



## ТВЕРДЫЕ ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti–V–C, ОСАЖДАЕМЫЕ В ВАКУУМЕ

К. Ю. Яковчук, Г. Г. Дидикин, С. Е. Литвин, В. В. Грабин

Получены эрозионностойкие покрытия системы Ti–V–C с применением электронно-лучевой технологии испарения и конденсации в вакууме. Приведены результаты исследований химического состава, структуры и свойств твердых покрытий композиции Ti–V–C, осажденных из паровой фазы на поверхность стальных подложек.

Erosion-resistant coatings of Ti–V–C system were produced using electron beam technology of evaporation and condensation in vacuum. Results of investigations of chemical composition, structure and properties of solid coatings of Ti–V–C composition, deposited from vapor phase on the surface of steel substrates, are given.

*Ключевые слова:* электронно-лучевое испарение и осаждение; твердые эрозионностойкие покрытия

Материалы на основе композиции Ti–V–C благодаря высокой твердости представляют интерес для разработки твердых эрозионностойких покрытий, при этом технология их осаждения не должна сопровождаться перегревом защищаемой детали и изменением физико-механических свойств несущей подложки [1, 2]. Настоящие исследования направлены на получение путем электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме твердого эрозионностойкого покрытия системы Ti–V–C, осаждаемого на стальную или титановую подложку при температуре не выше 500 °С.

Предварительно выполнили ряд исследований структуры и микротвердости покрытий TiC, TiV<sub>2</sub>, V<sub>4</sub>C, осаждаемых в диапазоне температур подложки  $T_{\text{п}} = 150...800$  °С традиционным способом как электронно-лучевого испарения, так и ионно-активированного электронно-лучевого осаждения (с частичной ионизацией паровой фазы) [3]. Данная технология и соответствующее электронно-лучевое оборудование могут применяться для нанесения твердых эрозионно- и износостойких покрытий [4, 5], в том числе на детали газотурбинных двигателей [6].

Как отмечалось в работе [7], способом прямого электронно-лучевого испарения карбидов можно получать твердые покрытия на основе TiC при температуре подложки выше 700 °С. При  $T_{\text{п}} = 700$  °С твердость покрытий равна примерно 20 и возрастает до 24...25 ГПа при 1300 °С. При температуре подложки ниже 700 °С в покрытиях присутствуют TiC, а также свободные титан и углерод, что приводит к снижению эрозионно- и износостойкости осажденного слоя.

В работе [3] приведен сравнительный анализ покрытий на основе TiC, полученных путем прямого и ионно-активированного испарения с одновре-

менной ионизацией парового потока дуговым разрядом и подачей потенциала смещения на подложку. Показано, что ионизация парового потока и ускорение положительных ионов активировали процессы синтеза TiC на поверхности конденсации. При этом микротвердость покрытий в интервале температур подложки 450...700 °С оставалась постоянной —  $(21,0 \pm 1,0)$  ГПа. При адгезионных испытаниях на изгиб стальных и титановых (сплав ВТ1) образцов с покрытием TiC отслоения покрытия не обнаружено, вплоть до углов загиба 90° [3].

В работе [6] показана возможность получения твердых покрытий путем прямого испарения штабиков TiV<sub>2</sub> и конденсации паровой фазы на подложке при  $T_{\text{п}} > 650$  °С. При  $T_{\text{п}} = 700$  °С микротвердость *HV* составляла 22...24 и возрастала до 30...32 ГПа при  $T_{\text{п}} = 1300$  °С. Следует отметить, что покрытие имело двухфазную структуру TiV<sub>2</sub> + TiV.

Настоящая работа посвящена экспериментам по электронно-лучевому осаждению покрытий на основе TiV<sub>2</sub> при различных значениях температуры подложки и исследованию их эрозионно- и жаростойкости. Техника испарения аналогична изложенной в работе [3]. Первоначально наносили связующий слой титана толщиной 3...4 мкм путем испарения из тигля диаметром 25 мм с частичной ионизацией его парового потока дуговым разрядом и осаждением на подложку, находящуюся под электрическим потенциалом (смещением). Затем испарение титана прекращали и осуществляли прямое испарение таблетки TiV<sub>2</sub> с ионизацией парового потока со скоростью конденсации около 2 мкм/мин. Толщина покрытия составляла 20...23 мкм. Проведенный химический анализ показал некоторый избыток титана, по сравнению со стехиометрическим составом TiV<sub>2</sub>, поэтому можно предположить, что структура покрытия состояла из двух фаз — TiV<sub>2</sub> и TiV.

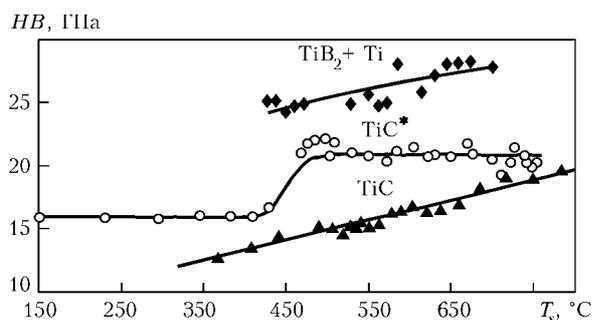


Рис. 1. Влияние температуры подложки и ионизации парового потока на микротвердость покрытий при электронно-лучевом осаждении: TiC — прямом; TiC\* — ионно-активированном; TiB<sub>2</sub> + Ti — прямом

На рис. 1 приведены зависимости микротвердости (измерения проводили на микрошлифах с поверхности) покрытий TiC и TiB<sub>2</sub> + Ti от температуры подложки при осаждении покрытия. Как видно, в интервале значений температуры подложки от 425 до 700 °С микротвердость покрытий TiB<sub>2</sub> + Ti выше, чем у покрытия TiC, и составляет 25... 28 ГПа.

Карбид бора при высоких значениях микротвердости (примерно 40 ГПа), подобно алмазу, характеризуется низкими значениями временного сопротивления при изгибе (или сжатии) и вязкости разрушения  $K_{1C}$ . В результате взаимодействия карбида бора с титаном по реакции  $B_4C + 5Ti = 4TiB + TiC$  получены особо твердые и вязкие твердосплавные изделия [8]. Установлено также, что в ходе спекания при 1900 °С порошков  $B_4C$  с добавкой 5... 7 мас. % титана формируются двухфазные керамические материалы  $B_4C + TiB_2$  с микротвердостью примерно 60... 70 ГПа и повышенным сопротивлением хрупкому разрушению [9].

Таким образом, способом прямого электронно-лучевого испарения смесей компонентов TiB<sub>2</sub> + TiC и TiB<sub>2</sub> + TiC +  $B_4C$  с одновременной ионизацией парового потока при температуре конденсации приблизительно 500 °С получено покрытие, отличающееся высокой твердостью (в соответствии с составом в правой части химической реакции приведенного уравнения).

Для определения оптимального соотношения компонентов в покрытии Ti-B-C, которое обеспечило бы его высокую твердость, проведены эксперименты по выбору состава испаряемых материалов. Способом холодного прессования из порошков TiC, TiB<sub>2</sub> и  $B_4C$  изготовлены соответствующие таблетки. Испарение таблеток осуществляли способом прямого электронно-лучевого испарения из тигля-лунки с ионизацией парового потока дуговым разрядом и подачей электрического потенциала смещения на подложку. Покрытия получали из расположенных одна на другой таблеток в различных комбинациях: TiC/TiB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>/TiC, TiC/ $B_4C$ ,  $B_4C$ /TiC. Скорость конденсации равнялась примерно 1,2... 1,5 мкм/мин, толщина покрытий составляла 30... 35 мкм.

Сравнительный анализ полученных покрытий показал наличие корреляции между микротвердостью и концентрацией бора: первая увеличивает

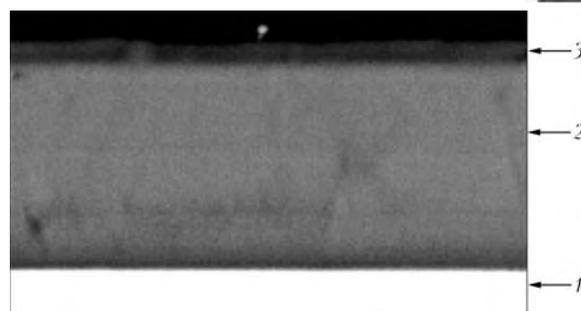


Рис. 2. Микроструктура (X2000) покрытия B + TiC + TiB<sub>2</sub>: 1 — подложка; 2 — слой B + TiC + TiB<sub>2</sub>; 3 — верхний твердый слой

ся по мере роста последней. В результате проведенных исследований выбраны составы материалов таблеток для получения многофазных покрытий системы Ti-B-C с максимальной твердостью 25... 30 ГПа при температуре осаждения около 500 °С. Материалом таблеток служили смеси TiB<sub>2</sub> + TiC, TiB<sub>2</sub> + B + TiC и TiB<sub>2</sub> +  $B_4C$  + TiC. Как следует из публикаций [10–12], в подобных двухфазных мелкокристаллических материалах можно достичь (при определенном содержании второй фазы) экстремумов таких свойств, как прочность, пластичность и вязкость разрушения.

Схема ионно-активированного электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме применительно к получению эрозионноустойчивых покрытий описана в работе [3]. В процессе испарения кольцевым электродом возбуждался дуговой разряд в паровом потоке между электродом и поверхностью ванны с подачей на подложку отрицательного электрического потенциала (смещения) около 200 В. Дополнительный водоохлаждаемый тигель, расположенный рядом с основным, обеспечивал возможность испарения материала подслоя независимым электронным лучом.

Подложками служили прямоугольные образцы размерами 20,0×15,0×2,4 мм, изготовленные из стали марки Ст3 и стали следующего состава мас. %: 24 Ni; 14,9 Cr; 2,4 Ti; 1,0 Mo, железо — остальное. Поверхность образцов шлифовали для обеспечения шероховатости поверхности  $R_a = 1,8... 2,2$  мкм. Блоки подложек (образцы) размерами 90×20 мм закрепляли в неподвижной оснастке и устанавливали над испарителями на расстоянии 300 мм. Методика подготовки поверхности образцов и техника экспериментов по осаждению, а также методика проведения исследования состава, структуры и свойств осажденных покрытий приведены в работе [3].

Абразивным материалом при испытании на эрозионную стойкость покрытий служил корунд  $\alpha-Al_2O_3$  с размером частиц 200 мкм. Диаметр потока частиц абразива составлял 3,5 мм, расход — 125 г/мин. Периодический осмотр и взвешивание образцов производили после расходования 0,5 кг абразива. Количество использованного в одном цикле испытаний абразива достигало 6 кг. Угол встречи потока абразива с поверхностью образцов составлял 90°, скорость вращения ротора равнялась 2350 об/мин, скорость частиц — 35 м/с.



## Содержание основных компонентов в испаряемых таблетках и покрытиях

Композиция	Химический состав, мас. %					
	таблетки (расчетный)			осажденного покрытия		
	В	С	Ti	В	С	Ti
35 % TiC + 65 % TiB <sub>2</sub>	20,2	7,0	72,8	13,0... 14,5	6,0... 7,0	78,5... 81,0
58,5 % TiB <sub>2</sub> + 10 % В + 31,5 % TiC	28,4	6,3	65,3	18,0... 20,2	7,2... 8,3	71,0... 74,5
25 % TiC + 5 % В <sub>4</sub> C + 70 % TiB <sub>2</sub>	25,7	6,1	68,2	16,5... 18,5	5,5... 6,9	74,6... 78,0
15 % TiC + 85 % TiB <sub>2</sub>	26,4	3,0	70,6	14,6... 15,9	3,1... 3,8	81,0... 81,6

Исходными материалами для испарения служили слитки титана диаметром 49,5 мм после электронно-лучевого переплава, а также таблетки (диаметр 35 мм, масса 20... 40 г, получены способом холодного прессования с последующим спеканием в вакууме при температуре 1050 °С) следующего состава, мас. %: 35TiC + 65TiB<sub>2</sub> (30 об. % TiC + 70 об. % TiB<sub>2</sub>), 31,5TiC + 10В + 58,5TiB<sub>2</sub>, 25TiC + 5В<sub>4</sub>C + 70TiB<sub>2</sub>, 15TiC + 85TiB<sub>2</sub>.

Выбор материала таблеток обусловлен необходимостью оптимизации химического состава покрытия, его микротвердости, микрохрупкости, а также технологичности прессования порошков для получения таблеток. Материал таблеток (15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>) предусматривает повышенное, по сравнению с композицией 30 об. % TiC + 70 об. % TiB<sub>2</sub>, содержание бора. Введение В<sub>4</sub>C в композицию TiC + TiB<sub>2</sub> предусматривало увеличение содержание бора и углерода, а также замену более дорогого и менее технологичного чистого бора в смеси TiC + В + TiB<sub>2</sub> карбидом бора В<sub>4</sub>C.

Кинетику окисления материалов исследовали в атмосферной среде с помощью термогравиметрического анализатора TGA7 фирмы «Perkin Elmer» высокой чувствительности (до 0,1 мкг) и скоростью нагрева/охлаждения 10 °С/мин в диапазоне значений температуры 20... 900 °С. Лодочку для загрузки образца изготовили из платины. Температуру определяли с помощью хромель-аломелевой термопары, предварительно прокалиброванной по ферромагнитному переходу по двум точкам Кюри. Калибровку весов производили по стандарту 100 мг. Управляли прибором при помощи компьютера и специализированного программного обеспечения с возможностью записи процесса окисления и обработки графических данных.

Образцами для исследования кинетики окисления служили фрагменты таблеток TiC и TiB<sub>2</sub> горячего прессования, отделенные от подложки покрытия (конденсаты) TiC, TiB<sub>2</sub>, 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> и 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub> толщиной 18... 35 мкм, а также графит марки МГ1. Исследуемый образец массой до 50 мг помещали в платиновую лодочку, нагревали до 150 °С со скоростью 10 °С/мин и выдерживали в течение 30 мин для удаления влаги. Кинетику окисления образцов изучали в процессе дальнейшего равномерного нагрева со скоростью 10 °С/мин до 900 °С и выдержкой при этой температуре в течение 2 ч.

Композиция 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> соответствует следующему химическому составу, мас. %: 20,2В, 7,0С, 72,8Ti (таблица). Покрытие композиции 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> получали путем прямого испарения таблетки 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> и осаждения парового потока на подложку с градиентом температуры по ее длине от 400 до 750 °С. Химический состав покрытия приведен в таблице. Микротвердость покрытия на микрошлифе в поперечном сечении составила 19 и 24 ГПа для температуры подложки соответственно 500 и 700 °С.

На покрытии, полученном при  $T_{\text{п}} = 400... 700$  °С, обнаружены микротрещины вокруг отпечатков алмазной пирамидки при нагрузке  $P \geq 100$  г; покрытие, осажденное при температуре выше 700 °С, не имело микротрещин при нагрузке до 150 г.

Таким образом, покрытие композиции 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub>, полученное при  $T_{\text{п}} \leq 500$  °С, имеет сравнительно низкую твердость. Твердость покрытий системы Ti–В–С увеличивается по мере роста концентрации бора. Повышения твердости покрытия предполагалось достичь путем увеличения концентрации бора в материале таблетки посредством добавки порошка чистого бора.

Таблетки композиции TiC + TiB<sub>2</sub> + В получили из порошков TiC, TiB<sub>2</sub> и бора в соотношении 58,5 % TiB<sub>2</sub> + 10 % В + 31,5 % TiC (таблица). Покрытие осаждали на стальную подложку с градиентом температуры вдоль подложки 300... 750 °С. Испарение таблеток осуществляли из тигля-лунки с ионизацией парового потока дуговым разрядом. Скорость осаждения составляла 2,0... 2,2 мкм/мин, толщина покрытия — 26... 29 мкм. Масса испаренного материала составляла 80... 85 % массы исходной таблетки.

На рис. 2 показана характерная микроструктура полученного покрытия. В таблице приведен его химический состав. Концентрации бора и углерода в покрытиях составляют соответственно 18,0... 20,2 и 7,2... 8,3 %.

Верхняя часть покрытия имеет повышенную микротвердость, по сравнению с центральной областью. Химический состав верхнего слоя покрытия следующий, мас. %: 20,5В, 10С, 69,5Ti. Концентрация углерода по толщине покрытия практически постоянна, кроме самой верхней зоны, и составляет 7,2... 7,7 % С, что, примерно, соответствует его исходной расчетной концентрации в материале таб-

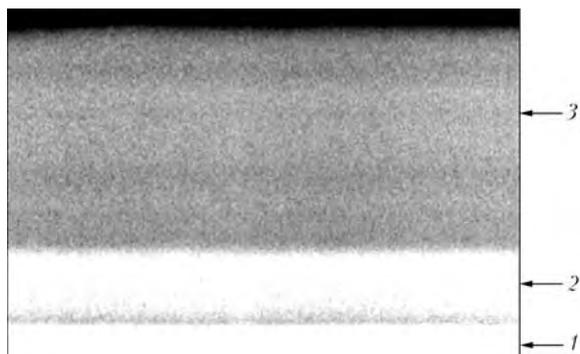


Рис. 3. Микроструктура (X2500) покрытия композиции 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>: 1 – подложка; 2 – связующий слой титана; 3 – твердый слой композиции 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>

летки с учетом присутствия свободного углерода в порошке карбида титана.

Микротвердость по толщине составляла 27 и 31 ГПа для покрытий, полученных соответственно при 500 и 650 °С. При нагрузках на индентор до 150 г микротрещин вокруг отпечатков на микрошлифе с поверхности покрытия не обнаружено.

С целью оптимизации состава материала для испаряемых таблеток и улучшения технологических характеристик порошка для их компактирования чистый бор в исходной смеси порошков композиции TiB<sub>2</sub> + В + TiC заменили карбидом бора В<sub>4</sub>С. В таблице приведен расчетный химический состав исходного порошка композиции 25 % TiC + 5 % В<sub>4</sub>С + 70 % TiB<sub>2</sub>.

Покрытие композиции 25 % TiC + 5 % В<sub>4</sub>С + 70 % TiB<sub>2</sub> с ионизацией парового потока дугowym разрядом осаждали на пластины размерами 20,0×15,0×2,4 мм из эталонной стали следующего состава, мас. %: 24Ni, 14,9Cr, 2,4Ti, 1,0Mo, железо – остальное при температуре подложки 500... 550 °С. Скорость конденсации парового потока составляла 2,0... 2,2 мкм/мин. Толщина связывающего слоя равнялась 3... 5 мкм, толщина покрытия – 15... 18 мкм. Испаряли примерно 80 % первоначальной массы таблетки.

Средняя концентрация углерода по толщине покрытия примерно равна его концентрации в материале таблетки; концентрация бора по толщине покрытия составляет 16,5... 18,5 % (таблица). Микротвердость покрытия в поперечном сечении достигает 25... 29 ГПа.

Испытания на адгезию покрытия к подложке показали, что первые трещины без отслоения покрытия появляются на образцах при угле загиба 3... 4°. При углах загиба 45... 60°, вплоть до разрушения стальных образцов, отслоения покрытия не зафиксировано. Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной адгезии покрытия к подложке.

Эрозионную стойкость стальных эталонных образцов с покрытием и без композиции TiC + TiB<sub>2</sub> определяли при угле атаки потока абразива 90°. Например, после воздействия 6 кг абразива (корунд α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) относительное количество уноса массы на 1 кг абразива для образцов с покрытием 25 % TiC + 5 % В<sub>4</sub>С + 70 % TiB<sub>2</sub> составило 0,07... 0,09 мг/кг, а для эталонных образцов без покрытия – 2,12 мг/кг. Расчет относительного уноса массы эталонного об-

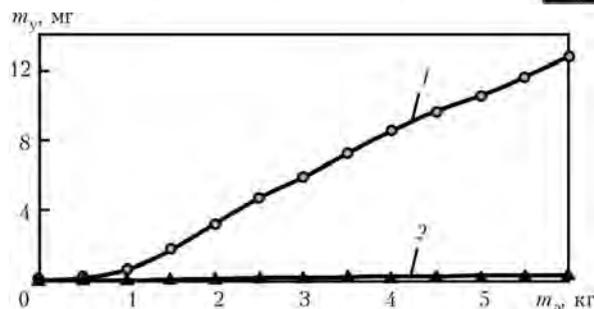


Рис. 4. Изменение массы эталонных стальных образцов без покрытия (1) и с покрытием системы TiC + TiB<sub>2</sub> (2) в процессе исследования эрозионной стойкости при угле атаки 90° (абразив – корунд Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); m<sub>yт</sub> – унос массы; m<sub>а</sub> – масса абразива

разца  $\Delta m_1$  к уносу массы покрытия  $\Delta m_2$  ( $\Delta m_1 / \Delta m_2$ ) показал следующие (средние) результаты: при угле атаки, равном 90°,  $\Delta m_1 / \Delta m_2 \sim 25... 30$ .

Материал таблетки композиции 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>, в сравнении с материалом композиции 25 % TiC + 5 % В<sub>4</sub>С + 70 % TiB<sub>2</sub>, имеет повышенное содержание бора и пониженное углерода (таблица). Покрытие композиции 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub> толщиной 15... 22 мкм осаждали на стальные подложки размерами 20,0×15,0×2,4 мм, нагретые до температуры 490... 500 °С. Подслой титана наносили при температуре подложки 490 °С. Испарение таблетки осуществляли с ионизацией парового потока дугowym разрядом; скорость конденсации составляла 1,2... 1,5 мкм/мин. Испаряли примерно 85 % первоначальной массы таблетки.

На рис. 3 приведена микроструктура покрытия, в нижней части которого располагается подслей титана. Толщина твердого слоя покрытия составляла 18 мкм.

В таблице приведен химический состав по толщине покрытия. Концентрация бора и углерода составили 14,6... 15,9 % В и 3,1... 3,8 % С (погрешность определения углерода и бора равнялась соответственно ± 0,2 и ± 0,5 %).

Таким образом, при испарении таблетки композиции 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub> концентрация углерода по толщине покрытия примерно соответствует его исходному содержанию в материале таблетки, концентрация бора в покрытии ниже исходной.

Микротвердость по толщине покрытия составляла 24... 26 ГПа (P = 50 г); тонкий (толщиной до 2 мкм) поверхностный слой покрытия (примерно 10 % С, 20,6 % В и ~ 70 % Ti) имел микротвердость около 30... 31 ГПа (P = 100 г).

Покрытие отличается повышенной трещиностойкостью, на микрошлифах с поверхности покрытия при нагрузке на индентор P = 150 г микротрещин вокруг отпечатков индентора не обнаружено.

Адгезия покрытия к подложке удовлетворительная. При загибе образцов с покрытием на угол 45... 60° отслоения покрытия не зафиксировано вплоть до разрушения стальных образцов. Трещины в покрытии располагались перпендикулярно длинной оси образца, появлялись при угле загиба 3... 4° и были вызваны продольной деформацией поверхностных слоев подложки.

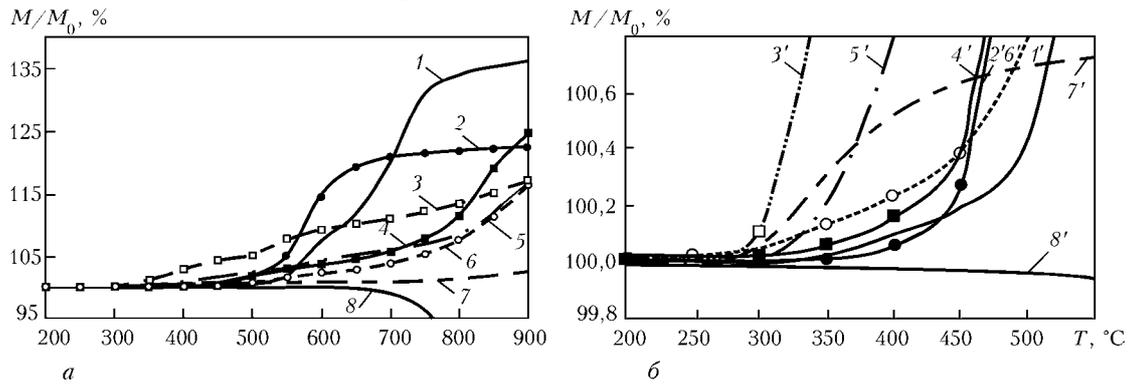


Рис. 5. Кинетика окисления на воздухе исходных материалов (сплошная линия); 1, 2, 4 — соответственно 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub> и TiC горячего прессования; 8 — углерода (графита МГ1); отделенных от подложки конденсатов (прерывистая линия (а); 3 — TiC; 5 — 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>; 6 — TiB<sub>2</sub>; 7 — 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub>; 1' — 8' (б) — эти же зависимости в измененном масштабе

Испытания на эрозионную стойкость покрытия 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>, осажденного при температуре подложки 500 °С, осуществляли при угле атаки 90°. На рис. 4 показана графическая зависимость уноса массы от количества израсходованного абразива для эталонного образца и образца с покрытием 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>. Образцы с покрытием подвержены значительно более слабой потере массы с тенденцией уменьшения уноса массы покрытия по мере увеличения количества израсходованного абразива.

Для образцов с покрытием основной унос массы происходит на первых килограммах израсходованного абразива и в дальнейшем процесс износа имеет тенденцию к затуханию: кривая зависимости уноса массы трансформируется в горизонтальную линию. Как показали металлографические исследования структуры поверхности покрытий до и после обработки абразивом, подобная закономерность уноса массы обусловлена исходной шероховатостью поверхности покрытия, при этом в начале испытаний происходит эрозионное «стирание» рельефных выступов на поверхности покрытия, затем процесс эрозионного разрушения замедляется.

В результате испытаний образцов после воздействия 6 кг абразива унос массы  $\Delta m_1$  для эталонных образцов составил 12,73 мг; для образцов с покрытием  $\Delta m_2$  — 0,30 мг. Относительный унос массы на 1 кг абразива для указанных образцов следующий: эталонных — 2,12; образцов с покрытием — 0,05 мг/кг.

Расчет относительного уноса массы эталонного образца  $\Delta m_1$  к уносу массы покрытия  $\Delta m_2$  ( $\Delta m_1/\Delta m_2$ ) дает следующие (средние) результаты: абразив — корунд  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, угол атаки 90°;  $\Delta m_1/\Delta m_2 \sim 42$  (6 кг абразива).

Для определения жаростойкости исследуемых покрытий изучали кинетику окисления на воздухе исходных материалов TiC, TiB<sub>2</sub>, 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> горячего прессования и отделенных от подложки конденсатов TiC, TiB<sub>2</sub>, 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub>, 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>.

На рис. 5 показана зависимость изменения отношения массы образцов  $M$  из различных материалов (относительно массы исходного образца  $M_0$  при комнатной температуре) в процессе окисления на воздухе. Процесс окисления образцов TiC\* (кри-

вая 4) и TiB<sub>2</sub> (кривая 2) горячего прессования начинается при значениях температуры соответственно 300 и 460 °С. Окисление конденсата TiC (кривая 3) начинается примерно при 300 °С, а конденсата TiB<sub>2</sub> (кривая 6) — при 280... 300 °С и заметно усиливается при значении температуры свыше 500 °С. Химический анализ покрытия TiB<sub>2</sub> показал избыток в нем титана (5... 7 %), по сравнению со стехиометрическим составом.

Окисление конденсатов 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> (рис. 5, б) протекает заметно слабее, чем конденсатов TiC, TiB<sub>2</sub> и 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>. На рис. 5 (кривая 5) приведены результаты исследования кинетики окисления конденсата 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>. Относительный прирост его массы после окисления выше, чем у образцов композиции 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub>. Полученные данные свидетельствуют о том, что в случае использования системы Ti-B-C можно получать покрытия с лучшей жаростойкостью, чем у TiC и TiB<sub>2</sub>.

### Выводы

1. Исследования химического состава, структуры и свойств покрытий системы Ti-B-C, осаждаемых с помощью ионно-активированной электронно-лучевой технологии испарения и конденсации в вакууме, показали, что покрытия состава 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>, осажденные при температуре стальной подложки  $T_n \leq 500$  °С, характеризуются высокими значениями адгезии, плотности, однородности химического состава, имеют микротвердость 24... 26 ГПа; микротвердость их поверхностного слоя составляет 29... 31 ГПа.

2. Наиболее высокой эрозионной стойкостью (более чем в 40 раз выше стойкости стальных образцов без покрытия при испытании частицами корунда под углом атаки 90°) отличается покрытие состава 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub>.

3. Покрытия системы Ti-B-C составов 35 % TiC + 65 % TiB<sub>2</sub> (30 об. % TiC + 70 об. % TiB<sub>2</sub>) и 15 % TiC + 85 % TiB<sub>2</sub> при окислении на воздухе в диапазоне рабочих температур изделий из сплавов на основе титана (до 500 °С) характеризуются жаростойкостью не ниже, чем жаростойкость покрытий TiC и TiB<sub>2</sub>.



Авторы выражают искреннюю благодарность научному сотруднику ИЭС им. Е. О. Патона, канд. техн. наук А. Г. Маринскому за помощь в проведении испытаний образцов на эрозионную стойкость.

1. Structure and properties of Ti-C-B composite thin films produced by sputtering of composite TiC-TiB<sub>2</sub> targets // E. A. Levashov, V. I. Kosayarin, L. M. Krukova et al. // Surface and coatings technology. — 1997. — 92, Iss. 1-2. — P. 34-41.
2. Choi D. J., Sing S. Y., Kim Y. J. (TiB + TiC) Hybrid titanium matrix composites shot sleeve for aluminum alloys die-casting // Advanced Materials Research. — 2007. — Vol. 15 — 17. — P. 31-235.
3. Твердые эрозионностойкие градиентные покрытия, осаждаемые в вакууме // К. Ю. Яковчук, В. В. Скрябинский, Г. Г. Маринский, Г. Г. Дидикин. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 2. — С. 17-22.
4. Movchan B. A. Functionally graded EB PVD coatings // Surface and coating technology. — 2002. — Vol. 149. — P. 252-262.
5. Pat. 6669989B2 США. Int. Cl.<sup>7</sup> C 23 16/00. Method for producing by evaporation a functionally graded coating with an outer ceramic layer on a metal substrate // B. A. Movchan, L. M. Nerodenko, Yu. E. Rudy. — Publ. 30.12.2003.
6. Патон Б. Е., Мовчан Б. А. Электронно-лучевая технология: покрытия и новые материалы // Проблемы сварки: Сб. ст. — Киев: Ин-т электросварки АН УССР, 1990. — С. 269-275.
7. Structure and Properties of Refractory Compounds Deposited by Electron Beam Evaporation // R. F. Bunshah, R. Nimmagadda, W. Dunford et al. // Thin Solid Films. — 1978. — Vol. 54. — P. 85-106.
8. Киффер Р., Безозовский Ф. Твердые материалы. — М.: Металлургия, 1968. — 384 с.
9. Макаренко Г. Н., Косолапова Т. Я., Марек Е. Ф. Износостойкие высокотемпературные материалы на основе карбида бора // Жаропрочность боридов и силицидов. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 92-97.
10. Watanabe T., Shoubu K. Mechanical properties of hot-pressed TiB<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> composites // J. Amer. Ceram. Soc. — 1985. — 68, № 2. — P. 34-36.
11. Movchan B. A., Lemkey F. D. Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials // Mater. Sci. Eng. — 1997. — A224. — P. 136-145.
12. Movchan B. A. Dimensional-Structural relationships of the strength of two-phase polycrystalline inorganic materials // Ibid. — 1991. — A138. — P. 109-121.

ПГ «МЦ ЭЛТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины», Киев  
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 26.11.2008

## НОВЫЕ КНИГИ

**Б. Е. Патон: Избранные труды. —**  
**Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2008. — 894 с.**

Сборник посвящен 90-летию со дня рождения академика НАН Украины Б. Е. Патона — выдающегося украинского ученого в области сварки, специальной электрометаллургии и материаловедения. Сборник состоит из семи разделов, охватывающих такие направления научной деятельности Б. Е. Патона, как сварка плавлением, сварка давлением, металлургия дуговой сварки, специальная электрометаллургия, сварные конструкции, космические технологии, а также применение сварки в медицине. Каждый раздел включает обзор работ, библиографию и подборку наиболее важных публикаций, в которых приведены результаты работ, выполненных впервые в мировой практике и внесших революционизирующее влияние на развитие ведущих отраслей промышленности.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.



**Борис Евгенович Патон /**  
**Вступ. ст. І. К. Походні, В. К. Лебедева;**  
**Укладачі: Л. В. Беляєва, Т. Б. Корольова, О. М. Лавріненко та ін. —**  
**Київ: Наук. думка, 2008. — 620 с.**

В книге освещены основные этапы жизни, научной, научно-организационной и общественной деятельности выдающегося украинского ученого в области сварки, металлургии и технологии металлов, материаловедения, общественного деятеля и талантливого организатора науки, академика Национальной академии наук Украины, Российской академии наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники УССР, дважды Героя Социалистического Труда СССР, Героя Украины, участника Великой Отечественной войны, ликвидатора аварии на ЧАЭС Бориса Евгеньевича Патона.

Указатель печатных работ знакомит читателя с научными трудами ученого. Для научных работников и всех, кто интересуется историей отечественной науки и техники.

