

## ОБРАБОТКА ЛАЗЕРОМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А.,  
Оковитый В. В., Володько А. С.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
*Асташицкий В. М.*

Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072,  
Минск, Беларусь

**Введение.** Методика оптимизации процесса лазерной обработки основана на необходимости получения упрочненных аморфных или нанокристаллических структур покрытий, являющихся объектом исследований. Для этого наиболее применимы жесткие режимы работы, основой оптимизации которых служит максимально возможная степень локального оплавления напыленных порошковых композиций с отсутствием признаков теплового разрушения на их поверхности. Количество центров кристаллизации (аморфизации) материала, из которых при сверхбыстром охлаждении развиваются упрочненные структуры, напрямую зависит от степени кратковременного оплавления композиции, содержащей различные фазы (в том числе тугоплавкие) [1]. В качестве технологического оборудования мы применяли твердотельный квазистационарный лазерный излучатель, позволяющий обрабатывать покрытия импульсами длительностью до 4 мс, полученными в режиме свободной генерации. Важной составляющей данной технологии является среда, в которой осуществляется обработка. Наиболее целесообразно применение азота для защиты от окисления, при этом затрудняется теплоотвод от обрабатываемого материала, что актуально при образовании упрочненных наноструктурных и аморфных фаз [2–4]. Для процесса оптимизации жестких режимов лазерной обработки по упомянутому критерию желательнее исследовать влияние на степень оплавления напыленных композиций плотности мощности импульса лазерного излучения. При варьировании плотности мощности учитывали так же, что форма импульсов излучения твердотельных лазеров при режиме свободной генерации определяется формой импульсов тока накачки [5]. Совместно с плотностью мощности оптимизировали так же суммарное количество импульсов в пятне обработки. Этот технологический параметр влияет на толщину обработанных слоев покрытия [3]. Для износостойких покрытий необходимо получение при напылении повышенных когезионной и адгезионной прочности. Следовательно, суммарное количество импульсов обязано обеспечивать оплавление и уплотнение полученных покрытий по всей толщине, что и будет способствовать получению упрочненных нанокристаллических или аморфных структур за счет факторов, о которых упоминалось выше. Оценку степени оплавления и уплотнения проводили при исследовании шлифов поперечного сечения обработанных покрытий на металлографическом микроскопе “MeF - 3” фирмы “Reichert” (Австрия) и на анализаторе изображения AutoScan. При изучении свойств полученных композиций при обработке на оптимальных режимах, создание упрочненных нанокристаллических и аморфных

структур соответствовало возрастанию усредненной микротвердости у композиционных материалов по сравнению с необработанными плазменными покрытиями [1–5].

**Оптимизация обработки плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики.** Согласно примененного методического подхода при изменении технологических параметров изменяли плотность мощности излучения и суммарное количество импульсов в пятне обработки. В таблице 1 показаны результаты оптимизации плотности мощности. Оптимальные плотности мощности излучения ( $W$ ) при обработке композиций  $Al_2O_3-TiO_2-12\%$  ( $MoS_2-Ni$ ) полученным методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах  $(4,0 - 6,5) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а для  $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ ( $MoS_2-Ni$ ), полученных методом СВС, находятся в пределах  $(3,5-6,0) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Это подтверждается динамикой возрастания степени оплавления обработанных композиций и изменения пористости, желаемого уменьшения которой (по критерию оптимизации) при  $W$  больше  $6,0$  и  $6,5 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> не происходит. Снижение эффективности теплоотдачи можно объяснить значительным содержанием в полученных покрытиях тугоплавкой оксидной фазы (более 80 %), которая соответственно препятствует возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. При дальнейшем увеличении  $W$  наблюдаются нежелательные тепловые разрушения поверхностей обрабатываемых материалов. Вид такого характерного разрушения с образованием “кратеров” показан на рисунке 1. Кроме плотности мощности импульсного излучения оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного луча в пятне обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий (0,5–0,6 мм). При металлографическом анализе нетравленных шлифов установлено, что необходимое количество импульсов для полученных покрытий из порошков  $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ ( $MoS_2-Ni$ ), полученных методом СВС составляет 4 - 5 воздействий, а для покрытий из порошков  $Al_2O_3-TiO_2-12\%$  ( $MoS_2-Ni$ ), полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, – 3–4. Дополнительные импульсы не дают дополнительного эффекта, поскольку их многократное повторение только ухудшает геометрию полученной поверхности покрытия вследствие теплового разрушения. Это затрудняет заключительную механическую обработку сформированных материалов, так как увеличивается припуск, который должен быть минимальным вследствие значительной стоимости используемых материалов покрытий и проблематичности их обработки вследствие твердости и износостойкости. Суммарное количество импульсов лазерного излучения согласно полученных результатов значительно меньше в сравнении с импульсами компрессионной плазменной струи (11–14) при воздействиях на те же покрытия. Это можно объяснить длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4 мс и 400 мкс. При существенно большей длительности воздействия возрастает зона концентрации подводимой энергии и толщина слоя, при обработке единичным импульсом лазерного излучения, при этом снижается суммарное количество воздействий для оплавления покрытий по всей толщине. Результаты исследований по оптимизации технологических параметров представлены в таблице 2 (диаметр пятна обработки составляет 8,0 мм).

Таблица 1 – Результаты исследований по оптимизации плотности мощности

Покрытие	Плотность мощности импульса лазерного луча, $\times 10^5$ Вт/см <sup>2</sup>	Показатель пористости на шлифах обработанного покрытия, %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> -12%(MoS <sub>2</sub> -Ni) (СВС)	3,5	3,3 – 4,1
	4,5	3,0 – 3,7
	5,5	2,8 – 3,4
	6,0	2,5 – 3,0
	6,5	2,7 – 3,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> -12%(MoS <sub>2</sub> -Ni) (агломер.)	4,0	4,0 – 4,7
	5,0	3,4 – 3,8
	6,0	3,2 – 3,6
	7,0	3,3 – 3,5

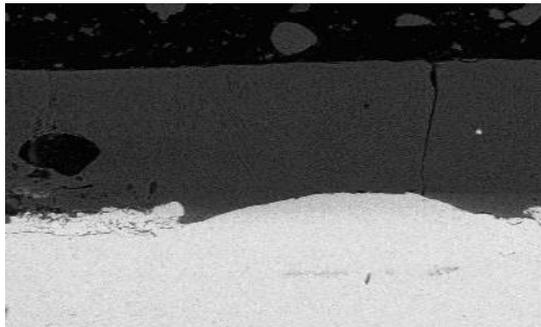


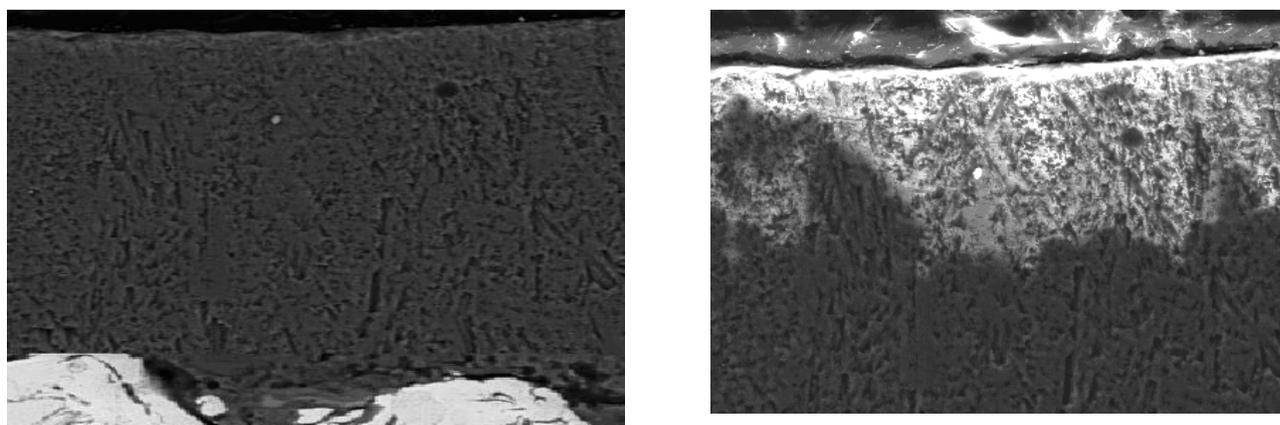
Рисунок 1 – Следы теплового разрушения поверхности покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni), полученного методом СВС после импульсной лазерной обработки при  $W$  больше оптимального значения

Таблица 2 – Оптимизированные технологические параметры импульсной лазерной обработки

Покрытие	Режимы обработки покрытия лучом лазера импульсного действия	
	Плотность мощности излучения, $\times 10^5$ Вт/см <sup>2</sup>	Суммарное количество импульсов луча в пятне обработки
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> -12%(MoS <sub>2</sub> -Ni)(СВС)	5,5–6,0	4–5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> -12%(MoS <sub>2</sub> -Ni) (агломер.)	6,0–6,5	3–4

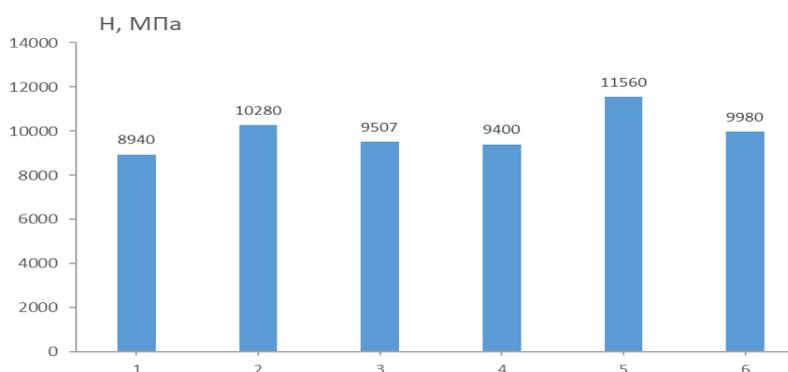
**Изучение покрытий с модифицированной структурой, полученной на оптимизированных режимах обработки импульсами лазерного излучения.** На рисунке 2 показана микроструктура покрытий, сформированных на оптимизированных режимах обработки. Как и в случае технологии компрессионных плазменных воздействий, слои полученных покрытий являются оплавленным металлокерамическим материалом. При процессе оплавления происходит активация химического взаимодействия на границах основных фаз сформированных композиций. Полученными продуктами при химическом взаимодействии могут быть тонкодисперсные образования, которые значительно упрочняют границы основных фаз и все покрытие в целом. Получается достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости полученных композиций. Геометрия поверхности полученных покрытий по сравнению с напыленным материалом (без последующей лазерной обработки) характеризуется снижением высоты микронеровностей. Из-за оптимизации технологических характеристик лазерного излучения не

присутствуют “кратеры” теплового разрушения сформированной поверхности. Как и при компрессионных плазменных воздействиях происходит усложнение травления ее элементов. Значительное увеличение количества нетравленных участков говорит о наличии в покрытиях упрочненных аморфных структур с высокой стойкостью к коррозии, трудно растворимых в кислотных травителях. В соответствии с методикой при изучении свойств полученных покрытий оценивали их усредненную микротвердость (Н). Изменение параметра Н для различных композиций проиллюстрировано на рисунке 3. По сравнению с компрессионной плазменной обработкой заметно уменьшение микротвердости, это объясняется снижением от воздействия импульсом лазерного излучения степени локальности оплавления материала. Так же снижается скорость охлаждения расплава за счет теплоотвода в подложку образцов. Уменьшаются степень измельчения его зеренной структуры и значение параметра Н, количество аморфных фаз покрытия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наряду с компрессионной плазменной обработкой рассмотренная лазерная технология позволяет улучшать свойства покрытий из порошков  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ , полученных методом СВС и методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием.



а) *а-метод СВС; б- метод агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием*

*Рисунок 3 – Микроструктура покрытия  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$  (x 500) после обработки импульсами лазерного излучения*



*1, 4 – после плазменного напыления; 2, 5 – после компрессионной плазменной обработки напыленных материалов; 3, 6 – после обработки лучом лазера импульсного действия*

*Рисунок 4 – Микротвердость покрытий  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$  (1,2,3 – агломерирование; 4,5,6 – СВС)*

**Заключение.** Исследованы и оптимизированы технологические параметры высокоэнергетической обработки напыленных плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики с применением добавок тугоплавких металлов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Оптимизация была выполнена при исследовании процессов структурообразования при оплавлении, уплотнении и высокоскоростном охлаждении покрытий. Основным критерием оптимизации служила максимальная степень локального оплавления, уплотнения сформированных композиций при отсутствии признаков разрушения от воздействий импульсами лазерного излучения. Энергия воздействий генерировалась при применении твердотельного квазистационарного лазерного излучателя.

На основании металлографического анализа нетравленных шлифов выявлено, что необходимое количество импульсов лазерного излучения для покрытий из порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ , полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, – 3–4, а для покрытий из порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ , полученных методом СВС составляет 4–5 воздействия. Оптимальные плотности мощности излучения ( $W$ ) при обработке композиций  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ , полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах  $(4,0 - 6,5) \times 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , а для  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ , полученных методом СВС, находятся в пределах  $(3,5 - 6,0) \times 10^5 \text{ Вт/см}^2$ . Суммарное количество импульсов лазерного излучения значительно меньше в сравнении с импульсами компрессионной плазменной струи (11–14) при воздействиях на те же покрытия. Что объясняется длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4 мс и 400 мкс. При большей длительности снижается суммарное количество воздействий для оплавления покрытий по всей толщине.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оковитый, В. А. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2009. – Вып. 4(58): Машиностроение. – С.49–53.
2. Оковитый, В. А. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск. : Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
3. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V Okovity // J. Welding International. – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918–920.
4. Оковитый, В. А. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / В. А. Оковитый [и др.] // “Наука и техника”, БНТУ – Минск. – 2018. – Вып. 3. – С.183–189.
5. Оковитый, В. А. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями “Наука и техника” / В. А. Оковитый [и др.] // “Наука и техника”, БНТУ – Минск. – 2018. Вып. 5. – С. 377–389.