



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-61-65>  
УДК 543.39: 665.081

Поступила 09.07.2024  
Received 09.07.2024

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: [panteleyenkovfi@bntu.by](mailto:panteleyenkovfi@bntu.by)  
ЖЭН ПЕНЧЕН, компания Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd,  
г. Яньтай, Китайская Народная Республика. E-mail: [1572669241@qq.com](mailto:1572669241@qq.com)

В статье анализируется опыт компании Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd по нанесению защитных антикоррозионных полимерных покрытий и рассматриваются современные наиболее перспективные восстановительно-упрочнительные технологии газотермического напыления (PAPS, AS, HVOF, HVOF) и лазерной наплавки (LASC). Приведены примеры установок, которыми располагает компания, и типичных восстановленных деталей машин с защитными износ- и коррозионностойкими покрытиями, микроструктуры покрытий. Отмечены основные этапы типового технологического процесса нанесения покрытий. На примере компании отмечается целесообразность и эффективность развития данного направления в Китае.

**Ключевые слова.** Газотермическое напыление, наплавка, лазер, износостойкость, коррозионная стойкость, защитные покрытия.

**Для цитирования.** Пантелеенко, Ф. И. Прогрессивные технологии лазерной наплавки и газотермического напыления / Ф. И. Пантелеенко, Жэн Пенчен // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 61–65. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-61-65>.

## PROGRESSIVE TECHNOLOGIES OF LASER SURFACING AND GAS-THERMAL SPRAYING

F. I. PANTELEENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.  
E-mail: [panteleyenkovfi@bntu.by](mailto:panteleyenkovfi@bntu.by)  
ZHEN PENCHEN, Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd,  
Yantai, People's Republic of China. E-mail: [1572669241@qq.com](mailto:1572669241@qq.com)

The article notes the experience of Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd in applying protective anti-corrosion polymer coatings and discusses the most promising modern recovery and strengthening technologies of thermal spraying (PAPS, AS, HVOF, HVOF) and laser cladding (LASC). Examples of installations that the company has and typical restored machine parts with protective wear- and corrosion-resistant coatings and the microstructure of coatings are given. The main stages of a typical technological process for applying coatings are noted. Using the example of the company, the feasibility and effectiveness of the development of this area in China is noted.

**Keywords.** Gas thermal spraying, surfacing, laser, wear resistance, corrosion resistance, protective coatings.

**For citation.** Panteleenko F. I., Zhe Penchen. Progressive technologies of laser surfacing and gas-thermal spraying. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 3, pp. 61–65. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-61-65>.

Современные отрасли промышленности (энергетика, машиностроение, металлургия, горнодобывающая, химическая, нефтеперерабатывающая, авиационно-космическая и др.) характеризуются возрастанием основных параметров эксплуатации машин, механизмов, оборудования, инструмента и, как следствие, более интенсивных износа, коррозии, высокотемпературной деградации и разрушения деталей.

По официальным данным мировая экономика ежегодно теряет более 80 млрд долларов по причине износа и коррозии. Поэтому особую значимость приобретают эффективные технологии восстановления и повышения срока службы ключевых деталей, лимитирующих срок службы машин. При этом, как правило, восстанавливая геометрические параметры изношенных деталей нанесением покрытий, правильная реализация выбора способа нанесения и материала покрытия позволяет одновременно значительно повысить или придать новые свойства поверхности и в целом детали (прочность, износ-, коррозионно-, температуростойчивость и др.).

Компания Huaheng Energy имеет многолетний положительный опыт нанесения защитных антикоррозионных полимерных покрытий повышенной износостойкости с целью защиты крупногабаритных металлических конструкций от коррозии и эрозии в жидких средах, в том числе в морской воде, атмосфере. Покрытия в этом случае наносят на изделия любой геометрии с помощью специализированного оборудования.

Дополнительное использование перед нанесением основного покрытия специальных наноразмерных порошков позволяет значительно улучшить адгезию покрытий к поверхности и увеличить срок защитного действия покрытий, что подтверждено соответствующими 12 охраняемыми документами (патентами) и опытом практического применения конструкций с полимерными покрытиями.

На рис. 1 приведены примеры фрагментов некоторых конструкций с защитными полимерными антикоррозионными покрытиями.



Рис. 1. Примеры фрагментов некоторых конструкций с защитными полимерными антикоррозионными покрытиями круглых (а), плоских и сложных (б) форм

Одним из основных перспективных направлений решения проблемы повышения срока службы ключевых деталей машин и оборудования, лимитирующих их срок службы, является нанесение защитных покрытий как на изношенные, так и на новые детали напылением и наплавкой. Как известно из мировой практики, напылением и наплавкой наносят свыше 70% защитных покрытий [1].

Газотермические методы напыления (газопламенные, плазменные, детонационные и др.) позволяют получать покрытия практически из любых материалов (металлов и сплавов, керамики, полимеров, композиционных материалов), не вызывают значительного нагрева основы и, как следствие, значительных напряжений и деформаций.

Однако существенными их недостатками являются слабые адгезия, когезия и пористость покрытий. Поэтому газотермические покрытия рекомендуются преимущественно для работы в условиях напряжений сжатия и минимальных растягивающих, изгибающих, знакопеременных напряжений во избежание отслаивания покрытий.

Наплавленные, особенно полученные с помощью современных высокоэнергетических лазерных, электроннолучевых, плазменных источников, покрытия лишены этих недостатков и обеспечивают как необходимые эксплуатационные свойства, так и максимальные (металлургические) адгезию и когезию.

Чем более мощным и концентрированным по плотности тепловой энергии (например, при переходе от маломощного газопламенного к высокоэнергетическому лазерному) является способ наплавки, тем меньше зона высокотемпературного термического влияния на основной материал детали, тем меньше остаточные напряжения, деформации и поводки наплавляемой детали. Так, например, при газопламенной наплавке стальной детали требуется нагрев поверхности до температуры, близкой к температуре ее плавления, зона термического влияния измеряется миллиметрами или десятками миллиметров, возникают значительные нежелательные напряжения и деформации, требующие рихтовки деталей.

Технологически поэтому в связи с невозможностью нагрева поверхности до требуемых температур невозможна газопламенная наплавка крупногабаритных деталей. При лазерной наплавке зона термического влияния составляет сотые доли миллиметра и интенсивность нагрева столь велика и мала по времени, что габариты наплавляемых деталей не играют роли, как это имеет место в случае газопламенной наплавки.

Проведенное нами на основе функционально-стоимостного анализа основных параметров (максимальных температур, обеспечиваемых тепловым источником, высокой скорости полета частиц, хорошей

прочности сцепления покрытия с основой, пористости покрытий, производительности технологии, стоимости) сравнительное исследование показало следующее.

Среди методов газотермического напыления наиболее перспективными и предпочтительными для применения в реальном производстве являются Plasma Air Powder Spraying (PAPS), Arc Spraying (AS) High Velocity Air Fuell (HVAF), High Velocity Oxygen Fuell (HVOF). Безусловным лидером среди технологий наплавки следует признать лазерную наплавку Laser Air Surface Cladding (LASC).

Производство компании располагает всеми вышеназванными современными оборудованием и действующими технологиями. На рис. 2, 3 приведены примеры устройств для LASC-наплавки и HVAF-, HVOF-, PAPS-, AS-напыления.

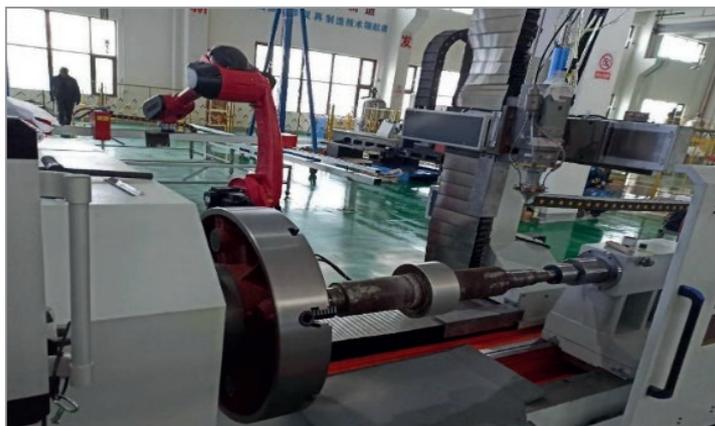


Рис. 2. Установка для лазерной LASC-наплавки

Важнейшим этапом реализации названных технологий является прежде всего тщательный анализ условий работы детали, причин выхода ее из эксплуатации, выбор материала покрытия и требуемой технологии его нанесения.

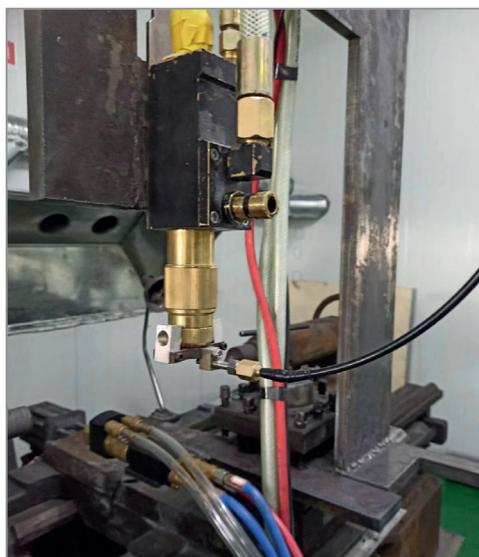


Рис. 3. Установка для HVAF-, HVOF-, PAPS-, AS-напыления

Выбор материала, его исполнения (порошок, пруток, электрод, проволока, шнур) должен гарантированно обеспечивать требуемые свойства материала покрытия (физические, механические, химические, эксплуатационные – износо-, жаро-, коррозионную стойкость и др.), технологичность нанесения в виде покрытия.

В настоящее время во многих странах, в том числе и в Китае, налажен промышленный выпуск широкого спектра различных материалов для получения покрытий, среди которых универсальностью обеспечиваемых свойств выгодно выделяются самофлюсующиеся порошки и проволоки, в том числе системы Ni-Cr-B-Si, порошки оксидной и безоксидной керамики, проволоки чистых металлов и сплавов для электродуговой металлизации, специальные порошки карбидов вольфрама или хрома в оболочке никеля или кобальта для HVOF- или HVAF-технологий.

Применительно к каждому типу деталей необходим выбор оптимальных технологических параметров нанесения покрытий (дистанции напыления или наплавки, скорости перемещения детали и напыляющей или наплавляющей головки, скорости подачи и расхода газа и наносимого материала для покрытия, силы тока и напряжения теплового источника и некоторых др.). Лучшим является вариант программного обеспечения оптимальных параметров нанесения покрытий при автоматизированной или роботизированной технологии.

В общем технологический процесс нанесения покрытий можно представить в виде следующих этапов:

- анализ состояния детали, причин вывода ее из эксплуатации (недопустимые износ, коррозия, кавитация и др.);
- выбор технологии и материала для восстановления детали и повышения ее эксплуатационных характеристик;
- подготовка восстанавливаемой поверхности точением, шлифованием, нарезанием «рваной» резьбы, удалением загрязнений, дробе- или пескоструйной очисткой, обезжириванием;
- подготовка наносимого материала покрытия (при необходимости);
- нанесение покрытия с учетом припуска на последующую механическую обработку в требуемый окончательный размер детали точением, шлифованием;
- оценка качества покрытия (визуально-измерительный контроль, твердометрия, при необходимости контроль микроструктуры и отсутствия внутренних дефектов в покрытии неразрушающими методами контроля);
- приемка восстановленной детали в эксплуатацию.

На рис. 4 в качестве примера представлены некоторые небольшие детали с напыленными по PAPS- и HVOF-технологиям (рис. 4, а, б) и наплавленными по LASC-технологии (рис. 4, в) покрытиями.

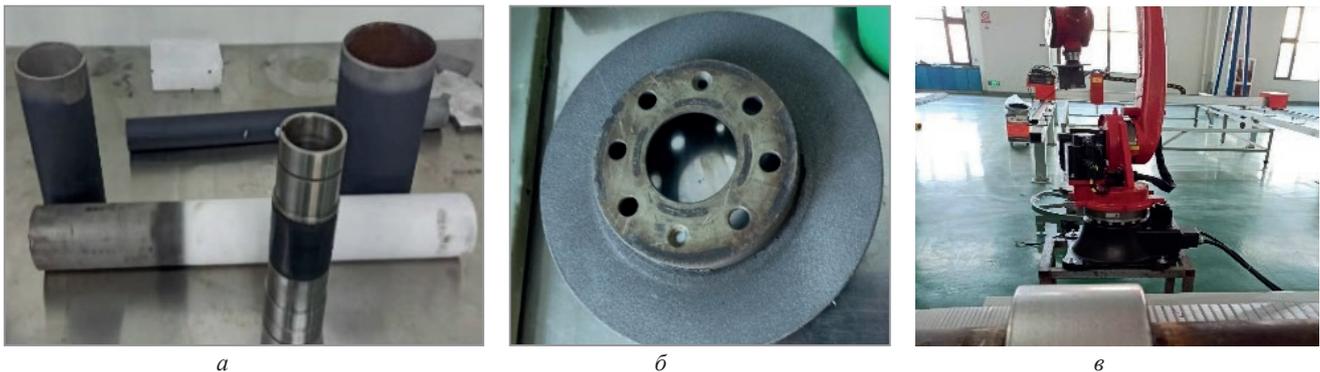


Рис. 4. Примеры некоторых небольших деталей с покрытиями:

а – напыленными по PAPS-технологии; б – напыленными по HVOF-технологии; в – наплавленные по LASC-технологии

При этом получены необходимые микроструктуры покрытий (рис. 5). Напыленные покрытия системы NiCrAlY (рис. 5, а) являются эффективной защитой деталей энергетических установок, работающих в условиях изнашивания, эрозии и высоких температур [4, 5].

В случае необходимости защиты поверхности деталей, работающих в условиях одновременного изнашивания и коррозии составов, эффективно применение лазерных наплавленных покрытий (рис. 5, б, в) из специального оригинального порошка [2, 3].

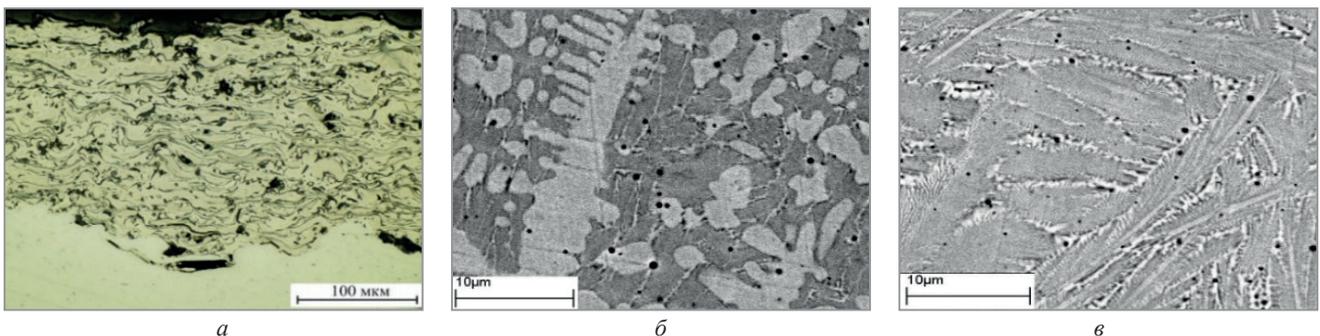


Рис. 5. Микроструктура покрытий напыленного из порошка системы NiCrAlY (а) и лазерного наплавленного из борсодержащего порошка аустенитной стали доэвтектического (б) и эвтектического (в) составов

В сферический порошок стали аустенитного класса дополнительно диффузионным путем вводится необходимое количество бора, который частично выполняет функции самофлюсования при наплавке, а, оставаясь в покрытии в заданном количестве, обеспечивает требуемую твердость и износостойчивость, не ухудшая при этом антикоррозионных свойств покрытия [2, 3]. В итоге это позволяет обеспечить высокую степень защиты от коррозии, а также значительно повысить износостойчивость деталей машин, работающих в условиях трения, регулировать твердость и износостойчивость предварительными параметрами обработки порошка.

Как показывает опыт, при правильном решении реализации технологии срок службы восстановленных деталей более чем в 2–3 раза выше. При этом стоимость восстановленной детали не превышает 30–65% стоимости новой детали [1].

Практика применения современных высокоэффективных технологий восстановления и упрочнения изношенных деталей машин в наиболее развитых странах мира выгодна и позволяет экономить значительные средства, материалы, сокращать вынужденные остановки машин на ремонт и замену изношенных деталей. Особенно высокоэффективно централизованное применение восстановительно-упрочнительных технологий в крупных индустриально развитых мегаполисах в специализированных компаниях, таких, как например, Huaheng Energy в Яньтае.

В настоящее время компания, располагая необходимыми современными оборудованием, материалами, квалифицированным персоналом, активно сотрудничает с предприятиями реального сектора экономики региона и готова решить проблемы реализации восстановительно-упрочнительных технологий. Технологическая и экономическая целесообразность развития данного направления очевидны.

Проведенные исследования и анализ современного состояния восстановительно-упрочняющих технологий показывают высокую эффективность и перспективность технологий лазерной наплавки и газотермического напыления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин / Ф.И. Пантелеенко [и др.], под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Способ получения самофлюсующегося порошка: пат. BY 17321 С1 / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, В.В. Оковитый, О.Г. Девожно, А.Ф. Пантелеенко. – Оpubл. 30.06.2013.
3. Coating Materials Characteristics for Plasma Treatment of Metals, through Diffusion Doping of Powders Based on Austenite Class Steels // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 843. – P. 141–144.
4. Современное применение металлокерамических покрытий на основе систем металл-хром-алюминий-иттрий (М-кролей) // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. Т. 3(74). – С. 72–81.
5. **Пантелеенко, Ф.И.** Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый. – Минск: БНТУ, 2019. – 231 с.

#### REFERENCES

1. **Panteleenko F.I., Ivanov V.P., Ljaljakin V.P., Konstantinov V.M.** *Vosstanovlenie detalej mashin* [Restoration of machine parts. Guide]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 672 p.
2. **Panteleenko F.I., Okovityj V.A., Okovityj V.V., Devojno O.G., Panteleenko A.F.** *Sposob poluchenija samofljusujushhegosja poroshka* [Method for producing self-fluxing powder:]. Patent BY 17321 S1, Opubl. 30.06.2013.
3. **Pantsialeynka F.I., Kuczumow A., Pantsialeynka A.F., Okovity V.A.** Coating Materials Characteristics for Plasma Treatment of Metals, through Diffusion Doping of Powders Based on Austenite Class Steels // Key Engineering Materials, 2019, vol. 843, pp. 141–146.
4. **Panteleenko F.I., Okovityj V.A., Devojno O.G. et al.** *Sovremennoe primenenie metallokeramicheskikh pokrytij na osnove sistem metall-hrom-aljuminij-ittrij (M-krolej)* [Modern application of metal-ceramic coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium (M-krol)]. *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija = Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2021, vol. 3(74), pp. 72–81.
5. **Panteleenko F.I., Okovityj V.A.** *Formirovanie mnogofunkcional'nyh plazmennyyh pokrytij na osnove keramicheskikh materialov* [Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials]. Minsk, BNTU Publ., 2019, 231 p.