

А.В. Букетов, В.О. Скирденко

### ВПЛИВ ПРИРОДИ НАПОВНЮВАЧІВ, ЩО Є ВІДХОДАМИ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА, НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ І ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Оптимізовано склад адгезійного і функціональних поверхневих шарів для формування двошарових покриттів з поліпшеними адгезійними, фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Встановлено, що при формуванні адгезійного шару доцільно вводити частки вугільного шлаку (63 мкм) за вмісту  $q = 10...15$  мас.ч. на  $q = 100$  мас.ч. епоксидного олігомеру. При формуванні поверхнього шару для покриттів з поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями необхідно використовувати як наповнювач вугільний шлак за вмісту  $q = 50...80$  мас.ч. на  $100$  мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.*

*Ключові слова:* епоксидний композит, фізико-механічні і теплофізичні властивості, наповнювач

*Рис. 4. Табл. 1. Літ. 6.*

А.В. Букетов, В.О. Скирденко

### ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ НАПОЛНИТЕЛЕЙ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ОТХОДАМИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА, НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Оптимизирован состав адгезионного и функциональных поверхностных слоев для формирования двухслойных покрытий с улучшенными адгезионными, физико-механическими и теплофизическими свойствами. Установлено, что при формировании адгезионного слоя целесообразно вводить частицы угольного шлака (63 мкм) в количестве  $q = 10...15$  масс.ч. на  $q = 100$  масс.ч. эпоксидного олигомера. При формировании поверхностного слоя для покрытий с улучшенными физико-механическими свойствами необходимо использовать как наполнитель угольный шлак в количестве  $q = 50...80$  масс.ч. на  $q = 100$  масс.ч. эпоксидного олигомера ЕД-20.*

*Ключевые слова:* эпоксидный композит, физико-механические и теплофизические свойства, наполнитель.

A.V. Buketov, V.O. Skirdenko

### INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NATURE MICRODISPERSED FILLERS ON PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES EPOXY COMPOSITES

*Optimized composition of the adhesive and the functional surface layers to form a two-layer coating with improved adhesion, physical, mechanical and thermal properties. Found that the formation of the adhesion layer is advantageously introduced coal slag particles in an amount of  $q = 10...15$  m.p. for  $q = 100$  m.p. epoxy oligomer. When forming the surface layer of the coating with improved physical and mechanical properties to be used as a filler in an amount of coal slag  $q = 50...80$  m.p. for  $q = 100$  m.p. epoxy oligomer.*

*Keywords:* epoxy composite, physical, mechanical and thermal properties, fillers.

**Постановка проблеми.** Епоксидні смоли та отримані на їх основі полімерні композити на сьогодні широко використовуються у різних галузях промисловості, на транспорті, енергетиці, суднобудуванні, будівництві, машинобудуванні, сільському господарстві та ін. Їх переважно застосовують як клеї, лаки, фарби та покриття різного функціонального призначення, а також використовують у вигляді зв'язувачів для композитних матеріалів (КМ). До епоксидних низькомолекулярних олігомерів додають різноманітні модифікатори і наповнювачі, в результаті чого після зшивання отримують неплавкі та нерозчинні матриці або покриття з доброю хімічною і водостійкістю. Для характеристики епоксидних смол, як правило, використовують епоксидне число, що характеризує вміст епоксидних груп у олігомері. Зокрема, епоксидні смоли, наприклад, ЕД-20, ЕД-16 мають відповідно 19...22% та 16...18% епоксидних груп. Дослідженнями авторів [1-4] встановлено, що епоксидні композити відзначаються доброю адгезією до субстратів із різних металів, кераміки, дерева, скла та пластмас, цегли та бетону. При цьому вони є стійкими до дії кислот, лугів низької та середньої концентрації, а також до нафтопродуктів: бензину, толуолу, дизельного палива, мастила та ін. [3]. Як правило, епоксикомпозити характеризуються високою життєздатністю (від двох до десяти років), їх об'ємна усадка складає не більше 3...8 %, а тривалість гелеутворення матриці можливо регулювати відповідними технологіями у діапазоні від 2 до 100 год. При затвердженні епоксиданові смоли і, зокрема, олігомер марки ЕД-20 не виділяють летких речовин. При цьому зазначають порівняно просту технологію їх застосування у вигляді захисних покриттів на деталі зі складним профілем поверхні [3, 4]. Слід зазначити, що фізико-механічні, теплофізичні та електротехнічні властивості епоксикомпозитів у комплексі можна ефективно регулювати додаванням у вигляді наповнювачів матеріалів різної фізичної

природи. В основному при цьому використовують переважно дисперсні наповнювачі у вигляді порошкових матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз публікацій у напрямку дослідження властивостей епоксикомпозитів вказує на необхідність введення у зв'язувач пластифікаторів, модифікаторів та наповнювачів для отримання епоксиполімерів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Доведено [1, 4], що введення у зв'язувач дрібно- і грубодисперсних часток, навіть за незначної кількості, забезпечує зміну швидкості перебігу фізико-хімічних процесів при структуроутворенні матеріалів. Причому важливе значення при регулюванні процесів зшивання епоксидних КМ має не лише хімічна і фізична природа, але й вміст та дисперсність часток. Як зазначено у працях [1, 3-5] для поліпшення адгезійних властивостей у зв'язувач доцільно вводити дрібнодисперсні частки (8...30 мкм), у той час як для поліпшення когезійної міцності композитів необхідно використовувати грубодисперсний наповнювач (63...120 мкм). Крім того, доцільно вводити у КМ бідисперсні добавки. Враховуючи це вважали за доцільне проведення відповідних досліджень зі встановлення впливу природи дисперсного наповнювача на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних КМ. Слід зазначити, що для зменшення вартості розроблених КМ як наповнювачі використано відходи промислового виробництва.

**Мета роботи** – встановити вплив природи дисперсних наповнювачів, які є відходами промислового виробництва, на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних КМ.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано 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 їх затверджувати при кімнатних температурах. Твердник вводили у епоксидний олігомер за співвідношення ПЕПА : ЕД-20 – 1 : 10.

Як наповнювач використано дисперсні порошки (63 мкм): Сталь 45 (ГОСТ 1050-88), пермалой 45Н (ГОСТ 10994-74) та вугільний шлак (ВШ), що є продуктом згорання кам'яного вугілля, яке, у свою чергу, подрібнювали механічним способом.

Вибір технологічних режимів формування КМ є одним з основних напрямків регулювання їхніх властивостей, тому епоксидні композити формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 і наповнювача та подальше введення його у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсних часток; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції упродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання упродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ упродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження зразків у термошафі до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів, що відбуваються у матриці, зразки витримували упродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, після чого проводили експериментальні випробування.

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження при рівномірному відриві пари склеєних зразків («метод грибків»). Дослідження проводили згідно ГОСТ 14760-69, вимірюючи силу відривання клейових з'єднань сталевих зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталевих зразків становив –  $d = 25$  мм. Залишкові напруження у КМ визначали консольним методом [6]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3...0,5$  мм формували на сталевій основі. Параметри основи: загальна довжина –  $l = 100$  мм; робоча довжина –  $l_0 = 80$  мм; товщина –  $\delta = 0,2$  мм.

Руйнівне напруження і модуль пружності при згинанні КМ визначали згідно ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм. Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю  $v = 3$  К/хв під дією постійного згинаючого навантаження  $F = 50 \pm 0,5$  Н. Внаслідок цього матеріал деформується на прийнятну за стандартом величину ( $h = 6$  мм).

З метою отримання необхідної достовірності результатів дослідження було проведено серію пошукових експериментів, виконано порівняння експериментального та табличного значення коефіцієнту варіації. В результаті цього було встановлено необхідну кількість дубльованих дослідів, яка за достовірності результатів 95 % складала 6 зразків.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Дослідження проводили у два етапи. На першому етапі досліджували у комплексі адгезійні властивості (міцність зчеплення адгезиву та субстрату при відриві) та залишкові напруження у покриттях, сформованих на сталій основі. На другому етапі з метою оптимізації інгредієнтів для функціонального шару досліджували у комплексі когезійні властивості, які у подальшому визначають показники фізико-механічних і теплофізичних характеристик КМ.

Дисперсні частки наповнювачів – Сталь 45, пермалой марки Н45 і вугільний шлак (ВШ) вводили у зв'язувач за вмісту від  $q = 5$  мас.ч. до  $q = 80$  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). Такий діапазон вмісту часток вибрано з умови оптимізації інгредієнтів шарів у двошаровому покритті: адгезійного шару (де, на наш погляд, необхідно вводити незначну кількість добавок) і водночас – поверхневого шару, що, очевидно, буде містити відносно великий об'єм наповнювача.

Результати експериментальних досліджень зміни адгезійної міцності КМ при розриві залежно від вмісту у епоксидній матриці наповнювачів різної фізичної природи наведено на рис. 1. Встановлено, що за зазначених вище умов формування матеріалів адгезійна міцність при розриві епоксидної матриці становить  $\sigma_a = 18,5$  МПа. Введення наповнювачів по-різному впливає на адгезійну міцність КМ. Встановлено (рис. 1), що максимальними показниками адгезійної міцності відзначаються КМ, наповнені вугільним шлаком при вмісті 15 мас.ч. Введення у зв'язувач часток ВШ при даному вмісті забезпечує підвищення показників адгезійної міцності КМ з  $\sigma_a = 18,5$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 56,5$  МПа. Надалі збільшення вмісту наповнювача призводить до зменшення показників адгезійної міцності, які за вмісту часток ВШ  $q = 80$  мас.ч. становлять  $\sigma_a = 31,0$  МПа. Встановлено (рис. 1), що критичним вмістом наповнювача ВШ для поліпшення адгезійних властивостей матеріалів є  $q = 15 \dots 20$  мас.ч. На наш погляд це зумовлено тим, що навколо часток при зшиванні КМ формуються адсорбційні і зовнішні поверхневі шари, які, в основному, визначають властивості композитів. При значному вмісті часток ( $q = 30 \dots 80$  мас.ч.), а також під впливом поверхні субстрату дані шари формуються, однак їхня структура не характеризується високим ступенем зшивання. Свідченням цього є зменшення показників адгезійної міцності при такому вмісті дисперсних часток. Підтвердженням наведеним вище положенням є результати дослідження впливу вмісту часток ВШ на залишкові напруження у КМ (рис. 2).

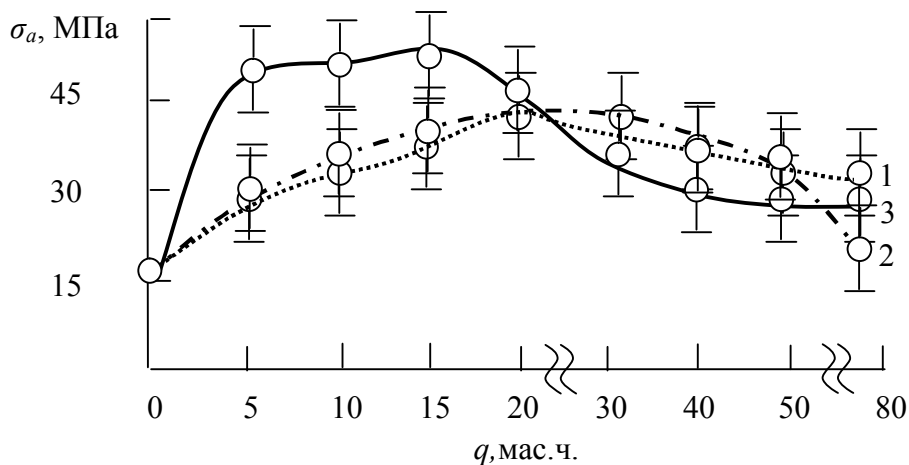


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності при відриві ( $\sigma_a$ ) від вмісту наповнювача ( $q$ ):  
1 – Сталь 45; 2 – пермалой 45Н; 3 – ВШ

Аналіз впливу вмісту часток ВШ на показники залишкових напружень у КМ підтверджує достовірність отриманих експериментальних досліджень. Встановлено, що залишкові напруження для епоксидної матриці становлять  $\sigma_3 = 2,3$  МПа (рис. 2). Введення часток ВШ при  $q = 5 \dots 30$  мас.ч. приводить до зменшення показників залишкових напружень до  $\sigma_3 = 1,6 \dots 2,1$  МПа. При вмісті часток  $q = 40 \dots 50$  мас.ч. залишкові напруження у КМ становлять  $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,2$  МПа. Тобто, в основному при збільшенні вмісту часток спостерігали монотонне зменшення залишкових напружень, що свідчить про зменшення ступеня зшивання матеріалів на межі поділу фаз «епоксидний композит – металева основа».

Аналогічно до наведених вище результатів аналізували вплив як наповнювача дисперсних часток з матеріалу – Сталь 45 на властивості КМ. Експериментально встановлено, що критичний

вміст даного наповнювача у епоксидному композиті становить  $q = 20$  мас.ч. (рис. 1, рис. 2). Показано, що введення часток сталі при такому вмісті у епоксидну матрицю забезпечує, порівняно з матрицею, підвищення адгезійної міцності при відриві з  $\sigma_a = 18,5$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 40,7$  МПа. Залишкові напруження при цьому зменшуються в усьому досліджуваному діапазоні зміни вмісту наповнювача з  $\sigma_3 = 2,3$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Водночас доведено, що збільшення вмісту часток зі Сталі 45 понад  $q = 20$  мас.ч. зумовлює погіршення показників адгезійної міцності КМ.

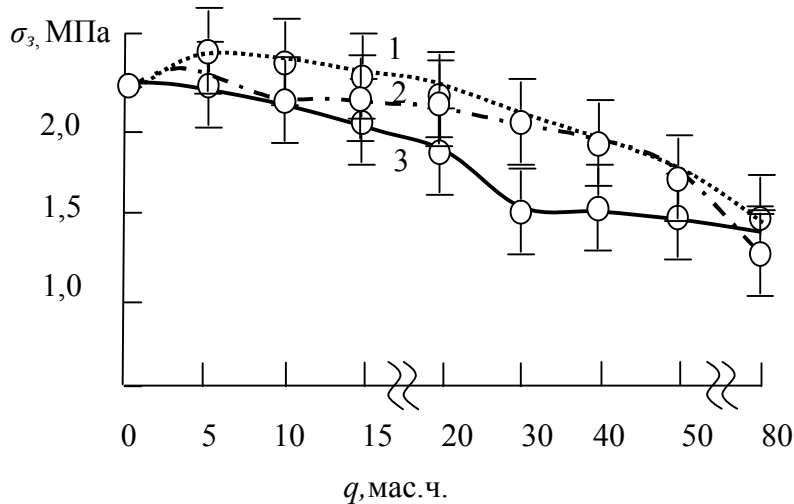


Рис. 2. Залежність залишкових напружень ( $\sigma_3$ ) від вмісту наповнювача ( $q$ ):  
1 – Сталь 45; 2 – пермалою 45Н; 3 – ВШ

Аналіз зміни властивостей КМ, наповнених частками пермалою Н45, дозволив встановити, що максимальними показниками адгезійної міцності відзначаються матеріали, які містять  $q = 20 \dots 30$  мас.ч. наповнювача. Введення у зв'язувач часток при такому вмісті дозволяє підвищити показники адгезійної міцності при відриві з  $\sigma_a = 18,5$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 38,6$  МПа. Збільшення вмісту наповнювача до  $q = 80$  мас.ч. призводить до погіршення адгезійних властивостей матеріалів. Також встановлено, що залишкові напруження зі збільшенням вмісту часток зменшуються з  $\sigma_3 = 2,3$  МПа (для матриці) до  $\sigma_3 = 1,2$  МПа (за вмісту часток у КМ –  $q = 80$  мас.ч.). Отже, на основі отриманих визначено критичний вміст часток пермалою Н45 у композиті з поліпшеними адгезійними властивостями, який становить  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. Необхідно зазначити, що показники адгезійної міцності КМ з пермалою Н45, порівняно з КМ, наповнених частками Сталі 45, є меншими, однак вони водночас характеризуються і дещо нижчими показниками залишкових напружень.

Підсумовуючи наведені вище результати експериментальних досліджень, можна стверджувати, що при формуванні адгезійного шару для захисних покриттів доцільно вводити незалежно два види наповнювачів: частки вугільного шламу за вмісту  $q = 15 \dots 20$  мас.ч. або частки Сталі 45 за вмісту  $q = 20 \dots 30$  мас.ч. на  $q = 100$  мас.ч. епоксидного олігомеру. Аналіз результатів дослідження вказує на кореляцію показників адгезійної міцності і залишкових напружень залежно від вмісту та природи наповнювача у КМ.

На другому етапі досліджували вплив фізичної природи наповнювачів і їх кількісного вмісту на когезійні властивості КМ, які, відповідно, визначають показники їх фізико-механічних та теплофізичних характеристик. Встановлено, що максимальними показниками модуля пружності при згинанні характеризуються КМ, наповнені частками ВШ (рис. 3). Показано, що збільшення вмісту часток ВШ у епоксидному олігомері приводить до зростання модуля пружності КМ і за вмісту наповнювача  $q = 15 \dots 20$  мас.ч. отримали максимальне підвищення показників з  $E = 2,8$  ГПа (для епоксидної матриці) до  $E = 4,9 \dots 5,2$  ГПа (рис. 4). Надалі збільшення вмісту часток до  $q = 80$  мас.ч. зумовлює зменшення показників модуля пружності при згинанні до  $E = 2,5$  ГПа. Порівняльний аналіз кривих залежності руйнівного напруження при згинанні від вмісту наповнювачів дозволяє констатувати, що найкращими властивостями відзначаються також матеріали, наповнені частками ВШ (рис. 5). Однак, оптимальний вміст наповнювача, при якому отримали максимальні показники руйнівних напружень становить  $q = 40$  мас.ч. Введення часток ВШ за даного вмісту забезпечує підвищення руйнівних напружень з  $\sigma_p = 47,6$  МПа (для

епоксидної матриці) до  $\sigma_p = 74 \dots 80$  МПа. Надалі збільшення вмісту часток до  $q = 50 \dots 80$  мас.ч. призводить до зменшення руйнівних напружень при згинанні до  $\sigma_p = 49,0$  МПа.

Окрім дослідження фізико-механічних властивостей КМ додатково випробовували теплостійкість композитів. Встановлено (табл. 1), що при збільшенні вмісту наповнювача теплостійкість матеріалів монотонно зростає і при вмісті наповнювача  $q = 80$  мас.ч. вона збільшується з  $T = 338$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 350$  К. Отже, аналізуючи вплив вмісту наповнювача ВШ на фізико-механічні властивості і теплостійкість КМ, можна стверджувати, що для поліпшення показників згаданих вище характеристик у комплексі доцільно у епоксидну матрицю вводити дану добавку за оптимального вмісту  $q = 30 \dots 50$  мас.ч.

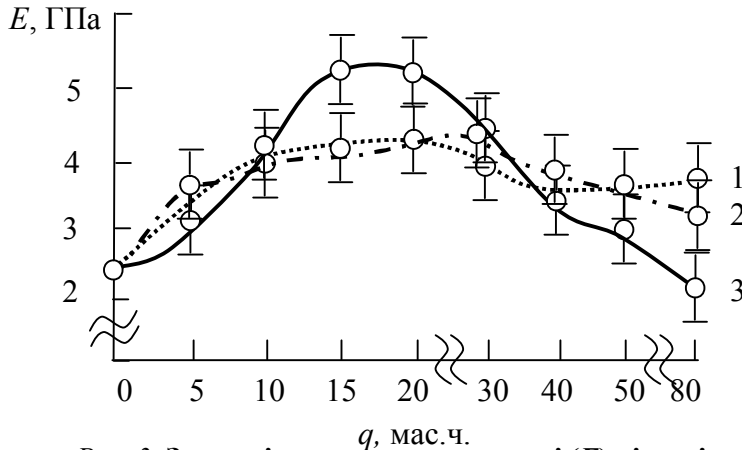


Рис. 3. Залежність модуля пружності ( $E$ ) від вмісту наповнювача ( $q$ ):  
1 – Сталь 45; 2 – пермалой 45Н; 3 – ВШ

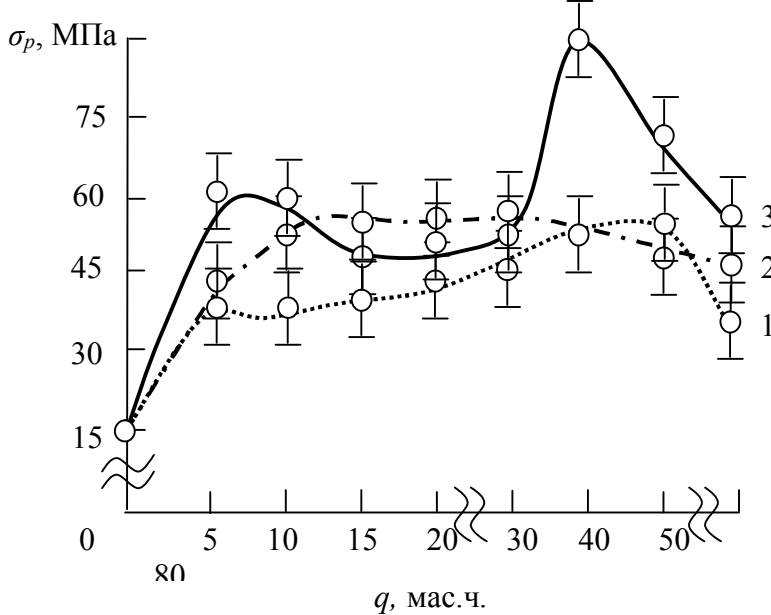


Рис. 4. Залежність руйнівних напружень ( $\sigma_p$ ) від вмісту наповнювача ( $q$ ):  
1 – Сталь 45; 2 – пермалой 45Н; 3 – ВШ

Надалі аналізували вплив вмісту Сталі 45 на властивості КМ. Встановлено (рис. 3, рис. 4), що максимальними показниками фізико-механічних властивостей відзначаються КМ, наповнені частками Сталі 45 при вмісті  $q = 20 \dots 40$  мас.ч. Такі композити мають показники модуля пружності при згинанні  $E = 4,2 \dots 4,4$  ГПа і руйнівного напруження при згинанні  $\sigma_p = 45,2 \dots 50,3$  МПа. Крім того, показано (табл. 1), що теплостійкість при збільшенні вмісту часток у КМ монотонно зростає і при  $q = 40$  мас.ч. становить  $T = 349$  К. Порівняльний аналіз впливу вмісту часток ВШ і Сталі 45 на фізико-механічні властивості та теплостійкість матеріалів доводить, що у епоксидний олігомер з метою поліпшення когезійної міцності композитів доцільно вводити вугільний шлак, тому що властивості КМ з даною добавкою за оптимального її вмісту суттєво покращуються.

Результати дослідження залежності когезійних властивостей КМ від вмісту часток пермалой Н45 дозволяють стверджувати про наступне. Встановлено (рис. 3, рис. 4), що при

збільшенні вмісту часток Н45 максимальними показниками модуля пружності ( $E = 4,25$  ГПа) і руйнівного напруження при згинанні ( $\sigma_p = 44,1$  МПа) характеризуються КМ за вмісту наповнювача  $q = 20 \dots 30$  мас.ч. Дані показники є на  $12 \dots 18$  % нижчими, порівняно з аналогічними показниками для КМ з частками Сталь 45 при тому ж вмісті наповнювача у композиті. Також, слід зауважити, що теплостійкість КМ, наповнених частками Н45 ( $q = 80$  мас.ч.), становить  $T = 338$  К, у той час як для матеріалів з наповнювачем Сталь 45 при такому ж вмісті спостерігали показники теплостійкості  $T = 340$  К. Виходячи з цього, можна стверджувати, що КМ, наповнені частками Н45 недоцільно використовувати при формуванні поверхневого шару для покриттів, які експлуатуються при статичних навантаженнях та підвищених температурах.

Таблиця 1. Залежність теплостійкості (за Мартенсом) від вмісту наповнювача

Вміст наповнювача, $q$ , мас.ч.	Теплостійкість, $T$ , К		
	Сталь 45	Пермалой 45Н	ВШ
0		338	
5	336	337	337
10	338	339	338
15	338	339	339
20	340	342	340
30	344	349	341
40	349	349	346
50	342	346	349
80	340	338	350

**Висновки.** На основі результатів проведених досліджень можна сказати наступне.

1. На основі попередньо встановленого технологічного регламенту розроблено рецептури адгезійного і функціональних поверхневих шарів для формування двохшарових покриттів з поліпшеними адгезійними, фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Зокрема, встановлено, що при формуванні адгезійного шару у зв'язувач доцільно вводити наповнювач вугільний шлак (63 мкм) за вмісту  $q = 10 \dots 15$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20. Такий матеріал відзначається наступними показниками властивостей: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 46,5 \dots 56,6$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_s = 2,06 \dots 2,16$  МПа. Крім того, адгезійний шар можна формувати на основі композиту з наповнювачем Сталь 45 ( $q = 20 \dots 30$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20). Такий матеріал відзначається наступними показниками властивостей: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 36,7 \dots 40,6$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_s = 2,04 \dots 2,34$  МПа.

2. Встановлено, що при формуванні поверхневого шару для покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями, які експлуатуються в умовах впливу статичних і динамічних навантажень, необхідно використовувати як наповнювач вугільний шлак за вмісту  $q = 15 \dots 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20. Такий матеріал відзначається наступними показниками властивостей: модуль пружності при згинанні –  $E = 4,9 \dots 5,21$  ГПа; руйнівне напруження при згинанні –  $\sigma_{32} = 50,4 \dots 51,6$  МПа; теплостійкість –  $T = 339 \dots 340$  К. При формуванні поверхневого шару для покриттів з поліпшеними теплофізичними властивостями, які експлуатуються в умовах впливу знакозмінних температур, необхідно використовувати як наповнювач вугільний шлак за вмісту  $q = 50 \dots 80$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20. Такий матеріал відзначається наступними показниками властивостей: модуль пружності при згинанні –  $E = 2,5 \dots 2,9$  ГПа; руйнівне напруження при згинанні –  $\sigma_{32} = 68,2 \dots 74,8$  МПа; теплостійкість –  $T = 349 \dots 350$  К.

1. Букетов А.В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів / А.В.Букетов, П.Д.Стухляк, І.В.Чихіра. – Тернопіль: Крок, 2011. – 201 с.
2. Ли Х. Справочное руководство по эпоксидным смолам / Х.Ли. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.
3. Чернин Н.Е. Эпоксидные материалы и композиции / Н.Е.Чернин. – М.:Химия, 1982. – 228 с.
4. Санжаровский А.Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий / А.Т.Санжаровский. – М.:Химия, 1978. – 184 с.
5. Вакула В.Л. Физическая химия адгезии полимеров / В.Л.Вакула, Л.М.Притыкин. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
6. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И.Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2013.