

В.В. КАБАНОВ, В.С. РУДНЕВ, П.М. НЕДОЗОРОВ,  
Д.С. ПИВОВАРОВ, Н.И. ФЕДОСЕВИЧ, В.М. ДОЛГОРУК

## Композиционный способ наплавки. Оборудование, технология, примеры внедрения

*Представлены результаты исследования условий формирования зоны сплавления покрытия и основного металла в процессе лазерной обработки. Показана возможность минимизации тепловых деформаций при нанесении покрытий на детали оборудования химического и пищевого машиностроения, а также детали судовых механизмов. Даны характеристики разработанного оборудования и приведены примеры внедрения технологии.*

*Ключевые слова:* покрытия, плазменное напыление, лазерная обработка, сплавление, деформация, поверхностное модифицирование, ремонт деталей.

**Composite method of surfacing. Equipment, technology, examples of implementation.** V.V. KABANOV<sup>1, 2</sup>, V.S. RUDNEV<sup>1, 3</sup>, P.M. NEDOZOROV<sup>1</sup>, D.S. PIVOVAROV<sup>4</sup>, N.I. FEDOSEVICH<sup>1</sup>, V.M. DOLGORUK<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, <sup>2</sup>Plazmoavtomatika Ltd, Vladivostok, <sup>3</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, <sup>4</sup>Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

*The results of the study of the conditions of formation of the fusion zone of the coating and the base metal during laser processing are presented. The possibility of minimizing thermal deformations during coating deposition on the parts of chemical and food engineering, parts of ship's equipment are shown. The characteristics of the developed equipment and examples of technology implementation are given.*

*Key words:* coatings, plasma spraying, laser processing, alloying, deformation, surface modification, repair of parts.

### Введение

В машиностроении широкое применение находят металлические покрытия, получаемые методами газотермического напыления и наплавки. Эти же методы активно используются и при выполнении ремонтных работ, когда необходимо восстанавливать изношенные и поврежденные поверхности деталей машин и механизмов, сохраняя при этом геометрию неповрежденных участков и детали в целом [4]. С этой целью в производственных условиях чаще всего прибегают к ставшим уже традиционными методам наплавки в среде защитных газов, ручной наплавке покрытыми электродами, наплавке под флюсом. И каждый раз при применении этих технологий неизбежно сталкиваются с деформацией восстанавливаемой детали.

---

\*КАБАНОВ Виктор Виллович – кандидат технических наук, ведущий технолог (Институт химии ДВО РАН, Владивосток), директор (ООО «Плазмаавтоматика», Владивосток), РУДНЕВ Владимир Сергеевич – доктор химических наук, заведующий лабораторией, профессор (Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), НЕДОЗОРОВ Петр Максимович – кандидат химических наук, научный сотрудник, ФЕДОСЕВИЧ Наталья Ивановна – ведущий инженер, ДОЛГОРУК Василий Михайлович – ведущий инженер (Институт химии ДВО РАН, Владивосток), ПИВОВАРОВ Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник (Центр лазерных технологий Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: plasma55@mail.ru

Применение лазера в качестве инструмента для наплавки позволяет прецизионно и с высокой скоростью воздействовать на зону сплавления, однако и этот способ не всегда позволяет избежать нарушений геометрии изделия [2]. Более радикальными в этом плане являются методы газотермического напыления, но и они имеют недостатки: прочность сцепления покрытия с основой не всегда отвечает нужным требованиям [1].

Существенного повышения качества удается добиться при использовании самофлюсующихся материалов [4]. Прочность сцепления покрытия с основой при этом обеспечивается за счет оплавления покрытия. В качестве инструмента для оплавления в современной практике применяют индукционные установки, плазменные и газовые горелки. В результате оплавления создается биметаллическое изделие с четко очерченной границей раздела между изделием и покрытием.

Лазерный луч также активно применяется для оплавления покрытий [4]. Однако больший интерес представляет возможность его применения для формирования переходной зоны сплавления основы с покрытием, обеспечивающей плавный переход теплофизических и механических характеристик [6, 7]. В рассматриваемом способе газотермическое напыление и лазерный луч работают последовательно. Напылением на рабочую поверхность детали наносят металлическое покрытие заданной толщины, с минимальным припуском на последующие сплавление с основой и механическую обработку. Далее с помощью лазерного луча покрытие сплавляют с основой, обеспечивая при этом формирование переходного плотного слоя, создающего с деталью монолитное соединение. С этой целью лазерный луч пробивают через покрытие и проплавливают поверхность основного металла. При этом осуществляют формирование совместной зоны сплавления между материалом покрытия и основным металлом. Этим и отличается предлагаемая технология. Глубина сплавления определяется жестко контролируемыми оператором параметрами – мощностью и фокусировкой излучения лазера, скоростью движения луча относительно поверхности. Чистовая механическая обработка завершает процесс. В промежутке между сплавлением и механической обработкой желательно включать термический отпуск, снимающий остаточные внутренние напряжения в детали. Эта технология применима для различных видов наплавляемых материалов, однако в каждом случае необходима оптимизация технологических параметров обработки.

Для ремонтно-восстановительных работ, связанных с нанесением металлических покрытий, представляют интерес самофлюсующиеся порошковые материалы на основе никеля. Самофлюсующиеся материалы этой группы отличает относительно низкая чувствительность к формированию структурных дефектов при повышенных скоростях нагрева и охлаждения, характерных для лазерной обработки [3, 5, 6]. В России наиболее распространены порошки самофлюсов производства АО «Полема» (Россия) ([www.polema.net/userfiles/files/metal-powders.pdf](http://www.polema.net/userfiles/files/metal-powders.pdf)) и международного холдинга MEC Group – Messer Eutectic Castolin ([www.castolin.com](http://www.castolin.com)). Процесс сплавления покрытия с основой осуществляют одновременно с процессом флюсования в зоне плавления (ванна расплава). Скорость охлаждения ванны расплава при этом ограничивают, с одной стороны, условием обеспечения выхода образующихся шлаков на поверхность расплава (минимизация результирующей пористости) и условиями формирования заданной структуры металла, с другой – необходимостью снижения остаточных сварочных напряжений, возрастающих с увеличением объема сварочной ванны и уменьшением скорости движения лазера в процессе сплавления.

В настоящем сообщении представлены результаты исследований по подбору оптимальных условий восстановления деталей комбинированием методов плазменного напыления и лазерного сплавления с применением самофлюсующегося порошкового материала на никелевой основе.

## Экспериментальная часть

В качестве исходного материала покрытия для экспериментальных образцов выбран порошковый материал Eutalloy PE 10680: твердый сплав на никелевой основе, высоколегированный хромом и кобальтом и содержащий 50 % карбида вольфрама; твердость покрытия после оплавления – 190–230 НВ; интервал температуры плавления 1050–1280 °С; плотность 8,1 г/см<sup>3</sup>; производитель порошка – Castolin Eutectic (www.castolin.com). Данный материал после оплавления легко обрабатывается механическим путем, отличается высокой стойкостью к окислению при работе в условиях повышенных температур (максимальная температура эксплуатации 800 °С) и повышенной стойкостью наплавленной поверхности к образованию трещин и сколов.

Напыление покрытия осуществляли с помощью аргонового плазмотрона с межэлектродными вставками (МЭВ) ПН-21Р на установке ПЛ-04 (Россия), оснащенной блоком порошковых питателей 7103 (www.plasma-vl.ru). Толщина покрытия при этом составила 0,3–0,4 мм. Сплавление покрытия с основой произведено с помощью волоконного лазера ЛС-1-К (Россия). В результате проведенных экспериментов оптимизирован режим, обеспечивающий монолитное соединение покрытия с основой при минимальном объеме наплавленного металла на максимально возможной скорости (рис. 1).

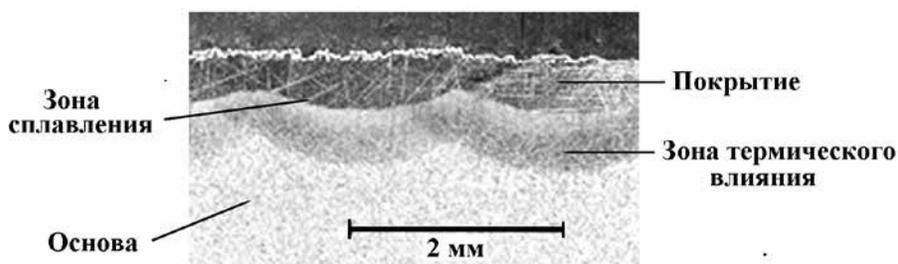


Рис. 1. Композитный материал, полученный сплавлением покрытия (Ni-Cr-Si-B, начальная толщина 0,3 мм) с основой (Ст 40Х). Мощность лазерного излучения 1 кВт, диаметр луча лазера на поверхности образца – 2 мм, скорость движения луча в процессе сплавления – 10 мм/с, расход защитного газа (аргона) – 25 л/мин

После обработки материала предлагаемым способом в нем отсутствуют поры, имевшие место после напыления порошка, ликвидированы и окислы, присутствовавшие на поверхности основы: в виде шлаков они вышли на поверхность оплавленного покрытия. Глубина зоны сплавления основа–покрытие контролируемо управляется изменением мощности излучения, фокусировкой лазерного луча, скоростью перемещения луча относительно изделия. Размеры же зоны термического влияния при этом минимальны по сравнению с традиционными способами наплавки.

На рис. 2 представлены фотографии шлифов и элементный состав характерных образцов материалов, полученных в ходе экспериментальной отладки режима лазерного сплавления покрытия.

Микрофотографии сечения покрытий и профили распределения концентрации элементов по сечению образцов получали и определяли на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 фирмы «JEOL» (Япония) с энергодисперсионной приставкой Oxford Instrument INCA-sight (Великобритания). При определении профилей распределения элементов зондирующий луч фокусировали на образце диаметром около 1 мкм. Глубина проникновения зондирующего луча в зависимости от материала покрытия составляла 2–5 мкм.

Для контроля процессов смещения металлов основы и покрытия, а также для выявления зон термического влияния лазерного луча при формировании конечных структур

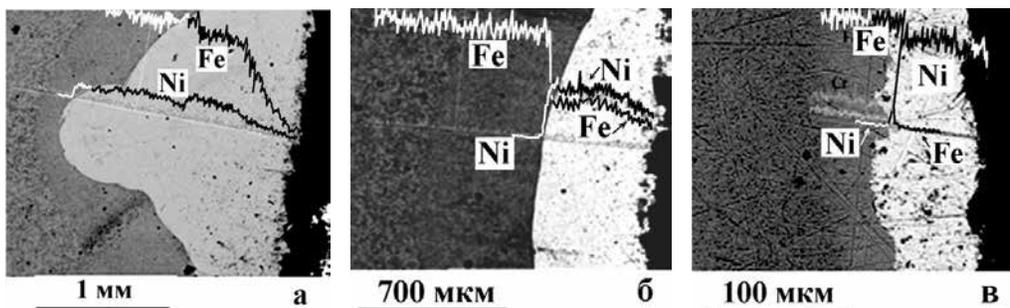


Рис. 2. Распределение элементов на поперечном сечении образцов, полученных при сплавлении покрытия (Ni-Cr-Si-B, начальная толщина покрытия 0,3 мм) с основой (Ст 40X). Мощность излучения – 1 кВт, диаметр луча на поверхности образца – 2 мм. Скорость движения лазерного луча: а – 10 мм/с, точка фокусировки лазерного луча приближена к поверхности образца на 25 мм относительно режимов «б» и «в»; б – 6 мм/с; в – 20 мм/с

проведены измерения микротвердости с помощью микротвердомера НМV-Gg20ST (Shimadzu, Япония). Измерения выполняли по точкам вдоль оси зоны проникновения луча через каждые 100 мкм, начиная с глубины 100 мкм от поверхности покрытия. Результаты измерений для трех характерных режимов сплавления представлены на рис. 3.

Как видно из представленных на рис. 2 микроснимков шлифов и соответствующих им на рис. 3 кривых изменения микротвердости, посредством управления скоростью перемещения лазерного луча, при заданных мощности и плотности излучения лазера на поверхности изделия можно управлять глубиной зоны сплавления и размерами зоны термического влияния. При сплавлении на малых скоростях (рис. 2, б) получаем интенсивное взаимное проникновение составляющих покрытия и основы. По всей глубине сварочной ванны формируется композит с равномерной твердостью (кривая б на рис. 3). Увеличение скорости лазерной обработки до 20 мм/с приводит к уменьшению объема зоны смешения материалов до минимума (рис. 2, в), но при этом увеличивается градиент по твердости в переходной зоне (кривая в на рис. 3). Увеличение скорости охлаждения препятствует выводу шлаков, образующихся в процессе флюсования, что влечет за собой увеличение пористости. Уменьшение глубины переходной зоны может неблагоприятно сказаться на прочности соединения вследствие концентрации напряжений на границе раздела основа–покрытие. Повышение концентрации лазерного излучения на поверхности приводит к интенсификации процессов смешения материалов подложки и покрытия (рис. 2, а), развитию закалочных структур по всей глубине сварочной ванны (кривая а на рис. 3). С увеличением объема расплавленного металла в этом режиме появляются существенные остаточные напряжения при последующем охлаждении, формируются зародыши трещин, что в конечном счете ведет к разрушению изделия.

Отлаженные в процессе выполнения данной работы режимы были реализованы при восстановлении деталей, представленных на рис. 4.

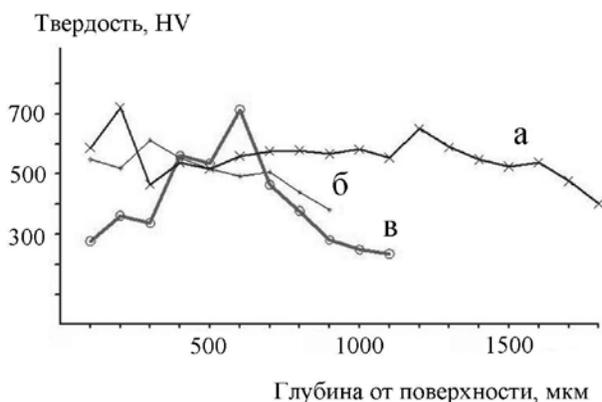


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине образца Ст 40X с покрытием. Мощность непрерывного излучения лазера – 1 кВт, диаметр луча на поверхности образца – 2 мм. а, б, в – скорости движения лазерного луча (режимы сплавления) 10, 6 и 20 мм/с соответственно

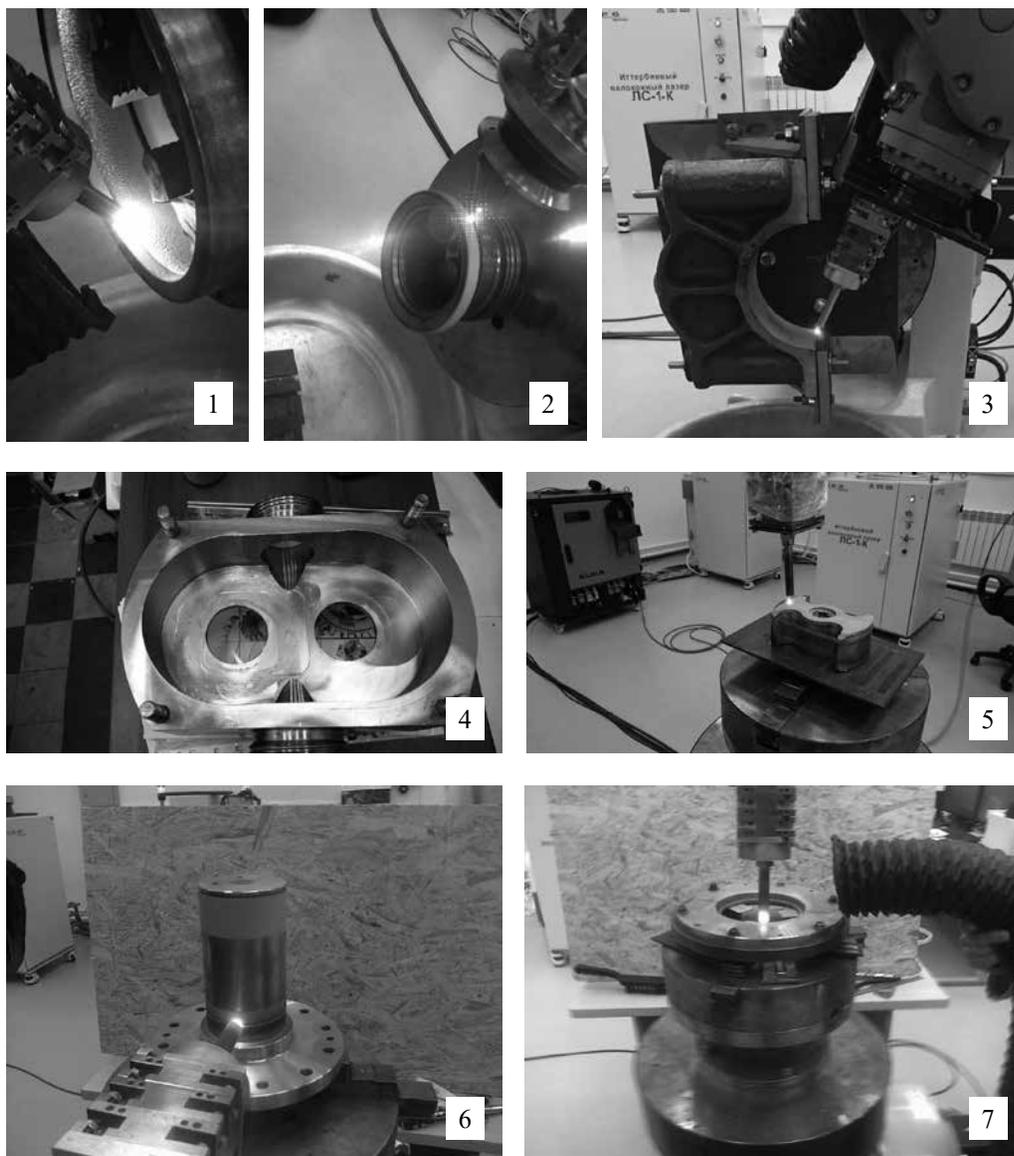


Рис. 4. Примеры реализации способа композиционной наплавки: 1 – кольцо проставочное (чугун в/п), 2 – седло клапана (Ст 40Х10С2М), 3 – подвеска (Ст 40ХН), 4, 5 – корпус (4) и ротор (5) насоса перекачки молока (Ст 17Х18Н9), 6, 7 – вал (6) и крышка (7) подшипникового щита редуктора турбины (Ст 40ХН)

## Заключение

Предлагаемый нами композиционный способ получения покрытий позволяет обеспечить гарантированное сплавление покрытия с основой с минимальными остаточными напряжениями. Его можно рекомендовать как для поверхностной модификации вновь изготавливаемых деталей с целью повышения противокоррозионной стойкости и получения заданных триботехнических характеристик, так и для ремонта деталей и узлов изделий химического и общего машиностроения, восстановление которых традиционными методами наплавки невозможно в связи с неизбежностью термических деформаций и потерей геометрии поверхностей, обработанных ранее с высокой точностью. Данный

способ пригоден также для обработки посадочных мест под подшипники для корпусов и валов турбин, генераторов, электрических двигателей, щитов подшипниковых, корпусов и роторов перекачивающих насосов. Для получения требуемых характеристик рекомендуется проведение контрольных плавок и соответствующих испытаний, по результатам которых можно создать режимы, гарантирующие получение заданных свойств и сохранение исходной геометрии изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 364 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
3. Донских С.А., Сёмин В.Н., Кремнёв В.А., Кремнёв Н.А., Котов В.Н. Воздействие режимов лазерного оплавления на адгезионную прочность клеевых покрытий системы железо-хром-бор-кремний // Междунар. журн. соц. и гуманитар. наук. 2016. Т. 2, № 1. С. 214–225.
4. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громько Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Белорус. наука, 2011. 357 с.
5. Спиридонов Н.В., Соколов И.О., Кудина А.В. Влияние лазерной обработки на структурно-фазовый состав напыленных Ni-Cr-B-Si-покрытий // Вестн. БНТУ. 2007. № 3. С. 22–25.
6. Способ получения покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов на стальных изделиях / Девойно О.Г., Пилипчук А.П., Кардаполова М.А., Тюнякин А.С., Волович В.И.: пат. 6599 РБ. С1 ВУ, МИК С 23С 4/18; заявл. 31.01.2001; опубл. 30.12.2004.
7. Devoino O.G., Panteleenko A.F. Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing // Sci. Techn. 2017. Vol. 16, N 3. P. 249–255.