

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО КАРБИДАМИ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К., Николаенко В.Л. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)
Тел./Факс: +375 (017) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *This paper deals with the laser melting of Al_2O_3 -SiC, Al_2O_3 - B_4C , Al_2O_3 -TiC plasma sprayed coatings. After laser melting, metastable phase γ - Al_2O_3 transforms into stable phase α - Al_2O_3 in coatings. The melting layer becomes much denser and, hence, its hardness has been greatly developed. Furthermore, the increase in hardness of the melting layers is almost independent of coating type and generally increases with the laser energy density. Finally, it has been found that the introduction SiC, B_4C , TiC to the Al_2O_3 matrix and the laser melting can improve the wear resistance of ceramic coatings.*

Key words: wear, alumina, coating, plasma spraying, the laser melting, wear resistance

Введение. Керамические покрытия, благодаря своим достоинствам (теплостойкости, химической устойчивости), дано зарекомендовали себя в качестве теплозащитных, коррозионностойких покрытий. Однако в последнее время покрытия на основе оксидной керамики все чаще применяются для защиты поверхностей трения от износа, особенно в тяжелых условиях эксплуатации (высокие температуры и агрессивные среды), там, где применение металлических покрытий невозможно [1]. К сожалению, в большинстве случаев область их применения остается ограниченной абразивным износом или трением при невысоких статических нагрузках, поскольку при наличии ударов происходит скалывание покрытий, обусловленное высокой хрупкостью оксидных керамических материалов.

Износостойкость керамических покрытий можно повысить как оптимизацией процесса плазменного напыления, увеличением плотности покрытий и уменьшением пористости, так и оптимизацией состава и созданием гетерогенных структур. Из литературных данных [2] известно, что гетерофазные керамические материалы, в которых в качестве вторых фаз используются тугоплавкие соединения в виде карбидов SiC, TiC, B_4C , обладают более высоким уровнем механических свойств, чем однофазные. Высокая износостойкость композиций, состоящих из матрицы оксида алюминия с мелкодисперсными включениями карбидов, может быть достигнута за счет оптимального сочетания высокой твердости, оказывающей прямое влияние на коэффициент трения [3], а также способности противостоять распространению трещин и разрушению покрытия в процессе работы.

Для получения покрытий с низкой пористостью и улучшения эксплуатационных характеристик керамических покрытий на основе оксида алюминия довольно часто применяют дополнительную высокотемпературную обработку с применением лазерного излучения [4-6]. Однако, основное внимание в данных работах уделено снижению пористости и повышению содержания фазы α - Al_2O_3 , а не наличию включений в виде твердых карбидов и их влиянию на свойства покрытий. Поэтому исследование структурных и фазовых превращений при плазменном напылении порошков оксида алюминия, модифицированного карбидами, а также при последующей лазерной обработке покрытий остается важной и актуальной темой.

В данной работе выполнена оценка влияния параметров лазерной обработки, таких как скорость перемещения и диаметр луча лазера, на структуру и свойства плазменных композиционных покрытий на основе порошков оксида алюминия, модифицированных карбидами бора, кремния и титана.

Методика исследований. В качестве исходных порошков использовали оксид алюминия по ТУ 6-09-426-75 с размером частиц 40-60 мкм, и порошки карбидов SiC, TiC, B₄C с размером частиц 16 -20 мкм, подвергнутые последующей термодиффузионной обработке. Покрытия наносили методом плазменного напыления на подготовленные дробеструйной обработкой образцы с предварительно нанесенным Ni-Al подслоем с использованием установки УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазматроном ПП-25 на режимах: I=420 А, U=85-90 В, L= 90 мм, p=0,6 МПа. Толщина слоя 0,6 мм. Оплавление осуществляли непрерывным лазером Комета-2 мощностью N = 1000 Вт при диаметре пятна лазерного луча от d₁=6,0 · 10⁻³ м до d₂ = 8,0 · 10⁻³ м со скоростями перемещения V₁= 600 мм/мин, V₂ = 800 мм/мин, V₃ = 1000 мм/мин.

Сравнительные экспресс-испытания проводили на установке торцевого трения при линейной скорости вращения истирающего диска 5-15 м/мин и нагрузке (P) 30–300 Н, материал контртела твёрдый сплав ВК-6. Величина износа определялась глубиной лунки с помощью профилографа-профилометра модели 252.

Обсуждение результатов. Исследование структуры покрытий после плазменного напыления показало, что образец с покрытием Al₂O₃-B₄C имеет наиболее плотную и мелкозернистую структуру с незначительным количеством пор (рис.1(б)). Пористость покрытий составила 2-4%. Карбидные включения равномерно распространены по всей толщине покрытия.

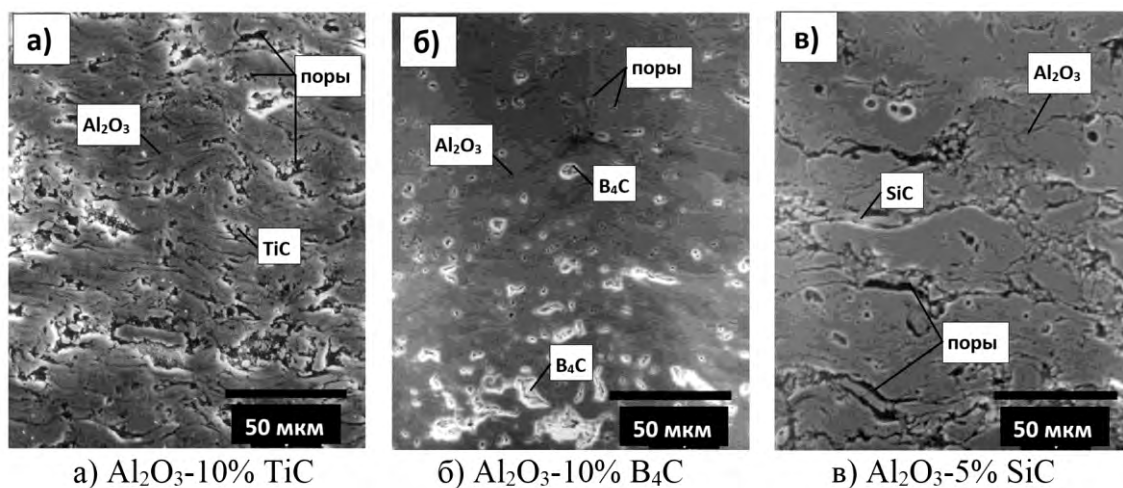


Рис. 1. Микроструктура керамических покрытий, модифицированных карбидами

В отличие от данных композиций покрытия Al₂O₃-TiC имеют значительную пористость 9-12% и несплошности (рис.1(а)). Указанные дефекты являются, вероятно, результатом недостаточной температуры прогрева частиц в плазменной струе или низкой скорости при подлете к основанию.

С целью снижения пористости и повышения эксплуатационных характеристик полученных покрытий проведена их лазерная обработка на указанных режимах. Необходимо отметить, что при лазерной обработке керамических покрытий на основе

оксида алюминия, модифицированного карбидами, сталкиваются с технологическими вопросами, связанными с незначительным интервалом между температурой плавления ($T_{пл} = 2045^{\circ}\text{C}$) и кипения ($T_{кип} = 2980^{\circ}\text{C}$) оксида алюминия по сравнению с карбидами [6], приводящими к полному испарению покрытий в результате неправильного подбора режимов обработки. Изменение толщины покрытия за счет его частичного испарения наблюдалось при воздействии лазера на исходные покрытия Al_2O_3 без карбидных включений при $d_1 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м и скорости перемещения $V_2 = 800$ мм/мин. В поверхностном слое материала основы под покрытием Al_2O_3 в результате лазерного воздействия формируется зона термического воздействия толщиной 50-100 мкм.

При исследовании микроструктуры покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ таких областей не выявлено. Для полного проплавления покрытий, содержащих карбиды с более высокой температурой плавления, чем оксид алюминия, необходимо производить обработку на более жестких режимах путем уменьшения диаметра и скорости перемещения луча. Установлено, что по мере увеличения плотности мощности лазерного излучения происходит уменьшение площади, занимаемой темными зонами, соответствующими порам в покрытии. Наименьшая пористость может быть получена для покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ (рисунок 2) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ при режимах лазерной обработки $N = 1000$ Вт, $V_1 = 600$ мм/мин при $d_2 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м, а для покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ при $V_1 = 600$ мм/мин и $d_1 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует более высоким значениям плотности мощности, необходимым для проплавления карбидных включений TiC, отличающихся более высокой температурой плавления, которая составляет 3067°C .

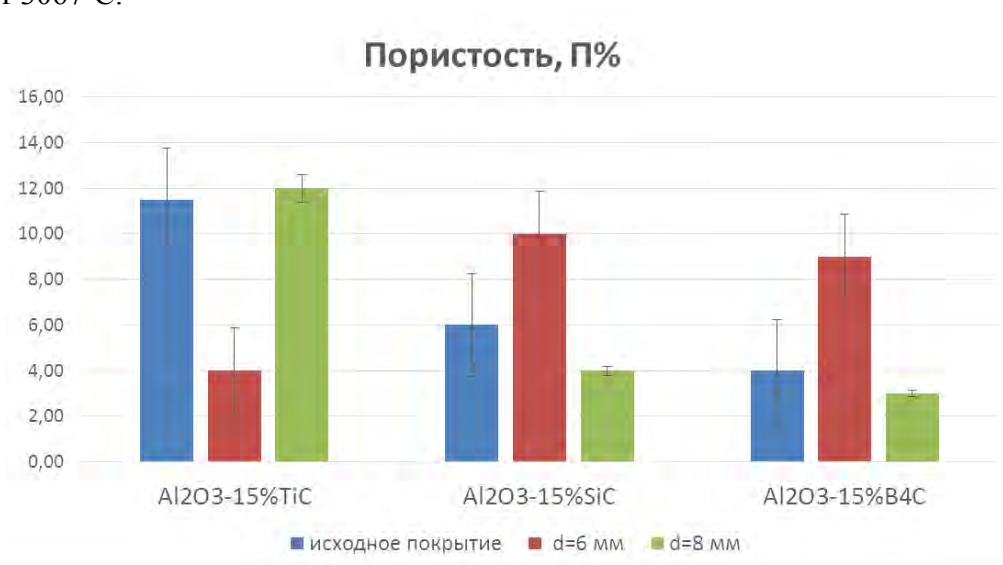


Рис. 2. Пористость покрытий после лазерной обработки со скоростью перемещения луча $V_1 = 600$ мм/мин

Снижение пористости покрытий считается положительным результатом, поскольку ее наличие оказывает существенное влияние на механические свойства, снижая тем самым твердость, когезионную прочность и коррозионную стойкость при проникновении агрессивной среды через открытые поры к металлическому основанию.

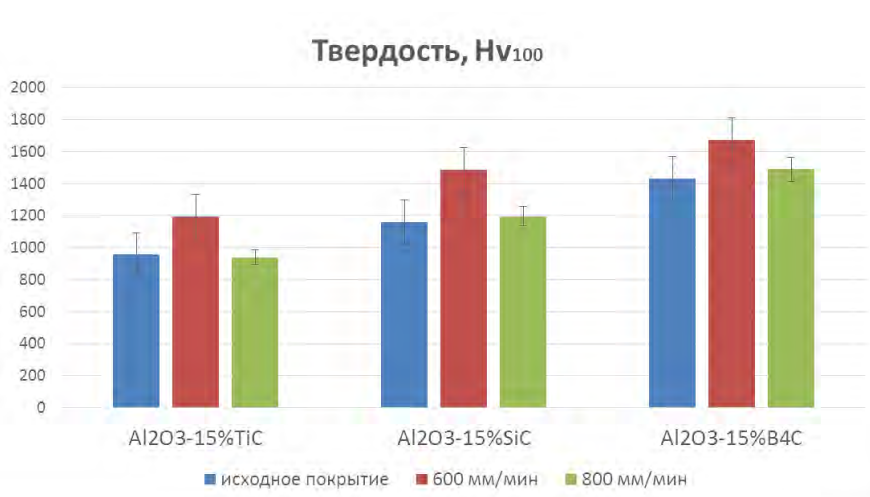


Рис.3. Микроструктуры покрытий после лазерной обработки со скоростью перемещения луча $V_1 = 600$ мм/мин при $d_2 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м

Твердость покрытий Al₂O₃-SiC, Al₂O₃-TiC, Al₂O₃-B₄C возрастала в результате лазерной обработки при $V_1 = 600$ мм/мин (рисунок 3). Аналогичный эффект отмечается после лазерного оплавления покрытий на основе Al₂O₃ в работе [7,8], в которой показано, что при уменьшении скорости перемещения луча лазера происходит повышение микротвердости с 700-1000 HV_{0.3} до 1100-1800 HV_{0.3}. Увеличение мощности лазерного излучения при обработке наноструктурных плазменных покрытий Al₂O₃-13%TiO₂, также способствует повышению твердости [9].

Как показывают данные рентгеноструктурного анализа, повышение твердости при лазерном оплавлении покрытий на данных режимах происходит за счет фазового превращения γ - Al₂O₃ → α - Al₂O₃. Фазовый состав покрытий представлен в виде диаграмм на рисунке 4.

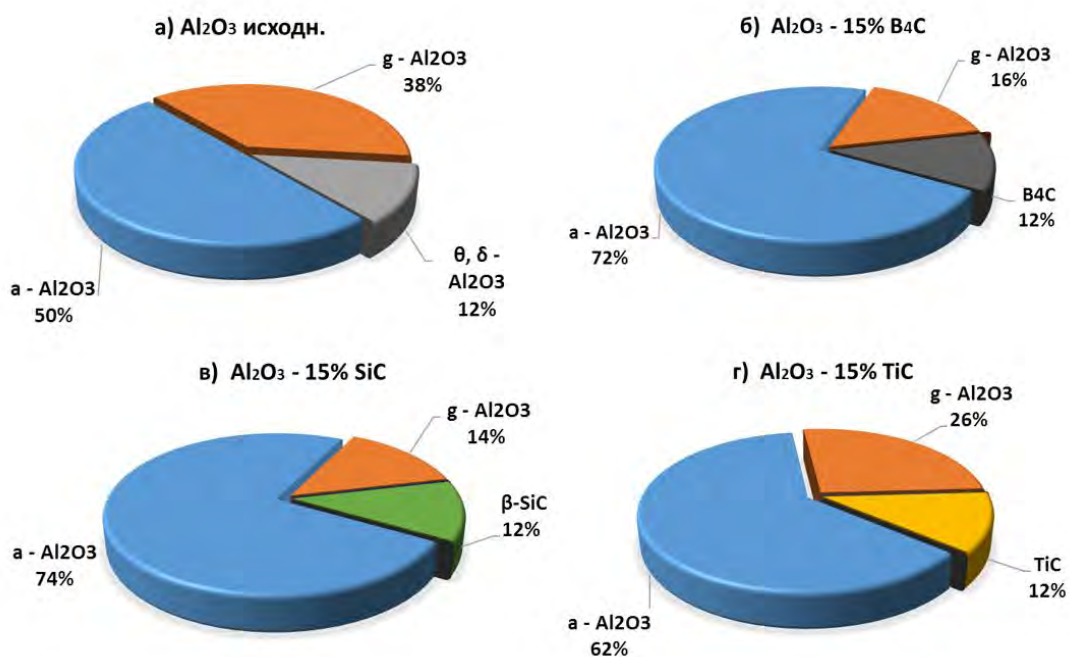


Рис. 4. Фазовый состав покрытий после лазерной обработки со скоростью перемещения луча $V_1 = 600$ мм/мин при $d_2 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м

При увеличении скорости перемещения луча лазера сокращается время пребывания в зоне нагрева. Кратковременное термическое воздействие на скоростях 800 мм/мин и 1000 мм/мин не обеспечивает условия для формирования высокотемпературной фазы α - Al_2O_3 и преобладающей является γ - Al_2O_3 .

Вопрос о преобладании той или иной фазы Al_2O_3 в покрытиях после лазерной обработки остается открытым и во многом зависит от условий нагрева и остывания под действием лазерного излучения [4,5,8], однозначно установлено что фазовый переход γ – α сопровождается усадкой покрытия, вызванной разницей в плотности указанных фаз. В работе [7] отмечено, что данное явление способствует повышению защитных свойств оплавленных лазером покрытий.

При определении оптимальных режимов лазерной обработки критерием оптимизации может является износостойкость покрытий [4]. Проведенные экспресс-испытания покрытий на основе оксида алюминия, модифицированного карбидами, и подвергнутых последующей лазерной обработке на различных режимах представлены в виде диаграмм величины износа на рисунке 5.

Исследование влияния режимов лазерного излучения на эксплуатационные характеристики покрытия проводили при мощности $N = 1000$ Вт, диаметре пятна лазерного луча $d_1 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м и $d_2 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м, скорости перемещения $V_1 = 600$ мм/мин.

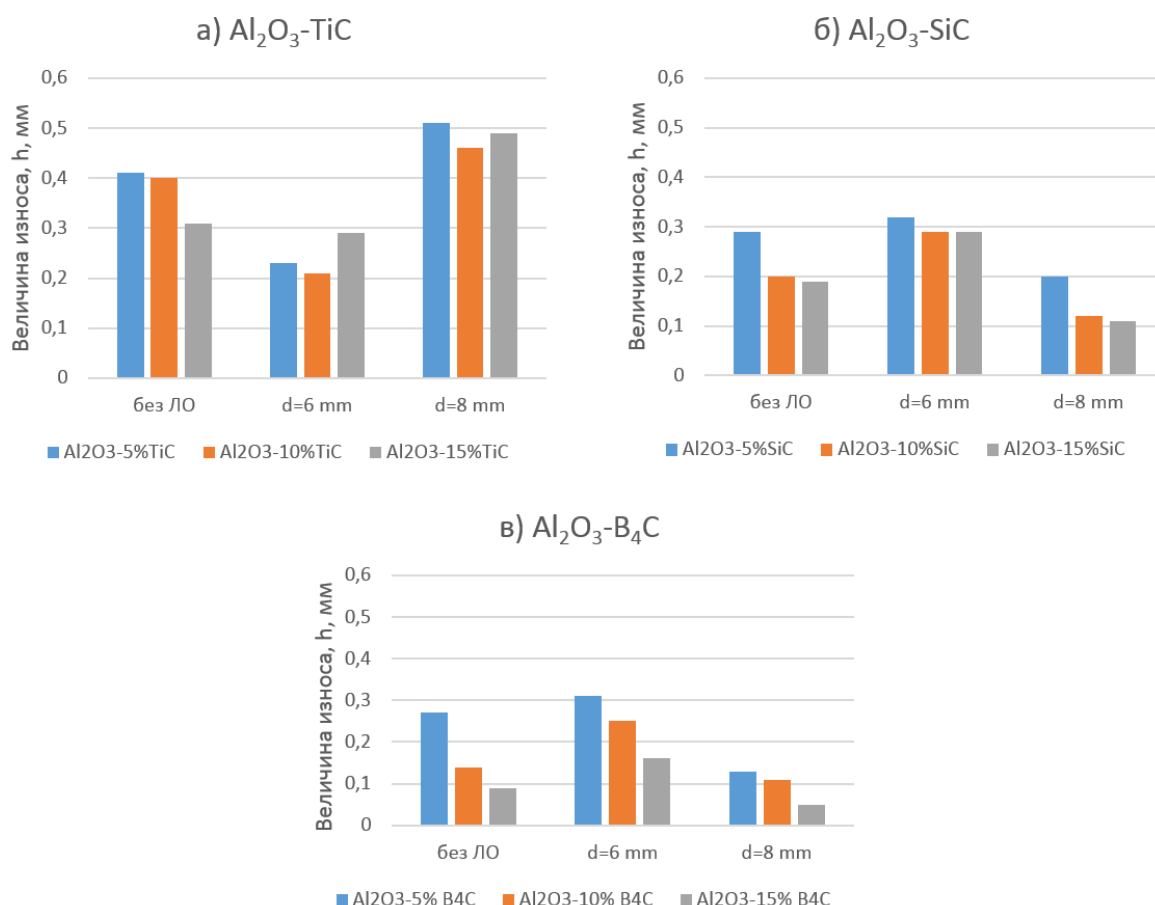


Рис. 5. Величина износа керамических покрытий при трении без смазочного материала при нагрузке 80 Н, время испытаний 30 мин в зависимости от режимов лазерной обработки (ЛО)

Установлено, что наименьшую величину износа имеют покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-V}_4\text{C}$, что установлено в ранних работах [10] и объясняется образованием пленок вторичных дисперсных структур на поверхности трения, а также покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ с содержанием карбида кремния в количестве 10%, для которых характерно повышение прочности, снижение хрупкости при сохранении высокой микротвердости.

Вывод. Лазерная поверхностная обработка плазменных покрытий является перспективным методом термической обработки, который может использоваться для получения однородных поверхностных слоев с повышенной износостойкостью. Наиболее оптимальными режимами лазерной обработки для покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-V}_4\text{C}$ являются мощность $N = 1000$ Вт, скорость перемещения луча лазера $V_1 = 600$ мм/мин при диаметре $d_2 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м, а для покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ при $V_1 = 600$ мм/мин и $d_1 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует более высоким значениям плотности мощности.

Список литературы. 1. Rainforth W. M. The wear behaviour of oxide ceramics-A Review //Journal of materials science. – 2004. – Т. 39. – №. 22. – С. 6705-6721. 2. Гогоци Ю.Г., Ковальченко А.М., Коско И.А., Ярошенко В.П. Фрикционное взаимодействие керамики на основе неметаллических тугоплавких соединений со сталью//Трение и износ.- 1990.- 11, № 4.- С.660-667. 3. Кацура А. А., Семенов А. П. Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда. – Наука, 1974. 4. Szkodo M., Bień A., Antoszkiewicz M. Effect of plasma sprayed and laser re-melted Al_2O_3 coatings on hardness and wear properties of stainless steel //Ceramics International. – 2016. – Т. 42. – №. 9. – С. 11275-11284. 5. Yuanzheng Y. et al. Laser remelting of plasma sprayed Al_2O_3 ceramic coatings and subsequent wear resistance //Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Т. 291. – №. 1-2. – С. 168-172. 6. Митрофанов А. А., Чащин Е. А., Балашова С. А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения //Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – №. 1. – С. 103-105. 7. Iwaszko J. et al. Remelting treatment of plasma sprayed coatings //Inżynieria Materiałowa. – 2004. – Т. 25. – №. 3. – С. 597-600. 8. Li C. et al. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13 wt.\% TiO}_2$ coatings on titanium alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Т. 506. – №. 1. – С. 356-363. 9. Wang Y. et al. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coatings at different laser power //Surface and Coatings Technology. – 2010. – Т. 204. – №. 21-22. – С. 3559-3566. 10. Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К. Триботехнические характеристики плазменных покрытий на основе оксида алюминия, модифицированных карбидами, при трении по стали// Сб. трудов XXIV-ой межд. науч.-техн. конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 11 – 17 сентября 2017. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 80-84.