

УДК 667.64:678.026

С.В. ЯКУЩЕНКО, В.М. ГУСЕВ

Херсонська державна морська академія

Д.П. СТУХЛЯК

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ЕПОКСИДНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ

У роботі обґрунтовано доцільність відновлення деталей полімерними композитами. Показано, що введення у полімер нанодисперсних часток дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі. Для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, модифікатор, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і нанодисперсні частки. Досліджено залежність вмісту нанодисперсного порошку на адгезійні властивості і залишкові напруження епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу або захисного покриття з полішеними адгезійними властивостями оптимальний вміст часток становить 1,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним навантаженням, позаяк показники їх властивостей суттєво підвищуються порівняно з матрицею. Отримані результати експериментальних досліджень залишкових напружень у покриттях добре узгоджуються з результатами випробувань зразків на адгезійну міцність, що свідчить про їх достовірність. Доведено, що введення нанодисперсного наповнювача (СНДС І) ($d = 20 \dots 80$ нм), який є сумішшю нанодисперсних сполук: $Si_3N_4 - 59,5\%$; $Al_2O_3 - 24,4\%$; $AlN - 10,1\%$; $TiN - 6,0\%$ за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. у полімерний зв'язувач на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч.), модифікатора 2,4-діамінотолуену (1 мас.ч.) і твердника поліетиленполіаміну (10 мас.ч.) забезпечує формування матеріалу, який відзначається наступними показниками адгезійної міцності та залишкових напружень: $\sigma_a = 47,5$ МПа, $\tau = 11,2$ МПа, $\sigma_3 = 1,7$ МПа. Формування такого матеріалу забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві у 1,2 рази, адгезійної міцності при зсуві у 1,3 рази, при цьому залишкові напруження зменшуються у 2,2 рази.

Ключові слова: епоксидний композит, адгезійна міцність, залишкові напруження, покриття, нанодисперсний наповнювач.

С.В. ЯКУЩЕНКО, В.Н. ГУСЕВ

Херсонская государственная морская академия

Д.П. СТУХЛЯК

Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЭПОКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

В работе обоснована целесообразность восстановления деталей полимерными композитами. Показано, что введение в полимер нанодисперсных частиц позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики композитных материалов и защитных покрытий на их основе. Для формирования композитных материалов использован эпоксидно-диановый олигомер ЭД-20, модификатор, отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА и нанодисперсные частицы. Исследована зависимость содержания нанодисперсного порошка на адгезионные свойства и остаточные напряжения эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными адгезионными свойствами оптимальное содержание частиц составляет 1,00 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим нагрузкам, поскольку показатели их свойств существенно повышаются по сравнению с матрицей. Полученные результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в покрытиях хорошо согласуются с результатами испытаний образцов на адгезионную прочность, что свидетельствует об их достоверности. Доказано, что введение нанодисперсного наполнителя (СНДС І) ($d = 20 \dots 80$ нм), который представляет собой смесь нанодисперсных соединений: $Si_3N_4 - 59,5\%$; $Al_2O_3 - 24,4\%$; $AlN - 10,1\%$; $TiN - 6,0\%$ при содержании $q = 1,00$ масс.ч. в полимерный связующим на основе эпоксидно-дианового олигомера ЭД-20 (100 мас.ч.), модификатора 2,4 диаминотолуена (1 мас.ч.) и отвердителя полиэтиленполиамин (10 мас.ч.) обеспечивает формирование материала, который отмечается следующими показателями адгезионной прочности и остаточных напряжений: $\sigma_a = 47,5$ МПа, $\tau = 11,2$ МПа, $\sigma_3 = 1,7$ МПа. Формирование такого материала обеспечивает повышение показателей адгезионной прочности при отрыве в 1,2 раза, адгезионной прочности при сдвиге в 1,3 раза, при этом остаточные напряжения уменьшаются в 2,2 раза.

Ключевые слова: епоксидный композит, адгезионная прочность, остаточные напряжения, покрытие, нанодисперсный наполнитель.

S.V. YAKUSHCHENKO, V.M. HUSIEV
Kherson State Maritime Academy
D.P. STUKHLYAK
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THE INVESTIGATION OF ADHESION STRENGTH AND RESIDUAL STRESSES OF THE EPOXY NANOCOMPOSITES

The expediency of restoring parts with polymer composites is proved in the work. It is shown that the introduction of nanodispersed particles into the polymer makes it possible to substantially improve the performance characteristics of composite materials and protective coatings based on them.

The epoxy diene oligomer ED-20, modifier, hardener polyethylene polyamine PEPA and nanodispersed particles were used to forming composite materials. The dependence of the nanodisperse powder content on the adhesion properties and residual stresses of epoxy composites was studied. It has been proved that for the formation of a composite material or protective coating with improved adhesive and cohesive properties, the optimum particle content is 1.00 pts.wt. by 100 pts.wt. of epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to resist static, dynamic loads, since their properties significantly increase in comparison with the matrix. The obtained results of experimental studies of residual stresses in coatings are in good agreement with the results of testing the samples for adhesion strength, which indicates their reliability.

It has been proved that the introduction of nanodispersed filler (MNDS 1) ($d = 20 \dots 80 \text{ nm}$), which is a mixture of nanodispersed compounds: $\text{Si}_3\text{N}_4 - 59.5\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 24.4\%$; $\text{AlN} - 10.1\%$; $\text{TiN} - 6.0\%$ at contents $q = 1.00 \text{ pts.wt.}$ into the polymer binder on the basis of an epoxy diene oligomer ED-20 (100 pts.wt.), a modifier of 2,4-diaminotoluene (1 pts.wt.), and a polyethylene polyamine (10 pts.wt.) ensures the formation of the material which is characterized the following indicators of adhesion strength and residual stresses: $\sigma_a = 47.5 \text{ MPa}$, $\tau = 11.2 \text{ MPa}$, $\sigma_r = 1.7 \text{ MPa}$.

The formation of such material provides an increase in the indicators of adhesion strength of 1.2 times, adhesion shear strength by 1.3 times, with residual stresses decreasing by 2.2 times.

Keywords: epoxy composite, adhesive strength, residual stresses, coating, nanodispersed filler.

Постановка проблеми

Епоксидні смоли є широкоживим зв'язувачем при виготовленні композитних матеріалів (КМ) [1]. Вони характеризуються широким спектром поліпшених фізичних і хімічних властивостей, що робить їх важливими в умовах розвитку сучасних технологій полімерного матеріалознавства [2, 3]. Завдяки підвищеним показникам адгезійної міцності до різноманітних оброблених і необроблених металевих поверхонь захисні покриття на основі епоксидного зв'язувача використовують в багатьох галузях промисловості [4, 5]. Проте, незважаючи на високі показники адгезійних характеристик до металів (насамперед до сталльної поверхні), у агресивних середовищах, особливо за підвищених температур, адгезійна міцність є недостатньою. Тому актуальним завданням на сьогодні є підвищення адгезійної міцності епоксидного зв'язувача до сталльної основи. Одним із ефективних способів підвищення адгезійних характеристик КМ є об'ємна модифікація полімерних матеріалів нанонаповнювачами за незначного вмісту добавок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Авторами [6–8] досліджено адгезійні властивості КМ на основі епоксидних смол. Показано доцільність їх використання у вигляді захисних покриттів технологічного устаткування. Встановлено [8], що поліпшення властивостей КМ можна досягти шляхом введення у зв'язувач різних за природою та дисперсністю добавок. Доведено [8, 9], що наночастки мають унікальні властивості, що передбачає їх підвищену хімічну та фізичну активність при зшиванні композицій. Експериментальні випробування, описані авторами праць [9–11], показали перспективність прогнозованого поліпшення фізико-механічних та адгезійних властивостей КМ за рахунок введення у епоксидний зв'язувач ED-20 наночасток за незначного вмісту. Отже, дослідження впливу нанонаповнювачів на адгезійні властивості епоксидних композитів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Мета дослідження

Мета роботи – дослідити вплив вмісту нанодисперсних наповнювачів на властивості полімерних композитів для відновлення деталей технологічного устаткування.

Матеріали та методика дослідження

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Як модифікатор використано 2,4-діамінотолуен (ДАТ). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78). Як нанодисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано порошки, які є сумішшю нанодисперсних сполук (СНДС) і характеризуються наступним складом, %: СНДС 1: Si_3N_4 – 59,5; Al_2O_3 – 24,4; AlN – 10,1; TiN – 6,0; СНДС 2: Si_3N_4 – 85; AlF_3 – 5; In – 5; ZrH – 5. Зернистість часток становить: СНДС 1 – $d = 20 \dots 80$ нм, СНДС 2 – $d = 30 \dots 40$ нм.

Адгезійну міцність КМ до металевію основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у покриттях визначали консольним методом [4]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм, робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм.

Викладення основного матеріалу дослідження

Попередньо експериментально досліджено властивості модифікованої 2,4-діамінотолуеном і обробленої ультразвуком епоксидної матриці. Доведено (рис. 1), що показники її адгезійної міцності при відриві і зсуві, а також залишкових напружень становлять відповідно: $\sigma_a = 39,1$ МПа, $\tau = 8,6$ МПа, $\sigma_3 = 3,7$ МПа. На першому етапі досліджували адгезійні властивості КМ за вмісту наповнювача СНДС 1 у кількості $q = 0,10 \dots 2,00$ мас.ч. За вмісту наповнювача у кількості $q = 0,10$ мас.ч. отримано незначне підвищення адгезійної міцності при відриві від $\sigma_a = 39,1$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 41,5$ МПа та адгезійної міцності при зсуві від $\tau = 8,6$ МПа до $\tau = 9,9$ МПа (рис. 1, крива 1, 2). За збільшення вмісту наповнювача до $q = 0,50$ мас.ч. спостерігали додаткове підвищення σ_a до 44,6 МПа, при цьому показники адгезійної міцності при зсуві досліджуваного композиту залишились на тому ж рівні та становлять $\tau = 9,7$ МПа. За підвищення вмісту СНДС 1 в матеріалі до 1,00 мас.ч. встановлено максимальні показники адгезійної міцності при відриві та зсуві: $\sigma_a = 47,5$ МПа і $\tau = 11,2$ МПа відповідно. Очевидно, це пов'язано із наявністю у порошок СНДС 1 триоксиду алюмінію (Al_2O_3) – 24,4 %. Відомо [11], що додавання наночасток Al_2O_3 до епоксидного зв'язувача підвищує адгезійну міцність композитів за рахунок утворення карбоксильних груп на межі поділу між зв'язувачем та сталююю основою. Для КМ із вмістом нанонаповнювача у кількості $q = 2,00$ мас.ч. отримали мінімальні показники властивостей. У цьому випадку адгезійна міцність при відриві становить – $\sigma_a = 41,9$ МПа, міцність при зсуві – $\tau = 7,0$ МПа.

На наступному етапі досліджували залишкові напруження, які виникають в тонкому шарі покриття на металевій основі. Як відомо [3, 4], утворення залишкових напружень при полімеризації зв'язувача пов'язане з тим, що у першу чергу зшивання матеріалу відбувається в приповерхневому шарі на межі поділу фаз «захисне покриття – металева основа» і супроводжується усадкою адгезиву. Крива 3 на рис. 1 характеризує залежність залишкових напружень від вмісту наповнювача СНДС 1. Встановлено, що залишкові напруження знижуються від $\sigma_3 = 3,7$ МПа до $\sigma_3 = 1,9$ МПа за вмісту наповнювача – $q = 0,10$ мас.ч. Доведено, що при введенні у зв'язувач СНДС 1 у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. залишкові напруження знижуються від $\sigma_3 = 3,7$ МПа (для модифікованої епоксидної матриці) до $\sigma_3 = 1,5 \dots 1,7$ МПа. Отже, за даного вмісту наповнювача суттєво зменшуються залишкові напруження в матеріалах, що передбачає підвищення довговічності і надійності захисних покриттів та полімер композитних виробів.

Мінімальні значення залишкових напружень виявлено у КМ за вмісту добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Проте, адгезійні властивості таких КМ є також мінімальними. Отже, на основі результатів дослідження встановлено критичний вміст нанонаповнювача СНДС 1 у модифікованій епоксидній матриці. Доведено, що введення наночасток СНДС 1 за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. у полімерний зв'язувач на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч.), модифікатора 2,4-діамінотолуену (1 мас.ч.) і твердника поліетиленполіаміну (10 мас.ч.) забезпечує формування матеріалу, який відзначається наступними показниками адгезійної міцності та залишкових напружень: $\sigma_a = 47,5$ МПа, $\tau = 11,2$ МПа, $\sigma_3 = 1,7$ МПа. Формування такого матеріалу забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві у 1,2 рази, адгезійної міцності при зсуві у 1,3 рази, при цьому залишкові напруження зменшуються у 2,2 рази.

Такі ж дослідження адгезійної міцності та залишкових напружень у КМ проведено для матеріалів з наповнювачем СНДС 2 за аналогічного діапазону вмісту останнього. Встановлено (рис. 2), що за вмісту наповнювача – $q = 0,10$ мас.ч. показники адгезійної міцності при відриві та зсуві КМ підвищуються від $\sigma_a = 39,1$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 47,5$ МПа та від $\tau = 8,6$ МПа до $\tau = 8,8$ МПа відповідно. При цьому показники залишкових напружень знижуються від $\sigma_3 = 3,7$ МПа до $\sigma_3 = 2,3$ МПа. За збільшення вмісту наповнювача до $q = 0,50$ мас.ч. спостерігали погіршення адгезійних властивостей КМ до

$\sigma_a = 46,9$ МПа і $\tau = 8,5$ МПа. Залишкові напруження в матеріалі за даного вмісту добавки майже не змінюються і становлять $\sigma_3 = 2,2$ МПа. За вмісту СНДС 2 у кількості $q = 1,00$ мас.ч. виявлено максимальне підвищення показників адгезійної міцності при відриві та зсуві КМ: $\sigma_a = 59,2$ МПа, $\tau = 9,1$ МПа (рис. 2, крива 1, 2). Показники залишкових напружень таких покриттів знижуються до $\sigma_3 = 1,6$ МПа. Надалі введення наночастинок у КМ понад критичного вмісту спостерігали погіршення властивостей матеріалів і за вмісту добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. формується композит з такими властивостями: $\sigma_a = 49,7$ МПа, $\tau = 8,6$ МПа, $\sigma_3 = 1,6$ МПа.

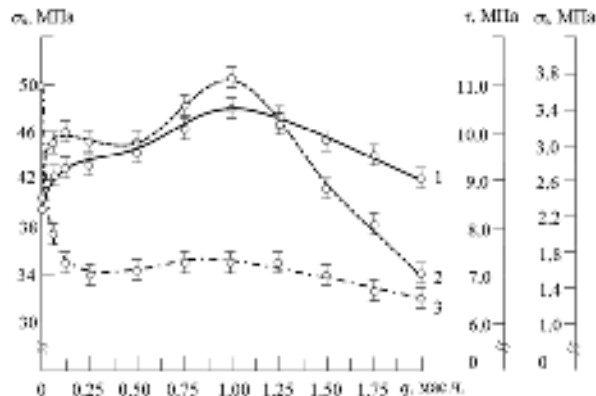


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту нанонаповнювача СНДС 1: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

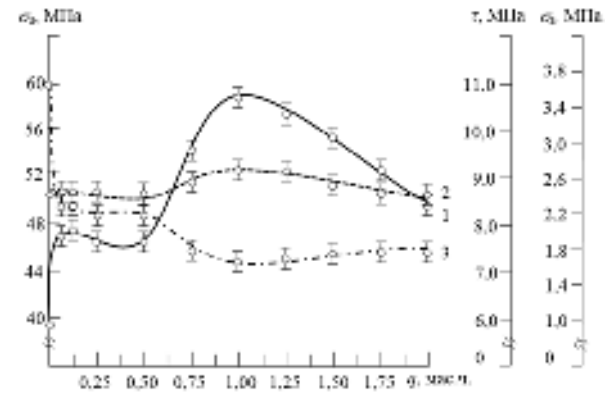


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту нанонаповнювача СНДС 2: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Отже, на основі результатів дослідження встановлено критичний вміст нанонаповнювача СНДС 2 у модифікованій епоксидній матриці. Доведено, що введення наночастинок СНДС 2 за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. у полімерний зв'язувач на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч.), модифікатора 2,4-діамінотолуену (1 мас.ч.) і твердника полетиленполіаміну (10 мас.ч.) забезпечує формування матеріалу, який відзначається наступними показниками адгезійної міцності та залишкових напружень: $\sigma_a = 59,2$ МПа, $\tau = 9,1$ МПа, $\sigma_3 = 1,6$ МПа. Формування такого матеріалу забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві у 1,5 разів, адгезійної міцності при зсуві у 1,1 разів, при цьому залишкові напруження зменшуються у 2,3 рази.

Також було проведено якісний аналіз світлин поверхонь досліджуваних матеріалів за вмісту наповнювачів СНДС 1 та СНДС 2 після полімеризації. На рис. 3 наведено характерні поверхні металевих зразків, на які нанесено досліджуваний КМ із добавкою СНДС 1. Зокрема, за вмісту наповнювача у кількості $q = 0,25$ мас.ч. та $q = 0,50$ мас.ч. спостерігали нерівномірність за товщиною полімерного композиту на металевій поверхні, наявні ділянки відшарування матеріалів внаслідок локальних термічних напружень (рис. 3, а, б). За збільшення вмісту наповнювача до $q = 0,75$ мас.ч. виявлено підвищення його адгезійної міцності до металеві основи (рис. 1), проте, також спостерігали утворення дефектів у захисному покритті. На рис. 3, г наведено світлину поверхні композиту за вмісту добавки у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Візуально дефектів у адгезиві не спостерігали, відсутні локальні термічні напруження. Надалі збільшення кількості наповнювача до $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. призводить до формування композитів, які характеризуються неоднорідністю поверхні полімеру, незначними ділянками відшарування матеріалу (рис. 3, д–е). Отже, результати дослідження композитів методом оптичної мікроскопії підтверджують результати випробувань адгезійних властивостей КМ та залишкових напружень у них.

При порівнянні динаміки показників властивостей епоксидних КМ, наповнених СНДС 1 та СНДС 2, встановлено, що полімерні матеріали мають оптимальні значення адгезійної міцності та залишкових напружень за однакового вмісту наночастинок ($q = 1,00$ мас.ч.). Для КМ з СНДС 1 (за критичного вмісту добавки) отримали наступні значення показників: $\sigma_a = 47,5$ МПа, $\tau = 11,2$ МПа, $\sigma_3 = 1,7$ МПа; для КМ з СНДС 2 (за критичного вмісту добавки) – $\sigma_a = 59,2$ МПа, $\tau = 9,1$ МПа, $\sigma_3 = 1,6$ МПа. Порівняльний аналіз дозволив визначити, що КМ, наповнений СНДС 1 характеризується вищою адгезійною міцністю при відриві, але має нижчу адгезійну міцність при зсуві, ніж КМ із СНДС 2. Залишкові напруження при цьому мають майже однакові значення: $\sigma_3 = 1,6$ МПа і $\sigma_3 = 1,7$ МПа. Очевидно, що матеріал, який містить наповнювач СНДС 2, доречно використовувати за необхідності захисту деталей технологічного устаткування багатошаровими покриттями. Водночас, матеріал, наповнений СНДС 1, краще використовувати для нанесення на деталі, які при експлуатації зазнають тангенціальних навантажень.

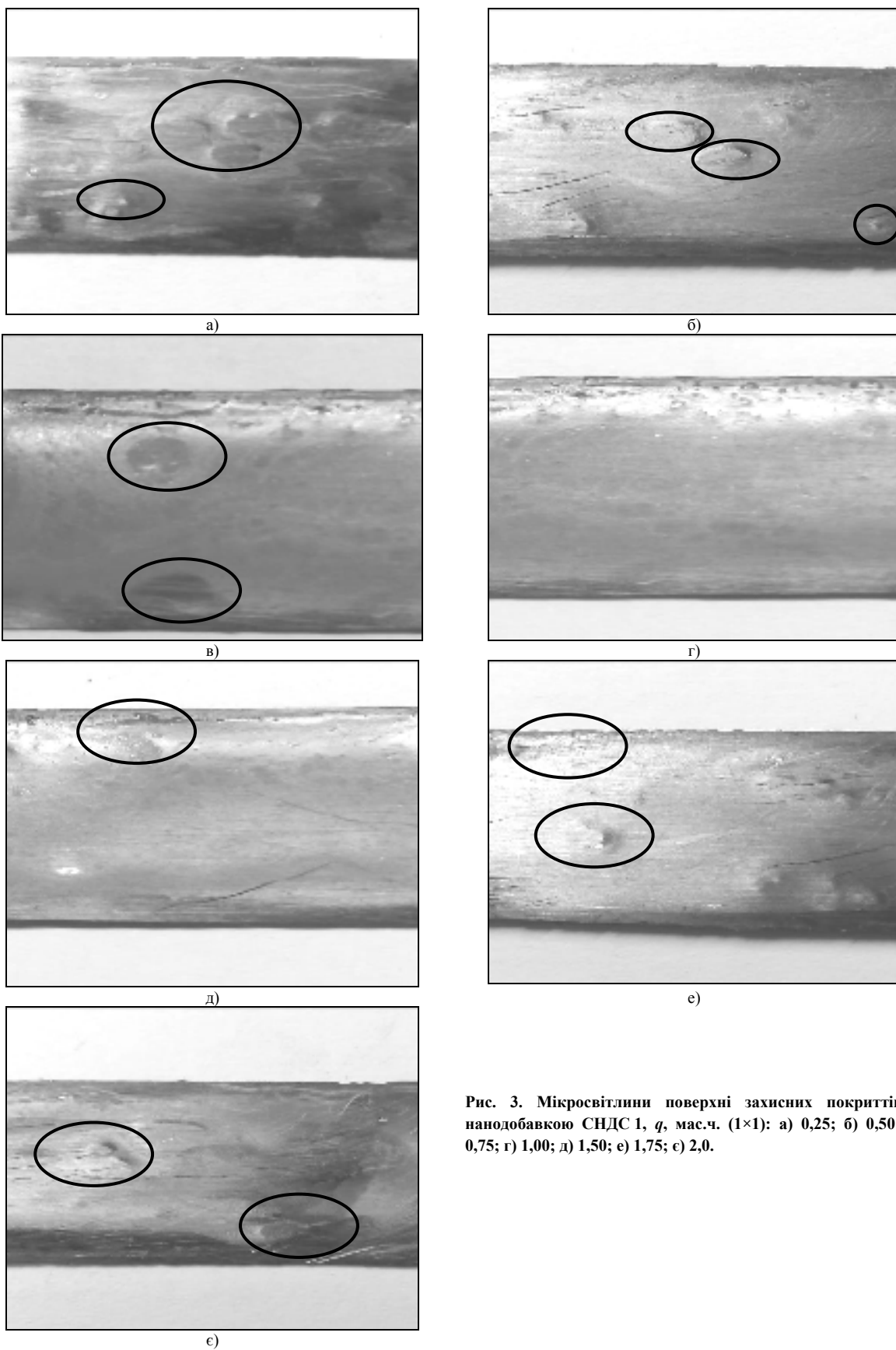


Рис. 3. Мікросвіттлини поверхні захисних покриттів з нанодобавкою СНДС 1, q , мас.ч. (1×1): а) 0,25; б) 0,50; в) 0,75; г) 1,00; д) 1,50; е) 1,75; е) 2,0.

Висновки

На основі результатів дослідження встановлено критичний вміст нанонаповнювачів СНДС 1 і СНДС 2 у модифікованих епоксидних композитах з поліпшеними адгезійними властивостями. У результаті проведених експериментів можна констатувати наступне.

1. Доведено, що введення нанодисперсного наповнювача (СНДС 1) ($d = 20 \dots 80$ нм), який є сумішшю нанодисперсних сполук: Si_3N_4 – 59,5 %; Al_2O_3 – 24,4 %; AlN – 10,1 %; TiN – 6,0 % за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. у полімерний зв'язувач на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч.), модифікатора 2,4-діамінотолуену (1 мас.ч.) і твердника поліетиленполіаміну (10 мас.ч.) забезпечує формування матеріалу, який відзначається наступними показниками адгезійної міцності та залишкових напружень: $\sigma_a = 47,5$ МПа, $\tau = 11,2$ МПа, $\sigma_s = 1,7$ МПа. Формування такого матеріалу забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві у 1,2 рази, адгезійної міцності при зсуві у 1,3 рази, при цьому залишкові напруження зменшуються у 2,2 рази.
2. Встановлено, що введення нанодисперсного наповнювача (СНДС 2) ($d = 30 \dots 40$ нм), який є сумішшю нанодисперсних сполук: Si_3N_4 – 85 %; AlF_3 – 5 %; In – 5 %; ZrH – 5 % за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. у полімерний зв'язувач на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч.), модифікатора 2,4-діамінотолуену (1 мас.ч.) і твердника поліетиленполіаміну (10 мас.ч.) забезпечує формування матеріалу, який відзначається наступними показниками адгезійної міцності та залишкових напружень: $\sigma_a = 59,2$ МПа, $\tau = 9,1$ МПа, $\sigma_s = 1,6$ МПа. Формування такого матеріалу забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві у 1,5 разів, адгезійної міцності при зсуві у 1,1 разів, при цьому залишкові напруження зменшуються у 2,3 рази.
3. Композитний матеріал, що містить наповнювач СНДС 2, доречно використовувати як захисне покриття для деталей та механізмів з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик. Водночас, матеріал, наповнений СНДС 1, краще використовувати для нанесення на деталі, які при експлуатації зазнають тангенціальних напружень.

Список використаної літератури

1. Mark H.F. Encyclopedia of Polymer Science and Technology / ed. By H.F. Mark. – John Wiley&Sons, 2002. – 3005 p.
2. Pascault, J.R. Epoxy Polymers: New Materials and Innovations / ed. by J.R. Pascault, J.J. Williams. – John Wiley & Sons, 2010. – 367 p.
3. Стухляк П.Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, О.І. Редько. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
4. Stukhlyak P.D. et al. Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment // Materials Science. – 2015. – Т. 51. – №. 2. – С. 208-212.
5. Букетов А.В. Вплив дрібнодисперсних мінеральних добавок на властивості полімерних композитів / А.В.Букетов, М.В. Браїло // Вопросы химии и химической технологии. – 2014. – №. 1. – С. 39-43.
6. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов.. – Тернопіль: Збруч. – 2009. – 237 с.
7. Букетов А. Дослідження адгезійної міцності і залишкових напружень у модифікованих епоксидних композитах / А. Букетов, П. Стухляк, В. Левицький // Вісник ТДТУ. – 2008. – Том 13. – № 4. – С. 31-40.
8. Salom C. et al. Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2017. – Vol. 84. – P. 119-125.
9. Buketov A. et al. Regularities of Impact Failure of Epoxy Composites with Al_2O_3 Microfiller and their Analysis on the Basis of External Surface Layer Concept // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications, 2016. – Т. 712. – С. 149-154.
10. Buketov A.V. et al. Mechanical Characteristics of Epoxy Nanocomposite Coatings with Ultradisperse Diamond Particles // Strength of Materials. – 2017. – Т. 49. – №. 3. – С. 464-471.
11. Zhai L.L. Effect of nano- Al_2O_3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel / L.L.Zhai, G.P.Ling, Y.W.Wang // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2008. – Т. 28. – №. 1-2. – С. 23-28.