

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СМЕСИ ПОРОШКОВ Ti– TiC– C, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ СИНТЕЗОМ, НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА

м.н.с В.А. Трегуб<sup>1</sup>, д.т.н. проф. О.Н. Сизоненко<sup>1</sup>, ассистент кафедры Д.А.Зинченко<sup>2</sup>,  
к.т.н. Е.В.Солодкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт импульсных процессов и технологий НАНУ

<sup>2</sup> Херсонская государственная морская академия

<sup>3</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ»

E-mail:vladimirtregub@gmail.com

*Исследовано влияние концентрации наполнителя из смеси порошков (Ti–TiC–C), полученных высоковольтным электроразрядным (ВЭР) синтезом, на теплофизические и физико-механические свойства эпоксидных композитов. На основе анализа показателей разрушающих напряжений при изгибе ( $\sigma_{32}$ ), модуля упругости ( $E$ ), ударной вязкости ( $W$ ) и теплостойкости по Мартенсу ( $T$ ) установлен диапазон значений концентрации синтезированных наполнителей из смеси порошков (Ti–TiC–C), способствующих повышению теплофизических и физико-механических свойств эпоксидных композитов для технологического оборудования в условиях знакопеременных нагрузок.*

### Постановка проблемы

Во многих отраслях промышленности развитых стран мира для защиты технологического оборудования от коррозии и износа эффективно используют композиты на основе эпоксидных смол. Усложнение условий эксплуатации технологического оборудования, в частности, работа механизмов в условиях агрессивных сред при знакопеременных нагрузках и повышенных температурах, предъявляет повышенные требования к эксплуатационным характеристикам эпоксидных композитных материалов (КМ). Поэтому разработка и исследование новых материалов с высокими показателями эксплуатационных характеристик является актуальной задачей современного полимерного материаловедения [1-2].

Анализ исследований последних лет позволяет утверждать, что одним из эффективных способов улучшения свойств эпоксидных композитов является введение наполнителей различной дисперсности и физико-химической природы [3-5].

**Цель работы** – исследовать влияние концентрации наполнителя из смеси порошков Ti–TiC–C, полученных высоковольтным электроразрядным синтезом, на физико-механические и теплофизические свойства эпоксидных композитов.

### Методика исследований

В качестве основного связующего компонента при формировании КМ был выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). В качестве матрицы для эпоксидных композиций использовался низкомолекулярный отвердитель полиэтиленполиамин  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$  (ТУ 6-05-241-202-78), который позволяет формировать материалы при комнатных температурах. Формирование КМ производилось при стехиометрическом соотношении компонентов ЭД-20: Пепа - 100: 10. В работе исследовались физико-механические и теплофизические свойства КМ, а именно: предел прочности на изгиб, модуль упругости, ударная вязкость и теплостойкость по Мартенсу.

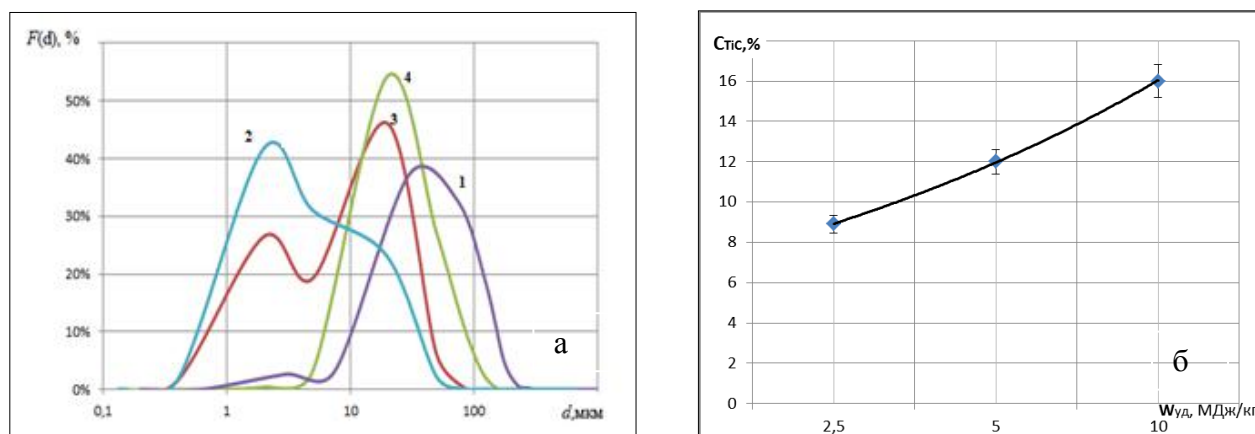
Как наполнитель для экспериментальных исследований физико-механических характеристик КМ использовалась порошок Ti (средний диаметр исходного порошка  $d_{cp}=60$  мкм) после ВЭР обработки с использованием электродной системы “15-ти острыйный анод – плоскость” [6]. Подробное описание экспериментального стенда и конструкции разрядной камеры приведено в [7]. ВЭР обработка порошка Ti в керосине выполнялась при напряжении

зарядки конденсаторной батареи  $U_0=50$  кВ и варьировании ёмкости конденсаторной батареи, при этом достигалось варьирование единичной и удельной энергии обработки ( $W_{ед}=10$  МДж/кг – №1; 5 МДж/кг – №2; 2,5 МДж/кг – №3).

Рентгеновский фазовый анализ порошков проводили на рентгеновских дифрактометрах Bruker D8 DISCOVER, Rigaku Ultima IV в Cu-K $\alpha$  излучении. При идентификации фаз использовали программное обеспечение Bruker: EVA. Количественный анализ содержания фаз проводился по методике Reference Intensity Ratio (RIR).

### Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об уменьшении среднего диаметра частиц порошка Ti с 60 мкм до 2 мкм при увеличении удельной энергии ВЭР обработки от 2,5 до 10 МДж/кг (см. рис. 1, а). Наиболее интенсивное диспергирование порошка было отмечено после обработки с удельной энергией 10 МДж/кг – пик распределения (42 %) лежит в диапазоне 2 мкм (см. рис. 1, а, кривая 2), при этом, примерно 15% частиц имеют размер менее 1 мкм. Вследствие снижения удельной энергией до 5 МДж/кг наблюдается качественное изменение характера распределения частиц порошка по размерам (см. рис. 1, а, кривая 3), которое представляет собой бимодальную кривую с пиками в областях 2 мкм (27 %) и 20 мкм (47 %), при этом также присутствуют частицы размером менее 1 мкм – около 10 %. При дальнейшем снижении удельной энергии обработки до 2,5 МДж/кг интенсивность диспергирования уменьшается – пик распределения (55%) лежит в диапазоне 20 мкм (см. рис. 1, а, кривая 4).



а – Распределение процентного содержания частиц  $F(d_{cp})$  по значениям среднего диаметра  $d_{cp}$  для порошка Ti

1 – исходный порошок Ti; 2 – смесь порошков №1; 3 – смесь порошков №2; 4 – смесь порошков №3.

б – Зависимость количества синтезированного карбида титана от удельной энергии обработки

Рис. 1. Морфологические характеристики и фазовый состав для порошка Ti

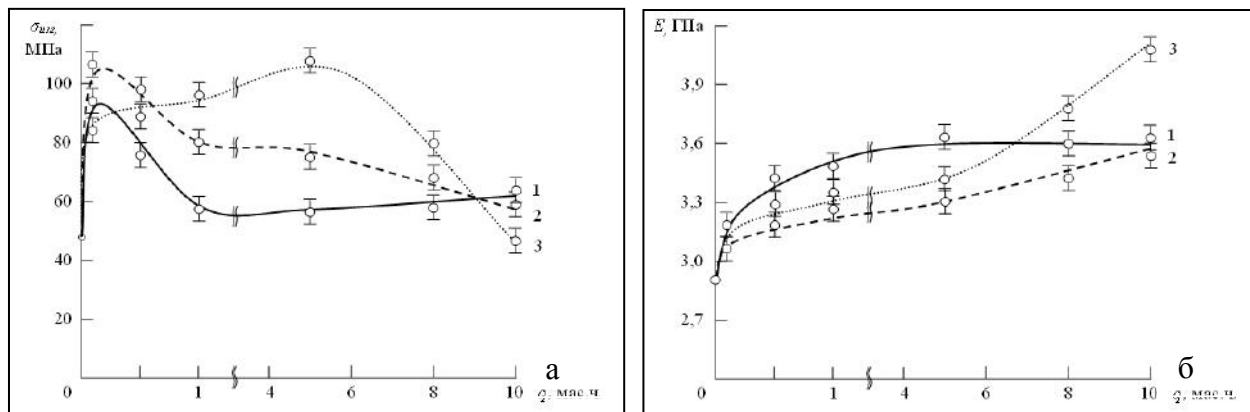
Рентгенофазовый анализ ВЭР обработанных порошков Ti показал наличие наноглерода, карбида титана и титана. Зависимость процентного содержания, синтезированного TiC от удельной энергии обработки близка к линейной (рис 1, б). Наибольшее количество TiC ( $C_{TiC} \approx 16\%$ ) и наноглерода ( $C=0,5$  %) было обнаружено в смеси порошков № 1. При уменьшении удельной энергии обработки до 5 МДж/кг (№ 2) процентное содержание TiC снижается до  $C_{TiC} \approx 12\%$ , а содержание свободного наноглерода снижается до  $C_C \approx 0,1\%$ . Отдельно стоит отметить, что в порошковой смеси после обработки с удельной энергией 2,5 МДж/кг (№ 3) не было обнаружено остаточного наноглерода, а процентное содержание карбида титана составило  $C_{TiC} \approx 8$  %.

Для установления влияния процентного содержания синтезированных наполнителей на физико-механические характеристики КМ были исследованы следующие характеристики: разрушающее напряжение ( $\sigma_{изг.}$ ), модуль упругости при изгибе ( $E$ ) и ударная вязкость ( $W$ ). При этом содержание наполнителей варьировали в пределах  $q=0,1-10,0$  мас.ч.

Экспериментально установлено [6], что разрушающее напряжение матрицы составляет  $\sigma_{изг.} = 48,0$  МПа, модуль упругости при изгибе –  $E = 2,9$  ГПа, ударная вязкость –  $W = 7,4$  кДж / м<sup>2</sup>.

Введение в эпоксидный олигомер частиц наполнителя в количестве  $q = 0,1-10,0$  мас.ч. приводит к повышению показателей разрушающих напряжений КМ до  $\sigma_{изг.} = 54,9-92,2$  МПа для системы наполненной смесью порошков №1 (см. рис 2, а, кривая 1),  $\sigma_{изг.} = 58,3-106,4$  МПа для системы наполненной смесью порошков №2 (см. рис 2, а, кривая 2),  $\sigma_{изг.} = 83,9-106,1$  МПа для системы наполненной смесью порошков №3 (см. рис 2, а, кривая 3).

При увеличении концентрации наполнителя также наблюдалось постепенное увеличение показателей модуля упругости КМ до  $E = 3,2-3,6$  ГПа для КМ наполненного смесью порошков №1 (см. рис. 2, б, кривая 1),  $E = 3,1-3,6$  ГПа для КМ наполненного смесью порошков №2 (см. рис. 2, б, кривая 2),  $E = 3,2-4,1$  ГПа для КМ наполненного смесью порошков №3 (см. рис. 2, б, кривая 3).



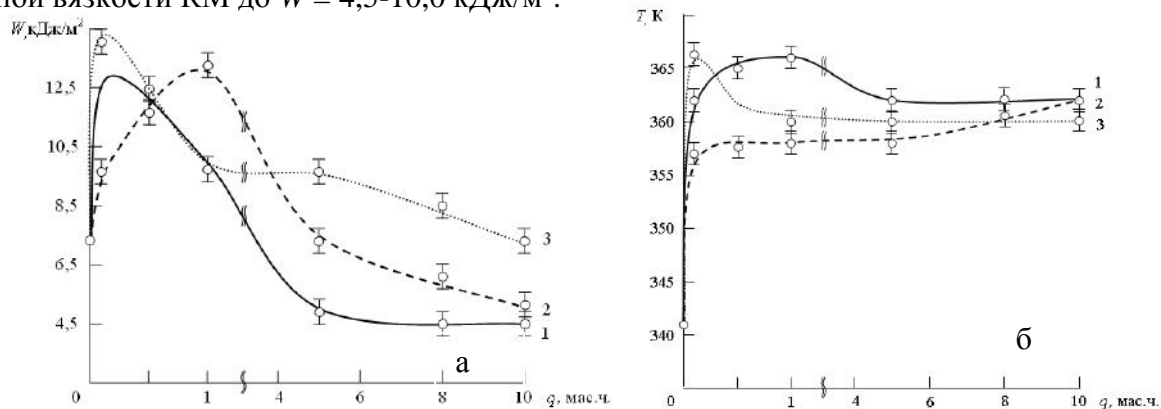
1 – КМ с добавкой смеси порошков №1; 2 – КМ с добавкой смеси порошков №2; 3 – КМ с добавкой смеси порошков №3

а – зависимость разрушающих напряжений при сгибании ( $\sigma_{изг.}$ ) КМ от содержания наполнителей;

б – зависимость значения модуля упругости от концентрации.

Рис. 2. Влияние процентного содержания наполнителя на физико-механические характеристики КМ.

Экспериментально установлено, что при введении наполнителя из смесей порошков № 1 и № 3 (см. рис. 3, а, кривая 1, 3) в количестве  $q = 0,1$  мас.ч. и смеси порошков №2 (см. рис. 3, а, кривая 2) в количестве  $q = 1,0$  мас.ч. ударная вязкость максимально возрастает относительно исходной матрицы ( $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>) и составляет  $W = 12,8$  кДж/м<sup>2</sup>,  $W = 14,4$  кДж/м<sup>2</sup> и  $W = 12,9$  кДж/м<sup>2</sup> соответственно. Дальнейшее повышение концентрации всех вышеуказанных наполнителей ( $q = 1,0-10,0$  мас.ч.) способствует снижению показателей ударной вязкости КМ до  $W = 4,5-10,0$  кДж/м<sup>2</sup>.



1 – КМ с добавкой смеси порошков №1; 2 – КМ с добавкой смеси порошков №2; 3 – КМ с добавкой смеси порошков №3

а – зависимость ударной вязкости ( $W$ ) КМ от содержания наполнителя; б – зависимость теплостойкости по Мартенсу от содержания наполнителя.

Рис. 3. Влияние процентного содержания наполнителя на физико-механические характеристики КМ.

В результате исследований теплостойкости КМ было установлено, что введение наполнителя из порошковых смесей в количестве  $q = 0,1-10,0$  мас.ч. обеспечивает повышение теплостойкости КМ относительно матрицы на  $\Delta T = 17-25$  К (см. рис. 3, б). Максимум на кривых зависимости теплостойкости от концентрации наполнителей наблюдался при содержании наполнителя из смеси порошков №1 в количестве  $q = 1,0$  мас.ч. при  $T = 366$  К (см. рис. 3, б, кривая 1), №2 в количестве  $q = 10,0$  мас.ч. при  $T = 362$  К (см. рис. 3, б, кривая 1), и №3 в количестве  $q = 0,1$  мас.ч. при  $T = 366$  К (см. рис. 3, б, кривая 3).

## ВЫВОДЫ

На основании результатов исследований модуля упругости, разрушающих напряжений, ударной вязкости и теплостойкости КМ с наполнителем из смеси порошков Ti-TiC-C, полученных ВЭР синтезом №1, 2,3, в количестве  $q = 0,1-1,0$  мас.ч., можно рекомендовать их для использования при эксплуатации технологического оборудования в условиях знакопеременных нагрузок, для восстановления и повышения эксплуатационных характеристик технологического оборудования и антикоррозионной защиты палубных механизмов (фундаментные подкладки).

В условиях повышенных температур, рекомендуется использовать КМ наполненные смесью порошков Ti-TiC-C №1 и №2 в количестве  $q = 10,0$  мас.ч.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Buketov A.V. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A.V. Buketov, P.O. Maruschak, O.O. Sapronov, D.O. Zinchenko, V.M. Yatsyuk, S. Panin // TRANSPORT. – Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), 2016. – Volume 31(3). – P. 333–342. – Режим доступа: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16484142.2016.1212267>
2. А.В.Букетов, А.В.Акимов, Д.А.Зинченко Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. - №5(229). – С. 126-133.
3. Букетов А.В. Вплив антифрикційної добавки на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів / А.В. Букетов, Д.О. Зінченко, О.В. Акімов, С.О. Сметанкін // матеріали 8-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 310-311.
4. Стухляк П.Д., Микитишин А.Г., Митник М.М., Букетов А.В. Автоматизація досліджень кінетики тверднення епоксиполімерних композитів // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. - Т.2, №3. – С.59-62.
5. Чихіра І.В., Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г. Дослідження адгезійної міцності модифікованих ультразвуком епоксикомпозитів, що містять комплексний наповнювач // Вісник НАУ.-Київ: НАУ.-Вип.95, Ч.ІІ.-2006.-С.291-297.
6. Трегуб В. Анализ физических процессов высоковольтной электроразрядной обработки порошков титана в керосине / Сизоненко О.Н., Присташ Н.С. // материалы 7-ой международ. науч.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон: Херсонская государственная морская академия, 2016. – С. 212-213.
7. Sizonenko O. Effect of high-voltage discharge on the particle size of hard alloy powders. – Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 49, Issue 11/12, 2011, P. 630–636. (Sizonenko O., G. Baglyuk, A. Raichenko et al).

*Робота виконана при частичній піддержці Гранта НАН України научно-дослідницьких робіт молодих учених в 2016 г. (тема № ІІ–18–15, № ГР 0115U003864).*