплив вмісту та природи наповнювача на структуроутворення і ступінь зшивання епоксидної матриці [8]. Використання як наповнювачів зносостійких грубодисперсних карбідів та оксидів металів, які проявляють себе як штучні структуроутворюючі елементи дозволяє керувати адгезійними характеристиками захисних по-

криттів. Відомо, що поверхня і природа наповнювача суттєво впливає на структуру та механічні властивості епоксидних композитів, тому вивчення та аналіз фізико-хімічних процесів на межі поділу є актуальною задачею сучасного матеріалознавства.

Доведено, що адсорбційні властивості наповнювача залежать від топології, питомої площі поверхні та хімічної активності мінеральних часток, хімічної будови зв'язувача та його реологічних властивостей [9]. Залежно від адсорбційних властивостей часток на їх поверхні формуються адсорбційні шари. На більшій відстані від поверхні дисперсної фази, за рахунок фізико-хімічної взаємодії, формуються поверхневі шари. Зазначимо, що фізична взаємодія не призводить до формування у поверхневих шарах нових структур. При цьому хімічна взаємодія може відбуватись як між активними центрами на поверхні часток і макромолекулами, так і безпосередньо між активними боковими групами чи сегментами ланцюгів самого зв'язувача. Така взаємодія, що відбувається в основному за рахунок утворення йонних або йонно-ковалентних зв'язків, сприяє утворенню у поверхневих шарах надмолекулярних структур (глобул), що у свою чергу забезпечує підвищення міцності композитів [10].

Вплив зовнішніх силових полів при формуванні полімерних композитів, зокрема НВЧ електромагнітного поля, дає змогу отримати матеріал із покращеними властивостями [11, 12]. Мікрохвильове, або надвисокочастотне випромінювання – це електромагнітні хвилі, довжиною від одного міліметра до одного метра, що використовують в радіолокації, радіонавігації, системах супутникового телебачення, мобільному зв'язку, побутових приладах та ін. Електромагнітна хвиля складається з двох складових, котрі нерозривно пов'язані одна з одною – електричної та магнітної. Результатом дії цих складових є створення електромагнітного поля.

Мікрохвильові технології, на відміну від традиційних методів модифікації, володіють рядом переваг, серед яких скорочення тривалості технологічних процесів, спрощення виробничої установки, більш низьке енергоспоживання, покращення екологічного стану і чистоти на виробництві, можливість отримання нових виробів більш високої якості, об'ємне і безінерційне нагрівання, можливість формування і підтримка необхідного розповсюдження теплового поля в об'ємі матеріалу та ін. [13–15].

Направлене введення дисперсних наповнювачів з подальшою надвисокочастотною електромагнітною обробкою дозволяє регулювати фізико-механічні властивості модифікованих матеріалів у широких межах.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є встановлення впливу природи та вмісту у епоксидному матеріалі грубодисперсних наповнювачів з міцністю адгезійних з'єднань та залишковими напруженнями у комплексі з їх надвисокочастотною електромагнітною обробкою.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

– визначити оптимальний час надвисокочастотної електромагнітної обробки композиції для формуван-

ня матеріалу з підвищеними адгезійними характеристиками;

– встановити вплив НВЧ електромагнітної обробки на адгезійно-міцнісні властивості епоксидної матриці;

– дослідити вплив грубодисперсних наповнювачів на міцність адгезійних з'єднань та залишкові напруження покриттів.

4. Матеріали і методика досліджень впливу НВЧ електромагнітного поля та наповнювачів на властивості епоксикомпозитів

Як зв'язувач при формуванні КМ використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) з густиною $\rho=1,16 \text{ г/см}^3$. Для матеріалів на основі ЕД-20 характерні високі питомі показники міцності, незначна усадка, висока адгезійна та когезійна міцність, технологічність при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, розвинута сировинна база.

Як пластифікатор використано полідіетилакрилат ПДЕА-4, що характеризується реакційною здатністю до епоксидного олігомера завдяки значній кількості гідроксильних груп. Пластифікатор вводили у зв'язувач при вмісті 16 мас. ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 (тут і далі за текстом мас.ч. наводяться на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20).

Як твердник використано поліетиленаполіамін (ТУ 6-05-241-202-78), який дозволяє затверджувати композити при кімнатній температурі, що доцільно при нанесенні покриттів на довго вимірні поверхні складного профілю технологічного устаткування. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію при вмісті 8 мас. ч. на 100 мас. ч. ЕД-20.

Як наповнювачі використано парамагнетики карбід бору та кремнію та діамагнетик лускатий графіт. Концентрація наповнювача становила 30 мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера. Вибрані наповнювачі характеризуються високою міцністю, твердістю і модулем пружності (табл. 1). Крім того, на поверхні усіх наповнювачів встановлено існування гідроксильних груп та інших активних центрів, які мають підвищену адсорбційну та каталітичну активність відносно епоксидного зв'язувача [16] Використовували наповнювачі з розміром часток 63 мкм (рис. 1, а–в).

Таблиця 1

Характеристики дисперсних наповнювачів

Наповнювач	Густина, г, $\text{кг/м}^3 \times 10^3$	Модуль пружності, Е, ГПа	Питома площа поверхні, $\text{м}^2/\text{г}$
Лускатий графіт	2,25	5,88	–
Карбід бору	5,42	223,9	12,1
Карбід кремнію	3,22	468,9	7,2

Епоксидний зв'язувач формували за наступною технологією: дозування компонентів, гідродинаміч-

не суміщення пластифікатора та епоксидної діанової смоли ЭД-20 до отримання однорідної суміші, термооброблення суміші протягом часу $\tau=4,0\pm 0,1$ год при температурі $T=393\pm 2$ К, охолодження до температури 293 ± 2 К, введення твердника, затвердження композиції. Затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримка протягом часу $\tau=24$ год. при температурі $T=293\pm 2$ К; нагрівання зі швидкістю $V=3$ град/хв до температури $T=393$ К і витримка протягом часу $\tau=2,0$ год; повільне охолодження до температури $T=293\pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували протягом часу $\tau=60$ год. на повітрі при температурі $T=293\pm 2$ К. з наступним проведенням експериментальних випробувань.

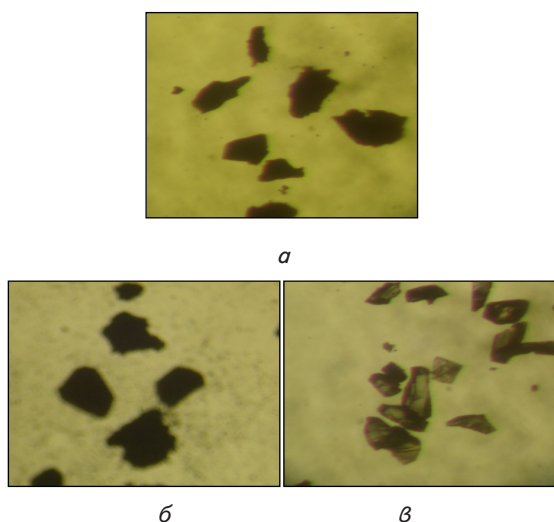


Рис. 1. Зовнішній вигляд дисперсних наповнювачів (збільшення – 100х): а – карбід кремнію; б – карбід бору; в – лускатий графіт

НВЧ активацію пластифікованого зв'язувача і епоксидних композицій проводили на попередній стадії формування матеріалу (до введення твердника, що забезпечує інтенсивніший перебіг фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз при формуванні КМ), за допомогою розробленого НВЧ випромінювача з частотою $f=2450$ МГц, довжина хвилі $\nu=0,1225$ м, робоча напруга – 220 В, частота струму 50 Гц. Тривалість оброблення композицій становила $t=30$ с: 120 с. Наважку оброблюваних композицій вибрано $m=0.20\pm 0.01$ кг. Обробляли композиції у тонкому шарі з товщиною $h=25...30$ мм.

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження при рівномірному відриві пари склеєних зразків встик (“метод грибків”). Дослідження проводили згідно з ГОСТ 14760-69. Залишкові напруження у матриці досліджували консольним методом.

5. Результати досліджень адгезійно-міцнісних властивостей модифікованих НВЧ електромагнітним полем епоксикомпозитів та їх обговорення

На першому етапі проведено дослідження міцності адгезійних з'єднань пластифікованого епоксидного

зв'язувача після оброблення НВЧ електромагнітним полем до введення твердника. Згідно з результатами досліджень встановлено (рис. 2), що опромінення НВЧ ЕМ полем епоксидної матриці призводить до покращення міцності адгезійних з'єднань композиції зі сталеву основою.

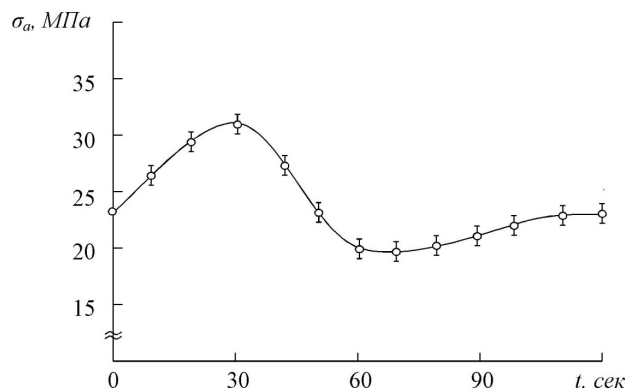


Рис. 2. Залежність міцності адгезійних з'єднань епоксидної матриці від часу обробки НВЧ електромагнітним полем

У зразків, які піддавалися впливу НВЧ електромагнітного поля спостерігали підвищення міцності адгезійних з'єднань, зокрема дія опромінення тривалістю 30 с призводить до максимального покращення характеристик міцності адгезійних з'єднань на 35 % з 23 МПа до 32 МПа. Це можна пояснити виникненням зміщення позитивного заряду вздовж напрямку електричної складової поля, і негативного заряду у зворотному напрямку, в результаті чого на поверхні композиції, котра являється діелектриком, виникають електричні заряди, а отже відбувається поляризація композиції [9]. У зв'язку з цим виникають зв'язані заряди на поверхнях композиції, які взаємодіють із зарядами металевої основи, що позитивно впливає на «прилипання» композиції до підкладки. При обробці матеріалу більше 30 с спостерігали екзотермічні ефекти, що негативно впливають на процеси структуроутворення при формуванні епоксикомпозиту.

З метою підтвердження результатів дослідження адгезійних властивостей проведено випробування залишкових напружень у пластифікованій епоксидній матриці. Встановлено (рис. 3), що абсолютна величина залишкових напружень у неопромінєній матриці становить $s_3=2,9$ МПа. Після НВЧ електромагнітної обробки зв'язувача значення залишкових напружень зростає до $s_3=3,9$ МПа.

Результати досліджень доводять покращення зшивання за рахунок структурних процесів, що пов'язані з утворенням вільних радикалів, які інтенсивно взаємодіють з гідроксильними центрами на поверхні металевої основи. Внаслідок цього збільшується вміст гел-фракції у матриці, зростає кількість фізичних і хімічних зв'язків у об'ємі полімера або на межі поділу фаз “матриця – металева основа”, а отже зростає абсолютне значення залишкових напружень і поліпшуються фізико-механічні властивості КМ, зокрема міцність адгезійних з'єднань. Такий механізм підвищення досліджуваних показників підтверджено методом ЕПР-спектроскопії та методом екстракції на пристрої Сокслета.

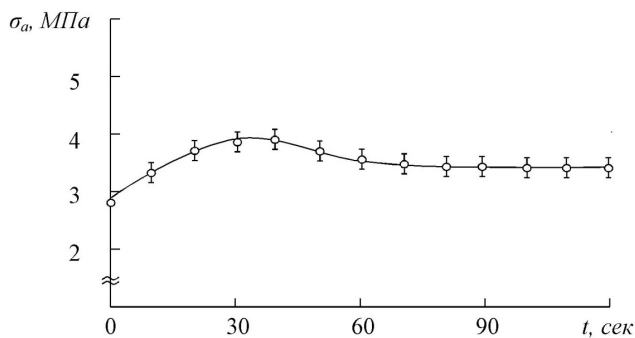


Рис. 3. Залежність залишкових напружень епоксидної матриці від часу обробки НВЧ електромагнітним полем

Оптичною макроскопією встановлено, що в результаті аналізу поверхні покриттів на грибках після випробувань пластифікованої епоксидної матриці на міцність адгезійних з'єднань (рис. 4) спостерігали, що частини покриття залишаються на обидвох сталевих грибках, що свідчить про когезійний характер руйнування покриття. З цього можна зробити висновок, що подальше покращення адгезійних характеристик слід досягати підвищенням показників когезійної міцності епоксидних композитів. Тому на наступному етапі вводили в пластифіковану епоксидну матрицю вибрані наповнювачі і проводили подальші випробування.



Рис. 4. Зразки для дослідження міцності адгезійних з'єднань епоксидного покриття до сталеві основи. Когезійний розрив

При дослідженні морфології поверхні дисперсних часток встановлено, що карбіди бору та кремнію володіють більшою активністю поверхні і мають добре розвинуту поверхню (рис. 1). Крім того, на поверхні цих наповнювачів встановлено існування гідроксильних груп та інших активних центрів, які мають підвищену адсорбційну та каталітичну активність відносно епоксидного зв'язувача. Частки лускатого графіту є кристалічної форми, що зменшує відносну активність до адсорбції даного наповнювача. Також важливим чинником вибору даних наповнювачів є їх не висока вартість і широка розповсюдженість.

Аналізуючи результати досліджень залежності міцності адгезійних з'єднань від тривалості НВЧ електромагнітної обробки (рис. 5) встановлено, що макси-

мальні адгезійні характеристики мають композитні матеріали, наповнені SiC при дії електромагнітного поля надвисокої частоти протягом 60 секунд. Введення такого наповнювача дозволяє збільшити адгезійні характеристики матеріалу з 32,1 МПа (без обробки) до 39,3 МПа (після обробки), а в порівнянні з максимальною адгезією пластифікованої матриці, результати зростають на 25 %. Подальша тривалість обробки не покращує показників міцності адгезійних з'єднань КМ в складі яких є грубодисперсний SiC. Доведено, що крива залежності міцності адгезійних з'єднань композитних матеріалів наповнених V_4C (рис. 3, крива 2), практично ідентична кривій 3, лише зміщена на кілька одиниць нижче по осі абсцис, тобто максимальні показники міцності адгезійних з'єднань КМ наповнених карбідом бору також досягаються при дії НВЧ ЕМ поля протягом 60 с і сягають 34,6 МПа, що на 8 % більше порівняно з неопроміненим матеріалом, наповненим V_4C і на 12 % більше від показників пластифікованого епоксидного зв'язувача. Покращення показників міцності адгезійних з'єднань КМ наповнених карбідами кремнію та бору, на нашу думку, можна пояснити виходячи із кількох факторів. По перше, поверхня цих наповнювачів є достатньо розвинутою і володіє хорошою активністю, що дуже важливо при структуроутворенні композитних матеріалів, під дією зовнішніх фізичних полів [17]. По друге, дані наповнювачі є феромагнетиками. Доведено, що магнітна складова опромінення також бере участь в покращенні міцності адгезійних показників матеріалу, зокрема впливає на орієнтацією доменів та зміщенням просторового заряду на поверхню матеріалу, оскільки домени після припинення дії силового поля можуть зберігати орієнтований стан. Як уже зазначалося вище, підвищення адгезії і значно менша швидкість протікання релаксаційних процесів свідчить про виникнення на границі полікомполіт – основа великої кількості центрів структуроутворення, що взаємодіють з полімером за рахунок виникнення водневих зв'язків між карбонільними групами смоли та гідроксильними групами дисперсного наповнювача [18]. Даний механізм підвищення максимального значення σ_a досягали при більшому часі НВЧ електромагнітної обробки (біля 60 с). У цьому випадку замість екзотермічних ефектів спостерігали активацію зв'язувача за рахунок виникнення радикалів, коли кількість парамагнітних центрів у зв'язувачі під дією НВЧ електромагнітної обробки зростає (дані ЕПР-спектроскопії). При подальшому формуванні матеріалу радикали та парамагнітні центри рекомбінують з утворенням додаткових фізичних зв'язків з поверхнею металевої основи, підвищуючи міцність адгезійних з'єднань [19]. Якщо дане твердження вірне, то при використанні діелектриків слід очікувати незначної зміни σ_a .

Встановлено (рис. 5) зміну міцності адгезійних з'єднань КМ наповнених лускатим графітом. Аналізуючи результати, можемо зробити висновок, що в матеріалах, наповнених лускатим графітом після 30 с НВЧ електромагнітної обробки зростають показники міцності адгезійних з'єднань на 22 % в порівнянні з необробленими КМ, проте дані покриття володіють найнижчою адгезією до металевої основи, навіть в порівнянні з пластифікованою епоксидною матрицею. Це можна пояснити незначною активністю і малою площею поверхні наповнювача, діамантною приро-

дою лускатого графіту а також формуванням навколо часток поверхневих шарів з дефектною структурою.

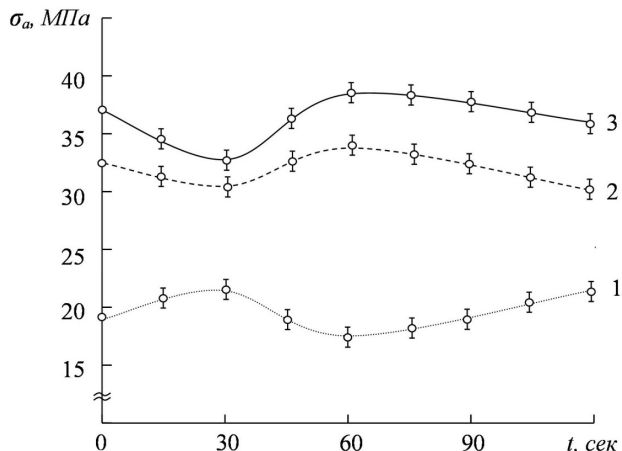


Рис. 5. Вплив тривалості НВЧ ЕМ обробки на міцність адгезійних з'єднань захисних полімеркомпозитних покриттів: 1 – Лускатий графіт; 2 – В₄С; 3 – SiC

Дані кінетики зміни залишкових напружень на границі полімеркомпозит – основа показують, що парамагнітна природа добавок та тривалість НВЧ електромагнітного оброблення значно впливають на фізико-хімічні процеси при формуванні композиту (рис. 6). Встановлено, що введення у полімерну систему дисперсних часток наповнювача впливає на величину залишкових напружень КМ. Це пояснюється формуванням тиксотропної структури в композиціях.

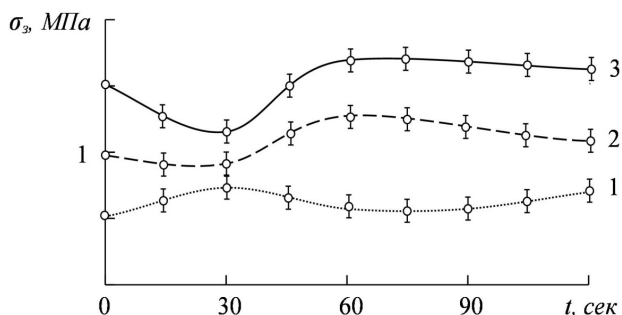


Рис. 6. Вплив тривалості НВЧ ЕМ обробки на залишкові напруження захисних полімеркомпозитних покриттів: 1 – Лускатий графіт; 2 – В₄С; 3 – SiC

Дані про залежність залишкових напружень від часу НВЧ електромагнітного оброблення епоксикомпозитів співставляли із залежністю міцності адгезійних з'єднань від часу оброблення електромагнітним полем надвисокої частоти. Досліди показують, що НВЧ електромагнітне оброблення композицій забезпечує підвищення ступеня зшивання матриці у ша-

рах на межі поділу фаз, на що вказує підвищення абсолютного значення залишкових напружень при обробці композицій протягом 60с з $\sigma_3=1.47$ МПа до $\sigma_3=1.69$ МПа для КМ наповнених SiC, і з $\sigma_3=1.01$ МПа до $\sigma_3=1.29$ МПа для КМ наповнених В₄С при одночасному збільшенні міцності адгезійних з'єднань. В КМ наповнені лускатим графітом спостерігається максимальне збільшення показників залишкових напружень при 30с НВЧ ЕМ обробці з $\sigma_3=0.51$ МПа до $\sigma_3=0.89$ МПа при одночасному збільшенні міцності адгезійних з'єднань.

Аналіз даних проведених досліджень (рис. 6), дозволяє стверджувати, що залишкові напруження (криві 2 і 3) монотонно знижуються при тривалості оброблення від 0с до 30с і від 60с до 120с, досягаючи свого піку лише при 60-ти секундній обробці композиції. На кривій 1 (рис. 6) спостерігається монотонне зростання залишкових напружень з піком на 30с.

6. Висновки

Встановлено, що надвисокочастотна електромагнітна обробка дозволяє покращити адгезійно-міцнісні властивості епоксикомпозитів. Вперше доведено, що оптимальний час НВЧ електромагнітної обробки пластифікованої епоксидної матриці становить 30 с, що забезпечує підвищення міцності адгезійних з'єднань на 35 % при збільшенні залишкових напружень з 2,9 МПа до 3,9 МПа у порівнянні з необробленими зразками з епоксидного зв'язувача.

Експериментально встановлено, що максимальні адгезійні характеристики мають композитні матеріали, наповнені SiC та В₄С після обробки в електромагнітному полі надвисокої частоти протягом 60 секунд. Введення таких наповнювачів дозволяє додатково підвищити міцність адгезійних з'єднань на 25 % та 12 % відповідно, у порівнянні з ненаповненою епоксидною матрицею. Встановлено, що підвищення вказаних характеристик досягається за рахунок виникнення радикалів, коли кількість парамагнітних центрів у зв'язувачі під дією НВЧ електромагнітної обробки зростає. При подальшому формуванні матеріалу радикали та парамагнітні центри рекомбінують з утворенням додаткових фізичних зв'язків з поверхнею металевої основи, підвищуючи міцність адгезійних з'єднань.

Виявлено, що матеріали наповнені лускатим графітом після 30с НВЧ електромагнітної обробки володіють кращими показниками міцності адгезійних з'єднань в порівнянні з необробленими зразками (на 22 %), проте дані покриття мають найнижчу адгезією до металевої основи, навіть в порівнянні з епоксидною матрицею. Це можна пояснити тим, що лускатий графіт має незначну активність і питому площу поверхні, є діаманетиком, що формування навколо часток наповнювача шарів з дефектною структурою

Література

1. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология [Текст] / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин. – СПб: Професия, 2008. – 560 с
2. Xantos, M. Functional fillers for plastics, 2nd edition [Text] / M. Xantos. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – 531 p.

3. Стухляк, П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями [Текст] / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, І. Г. Добротвор. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
4. Mehdizadeh, M. Microwave/RF methods for detection and drying of residual water in polymers [Text] / M. Mehdizadeh // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. Austin, Texas, 2004. – P. 32.
5. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – С-Пб. : Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
6. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов [Текст] / Ю. Г. Богданова. – М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям, 2010. – 68 с.
7. Кандырин, Л. Б. Исследование механических свойств наполненных композиций и полимербетонов на основе смесей фурановых и эпоксидных смол [Текст] / Л. Б. Кандырин, Б. Е. Усольцев и др. // Пласт. Массы. – 2000. – № 7. – С. 34–37.
8. Савчук, П. П. Структура та функціональні властивості епоксидних композитів, наповнених високодисперсними частинками [Текст] / П. П. Савчук, А. Г. Косторнов // Порошкова металургія. – 2009. – № 9/10. – С. 81–87.
9. Федоров, В. В. Дослідження впливу природи наповнювачів на реологічні властивості епоксидних композицій [Текст] / В. В. Федоров, Л. М. Білий // Наукові нотатки. – 2006. – Вип. 17. – С. 406–411.
10. Зубов, П. И. Структура и свойства полимерных покрытий [Текст] / П. И. Зубов Л. А. Сухарева. – М.:Химия,1982. – 256 с.
11. Varga, Cs. Modification of the mechanical properties of rubbers by introducing recycled rubber into the original mixture [Text] / Cs. Varga, N. Miskolczi, L. Bartha et al. // Global NEST Journal. – 2010. – Vol. 12, Issue 4. – P. 352–358.
12. Gunaratne, R. D. Microwave and conventional mechanical & thermal analysis of the reactions in epoxy vinyl ester resins [Text] / R. D. Gunaratne, R. J. Day // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. Austin, Texas, 2004. – P. 39.
13. Фельдман, Н. Я. Особенности проведения термических процессов в СВЧ-электромагнитном поле [Текст] / Н. Я. Фельдман // Современная электроника. – 2009. – № 5. – С. 64–67.
14. Калганова, С. Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле [Текст]: автореф. ... дис. докт. техн. наук / С. Г. Калганова. – Саратов, 2009. – 34 с.
15. Каблов, В. Ф. Влияние микроволнового излучения на прочностные свойства эластомерных композиций на основе непределельных каучуков [Текст] / В. Ф. Каблов, Н. А. Кейбал, Д. А. Провоторова, А. Е. Митченко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
16. Букетов, А. В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів [Текст] / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, Є. М. Кальба. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
17. Zhou, J. Research on the technology and the mechanical properties of the microwave processing of polymer [Text] / J. Zhou, C. Shi, B. Mei, R. Yuan, Z. Fu // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 137, Issues 1–3. – P. 156–158. doi:10.1016/S0924-0136(02)01082-8
18. Yue, C. Y. Influence of thermal and microwave processing on the mechanical and interfacial properties of a glass/epoxy composite [Text] / Y. Yue, H. C. Looi // Composites. – 1995. – Vol. 26, Issue 11. – P. 764–773. doi: 10.1016/0010-4361(95)98197-s
19. Chaowasakoo, T. Mechanical and morphological properties of fly ash/epoxy composites using conventional thermal and microwave curing methods [Text] / T. Chaowasakoo, N. Sombatsompop // Composites Science and Technology. 2007. – Vol. 67, Issue 11-12. – P. 2282–2291. doi: 10.1016/j.compscitech.2007.01.016