



UDC 620.178.16:678.686

## BEHAVIOR OF WEAR-RESISTANT EPOXY COMPOSITIONS MODIFIED BY DILUENTS UNDER CONTACT-DYNAMIC LOADING AND GAS-ABRASIVE WEAR

Alexey Yu. Poloz\*, Yuri N. Vaschenko, Yuri R. Ebich

SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology", Gagarina Avenue, 8, Dnipro, 49005, Ukraine

Received 16 December 2023; accepted 27 April 2024; available online 10 July 2024

### Abstract

**Aim.** Comparative assessment of the influence of diluents of different chemical nature and activity on the behavior of wear-resistant epoxy compositions under conditions of contact-dynamic loading, selection of an evaluation parameter for the rational use of known and new diluents in such compositions. **Methods.** Optical microscopy to determine the morphology of the worn surface of epoxy compositions, pulsed dynamic indentation, Kelvin-Voigt models to characterize viscoelastic properties, gas-abrasive wear. **Results.** The influence of diluents of different chemical nature and activity on leading world manufacturers on the behavior of wear-resistant epoxy compositions based on industrial diene resin CHS-Epoxy 525 (Czech Republic) under conditions of contact-dynamic loading and gas-abrasive wear is considered and it is shown that for the studied diluents the time of the active phase of deformation is  $t_1$  (the introduction of compositions into the matrix varies over a wider range with virtually the same time of the passive phase  $t_2$  (rebound from the surface) and is decisive in the processes of their deformation and wear. A linear dependence of the maximum deformation  $h_{max}$  of epoxy compositions on  $t_1$  has been established, the extrapolation of which determines the minimum value of this characteristic that can be achieved when using diluents for a given epoxy matrix. The symbatic rectilinear ratios of the components (elastic and viscous) of the deformation energy  $\alpha$  of epoxy compositions with diluents depending on  $t_1$  and  $h_{max}$  were determined and it was found that their minimum deformation and, accordingly, maximum wear resistance are achieved at  $\alpha \sim 1.70$ . For the rational use of known and new diluents in wear-resistant epoxy compositions, it is recommended to use experimental  $h_{max}$  values and  $\alpha$  values calculated on their basis using the proposed equation as evaluation parameters.

**Keywords:** epoxy compositions; diluents; deformation process; ratio of deformation energy components; wear resistance.

## ПОВЕДІНКА МОДИФІКОВАНИХ РОЗБАВНИКАМИ ЗНОСОСТІЙКИХ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ В УМОВАХ КОНТАКТНО-ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ І ГАЗОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Олексій Ю. Полоз, Юрій М. Ващенко, Юрій Р. Ебіч

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», просп. Науки, 8, Дніпро, 49005, Україна

### Анотація

**Мета.** Порівняльна оцінка впливу розбавників різної хімічної природи та активності на поведінку зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження, вибір оціночного параметру для раціонального використання відомих та нових розбавників в таких композиціях. **Методи:** оптичної мікроскопії – для визначення морфології зношеної поверхні епоксидних композицій, імпульсного динамічного індентування, моделей Кельвіна-Фойгта – для характеристики в'язкопружних властивостей, газоабразивного зношування. **Результати.** Розглянуто вплив розбавників різної хімічної природи та активності провідних світових виробників на поведінку зносостійких епоксидних композицій на основі промислової діанової смоли CHS-Епоху 525 (Чехія) в умовах контактної-динамічного навантаження і газоабразивного зношування та показано, що для досліджених розбавників час активної фази деформування  $t_1$  (занурення в матрицю) композицій змінюється в більш широкі межі за фактично однакового часу пасивної фази  $t_2$  (відскок від поверхні) і є вирішальним в процесах їх деформування та зношування. Встановлено прямолінійну залежність максимальної деформації  $h_{max}$  епоксидних композицій від  $t_1$ , екстраполяцією якої визначено мінімальне значення цієї характеристики, що може бути досягнуто під час використання розбавників для даної епоксидної матриці. Визначено симбатні прямолінійні залежності співвідношення складових (пружної та в'язкої) енергії деформування  $\alpha$  епоксидних композицій з розбавниками від  $t_1$  та  $h_{max}$  і з'ясовано, що їх мінімальна деформація і, відповідно, максимальна зносостійкість досягаються за  $\alpha \sim 1,70$ . Для раціонального використання відомих і нових розбавників в зносостійких епоксидних композиціях як оціночні параметри рекомендується використовувати експериментальні значення  $h_{max}$  та розраховані на їх підставі значення  $\alpha$  за запропонованим рівнянням.

**Ключові слова:** епоксидні композиції; розбавники; процес деформування; співвідношення складових енергій деформування; зносостійкість.

\*Corresponding author: e-mail: [ua.apolo@gmail.com](mailto:ua.apolo@gmail.com)

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v32i2.293333

## Вступ

Епоксидні композиції широко використовуються як зносостійкі покриття, для ремонту та захисту обладнання, що працює в умовах дії потоку абразивних матеріалів [1–5]. У сучасній практиці використовуються як ненаповнені композиції, так і наповнені наповнювачами різної природи [6–8] в підвищеній концентрації з високою твердістю за шкалою Мооса: силіцій і бор карбіди, бору нітрид, електрокорунд та ін., часто в комбінації з волокнистими матеріалами [9–14]. Водночас введення наповнювачів у підвищеній концентрації (300 мас. ч. і більше на 100 мас. ч. епоксидної смоли) для покращення їх зносостійкості і зниження собівартості навіть в низьков'язкі епоксидні смоли різних виробників пов'язано із значними труднощами рівномірного їх розподілу в епоксидній матриці внаслідок різкого підвищення в'язкості композицій. Для зниження початкової в'язкості і покращення розтікання під час нанесення ненаповнених композицій, а також можливості застосування підвищеної кількості наповнювачів в наповнених композиціях, до їх складу вводяться розбавники – активні та неактивні [15–20]. Активні розбавники (наприклад, широко використані епоксидовмісні сполуки) можуть взаємодіяти з отверджувачами і приймати участь в модифікації полімерних ланцюгів та формуванні тривимірної сітки [21–22]. Неактивні розбавники (наприклад, дибутилфталат) сприяють підвищенню еластичності, тріщиностійкості композицій внаслідок зміни їх надмолекулярної структури [23].

Звичайно під час застосування розбавників наводяться дані їх впливу на формування тривимірної сітки, реологічні, фізико-механічні, адгезійні характеристики епоксидних композицій, але практично відсутні відомості щодо поведінки цих композицій в умовах контактної-динамічної навантажені, що характерні в ході експлуатації циклонів, трубопроводів, промислових насосів під дією потоку частинок різних матеріалів. Такі відомості необхідні для цілеспрямованого вибору відповідних розбавників під час експлуатації захисних зносостійких епоксидних композицій в заданих умовах експлуатації.

У зв'язку з цим, метою даного дослідження є порівняльна оцінка впливу розбавників

різної хімічної природи та активності на поведінку зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічної навантажені, вибір оціночних параметрів для прогнозованого раціонального використання відомих та нових розбавників в таких композиціях.

*Об'єкти та методи дослідження.* Об'єктами дослідження є епоксидні композиції на основі промислової діанової смоли CHS-Ероху 525 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (епоксидний еквівалент 179–189 г/екв, динамічна в'язкість за 25 °С 10–12 Па·с), до складу яких вводили розбавники (10 мас. ч. на 100 мас. ч. смоли) різної активності: дибутилфталат (ДБФ), діоктилфталат (ДОФ), олігоефіракрилат ТГМ-3, моно-, ди- і трифункціональні епоксидовмісні сполуки різних світових виробників. У табл. 1 приведені основні характеристики досліджених розбавників епоксидних композицій. Отвердження композицій здійснювали Polyamine В, Швеція (суміш тетраетиленпентаміну, пентаетиленгексаміну, гексаметиленгептаміну і більш високомолекулярних амінів) за режимом: 20 °С×24 год. з доотвердженням 100 °С×3 год. Доотвердження здійснювали для максимально повної участі епоксидних груп смоли та епоксидовмісних розбавників в реакціях з амінними групами отверджувача під час формування тривимірної сітки композицій. Polyamine В застосовували в рекомендованій виробником кількості – 10 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли.

Композиції виготовляли шляхом введення в епоксидну смолу CHS-Ероху 525 різних розбавників за температури 60 °С і перемішуванням протягом 10 хв. Отверджувач вводили в композиції перед їх застосуванням за 20–22 °С з перемішуванням.

Властивості епоксидних композицій під дією контактної-динамічної навантажені визначали за 22±2 °С за допомогою пристрою ИПМ-1К, розробленого в Інституті прикладної фізики НАН Білорусі, із застосуванням відповідних математичних залежностей. В пристрої застосовується метод динамічного ідентифікування під час удару жорстким індентором по композиційному матеріалу в однократному імпульсному режимі [24] з фіксацією часу активної (занурення в матрицю)  $t_1$  та пасивної (відскок від поверхні)  $t_2$  фаз процесу [25], величини максимальної деформації композицій  $h_{\max}$ . В'язкопружні

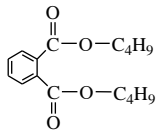
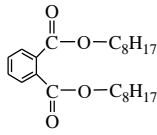
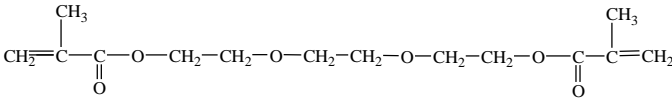
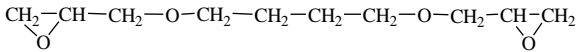
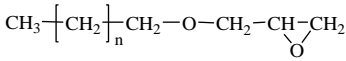
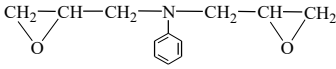
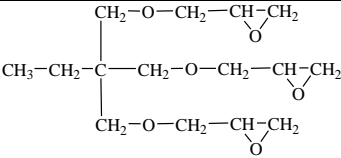
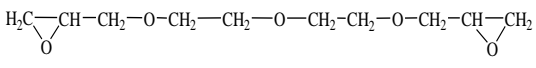
властивості характеризували з  
використанням моделей Максвелла та  
Кельвіна-Фойгхта.

Table 1

## Characteristics of diluents of epoxy compositions

Таблиця 1

## Характеристики розбавників епоксидних композицій

Diluent (manufacturer)	Chemical formula	Abbreviated characteristic
DBP - dibutyl phthalate (GJ Chemical, USA)		Colorless liquid, main substance content >99.5%, boiling point 340°C, acidity <0.05%, dynamic viscosity at 25°C - 20 mPa·s
DOP - dioctyl phthalate (GJ Chemical, USA)		Colorless liquid, main substance content >99.5%, boiling point 386°C, acidity <0.05%, dynamic viscosity at 25°C - 80 mPa·s
TGM-3 - oligoether acrylate, tri(oxyethylene)- $\alpha,\omega$ -dimethacrylate (JSC "Armplast", Ukraine)		Yellow-brown liquid, acid value - <5 mg KOH/g, dynamic viscosity at 25°C - 30 mPa·s
EPODIL 750 - diglycidyl ether 1,4-butanediol (Air Products, USA)		Transparent liquid, epoxy equivalent 130 g, dynamic viscosity at 25°C - 18 mPa·s
TCM AGE -alkyl glycidyl ether C <sub>12</sub> -C <sub>14</sub> (Chemicals and Materials, China)		Transparent liquid, epoxy equivalent 330 g, dynamic viscosity at 25°C - 10 mPa·s
EA - dimethylaniline diepoxide (JSC "Armplast", Ukraine)		Dark cherry-colored liquid, content of epoxy groups is 34.0% by weight, chlorine ions - 0.02% by weight, total chlorine - 0.5% by weight
CHS-Epoxy RR690 - triglycidyl ester trimethylolpropane (Spolchemie, Czech Republic)		Transparent liquid, epoxy equivalent 145 g, dynamic viscosity at 25°C - 150 mPa·s
DEG-1 - diglycidyl ether diethylene glycol (JSC "НИИHIMPOLYMER", Russia)		Yellowish liquid, epoxy equivalent 140 g, dynamic viscosity at 25°C - 70 mPa·s

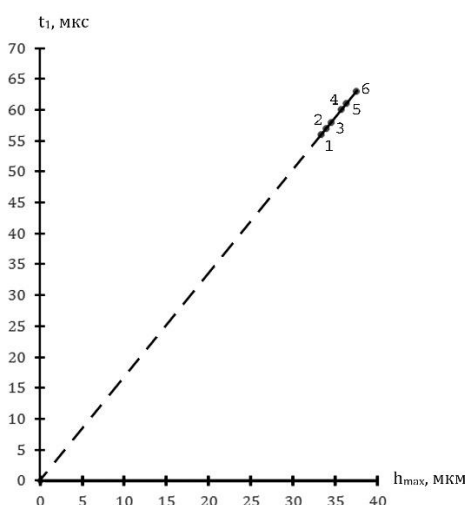
Зношування епоксидних композицій з'ясовували в найбільш тяжких умовах випробування - під дією газоабразивного середовища (річковий пісок Придніпровського родовища з розміром частинок 0.5-0.9 мм) під різними кутами атаки абразиву (15-90 °C) і швидкості потоку частинок 76 м/с згідно з ГОСТ 23.201-78 на відцентровому прискорювачі ЦУК-3. Морфологію поверхні епоксидних композицій після газоабразивного зношування досліджували із застосуванням

цифрового оптичного USB-мікроскопу Microsafe ShinyVision MM-2288-5X-BN (Китай).

## Результати та їх обговорення

На рис. 1 представлено вплив досліджених розбавників на величину максимальної деформації  $h_{max}$  епоксидних композицій в залежності від часу активної фази процесу деформування  $t_1$ . Як свідчать наведені дані, спостерігається чітка прямолінійна залежність  $t_1$  ( $y_1$ ) від  $h_{max}$  ( $x_1$ ) з коефіцієнтом парної кореляції  $> 0.99$ , яка відповідає

рівнянню, розрахованому за допомогою  $y_1 = 1.667x_1 + 0.500$ . (1)  
 пакету програм STATISTICA для MS Excel:



**Fig. 1. The relationship between the maximum deformation  $h_{\max}$  and the time of the active phase of the deformation process  $t_1$  of epoxy compositions with diluents:**

1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, DEG-1; 3 - TGM-3; 4 - EA; 5 - DBP, DOP; 6 - TCM AGE

**Рис. 1. Взаємозв'язок максимальної деформації  $h_{\max}$  з часом активної фази процесу деформування  $t_1$  епоксидних композицій з розбавниками:**

1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, ДЕГ-1; 3 - ТГМ-3; 4 - ЕА; 5 - ДБФ, ДОФ; 6 - ТСМ АГЕ

Екстраполяція цієї залежності на вісь абсцис показує можливість встановлення часу активної фази процесу деформування  $t_1$ , для значення певної величини  $h_{\max}$  для використання розбавників в даній епоксидній матриці.

Час активної  $t_1$  і пасивної  $t_2$  фаз процесу деформування зносостійких епоксидних композицій залежить від енергії

деформування  $E_d$  та її складових – пружної  $E_p$  і в'язкої  $E_v$ , їх співвідношення  $\alpha$  (табл. 2). Згідно з даними табл. 2, час перебігу активної фази деформування  $t_1$  епоксидних композицій у присутності розбавників змінюється в більш широких межах (56–63 мкс) за практично однакових значень часу пасивної фази  $t_2$  (52–53 мкс) і є вирішальним під час їх зношування ( $\Delta V$ ).

Table 2

**The influence of diluents on the deformation parameters of epoxy compositions under contact-dynamic loading and their maximum wear  $\Delta V$  (abrasive attack angle 45°)**

Таблиця 2

**Вплив розбавників на параметри деформування епоксидних композицій під контактним динамічним навантаженням та їх максимальне зношування  $\Delta V$  (під кутом атаки абразиву 45° C)**

Diluent	$t_1, \mu s$	$t_2, \mu s$	$h_{\max}, \mu m$	$E_p \cdot 10^4, J$	$E_v \cdot 10^4, J$	$E_p/E_v, \alpha$	$\Delta V \cdot 10^3, cm^3$
DBP	61	53	36.3	6.23	4.61	1.35	24.0
DOP	61	53	36.3	6.26	4.64	1.35	24.0
TGM-3	58	52	34.5	6.38	4.26	1.50	15.4
EPODIL 750	57	53	33.9	6.41	4.22	1.52	14.3
TCM AGE	63	53	37.5	6.13	4.83	1.27	34.0
EA	60	53	35.7	6.33	4.52	1.40	17.8
CHS-Ероху RR690	56	52	33.3	6.50	4.14	1.57	13.8
DEG-1	57	53	33.9	6.46	4.25	1.52	14.4

Для досягнення високої зносостійкості епоксидних композицій і, відповідно, мінімальних значень  $t_1$  і  $h_{\max}$ , слід застосовувати у їх складі розбавники, що забезпечують оптимальне співвідношення пружної та в'язкої енергії деформування  $\alpha = E_p/E_v$  на рівні  $\sim 1.70$  (рис. 2). Слід відзначити,

що залежності  $\alpha$  ( $y_2$  та  $y_3$ ) від  $t_1$  ( $x_2$ ) та  $h_{\max}$  ( $x_3$ ) мають симбатний характер, характеризуються наближеними прямолінійними залежностями (з коефіцієнтами парної кореляції  $> 0.99$ ) згідно з рівняннями:

$$y_2 = -0.043x_2 + 3.991; \quad (2)$$

$$y_3 = -0.072x_3 + 3.970. \quad (3)$$

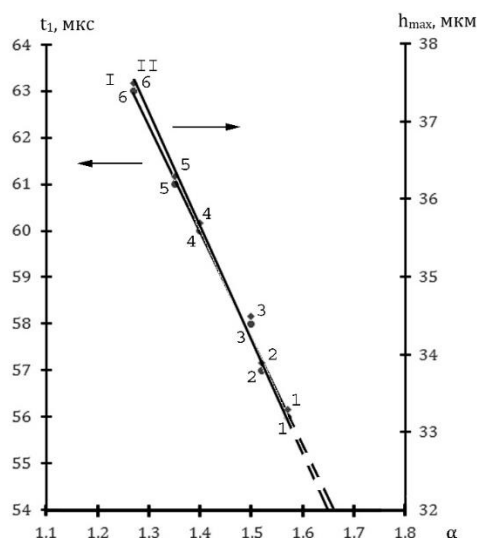


Fig. 2. The relationship of the ratio of the component (elastic and viscous) deformation energy  $\alpha$  of epoxy compositions with diluents from the active deformation phase  $t_1$  (I) and the maximum deformation  $h_{max}$  (II):

1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, DEG-1; 3 - TGM-3; 4 - EA; 5 - DBP, DOP; 6 - TCM AGE

Рис. 2. Взаємозв'язок співвідношення складових (пружної і в'язкої) енергії деформування  $\alpha$  епоксидних композицій з розбавниками від активної фази деформування  $t_1$  (I) та максимальної деформації  $h_{max}$  (II):  
1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, ДЕГ-1; 3 - ТГМ-3; 4 - ЕА; 5 - ДБФ, ДОФ; 6 - ТСМ АГЕ

Рівняння (3) дозволяє за експериментальним значенням  $h_{max}$  епоксидної композиції з новим розбавником розрахувати величину  $\alpha$  для цієї композиції і спрогнозувати її зносотійкість.

Цікавою виявилась залежність максимального зношування ( $\Delta V$ ) під кутом атаки абразиву  $45^\circ\text{C}$  від величини максимальної деформації  $h_{max}$  епоксидних

композицій (рис. 3) з різними за активністю розбавниками - спостерігаються дві прямолінійні залежності I та II з різним кутом нахилу: пряма I характерна для активних дитриепоксидовмісних розбавників CHS-Ероху RR690, EPODIL 750, ДЕГ-1, ЕА та олігоестеракрилату ТГМ-3, що здатний, як з'ясувалось, до гомополімеризації в ході доотвердження композицій.

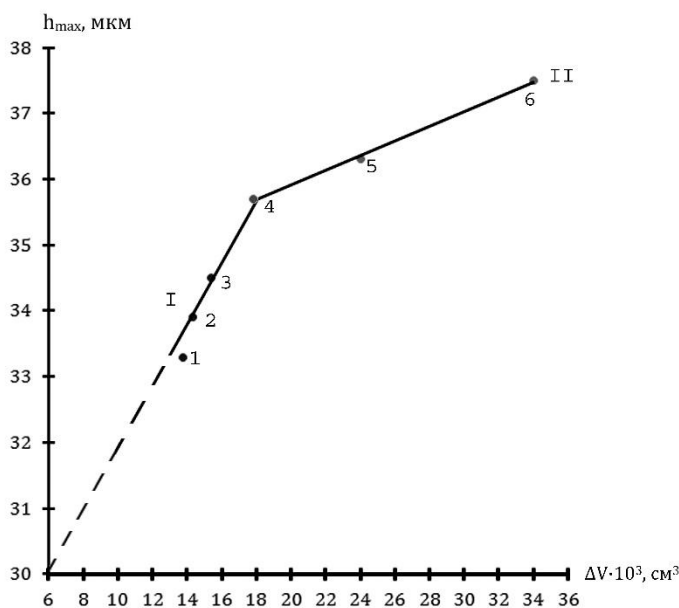


Fig. 3. The relationship between the maximum deformation  $h_{max}$  of epoxy compositions and their maximum wear  $\Delta V$  in the presence of diluents:

1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, DEG-1; 3 - TGM-3; 4 - EA; 5 - DBP, DOP; 6 - TCM AGE

Рис. 3. Взаємозв'язок максимальної деформації  $h_{max}$  епоксидних композицій з їх максимальним зношуванням  $\Delta V$  у присутності розбавників:

1 - CHS-Ероху RR690; 2 - EPODIL 750, ДЕГ-1; 3 - ТГМ-3; 4 - ЕА; 5 - ДБФ, ДОФ; 6 - ТСМ АГЕ

Екстраполяція прямої I на вісь абсцис показує досягнення можливої максимальної зносостійкості (мінімального значення зношування  $\Delta V$ ) композицій за даних умов експлуатації. Пряма II характерна для неактивних (ДБФ, ДОФ) і малоактивних (TCM AGE) розбавників з їх значно гіршими можливостями позитивного впливу на зносостійкість епоксидних композицій. Мікрофотографії морфології зношених поверхонь досліджених епоксидних композицій ілюструють ідентичний абразивно-ерозійний характер (рис. 4), коли об'ємне зношування композицій ( $\Delta V$ ) визначається кількістю видалених частинок під дією абразиву в залежності від ступеню їх зшивання [22].

Таким чином, досліджені розбавники за впливом на підвищення зносостійкості (зменшення зношування  $\Delta V$ ) епоксидних

композицій з урахуванням комплексу їх властивостей, співвідношення  $\alpha$  складових пружної та в'язкої енергії деформування, а також величини максимальної деформації  $h_{\max}$  розташовуються у наступний ряд: TCM AGE < ДБФ, ДОФ < EA < ТГМ-3 < ДЕГ-1, EPODIL 750 < CHS-Ероху RR690.

На відміну від ненаповнених, для високонаповнених силіцій карбідом (> 200 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли) епоксидних композитів з діепоксидовмісними розбавниками, характер залежності співвідношення  $\alpha$  складових енергії деформування від концентрації наповнювача носить нелінійний характер [26], що пов'язано із додатковим вкладом у процес їх деформування сформованої дисперсної структури наповнювача, взаємодії епоксидної матриці з наповнювачем і густиною полімерного прошарку на межі поділу фаз [27].

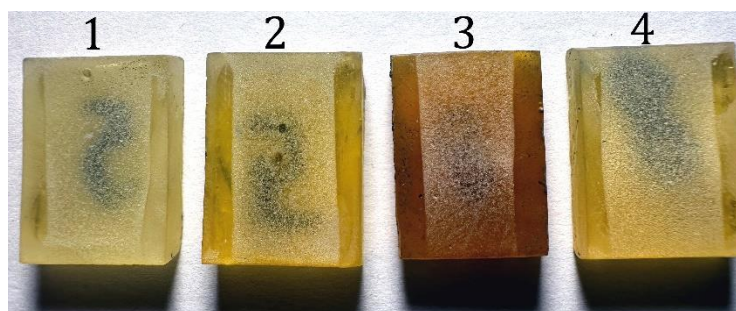


Fig. 4. Morphology (x10) of weared surface of epoxy compositions with diluents:

1 - DBP; 2 - TCM AGE; 3 - DEG-1; 4 - CHS-Epoxy RR690

Рис. 4. Морфологія (x10) зношеної поверхні епоксидних композицій з розбавниками:

1 - ДБФ; 2 - TCM AGE; 3 - ДЕГ-1; 4 - CHS-Ероху RR690

## Висновки

Розглянуто вплив розбавників різної хімічної природи та активності провідних світових виробників на поведінку зносостійких епоксидних композицій на основі промислової діанової смоли CHS-Epoxy 525 (Чехія) в умовах контактної-динамічного навантаження і газоабразивного зношування. Показано, що для досліджених розбавників час активної фази деформування  $t_1$  (занурення в матрицю) композицій змінюється в більш широких межах за фактично однакового часу пасивної фази  $t_2$  (відскок від поверхні) і є вирішальним в процесах їх деформування та зношування.

Встановлено прямолінійну залежність максимальної деформації  $h_{\max}$  епоксидних композицій від  $t_1$ , екстраполяцією якої визначено мінімальне значення цієї характеристики, що може бути досягнуто під

час використання розбавників для даної епоксидної матриці.

Визначено симбатні прямолінійні залежності  $t_1$  та  $h_{\max}$  від співвідношення складових (пружної та в'язкої) енергії деформування  $\alpha$  епоксидних композицій з розбавниками і з'ясовано, що їх мінімальна деформація і, відповідно, максимальна зносостійкість досягаються за  $\alpha \sim 1.70$ . Для раціонального використання відомих і нових розбавників в зносостійких епоксидних композиціях як оціночні параметри рекомендується використовувати експериментальні значення  $h_{\max}$  та розраховані за запропонованим рівнянням значення  $\alpha$ .

Показано, що морфологія зношених поверхонь досліджених епоксидних композицій має ідентичний абразивно-ерозійний характер.

## References

- [1] Vakhrushev, A. V., Haghi, A. K. (2019). *Composite Materials Engineering (Modeling and Technology)*. Apple Academic Press.  
<https://doi.org/10.1201/9780429242762>
- [2] Stuhlyak, P. D. (1994). [*Epoxy composites for protective coatings*]. Ternopil: Zbruch (in Russian).
- [3] Goryaeva, Yu. E., Semenets, O. A., Anisimov, V.M. (2003). [Comparative studies of the performance of materials during wear in the flow of abrasive particles]. *Voprosy khimiy i khimicheskoi technologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (6), 128–131 (in Ukrainian).
- [4] Poloz, O. Yu., Lipytskyi, S. G., Kushchenko, S. M. (2015). [Wear-resistant epoxy composites for structural purposes]. *Chemical industry of Ukraine*, 5, 25–27 (in Ukrainian).
- [5] Melnyk, O. V., Smirnov, I. V., Labunets, V. F., Chorniy, O. V. (2020). [Research on the wear resistance of plasma coatings under conditions of abrasive wear]. *Problems of frictions and wear*, 3(88), 126–130 (in Ukrainian).  
[https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14928](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14928)
- [6] Alhazmia, W.H., Jazaab, Y., Mousa, S. Abd-Elhadyc, A.A., Sallam, H. E. M. (2021). Tribological and Mechanical Properties of Epoxy Reinforced by Hybrid Nanoparticles. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(3), 1–14. <https://doi.org/10.1590/1679-78256384>
- [7] Abed, Salwa A., Khalaf, Ahmad A., Mohamed, Muzher Taha, Hanon, Muammel M. (2023). Optimum abrasive wear resistance for epoxy composites reinforced with polyethylene (PET) waste using Taguchi design and neural network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 12(121), 34–40.  
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272534>
- [8] Subhrajit, Ray (2021). Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 73(7), 2050–2059.  
<https://doi.org/10.1007/s11837-021-04698-8>
- [9] Nassar, A., Slem, M., El-Batanony, I., Nassar, E. (2021). Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus. *Polymers and Polymer Composites*, 29(95), 389–399.  
<https://doi.org/10.1177/09673911211002731>
- [10] Xia, H., Li, J., Wang, K., Hou, X., Yang, T., Hu, J., Shi, Zh. (2022). Superior wear resistance of epoxy composite with highly dispersed graphene spheres. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5, 173–183.  
<https://doi.org/10.1007/s42114-021-00259-4>
- [11] Nassar, Amal, Younis, Mona, Ismail, Mohamed, Nassar, Eman (2022). Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles. *Polymers*, 14(2), 2–17.  
<https://doi.org/10.3390/polym14020333>
- [12] Zhicai, Zh., Nie, Zh., Fugang, Q., Biao, Zh., Bin, L., Xiaoping, O. (2020). Reinforced Superhydrophobic Anti-Corrosion Epoxy Resin Coating by Fluorine-Silicon-Carbide Composites. *Coatings*, 10(12), 2–16.  
<https://doi.org/10.3390/coatings10121244>
- [13] Shahabaz, S. M., Mehrotra, Prakhar, Kalita, Hridayneel, Sharma, Sathyashankara, Naik, Nithesh, Noronha, Dilifa Jossley, Shetty, Nagaraja (2023). Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*, 7(4, 133), 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/jcs7040133>
- [14] Huang, Zh., Zhao, W., Zhao, W., Ci, X., Li, W. (2021). Tribological and anti-corrosion performance of epoxy resin composite coatings reinforced with differently sized cubic boron nitride (CBN) particles. *Friction*, 9(1), 104–118. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0329-8>
- [15] Savin, S. N., Kiose, O. O., Rudenko, V. O., Lozhichevskaya, T. V. (2019). [Active thinners combined systems for epoxy resins]. *Visnik Odesskogo nacionalnogo universitetu. Khimiya - Odesa National University Herald. Chemistry*, 24(4, 72), 70–79. (in Russian).  
[http://dx.doi.org/10.18524/2304-0947.2019.4\(72\).185543](http://dx.doi.org/10.18524/2304-0947.2019.4(72).185543)
- [16] Khalina, M., Beheshty, M. H., Salimi, A. (2019). The effect of reactive diluent on mechanical properties and microstructure of epoxy resins. *Polymer Bulletin*, 76(8), 3905–3927. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2577-6>
- [17] Rudawska, A., Frigione, M. (2022). Effect of Diluents on Mechanical Characteristics of Epoxy Compounds. *Polymers*, 14(11), 1–23.  
<https://doi.org/10.3390/polym14112277>
- [18] Delavar barde, Y., Ramezani, N., Nazif, A., Behzadpour, M. (2020). Effect of Different Diluents on the Main Properties of the Epoxy-Based Composite. *Journal of Materials Sciences and Applications*, 4(104), 1–9. <https://jscholaronline.org/articles/JMSA/Effect-of-Different.pdf>
- [19] Xu, L., Zhang, K., Liu, Y. (2019). Hydraulic Abrasion-Resistant Elastic Epoxy Resin Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1–11.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9358139>
- [20] Aras, Ö., Kaya, Y. (2021). Effect of Reactive and Non-Reactive Diluent on Mechanical Properties of Epoxy Resin. *BSEU Journal of Science*, 8(1), 167–172.  
<https://doi.org/10.35193/bseufbd.855955>
- [21] Poloz, A. Yu., Ebich, Yu. R., Dolinskaya, R. M., Prokopchuk N. R. (2021). [Evaluation of the efficiency of epoxy-containing diluents-modifiers of epoxy compositions]. *Polymer materials and technologies*, 7 (1), 33–40 (in Russian).  
<https://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-33-40>
- [22] Poloz, A. Yu., Ebich, Yu. R., Dolinskaya, R. M., Prokopchuk, N. R. (2021). [Influence of epoxy-containing diluents-modifiers on the structure and properties of wear-resistant epoxy compositions]. *Polymer materials and technologies*, 7(3), 65–73 (in Russian).  
<https://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-65-73>
- [23] Zaitsev, Yu. S., Kochergin, Yu. S., Pacter, N. K., Coachman, R. W. (1990). [*Epoxy oligomers and adhesive compositions*]. Kiev, USSR: Naukova Dumka (in Russian).
- [24] Kren', A. P., Rudnytskyi, V. A., Deykun, Y. H. (2004). [Determination of viscoelastic parameters by dynamic indentation using a nonlinear deformation model]. *Kauchuk i rezyna. – Rubber and rubber*, 6, 19–23 (in Russian).
- [25] Johnson, K. (1989). [*Mechanics of contact interaction: trans. from English*]. Moscow, Mir (in Russian).
- [26] Poloz, O. Yu., Ebich, Y. R. (2021). [Behavior of wear-resistant epoxy compositions in conditions of contact-dynamic loading]. *Problems of frictions and wear*, 2(91), 46–52 (in Ukrainian). [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528)

- 
- [27] Poloz, O. Yu., Stempel, V. I., Burmistrov, K. S., Ebich, Yu. R. (2020). [Features of interfacial interaction in epoxy composites filled with silicon carbide]. *Voprosy khimiy i khimicheskoi technologii* – Issues of Chemistry and Chemical Technology, 1(128), 39-45 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-128-1-39-46>