

УДК 666.3/7: 541.138.2: 620.198.27

**В. П. Коновал\*, А. П. Уманский, В. Н. Талаш,  
В. А. Лавренко, Ю. Б. Руденко, В. И. Субботин**

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН  
Украины, г. Киев, Украина

\*akwa@ukr.net

### **Электрохимическая коррозия композиционных материалов системы TiCrV<sub>2</sub>-AlN в 3 %-ном растворе NaCl**

*Методом потенциодинамических поляризационных кривых изучено коррозионную стойкость керамических материалов и керметов на основе диборида титана-хрома в 3 %-ном растворе NaCl, имитирующем морскую воду. Изучено состав и микроструктуру поверхностей окисленных образцов. Небольшие добавки AlN (5–10 % (по объему)) в TiCrV<sub>2</sub> позволяют существенно увеличить коррозионную стойкость материала. Введение в состав материала металлической связки из сплава NiAlCr снижает стойкость материала к анодному окислению.*

**Ключевые слова:** электрохимическая коррозия, диборид титана-хрома, нитрид алюминия, композиционный материал.

#### **ВСТУПЛЕНИЕ**

Одним из основных видов разрушения деталей машин и механизмов является электрохимическая коррозия. Металлические сплавы, как основной конструкционный материал в машиностроении, металлургии, химической и других отраслях промышленности, все чаще и чаще не в состоянии выполнять свои функции в связи с постоянно возрастающими требованиями по жаростойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости в агрессивных средах. Поэтому интерес к керамическим коррозионностойким конструкционным материалам постоянно возрастает.

Одним из основных недостатков большинства керамических материалов является их достаточно высокая хрупкость. Зачастую материалы, обладающие высоким уровнем коррозионной стойкости, имеют низкие прочностные свойства, что существенно ограничивает области их применения.

Перспективным материалом с точки зрения сочетания комплекса эксплуатационных свойств (высокая твердость, коррозионно- и износостойкость, тепло- и электропроводность) является диборид титана-хрома (TiCrV<sub>2</sub>). Обобщенные свойства данного материала наиболее полно представлены в [1]. По сравнению с TiV<sub>2</sub> и CrV<sub>2</sub> диборид титана-хрома имеет более высокую твердость, жаро- и износостойкость. Важным преимуществом по сравнению с широко распространенными материалами на основе карбида вольфрама (WC) является его более высокая коррозионная стойкость, а также значительно меньший удельный вес, а соответственно и стоимость. Недостатком TiCrV<sub>2</sub> являются невысокие прочностные свойства. Введение различных добавок, как керамических, так и металлических, позволяет повысить прочность материала.

© В. П. КОНОВАЛ, А. П. УМАНСКИЙ, В. Н. ТАЛАШ, В. А. ЛАВРЕНКО, Ю. Б. РУДЕНКО, В. И. СУББОТИН,

2017

Известны как керамические материалы [2, 3], так и керметы [4–7] на основе  $\text{TiCrB}_2$ , для которых достаточно подробно изучены состав, структура, механические и триботехнические свойства. Стойкость к высокотемпературному окислению и электрохимической коррозии в 3 %-ном растворе  $\text{NaCl}$  чистого  $\text{TiCrB}_2$  и композиционного материала  $\text{TiCrB}_2\text{-30(Fe-Cr)}$ \* исследована в [8], где также показана перспективность применения материала в данных условиях. Перспективным с точки зрения жаростойкости [9], механических и триботехнических свойств [3] являются материалы системы  $\text{TiCrB}_2\text{-AlN}$ . Более известны и подробно изучены материалы системы  $\text{TiB}_2\text{-AlN}$ , которые все же уступают по механическим и триботехническим свойствам [10], а особенно жаростойкости [11], материалам на основе  $\text{TiCrB}_2$ . Учитывая высокий уровень коррозионной стойкости в морской воде материалов  $\text{TiB}_2\text{-AlN}$  [12, 13], материалы системы  $\text{TiCrB}_2\text{-AlN}$  также представляет значительный интерес в этом отношении.

Целью настоящей работы было изучение влияния неметаллической ( $\text{AlN}$ ) и металлической (сплав  $\text{NiAlCr}$ ) добавок в  $\text{TiCrB}_2$  на стойкость полученных композитов к электрохимической коррозии в 3 %-ном растворе  $\text{NaCl}$ , имитирующем морскую воду.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных материалов использовали порошки  $\text{TiCrB}_2$ ,  $\text{AlN}$  и сплава  $\text{Ni-18Al-3Cr}$ . Шихту порошков для горячего прессования и спекания получали путем смешивания и размол в планетарной мельнице составляющих порошков в необходимой пропорции на протяжении 8 ч. Гранулометрический состав смеси порошков изучали на лазерном анализаторе “SK Laser Micron Sizer”.

Керамические материалы получали горячим прессованием на установке СПД-120 с индукционным нагревом в графитовых пресс-формах, предварительно обмазанных нитридом бора. Температура горячего прессования, в зависимости от состава, варьировалась в диапазоне 1850–1900 °С, а давление составляло 40 МПа при выдержке 20–25 мин. Керметы получали брикетированием шихты в стальной пресс-форме с последующим спеканием в вакууме при температурах 1500–1550 °С и выдержке 30–40 мин. Образцы для испытаний размером 30×5×5 мм шлифовали со всех сторон на наждачной бумаге ( $\text{SiC}$ ) с зернистостью P60–P2000.

Изучение анодного растворения полученных композитов в 3 %-ном растворе  $\text{NaCl}$ , имитирующем морскую воду, были проведены с помощью метода потенциодинамических поляризационных кривых с использованием потенциостата ПИ-50-1 при скорости изменения потенциала 0,5 мВ/с и температуре 20 °С. Платиновый электрод был использован в качестве катода; потенциалы анода измеряли с помощью хлорсеребряного электрода сравнения.

Состав и микроструктуру окисленных поверхностей изучали на растровом электронном микроскопе РЭМ10БИ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая данные предыдущих исследований [3, 9] для испытаний на коррозионную стойкость, были получены материалы на основе диборида титана-хрома, состав и свойства которых представлены в табл. 1.

---

\* Здесь состав материала приведен в % (по массе), а далее в работе состав материалов в % (по объему).

**Таблица 1. Состав и свойства исследуемых материалов**

Состав материала, % (по объему)	Твердость <i>HRA</i>	Прочность на изгиб, МПа	Относительная плотность, %
TiCrB <sub>2</sub>	92	410	93
TiCrB <sub>2</sub> -5AlN	91	485	98
TiCrB <sub>2</sub> -10AlN	91	480	97
TiCrB <sub>2</sub> -30AlN	87	460	95
TiCrB <sub>2</sub> -63AlN	85	450	94
(TiCrB <sub>2</sub> -10AlN)-25NiAlCr	82	–	98
(TiCrB <sub>2</sub> -10AlN)-50NiAlCr	77	–	98

Полученные анодные поляризационные кривые для материалов системы TiCrB<sub>2</sub>-AlN (рис. 1), свидетельствуют, что даже небольшие добавки AlN в TiCrB<sub>2</sub> существенно повышают стойкость материала к анодному окислению. Самым стойким к этому виду коррозии оказался композит TiCrB<sub>2</sub>-63AlN.

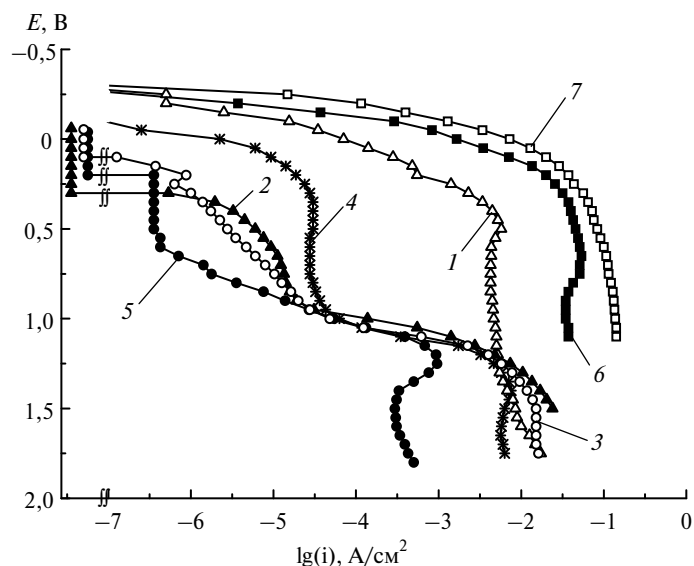


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые образцов в 3 %-ном растворе NaCl: TiCrB<sub>2</sub> (1), TiCrB<sub>2</sub>-5AlN (2), TiCrB<sub>2</sub>-10AlN (3), TiCrB<sub>2</sub>-30AlN (4), TiCrB<sub>2</sub>-63AlN (5), TiCrB<sub>2</sub>-10AlN-25NiAlCr (6), TiCrB<sub>2</sub>-10AlN-50NiAlCr (7); для данных материалов стационарный потенциал  $E_{ст} = -0,275$  (1),  $-0,061$  (2),  $-0,055$  (3),  $-0,095$  (4),  $-0,038$  (5),  $-0,265$  (6),  $-0,300$  (7).

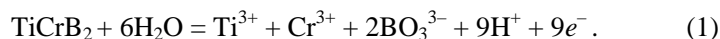
Логично было бы предположить, что с увеличением содержания неэлектропроводного нитрида алюминия анодная стойкость полученных композитов возрастает пропорционально. Однако анодное поведение материалов, содержащих 5, 10 и 30 % AlN, которые хотя и имеют похожий характер поляризационных кривых, все же не укладывается в пропорционально возрастающую схему. На начальной стадии анодного окисления наиболее высокую стойкость наблюдали на материале, содержащем 5 % AlN, тогда как при увеличении плотности тока незначительное преимущество имеет материал TiCrB<sub>2</sub>-10AlN (см. рис. 1).

Такая зависимость поляризационных кривых может быть связана со свойствами, составом и структурой полученных композиционных материалов. Вместе с высокой стойкостью к анодному окислению материалы, содержащие 5 и 10 % AlN, также имеют наиболее высокую плотность и прочность (см. табл. 1).

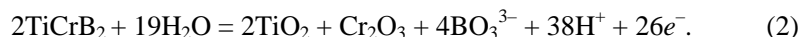
Вместе с керамическими материалами исследована коррозионная стойкость в 3 %-ном растворе NaCl керметов на основе диборида титана-хрома с добавкой сплава NiAlCr.

Анодные поляризационные кривые, полученные для материалов системы TiCrB<sub>2</sub>-AlN-NiAlCr, свидетельствуют, что введение в состав композита TiCrB<sub>2</sub>-10AlN металлической связки из сплава NiAlCr существенно повышает скорость анодного растворения материала. Особого различия между анодными поляризационными кривыми с 25 и 50 % NiAlCr не наблюдается, хотя материал TiCrB<sub>2</sub>-10AlN-25NiAlCr более устойчив к анодному растворению по сравнению с образцом TiCrB<sub>2</sub>-10AlN-50NiAlCr (см. рис. 1, кривые 6, 7). Такая зависимость поляризационных кривых свидетельствует о достаточно низкой стойкости сплава NiAlCr к анодному окислению (в первую очередь переходом в раствор электролита ионов Al<sup>3+</sup> с последующим образованием оксидной пленки сложного состава, которая при  $E \geq 0,2$  В пассивирует анодный процесс).

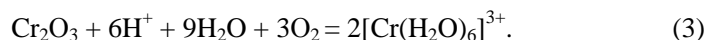
На основании хода кривой 1 (см. рис. 1) можно предложить следующий анодный процесс на поверхности TiCrB<sub>2</sub>: в диапазоне потенциалов  $E = -0,275-(+0,2)$  В в раствор переходят Ti<sup>3+</sup>-ионы и ионы борной кислоты, а при  $E = 0,2$  В и до  $E = 0,5$  В к ним присоединяется переход в раствор Cr<sup>3+</sup>-ионов:



После достижения потенциала  $E = 0,5$  В на поверхности образца наблюдается относительная ее пассивация с образованием оксидной пленки смешанного состава:



Анодные поляризационные кривые для образцов TiCrB<sub>2</sub>-5AlN, TiCrB<sub>2</sub>-10AlN, TiCrB<sub>2</sub>-30AlN, TiCrB<sub>2</sub>-63AlN (см. рис. 1, кривые 1-5) имеют сопоставимый ход, что объясняется неучастием в анодном растворении зерен нитрида алюминия, а электрохимические реакции, протекающие на их поверхностях, в целом идентичны реакциям (1) и (2). Анодное поведение образцов TiCrB<sub>2</sub>-5AlN и TiCrB<sub>2</sub>-10AlN практически одинаково, а образец TiCrB<sub>2</sub>-30AlN после участка относительной пассивации ( $E = 0,1-1,0$  В) снова начинает анодно растворяться (до  $E = 1,3$  В), что, очевидно, связано с растворением образованной по реакции (2) оксидной пленки с дальнейшим доокислением Cr<sup>3+</sup> до Cr<sup>6+</sup>. Визуально наблюдали появление слабой желтой окраски раствора электролита, видимо за счет образования гидроксокомплекса Cr<sup>6+</sup>:



Необходимо отметить, что образцы TiCrB<sub>2</sub>-5AlN, TiCrB<sub>2</sub>-10AlN и TiCrB<sub>2</sub>-63AlN имеют значительную область пассивности, достигающую (от стационарного потенциала) почти 0,40 В, что дает основание считать исследованные образцы абсолютно анодностойкими в реальных условиях эксплуатации, когда возникающая на поверхности изделий из изученных композитов разность потенциалов практически не превышает этой величины.

Учитывая, что электрохимические реакции протекают на поверхности материалов, важным является характер распределения фаз и их состав, размер зерен на поверхности, контактирующей с агрессивной средой.

С целью объяснения механизма анодного окисления разработанных материалов были исследованы микроструктура и состав поверхностей материалов до и после окисления. Материал  $\text{TiCrB}_2\text{-10AlN}$  имеет гетерофазную мелкодисперсную микроструктуру на основе зерен  $\text{TiCrB}_2$ , AlN, а также незначительного количества фазы на основе борида хрома и железа. Идентификацию составляющих фаз материала проводили с учетом результатов более подробных исследований структуры и свойств материалов системы  $\text{TiCrB}_2\text{-AlN}$  [3].

Микроструктура поверхности материала до окисления и после существенно отличаются (рис. 2). До испытаний на поверхности образца наблюдали соотношение фаз  $\text{TiCrB}_2$  (фаза 1) и AlN (фаза 3), близкое к соотношению фаз в исходном материале (90:10), включая незначительные выделения фазы на основе борида хрома и железа (см. рис. 2, а, белая фаза 2). После испытаний на поверхности образца количество фазы на основе AlN увеличилось в несколько раз (см. рис. 2, б, фаза 3), что в свою очередь существенно замедлило процесс анодного растворения. Такие структурные изменения произошли вследствие частичного растворения на начальной стадии менее стойких поверхностных слоев на основе соединений титана и хрома. Составы фаз на основе  $\text{TiCrB}_2$  (серая фаза 1) до и после испытаний практически идентичны, тогда как на поверхности фазы на основе AlN (черная фаза 3) после испытаний увеличилось количество Al, а также уменьшилось количество Ti (табл. 2). Учитывая, что  $\text{TiCrB}_2$  и AlN не взаимодействуют между собой, наличие Ti на поверхности зерен AlN объясняется формированием тонкой оксидной пленки на основе Ti ( $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ) на зернах AlN в процессе контакта с внешней средой.

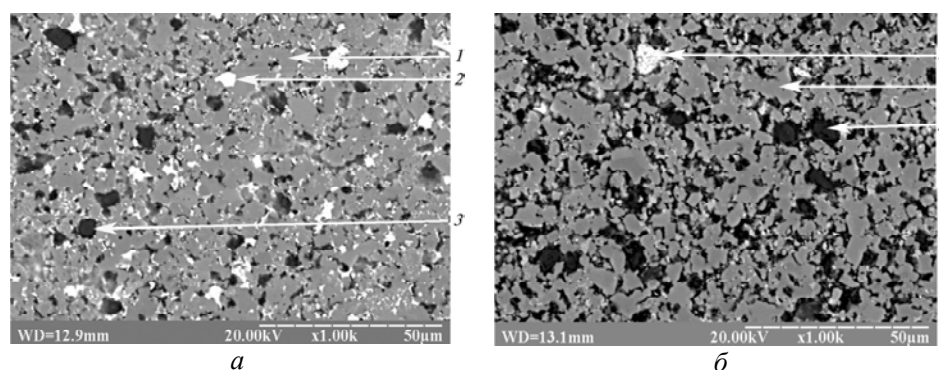


Рис. 2. Микроструктура исходного композиционного материала  $\text{TiCrB}_2\text{-10AlN}$  до (а) и после (б) анодного окисления в течение 72 ч: фазы  $\text{TiCrB}_2$  (1), на основе борида хрома и железа (2), AlN (3).

В результате анодного окисления материала  $\text{TiCrB}_2\text{-10AlN}$  на его поверхности протекают процессы растворения и формирования новых фаз. Структура поверхности материала после окисления имеет большее количество коррозионностойкой фазы на основе AlN с более четкими границами зерен. Учитывая, что в результате анодного окисления на поверхности образцов, как правило, формируются ультратонкие оксидные пленки [12, 14], то по количественному содержанию кислорода, полученному методом EDX-анализа, сложно судить о их составе и свойствах.

**Таблица 2. Химический состав основных фаз композиционного материала  $\text{TiCrB}_2\text{-10AlN}$  в исходном состоянии и после анодного окисления**

Элемент	1 (серая фаза)		2 (белая фаза)		3 (черная фаза)	
	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления
Ti	73,89	72,77	5,07	5,46	24,46	3,15
Cr	12,78	10,44	64,01	65,42	1,95	1,23
Al	–	0,42	0,62	0,35	63,43	82,14
Fe	–	0,10	25,16	22,14	–	1,76
O	13,30	16,28	5,15	6,63	10,16	11,71

Исходная поверхность материала  $\text{TiCrB}_2\text{-30AlN}$  имеет гетерофазную микроструктуру с равномерным распределением фаз на основе  $\text{TiCrB}_2$ , AlN и  $(\text{Fe,Cr})\text{B}$  (рис. 3, *а*, табл. 3). После анодного окисления микроструктура стала более мелкодисперсной с отсутствием четких межфазных границ (см. рис. 3, *б*). Также на поверхности каждой из фаз количество кислорода увеличилось более чем в 2 раза, а также содержится значительное количество титана (см. табл. 3). Такое распределение элементов вместе с микроструктурой поверхности свидетельствуют о формировании на поверхности материала пленки на основе оксида титана, которая частично растворяется.

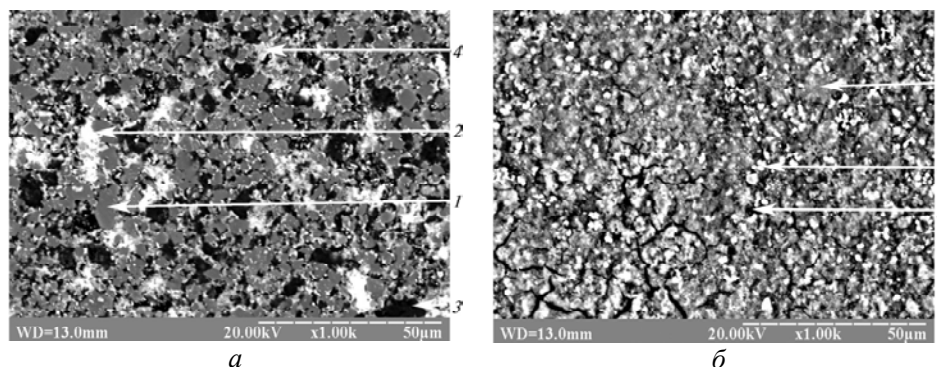


Рис. 3. Микроструктура исходного композиционного материала  $\text{TiCrB}_2\text{-30AlN}$  до (*а*) и после (*б*) анодного окисления в течение 72 ч: фазы  $\text{TiCrB}_2$  (1), на основе бориды хрома и железа (2), AlN (3), светлосерая фаза (4).

Материал  $\text{TiCrB}_2\text{-63AlN}$  характеризуется наиболее мелкодисперсной микроструктурой с равномерным распределением фаз (рис. 4, *а*). В процессе анодного окисления на поверхности материала происходит существенное изменение микроструктуры и перераспределение элементов (см. рис. 4, *б*). Серая фаза, близкая по составу к исходному  $\text{TiCrB}_2$ , отсутствует, а на поверхности всех полученных после анодного окисления фаз содержится значительное количество алюминия (табл. 4), что свидетельствует о неучастии AlN в окислительном процессе, что, в свою очередь, создает защитный слой из нитрида алюминия на поверхности  $\text{TiCrB}_2\text{-63AlN}$ .

Изучение состава и микроструктуры испытанных образцов показало, что значительное влияние на механизм анодного окисления имеет размер зерен, характер распределения и соотношение фаз в материале. В зависимости от

этого могут преобладать процессы растворения или пассивации на поверхности материала.

**Таблица 3. Химический состав основных фаз композиционного материала  $\text{TiCrV}_2\text{-30AlN}$  в исходном состоянии и после анодного окисления**

Элемент	1 (серая фаза)		2 (белая фаза)		3 (черная фаза)		4 (светло-серая фаза)
	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления	исходный материал
Ti	70,84	40,63	10,64	28,96	2,0	57,07	22,58
Cr	9,68	8,61	19,68	0,98	2,59	3,97	31,07
Al	0,52	5,62	2,73	0,36	91,28	3,50	11,66
Fe	0,78	8,80	39,48	3,43	2,76	3,46	16,01
O	18,19	36,34	27,47	66,27	1,36	32,0	18,68

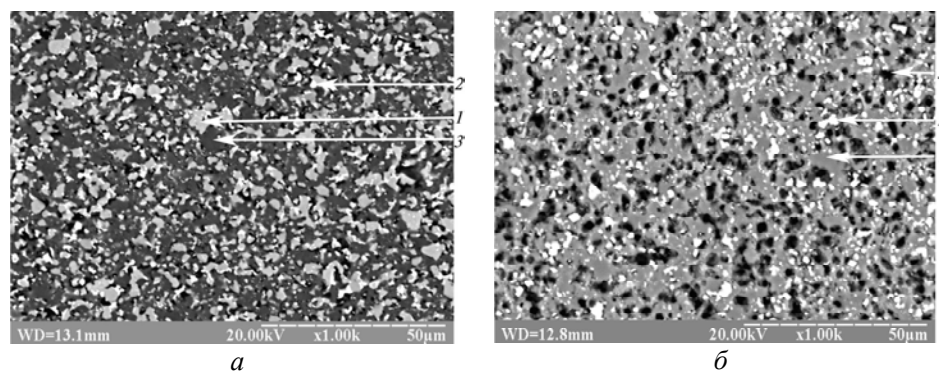


Рис. 4. Микроструктура исходного композиционного материала  $\text{TiCrV}_2\text{-63AlN}$  до (а) и после (б) анодного окисления в течение 72 ч: серая (1), белая (2) и черная (3) фазы.

**Таблица 4. Химический состав основных фаз композиционного материала  $\text{TiCrV}_2\text{-63AlN}$  в исходном состоянии и после анодного окисления**

Элемент	1 (серая фаза)		2 (белая фаза)		3 (черная фаза)	
	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления	исходный материал	после окисления
Ti	76,52	2,43	60,81	67,0	5,81	24,69
Cr	20,11	0,38	5,63	10,95	1,61	1,85
Al	1,10	93,29	29,56	9,46	85,43	62,83
O	2,27	3,90	4,0	12,58	7,15	9,63

### ВЫВОДЫ

Исследованиями коррозионной стойкости керамических материалов и керметов на основе  $\text{TiCrV}_2$  в 3 %-ном растворе NaCl установлено, что даже небольшие (5–10 %) добавки AlN в  $\text{TiCrV}_2$  позволяют существенно увеличить стойкость материала к электрохимической коррозии. Вместе с высокой стой-

костью к анодному окислению материалы, содержащие 5 и 10 % AlN, также имеют наиболее высокую плотность и прочность.

Изучение анодных поляризационных кривых, состава и микроструктуры окисленных образцов показало, что количество неэлектропроводной фазы AlN немонотонно влияет на коррозионную стойкость материала. Для получения композита с высокой устойчивостью к анодному окислению очень важной является возможность получения равномерного распределения фаз на поверхности материала, а также минимальный размер зерен в исходных компонентах. Это позволяет формировать защитные пленки, способные покрывать менее коррозионностойкие фазы гетерофазного материала.

Введение металлической фазы существенно снижает стойкость композиционного материала TiCrB<sub>2</sub>-10AlN к анодному окислению.

*Методом потенціодинамічних поляризаційних кривих вивчено корозійну стійкість керамічних матеріалів і керметів на основі дибориду титану-хрому в 3 %-ному розчині NaCl, що імітує морську воду. Вивчено склад і микроструктуру поверхонь окислених зразків. Невеликі добавки AlN (5–10 % (за об'ємом)) в TiCrB<sub>2</sub> дозволяють істотно збільшити корозійну стійкість матеріалу. Введення до складу матеріалу металевої зв'язки зі сплаву NiAlCr знижує стійкість матеріалу до анодного окиснення.*

**Ключові слова:** електрохімічна корозія, диборид титану-хрому, нітрид алюмінію, композиційний матеріал.

*The corrosion resistance of ceramic and cermet materials on the base of titanium-chromium diboride in 3 % NaCl solution (simulating marine water) by the method of potentiodynamic polarization curves has been studied. The composition and microstructure of oxidized samples surface have been investigated. Small additives of AlN (5–10 vol %) in TiCrB<sub>2</sub> can significantly increase the corrosion resistance of the material. The introduction of NiAlCr alloy binder reduces the material resistance to anodic oxidation.*

**Keywords:** electrochemical corrosion, titanium-chromium diboride, aluminum nitride, composite material.

1. Самсонов Г. В., Марковский Л. Я., Жигач А. Ф., Валяшко М. Г. Бор, его соединения и сплавы. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – 590 с.
2. Murthy T. S. R. Ch., Sonber J. K., Subramanian C. et al. Densification, characterization and oxidation studies of (TiCr)B<sub>2</sub> + 20 % MoSi<sub>2</sub> // Int. J. Ref. Met. Hard Mater. – 2013. – 37. – P. 12–28.
3. Коновал В. П., Шемет В. Ж., Грушко Б. и др. Структура и свойства композиционных материалов на основе диборида титана-хрома // Порошк. металлургия. – 2012. – № 7/8. – С. 69–78.
4. Ковальченко М. С., Очкас Л. Ф., Юрченко Д. З. Износостойкие твердые сплавы на основе двойного диборида титана-хрома // Там же. – 1982. – № 11. – С. 54–57.
5. Козина Г. К., Прихно И. Г., Дзыкович И. Я., Артемюк С. А. Наполнитель композиционного наплавочного износостойкого материала на основе диборида титана-хрома // Сверхтв. материалы. – 1996. – № 3. – С. 14–21.
6. Евтушок Т. М., Григорьев О. Н., Костенко А. Д. и др. Трибологические свойства композиционных материалов на основе тугоплавких соединений титана // Порошк. металлургия. – 2005. – № 7/8. – С. 58–64.
7. Пат. 25933 Україна. МПК С 22 С 29/00. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану / О. П. Уманський, А. Д. Панасюк, В. П. Коновал та ін. – Заявл. 27.04.2007; Опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13.
8. Коновал В. П. Коррозионная стойкость диборида титана-хрома и композиционного материала на его основе // Новые огнеупоры. – 2010. – № 10. – С. 35–39.
9. Panasyuk A. D., Lavrenko V. A., Desmaison-Brut M., Desmaison J. Development of AlN – (Ti,Cr)B<sub>2</sub> composite ceramics and study of their corrosion resistance in air up to 1550 °C // Key Eng. Mater. – 2002. – 206–213. – P. 1069–1072.



10. *Li L. H., Kim H. E., Kang E. S.* Sintering and mechanical properties of titanium diboride with aluminum nitride as a sintering aid // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2002. – **22**. – P. 973–977.
11. *Schneider S. V., Desmaison-Brut M., Gogotsi Y. G., Desmaison J.* Oxidation behavior of a hot isostatically pressed TiB<sub>2</sub>-AlN composite // *Key Eng. Mater.* – 1996. – **113**. – P. 49–58.
12. *Lavrenko V. A., Panasyuk A. D., Desmaison-Brut M. et al.* Kinetics and mechanism of electrolytic corrosion of titanium-based ceramics in 3 % NaCl solution // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2005. – **25**. – P. 1813–1818.
13. *Швец В. А., Лавренко В. А., Талаш В. Н., Френкель О. А.* Коррозионные свойства новых композиционных керамических материалов систем TiB<sub>2</sub>-TiN и TiB<sub>2</sub>-AlN в 3 % растворе NaCl // *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. випуск.* – 2000. – **1**, № 1. – С. 411–416.
14. *Францевич И. Н., Пилянкевич А. Н., Лавренко В. А., Вольфсон А. И.* Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита. – К.: Наук. думка, 1985. – 280 с.

Поступила 03.12.15