

Уманский А.П., \*  
Пугачевская Е.П., \*\*  
Марценюк И.С., \*

\*Институт проблем материаловедения НАНУ,

\*\*Национальный авиационный университет,  
м. Київ, Україна

## КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### Введение

С каждым днем все больше растут требования к надежности и долговечности машин, что в свою очередь ведет к разработке новых технологий, методик и материалов, которые помогают продлить ресурс работы той или иной техники. Одним из перспективных направлений развития машиностроения является применение новых материалов, обладающих высокими физико-механическими и трибологическими характеристиками. К числу наиболее перспективных материалов относятся тугоплавкие металлоподобные и неметаллические соединения типа карбидов, боридов, нитридов и т.д. [1 - 3]. Однако их непосредственное использование для изготовления деталей машин и механизмов часто ограничивается технологическими трудностями, значительной хрупкостью и невысокими прочностными свойствами в условиях динамических нагрузок, а также относительно высокой стоимостью.

Поэтому гораздо целесообразнее использовать полезные свойства тугоплавких соединений, применяя их в виде основы композиционных материалов. В качестве пластичной составляющей таких композитов традиционно используют металлические сплавы. Композиционный материал можно использовать для изготовления деталей машин, но гораздо целесообразнее его использовать в качестве накладок для трущихся и нагруженных деталей или в форме покрытий. Применение композиционных материалов в таком виде является в ряде случаев наиболее эффективным, а иногда и единственно возможным средством решения сложных технических проблем.

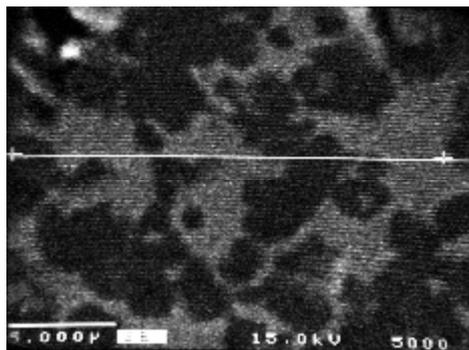
### Постановка проблемы

Целью работы была разработка нового композиционного материала на основе диборида титана-хрома с высокими эксплуатационными характеристиками для применения его в узлах трения в качестве накладок.

### Изложение основного материала

Методом смачивания и изучения механизмов физико-химического взаимодействия были определены структурные составляющие материала. В качестве твердой фазы был выбран диборид титана-хрома, так как он обладает высокими физико-механическими (твердостью, микротвердостью, прочностью при изгибе) и эксплуатационными свойствами (износ- и коррозионностойкостью) [4]. Однако, применение его в чистом виде ограничено за счет высокой хрупкости диборида титан-хрома. Для повышения пластичности материала в качестве металлической связки был предложен никелевый сплав с добавками хрома. По результатам смачивания диборида титана-хрома никель-хромовыми сплавами был выбран оптимальный состав металлической связки для композиционного материала – Ni-15 мас. % Cr [5]. Хром, как поверхностно-активный элемент, способствует растеканию никеля по поверхности диборида титана-хрома, что приводит к образованию нулевых контактных углов. При такой концентрации хрома в никелевом сплаве не происходит активное химическое взаимодействие между компонентами композиционного материала, что является необходимым условием при выборе металлической связки КМ.

Методами порошковой металлургии были получены три состава материала: ТБХН30, ТБХН40, ТБХН50 с 30, 40 и 50 мас. % металлической связки Ni-Cr соответственно. На микроскопе Camebax SX-50 был проведен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) полученных материалов (рис. 1).



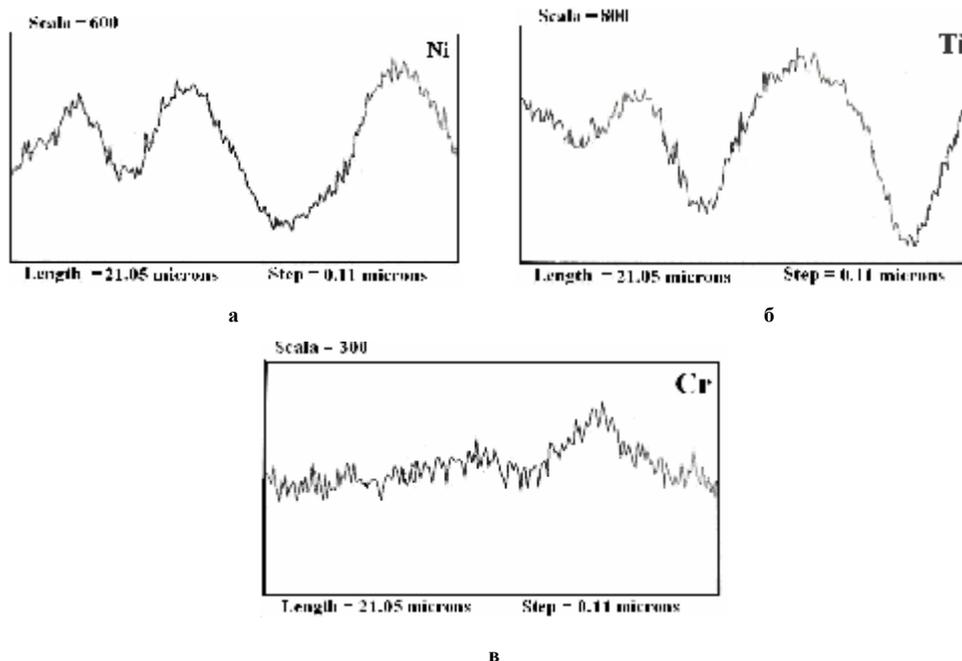


Рис. 1 – Микроструктура материала ТБХН30 и распределение в ней элементов: а – никель; б – титан; в – хром

Структура материала ТБХН гетерофазна с равномерным распределением фаз: темно серая фаза – зерна диборида титана-хрома, светло-серая фаза – металлическая связка Ni-Cr.

Был проведен сравнительный анализ физико-механических свойств разработанных композиционных материалов с твердым сплавом ВК6 (табл. 1). Этот материал в качестве эталона выбран потому что, во-первых, он относится к тому же классу материалов, что и разработанный, а именно, к керметам, а во-вторых, этот материал широко используется для упрочнения и восстановления узлов трения.

Таблица 1

#### Физико-механические свойства материалов

Материал	Микротвердость, ГПа	Агрегатная твердость, НРА	Предел прочности при изгибе, МПа
ТБХН30	25	89,1	1310
ТБХН40	23	88,6	1360
ТБХН50	21	88,9	1490
ВК6	17	86	1400

На приборе ПМТ-3 была измерена микротвердость разработанных материалов и твердого сплава

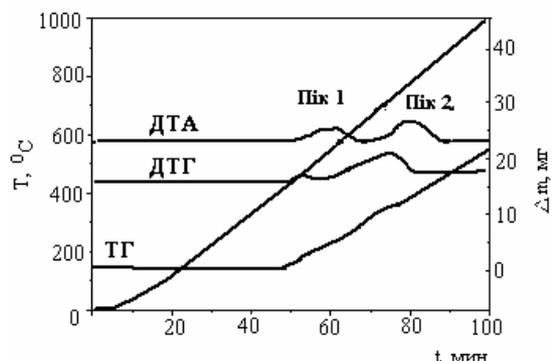


Рис. 2 – Дериватограмма окисления композиционного материала ТБХН30

ВК6. Самой высокой микротвердостью обладает материал ТБХН40 (табл. 1). Это объясняется тем, что ТБХН40 содержит оптимальное количество металлической связки, т.е. в материале ТБХН30 ее недостаточно, что приводит к охрупчиванию композита, а в материале ТБХН50 ее слишком много, что обеспечивает высокие пластичные свойства, однако снижает микротвердость материала.

С увеличением содержания металлической связки в композиционном материале, т.е. с увеличением его пластичности, растут значения предела прочности при изгибе. Для твердого сплава ВК6 предел прочности при изгибе составил 1400 МПа, что сопоставимо с результатами, полученными по композиционным материалам.

Исследовалась стойкость разработанных композиционных материалов к высокотемпературному окислению. Образцы в виде кубиков из материала ТБХН30 с гранью 5 мм подвергались окислению на дериватографе марки Q-1500D с плавным нагревом их до температуры 1000 °С. По полученным данным была построена дериватограмма (рис. 2).

Окисление материала характеризуется несколькими стадиями: на первой стадии образуются пики в интервале 450 - 550 °С. Эти пики предположительно соответствуют оксидам бора  $B_2O_3$ , что согласуется с данными, приведенными в работе [6].

Вторая стадия характеризуется образованием пиков в температурном интервале 600 - 800 °С. После проведения окисления была изучена структура образовавшейся пленки. Микрорентгеноспектральный анализ сечения переходной зоны оксидной пленки и материала выявил образование сложных оксидов титана-хрома (рис. 3), т.е. окислению подвергается главным образом тугоплавкая составляющая материала – диборид титана-хрома. Также обнаружены сложные оксиды никеля-хрома, что, очевидно, свидетельствует о том, что пластичная составляющая только начинает окисляться, то есть для образования четких пиков недостаточно заданной температуры. Кривая ТГ подтверждает прирост массы материала, то есть происходит процесс окисления металлической связки, однако не так интенсивно, как окисление тугоплавкой составляющей материала. Эти результаты согласуются с процессом окисления Ni – Cr сплавов, описанном в работах [7, 8].

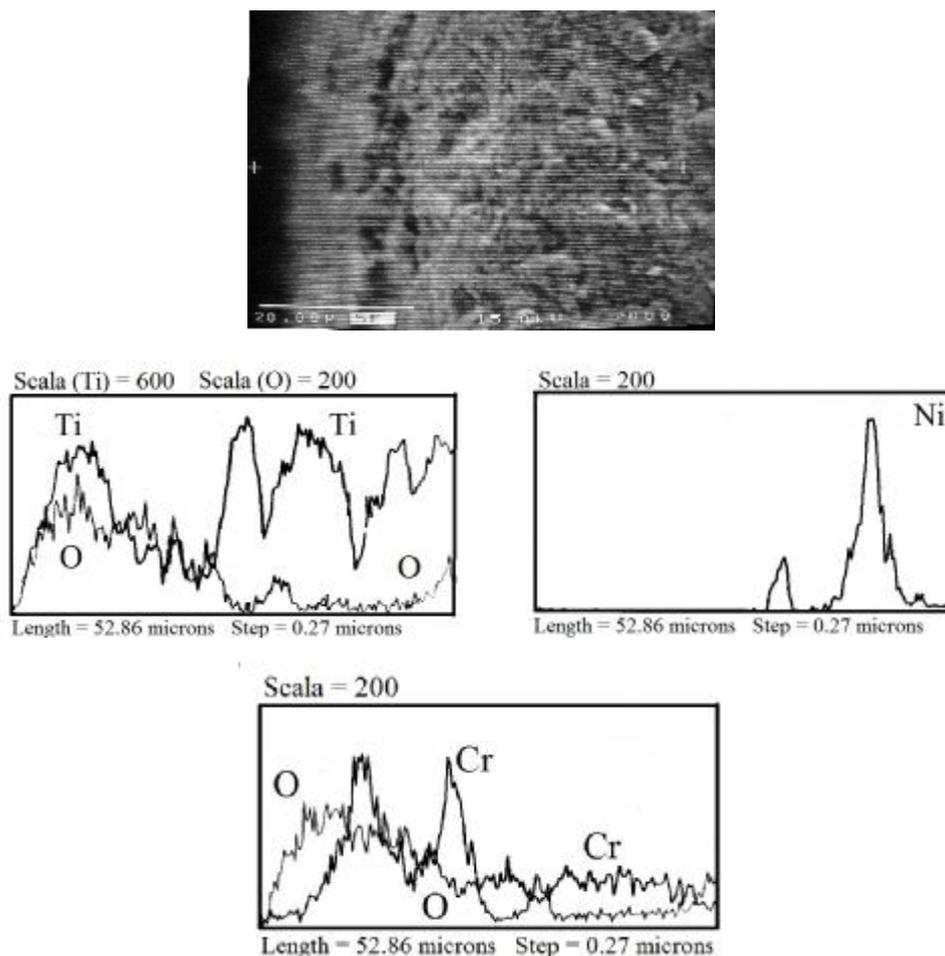


Рис. 3 – Микроструктура переходной зоны материала ТБХН30 и оксидной пленки и распределение элементов

На основании результатов по высокотемпературному окислению можно говорить о том, что материал обладает селективной окисляемостью. То есть, протекает многостадийный процесс окисления с образованием оксидов тугоплавкой составляющей материала и металлической связки разных составов.

Для изучения триботехнических характеристик материалов были проведены испытания образцов в условиях фреттинг-коррозии на установке имитирующей вибрацию МФК-1(ГОСТ 23.211-80), по схеме контакта плоскость-плоскость. Были подготовлены образцы цилиндрической формы из композиционных материалов ТБХН диаметром 20 мм и высотой 25 - 30 мм. Контрольный образец во всех испытаниях выполнен из стали 95X18 с твердостью 45-50 HRC. Условия испытаний:  $P = 20$  МПа;  $A = 50$  мкм;  $T = 293$  К;  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов.

Применение разработанных материалов рекомендуется в качестве накладок на титановые сплавы авиационного назначения, в частности, упрочнение вибрационных полок лопаток газотурбинного двигателя. Поэтому проводился сравнительный анализ износостойкости композиционного материала ТБХН и титановых сплавов ВТ-22 и ВТ-3.

Гистограмма (рис. 4) иллюстрирует линейный износ композиционных материалов ТБХН и титановых сплавов в условиях фреттинг-коррозии.

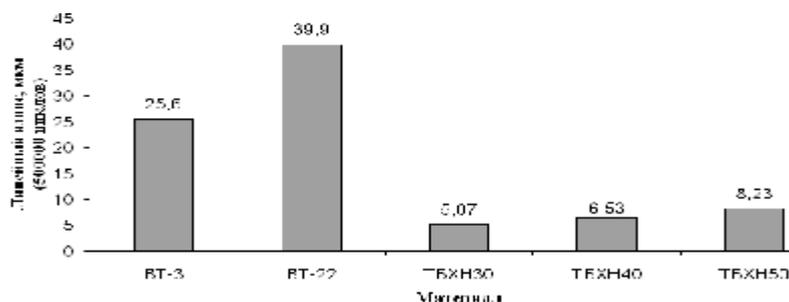


Рис. 4 – Линейный износ материалов, мкм

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что линейный износ материала ТБХН растет с увеличением содержания в композите металлической связки, однако, в целом, износостойкость композиционных материалов в паре трения со сталью 95Х18 в 5 - 8 раз выше износостойкости титановых сплавов.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно говорить о том, что композиционный материал на основе диборида титана-хрома обладает высокими физико-механическими, физико-химическими и триботехническими свойствами, что позволяет его считать перспективным материалом для использования в узлах трения.

Для решения научно-технической проблемы повышения работоспособности рабочих лопаток ГТД, были проведены триботехнические испытания композиционных материалов (композитов) и титановых сплавов в различных сочетаниях с целью выбора оптимального среди следующих пар трения:

1) титановый сплав - титановый сплав; 2) композит - титановый сплав; 3) композит - композит.

Испытания проводились в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы лопаток газотурбинных двигателей, изготовленных из титановых сплавов, а именно,  $P = 20$  МПа;  $A = 125$  мкм;  $T = 293$  К;  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов.

**Титановый сплав - титановый сплав.** Линейный износ титановых сплавов составил  $\sim 10$  мкм (рис. 5). В процессе трения титановых сплавов оксидная пленка, образуемая на поверхности, разрушается, и трение происходит по ювенильной поверхности титанового сплава. Это приводит к схватыванию и вырывам материала (рис. 6), т.е. реализуется адгезионный механизм изнашивания.

Рис. 5 – Линейный износ материалов

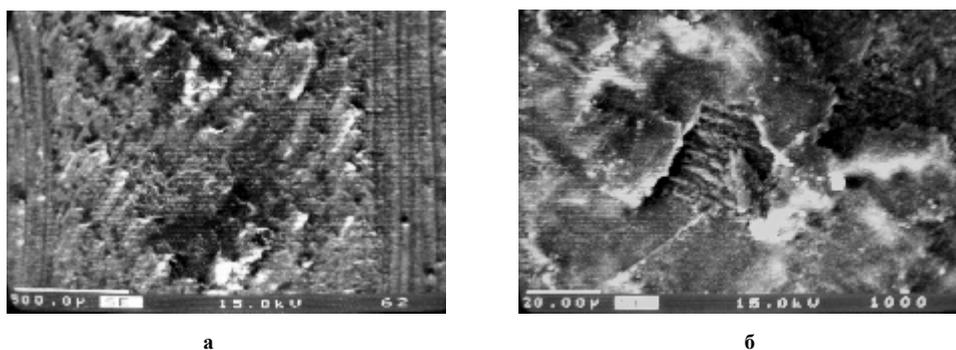


Рис. 6 – Микроструктуры дорожек трения титанового сплава BT-3 в паре с титановым сплавом BT-3

**Композит - титановый сплав.** Испытывался композиционный материал ТБХН40 в паре трения с титановым сплавом ВТ-3. Линейный износ составил 8,64 мкм (рис. 5). Как известно [9 - 11], особенно с изнашиванием титановых сплавов является то, что в процессе трения происходит перенос материала образца на поверхность контртела и трение происходит по схеме «титановый сплав - титановый сплав». Причем, такое явление проявляется независимо от материала контробразца. Как правило, во всех таких случаях износ титанового сплава интенсивнее износа контробразца вследствие налипания и задира. Микрорентгоспектральный анализ дорожек трения композиционного материала ТБХН40 свидетельствует о том, что на поверхности композита действительно присутствует слой титанового сплава (рис. 7).

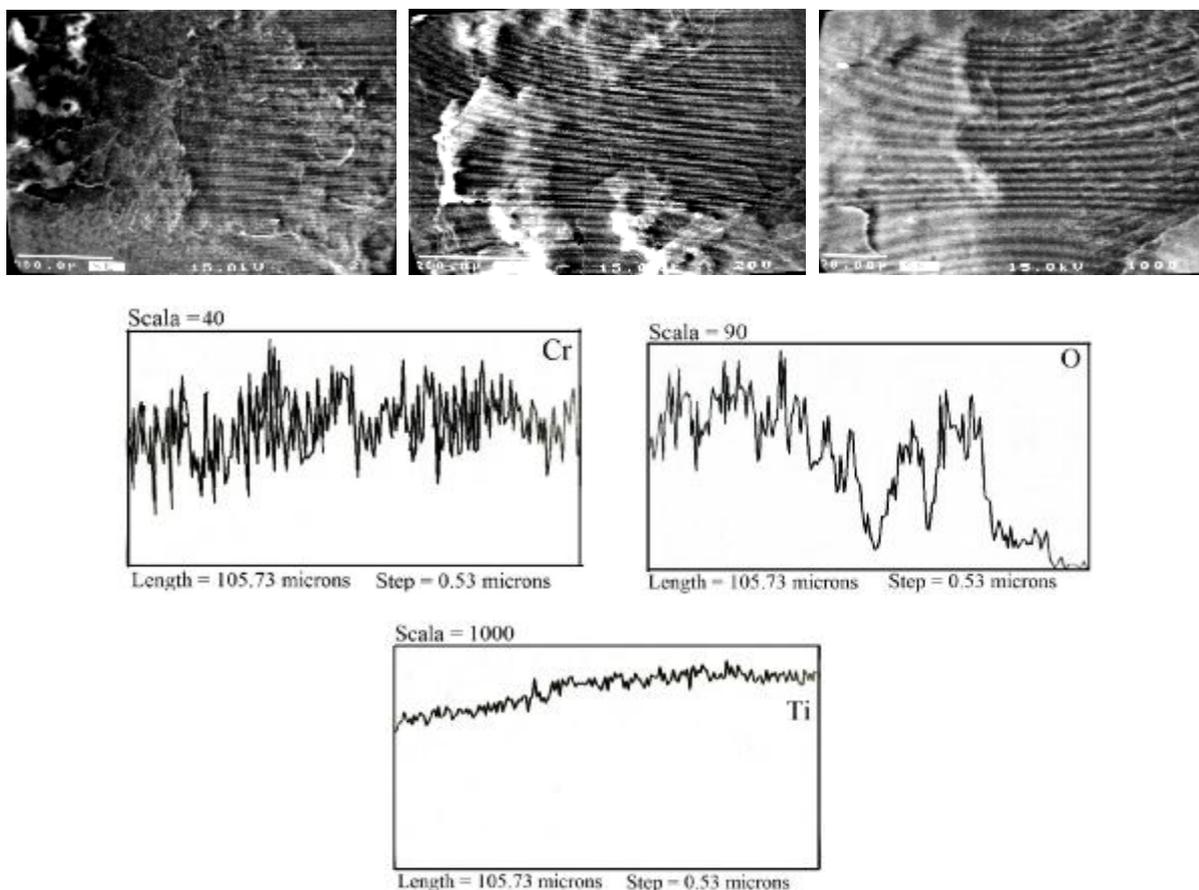


Рис. 7 – Микроструктуры дорожки трения материала ТБХН40 и распределение элементов (пара трения – ВТ3)

Микроструктуры дорожек трения иллюстрируют наличие участков схватывания с последующими вырывами и сколами материала. Таким образом, реализуется адгезионный механизм изнашивания, как и в одноименной паре трения «титановый сплав - титановый сплав».

**Композит - композит.** Линейный износ составил ~ 4 мкм (рис. 5). Высокие результаты по износостойкости композиционных материалов в одноименных парах обеспечиваются за счет реализации окислительного механизма изнашивания. На поверхности материала в процессе трения образуются окисные пленки с дискретной структурой (рис. 8)

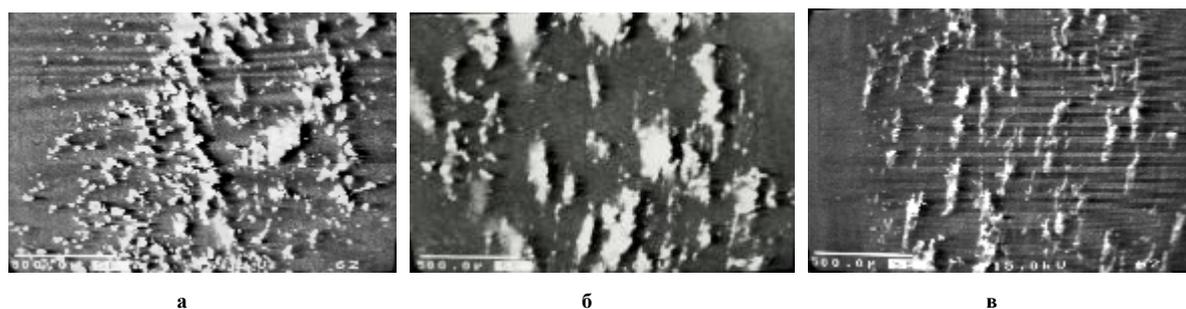


Рис. 8 – Микроструктуры дорожек трения композиционного материала:  
а – ТБХН30; б – ТБХН40; в – ТБХН50

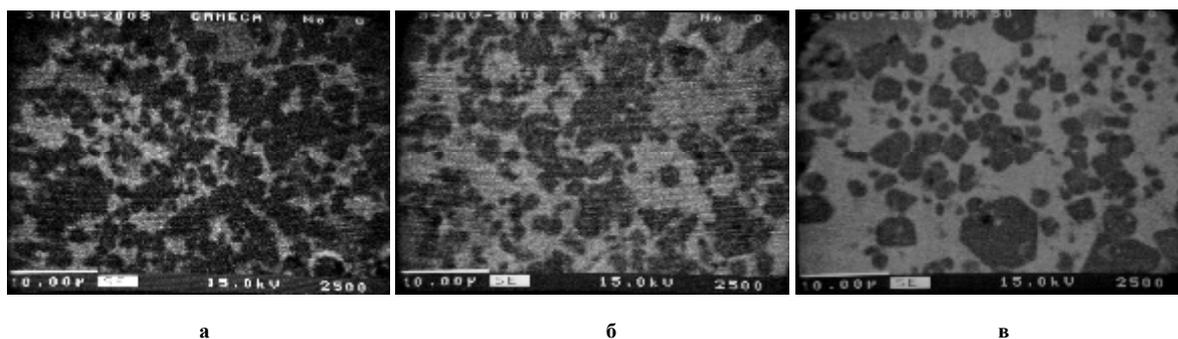


Рис. 9 – Микроструктуры материала ТБХН  $\times 2500$ :  
а – ТБХН30; б – ТБХН40; в – ТБХН50

Очевидно, в процессе трения в зоне контакта происходит существенное повышение температуры, что приводит к образованию оксидных пленок. Причем, дискретность оксидной пленки объясняется селективностью окисления композиционного материала, что согласуется с данными по высокотемпературному окислению композиционного материала ТБХН.

Анализ дорожек трения композиционных материалов ТБХН на микроскопе РЭМ-106И показал, что кислород содержится и в светлой и в темной фазах, то есть на поверхности трения образуются оксиды двух составов, причем белая фаза содержит кислорода значительно больше, а значит, и температура образования этих оксидов разная (рис. 10). То есть, в процессе трения также реализуется двухстадийное окисление материала.

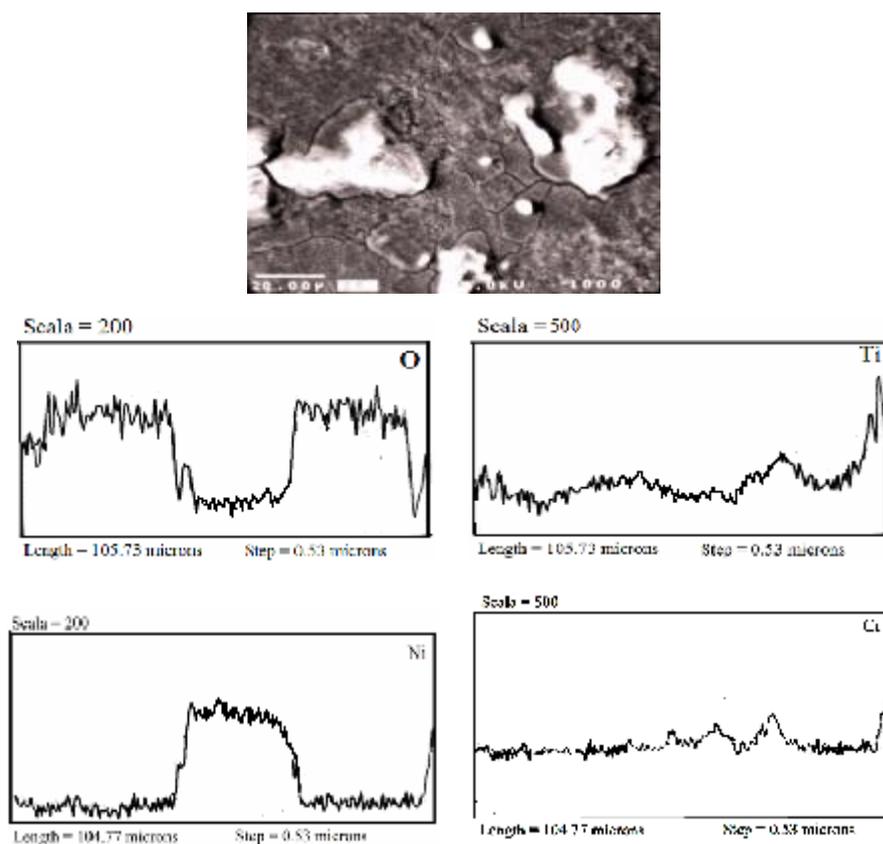


Рис. 10 – Микроструктура дорожки трения ТБХН30 и распределение в ней элементов

Таким образом, формируемая на поверхности трения дискретная оксидная пленка работает как защитная за счет формирования оксидов разных составов, тем самым предотвращая повышенный износ композиционных материалов.

Кроме того, для разработанных композиционных материалов с разным содержанием металлической связки выявлена следующая закономерность. В зависимости от состава материала меняется дис-

кретность оксидной пленки. На рис. 9 четко видно, что с увеличением содержания металлической связки в материале количество зерен диборида титана-хрома заметно уменьшается, что ведет к уменьшению количества оксидной пленки. Так, дорожка трения материала ТБХН50 с 50% металлической связки характеризуется мелкодисперсной оксидной пленкой и количество ее существенно меньше, чем на дорожке трения материала ТБХН30. Дорожка трения материала ТБХН40 содержит текстурированные дискретные оксидные фазы белого цвета размер которых составляет 100-150 мкм (рис. 8б). Такие результаты позволяют говорить о том, что механизмом изнашивания композиционного материала ТБХН можно управлять, варьируя содержание металлической составляющей в нем.

### Выводы

1. Разработан новый композиционный материал на основе диборида титана-хрома с никель-хромовой связкой. Материал ТБХН обладает высокими физико-механическими свойствами (микротвердость 21-25 ГПа, агрегатная твердость ~89 HRA, предел прочности при изгибе 1310-1490 МПа). Температура начала интенсивного окисления ~ 700 °С. Линейный износ материалов в паре трения со сталью 95Х18 составил 4-6 мкм при 500000 циклов.

2. Проведены испытания нового композиционного материала и титановых сплавов в условиях фреттинг-коррозии в различных сочетаниях пар трения. Среди исследованных материалов максимальной износостойкостью обладает пара трения «композит - композит» за счет реализации окислительного механизма изнашивания. На дорожках трения композиционного материала ТБХН формируются дискретные оксидные пленки, которые работают как защитные, предотвращая повышенный износ материала.

3. Варьируя количеством металлической связки в материале можно управлять интенсивностью изнашивания композиционного материала. Так, с увеличением количества металлической связки меняется состав оксидной пленки, формируемой на материале в процессе трения. Чем больше металлической связки в материале, тем ниже износостойкость материала.

4. Композиционный материал на основе диборида титана-хрома является перспективным и может быть рекомендован для работы в качестве накладок или износостойких покрытий в узлах трения авиационной техники.

### Литература

1. Котельников Р.Б. Особо тугоплавкие элементы и соединения. Справ. / Под ред. Котельникова Р.Б. – М.: Металлургия, 1969. – 468 с.
2. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургиздат, 1963. – 397 с.
3. Туманова А.Г. Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справ. / Под ред. Туманова А.Г. и Портного К.И. – М.: Машиностроение, 1967. – 438 с.
4. Самсонов Г.В. Бор, его соединения и сплавы / Самсонов Г.В., Марковский Л.Я., Жигач А.Ф., Валяшко М.Г. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – 590 с.
5. Уманский А.П. Исследование контактного взаимодействия диборида титана хрома со сплавами Ni-Cr / А.П. Уманский, Е.П. Пугачевская, В.П. Коновал // Адгезия металлов и сплавов. – К., 2008. – №41. – С. 44-52.
6. Лавренко В.А. Высокотемпературное окисление композиционных материалов на основе диборида титана / В.А. Лавренко, С.С. Чупров, А.П. Уманский, Т.Г. Проценко, Е.С. Луговская. // Порошковая металлургия. – К.: 1987. – № 9 (297). – С. 84-86.
7. Жаропрочные сплавы. Симс Ч., Хагель В. Нью-Йорк – Лондон – Сидней – Торонто, 1972. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
8. Panasyuk A.D., Lavrenko V.A. Development of Advanced AlN and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>- Based Ceramics with metallic binder and Investigation of the Corrosion Properties / Corrosion of Advanced Ceramics Trans Tech. Publication. 1995. p. 59-64.
9. Абковиц С. и др. Титан в промышленности. Пер. с англ. М., Оборонгиз, 1957. – 146 с.
10. Горынин И.В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
11. Пульцин Н.М. Титановые сплавы и их применение в машиностроении. – М. – Л.: Машгиз, 1962. – 168 с.

Надійшла 31.10.2011