

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА WC–TiC–Co ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

¹Е. А. Крутилина, ¹В. И. Шиманский, ¹В. В. Углов,
¹М. И. Терешко, ²В. М. Асташинский, ²А. М. Кузьмицкий

¹Белорусский государственный университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

В работе исследованы механизмы эрозии поверхности композиционного твердого сплава на основе карбидов тугоплавких металлов WC–TiC–Co, который подвергался воздействию высокоэнергетических импульсных потоков плазмы. Выявлены основные механизмы массопереноса, которые заключаются в преимущественном испарении компонентов с поверхности вследствие ее нагрева до сверхвысоких температур. Показано, что с увеличением количества импульсов происходит увеличение величины уноса массы, которая достигает 17 мг/см² после семи последовательных импульсов плазмы при плотности поглощенной энергии 40–45 Дж/см².

Ключевые слова: эрозия поверхности, испарение, твердый сплав, плазменные потоки

SURFACE EROSION OF COMPOSITE WC–TiC–Co HARD ALLOY AFTER COMPRESSION PLASMA FLOWS IMPACT

¹E. A. Kruttilina, ¹V. I. Shymanski, ¹V. V. Uglov,
¹M. I. Tereshko, ²V. M. Astashynski, ²A. M. Kuzmitski

¹Belarusian State University,
Minsk, Republic of Belarus

²A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer
of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

The paper examines the mechanisms of surface erosion of a composite hard alloy based on refractory metal carbides WC–TiC–Co, which was exposed to high-energy pulsed plasma flows. The main mechanisms of mass transfer have been identified, which consist in the preferential evaporation of components from the surface due to its heating to ultra-high temperatures. It is shown that with an increase in the number of pulses there is an increase in

the amount of mass loss, which reaches 17 mg/cm² after seven consecutive plasma pulses at an absorbed energy density of 40–45 J/cm².

Keywords: surface erosion, evaporation, hard alloy, plasma flows

e-mail: soldatenko@tut.by

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие импульсных концентрированных потоков энергии, например, электронных или ионных пучков, а также высокоинтенсивных потоков плазмы, на материал сопровождается эрозией его поверхностных слоев, с которой связаны как положительные, так и отрицательные эффекты. С одной стороны, достаточно широко процесс эрозии используется для формирования покрытия, состоящего из материала распыляемой мишени, на поверхности заранее подготовленной подложки. С другой стороны, эрозия может приводить к удалению вещества с обрабатываемой поверхности по различным механизмам [1]. Последний эффект является скорее негативным последствием воздействия концентрированных потоков энергии. Так, например, может происходить снижение концентрации легирующего элемента в поверхностном слое многокомпонентного сплава, причем в случае различных механизмов эрозии для различных элементов может наблюдаться изменение их соотношения в приповерхностном слое, например, за счет избирательного испарения.

Согласно [1], основные механизмы тепловой эрозии условно можно разделить на две группы. К первой относятся те, которые приводят к переносу через поверхность отдельных атомов и молекул в результате протекания таких процессов, как испарение жидкости со свободной поверхности, сублимация, переход из конденсированного состояния в газ при давлениях выше критических значений; кипение жидкостей и гидродинамическое течение вещества. Вторая группа включает механизмы, предполагающие отделение микро- и макрочастиц от разогретой поверхности. Вклад того или иного механизма эрозии в унос массы обрабатываемого материала зависит от типа потока при высокоэнергетическом воздействии, его мощности, а также длительности импульса обработки.

Обработка материалов компрессионными плазменными потоками представляет собой уникальный способ модифицирования глубоких приповерхностных слоев в импульсном режиме, в котором достигается как высокая плотность энергии потока, так и большая длительность его существования. Эффективность данного метода была установлена для различных материалов. Такого рода обработка позволяет существенно модифицировать физико-химические и механические свойства поверхностных слоев, в частности, окислительную стабильность, микротвердость и износостойкость [2–6], что достигается за счет измельчения зеренной структуры до наноразмерного масштаба, формирования неравновесных фаз с повышенными механическими свойствами, перераспределения элементов по поверхности и глубине расплавленного слоя с одновременной гомогенизацией элементного состава в результате плавления и последующей сверхбыстрой кристаллизации. Плазменная обработка может оказать положительное влияние на срок эксплуатации режущих инструментов, изготовленных из твердых сплавов и пригодных для работы на высоких скоростях резания. Тем не менее, в этом случае повышается роль процессов, происходящих в жидкофазном состоянии, в том числе и результатов эрозии. Таким образом, целью данной работы являлось установление основных механизмов эрозии в композиционном материале – спеченном твердом сплаве WC–TiC–Co марки T15K6 в результате воздействия на него компрессионными плазменными потоками.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа механизмов эрозии в тугоплавких системах были выбраны образцы двухкарбидного спеченного TiC–WC–Co твердого сплава марки T15K6 (состав в вес. %: WC – 79; TiC – 15; Co – 6). Механизмы эрозии поверхности изучались как при прямом воздействии плазменного потока, так и при комбинированном воздействии, при котором на предварительном этапе на поверхность образцов осаждалось покрытие титана или циркония. Формирование покрытий происходило методом вакуумно-дугового осаждения, толщина покрытий составляла около 2 мкм.

Образцы подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков, генерируемых в магнетоплазменном компрессоре компактной геометрии. Плазменный поток формировался в остаточной атмосфере азота при давлении 400 Па. Напряжение на накопительной системе конденсаторов составляло 4,0 кВ, расстояние между поверхностью образца и электродами в компрессоре – 8 см. Выбранные режимы плазменного воздействия обеспечивали плотность поглощенной энергии 40–45 Дж/см². Обработка проводилась несколькими последовательными импульсами с интервалом 10 с, длительность каждого из которых составляла 100 мкс. В работе исследовалось влияние количества импульсов (1, 3, 5 и 7 импульсов) на процессы эрозии поверхности.

Исследуемые образцы композиционных материалов до и после обработки компрессионными плазменными потоками взвешивались на аналитических весах Radwag с точностью измерения массы ±0,05 мг. Полученные результаты уноса массы образца нормировались на единицу площади.

Особенности морфологии поверхности и внутренней структуры образцов после плазменного воздействия анализировались с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO1455VP, работающего при ускоряющем напряжении 20 кВ. Исследование фазового состава модифицированных образцов твердого сплава происходило на дифрактометре Ultima IV Rigaku в медном излучении (длина волны излучения 0,154178 нм) в геометрии Брэгга – Брентано.

Эрозия поверхности сплава после импульсного высокоэнергетического воздействия плазменным потоком может осуществляться за счет испарения атомов вещества со свободной поверхности образца. Для оценки величины испарения определялся поток атомов j (количество атомов с единицы поверхности в единицу времени) согласно следующему выражению [7]:

$$j = \alpha P(T) \sqrt{\frac{M}{4\pi k T}}, \quad (1)$$

где $P(T)$ – давление насыщенных паров над свободной поверхностью при температуре T ; M – масса испаряющихся атомов; α – постоянная, не зависящая от температуры испаряемого материала ($\alpha \sim 1$), k – постоянная Больцмана. Как видно из выражения (1), плотность потока испаряющихся атомов зависит от давления насыщенных паров, которое определялось по эмпирическому соотношению [8]:

$$\lg(P) = A - \frac{B}{T}, \quad (2)$$

где A и B – константы для данного материала. Ввиду того, что процесс испарения интенсивнее протекает из жидкой фазы, когда расплав представляет собой смесь различных элементов, оценка по формуле (1) проводилась для каждого металлического элемента (вольфрам, титан, кобальт, цирконий) по отдельности, после чего их вклад в общий унос массы учитывался аддитивно с коэффициентом, соответствующим атомной концентрации каждого конкретного элемента в материале. Необходимые значения постоянных величин A и B были взяты из справочника [8]. Далее приведены используемые в расчетах значения: вольфрам $A = 11,8$ и $B = 49300$ К в диапазоне температур 3289–5373 К,

титан $A = 9,136$ и $B = 22110$ К в диапазоне температур $2000\text{--}3533$ К, кобальт $A = 9,15$ и $B = 21400$ К в диапазоне температур $1767\text{--}3433$ К, цирконий $A = 9,5$ и $B = 26300$ К в диапазоне температур $2139\text{--}3973$ К.

Согласно (1) и (2) поток испаряющихся атомов зависит от температуры, которая достигается вследствие плазменного воздействия непосредственно на поверхности. Для определения температуры поверхностного слоя численно решалось одномерное уравнение теплопроводности, согласно методике, описанной в [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно экспериментальным результатам по измерению массы образцов (рис. 1) величина удаленной с поверхности образца массы зависит от количества последовательных импульсов воздействия. Увеличение количества импульсов плазменного воздействия от одного до семи приводит к повышению величины удаленной массы от 2 до 17 мг/см^2 .

Анализ эрозии поверхности TiC–WC–Co твердого сплава проводился не только при прямом воздействии плазменного потока на соответствующие образцы, но при комбинированном воздействии, включающем предварительное нанесение тонкого металлического (Ti или Zr) покрытия. Данная технология поверхностного легирования материалов широко описана в литературе [2–5] и используется для модифицирования структурно-фазового состояния приповерхностных слоев металлов и сплавов. Именно воздействия КПП при сочетании высокой плотности поглощенной энергии и большой длительности импульса позволяет достигнуть плавления тугоплавкого материала и осуществить его перемешивание с расплавленным покрытием. При этом изменяется элементный и фазовый составы модифицированного слоя, которые оказывают влияние на эрозию поверхности при последующих импульсах воздействия плазмы.

Как показали результаты эксперимента по определению массы образцов, после воздействия КПП снижение массы наблюдается для всех групп образцов TiC–WC–Co твердых сплавов (рис. 1), причем после одного импульса воздействия плазмы унесенная масса не отличается для прямого и комбинированного воздействия КПП. Различие становится заметным после трех импульсов. Следует отметить, что в случае комбинированного воздействия КПП, т. е. воздействия после предварительного нанесения на обрабатываемый материал покрытия титана или циркония, унос массы происходит интенсивнее по сравнению с таковым при прямом воздействии.

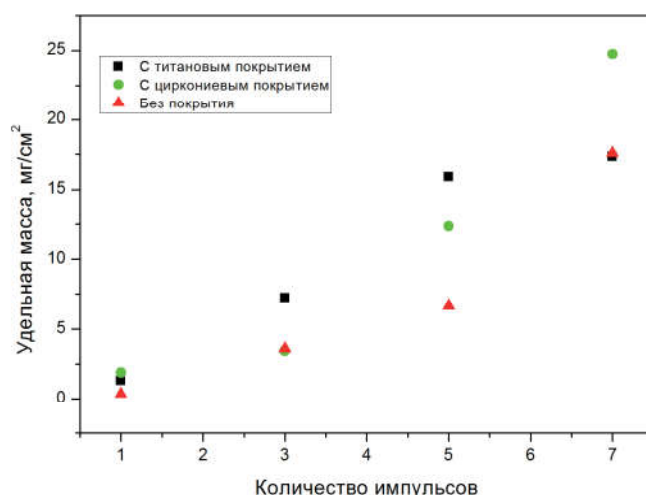
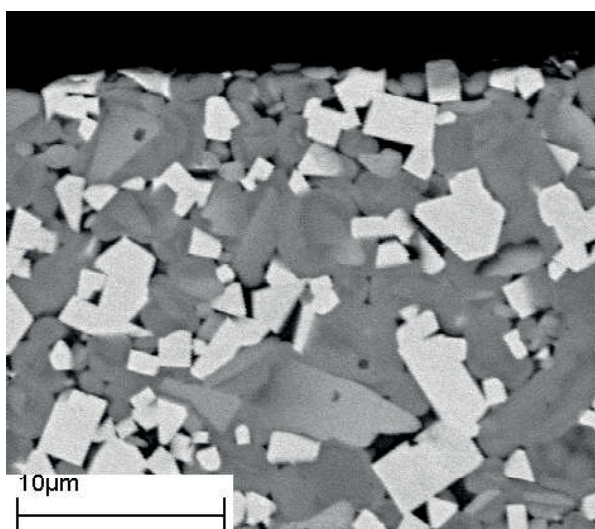


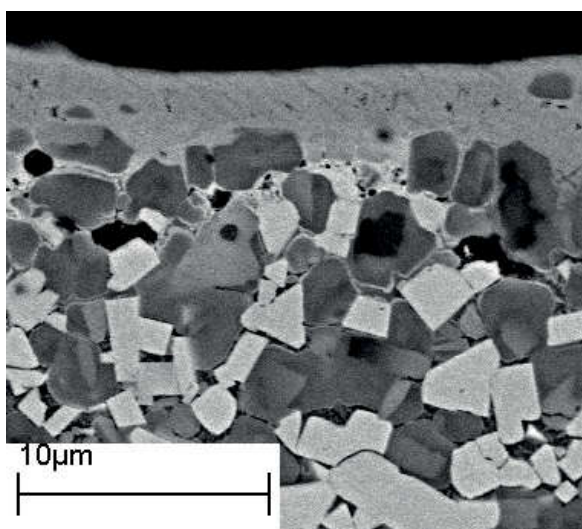
Рис. 1. Зависимость массы, удаленной с единицы поверхности TiC–WC–Co твердого сплава, от количества импульсов воздействия КПП

Для данного типа материала возможными механизмами эрозии являются испарение со свободной нагретой поверхности, гидродинамический разлет вещества, а также может реализовываться дополнительный механизм, связанный с отколом макрочастиц от обрабатываемого образца, находящегося в твердом состоянии. Первые два механизма должны реализовываться в жидком состоянии вещества. Ввиду этого, с целью обнаружения плавления поверхностных слоев исследуемых систем после воздействия КПП в соответствующих режимах, были выполнены исследования методом РЭМ (рис. 2).

Результаты растровой электронной микроскопии показывают, что при обработке образцов TiC–WC–Co сплава без предварительного нанесения покрытия наблюдается формирование модифицированного переплавленного слоя, состоящего преимущественно из твердого раствора (Ti,W)C толщиной приблизительно 4 мкм. В отличие от исходного состояния, представляющего собой совокупность отдельных частиц карбидов TiC и WC с размерами до 1–2 мкм, в модифицированном слое происходит их плавление и гомогенизация элементного состава. В модифицированном слое также обнаруживаются темные области правильной сферической формы со средним размером 2–3 мкм и локализованные преимущественно на границе расплавленной части. Эти образования могут представлять собой поры, сформированные в результате выделения свободного углерода из расплавленных карбидов. Поверхностный переплавленный слой образцов TiC–WC–Co сплава с титановым покрытием характеризуется менее однородной структурой по сравнению с образцами без покрытия, и его толщина составляет около 2 мкм. В этом случае также образуется модифицированный слой, состоящий преимущественно из твердого раствора (Ti,W)C, который помимо повышенной концентрации титана содержит включения сложного состава на основе титана, кобальта и углерода. В случае воздействия КПП на сплав с предварительно нанесенным покрытием Zr наблюдаются аналогичные структурные изменения: формируется приповерхностный модифицированный слой толщиной около 2 мкм, состоящий из твердого раствора (Ti,W,Zr)C, который, однако, обладает более однородной структурой по сравнению с модифицированным слоем с покрытием титана. Модифицированные слои в сплавах TiC–WC–Co с покрытиями титана и циркония также характеризуются наличием внутренних сферических пор с размерами 2–3 мкм. Таким образом, можно сделать вывод о формировании многоэлементного расплава на поверхности образцов сплава TiC–WC–Co после воздействия КПП.



а



б

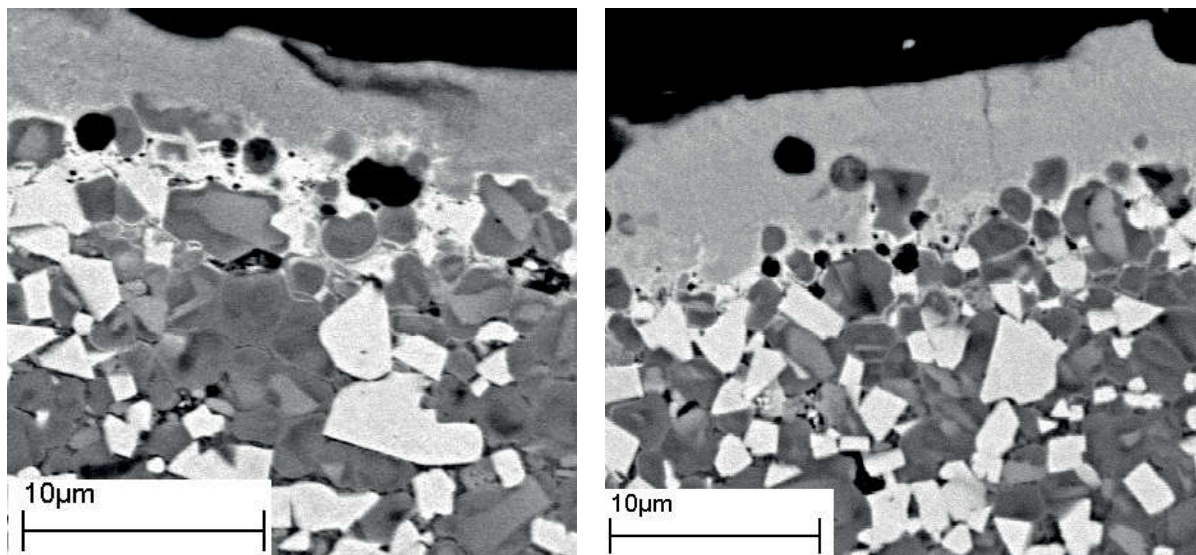


Рис. 2. РЭМ-изображения поперечного сечения исходного TiC–WC–Co твердого сплава (а) и после обработки пятью импульсами КПП сплава без покрытия (б), с покрытием Ti (в), с покрытием Zr (г)

В табл. 1 приведены значения уноса массы сплавов на основе TiC–WC–Co после воздействия КПП, полученные экспериментально, а также рассчитанные согласно выражению (1) за счет испарения компонентов с поверхности.

Табл. 1

Величина экспериментальной ($\Delta m_{\text{эксп}}$) и расчетной ($\Delta m_{\text{исп}}$) удаленной массы с единицы поверхности за один импульс плазменного потока для сплавов TiC–WC–Co

	T15K6	T15K6 / Ti	T15K6 / Zr
$\Delta m_{\text{исп}}, \text{ г/см}^2$	0,019	0,057	0,049
$\Delta m_{\text{эксп}}, \text{ г/см}^2$	0,0004	0,0013	0,0020

Как можно заметить, экспериментальные значения удаленной массы на порядок меньше величин, соответствующих расчетным данным с учетом исключительно механизма эрозии поверхности за счет испарения. Такое расхождение расчетных данных с экспериментальными можно объяснить сложностью учета неравновесных процессов, происходящих при взаимодействии КПП с веществом, а также формированием ударно-сжатого слоя, после рассеивания которого возможно осаждение на поверхность образцов испарившихся элементов [6]. Температура плавления / кристаллизации твердого сплава определяется температурой плавления / кристаллизации наиболее тугоплавкого его компонента – твердого раствора (Ti,W)C и составляет 3330 К [9]. В связи с этим время существования расплавленного состояния составляет несколько десятков мкс. В этом случае испаряющиеся атомы с поверхности и переходящие в ударно-сжатый слой, успевают переосадиться обратно на поверхность, и к моменту времени, когда происходит рассеяние ударно-сжатого слоя, температура поверхности существенно понижается и не способствует интенсивному испарению ее атомов. Этим и объясняется повышенное значение удаленной массы, полученное из соотношения (1), которое не учитывает описанный выше механизм возврата атомов на поверхность. Некоторое увеличение величины уноса массы для твердого сплава с титановым и с циркониевым покрытием

обусловлено меньшими температурами плавления титана (1941 К) и циркония (2128 К) по сравнению с компонентами твердого сплава.

Предположение о возможности протекания эрозии посредством гидродинамического разлета вещества было сделано по результатам исследования методом РЭМ (рис. 4). На изображениях можно заметить области «отрыва» расплава от обрабатываемой поверхности. Однако при дальнейшей оценке роли указанного механизма был сделан вывод о малой вероятности его протекания, так как расплавы тугоплавких элементов обладают достаточно высокой вязкостью [10]. Кроме того, ввиду различия температур плавления и кристаллизации фазовых составляющих твердого сплава Т15К6 расплав сильно неоднороден, в нем наблюдаются включения твердой фазы, что дополнительно повышает вязкость расплава. Согласно полученным результатам можно сделать вывод о том, что испарение со свободной поверхности расплава является основным механизмом уноса массы в результате воздействия КПП.

Кроме того, для спеченного твердого сплава TiC–WC–Co необходимо учитывать механизм эрозии поверхности, связанный с отколом макрочастиц из твердой фазы после кристаллизации. Реализация данного механизма возможна только в том случае, когда в приповерхностном слое обрабатываемого образца генерируются сильные волны сжатия и растяжения с механическим напряжением, превышающим предел прочности на растяжение, составляющий 824 МПа [11] для сплава TiC–WC–Co марки Т15К6. Численная оценка термического упругого напряжения проводилась по формуле:

$$\sigma_{th} = \frac{E\alpha}{1-\mu} \Delta T, \quad (3)$$

где σ_{th} – термические упругие напряжения, возникающие за счет разницы температур между облученной и необлученной сторонами, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, α – температурный коэффициент линейного расширения, $\Delta T = T_1 - T_2$; T_1 – температура на поверхности образца через 200 мкс после начала действия импульса, T_2 – температура на границе модифицированного слоя через 200 мкс после начала действия импульса.

Расчет значения термоупругих напряжений по соотношению (3) составил 2,5 МПа, что указывает на незначительную долю уноса массы таким механизмом. Согласно полученным результатам можно сделать вывод о преобладании испарения со свободной нагретой поверхности расплава как основного механизма эрозии поверхности твердого сплава TiC–WC–Co в результате воздействия КПП.

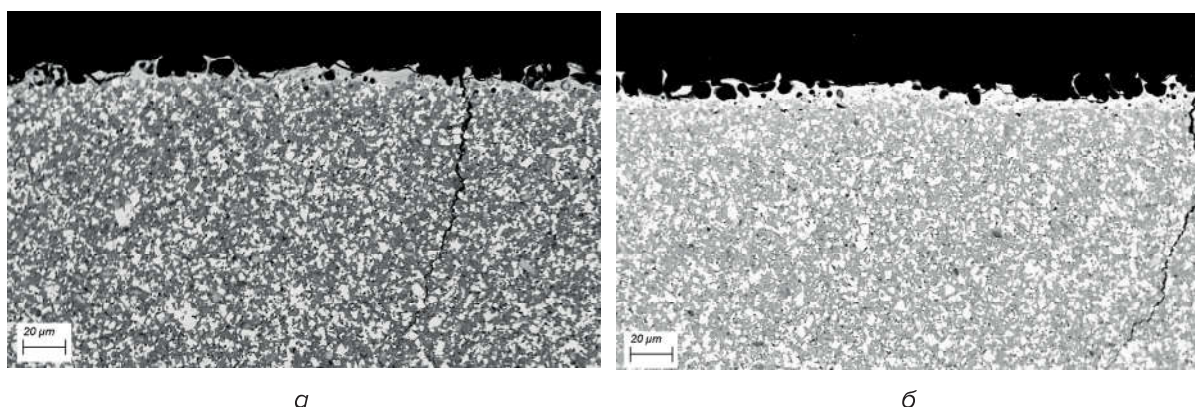


Рис. 4. РЭМ-изображения поперечного сечения твердого сплава TiC–WC–Co с покрытием титана (а) и циркония (б) после обработки КПП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования было установлено, что эрозия поверхностных слоев композиционного материала WC–TiC–Co в результате воздействия компрессионных плазменных потоков протекает преимущественно за счет испарения со свободной поверхности. Интенсивность эрозии зависит как от состава композиционного материала, так и способа высокоэнергетического импульсного воздействия (исследование проводилось для твердого сплава T15K6 и твердого сплава с покрытием Ti и Zr). При предварительном нанесении покрытия и последующем воздействии КПП количество унесенной массы повышается. Для таких тугоплавких материалов главным механизмом эрозии выступает атомное испарение со свободной поверхности за счет высокотемпературного нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блейхер, Г. А. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц / Г. А. Блейхер, В. П. Кривобоков. – Новосибирск : Наука, 2014. – 248 с.
2. Модификация поверхностных слоев твердого сплава T15K6 с покрытиями из титана и циркония под воздействием компрессионных плазменных потоков / В. В. Углов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 4. – С. 81–87.
3. Фазообразование в твердом сплаве на основе карбидов вольфрама и титана в системе Mo покрытие – твердый сплав при воздействии компрессионных плазменных потоков / В. В. Углов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 2. – С. 18–25.
4. Структура и фазовый состав системы «хром-кремний», модифицированной сильнотоочными электронными пучками / В. В. Углов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 1. – С. 77–83.
5. Формирование твердых растворов в системе «цирконий – титан» под воздействием компрессионных плазменных потоков и сильнотоочных электронных пучков / Н. Н. Черенда [и др.] // Перспективные материалы. – 2012. – № 3. – С. 16–23.
6. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – 248 с.
7. Жвавый, С. П. Численное моделирование динамики фазовых переходов в CaTe, инициируемых наносекундным излучателем эксимерного лазера / С. П. Жвавый, Г. Л. Зыков // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 6. – С. 652–655.
8. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность. – СПб. : Профессионал, 2006. – 1464 с.
9. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams / V. V. Uglov [et al.] // Surf. and Coat. Tech.. – 2012. – Vol. 206. – Pp. 2972–2976.
10. Kaptay, George. A unified equation for the viscosity of pure liquid metals / George Kaptay // International Journal of Materials Research. – 2005. – Vol. 96, no. 1. – Pp. 24–31.
11. Новые материалы и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. / под общей редакцией Е. А. Памфилова. – Брянск : БГИТУ, 2017. – Вып. 26. – 115 с.

REFERENCES

1. Bleikher G. A., Krivobokov V. P. *Eroziya poverkhnosti tverdogo tela pod deistviem moshchnykh puchkov zaryazhennykh chastits* [Erosion of solid surface under the action of powerful beams of charged particles]. Novosibirsk, Nauka Publ., 248 p. (in Russian).
2. Uglov V. V., Kuleshov A. K., Krutilina E. A., Astashinskij V. M., Kuz'mitskij A. M. *Modifikatsiya poverkhnostnykh sloev tverdogo splava T15K6 s pokrytiyami iz titana i tsirkoniya pod vozdeistviem kompressionnykh plazmennyykh potokov* [Modification of surface layers of T15K6 carbide alloy with titanium and zirconium coatings under the influence of compression plasma flows]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya* [Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques], 2013, no. 4, pp. 81–87. (in Russian).

3. Uglov V. V., Kuleshov A. K., Soldatenko E. A., Astashinskii V. M., Kuz'mitskii A. M. Fazoobrazovanie v tverdom splave na osnove karbidov vol'frama i titana v sisteme Mo pokrytie – tverdyi splav pri vozdeistvii kompressionnykh plazmennyykh potokov [Phase formation in hard alloy on the basis of tungsten and titanium carbides in the Mo coating – hard alloy system under the influence of compression plasma flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Inorganic Materials: Applied Research Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2012, no. 2, pp. 18–25. (in Russian).
4. Uglov V. V., Kvasov N. T., Petukhov Yu. A., Koval' N. N., Ivanov Yu. F., Teresov A. D. Struktura i fazovyi sostav sistemy «khrom – kremnij», modifitsirovannoi sil'notochnymi elektronnyimi puchkami [Structure and phase composition of the chromium-silicon system modified by high-current electron beams]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya* [Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques], 2012, no. 1, pp. 77–83. (in Russian).
5. Cherenda N. N., Shimanskij V. I., Uglov V. V., Astashinskij V. M., Kuz'mitskij A. M., Koval' N. N., Ivanov Yu. F., Teresov A. D. Formirovanie tverdykh rastvorov v sisteme «tsirkonij – titan» pod vozdeistviem kompressionnykh plazmennyykh potokov i sil'notochnyykh elektronnykh puchkov [Formation of solid solutions in the “zirconium – titanium” system under the influence of compression plasma flows and high-current electron beams]. *Perspektivnye materialy* [Journal Prospective Materials], 2012, no. 3, pp. 16–23. (in Russian).
6. Uglov V. V., Cherenda N. N., Anishchik V. M., Astashinskii V. M., Kvasov N. T. *Modifikatsiya materialov kompressionnymi plazmennymi potokami* [Modification of materials by compression plasma flows]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2013, 248 p. (in Russian).
7. Zhvavyi S. P. Chislennoe modelirovanie dinamiki fazovykh perekhodov v CaTe, initsiirovemykh nanosekundnym izluchatelem eksimernogo lazera [Numerical modeling of the dynamics of phase transitions in CaTe initiated by a nanosecond excimer laser emitter]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2006, vol. 40, no. 6, pp. 652–655. (in Russian).
8. Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Obshchie svedeniya. Stroenie veshchestva. Fizicheskie svoystva vazhneishikh veshchestv. Aromaticheskie soedineniya. Khimiya fotograficheskikh protsessov. Nomenklatura organicheskikh soedinenij. Tekhnika laboratornykh rabot. Osnovy tekhnologii. Intellektual'naya sobstvennost' [New Handbook of Chemist and Technologist. General information. Structure of substances. Physical properties of the most important substances. Aromatic compounds. Chemistry of photographic processes. Nomenclature of organic compounds. Technique of laboratory works. Fundamentals of technology. Intellectual property]. St. Petersburg, Professional Publ., 2006, 1464 p. (in Russian).
9. Uglov V. V., Kuleshov A. K., Soldatenko E. A., Koval' N. N., Ivanov Yu. F., Teresov A. D. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams. *Surf. and Coat. Tech.*, 2012, vol. 206, pp. 2972–2976.
10. Kaptay, George. A unified equation for the viscosity of pure liquid metals. *International Journal of Materials Research*, 2005, vol. 96, no. 1, pp. 24–31.
11. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. Sbornik nauchnykh trudov* [New Materials and Technologies in Mechanical Engineering. Collected Scientific Papers]. Bryansk, Bryansk State Technological University Of Engineering Publ., 2017, vol. 26, 115 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 13.06.2024 г.