

## ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2024 С.И. Ярьско<sup>1,2</sup>, И.А. Антошин<sup>2</sup><sup>1</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

В работе рассмотрены возможности лазерной обработки (ЛО) как перспективного метода постобработки керамических покрытий, позволяющего добиться существенного повышения их эксплуатационных характеристик. Приведены данные по реализации данного метода при обработке керамических покрытий, нанесенных с использованием технологий газотермического напыления (ГТН), применяя различное лазерное оборудование. Установлено, что ЛО оказывает существенное влияние на микроструктуру керамических газотермических покрытий (ГТП), обеспечивает более высокую их плотность, снижает дисперсность и порообразование в 2-4 раза, позволяет регулировать распределение и величину остаточных напряжений. Показано, что с помощью ЛО удается добиться улучшения эксплуатационных характеристик покрытий, увеличения микротвердости на 25-40 %, увеличения адгезионной прочности покрытия и металлической основы, износостойкости и коррозионной стойкости. Приведены данные, свидетельствующие о неоднозначности влияния режимов ЛО при постобработке керамических покрытий на их свойства и недопустимости чрезмерного оплавления поверхности.

*Ключевые слова:* лазерное излучение, керамическое покрытие, микроструктура, износостойкость, микротвердость, коррозионная стойкость, порообразование, остаточные напряжения  
DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-281-288  
EDN: JCTWGO

## ВВЕДЕНИЕ

Большое количество деталей машин, различного оборудования и конструкций со временем выходят из строя вследствие износа рабочих поверхностей или длительного агрессивного воздействия окружающей среды. В мировой практике существует большое количество технологий повышения ресурса работы деталей машин и конструкций, основанных на различных физических принципах. В том числе, к ним относятся методы нанесения дополнительных защитных покрытий на наиболее нагруженные и подверженные износу поверхности деталей машин. Перспективными технологиями нанесения защитных покрытий являются технологии газотермического напыления [1], используемые, в том числе, и для создания керамических покрытий различного назначения.

Напыление керамических покрытий на металлическую подложку рабочего узла машины или конструкции может оказать значительное влияние на ресурс работы этого узла. Керамические покрытия обладают рядом существенных технологических достоинств, к которым, прежде всего, можно отнести высокие твердость,

коррозионностойкость и жаростойкость. Набор этих и многих других свойств позволяет существенно расширить область применения технологий напыления керамических покрытий.

Однако, несмотря на существенные эксплуатационные преимущества напыляемых покрытий, такие как: не превышающая 2-5 % пористость, хорошая адгезия между основой и покрытием, шероховатость до 10 мкм, данные покрытия обладают своими недостатками. Процесс нанесения покрытия является термическим, характеризуется большой гетерогенностью и образованием оксидных пленок при напылении порошковых материалов. За счет кислородосодержащей атмосферы пламени на частицах порошка затруднено восстановление оксидов, а на поверхности подложки совершенно невозможно.

Для повышения эксплуатационных характеристик керамических газотермических покрытий (ГТП) целесообразно применять дополнительную обработку предварительно нанесенного покрытия на основе тугоплавких соединений. Покрытия, полученные таким образом, могут значительно продлить срок службы деталей машин, для которых он ограничен. В этом отношении целесообразно в качестве инструмента регулирования свойств керамических покрытий, созданных различными методами, рассматривать лазерную обработку, позволяющую локально и оперативно управлять свойствами покрытий [2].

*Ярьско Сергей Игоревич, доктор технических наук, заведующий лабораторией лазерно-индуцированных процессов. E-mail: yarsi54@gmail.com*

*Антошин Илья Александрович, аспирант. E-mail: ilyaantoshin16@mail.ru*

Одним из приоритетных направлений исследований являются работы по уменьшению пористости покрытий и увеличению адгезии покрытия и металла подложки, по изучению влияния лазерного излучения на свойства, структуру покрытий на основе порошковых композиций твердых металлов, созданных различными методами.

Цель данной работы – анализ современного состояния в области модифицирования керамических покрытий лазерным излучением, направленного на повышение их эксплуатационных свойств и на устранение недостатков, выявленных в процессе их получения.

### МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Анализ результатов исследований показывает, что нанесение керамических покрытий для повышения антифрикционных и защитных свойств деталей машин и изделий имеет широкую область применения [1]. К настоящему времени в этом направлении достигнуты определенные успехи.

К числу методов, которые наиболее актуальны для нанесения порошковых керамических покрытий, относятся высокоскоростные методы напыления HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) [3-5], плазменное напыление [6, 7] и в некоторых случаях холодное газодинамическое напыление (ХГН) [8] (рис. 1).

### ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения дополнительной лазерной термообработки преимущественно используются CO<sub>2</sub>-лазеры с фиксированной длиной волны  $\lambda=10,6$  мкм [9, 10], имеется опыт применения CO<sub>2</sub>-лазера с перестраиваемой длиной волны  $\lambda=9-12$  мкм [11]. При использовании данных типов лазеров актуальны режимы постобработки покрытий при мощности излучения до 3,8 кВт и скоростях сканирования до 10 мм/с.

Реже используются мощные диодные лазе-

ры с длиной волны  $\lambda=807$  нм, мощность которых варьируется от 100 до 400 Вт, а скорость сканирования изменяется от 2 до 8 мм/с [12]. При лазерной обработке керамических покрытий нашли применение импульсные [6] и непрерывные [7] Nd:YAG-лазеры, мощность которых варьируется в пределах 0,4-3,0 кВт, скорость сканирования от 0,5 до 5 м/мин (8,3-83,3 мм/с), энергия в импульсе до 55 Дж. Известно применение для лазерной постобработки керамических покрытий импульсного эксимерного ArF лазера с длиной волны  $\lambda=193$  нм [13].

### СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ

На сегодняшний день накоплен значительный опыт по лазерной модификации керамических покрытий на основе ZrO<sub>2</sub>-7 %Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, покрытий системы Ni-Cr-B-Si, нанесенных с помощью технологий газотермического напыления, а также покрытий на основе порошковых композиций промышленного производства.

Лазерная модификация ГТП при использовании различных типов лазеров, режимов обработки и методов нанесения покрытий способна оказывать положительное влияние на их эксплуатационные свойства, а именно: микроструктуру, адгезионную прочность, износостойкость, коррозионную стойкость и микротвердость.

**Изменение структуры.** Использование Nd:YAG-лазера при обработке керамических покрытий при мощности лазерного излучения 0,4-3,0 кВт обеспечивает более высокую плотность покрытий, снижает дисперсность их структуры, в этом случае устраняются такие недостатки как высокая степень порообразования, количество пор снижается с 14,3 % до 2,5 % [6, 7]. ЛО керамических покрытий (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ПН 85-Ю-15) с использованием CO<sub>2</sub>-лазера также приводит к уменьшению порообразования примерно в 1,5 раза (рис. 2) [14, 15].

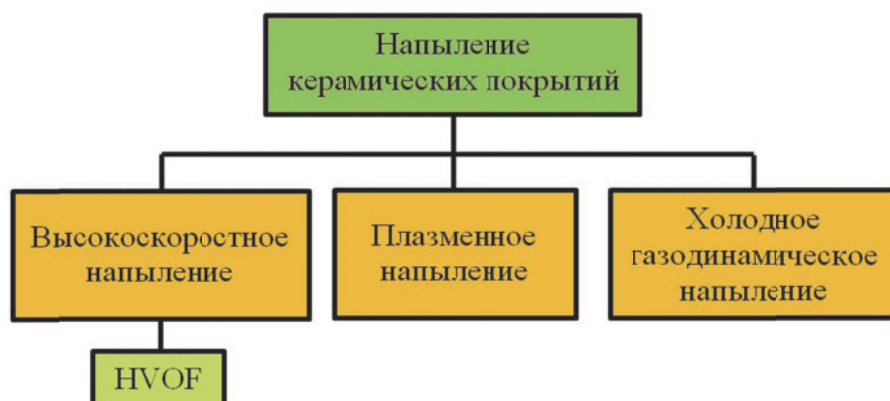
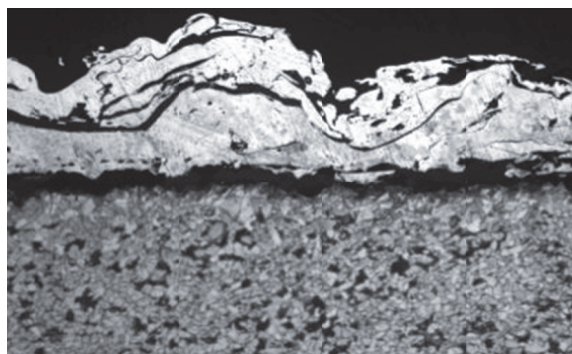
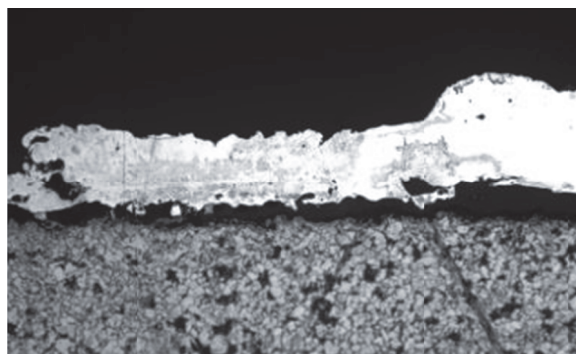


Рис. 1. Методы ГТН, используемые при создании керамических покрытий



– а –



– б –

**Рис. 2.** Изменение структуры плазменного покрытия на основе сплава ПН 85-Ю-15 [14]:

а – покрытие в исходном состоянии;

б – покрытие после лазерной обработки

Уменьшения порообразования можно добиться для покрытий, нанесенных методом ХГН, при оптимизации режимов лазерной обработки, но здесь стоит отметить, что оптимальные режимы для порошков фракций разного размера будут отличаться друг от друга [8].

В ряде случаев воздействие лазерного излучения приводит к изменению не только структуры и морфологии покрытия, но и к физико-химическим процессам на его поверхности. Так, например, наносекундная многократная ЛО излучением Nd:YAG-лазера керамики AlN при плотности энергии более 10 Дж/см<sup>2</sup> обуславливает ее разложение при нагреве и образование на поверхности алюминиевой пленки. Поскольку эксперименты проводятся на воздухе, на поверхности покрытия появляется окисная пленка, что придает ему дополнительную коррозионную стойкость [16]. Указанные изменения связаны с проходящей в процессе нагрева химической реакцией разложения AlN. По такому же принципу в работе [17] наблюдается снижение содержания углерода при лазерной обработке с поверхности керамического покрытия на основе карбида кремния. Для ЛО использовался импульсный Nd:YAG-лазер в режиме модуляции добротности с длительностью импульса 10 нс, частотой следования импульсов 120 Гц, средней мощностью 80 Вт.

В процессе проведения ЛО с использованием непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера при вариации мощности лазерного излучения от 100 до 1300 Вт и скорости сканирования от 2 до 6 мм/с покрытий KR85B и KR85C (оксидные покрытия на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 83 и 85 % соответственно) было установлено, что распределение напряжений в продольном направлении (относительно движения луча) менее критично к началу процесса трещинообразования, чем распределение напряжений в поперечном направлении или по глубине. Распределение напряжений в большей степени зависят от мощности лазера, нежели от скорости сканирования [9].

ЛО в вакууме с использованием эксимерного лазера ArF (30 нс) поликристаллических спеченных покрытий Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при плотности энергии близкой к порогу абляции позволила уменьшить шероховатость с исходного значения Ra0,31±0,04 до величины Ra0,24±0,02 [13]. А при оптимизации условий ЛО была получена гладкая аморфная поверхность с очень низким содержанием трещин и изъянов, вредных для трибологических применений.

Подобные изменения в микроструктуре покрытия наблюдаются за счет повторного быстрого нагрева и переплава материала покрытия с последующим быстрым охлаждением.

#### **Адгезионная прочность и износостойкость.**

Прирост адгезионной прочности покрытия на основе оксида циркония, полученного плазменным напылением, наблюдается после лазерной обработки излучением Nd:YAG-лазера (энергия импульса до 55 Дж, длительность импульса 4 мс). Испытаний на разрыв показали, что адгезионная прочность увеличивается с 8,03 МПа (покрытие в исходном состоянии) до 14,97 МПа (после ЛО). При этом отмечается, что отрыв покрытия от подложки происходит в местах, где присутствуют нерасплавленные в процессе напыления частицы напыляемого материала [6].

При лазерной обработке покрытий на никелевой основе ПГ-СР4, ПГ-СР3 и ПГ-СР2 удалось добиться переплава материала подложки и материала покрытия, при плотности мощности 90-100 кВт/см<sup>2</sup> и скорости сканирования 1 мм/с происходит интенсивное растворение основы и проникновение ее частиц в материал покрытия (рис. 3). Авторы [18] считают, что такой эффект переплава покрытия и основы ведет к равномерному распределению остаточных напряжений, т.к. уменьшается градиент свойств в области оплавления материала подложки и покрытия. В месте с этим также отмечается, что эффект переплава материала покрытия и основы может увеличить адгезионную прочность покрытия и основы.

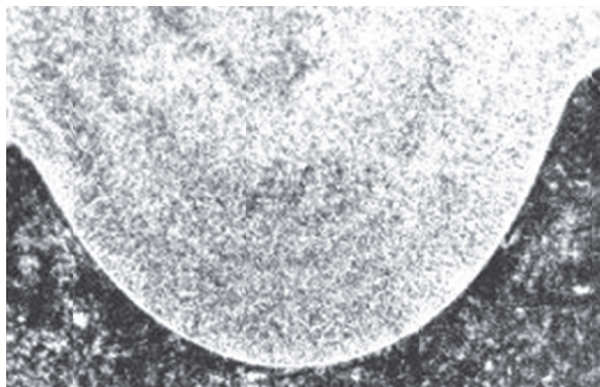


Рис. 3. Внедрение покрытия в материал основы [18]

Несмотря на то, что при лазерном перегреве покрытия возможно появление значительных трещин и пузырей в области лазерной обработки, трибологические испытания по схеме «штифт-диск» без смазки показывают значительный прирост износостойкости керамического покрытия на основе  $ZrO_2$  в 4-5 раз (рис. 4). При этом происходит изменение механизма изнашивания материала покрытия. Если основным механизмом изнашивания покрытий, полученных в результате плазменного напыления, является растрескивание покрытия, то для покрытий после лазерного переплава преобладает абразивный износ.

Изменение адгезионной прочности керамических покрытий наблюдается, главным образом, за счет уменьшения порообразования после ЛО, а также за счет дополнительного переплава металла покрытия и основы и интенсивного перемешивания материалов подложки и покрытия. Повышение микротвердости поверхности покрытия и уменьшение порообразования обуславливают рост их износостойкости.

**Микротвердость и коррозионная стойкость.** Лазерная обработка покрытий из порошковых композиций промышленного производства (на

основе Ni, Cr, Fe, порошков ПР-Х18Р9, ПН 85-Ю-15, Ni ПНК-УТ-1 и ПТОМ-1, самофлюсующихся сплавов ПГ-10Н-01 и РГ-12Н-1,  $Al_2O_3$ ), наносимых на подложки, как правило, с помощью методов плазменного или HVOF напыления [2, 3, 10, 11, 19, 20,] позволяет получать более высокую микротвердость данных покрытий, обеспечивает рост коррозионной стойкости и более однородную микроструктуру. Так, например, при ЛО с использованием непрерывного  $CO_2$ -лазера (мощность излучения 400 Вт, скорость сканирования 6,5 мм/с) в режиме без оплавления наблюдалось повышение микротвердости по глубине покрытия до HV1400-1800 при исходной микротвердости HV1100-1250 [11].

При лазерной постобработке покрытия  $Cr_3C_2$ -25%NiCr с помощью диодного лазера с длиной волны 807 нм при вариации мощности от 100 до 200 Вт и скорости сканирования от 2 до 8 мм/с удалось добиться повышения микротвердости покрытия до HV1032 при микротвердости в исходном состоянии HV800 [4].

При сравнении эксплуатационных свойств покрытия Co-Cr-W (Stellite 6), нанесенного методом HFOV, в исходном состоянии и после лазерной модификации, отмечено, что после ЛО микротвердость покрытия снижается на 10-20 %, но в месте с этим наблюдается повышение модуля упругости на 10-20 %. Данный эффект связывается с перестройкой кристаллической решетки Co-фазы в процессе ЛО [3].

Процесс дополнительной термообработки, в частности объемной, оказывает существенное влияние на коррозионную стойкость покрытий, полученных методом ГТН. Примером служат испытания на коррозионную стойкость в 0,1М-растворе соляной кислоты покрытий на основе Ni (Ni-32Mo-15Cr-3Si-2Co), полученных методом HVOF. Перед проведением испытаний образцы с покрытием шлифовались до Ra0.5, очищались ультразвуком и обезжиривались ацетоном с целью удаления тонкого оксидного

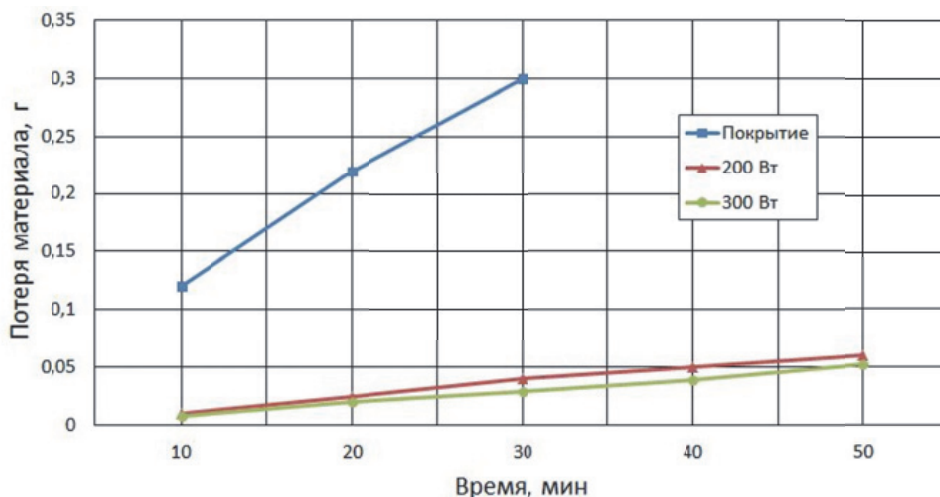


Рис. 4. Изменение износостойкости [6]

слоя [12]. Для покрытий после термообработки (нагрев до 600°C со скоростью 15 °C/мин, выдержка 1ч и охлаждение в печи) установлено снижение плотности тока коррозии более чем в 10 раз, что свидетельствует об уменьшении скорости коррозии и повышении срока эксплуатации покрытий. Аналогичное влияние на коррозионную стойкость покрытий на Ni основе оказывает воздействие сильноточным электронным пучком [21].

В ряде исследований отмечается, что непрерывная ЛО керамических покрытий оказывается гораздо предпочтительнее импульсной, поскольку обеспечивает более равномерное распределение физико-механических свойств покрытия [11]. При импульсной лазерной постобработке керамических покрытий наиболее вероятно образование трещин, вследствие высоких градиентов температуры в зоне обработки. При непрерывной ЛО этот процесс менее выражен. Следовательно, предпочтительным является более длительное время обработки.

Покрытия CoCrTaAlCSiY относятся к классу стеллитов и являются новым объектом в области газотермического напыления покрытий, и с этой точки зрения интересно изучение их свойств после лазерной обработки. Стеллиты – твердые сплавы – на основе кобальта и хрома находят широкое применение благодаря своим превосходным коррозионным и износостойким свойствам. Особенно хорошо известны и достаточно хорошо исследованы стеллиты на основе композиции Co-Cr-W. Лазерная обработка с использование мощного диодного лазера позволяет улучшить адгезионное сцепление этого типа покрытия и подложки, уменьшить пористость и увеличить его микротвердость примерно на 25-30 % (рис. 5) [5], что характерно и при лазерной

постобработке широкого класса керамических покрытий.

Изменение микротвердости покрытий, главным образом, связано с технологией лазерной термообработки, практической реализацией быстроспротекающих процессов структурообразования и стабилизацией высокодисперсных и прочных фаз в зоне лазерной обработки. Образование структур высокой плотности, низкой пористости обуславливают высокую твердость покрытий после лазерной обработки и существенное повышение их коррозионной стойкости.

## ВЫВОДЫ

Анализ исследований в области лазерной обработки керамических покрытий различного назначения независимо от способов их создания с применением лазерных источников различного типа говорит о перспективности данного метода для повышения эксплуатационных характеристик покрытий. Об этом свидетельствуют следующие результаты, в частности:

1. ЛО керамических покрытий позволяет увеличить микротвердость газотермических покрытий на 25-40%, уменьшить порообразование в 2-4 раза, увеличить адгезионную прочность покрытия и металлической основы, повысить коррозионную стойкость покрытий более чем на 50 %, а износостойкость в 4-5 раз, позволяет целенаправленно регулировать распределение и величину остаточных напряжений;

2. Наиболее целесообразна лазерная постобработка керамических покрытий с оплавлением поверхности. Такой режим работы обуславливает повышение эксплуатационных характеристик покрытий. При этом необходимо тщательно подбирать режимы ЛО, т.к. перегрев

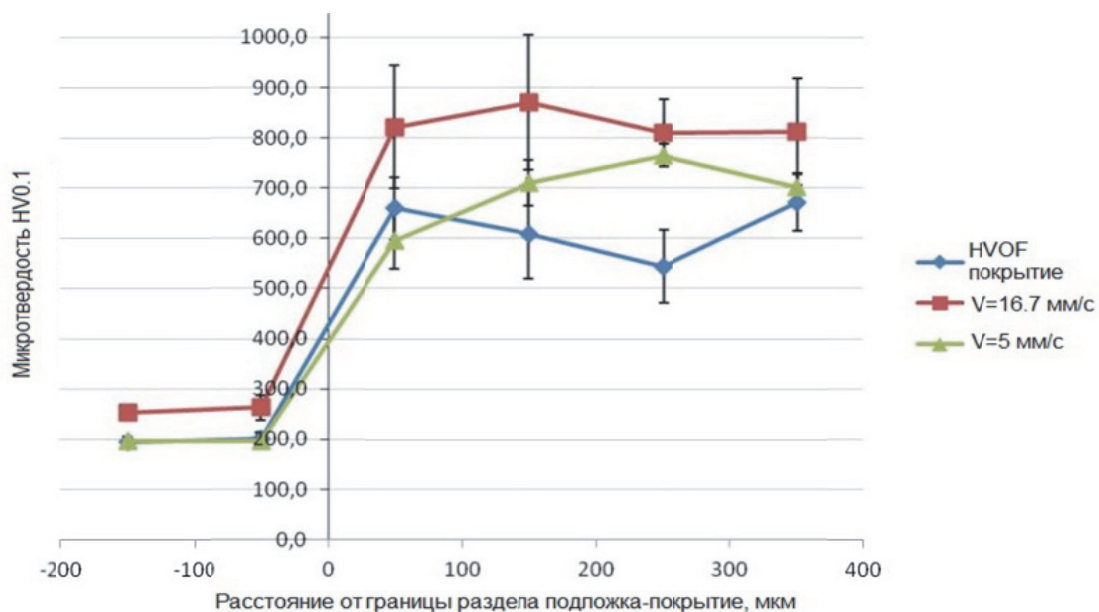


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине покрытия

поверхности при ЛО может привести к ухудшению названных выше эксплуатационных характеристик;

3. Для керамических покрытий предпочтительнее применять непрерывную лазерную обработку, в этом случае достигается более равномерное распределение физико-механических свойств покрытия.

Следует также отметить, что, большое количество работ, опубликованных за последние годы в данной предметной области исследования, является показателем значительного роста интереса к теме лазерной модификации поверхности покрытий, в том числе и керамических, полученных методами ГТН. Это свидетельствует о перспективности данного способа модификации керамических ГТП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Л.Х. Балдаев [и др.], под общ. ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344с.
2. Девойно, О.Г. Модифицированные поверхности покрытий с использованием лазерного нагрева / О.Г. Девойно, А.С. Калиниченко, М.А. Кардаполова. – Минск: БНТУ, 2013. – 230 с.
3. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings / Š. Houdková, Z. Pala, E. Smazalová et al. // Surf. Coat. Technol. – 2017. – V.318. – PP.129-141. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.012
4. Surface modification of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara et al. // Vacuum. – 2006. – V.80(11-12). – PP.1400-1405. doi:10.1016/j.vacuum.2006.01.070
5. Glanc A., Houdková Š., Vostřák M. Microstructure and tribological behavior of HVOF sprayed and laser treated CoCrTaAlSiY coatings // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – V.461, №1. – PP.012021. doi:10.1088/1757-899X/461/1/012021
6. Fu Y., Batchelor A.W., Xing H., Gu Y. Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO<sub>2</sub> coatings // Wear. – 1997. – V.210, №1-2. – PP.157-164. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00058-6
7. Шелягин, В.Д. Лазерная модификация плазменнонанесенных покрытий / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, А.П. Грищенко и др. // Вісник двигунобудування. – 2009. – №2. – С.69-72.
8. Шишковский, И.В. Лазерная постобработка Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni композитных покрытий, нанесенных с помощью холодного газодинамического напыления / И.В. Шишковский, П.А. Подрабинник // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №5. – С.39-42.
9. Triantafyllidis D., Li L., Stott F.H. Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment // Surf. Coat. Technol. – 2006. – T.201. – №6. – С.3163-3173.
10. Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwiński, M.S. Węglowski, J. Dworak et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – V.1140. – №1. – PP.012054. DOI:10.1088/1757-899X/1140/1/012054
11. Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / Al Harbi N., Y Benyounis K., Looney L., and Stokes J. // In book: Encyclopedia of Smart Materials. – Publisher: Elsevier, 2018
12. Bolelli G., Lusvardi L., Barletta M. Heat treatment effects on the corrosion resistance of some HVOF-sprayed metal alloy coatings // Surf. Coat. Technol. – 2008. – V.202. – №19. – PP.4839-4847. https://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.074
13. Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti et al. // Applied Surface Science. – 2000. – T.154. – С.682-688.
14. Митрофанов, А.А. Модифицирование газотермических покрытий воздействием излучения СО<sub>2</sub>-лазера / А.А. Митрофанов, Е.А. Чашин, С.А. Балашова, А.Х. Харахашев // Advanced Engineering Research. – 2014. – Т.14. – №3(78). – С.103-110.
15. Митрофанов, А.А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения / А.А. Митрофанов, Е.А. Чашин, С.А. Балашова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – №1. – С.103-105.
16. Laser-induced periodic structure formation in AlN ceramic / N.N. Nedyalkov, A. Dikovska, R. Nikov et al. // Opt. Laser Technol. – 2021. – T.144. – С.107402.
17. Surface modification of ceramic matrix composites induced by laser treatment / S. Costil, S. Lukat, C. Langlade, C. Coddet // Applied Surface Science. – 2008. – T.255. – №5. – С.2425-2432.
18. Спиридонов, Н.В. Влияние лазерной обработки на структурно-фазовый состав напыленных Ni-Cr-B-Si-покрытий / Н.В. Спиридонов, И.О. Соколов, А.В. Кудина // Наука и техника. – 2007. – №3. – С.22-25.
19. Девойно, О.Г. Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко // Наука и техника. – 2017. – № 3. – С.249-255.
20. Балашова, С.А. Повышение эксплуатационных характеристик керамических покрытий / С.А. Балашова, Е.А. Чашин, И.В. Шилов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т.2. – №1. – С.73-80.
21. Погребняк, А.Д. Характеристики и свойства защитных покрытий на основе Ni-Cr и Co-Cr после обработки концентрированными потоками энергии / А.Д. Погребняк, Ш.М. Рузимов, О.П. Кульментьева и др. // Физическая инженерия поверхности. – 2005. – Т.3. – № 3-4. – С.158-189.

## LASER MODIFICATION OF CERAMIC GAS-THERMAL COATINGS

© 2024 S.I. Yaresko<sup>1,2</sup>, I.A. Antoshin<sup>2</sup><sup>1</sup>Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

The possibilities of laser processing (LP) as a promising method of post-treatment of ceramic coatings, which allows to achieve a significant increase in their performance characteristics, are considered in the work. Data on the implementation of this method in the processing of ceramic coatings applied using gas thermal spraying (GTN) technologies using various laser equipment are presented. It has been established that LP has a significant effect on the microstructure of ceramic gas-thermal coatings (GTP), provides a higher density, reduces dispersion and porosity by 2-4 times, and allows you to regulate the distribution and value of residual stresses. It is shown that with the help of LP, it is possible to improve the performance characteristics of coatings, increase microhardness by 25-40%, increase the adhesive strength of the coating and the metal base, wear resistance and corrosion resistance. The data testifying to the ambiguity of the influence of LP modes during post-processing of ceramic coatings on their properties and the inadmissibility of excessive melting of the surface are presented.

Key words: laser radiation, ceramic coating, microstructure, wear resistance, microhardness, corrosion resistance, pore formation, residual stresses

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-281-288

EDN: JCTWGO

## REFERENCES

- Baldaev, L.H. Gazotermicheskoe napylenie: ucheb. posobie / L.H. Baldaev [i dr.], pod obshch. red. L.H. Baldaeva. – M.: Market DS, 2007. – 344s.
- Devojno, O.G. Modificirovannye poverhnosti pokrytij s ispol'zovaniem lazernogo nagreva / O.G. Devojno, A.S. Kalinichenko, M.A. Kardapolova. – Minsk: BNTU, 2013. – 230 s.
- Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings / Š. Houdková, Z. Pala, E. Smazalová et al. // Surf. Coat. Technol. – 2017. – V.318. – PP.129-141. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.012
- Surface modification of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara et al. // Vacuum. – 2006. – V.80(11-12). – PP.1400-1405. doi:10.1016/j.vacuum.2006.01.070
- Glanc A., Houdková Š., Vostřák M. Microstructure and tribological behavior of HVOF sprayed and laser treated CoCrTaAlC<sub>3</sub>SiY coatings // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – V.461, №1. – PP.012021. doi:10.1088/1757-899X/461/1/012021
- Fu Y., Batchelor A.W., Xing H., Gu Y. Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO<sub>2</sub> coatings // Wear. – 1997. – V.210, №1-2. – PP.157-164. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00058-6
- Shelyagin, V.D. Lazernaya modifikaciya plazmennonanesennyh pokrytij / V.D. Shelyagin, V.Yu. Haskin, A.P. Grishchenko i dr. // Visnik dvigunobuduvannya. – 2009. – №2. – S.69-72.
- Shishkovskij, I.V. Lazernaya postobrabotka Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni kompozitnyh pokrytij, nanesennyh s pomoshch'yu holodnogo gazodinamicheskogo napyleniya / I.V. Shishkovskij, P.A. Podrabbinnik // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2015. – №5. – S.39-42.
- Triantafyllidis D., Li L., Stott F. H. Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment // Surf. Coat. Technol. – 2006. – T.201. – №6. – S.3163-3173.
- Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwiński, M.S. Węglowski, J. Dworak et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – V.1140. – №1. – PP.012054. DOI:10.1088/1757-899X/1140/1/012054
- Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / Al Harbi N., Y Benyounis K., Looney L., and Stokes J. // In book: Encyclopedia of Smart Materials. – Publisher: Elsevier, 2018
- Bolelli G., Lusvarghi L., Barletta M. Heat treatment effects on the corrosion resistance of some HVOF-sprayed metal alloy coatings // Surf. Coat. Technol. – 2008. – V.202. – №19. – PP.4839-4847. https://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.074
- Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti et al. // Applied Surface Science. – 2000. – T.154. – S.682-688.
- Mitrofanov, A.A. Modificirovanie gazotermicheskikh pokrytij vozdejstviem izlucheniya CO<sub>2</sub>-lazera / A.A. Mitrofanov, E.A. Chashchin, S.A. Balashova, A.H. Harahashev // Advanced Engineering Research. – 2014. – T.14. – № 3(78). – S.103-110.
- Mitrofanov, A.A. Obrabotka gazotermicheskikh pokrytij s ispol'zovaniem lazernogo izlucheniya / A.A. Mitrofanov, E.A. Chashchin, S.A. Balashova // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2011. – №1. – S.103-105.
- Laser-induced periodic structure formation in AlN ceramic / N.N. Nedyalkov, A. Dikovska, R. Nikov et al. // Opt. Laser Technol. – 2021. – T.144. – S.107402.
- Surface modification of ceramic matrix composites induced by laser treatment / S. Costil, S. Lukat, C. Langlade, C. Coddet // Applied Surface Science. – 2008. – T.255. – №5. – S.2425-2432.
- Spiridonov, N.V. Vliyanie lazernoj obrabotki na strukturno-fazovyy sostav napylenykh Ni-Cr-B-Si-pokrytij / N.V. Spiridonov, I.O. Sokorov, A.V. Kudina // Nauka i tekhnika. – 2007. – №3. – S.22-25.
- Devojno, O.G. Issledovanie iznosostojkikh pokrytij iz diffuzionno-legirovannoj austenitnoj stali, poluchennykh

- plazmennym napyleniem i posleduyushchej lazernoj obrabotkoj / O.G. Devojno, A.F. Panteleenko // Nauka i tekhnika. – 2017. – № 3. – S.249-255.
20. Balashova, S.A. Povyshenie ekspluatacionnyh harakteristik keramicheskikh pokrytij / S.A. Balashova, E.A. Chashchin, I.V. Shilov i dr. // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – T.2. – №1. – S.73-80.
21. Pogrebnyak, A.D. Harakteristiki i svojstva zashchitnyh pokrytij na osnove Ni-Cr i Co-Cr posle obrabotki koncentrirovannymi potokami energii / A.D. Pogrebnyak, S.H.M. Ruzimov, O.P. Kulmenteva i dr. // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2005. – T.3. – № 3-4. – S.158-189.

---

Sergey Yaresko, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Laser-Induced Processes.

E-mail: yarsi54@gmail.com

Ilya Antoshin, Graduate Student.

E-mail: ilyaantoshin16@mail.ru