

УДК 621.793.71

¹Ф. И. Пантелеенко, член -корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., ¹В. А. Оковитый, к.т.н.,
¹О. Г. Девойно, д.т.н., проф., ¹В. А. Сидоров, к.т.н., доцент, ¹В. В. Оковитый,
²В.М. Асташинский, членн.-корр. НАН Беларуси, д. физ.-мат. н., проф.
¹Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь
Тел./Факс+375 17 293-95-99, E-mail: niil_svarka@bntu.by
²Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск,
Беларусь
²Тел./Факс +375 17 284-24-91, E-mail: ast@hmti.ac.by

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОБАВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

В статье изучены и оптимизированы технологические параметры упрочнения высокоэнергетическим плазменным воздействием к напыленным покрытиям из материалов на основе оксидной керамики с использованием добавок тугоплавких металлов. Процессы структурообразования изучались при плавлении, уплотнении и высокоскоростном охлаждении покрытий. Критерием оптимизации режимов является максимальная степень локального плавления и уплотнения напыляемых композиций при отсутствии признаков разрушения покрытия под воздействием излучения.

Ключевые слова: керамическое покрытие, плазменное напыление, утилизация материалов, оптимизация параметров, тугоплавкие металлы

F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devojno, V. A. Sidorov, V. V. Okovity, V. M. Astashinsky

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF MODIFICATION BY HIGH-ENERGY PLASMA EXPOSURE OF COATINGS FROM CERAMICS WITH THE APPLICATION OF ADDITIVES OF REFINING METALS

In the article technological parameters of hardening of high-energy treatments of sprayed coatings of materials based on oxide ceramics using additives of refractory metals were studied and optimized. The processes of structure formation were studied during melting, compaction, and high-speed cooling of coatings. The criterion for optimizing the regimes is the maximum degree of local melting and compaction of the sprayed compositions in the absence of signs of coating destruction under the influence of radiation.

Keywords: ceramic coating, plasma spraying, material utilization, optimization of parameters, refractory metals

1. Введение

Одной из наиболее часто применяемых порошковых композиций, изготавливаемых методом агломерирования мелкодисперсной порошковой шихты с последующим процессом высокотемпературного спекания, используемой для нанесения износостойких плазменных покрытий, является композиция из диоксида титана-оксида алюминия-плакированная никелем твердая смазка. Тем не менее она характеризуется невысокой износостойкостью и твердость в условиях трения при высоких температурах, низкой гетерогенность покрытий, связанной с неоптимальным соотношением мягкой и твердой составляющих в покрытии [1-3]. Вместе с тем эффективность защитных плазменных покрытий может быть существенно повышена путем модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке нанесенных материалов [4-6].

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М.; 2020.

Высокоэнергетические источники энергии (импульсный лазер и компрессионная плазменная установка) имеют свои особенности и преимущества при обработке плазменных покрытий: высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют обрабатывать необходимый участок покрытия без нагрева всего объема и нарушения его структуры и свойств; возможность управления параметрами воздействия обеспечивает регулирование структуры обрабатываемого слоя, его твердости, шероховатости, износостойкости, геометрических размеров. приводит к значительному уплотнению обрабатываемого слоя покрытия, устраняет пористость, снижает шероховатость [7-9]. Однако следует учитывать, что высокоэнергетическая обработка приводит к перераспределению и изменению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем выше мощность излучения и меньше толщина покрытия, поэтому требуется серьезная оптимизация режимов обработки.

Целью наших исследований является создание композиционного керамического материала на основе оксидной керамики с добавлением молибдена, обладающего хорошими технологическими характеристиками, устойчивому к поддержанию химического состава в процессе газотермического напыления и способному формировать плазменные покрытия с высокой износостойкостью, определенной степенью гетерогенности (получение оптимальных соотношений мягкой и твердой составляющих в покрытии), низким коэффициентом трения, с высокой твердостью, износостойкостью, обрабатываемостью.

2. Обработка импульсным лазером плазменных покрытий

В качестве технологического оборудования применяют твердотельный квазистационарный лазерный излучатель. Он позволяет обрабатывать покрытия импульсами лазерного луча длительностью до 4 мс, полученными в режиме свободной генерации. Для оптимизации жестких режимов лазерной обработки необходимо исследовать влияние плотности мощности импульса лазерного излучения на степень оплавления напыленных композиций. При варьировании плотности мощности учитывали, что форма импульсов излучения твердотельных лазеров в режиме свободной генерации определяется формой импульсов тока накачки. Наряду с плотностью мощности оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного излучения в пятне обработки. Указанный технологический параметр влияет на толщину обработанных слоев покрытия [1-3].

В таблице 1 представлены результаты оптимизации плотности мощности. Наряду с плотностью мощности импульсного излучения для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий (0,5 – 0,6 мм) оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного луча в пятне обработки.

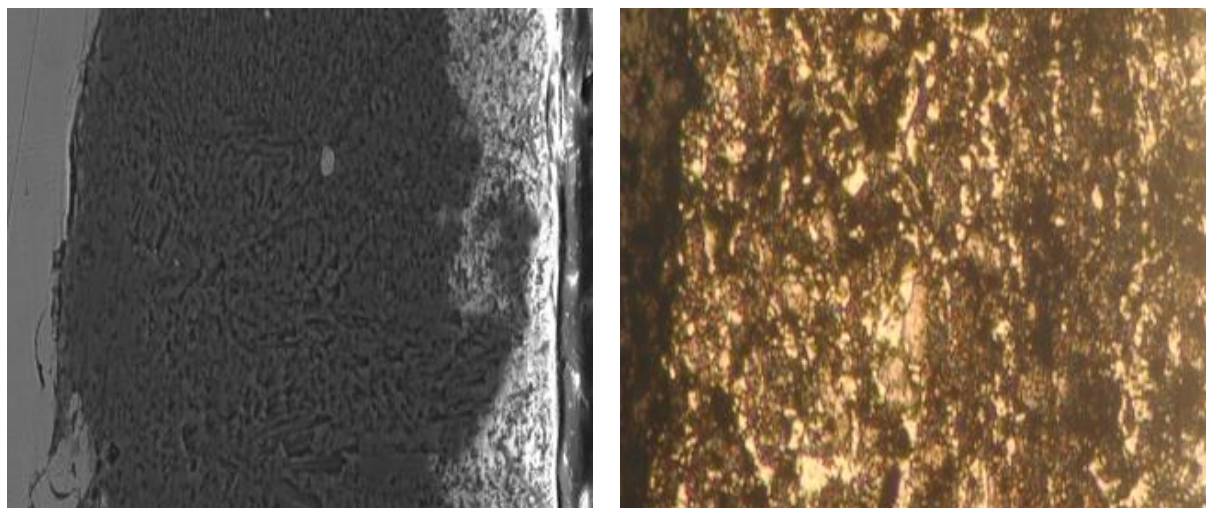
Таблица 1. – Результаты исследований по оптимизации плотности мощности

Покрытие	Плотность мощности импульса лазерного луча, $\times 10^5$ Вт/см ²	Показатель пористости на шлифах обработанного покрытия, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -MoS ₂ -Mo	4,0	3,3 – 4,4
	4,5	3,1 – 3,3
	5,5	3,4 – 3,8
	6,0	3,5 – 4,1
	7,0	3,7 – 4,3

Микроструктура покрытий, полученных на оптимизированных режимах обработки, показана на рис. 1а. Как и в случае технологии воздействия импульсами компрессионной плазмы слои покрытий представляют собой оплавленный металлокерамический материал. При оплавлении активизируется химическое взаимодействие на границах основных фаз нанесенных композиций. Продуктами химического взаимодействия могут быть тонкодисперсные (в том числе наноразмерные) образования, которые упрочняют границы основных фаз и покрытие в целом [4-5].

3. Обработка импульсами компрессионного плазменного потока

Обработку напыленных покрытий проводили с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Экспериментальный стенд для исследований МПК (рис.2а) состоит из вакуумного блока, включающего камеру с системами откачки и напуска рабочего газа (водорода), энергетического блока, контрольно-измерительного блока, управляющего всеми узлами стенда и синхронизацией между ними, а также диагностического комплекса. Вакуумная камера образована двумя отсеками составляющими единый объем длиной 150 см, в прямоугольном торце которого установлено разрядное устройство МПК. Система подачи рабочего газа включает в себя балластный отсек, что позволяет использовать в качестве рабочего вещества любые газы, а также смешивать их в любом соотношении. Накопитель энергии включает в себя основную секционированную конденсаторную батарею для питания МПК и батарею конденсаторов для питания электродинамического клапана напуска рабочего газа. Общий вид разрядного устройства магнитоплазменного компрессора представлен на рис. 2 б.



а

б

Рисунок 1. Микроструктура покрытия: а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MoS}_2\text{-Mo}$ после обработки импульсами лазерного излучения; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MoS}_2\text{-Mo}$ после обработки импульсами компрессионного плазменного потока (x 500)

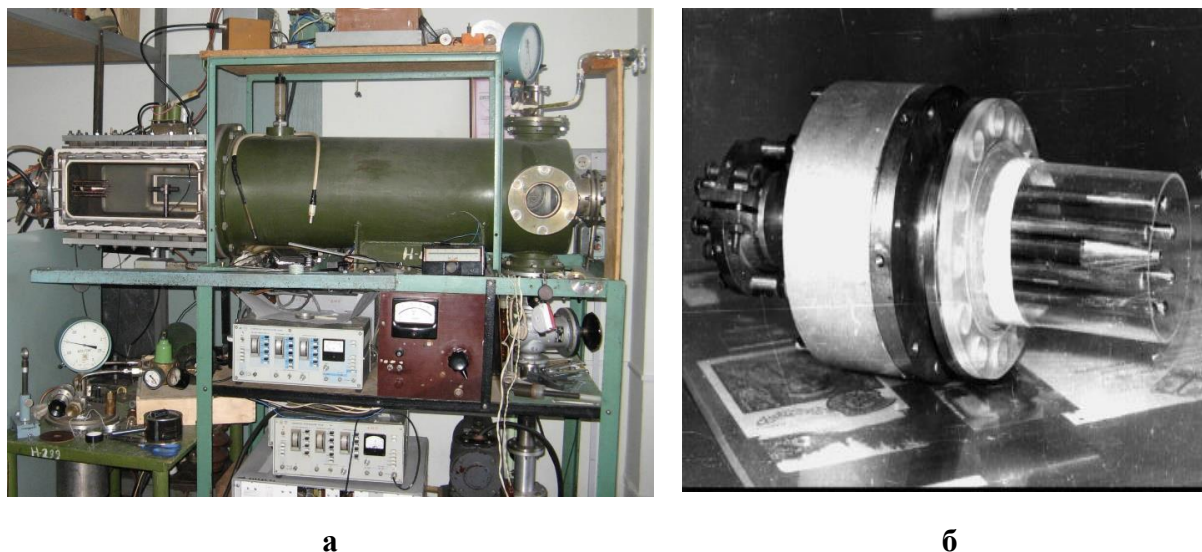


Рисунок 2. Экспериментальный стенд МПК: а – общий вид стенда; б – разрядное устройство МПК

Преимуществом МПК по сравнению с другими типами ускорителей является высокая устойчивость генерируемого им компрессионного потока, возможность управления его составом, размерами и параметрами плазмы при длительности разряда, достаточной для практических применений [1]. Методика оптимизации базировалась на необходимости получения упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур покрытий, являющихся объектом исследований [1-3]. При тепловом воздействии импульса плазменной струи происходит оплавление слоя покрытия толщиной порядка 30 мкм и его сверхбыстрое охлаждение с теплоотводом в подложку. Чем выше степень кратковременного оплавления композиции, содержащей различные фазы (в том числе тугоплавкие), тем больше центров последующей кристаллизации (аморфизации) материала, из которых при сверхбыстром охлаждении развиваются упрочненные структуры. С учетом вышеизложенного критерием оптимизации импульсами компрессионного плазменного потока покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MoS}_2\text{-Mo}$ выбрана максимальная степень их оплавления и уплотнения, что достигается увеличением энергетического уровня теплового и ударно – волнового воздействия импульса при уменьшении дистанции воздействия до минимального значения. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины). Согласно методического подхода при варьировании технологических параметров обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество. Последний технологический параметр оказывает влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полном объеме способствовать получению упрочненных структур.

В таблице 2 представлены результаты оптимизации дистанции обработки. Микроструктура покрытий, полученных на оптимизированных режимах обработки, показана на рисунке 1,б.

Как видно, слои покрытий представляют собой оплавленный металл - керамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных

элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций. На фотографии структуры заметны следы частиц твердых смазок, образующих покрытия. Указанные элементы структуры наблюдается в виде характерных непротравленных (светлых) оболочек. Сохранение структуры распыляемых композиционных частиц в плазменной струе, соударения их с подложкой и после воздействий импульсами плазмы свидетельствует о том, что состав исходных порошков не претерпевает существенных изменений при формировании покрытий.

Таблица 2. – Результаты исследований по оптимизации дистанции обработки

Покрытие	Дистанция обработки, м	Показатель пористости, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -MoS ₂ -Mo	0,09	4,3 – 5,5
	0,08	3,6 – 5,0
	0,07	3,4 – 4,0
	0,06	3,7-4,7
	0,05	Разрушение покрытия

4. Заключение

1. С учетом полученных результатов можно констатировать, что происходит уплотнение напыленных материалов за счет теплового и ударно - волнового воздействий импульсами компрессионного плазменного потока и лазерного излучения. При этом снижается пористость материалов, возрастают когезионная и адгезионная прочности покрытий, происходит измельчение зеренной структуры, формируются аморфные фазы повышенной прочности, о чем свидетельствует увеличение усредненной микротвердости нанесенных композиций.

2. Необходимое и достаточное количество импульсов для покрытий из порошка Al₂O₃-TiO₂-MoS₂-Mo составляет 5-6 воздействий. Дополнительные импульсы неэффективны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия из-за теплового разрушения. Суммарное количество импульсов лазерного излучения значительно меньше в сравнении с импульсами плазменной струи (11 - 12) при воздействиях на те же покрытия. Это объясняется длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4мс и 400 мкс. Микроструктура покрытий представляет собой оплавленный металлокерамический материал. При оплавлении активизируется химическое взаимодействие на границах основных фаз нанесенных композиций. Продуктами химического взаимодействия могут быть тонкодисперсные (в том числе наноразмерные) образования, которые упрочняют границы основных фаз и покрытие в целом.

3. Оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для Al₂O₃-TiO₂-MoS₂-Mo - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,07м м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях ≤ 0,05 м наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Наряду с дистанцией обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий оптимизировали суммарное количество импульсов плазмы. Установлено, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий составляет 11-12. Дополнительные

импульсы нецелесообразны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия. Слои покрытий представляют собой оплавленный металл - керамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пантелеенко, Ф. И. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый. – Минск: БНТУ, 2019. – 251 с.
2. Пантелеенко, Ф. И. Разработка композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. М. Асташинский, В. В. Оковитый. // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва: Машиностроение, 2015. – Вып.2. – С. 43-47.
3. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Обработка металлов. – Новосибирск, 2015. – №2(67). – С. 46-54.
4. Оковитый, В. А. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, Т. Л. Талако, А. Ф. Пантелеенко // Обработка металлов. – Новосибирск, 2015. – №2(67). – С. 39-45.
5. Пантелеенко, Ф. И. Исследование процессов и оптимизация технологических параметров импульсно-плазменной обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. М. Асташинский, В. В. Оковитый // Труды международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении». – Кемерово, 2015. – С. 360-364.
6. Пантелеенко, Ф. И. Анализ и выбор возможных вариантов напыления композиционных многослойных покрытий из порошков оксидной керамики на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый, В. А. Асташинский // Тезисы международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера 21 века», 12-17 сентября 2017 г., г. Севастополь. – Т.1, – С. 185-190.
7. Оковитый, В. А. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Асташинский, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып.3. – С. 183-189.
8. Оковитый, В. А. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый, В. М. Асташинский, В.В. Углов. // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 5. – С. 377-389.
9. Пат. 031920 Евразийский, Способ нанесения газотермического покрытия / Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. – № 2017/ЕА/0018; заявл. 05.04.17.

Поступила в редколлегию 23.01.2020 г.