

UDC 678.5:620.178.16

## INFLUENCE OF OLIGOMERIC RUBBERS ON THE BEHAVIOR OF EPOXY COMPOSITIONS UNDER DYNAMIC CONTACT LOADING AND THEIR WEAR RESISTANCE

Alexey Yu. Poloz<sup>1</sup>, Yuri R. Ebich<sup>2</sup><sup>1</sup>LTD "New Technologies", square Academician Starodubov, 1, Dnipro, 49050, Ukraine<sup>2</sup>SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology", Gagarina Avenue, 8, Dnipro, 49005, Ukraine

Received 8 April 2023; accepted 10 November 2023; available online 25 January 2024

### Abstract

**Aim.** Comparative assessment of the influence of the chemical structure of oligomeric rubbers with reactive groups in the composition of protective wear-resistant epoxy compositions on the features of their phase morphology and deformation under the action of contact-dynamic loading, wear resistance. **Methods.** Optical microscopy to determine the phase morphology of modified epoxy compositions, size distribution of the heterophase (oligomeric rubbers) using the point method of Glagolev and linear Rosival, pulsed dynamic indentation, Maxwell and Kelvin-Voigt models to characterize viscoelastic properties. **Results.** The effect of oligomeric rubbers with reactive groups (carboxyl, hydroxyl, epoxy, acylhydrazone) on the behavior of epoxy compositions based on dian resin under contact-dynamic loading conditions has been determined, and extreme dependences of the active (embedding into the matrix) and passive (rebound from the surface) phases of the process on energy components of their deformation (elastic and viscous), which is associated with the formation of the phase morphology of compositions with different degrees of dispersity of the heterophase. It was found that the maximum wear and deformation of the modified epoxy compositions are related to their dynamic modulus of elasticity by straight-line relationships, the equations of which, using the experimental value of the maximum deformation, make it possible to predict the dynamic modulus of elasticity and, accordingly, the maximum wear of the compositions. The possibility of reducing (by 32 %) the maximum wear of an industrial epoxy composition highly filled with multidisperse silicon carbide with the introduction of oligomeric nitrile butadiene rubber with terminal carboxyl groups SKN-10 KTR was shown.

**Keywords:** epoxy compositions; oligomeric rubbers; phase morphology; deformation energy components; active and passive phases of deformation; dynamic modulus of elasticity; wear resistance.

## ВПЛИВ ОЛІГОМЕРНИХ КАУЧУКІВ НА ПОВЕДІНКУ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ ПРИ КОНТАКТНО-ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ТА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Олексій Ю. Полоз<sup>1</sup>, Юрій Р. Ебіч<sup>2</sup><sup>1</sup>ТОВ «Нові технології», пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна<sup>2</sup>ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», просп. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна

### Анотація

**Мета.** Порівняльна оцінка впливу хімічної будови олігомерних каучуків з реакційноздатними групами у складі захисних зносостійких епоксидних композицій на особливості їх фазової морфології та деформування під дією контактної динамічної навантаження, зносостійкість. **Методи.** Оптична мікроскопія для визначення фазової морфології модифікованих епоксидних композицій, розподіл гетерофази (олігомерних каучуків) за розмірами із застосуванням точкового методу Глаголева і лінійного Розівала, імпульсного динамічного індентування, моделей Максвелла і Кельвіна-Фойгта для характеристики в'язкопружних властивостей, газообразивного зношування. **Результати.** Визначено вплив олігомерних каучуків з реакційноздатними групами (карбоксильними, гідроксильними, епоксидними, ацилгідразонними) на поведінку епоксидних композицій на основі діанової смоли в умовах контактної динамічної навантаження і встановлено екстремальні залежності активної (занурення в матрицю) та пасивної (відскок від поверхні) фаз процесу від складових енергій їх деформування (пружної та в'язкої), що пов'язано із формуванням фазової морфології композицій з різним ступенем дисперсності гетерофази. З'ясовано, що максимальні зношування та деформація модифікованих епоксидних композицій пов'язані із їх динамічним модулем пружності прямолінійними залежностями, рівняння яких за експериментальним значенням максимальної деформації дозволяють спрогнозувати динамічний модуль пружності та, відповідно, максимальне зношування композицій. Показана можливість зменшення (на 32 %) максимального зношування промислової високонаповненої мультидисперсним силіцій карбідом епоксидної композиції за введення олігомерного бутадієн-нітрильного каучуку з кінцевими карбоксильними групами SKN-10 KTR.

**Ключові слова:** епоксидні композиції; олігомерні каучуки; фазова морфологія; складові енергії деформування; активна та пасивна фази деформування; динамічний модуль пружності; зносостійкість.

\*Corresponding author: e-mail: ua.apolo@gmail.com

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v31i4.276862

## Вступ

Підвищення зносостійкості захисних покриттів, деталей різноманітного обладнання, що працюють в контакт з абразивними матеріалами в умовах динамічного навантаження, має суттєве значення для економічного розвитку гірничо-збагачувальної промисловості, підприємств кольорової та чорної металургії, промисловості будівельних матеріалів, транспорту та інших галузей [1–4]. Зносостійкі епоксидні композиції з різноманітними наповнювачами [5–8] мають необхідну плинність, тиксотропність, добру адгезію до багатьох матеріалів, високу міцність, хімічну стійкість [9–10], що дозволяє їх використовувати в якості покриттів, клеїв [11–12], для виготовлення, ремонту та відновлення зношених деталей [13–18], композитів в авіаційній та космічній техніці [19–20] та ін. До того ж підвищення експлуатаційних характеристик таких композицій, що працюють в умовах контактно-динамічного навантаження, має суттєве значення внаслідок їх певної крихкості і досягається модифікацією олігомерними каучуками [21–23]. Формування гетерогенної змішаної тривимірної структури модифікованих епоксидних композицій з жорсткими густосітчастими фрагментами поліепоксиду та еластичними фрагментами олігомерних каучуків дозволяє регулювати їх фізико-механічні, в'язкопружні властивості, зменшити крихкість, підвищити деформаційні характеристики [21; 23]. В той же час відсутні порівняльні дані щодо впливу хімічної будови олігомерних каучуків на поведінку модифікованих епоксидних композицій в умовах контактно-динамічного навантаження, що не дозволяє обирати найбільш ефективні олігомерні каучуки для промислового впровадження перспективних зносостійких композицій.

У зв'язку з цим, метою даного дослідження є порівняльна оцінка впливу хімічної будови олігомерних каучуків з реакційноздатними групами у складі захисних зносостійких епоксидних композицій на особливості їх фазової морфології та деформування під дією контактно-динамічного навантаження, зносостійкість.

## Об'єкти та методи дослідження

Олігомерні каучуки з реакційноздатними групами (табл. 1) використовували для

модифікації промислової діанової смоли CHS-Ероху 525 (Чехія) з епоксидним еквівалентом 182 г/моль та динамічною в'язкістю за 25 °С 11.4 Па·с. У процесі виготовлення композицій в епоксидну смолу для зменшення її в'язкості вводили 10 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли епоксидовмісний розбавник EPODIL 750 (дигліцидиловий етер 1,4-бутандіолу, США) з епоксидним еквівалентом 130 г/моль та динамічною в'язкістю за 25 °С 18 мПа·с., перемішували за 60 °С протягом 5 хв, додавали олігомерний каучук у кількості 10 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли і перемішували 5 хв. Отверджувач (10 мас.ч. на 100 мас.ч. композиції) Polyamine B (Швеція) – суміш тетраетиленпентаміну, пентаетиленгексаміну, гексаетиленгептаміну і більш високомолекулярних амінів вводили в композицію перед застосуванням за температури 20–22 °С з перемішуванням. Композиції отверджували за енергозберігаючою технологією за 20–22 °С протягом 24 год. з доотвердженням за розробленим оптимальним режимом: 80 °С × 2.4 год. + 100 °С × 2.1 год. для покращення їх властивостей.

Фазову морфологію модифікованих композицій визначали із застосуванням оптичного мікроскопу NU-2E (фірми Carl Zeiss, Німеччина) за збільшення ×1000 за загальноприйнятою методикою [24]. Розподіл гетерофази (олігомерних каучуків) за розмірами здійснювали обробкою мікрознімків із застосуванням точкового методу Глаголева та лінійного методу Розиваля [25].

Властивості епоксидних композицій під дією контактно-динамічного навантаження визначали за 22±2 °С за допомогою пристрою ИПМ-1К, розробленого в Інституті прикладної фізики НАН Біларусі, із застосуванням відповідних математичних залежностей. У методі динамічного індентування, що застосовується в пристрої, використовується удар жорстким індентором по композиційному матеріалу в однократному імпульсному режимі [13] з фіксацією активної та пасивної фаз процесу, величини максимальної деформації композицій  $h_{\max}$ . В'язкопружні властивості характеризували з використанням моделей Максвела та Кельвіна-Фойгхта. Динамічне навантаження моделює найбільш жорсткі умови експлуатації композиційних матеріалів.

## Characteristics of oligomeric rubbers with reactive groups

Таблиця 1

## Характеристика олігомерних каучуків з реакційноздатними групами

Rubber type (technical conditions)	Chemical formula	Abbreviated characteristic
SKD-KTR (2294-177-00151963-2012)	$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{N}\equiv\text{C}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\right]_n-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$	Oligomeric polybutadiene with terminal carboxyl groups, $M_n=3000$ , content of carboxyl groups 2.9% wt.
SKN-10 KTR (2294-099-00151963-05)	$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{N}\equiv\text{C}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\right]_n-\left[\text{CH}_2-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\text{CH}}\right]_m-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$	Copolymer of butadiene and acrylonitrile with terminal carboxyl groups, $M_n=3000$ , content of acrylonitrile 10% wt., content of carboxyl groups 2.9% wt.
SKD-GTR (38.103315-86)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{N}\equiv\text{C}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\right]_n-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$	Oligomeric polybutadiene with terminal hydroxyl groups, $M_n=3000$ , content of hydroxyl groups 1.25% wt.
SKN-14 GTR (prototype)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{N}\equiv\text{C}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\right]_n-\left[\text{CH}_2-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\text{CH}}\right]_m-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$	Copolymer of butadiene and acrylonitrile with terminal hydroxyl groups, $M_n=3000$ , content of acrylonitrile 14% wt., content of hydroxyl groups 1.3% wt.
SKD-0-E (38.103570-84)	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\right]_n-\left[\text{CH}_2-\underset{\text{O}}{\text{CH}}-\text{CH}-\text{CH}_2\right]_m$	Epoxidized oligomeric polybutadiene, $M_n=4500$ , content of epoxy groups 3.4% wt.
SKI-GZ (prototype)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{C}=\text{N}-\text{NH}-\text{C}-\text{C} \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{O} \quad \text{CH}_3 \end{array} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_2-\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{C}-\text{C}-\text{NH}-\text{N}=\text{C} \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{O} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	Oligomeric isoprene with terminal acylhydrazone groups, $M_n=3000$ , content of acylhydrazone groups 6.4% wt.

Зношування епоксидних матеріалів знаходили у найбільш тяжких умовах випробування – під дією газоабразивного середовища (річковий пісок Придніпровського родовища з розміром частинок 0.5–0.9 мм) за різних кутів атаки абразиву (15–90°) і швидкості потоку частинок 76 м/с згідно з ГОСТ 23.201-78 на відцентровому прискорювачі ЦУК-3.

### Результати та їх обговорення

На рис. 1 наведено залежності впливу олігомерних каучуків з реакційноздатними

групами, які можуть взаємодіяти з епоксидними групами смоли, розбавника та амінними групами отверджувача, на поведінку ненаповнених композицій в умовах контактної-динамічного навантаження. Звертає на себе увагу відмінність цієї поведінки у порівнянні з немодифікованими композиціями [13] – не спостерігаються прямолінійні залежності між складовими енергії деформування (пружної  $E_n$  та в'язкої  $E_v$ ) композицій і максимальної деформації  $h_{\max}$  від часу активної фази (втління в матрицю)

процесу  $t_1$ . Така поведінка модифікованих композицій пояснюється впливом на процес деформування 2 факторів: їх густосітчастої тривимірної сітки та фазової морфології (рис. 2), оскільки олігомерні каучуки за звичайної температури не сумісні з епоксидною матрицею (смола + розбавник). У процесі введення олігомерних каучуків в епоксидну матрицю вони розподіляються в останній у вигляді мікрокрапель переважно з розмірами 1–5 мкм (рис. 3). Найбільш споріднені з епоксидною матрицею бутадієн-нітрильні каучуки з кінцевими гідроксильними (СКН-14 ГТР) та карбоксильними (СКН-10 КТР) групами розподіляються в епоксидній матриці з найбільшою кількістю дрібних, термодинамічно стійких мікрокрапель (і, відповідно, з найбільшим об'ємом

гетерофази), що забезпечує максимальний міжфазний контакт між складовими компонентами композицій і, як наслідок, найменшу величину їх деформації  $h_{\max}$  (рис. 1b).

Динамічний модуль пружності  $E_d$  враховує усі особливості сформованої в ході змішування та отвердження структури модифікованих композицій; залежності їх максимальної деформації  $h_{\max}$  та максимального зношування за умови кута атаки абразиву  $45^\circ$  пов'язані з ним прямолінійними залежностями (рис. 4–5) з коефіцієнтом парної кореляції більше 0.99, які відповідають рівнянням 1–3, розрахованим за допомогою пакету програм STATISTICA для MS Excel:

$$y_1 = -2,179x_1 + 62,906; \quad (1)$$

$$y_2 = -4,633x_2 + 65,631; \quad (\text{прямолинійна залежність II}) \quad (2)$$

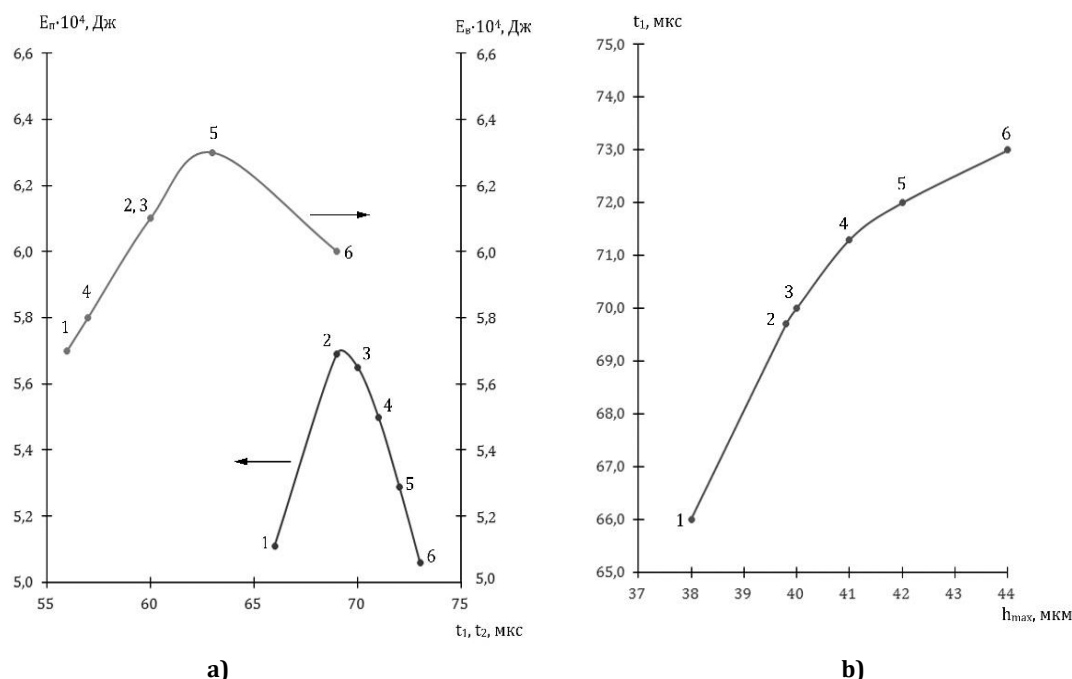
$$y_3 = -4,333x_3 + 70,867; \quad (\text{прямолинійна залежність I}) \quad (3)$$

де  $y_1$  – максимальна величина деформації  $h_{\max}$ , мкм;

$y_2, y_3$  – максимальне зношування  $\Delta V \cdot 10^3$ , см<sup>3</sup>;

$x_1, x_2, x_3$  – динамічний модуль пружності  $E_d \cdot 10^{-9}$ , Па.

Рівняння (1) дозволяє за модифікованих епоксидних композицій і, експериментальними значеннями  $h_{\max}$  відповідно, максимальне їх зношування  $\Delta V$ . спрогнозувати динамічний модуль пружності



**Fig. 1. Dependences of the active  $t_1$  and passive  $t_2$  (a) phases of deformation of cured unfilled epoxy compositions modified with oligomeric rubbers on the components of the deformation energy (elastic  $E_n$  and viscous  $E_b$ ) and their maximum deformation  $h_{\max}$  on  $t_1$  (b): 1 - SKN-14 GTR; 2 - SKN-10 KTR; 3 - SKD-GTR; 4 - SKD-0-E; 5 - SKI-GZ; 6 - SKD-KTR**

**Рис. 1. Залежності активної  $t_1$  та пасивної  $t_2$  (a) фаз деформування модифікованих олігомерними каучуками отверджених ненаповнених епоксидних композицій від складових енергії деформування (пружної  $E_n$  і в'язкої  $E_b$ ) та їх максимальної деформації  $h_{\max}$  від  $t_1$  (b): 1 - СКН-14 ГТР; 2 - СКН-10 КТР; 3 - СКД-ГТР; 4 - СКД-0-Е; 5 - СКИ-ГЗ; 6 - СКД-КТР**

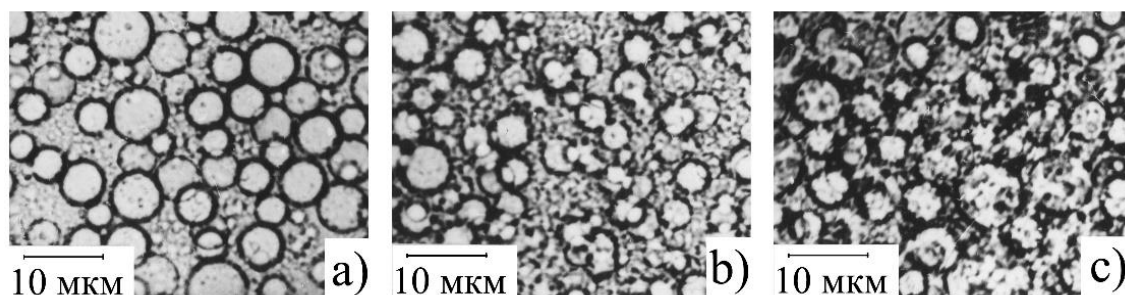


Fig. 2. Optical microscopic images of the structures of epoxy resin-oligomeric rubbers compositions at 20 °C: a) SKD-KTR; b) - SKN-10 KTR; c) - SKN-14 GTR

Рис. 2. Оптико-мікроскопічні знімки структур композицій епоксидна смола - олігомерні каучуки за 20 °С: а) - СКД-КТР; б) - СКН-10 КТР; в) - СКН-14 ГТР

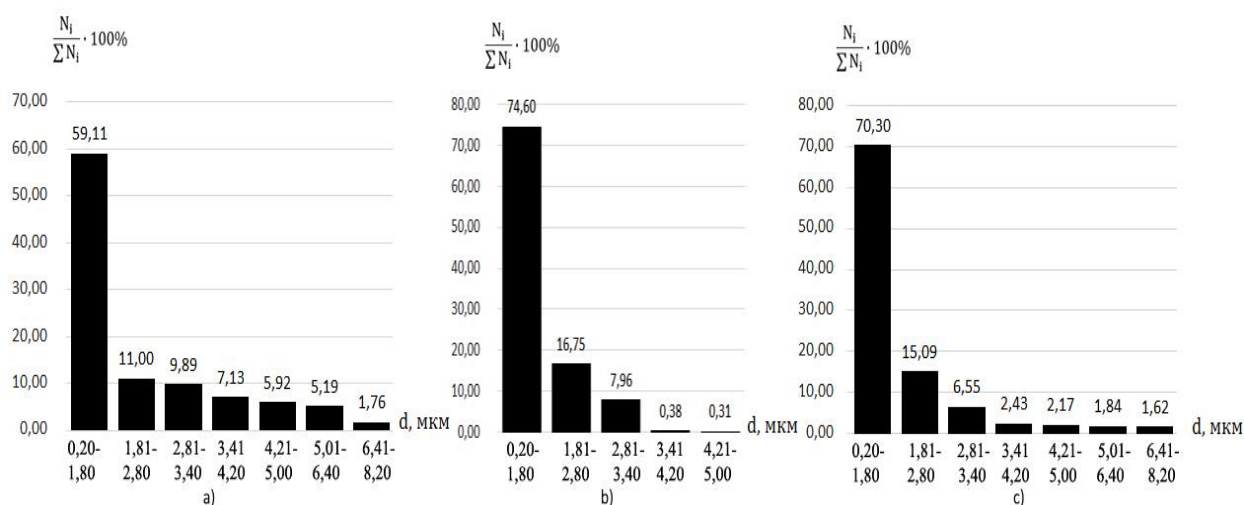


Fig. 3. Histograms of the distribution of particles of the dispersed phase in epoxy resin systems - oligomeric rubbers at 20 °C: a) - SKD-KTR; b) - SKN-10 KTR; c) - SKN-14 GTR

Рис. 3. Гістограми розподілу частинок дисперсної фази в системах епоксидна смола - олігомерні каучуки за 20 °С: а) - СКД-КТР; б) - СКН-10 КТР; в) - СКН-14 ГТР

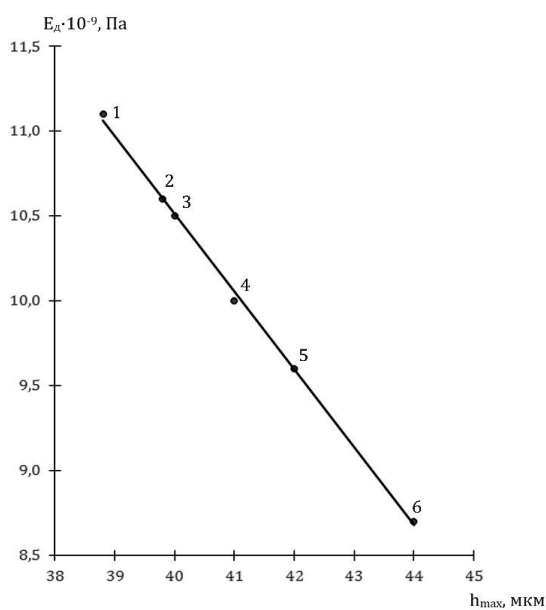


Fig. 4. Relationship between the maximum deformation  $h_{max}$  of epoxy unfilled compositions modified with oligomeric rubbers and the dynamic modulus of elasticity  $E_d$ : 1-SKN-14 GTR; 2 - SKN-10 KTR; 3 - SKD-GTR; 4 - SKD-0-E; 5- SKI-GZ; 6 - SKD-KTR

Рис. 4. Взаємозв'язок максимальної деформації  $h_{max}$  модифікованих олігомерними каучуками епоксидних ненаповнених композицій з динамічним модулем пружності  $E_d$ : 1- СКН-14 ГТР; 2 - СКН-10 КТР; 3 - СКД-ГТР; 4 - СКД-0-Е; 5- СКІ-ГЗ; 6 - СКД-КТР

Цікавим є розподілення олігомерних каучуків у дві паралельні прямолінійні залежності максимального зношування  $\Delta V$  від модуля пружності  $E_d$  (рис. 5), що свідчить про аналогічний характер деформування модифікованих композицій з урахуванням їх структури. Водночас спостерігаються деякі зміни у порядку розташування олігомерних каучуків на залежності  $\Delta V$  від  $E_d$  (рис. 5, II) у порівнянні із залежністю  $h_{max}$  від  $E_d$  (рис. 4): найменше зношування композицій відбувається за введення каучуку з кінцевими карбоксильними групами SKN-10 KTR та епоксидованого олігобутадієну СКД-0-Е. Така

поведінка епоксидних композицій з цими олігомерними каучуками обумовлена їх більшою реакційною здатністю в реакціях з епоксидною матрицею за звичайної температури 20 °С [22], формуванням в цих умовах більш густочастотої структури [21]. За додавання 5 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли олігомерного каучуку SKN-10 KTR в промислові високонаповнені мультидисперсним силіцій карбідом зносостійкі епоксидні композиції ТОВ «Нові технології» (табл. 2) їх максимальне зношування  $\Delta V$  зменшується на 32 %, максимальна деформація  $h_{max}$  – на 13 %.

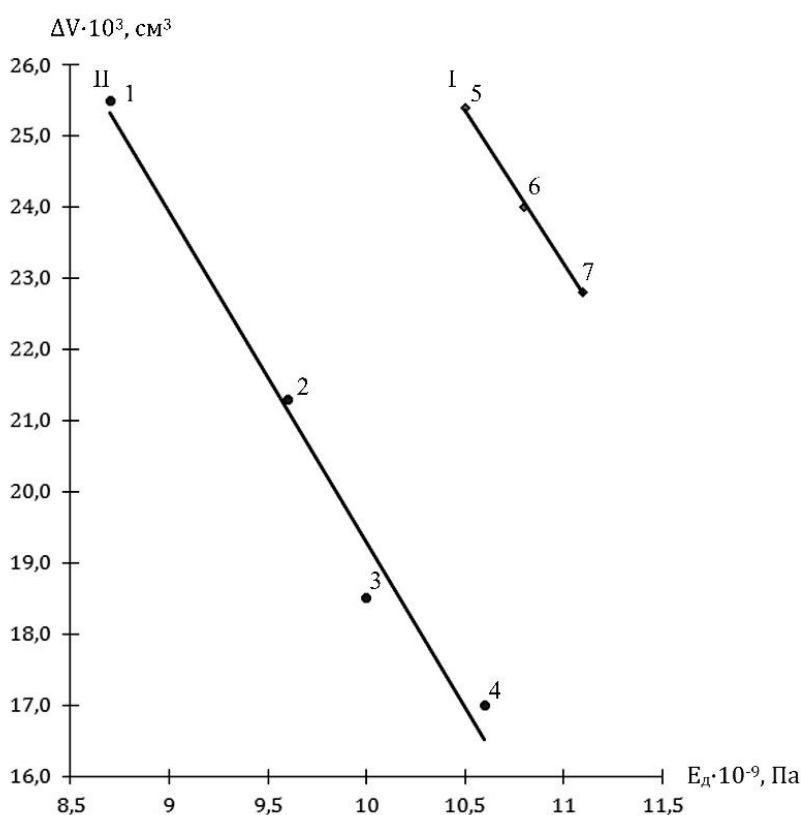


Fig.5. Relationship between maximum wear  $\Delta V$  of unfilled epoxy compositions modified with oligomeric rubbers and dynamic modulus of elasticity  $E_d$ : 1 – SKD-KTR; 2 – SKI-GZ; 3 – SKD-0-E; 4 – SKN-10 KTR; 5 – SKD-GTR; 6 – SKN-8 GTR; 7 – SKN-14 GTR

Рис.5. Взаємозв'язок максимального зношування  $\Delta V$  модифікованих олігомерними каучуками ненаповнених епоксидних композицій з динамічним модулем пружності  $E_d$ : 1 – СКД-КТР; 2 – СКІ-ГЗ; 3 – СКД-0-Е; 4 – SKN-10 KTR; 5 – СКД-ГТР; 6 – SKN-8 ГТР; 7 – SKN-14 ГТР

Table 2

Comparative parameters of deformation of industrial wear-resistant compositions filled with multidispersed silicon carbide under contact-dynamic loading and their maximum wear  $\Delta V$  under the action of a gas-abrasive impact

Таблиця 2

Порівняльні параметри деформування наповнених мультидисперсним силіцій карбідом промислових зносостійких композицій при контактній динамічній навантаженні та їх максимальне зношування  $\Delta V$  під дією газоабразивного середовища

Wear-resistant compositions	$t_1, \mu s$	$t_2, \mu s$	$t_1/t_2$	$h_{max}, \mu m$	$\Delta V \cdot 10^3, cm^3$
Serial	64	40	1.60	42.8	57.6
Modified by SKN-10 KTR	51	35	1.46	37.1	39.1

## Висновки

Визначено вплив олігомерних каучуків з реакційноздатними групами (карбоксільними, гідроксільними, епоксидними, ацилгідрозонними) на поведінку епоксидних композицій на основі діанової смоли СНS-Ероху 525 (Чехія) в умовах контактної динамічного навантаження і встановлено екстремальні залежності активної (занурення в матрицю) та пасивної (відскок від поверхні) фаз процесу від складових енергії їх деформування (пружної та в'язкої), що пов'язано із формуванням фазової морфології композицій з різним ступенем дисперсності гетерофази (олігомерних каучуків).

З'ясовано, що максимальні зношування та деформація модифікованих олігомерними каучуками епоксидних композицій пов'язані

із їх динамічним модулем пружності прямолінійними залежностями з коефіцієнтом парної кореляції більше 0.99, рівняння яких за експериментальним значенням максимальної деформації дозволяють спрогнозувати значення динамічного модуля пружності  $E_d$  і, відповідно, максимальне зношування  $\Delta V$  композицій.

Встановлено, що додавання 5.0 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли олігомерного бутадієн-нітрильного каучуку з кінцевими карбоксільними групами СКН-10 КТР в промисловий високонаповнений мультидисперсним силіцій карбідом склад дозволяє зменшити його максимальне зношування на 32 %, а максимальну деформацію – на 13%.

## References

- [1] 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)
- [2] 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).
- [3] Saponov, O.O., Nigalatii, V.D., Klevtsov, K.M., Smirnov, I.V. (2013). [Influence of the content and nature of fine filler on the mechanical properties and structure of polymer protective coatings]. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 2(9), 229-237 (in Ukrainian).
- [4] Tasyurek, M., Duzcukoglu, H. (2022). Improving the wear behavior of epoxy resin with boron carbide reinforcement. *Iran Polymer Journal*, 31, 169-184. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00987-w>
- [5] Nassar, A., Salem, 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>
- [6] 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>
- [7] Nassar, A., Younis, M., Ismail, M., Nassar, E. (2022). Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles. *Polymers*, 14(2), 2-17. <https://doi.org/10.3390/polym14020333>
- [8] 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>
- [9] Mark, H. F. (2002). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & sons.
- [10] Pascault, J. R., Williams, J. J. (2010). *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations*. John Wiley & sons.
- [11] Zaitsev, Yu. S., Kochergin, Yu. S., Pacter, N. K., Coachman, R. W. (1990). [Epoxy oligomers and adhesive compositions]. Kiev, USSR: Naukova Dumka (in Russian).
- [12] Petrie, E. M. (2006). *Epoxy Adhesive Formulations*. McGRAW-HILL.
- [13] 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)
- [14] Wei, Hongyu, Xia, Jun, Zhou, Wanlin, Zhou, Laishui, Hussain, Ghulam, Li, Qin, Ostrikov, Kostya (2020). Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108035. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108035>
- [15] Poloz, A. Yu., Lipytskyi, S. G., Kushchenko, S. N. (2016) [The choice of parameters for the comparative evaluation of wear resistance epoxy composite materials]. *Technological audit and production reserves*, 5/3 (31), 26-31. (in Russian). <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81253>
- [16] Hammi, Maryama, Ziat, Younes, Zarhri, Zakaryaa, Laghlimi, Charaf, Moutcine, Abdelaziz (2021). Epoxy/alumina composite coating on welded steel 316L with excellent wear and anticorrosion properties. *Scientific Reports*, 11, 12928. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91741-y>
- [17] Abdulqadir, Z. H. M., Karim, F. R. (2022). Evaluating the Efficiency of Epoxy Injection Technique for Repairing Normal and High Strength Concrete Beams -A Critical Review. *Construction*, 2(2), 48-55. <https://doi.org/10.15282/construction.v2i2.8522>
- [18] 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).
- [19] Degtyarev O. V. (Ed.). (2018). [Science for the space industry]. *Informatsionnyy byuletен' Koordinatsionnogo soveta po organizatsii sovместnykh rabot GP «KB «Yuzhnoye» i nauchnykh*

- uchrezhdeniy NAN Ukrainy – Information bulletin of the Coordination Council on the organization of joint work of the «KB «Yuzhnoye» and scientific institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine, (2), 75-78 (in Russian).
- [20] Meyirbekov, M. N., Ismailov, M. B. (2020). [Influence of rubber on mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber (Review)]. *Complex Use of Mineral Resources*, (1), 11-21 (in Russian). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.02>
- [21] Poloz, A. Yu., Ebich, Yu. R., Prokopchuk, N. R., Dolinskaya, R. M., Mozalev, V.V. (2016). [Oligomeric rubbers with reactive groups as modifiers of epoxy wear-resistant compositions]. *Voprosy khimiy i khimicheskoi technologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (1), 72–76 (in Russian). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchem\\_2016\\_1\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchem_2016_1_14)
- [22] Poloz, O. Yu., Ebich, Y. R. (2021). [Influence of oligomer rubbers on the initial stages of the formation of wear-resistant epoxy compositions]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 29(4), 580–588 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i4.241644>
- [23] Kochergin, Yu. S., Zolotareva, V. V., Grigorenko, T. I. (2017). [Wear resistance of composite materials based on epoxy-rubber polymers]. *Bull. of Belarus State Technological Univ.* (4), 10–19 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/article.58ddfc7bea0549.53745809>
- [24] Clarke, A., Eberhardt, C. (2002). *Microscopy Techniques for Materials Science*. – New York: CRC Press LLC.
- [25] Radzinskaya, I. N., Balueva, L. I., Shtarkman, B. P. (1974). [Quantitative methods of estimating parameters of the phase morphology of polymer mixtures], *Kolloidnyy zhurnal – Colloid journal*, 36(2), 291–297. (in Russian).