

УДК 539.4.015: 666.3

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ МАХ-ФАЗ ТИТАНУ НА ЗНОШУВАННЯ В КОНТАКТІ З МІДДЮ. Ч. 1. ДВОСТАДІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ

Т. О. ПРИХНА<sup>1</sup>, В. Я. ПОДГУРСЬКА<sup>2</sup>, О. П. ОСТАШ<sup>2</sup>, Б. Д. ВАСИЛІВ<sup>2</sup>,  
В. Б. СВЕРДУН<sup>1</sup>, М. В. КАРПЕЦЬ<sup>1</sup>, Т. Б. СЕРБЕНЮК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено трибологічні властивості матеріалів для електроконтактної вставки пантографа трамвая у парі з міддю марки М1 контактного проводу силової електричної мережі. Кандидатними матеріалами вставки були композити на основі МАХ-фаз  $Ti_3AlC_2$ ,  $(Ti, Nb)_3AlC_2$  та  $Ti_2AlC$ , а також  $TiC$  та  $Al_2O_3$ . Найбільшою зносотривкістю володіли композити з вмістом 85...95% МАХ-фази структурної модифікації 312. Їх знос після 5 km шляху за контактного напруження 0,25 МПа (що відповідає умовам експлуатації) виявився у 20 разів меншим, ніж алюмінієвого сплаву, який застосовують для виготовлення вставок пантографів в Україні. Зносотривкість міді М1 також залежала від фазового складу матеріалу вставки: у контакті з композитами на основі 95%  $Ti_3AlC_2$  + 5%  $TiC$  або 85%  $(Ti, Nb)_3AlC_2$  + 10%  $TiC$  + 5%  $Al_2O_3$  вона у 4–5 разів вища, ніж у контакті з алюмінієвим сплавом.

**Ключові слова:** пантограф, композити на основі МАХ-фаз титану, електропровідність, міцність, зношування, дугостійкість.

Титану та його сплавам притаманний комплекс підвищених фізико-механічних характеристик, тому їх широко використовують в авіа- і ракетобудуванні, хімічній, машинобудівній та інших галузях промисловості [1]. Проте ці сплави мають дуже погані антифрикційні властивості, зокрема, схильні до контактного схоплювання під час тертя. Тому, щоб підвищити довговічність вузлів тертя з них, застосовують поверхневу обробку шляхом нанесення функціональних покриттів [2]. Невелика товщина цих покриттів (декілька десятків мікрметрів) часто не забезпечує довготривалу експлуатацію трибоспряжень.

Перспективними тут є композитні матеріали на основі МАХ-фаз титану [3, 4]. Зокрема, композити системи  $(Ti, Nb)-(Al, Si)-(C, N)$  мають унікальну комбінацію властивостей металів і керамік: високі міцність, жаро- і корозійну тривалість, електро- і теплопровідність, а також низькі коефіцієнти термічного розширення і тертя. При цьому їх можна легко обробляти традиційними механічними способами [4–7]. Низький коефіцієнт тертя матеріалів на основі МАХ-фаз зумовлює їх шарувата наноламінатна структура [3, 4, 7], тому їх все частіше застосовують в електротранспорті, зокрема, для виготовлення вставок пантографів [8, 9].

Підвищення надійності і ресурсу експлуатації електротранспорту пов'язано з розвитком досліджень пар тертя і зношування матеріалів, оскільки саме відмови рухомих з'єднань складають близько 95% від усіх несправностей [10]. Найпоширенішими у міському електротранспорті рухомими з'єднаннями є ковзні електричні контакти. Технічні умови передбачають, що матеріали струмозмінальних ковзних елементів повинні забезпечувати високі електропровідність, твердість, міцність, зносотривкість, а також стійкість до дії електричної дуги [11], оскільки

зниження довговічності струмознімальних вставок також спричинене імпульсною електричною дугою, яка виникає за недостатнього контакту між вставкою і проводом силової електричної мережі. При цьому на поверхні вставки з'являються оплавлення з вкрапленнями твердих сплавів, які пришвидшують зношування матеріалів пари тертя [12].

Мета цього дослідження – вивчити вплив структурно-фазового складу композитів на основі МАХ-фаз систем Ti–Al–C і (Ti, Nb)–Al–C, отриманих за двостадійною технологією, на їх ресурсні фізико-механічні властивості як кандидатних матеріалів для електроконтактної вставки пантографа електротранспорту.

**Матеріали і методика.** Випробовували пари тертя титановий композит-мідь марки М1, які моделюють взаємодію струмознімальної вставки пантографа і контактного проводу силової електричної мережі. Композити отримували за двостадійною технологією: синтез у вакуумі (1350°C, 30...120 min) та ущільнення гарячим пресуванням (1350°C, 30...35 МПа, 10...30 min) порошків TiH<sub>2</sub>, TiC і Al (МАХ-фази Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> і Ti<sub>2</sub>AlC структурних модифікацій 312 і 211, відповідно), а також порошків TiH<sub>2</sub>, TiC, Al і Nb (МАХ-фаза (Ti, Nb)<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>). Вихідні порошки змішували і мололи у планетарному активаторі МПФ-1 в аргоні та компактували при 30 МПа. Фазовий склад матеріалів подано в табл. 1 (варіанти 1–6). Для порівняння випробовували також зразки сплаву системи Al–Cu–Fe–Si в литому стані (варіант 7), який використовують в Україні для виготовлення вставок пантографів трамваїв [13].

**Таблиця 1. Досліджувані матеріали, фазовий склад і механічні властивості**

№ варіанта	Матеріал	Фазовий склад, %	<i>HV</i> <sub>500</sub>	$\sigma_f$
			МПа	
1	Ti-композити	95Ti <sub>2</sub> AlC, 5TiC	3860	433
2		98Ti <sub>2</sub> AlC, 2TiC	3710	445
3		95Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> , 5TiC	5420	545
4		85(Ti, Nb) <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> , 10TiC, 5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5450	410
5		40Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> , 60Ti <sub>2</sub> AlC	3680	440
6		83Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> , 15Ti <sub>2</sub> AlC, 2TiC	7590	418
7	Al сплав	–	700	300

Міцність матеріалів ( $\sigma_f$ ) визначали на призматичних зразках розміром 4×5×40 mm за триточкового згину, як руйнівні напруження на діаграмі “навантаження–прогин”, а мікротвердість – приладом ПМТ-3М за навантаження 500 g (*HV*<sub>500</sub>). Їх електропровідність виміряли за чотириточковою схемою. Тривкість до зношування оцінювали за втратою маси ( $\Delta m$ ) тіла 1 (досліджувані матеріали) і контргіла 2 (мідь марки М1) за умов ковзання без мастильного матеріалу (рис. 1а) за питомого контактного навантаження 0,25 МПа на шляху 5 km. Визначали

також стійкість матеріалів до дії електричної дуги, потужність якої ( $W = CU^2/2$ , де  $C$  – ємність конденсатора,  $U$  – максимальне значення електричної напруги за розряду конденсатора) регулювали ємністю (300 і 600  $\mu\text{F}$ ) розрядного конденсатора. Ступінь пошкодження поверхні зразків характеризували (рис. 1b) діаметром ( $d$ ) і глибиною ( $h$ ) кратера, які встановлювали на безконтактному інтерференційному профілографі “Micron beta”. Рентгенофазовий аналіз виконували на дифрактометрі ДРОН-4,0 у монохроматичному  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з фокусуванням за схемою Брегга-Брентано. Для мікрофрактографічного аналізу застосовували сканівний електронний мікроскоп Carl Zeiss EVO-40XVP.

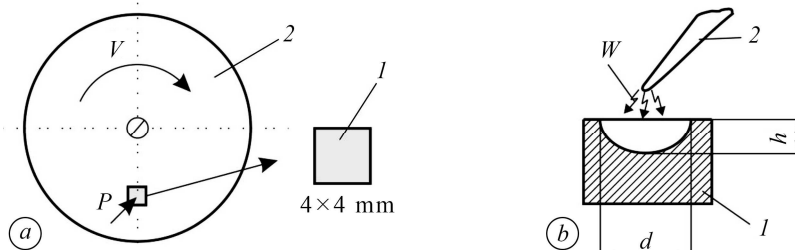


Рис. 1. Схеми випробувань: *a* – на зношування (1 – тіло; 2 – контртіло); *b* – на стійкість до електричної дуги (1 – зразок; 2 – електрод).

Fig. 1. Test schemes for (a) wear resistance (1 – body, 2 – rider) and (b) resistance to electrical arc (1 – sample, 2 – electrode) estimation.

**Результати та їх обговорення.** Отримали титанові композити (табл. 1), де переважають МАХ-фази модифікації 211 або 312 та їх суміш (85...100%) за наявності додаткових фаз  $\text{TiC}$  (2...10%) і  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5%). Хімічний склад і структурно-фазовий стан композитів забезпечують їх питому електропровідність 2...5  $\text{MSm/m}$ , що є на рівні досліджуваного алюмінієвого сплаву (2...5  $\text{MSm/m}$ ) і задовольняє вимоги до матеріалів контактних вставок пантографів [11]. Мікротвердість цих матеріалів різнилась майже вдвічі за переважно невеликої зміни у міцності (до ~ 8%). Винятком є варіант 3 (див. табл. 1), який за середньої мікротвердості має вищу (до 20%) міцність. При цьому міцність і, особливо, мікротвердість титанових композитів значно вищі, ніж алюмінієвого сплаву.

Аналіз мікрофрактограм свідчить (рис. 2), що всі композити мають наноламінатну шарувату структуру різної дисперсності: грубшу – для варіантів 1 і 6; дрібнішу – для варіантів 3 і 4. В результаті руйнування матеріалів варіантів 3 і 4 енергоємніше: окремі квазівідкольні фасетки оточені локальними зонами в'язкого руйнування (рис. 2b, c). Ці матеріали на основі МАХ-фази модифікації 312 мають середні значення (542 і 545 МПа) мікротвердості (див. табл. 1).

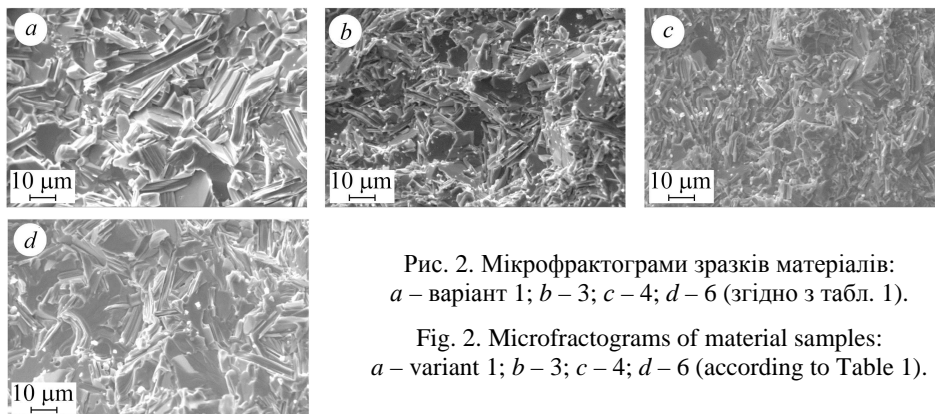


Рис. 2. Мікрофрактограми зразків матеріалів: *a* – варіант 1; *b* – 3; *c* – 4; *d* – 6 (згідно з табл. 1).

Fig. 2. Microfractograms of material samples: *a* – variant 1; *b* – 3; *c* – 4; *d* – 6 (according to Table 1).

Матеріали варіантів 1 і 6 на основі МАХ-фази модифікації 211 або суміші модифікації 211 і 312 руйнуються за крихким мікромеханізмом, причому великі відкольні фасетки характерні як для матеріалу варіанта 1 (рис. 2а) з низькою (386 МПа) мікротвердістю, так і для варіанта 6 (рис. 2d) – з найвищою (759 МПа). Кореляції між мікрофрактографічними особливостями і мікротвердістю, а також міцністю досліджуваних композитів не спостерігали.

Водночас потрібно зауважити, що через схильність до вираженого крихкого руйнування матеріалів варіантів 1 і 6 в зоні контакту трибопари утворюються абразивні часточки, що впливає на зношування мідного контртіла. Отримані результати дійсно свідчать про таку можливість. У контакті з композитами варіантів 1, 2, 5 і 6 мідь зношується значно інтенсивніше (на порядок і більше), ніж коли працює у парі з композитами варіантів 3 і 4 (рис. 3b; табл. 2). Задири на поверхні ковзання мідного контртіла (рис. 4a), очевидно, обумовлені часточками тіла з крихких композитів. Подібну картину зафіксували для пари алюмінієвий сплав–мідь (рис. 4b). У контакті з матеріалами варіантів 3 і 4 поверхня контртіла гладка, близька до полірованої (рис. 4c).

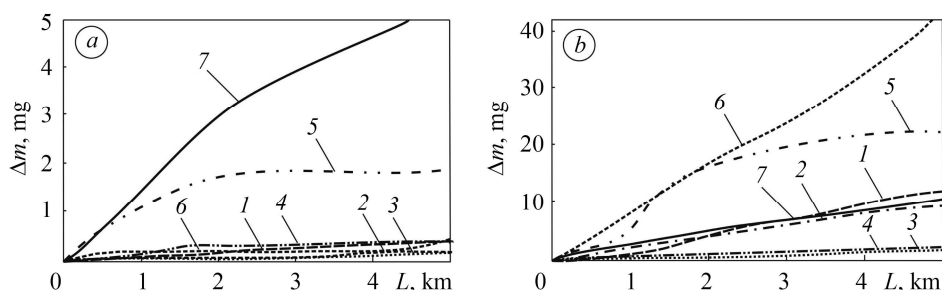


Рис. 3. Кінетика зношування: *a* – композитів і алюмінієвого сплаву в контакті з міддю; *b* – міді в контакті з композитами і алюмінієвим сплавом. Цифри відповідають номеру варіанта в табл. 1.

Fig. 3. Kinetics of wear: *a* – composites and aluminum alloy in contact with copper; *b* – copper in contact with composites and aluminum alloy. The numbers correspond to the material variant in Table 1.

**Таблиця 2. Опір зношуванню і дугостійкість досліджуваних матеріалів**

№ варіанта*	Втрата маси $\Delta m$ , mg**		Параметри пошкодження за різної потужності дуги			
			$d$ , $\mu\text{m}$		$h$ , $\mu\text{m}$	
	Тіло	Контртіло	300	600	300	600
1	0,4	11,3	947	1216	8	13
2	0,2	9,6	850	1394	8	9
3	0,3	1,7	814	1145	10	14
4	0,4	2,5	902	1428	9	12
5	1,8	22,1	884	1449	6	8
6	0,6	46,9	892	1401	13	10
7	6,0	10,5	813	1200	42	76

\* № варіанта згідно з табл. 1.

\*\* За питомого контактного навантаження 0,25 МПа на шляху 5 км.

Опір зношуванню титанових композитів (тіла) високий для всіх варіантів (рис. 3а; табл. 2), тільки варіант 5 проявив децю нижчу зносотривкість. При цьому оптимальна пара композит варіанта 3–мідь марки М1 суттєво переважає пару алюмінієвий сплав–мідь (варіант 7) за ступенем зносу як тіла, так і контртіла (рис. 3 і табл. 2).

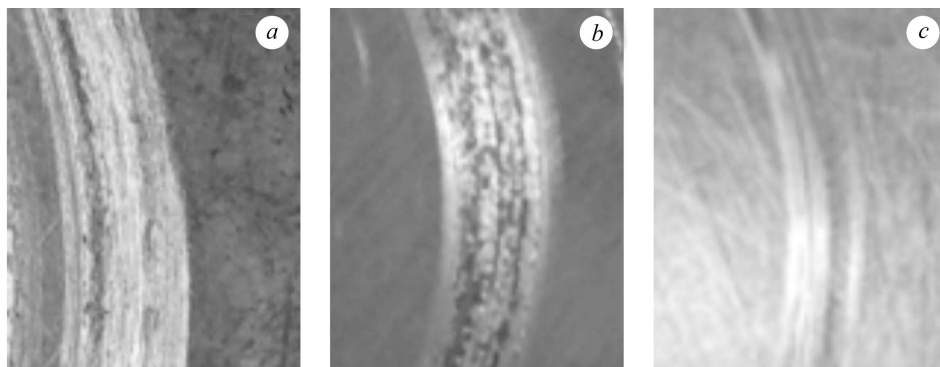


Рис. 4. Зношені поверхні зразків міді у контакті з матеріалами варіантів 6 (а); 7 (b) і 3 (с).

Fig. 4. Worn surfaces of copper samples in contact with materials of variant 6 (a); 7 (b) and 3 (c).

Подібну картину спостерігали за стійкістю досліджуваних матеріалів до дії електричної дуги (табл. 2). За різної її потужності діаметр  $d$  пошкодження на поверхні титанових композитів і алюмінієвого сплаву відрізняється мало (до 14%). За глибиною  $h$  пошкодження композити також різняться несуттєво, але значно переважають алюмінієвий сплав (у середньому в 4–7 разів залежно від потужності дуги).

#### ВИСНОВКИ

Встановлено, що спечені композити на основі МАХ-фаз систем  $\text{Ti-Al-C}$  і  $(\text{Ti, Nb})\text{-Al-C}$  – перспективні для використання в трибоспряженнях за контактних напружень 0,25 МПа, що зумовлено їх наноламінатною структурою. Виявлено, що структурна модифікація 312 зносотривкіша, ніж 211. Композити на основі суміші цих модифікацій демонструють нижчу (у 4–7 разів) зносотривкість. Опір зношуванню литого сплаву системи  $\text{Al-Cu-Fe-Si}$  (традиційного матеріалу вставок пантографів) суттєво менший (у 20 разів) порівняно з МАХ-фазами. За критерієм зношування пари композит–мідь марки М1 перевагу мають композити на основі МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  і  $(\text{Ti, Nb})_3\text{AlC}_2$ , а на основі  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  зумовлюють більше (у 4–5 разів) зношування контртіла (міді), що є на рівні пари алюмінієвий сплав–мідь. Композити на основі суміші модифікацій 312 і 211 зношують контртіло у 10–20 разів сильніше проти оптимальних варіантів.

**РЕЗЮМЕ.** Исследованы трибологические свойства материалов для электроконтактной вставки пантографа трамвая в паре с медью марки М1 контактного провода силовой электрической сети. Кандидатными материалами вставки были композиты на основе МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ ,  $(\text{Ti, Nb})_3\text{AlC}_2$  и  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ , а также  $\text{TiC}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наибольшую износостойкость имели композиты с содержанием 85...95% МАХ-фазы структурной модификации 312. Их износ после 5 км пути при контактном напряжении 0,25 МПа (что соответствует условиям эксплуатации) оказался меньше в 20 раз, чем алюминиевого сплава, применяемого для изготовления вставок пантографов в Украине. Износостойкость меди М1 также зависела от фазового состава материала вставки: в контакте с композитами на основе 95%  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  + 5%  $\text{TiC}$  или 85%  $(\text{Ti, Nb})_3\text{AlC}_2$  + 10%  $\text{TiC}$  + 5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  она в 4–5 раз выше, нежели в контакте с алюминиевым сплавом.

**SUMMARY.** The tribological properties of the materials for a slide plate of the tram pantograph in pair with the material (copper grade М1) of the mains power grid are investigated.

As candidate materials for pantograph slide plate composites based on the MAX phases of  $Ti_3AlC_2$ ,  $(Ti, Nb)_3AlC_2$  and  $Ti_2AlC$ , as well as  $TiC$  and  $Al_2O_3$  were studied. The highest wear resistance was observed for composites with a content of 85...95% of the MAX phase of the structural modification 312. The wear of these materials after 5 km of the path at a contact stress of 0.25 MPa (which corresponded to the operating conditions) turned out to be 20 times less in comparison with the aluminum alloy used in Ukraine for the pantograph slide plate. The durability of grade M1 copper also depended on the phase composition of the slide plate material: in pair with composites based on 95%  $Ti_3AlC_2$  + 5%  $TiC$  or 85%  $(Ti, Nb)_3AlC_2$  + 10%  $TiC$  + 5%  $Al_2O_3$ , it was 4–5 times higher than in contact with the aluminum alloy.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остащ, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков, О. Г. Моляр, О. І. Семенець, В. С. Кравець, В. Я. Дереча. – Львів: СПОЛЮМ, 2007. – 1068 с.*
2. *Федірко В. М., Погрелюк І. М., Яськів О. І. Термодифузійне багатоконпонентне насичення титанових сплавів. – К.: Наук. думка, 2009. – 166 с.*
3. *Barsoum M. The  $M_{n+1}AX_n$  phases: A new class of solids thermodynamically stable nanolaminates // Progress in Solid State Chemistry. – 2000. – 28 (1–4). – P. 201–281.*
4. *Radovich M. and Barsoum M. W. MAX phases: bridging the gap between metals and ceramics // Amer. Ceram. Soc. Bull. – 2013. – 92, № 3. – P. 20–27.*
5. *Thermal stability and mechanical characteristics of densified  $Ti_3AlC_2$ -based material / Т. Прихна, О. Остащ, Т. Васуєк et al. // Solid State Phenomena. – 2015. – 230. – P. 140–143.*
6. *Вплив технологічних середовищ на механічні і фізичні властивості матеріалів для паливних комірок / А. Д. Івасишин, О. П. Остащ, Т. О. Прихна, В. Я. Подгурська, Т. В. Басуєк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 2. – С. 7–14.  
(Influence of technological media on the mechanical and physical properties of materials for fuel cells / A. D. Ivasyshyn, O. P. Ostash, T. O. Prikhna, V. Ya. Podhurska, T. V. Basyuk // Materials Science. – 2015. – 51, № 2. – P. 149–157.)*
7. *Lightweight (Ti, Nb)–Al–C MAX phases-based materials: preparation, structure and properties / Т. Прихна, Т. Васуєк, М. Карпєтс et al. // Sustainable Industrial Processing Summit and Exhibition. Vol. 5: Marquis Int. Symp. New and Advanced Materials and Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development (Eds F. Kongoli, F. Marquis, N. Chikhradze). – Flogen, 2017. – P. 367–386.*
8. *Xiao Q. D. and Lv Z. L. Current carrying friction and wear characteristics of  $Ti_3AlC_2$  by novel method of infiltration sintering // Adv. in Appl. Ceramics. – 2012. – 111, № 4. – P. 202–207.*
9. *Erosion behavior of  $Ti_3AlC_2$  cathode under atmosphere air arc / Xiaochen Huang, Yi Feng, Gang Qian, Ke Liu // J. Alloys and Compounds. – 2017. – 727. – P. 419–427.*
10. *Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.*
11. *Ефремов И. С., Кобозев В. М., Шевченко В. В. Технические средства электрического транспорта. – М.: Высш. шк., 1985. – 448 с.*
12. *Гершман И. С., Большаков Ю. Л., Сыченко В. Г. Совместимость различных токосъемных материалов на одном участке контактного провода // Залізн. транспорт України. – 2008. – № 5. – С. 52–56.*
13. *Патент України № 77745. Струмознімний ковзний елемент / С. А. Сергієнко, В. А. Коваль. – Опубл. 25.02.2013; Бюл. № 4.*

Одержано 19.04.2018