

ISSN 1999-4125 (Print)

Научная статья

УДК 621.793.7:621.762

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-1-24-33

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛАЗЕРОМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Пантелеенко Федор Иванович<sup>1</sup>, Оковитый Вячеслав Александрович<sup>1</sup>,  
Девойно Олег Георгиевич<sup>1</sup>, Сидоров Виктор Александрович<sup>1</sup>,  
Литвинко Артем Анатольевич<sup>1</sup>, Оковитый Василий Вячеславович<sup>1</sup>,  
Асташинский Валентин Миронович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

\*для корреспонденции: panteleyenkofi@tut.by



### Информация о статье

Поступила:

30 декабря 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2023 г.

Принята к публикации:

28 февраля 2023 г.

Опубликована:

30 марта 2023 г.

### Ключевые слова:

оптимизации технологических параметров, лазер непрерывного действия, плазменные покрытия, максимальная степень локального оплавления, скорость перемещения луча, коэффициент перекрытия дорожек, тепловое разрушение поверхности.

### Аннотация.

В статье приведены результаты оптимизации технологических параметров обработки лучом лазера непрерывного действия плазменных покрытий на базе порошка  $\text{NiCrAlY} - \text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$  и  $(\text{NiCrAlY})\text{B}$ . Высококонцентрированная модификация покрытий с помощью лазера приводит к значительному упрочнению и уплотнению внешнего слоя, снижая при этом шероховатость и, следовательно, неравномерность нагрева покрытия, а также устраняет общую пористость в приповерхностном слое. При лазерном оплавлении, изменяя параметры режимов излучения и оптимизируя их, можно создавать необходимую структуру в формируемом покрытии с созданием плотного покрытия с оплавленной и гладкой поверхностью, с качественной адгезионной прочностью для эксплуатации обработанных деталей, с получением довольно дисперсной микроструктуры и минимальной диффузии элементов из подложки. Высокоэнергетические источники энергии при последующей обработке сформированных износостойких плазменных покрытий имеют свои преимущества и особенности: возможность при воздействии управления параметрами, обеспечивающими регулирование структуры приповерхностных слоев и их технологических характеристик (геометрических размеров у обработанных участков, их шероховатости, твердости, износостойкости и др.), использование локальности и концентрации подводимой к обрабатываемому покрытию энергии и возможность обрабатывать исключительно приповерхностный слой покрытия без ненужного нагрева всего объема с нарушением свойств и его структуры.

**Для цитирования:** Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Сидоров В.А., Литвинко А.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М. Оптимизация технологических параметров обработки многослойных плазменных покрытий лазером непрерывного действия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 1 (155). С. 24-33. doi: 10.26730/1999-4125-2023-1-24-33

**Введение.** Одним из способов эффективного модифицирования структуры плазменных покрытий без изменения свойств основы является их обработка высококонцентрированными потоками энергии. К основным видам такой обработки покрытий относятся: оплавление сформированных покрытий при помощи плазменной установки; применение импульсов компрессионной плазмы; оплавление с использованием лазерного луча. В области плазменного нанесения функциональных, в том числе износостойких покрытий все больше применяются процессы, в которых используется обработка лазерным излучением [1-5]. К ним можно отнести лазерные (такие как наплавка и поверхностные модифицирования), а также гибридные (лазерно-плазменное формирование покрытий, лазерная обработка, совмещенная с высокочастотным подогревом). Обычно при реализации используют излучение лазером технологического спектра: газовых (CO<sub>2</sub>-лазеров), твердотельных (Nd:YAG-лазеров), диодных и волоконных [6].

Структура полученных после оплавления лазерным излучением слоев характеризуется отсутствием окисных включений и пор, а также дисперсностью. Полученная оплавленная зона отличается микротвердостью, более низкой по сравнению с процессом плазменного напыления. Характер распределения по глубине полученной оплавленной зоны легирующих элементов равномерен, за исключением границ зоны оплавления. Эта существенная особенность присуща лазерной обработке. Она обеспечивается кратковременностью расплавления напыленного слоя и последующего охлаждения с высокими скоростями, что изначально способствует сохранению всего спектра легирующих элементов, которые содержались в предварительно напыленных покрытиях, и достаточно равномерному их распределению в объеме после процесса наплавки. К известным недостаткам процесса лазерной обработки можно отнести невысокий коэффициент преобразования энергии луча в тепловую энергию и малую производительность процесса. К основным преимуществам этого процесса можно отнести локальное тепловое воздействие (поскольку размер пятна нагрева обычно в пределах 0,1...10,0 мм), гибкость подвода энергии к месту необходимой обработки, возможность формирования обработанных слоев с высокими характеристиками твердости и износостойкости с модификацией на глубину от нескольких микрометров до уровня 1,0...3,0 мм [7,8]. Происходящее при этом измельчение зерен способствует упрочнению металлов без образования в них твердых фаз. Характерны и определенные недостатки, такие как формирование внутренних напряжений в дорожках упрочнения, что может привести к образованию трещин, вероятность образования пор при процессе упрочнения с оплавлением, что связано с выделением газов из-за выгорания неметаллических включений, находящихся в основном металле [9, 10].

### **Методика исследований**

1. Методика оптимизации лазерной обработки базируется на необходимости получения измельченной нанокристаллической структуры покрытий, являющихся объектом исследований. С учетом предварительных экспериментальных данных и результатов исследований Белорусского национального технического университета при тепловом воздействии луча лазера непрерывного действия возможны следующие варианты режимов оплавления и структурообразования покрытий:

2. - жесткие технологические параметры с максимально допустимыми плотностью мощности и скоростью перемещения луча. При этом имеет место минимальный нагрев подложки, проплавление которой исключается. Такие режимы обеспечивают высокоскоростное охлаждение жидкофазного материала покрытия с теплоотводом в подложку. Формируется характерная измельченная, метастабильная структура кристаллизующегося материала [11];

3. - при смягчении режимов лазерной обработки создаются условия для образования равновесной литой дендритной структуры с ростом кристаллических зерен [12];

4. - при лазерной обработке с большими энергетическими вкладами происходит проплавление подложки, существенный нагрев которой предотвращает высокоскоростное охлаждение и измельчение структуры [13].

5. С учетом рассмотренных вариантов для формирования измельченной нанокристаллической структуры покрытий наиболее приемлемы жесткие режимы их лазерной обработки [14]. Критерий оптимизации режимов – максимальная степень локального оплавления и уплотнения напыленных композиций при минимальном нагреве подложки, проплавление которой исключается. Чем выше степень кратковременного оплавления, тем больше центров

кристаллизации расплава с конкурирующим развитием кристаллических зерен при сверхбыстром охлаждении жидкофазного материала. Взаимный контакт увеличивающихся кристаллических зерен существенно ограничивает их развитие и размеры, создаются условия для получения измельченной нанокристаллической структуры. Для оптимизации жестких режимов лазерной обработки по упомянутому критерию необходимо исследовать влияние плотности мощности и скорости перемещения луча на степень оплавления напыленных композиций. Плотность мощности зависит от диаметра луча, который может изменяться в пределах 1,0 – 5,0 мм. Предварительные эксперименты показали целесообразность фиксированного диаметра величиной 2,0 мм. Превышение этого значения затрудняет достижение локальности максимального кратковременного оплавления рассматриваемых композиций (активизируется нагрев подложки), а уменьшение вызывает возрастание количества проходов луча для обработки всей протяженности покрытия, что снижает производительность оплавления. Вместе с тем исследуемая обработка лазером непрерывного действия осуществляется в атмосфере воздуха. Поэтому снижение производительности оплавления нежелательно во избежание чрезмерного окисления покрытий при возрастании времени контакта кислорода с нагретым до высокой температуры оплаваемым материалом. Оптимизацию скорости перемещения луча осуществляют при ее варьировании в пределах 50 – 400 мм/мин. Оценка степени оплавления и уплотнения, появления признаков смягчения режимов обработки с образованием дендритной структуры проводят при исследовании шлифов поперечного сечения обработанных покрытий на металлографическом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) и на полуавтоматическом анализаторе изображения МОР – АМОЗ. Последний служит для получения обобщенной количественной информации о пористости обработанных покрытий и выкрошенных при подготовке шлифов частицах. Такая информация позволяет судить о степени оплавления и уплотнения напыленных материалов при тепловом воздействии на них лучом лазера. При изучении свойств покрытий, обработанных лазерным лучом при оптимальных режимах, наряду с металлографическим анализом структуры замеряли микротвердость образцов. Изменение усредненных значений микротвердости покрытий (параметра Н) служило сравнительной оценкой измельчения их структуры и формирования наноструктурных фаз в зависимости от применения того или иного из исследуемых технологических приемов [15]. Повышению Н соответствует увеличение прочности нанесенных композиционных материалов за счет возрастания присутствия измельченных наноструктурных фаз. Сопоставление значений Н напыленных и обработанных лучом лазера материалов позволяет оценить эффективность обработки, направленной на измельчение структуры покрытий. Кроме того, указанное сопоставление позволяет судить о влиянии обработки на эффективность модифицирования покрытий элементами металлов Ni, Cr, Al как дополнительного фактора измельчения структуры. Плазменное напыление композиций, приведенных в Таблице 1, выполняют на установке УПУ-3Д с порошковым питателем TWIN-10. Исследование процессов и оптимизацию технологических параметров лазерной обработки напыленных композиций осуществляют на серийно выпускаемой установке, представляющей собой CO<sub>2</sub> – лазер непрерывного действия (мощность луча 700 Вт). Напыление и обработку покрытий проводят в воздушной атмосфере.

#### 6. Оптимизация обработки лучом лазера непрерывного действия плазменных покрытий

Согласно методическому подходу, при варьировании технологических параметров лазерной обработки изменяли скорость перемещения луча и коэффициент перекрытия дорожек воздействия лазерным лучом [10-15]. Последний технологический параметр оказывает влияние на стабилизацию оплавления и уплотнения по всей протяженности покрытия, на производительность обработки. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому должна быть обеспечена стабильность оплавления и уплотнения по всей толщине и протяженности покрытий, чему способствует увеличение коэффициента перекрытия дорожек. Вместе с тем увеличение коэффициента ограничивается нежелательным снижением производительности обработки. Указанные тенденции влияния коэффициента учитывались при его оптимизации. Экспериментальные исследования процессов и оптимизацию технологических параметров лазерной обработки покрытий проводили с использованием стальных цилиндрических образцов длиной 12 мм и диаметром 10 мм. При нанесении покрытий на образцы выполняли следующие операции: одну из торцевых поверхностей образцов подвергали струйно-абразивной обработке

зернами электрокорунда (давление сжатого воздуха 0,4-0,6 МПа; угол атаки струи 60-90 град.; расстояние от среза сопла пистолета до поверхности 100-120 мм; расход абразива 3-5 кг/ч; шероховатость подготовленной поверхности должна быть Ra 12,5-25 мкм);- на подготовленную поверхность плазменным напылением наносили покрытия NiCrAlY- ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); (NiCrAlYTa) В (ток дуги плазмотрона 450-500 А; расход плазмообразующего газа – аргона 40 л/мин; расход плазмообразующего газа – водорода 8 л/мин; дистанция напыления 100-110 мм; расход распыляемого порошка 4,0 кг/ч). Толщина покрытий составляла 0,5-0,6 мм; покрытия обрабатывали лучом CO<sub>2</sub> – лазера непрерывного действия (диаметр луча 2,0 мм). Скорость перемещения луча и коэффициент перекрытия дорожек воздействия лазерным лучом варьировали с их оптимизацией по принятому критерию [4]. В Таблице 1 представлены результаты оптимизации скорости перемещения луча. Согласно данным Таблицы 1 оптимальные скорости перемещения луча лазера при обработке покрытий NiCrAlY- ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); (NiCrAlYTa) В находятся в пределах 150 – 200 мм/мин. Об этом свидетельствует динамика возрастания степени оплавления, уплотнения обработанных композиций и соответствующего изменения пористости, желаемого уменьшения которой (по критерию оптимизации) при скоростях перемещения луча ниже 150 – 200 мм/мин практически не происходит. Снижение эффективности теплоотдачи объясняется значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой и твердой карбидной фазы (55 – 70%), препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при скоростях перемещения луча ниже 150 – 200 мм/мин наблюдается нежелательное смягчение режимов лазерной обработки и создаются условия для образования равновесной литой дендритной структуры с ростом кристаллических зерен. Характерный вид такой структуры показан на Рис. 1. Как отмечалось, наряду со скоростью перемещения луча для обеспечения стабильности оплавления и уплотнения по всей толщине и протяженности покрытий оптимизировали коэффициент перекрытия дорожек обработки. Установлено, что необходимый и достаточный коэффициент перекрытия составляет 0,8 – 0,9. Превышение указанной величины коэффициента нецелесообразно из-за уменьшения производительности обработки и, как следствие, дополнительного окисления покрытий при возрастании времени контакта кислорода с оплаиваемым материалом. Дополнительные окисленные включения с низкой теплопроводностью затрудняют высокоскоростное охлаждение оплавленного материала. Затрудняется формирование измельченной, в том числе нанокристаллической структуры покрытия.

Таблица 1. Результаты исследований по оптимизации скорости перемещения луча  
Table 1. Research results on optimization of travel speed

Покрытие	Скорость перемещения луча лазера, мм/мин	Показатель пористости на шлифах обработанного покрытия, %
(NiCrAlYTa) В	300	4,8 – 6,1
	200	4,1 – 4,6
	100	3,9 – 4,2
NiCrAlY - ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	250	6,1 – 7,0
	150	5,2 – 5,9
	50	4,9 – 5,4

При скоростях перемещения луча меньше 200 мм/мин (для покрытий (NiCrAlYTa) В и меньше 150 мм/мин (для покрытий NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) наблюдается структура покрытий, характерная смягченным режимам лазерной обработки с ростом кристаллических зерен

#### Изучение свойств, обработанных лучом лазера многослойных плазменных покрытий

На Рис. 1 показана характерная структура покрытий (NiCrAlYTa) В и NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> после воздействия на них лазерным лучом при оптимальных технологических параметрах. В соответствии с Рис. 2 получена достаточно плотная структура с оплавлением покрытий по всей толщине напыленных композиций. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Равномерно распределенные оксиды (серые включения на Рис. 3) существенно повышают твердость покрытий, снижают степень деформации их рабочей поверхности в паре трения. При этом снижается площадь фактического контакта трущихся

поверхностей. В результате уменьшается вероятность непосредственного металлического контакта поверхностей трения, уменьшается интенсивность доминирующего изнашивания микроконтактным схватыванием. Равномерное распределение оксидов в связующем NiCrAlY также препятствует появлению сплошных линий разрушения в твердой фазе [12].

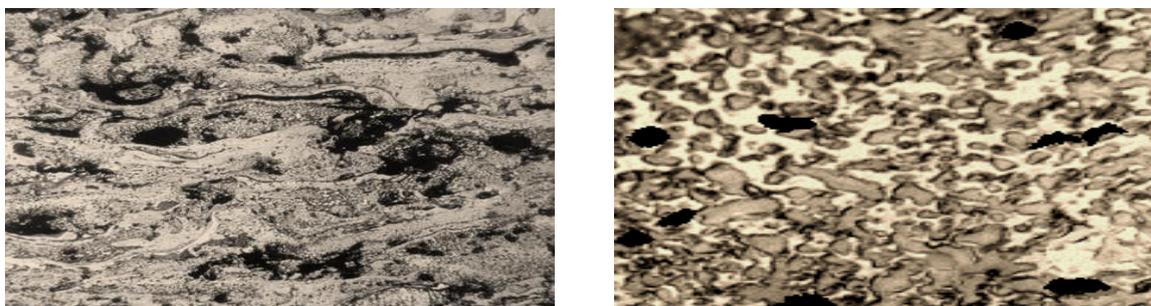


Рис. 1. Характерная микроструктура многослойных покрытий на базе никелевых сплавов после лазерной обработки: а – (NiCrAlYTa) В при увеличении  $\times 1000$ ; б – NiCrAlY -  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$  при увеличении  $\times 1000$

Fig. 1. Characteristic microstructure of multilayer coatings based on nickel alloys after laser processing: a – (NiCrAlYTa) B at magnification  $\times 1000$ ; b – NiCrAlY -  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$  with an increase of  $\times 1000$

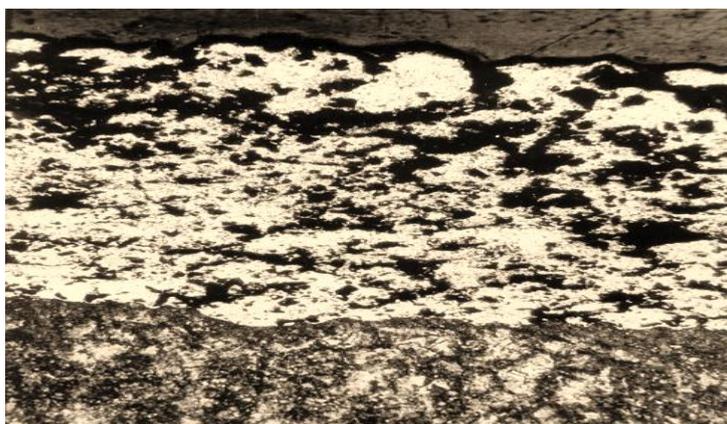


Рис. 2. Характерная микроструктура NiCrAlY -  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$  после лазерной обработки ( $\times 100$ )

Fig.2. Characteristic microstructure of NiCrAlY -  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$  after laser treatment ( $\times 100$ )

Покрытия при обработке  $CO_2$  – лазером непрерывного действия в условиях атмосферы склонны к образованию избыточной оксидной фазы. Согласно Рис. 2 такая фаза присутствует в характерной структуре указанных покрытий в виде темных прослоек значительной толщины. NiCrAlY связующее способствует образованию тонких оксидных пленок, прочно сцепленных с частицами, формирующими напыленное покрытие. Эти пленки защищают частицы от дальнейшего высокотемпературного окисления газовой средой при лазерной обработке композиций. В соответствии с методическим подходом при изучении свойств покрытий, обработанных лучом лазера при оптимальных режимах, оценивали усредненную микротвердость (Н) нанесенных композиций. Изменение параметра Н для различных покрытий иллюстрируется Рис. 3. Приведенные данные получены по результатам замеров микротвердости (ГОСТ 9450 - 76) в пяти поясах по длине поперечного сечения покрытий толщиной 0,5 – 0,6 мм. Применялся микротвердомер «Micromet – II» фирмы Vuehler (Швейцария) с нагрузкой 100 г на индентор. Замеры, соответствующие переходной зоне от покрытия к подложке, не учитывались. Как видно из Рис. 3, усредненная микротвердость напыленных материалов (Н) после лазерной обработки возросла. Это объясняется более эффективным формированием фаз повышенной прочности с измельченной зеренной структурой, в том числе до нанокристаллического уровня. Более эффективное формирование наноструктурных фаз обусловлено отсутствием процессов рекристаллизации, которые по данным [4- 6] происходят при напылении слоев покрытий. Сопоставление компрессионно-плазменной и лазерной обработок свидетельствует о том, что

последняя измельчает структуру покрытий в меньшей степени, усредненная микротвердость покрытий снижается. Это объясняется тем, что локальные объемы нагрева и продолжительность теплового воздействия на покрытие лучом лазера возрастают. Как следствие, уменьшаются интенсивности теплоотвода и высокоскоростного охлаждения расплавленного материала покрытия. Дополнительным фактором, затрудняющим высокоскоростное охлаждение и измельчение структуры, является наличие избыточных оксидов в обработанных лазером композициях. В сравнении с воздействиями импульсами компрессионной плазмы при лазерной обработке упомянутых композиций снижение параметра  $H$  максимальное.

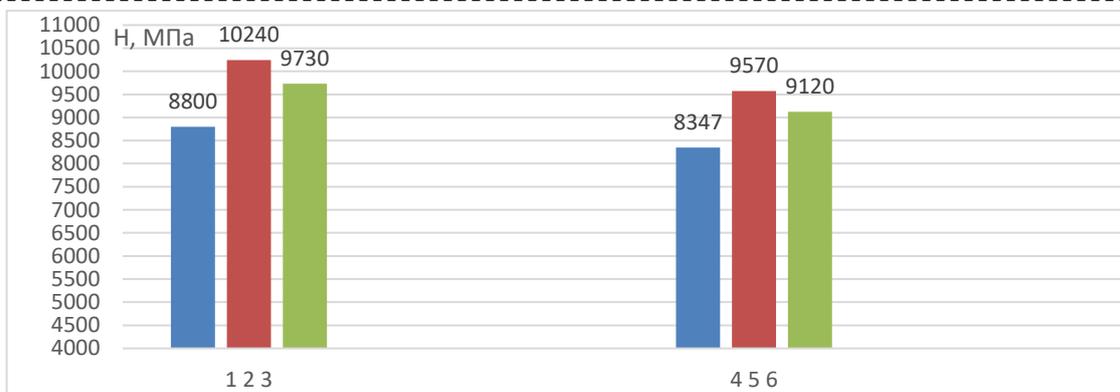


Рис.3. Микротвердость покрытий 1, 2, 3 – для NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,5,6 для (NiCrAlY)B (1 и 2 – до обработки; 3 и 4 – после компрессионно-плазменной; 5 и 6 – после лазерной обработки.

Fig. 3. Microhardness of coatings 1, 2, 3 – for NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,5,6 for (NiCrAlY)B (1 and 2 – before treatment; 3 and 4 – after compression-plasma treatment; 5 and 6 – after laser treatment.

### Выводы

Проведены исследования процессов и оптимизированы технологические параметры обработки лучом лазера непрерывного действия плазменных покрытий. В качестве материалов покрытий выбраны порошки NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и (NiCrAlY)B. Методика оптимизации технологических параметров базировалась на необходимости получения измельченной нанокристаллической структуры наносимых композиций. При этом критериями оптимизации служили максимальная степень локального оплавления и уплотнения напыленных покрытий в отсутствие признаков теплового разрушения их поверхности при минимальном нагреве подложки, проплавление которой исключается. Структура полученных после оплавления лазерным излучением слоев характеризуется отсутствием окисных включений и пор, а также дисперсностью. Полученная оплавленная зона отличается более низкой микротвердостью по сравнению с процессом плазменного напыления. Установлено, что оптимальная скорость перемещения луча лазера непрерывного действия при обработке покрытий находится в пределах 150 – 200 мм/мин. Необходимый и достаточный коэффициент перекрытия дорожек обработки составляет 0,8 – 0,9. Превышение указанной величины коэффициента нецелесообразно из-за уменьшения производительности обработки и, как следствие, дополнительного окисления покрытий при возрастании времени контакта кислорода с оплаваемым материалом. Усредненная микротвердость напыленных материалов ( $H$ ) после лазерной обработки возросла. Это объясняется более эффективным формированием фаз повышенной прочности с измельченной зеренной структурой, в том числе до нанокристаллического уровня. Более эффективное формирование наноструктурных фаз обусловлено отсутствием процессов рекристаллизации, которые происходят при напылении слоев покрытий. Сопоставление компрессионно-плазменной и лазерной обработок свидетельствует о том, что последняя измельчает структуру покрытий в меньшей степени, усредненная микротвердость покрытий снижается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф., Оковитый В. В. Исследование процессов обработки импульсами лазерного излучения плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики // Наука и техника, БНТУ - Минск, 2014. Вып. 4. С.3-10.
2. Okovity V. A., Shevtsov A. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Kostyukevich E. A. Paramets optimization

for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics // High Temperature Material Processes. 2014. №18(1–2). Pp. 45–62.

3. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями // Наука и техника, БНТУ – Минск. 2018. Вып. 5. С.377–389.

4. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Соболевский С. Б., Оковитый В. В. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием // Наука и техника, БНТУ – Минск. 2020. Вып. 6. С.615–620.

5. Soleimanipour Z., Baghshahi S., Shoja-razavi R., Salehi M. Hot corrosion behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser clad plasma sprayed YSZ thermal barrier coatings, Ceram. Int. 2016. 42. Pp. 17698–17705.

6. Ahmadi M. S., Shoja-Razavi R., Valefi Z., Jamali H. Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed and laser glazed YSZ–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier composite, Opt. Laser Technol. 2019. 111. Pp. 687–695.

7. Ahmadi-Pidani R., Shoja-Razavi R., Mozafarinia R., Jamali H. Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification, Opt. Lasers Eng. 2012. 50. Pp. 780–786.

8. Ghasemi R., Shoja-Razavi R., Mozafarinia R., Jamali H. The influence of laser treatment on thermal shock resistance of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings, Ceram. Int. 2014. 40. Pp. 347–355.

9. Soleimanipour Z., Baghshahi S., Shoja-razavi R. Improving the thermal shock resistance of thermal barrier coatings through formation of an in situ YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite laser cladding, J. Mater. Eng. Perform. 2017. 26. Pp. 1890–1899.

10. Tsai H., Tsai P. Performance of laser-glazed plasma-sprayed (ZrO<sub>2</sub>-12wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/ (Ni-22wt.% Cr-10wt.% Al-1wt.% Y) thermal barrier coatings in cyclic oxidation tests, Surf. Coat. Technol. 1995. 71. Pp. 53–59.

11. Nejati M., Rahimpour M., Mobasherpour I. Evaluation of hot corrosion behavior of CSZ, CSZ/micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CSZ/nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma sprayed thermal barrier coatings, Ceram. Int. 2014. 40. Pp. 4579–4590.

12. Wang Y., Li C. G., Tian W., Yang Y. Laser surface remelting of plasma sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt%TiO<sub>2</sub> coatings on titanium alloy, Appl. Surf. Sci. 2009. 255. Pp. 8603–8610.

13. Wang Y., Li C. G., Guo L. X., Tian W. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings at different laser power, Surf. Coat. Technol. 2010. 204. Pp. 3559–3566.

14. Dubourg L., Lima R. S., Moreau C. Properties of alumina–titania coatings prepared by laser-assisted air plasma spraying, Surf. Coat. Technol. 2007. 201. Pp. 6278–6284.

15. Li C. G., Yu Z. S., Zhang Y. F., Zhang P. L., Yan H., Lu Q. H., Li W. G., Wang Y., Microstructure evolution of laser remelted Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt%TiO<sub>2</sub> coatings, J. Alloy.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Пантелеенко Алексей Федорович**, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, [panteleyenkofi@tut.by](mailto:panteleyenkofi@tut.by)

**Оковитый Вячеслав Александрович**, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), кандидат техн. наук, [niil\\_svarka@bntu.by](mailto:niil_svarka@bntu.by)

**Девойно Олег Георгиевич**, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), заведующий заведующий ОНИЛ ПиЛТ, доктор техн. наук, проф., (+375 17 331-30-58 [plazteh@bntu.by](mailto:plazteh@bntu.by))

**Сидоров Виктор Александрович**, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, кандидат техн. наук, профессор, [panteleyenkofi@tut.by](mailto:panteleyenkofi@tut.by)

**Литвинко Артем Анатольевич**, научный сотрудник, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

**Оковитый Василий Вячеславович**, Инженер, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

**Асташинский Валентин Миронович**, Белорусский национальный технический университет (220072, Минск, п. Бровка, 15, Беларусь), чл.-кор. НАН Б, доктор физ.-мат. наук, профессор, [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)

Заявленный вклад авторов:

Пантелеенко Ф. И. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; выводы.

Оковитый В. А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.  
Девойно О. Г. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; выводы.  
Сидоров В. А. – сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; написание текста.  
Литвинко А. А. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.  
Оковитый В. В. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.  
Асташинский В. М. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESSING MULTILAYER PLASMA COATINGS WITH A CONTINUOUS LASER

Fyodor I. Panteleenko<sup>1</sup>, Vjacheslav A. Okovity<sup>1</sup>,  
Oleg G. Devoyno<sup>1</sup>, Viktor A. Sidorov<sup>1</sup>, Artem A. Litvinko<sup>1</sup>,  
Vasily V. Okovity<sup>1</sup>, Valentin M. Astashinsky<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University,

<sup>2</sup>Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus

\*for correspondence: panteleyenkofi@tut.by



#### Article info

Received:

30 December 2022

Accepted for publication:

15 February 2023

Accepted:

28 February 2023

Published:

30 March 2023

**Keywords:** optimization of technological parameters, cw laser, plasma coatings, maximum degree of local melting, beam travel speed, track overlap ratio, thermal destruction of the surface

#### Abstract.

The article presents the results of optimization of technological parameters of processing by a continuous laser beam of plasma coatings based on NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (NiCrAlY)B powders. Highly concentrated modification of coatings using a laser leads to a significant hardening and compaction of the outer layer, while reducing the roughness and hence the uneven heating of the coating, and also eliminates the overall porosity in the near-surface layer. With laser melting, by changing the parameters of the radiation modes and optimizing them, it is possible to create the necessary structure in the coating being formed with the creation of a dense coating with a melted and smooth surface, with high-quality adhesive strength for the operation of machined parts, with obtaining a fairly dispersed microstructure and minimal diffusion of elements from the substrate. High-energy energy sources in the subsequent processing of the formed wear-resistant plasma coatings have their own advantages and features: the ability to control the parameters that provide regulation of the structure of near-surface layers and their technological characteristics (geometrical dimensions of the treated areas, their roughness, hardness, wear resistance, etc.), the use of the locality and concentration of the energy supplied to the coating being processed and make it possible to process only the near-surface layer of the coating without unnecessary heating of the entire volume with a violation of its properties and structure.

**For citation:** Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoyno O.G., Sidorov V.A., Litvinko A.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Optimization of technological parameters of processing multilayer plasma coatings with a continuous laser. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 1(155):24-33. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2023-1-24-33

## REFERENCES

1. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Investigation of the processing of plasma coatings from materials based on multifunctional oxide ceramics by laser radiation pulses. *Science and technology*. 2014; 4:3-10.
2. Okovity V.A., Okovity V.A., Shevtsov A.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Kostyukevich E.A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics. *High Temperature Material Processes*. 2014; 18(1-2):45-62.
3. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V. Formation and study of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy effects. *Science and Technology*. 2018; 5:377-389.
4. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Sobolevsky S.B., Okovity V.V. Formation of plasma powder coatings from cermets with subsequent high-energy modification. *Science and Technology*. 2020; 6:615-620.
5. Soleimanipour Z., Baghshahi S., Shoja-razavi R., Salehi M. Hot corrosion behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser clad plasma sprayed YSZ thermal barrier coatings. *Ceram. Int*. 2016; 42:17698-17705.
6. Ahmadi M.S., Shoja-Razavi R., Valefi Z., Jamali H. Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed and laser glazed YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier composite. *Opt. Laser Technol*. 2019; 111:687-695.
7. Ahmadi-Pidani R., Shoja-Razavi R., Mozafarinia R., Jamali H. Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification. *Opt. Lasers Eng*. 2012; 50:780-786.
8. Ghasemi R., Shoja-Razavi R., Mozafarinia R., Jamali H. The influence of laser treatment on thermal shock resistance of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings, *Ceram. Int*. 2014; 40:347-355.
9. Soleimanipour Z., Baghshahi S., Shoja-razavi R. Improving the thermal shock resistance of thermal barrier coatings through formation of an in situ YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite laser cladding. *J. Mater. Eng. Perform*. 2017; 26:1890-1899.
10. Tsai H., Tsai P. Performance of laser-glazed plasma-sprayed (ZrO<sub>2</sub>-12wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/(Ni-22wt.% Cr-10wt.% Al-1wt.% Y) thermal barrier coatings in cyclic oxidation tests, *Surf. Coat. Technol*. 1995; 71:53-59.
11. Nejati M., Rahimipour M., Mobasherpour I. Evaluation of hot corrosion behavior of CSZ, CSZ/micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CSZ/nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma sprayed thermal barrier coatings. *Ceram. Int*. 2014; 40:4579-4590.
12. Wang Y., Li C.G., Tian W., Yang Y. Laser surface remelting of plasma sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt%TiO<sub>2</sub> coatings on titanium alloy. *Appl. Surf. Sci*. 2009; 255:8603-8610.
13. Wang Y., Li C.G., Guo L.X., Tian W. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings at different laser power. *Surf. Coat. Technol*. 2010; 204:3559-3566.
14. Dubourg L., Lima R.S., Moreau C. Properties of alumina-titania coatings prepared by laser-assisted air plasma spraying. *Surf. Coat. Technol*. 2007; 201:6278-6284.
15. Li C.G., Yu Z.S., Zhang Y.F., Zhang P.L., Yan H., Lu Q.H., Li W.G., Wang Y. Microstructure evolution of laser remelted Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt% TiO<sub>2</sub> coatings. *J. Alloy*.

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Fyodor I. Panteleenko**, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), member-cor.NAS of Belarus, Dr. S. in Engineering, prof., panteleyenkofi@tut.by

**Vjacheslav A. Okovity**, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, niil\_svarka@bntu.by

**Oleg G. Devoino**, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), Head of ONIL PiLT, Doctor of Technical Sciences, Prof., (+375 17 331-30-58 plazteh@bntu.by)

**Viktor A. Sidorov**, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, va\_sidorov@tut.by

**Artem A. Litvinko**, Senior engineer, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

**Vasily V. Okovity**, Senior engineer, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

**Valentin M. Astashinsky**, Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus (220072, Minsk, Brovka, 15), member-cor.NAS of Belarus, Dr. Sc. in Physics and Mathematics, ast@hmti.ac.by

Contribution of the authors:

Panteleenko F.I. – setting a research problem; scientific management; conceptualization of the study; conclusions.  
Okovity V.A. – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization

---

of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Devoino O.G. – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; data collection and analysis; conclusions.

Sidorov V.A. – collection and analysis of data; review of relevant literature; writing text.

Litvinko A.A. – review of relevant literature; writing text, collecting and analyzing data.

Okovity V.V. – review of relevant literature; writing text, collecting and analyzing data.

Astashinsky V.M. – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

