

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL
AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

Научная статья

УДК 624.131.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-18-26

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ КОМПРЕССИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ**

Пантелеенко Федор Иванович ¹, Оковитый Вячеслав Александрович ¹,
Девойно Олег Георгиевич ¹, Литвинко Артем Анатольевич ¹,
Оковитый Василий Вячеславович ¹, Асташинский Валентин Миронович ²,
Блюменштейн Валерий Юрьевич ³

¹ Белорусский национальный технический университет

² Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: panteleyenkofi@tut.by



Информация о статье

Поступила:

30 декабря 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 января 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

струя плазмы, оптимизация
плазменного процесса, методы
высокоэнергетической
обработки, технологические и
эксплуатационные
характеристики.

Аннотация.

Статья предоставляет результаты, полученные в рамках исследования влияния технологических характеристик обработки компрессионным плазменным потоком на качественные показатели композиционных покрытий на основе материалов никель-хром-алюминий-титан с оксидами алюминия и титана. Возникающие при этом градиенты температур и легирование исходного материала в процессе проводимой обработки часто приводят к структурным и фазовым превращениям в поверхностных слоях наносимых материалов и, соответственно, к изменению их технологических свойств: твердости, износостойкости, теплостойкости, прочности сцепления и др. Совершенно новые возможности для проводимой модификации свойств покрытий и значительного улучшения получаемых эксплуатационных характеристик дает применение компрессионных плазменных потоков, которые генерируются квазистационарными плазменными ускорителями. Подробно рассмотрены вопросы упрочнения плазменных покрытий из разработанных материалов методами высокоэнергетической обработки. Исследованы и оптимизированы характерные технологические параметры упрочняющей обработки сформированных плазменных покрытий. Изменяя используемые технологические характеристики процесса обработки импульсами компрессионного плазменного потока, меняли как расстояние при воздействиях, так и их число. Число импульсов значительно действует на толщину обработанных слоев. Общее число импульсов обязано создать оплавленное с высокими прочностными характеристиками по всей толщине покрытия.

Для цитирования: Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Литвинко А.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М., Блюменштейн В.Ю. Исследование механизма упрочнения плазменных покрытий при их обработке компрессионным плазменным потоком // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 18-26. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-18-26, EDN: UXWCNS

Введение

Известно [1, 2], что обработка газотермических покрытий интенсивными высокоэнергетическими потоками – электронными, ионными, лазерными и плазменными – сопровождается нагревом обрабатываемой поверхности (иногда выше температуры плавления исходного материала) с последующим быстрым переохлаждением поверхностного слоя покрытия со скоростью, достигающей значений 10^{10} К/с. Возникающие при этом градиенты температур и легирование исходного материала в процессе проводимой обработки часто приводят к структурным и фазовым превращениям в поверхностных слоях наносимых материалов и, соответственно, к изменению их технологических свойств: твердости, износостойкости, теплостойкости, прочности сцепления [3-5] и др. Совершенно новые возможности для проводимой модификации свойств покрытий и значительного улучшения получаемых эксплуатационных характеристик дает применение компрессионных плазменных потоков, которые генерируются квазистационарными плазменными ускорителями [6]. Этот способ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами высокоэнергетической обработки: малый промежуток времени воздействия (порядка ~ 100 мкс), возможность дополнительного легирования полученных слоев покрытия элементами предварительно нанесенного покрытия, использование применяемого газа не только для нагрева покрытия, но и для его легирования. Совместное перемешивание компрессионными плазменными потоками системы «основа-нанесенное покрытие» позволяет получить приповерхностный слой, содержащий элементы как покрытия, так и основы. Целью наших исследований являлось изучение плазменных покрытий при высокоэнергетическом воздействии компрессионным плазменным потоком, изучение изменений элементного состава покрытия, структурных и фазовых превращений и технологических свойств модифицированного слоя, создание научных основ новых методов значительного улучшения свойств плазменных износостойких покрытий, широко используемых в целом ряде отраслей промышленности. Известно, что при ударном и волновом воздействиях импульсов потока компрессионной плазмы происходит пластическая деформация и значительное уплотнение обрабатываемого слоя нанесенного плазменного покрытия. Сверхбыстрое охлаждение и соответствующий теплоотвод в подложку после оплавления сформированного слоя толщиной порядка 20-30 мкм – результат

теплового воздействия импульсов компрессионной плазмы. Происходят существенные структурно-фазовые изменения в модифицированной области. Воздействие импульсов высокотемпературной плазмы на систему «основа-покрытие» приводит к расплавлению полученного покрытия и слоя основы и происходящему впоследствии жидкофазному перемешиванию этих компонентов под воздействием давления потока плазмы. Действие плазменных потоков на поверхность полученного материала приводит к значительным изменениям в морфологии. Степень кратковременного оплавления у композиций, содержащих различные фазы, влияя на количество центров проходящей кристаллизации, приводящих к упрочнению структур при осуществлении сверхбыстрого охлаждения. В структурах происходят изменения их ближнего порядка, материал в сформированном покрытии приходит к состоянию, подобному аморфному [7, 8]. Степень пластической деформации существенно влияет на вероятность формирования аморфных структур.

Влияние технологических параметров компрессионного плазменного потока на защитные плазменные покрытия

Плазменные покрытия из исходных порошковых материалов слоев $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlTi}$ служили объектом проводимых исследований. Эти плазменные покрытия применяются для восстановления деталей, работающих в супернеблагоприятных условиях трения. Технология последующего воздействия при помощи компрессионного плазменного потока используется в качестве упрочняющей плазменное покрытие термической обработки. В качестве основных критериев по последующей оптимизации параметров проведенной обработки взяты степень полученной аморфизации структуры и их пористость обработанных слоев. Граничные слои обработанных покрытий рядом с подложкой необходимо характеризовать аморфной фазой с максимальным содержанием и минимальной пористостью. Это можно получить при уменьшении дистанции при воздействии импульсами для ужесточения обработанных режимов, что подразумевает рост тепловой и ударно-волновой энергии. При дальнейшем ужесточении используемых режимов может произойти формирование ряда макротрещин и разрушение сформированного покрытия. Экспериментальные для исследований цилиндрические образцы (длина 12 мм, с диаметром 10 мм изготавливали по следующей технологии:

- на изготовленную поверхность с помощью метода плазменного напыления наносили $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}$

Таблица 1. Полученные значения по оптимизации дистанции обработки импульсами компрессионной плазмы

Table 1. Obtained values for optimization of processing distance pulses of compression plasma

Сформированное покрытие	Дистанция обработки импульсами ¹ компрессионной плазмы, м	Показатель полученной пористости, %	Показатель микротвердости ² , МПа
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -NiCrAlTa	0,17	4,5-5,8	5775-8644 (4621-6910)
	0,16	4,0-5,3	6286-9033 (5025-7227)
	0,15	3,7 – 4,9	7312-9350 (5850-7482)
	0,14	2,8 – 4,5	7414-9695 (5931-7761)
	0,13	2,6 – 3,9	7775-9914 (6221-7934)
	0,12	3,4-4,3	6286-8033 (5032-6429)
	0,11	Разрушение покрытия	-

¹Примечание: суммарное количество импульсов компрессионной плазмы – 12

²Примечание: в показателях микротвердости в скобках указаны значения микротвердости покрытий до обработки импульсами компрессионной плазмы

Таблица 2. Полученные значения по оптимизации количества импульсов компрессионной плазмы

Table 2. Obtained values for optimizing the number of pulses compression plasma

Сформированное покрытие	Суммарное количество импульсов компрессионной плазмы	Показатель полученной пористости, %	Показатель микротвердости, МПа
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -NiCrAlTa дистанция обработки (0,13 м)	11	4,5-5,8	6357-8394
	12	3,0-4,11	7148-9193
	13	3,2 - 4,4	7381-9495
	14	2,6 - 3,9	7775-9914
	15	2,8 - 4,1	7976-10199
	16	3,6 - 4,9	7621-9103
	17	4,5 - 5,4	7109-8998

TiO₂-NiCrAlTa плазменные покрытия с толщиной покрытия 0,5-0,6 мм (ток дуги на плазмотроне 500 А; расход плазмообразующего газов: аргона 50 л/мин и водорода 8 л/мин; дистанция плазмотрон-деталь 100 мм; расход распыляемого на деталь порошка 3,0 кг/ч);

- граничные с подложкой детали слои плазменного покрытия обрабатывали компрессионным плазменным потоком с толщиной 0,2 мм с оптимизацией полученных режимов по принятым критериям. В результате получено, что оптимальными для них являются режимы: количество нужных импульсов для полной термической обработки граничных слоев – 8 воздействий, необходимая дистанция обработки около 80 мм;

- поверхностные слои (толщина слоев -0,4 мм) покрытий обрабатывали: количество нужных импульсов для полной термической обработки поверхностных слоев – 14 воздействий; дистанция – 110 мм; начальное

напряжение (накопитель второй ступени ускорителя) – 4,5 кВ; их нужная пористость была в пределах 4,4-5,5% для улучшения в процессе трения и изнашивания маслоудерживающей способности.

Используя принятую методику, изменяя используемые технологические характеристики процесса обработки импульсами компрессионного плазменного потока, меняли как расстояние при воздействиях, так и их число [9, 10]. Число импульсов значительно действует на толщину обработанных слоев. Общее число импульсов обязано создать оплавленное с высокими прочностными характеристиками по всей толщине покрытие. Согласно данных оптимизации (Таблицы 1), оптимумы у дистанций при формировании упрочненных структур для NiCrAlTa-Al₂O₃-TiO₂ – 0,13 м. Подтверждением этого служит стабилизация показателей общей пористости, при расстояниях ниже 0,13 и 0,14 м уменьшение не происходит

благодаря мгновенности динамических и тепловых воздействий (порядка 200 мкс), а также максимуму содержания тугоплавкой фазы, уменьшающей степени оплавления. При расстояниях ниже 0,11 м для NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂ заметны дефекты с развитием макротрещин.

Оптимизировали также суммарное число импульсов у компрессионной плазмы. При обработке системы малым количеством импульсов наблюдается неполное расплавление и частичное перемешивание компонентов системы. Обработка большим количеством импульсов характеризуется более однородным

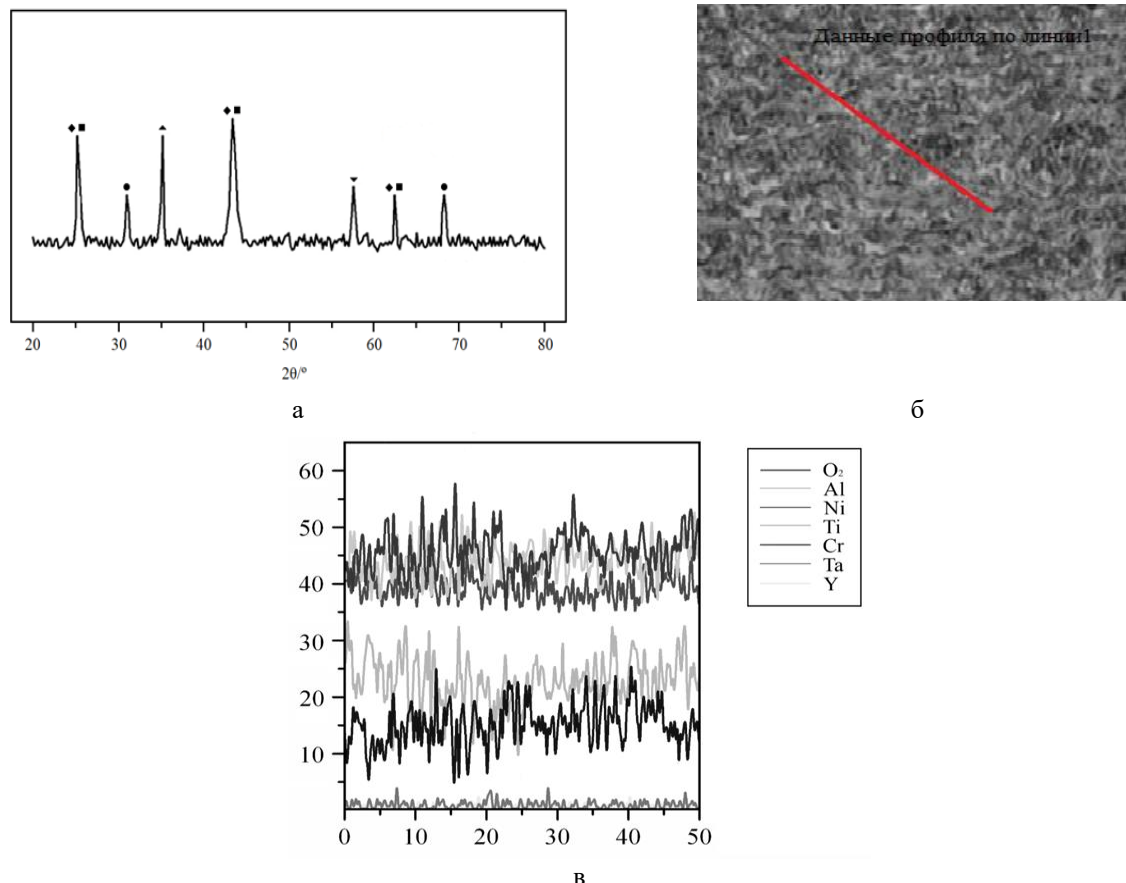


Рис. 1. Характеристики покрытия NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂: а – рентгенограмма; б – полученная структура; в – распределение элементов в характеристическом рентгеновском излучении по указанной линии (Рис. 1б)

Fig. 1. Characteristics of the NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂ coating: a – x-ray pattern; b – the resulting structure; c – distribution of elements in characteristic X-ray radiation along the indicated line (Fig. 1b)

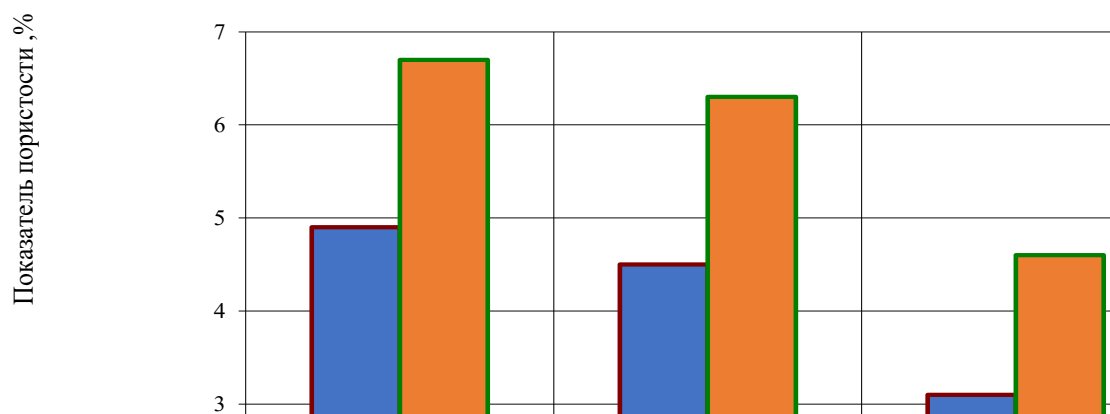


Рис. 2. Влияние дистанции КП воздействия на полученную пористость формируемой поверхности (1 – мин., 2 – макс.)

Fig. 2. The influence of the CP exposure distance on the resulting porosity of the formed surface (1 – min., 2 – max.)

перемешиванием. Увеличение микротвердости также может быть обусловлено эффектами быстрой закалки: образец испытывает резкий нагрев вплоть до расплавления поверхностного слоя с последующим отводом тепла вглубь образца и быстрой рекристаллизацией. В результате исследований выявлено, что для полной обработки сформированных покрытий для $\text{NiCrAlTiTa-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ необходимо 14-15 воздействий (Таблица 2). Дальнейшее увеличение не нужно, происходит ухудшение геометрии созданной поверхности покрытия и технологических характеристик покрытия из-за переплава.

При проведении исследования полученного механизма и свойств при формировании износостойкой плазменной структуры поверхностных обработанных слоев изучены полученные микроструктура и микротвердость. Изучены полученные на оптимальных режимах проведенной обработки рентгенограммы покрытий (Рис. 1), соответствующих вышеуказанным поверхностным обработанным слоям. Поверхностные слои обработанных покрытий наносили $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlTiTa}$ согласно полученным микроструктурам, они представляют собой оплавленный керамико-металлический материал с очень мелкозернистой структурой. Достаточно равномерно распределены все структурные элементы, в том числе распределение пор и твердой фазы оксидов. Все это помогает увеличению износостойкости полученных покрытий в условиях граничной и несовершенной смазки при трении. Стабилизирует смазочную пленку в трибосопряжении величина равномерно распределенной в покрытии пористости, которая соответствует эффективному для последующего смазывания полученных покрытий значению. В

паре трения равномерно распределенные в покрытии оксиды снижают полученную степень деформации рабочей поверхности и существенно повышают их твердость. Площадь фактического контакта у трущихся поверхностей при этом снижается.

При этом уменьшается способность непосредственного металлического контакта у поверхностей трения и интенсивность изнашивания при микроконтактном схватывании. На Рис. 2 и 3 даны после компрессионной обработки на разработанных оптимальных режимах показатели микротвердости и пористости поверхностных слоев полученных покрытий. Они могут служить количественной и качественной оценкой о равномерности распределения оксидной фазы во всех поверхностных слоях и пор [1-4]. Согласно представленным данным, приведенным в Таблице 1, в сравнении с параметрами необработанных материалов полученная микротвердость у поверхностных слоев ранее напильных покрытий после проведенных комплексной плазмой импульсных воздействий увеличилась примерно на 20-40%. При этом разброс у значений полученной микротвердости становится меньше, что подтверждает равномерность по распределению полученных пор и самой оксидной фазы. Уменьшение по разбросу значений у микротвердости связано со снижением абсолютных величин показателей пористости после применения на напильные плазмой материалы потоков высококонцентрированной энергии. После воздействий компрессионных плазменных потоков распределение уровней у остаточных напряжений между всеми структурными элементами у поверхностных слоев хорошо влияет на полученную износостойкость слоев.

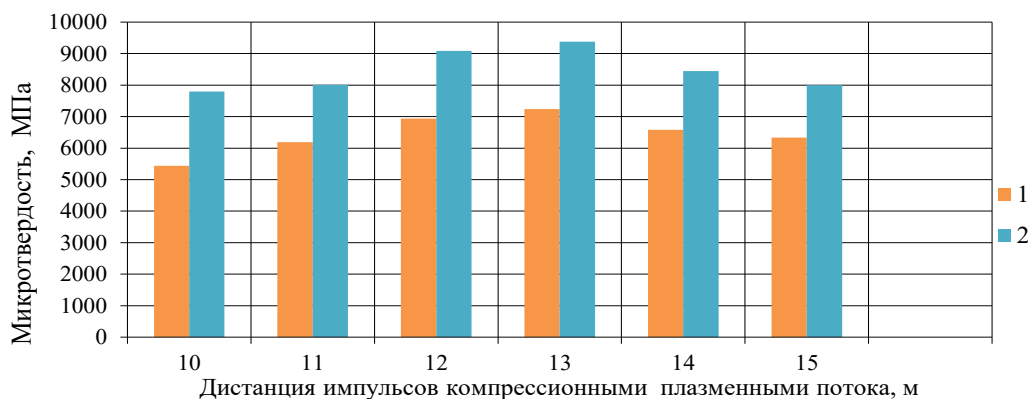


Рис. 3. Влияние дистанции КП воздействия на показатели микротвердости формируемой поверхности (1 – мин., 2 – макс.)

Fig. 3. The influence of the CP exposure distance on the microhardness of the formed surface (1 – min., 2 – max.)

Сопротивление механическим разрушениям во время трения увеличивают связующая фаза NiCr и присущие ей сжимающие напряжения. Становится меньше возможность исчезновения из связки оксидной фазы, есть наличие ее в зоне трения в виде твердых частиц из-за развития процессов абразивного изнашивания. Подробно изучена микроструктура у граничных слоев с подложкой полученных покрытий, обработанных на оптимальных технических режимах компрессионной плазмы.

Выводы

Совершенно новые возможности для проводимой модификации свойств покрытий и значительного улучшения получаемых эксплуатационных характеристик дает применение компрессионных плазменных потоков, которые генерируются квазистационарными плазменными ускорителями. Этот способ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами высокоэнергетической обработки: малый промежуток времени воздействия (порядка ~ 100 мкс), возможность дополнительного легирования полученных слоев покрытия элементами предварительно нанесенного покрытия, использование применяемого газа не только для нагревания покрытия, но и для его легирования. Используя принятую нами методику, изменяя используемые технологические характеристики процесса обработки импульсами компрессионного плазменного потока, меняли как расстояние при воздействиях, так и их число. Число импульсов значительно действует на толщину обработанных слоев. Общее число импульсов обязано создать оплавленное с высокими прочностными характеристиками по всей толщине покрытие. Рассмотренные процессы по снижению пористости с аморфизацией граничных слоев и активацией межфазного взаимодействия являются важными параметрами механизма по их упрочнению. Все это затем подтверждается полученными экспериментальными данными, что позволяет оценивать изменение показателей прочности сцепления полученных плазменных износостойких покрытий с послойно проведенной обработкой потоками с различной концентрацией их энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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». 2018. Вып. 5. С. 377–389. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389.

EDN: YOLTHV.

2. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Володько А. С., Оковитый В. В., Сидоров В. А., Литвинко А. А., Асташинский В. М. Исследование обработанных компрессионной плазмой многослойных плазменных покрытий на основе металлокерамик // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», ДонНТУ, Донецк. 2023. Вып. 2. С. 79–84. EDN: BQQATQ.

3. Пантелеенко Ф. И. [и др.] Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления // «Наука и техника». 2023. Вып. 3. С. 179–185. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185 EDN: QILEMK.

4. Оковитый В. А. [и др.] Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 377–389. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389.

5. Пантелеенко Ф. И. [и др.] Формирование покрытий на основе диоксида циркония на элементах экранов противометеорной защиты // Вестник Кузбасского технического университета. 2018. № 6 (130). С. 94–101. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-94-100.

6. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Володько А. С., Оковитый В. В., Сидоров В. А., Литвинко А. А., Асташинский В. М. Способы модифицирования высокоэнергетическими воздействиями многослойных плазменных покрытий на основе керамик // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», ДонНТУ, Донецк. 2023. Вып. 3. С. 64–71.

7. Panteleenko F.I. [et al.] Modern methods of high-energy modification of the structures of multilayer plasma coatings // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2024. No. 1(84). Pp. 81–90. EDN JMJDP1.

8. Singh A. [et al.] Microstructure and tribological behavior of fossil plasma sintered iron-based amorphous coatings // Materialovedeniya i inzheneriya. 2010. № 527. Pp. 500–507.

9. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Сидоров В. А., Литвинко А. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Характеристики многослойных покрытий, модифицированных потоками компрессионной плазмы // Материалы XXXI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера 21 века», 16-21 сентября 2024 г., Севастополь.

10. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Бендик В. И., Оковитый В. В. Модифицирование потоками компрессионной плазмы многослойных покрытий // LXVIII международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», 27–31 мая 2024 г., Витебск.

Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пантелеенко Федор Иванович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, e-mail: panteleyenkovfi@tut.by

Оковитый Вячеслав Александрович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), кандидат техн. наук, e-mail: 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, e-mail: plazteh@bntu.by)

Литвинко Артем Анатольевич, заведующий лабораторией НИИЛ СРТиНК, 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, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (220072, Минск, п. Бровки, 15, Беларусь), чл.-кор. НАН Б, доктор физ.-мат. наук, профессор, e-mail: ast@hmti.ac.by

Блюменштейн Валерий Юрьевич, профессор кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), докт. техн. наук, профессор, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

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.

Литвинко А. А. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.

Оковитый В. В. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.

Блюменштейн В. Ю. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

STUDY OF THE MECHANISM OF HARDENING OF PLASMA COATINGS DURING THEIR TREATMENT WITH A COMPRESSION PLASMA FLOW

Fyodor I. Panteleenko ¹, Vjacheslav A. Okovity ¹,
Oleg G. Devoino ¹, Artem A. Litvinko ¹, Vasily V. Okovity ¹,
Valentin M. Astashinsky ²,
Valery Yu. Blumenstein ³

¹ Belarusian National Technical University,

² Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: panteleyenkovfi@tut.by



Article info

Received:

Abstract.

The article presents the results obtained as part of a study of the influence of technological characteristics of compression plasma flow processing on the quality indicators of composite coatings based on nickel-chromium-aluminum-yttrium materials with aluminum and titanium oxides. The resulting temperature gradients and alloying of the source material during

30 December 2024

Accepted for publication:
22 January 2025Accepted:
30 April 2025Published:
26 June 2025

Keywords: plasma jet, optimization of the plasma process, high-energy processing methods, technological and operational characteristics.

the processing often lead to structural and phase transformations in the surface layers of the applied materials and, accordingly, to a change in their technological properties: hardness, wear resistance, heat resistance, adhesion strength, etc. Completely new opportunities for modification properties of coatings and a significant improvement in the resulting performance characteristics is achieved by the use of compression plasma flows, which are generated by quasi-stationary plasma accelerators. The issues of hardening plasma coatings from the developed materials using high-energy processing methods are considered in detail. The characteristic technological parameters of the hardening treatment of formed plasma coatings have been studied and optimized. By changing the used technological characteristics of the process of processing pulses of compression plasma flow, we changed both the distance under the influences and their number. The number of pulses significantly affects the thickness of the treated layers. The total number of pulses should create a melted coating with high strength characteristics over the entire thickness.

For citation: Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Litvinko A.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Blumenstein V.Yu. Study of the mechanism of hardening of plasma coatings during their treatment with a compression plasma flow. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):18-26. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-18-26, EDN: UXWCNS

REFERENCES

1. 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 influences. *"Science and Technology"*. 2018; 5:377–389.
2. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Volodko A.S., Okovity V.V., Sidorov V.A., Litvinko A. A., Astashinsky V.M. Study of multilayer plasma coatings based on metal ceramics treated with compression plasma. *International collection of scientific works of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and mechanical engineering systems"*. DonNTU. Donetsk. 2023; 2:79–84.
3. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Litvinko A.A., A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Blumenstein V. M. Aspects of creating multilayer coatings using plasma spraying. *"Science and Technology"*. 2023; 3:179–185.
4. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V., Chimanskiy V.I., Cerenda N.N. Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects. *Nauka i Technika = Science & Technique*. 2018; 17 (5):378–389. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389 (in Russ.)
5. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V. (2018) Formation of Coatings on the Basis of zirconium Dioxide on the Elements of Screens of Anti-Elementary Protection. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass*

State Technical University. 2018;130(6):94–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-94-100 (in Russ.)

6. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Volodko A.S., Okovity V.V., Sidorov V.A., Litvinko A. A., Astashinsky V.M. Methods for modifying multilayer plasma coatings based on ceramics with high-energy effects. *International collection of scientific works of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and mechanical engineering systems"*. DonNTU, Donetsk. 2023; 3:64–71.

7. Panteleenko F.I. [et al.] Modern methods of high-energy modification of the structures of multilayer plasma coatings. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. 2024; 1(84):81–90. EDN JMJDP1.

8. Singh A. [et al.] Microstructure and tribological behavior of fossil plasma sintered iron-based amorphous coatings. *Materialovedeniya i inzheneriya*. 2010; 527:500–507.

9. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Litvinko A.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Characteristics of multilayer coatings modified by compression plasma flows. *Materials of the XXXI International Scientific and Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere of the 21st Century"*. September 16-21, 2024, Sevastopol.

10. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Bendik V.I., Okovity V.V. Modification of multilayer coatings by compression plasma flows. *LXVIII International Scientific Conference "Current Problems of Strength"*. 27- May 31, 2024, Vitebsk. WITH.

© 2025 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, e-mail: prof., panteleyenkovfi@tut.by

Vjacheslav A. Okovity, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, e-mail: niil_svarka@bntu.by

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

Artem A. Litvinko, Head of NNIL SRTiNK, 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, e-mail: ast@hmti.ac.by

Valery Yu. Blumenstein, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Kemerovo, Vesennaya St., 28, Russian Federation), Dr. Sc. in Engineering, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

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.

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.

Blumenstein V.Yu. – scientific management; review of relevant literature; data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

