

УДК 621.9.048.7

*Е.В. Земляков, Я. Туоминен,
Е.Ю. Поздеева, Г.А. Туричин, Е.А. Комарова*

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Для реализации технологий лазерной наплавки используются твердотельные, газовые и диодные лазеры мощностью от 3 до 6 кВт. Лазерная наплавка, как правило, применяется для обработки небольших деталей либо локальных участков крупногабаритных изделий в горнодобывающей, аэрокосмической, энергомашиностроительной и других отраслях промышленности. Постоянное развитие лазерной техники и технологии привело к появлению мощных лазеров, имеющих высокие КПД и коэффициент поглощения лазерного излучения металлическими материалами и при этом низкие эксплуатационные расходы. Использование волоконных, дисковых и диодных лазеров мощностью более 10 кВт позволяет значительно повысить производительность процесса лазерной наплавки, что является ключевым моментом для использования лазерной технологии при обработке крупногабаритных изделий. Использование существующих технологий лазерной наплавки для получения покрытий большой площади ограничено их низкой эффективностью. Конечные свойства покрытий и промышленная применимость лазерных технологий определяется не только уровнем мощности лазерного излучения, но и характеристиками дополнительного оборудования: сопел, устройств подачи материала, систем фокусировки и формирования лазерного луча. В статье представлены результаты экспериментальных исследований формирования поверхностных слоев при лазерной наплавке порошков, проволоки и лент с использованием лазерного излучения мощностью до 15 кВт.

Твердотельные, газовые и диодные лазеры мощностью 3–6 кВт, используемые в промышленности для восстановительной наплавки небольших областей, обеспечивают производительность процесса в диапазоне 1–2 кг/ч.

Основным стимулом к переходу от традиционных технологий получения покрытий (термическое напыление, дуговая наплавка) к лазерным служит более высокое качество получаемых покрытий, обусловленное низким коэффициентом перемешивания наплавляемого материала с материалом подложки при более высоких адгезионных характеристиках. Однако для нанесения покрытий большой площади в основном используются традиционные методы наплавки и напыления, обеспечивающие производительность процесса от 5 до 20 кг/ч и, соответственно, более высокую экономическую эффективность.

Получение функциональных покрытий большой площади актуально для широкого спектра отраслей тяжелой промышленности судостроения, энергетики, нефтегазовой и горнодобывающей отраслей, металлообрабатывающей, бумажной и других [1–4]. На сегодняшний день существуют примеры промышленного использования CO₂-лазера мощностью до 20 кВт при изготовлении и ремонте трубных панелей бойлеров электрогенераторов и массивных поршневых штоков для горнодобывающей и оффшорной индустрии* [5].

CO₂-лазеры долгое время были единственными лазерами, способными обеспечить такой высокий уровень мощности. Однако для CO₂-лазеров характерны низкие КПД и эффективность обработки, высокие эксплуатационные расходы, а также необходимость использования для транспортировки луча зеркального лучепро-

* Оффшорная индустрия охватывает нефтяные и газовые работы на шельфе (разведка месторождений, бурение скважин, установка стационарных или плавучих платформ, создание подводной инфраструктуры, прокладка трубопроводов, обслуживание нефтяных и газовых платформ), а также установку и обслуживание ветровых генераторов, дноуглубительные операции, проведение глубоководных работ, прокладку или ремонт кабелей и многое другое.

вода, что значительно снижает гибкость технологического процесса. В последнее время на рынке появились промышленные образцы мощных твердотельных (дисковых) и волоконных лазеров мощностью соответственно до 16 и 30 кВт, [6]. Кроме того, мощность диодных лазеров была увеличена до 15 кВт [7]. Эти типы лазеров обладают существенными преимуществами перед CO₂-лазерами: более высоким КПД; более высоким коэффициентом поглощения лазерного излучения металлами; возможностью транспортировки излучения по оптическому волокну; низкими эксплуатационными расходами. Очевидно, что использование новых типов лазеров позволит повысить производительность процесса наплавки [8, 9] и сделать лазерные технологии более эффективными.

Экспериментальные исследования

Основные эксперименты по лазерной наплавке проводились в Институте лазерных и сварочных технологий СПбГПУ на лабораторном стенде для лазерно-дуговой обработки, где используется волоконный лазер ЛС-15 мощностью 15 кВт. Лазерное излучение транспортировалось по волоконному кабелю к фокусирующей головке Precitec YW50 с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,6 мм. Встроенный в технологическую головку одномерный сканатор ILV DC обеспечивал развертку лазерного луча на поверхности мишени. Сканатор может работать в двух режимах, определяющих временную зависимость скорости колебания зеркала: синусоидальном и треугольном. В синусоидальном режиме работы предусмотрена возможность управления мощностью лазерного излучения. При этом траектория движения лазерного луча разбивается на 32 точки, в каждой из которой с помощью системы управления сканатором можно задать необходимый уровень мощности в диапазоне 0–100 % от максимального.

В ходе экспериментов наплавляемый материал подавался в зону лазерного воздействия в виде порошка, а также в виде присадочной проволоки. При лазерной порошковой наплавке со сканированием использовались как коаксиальное сопло, так и некоаксиальное. Наплавка осуществлялась на небольшие пластины (20×60×100 мм³) и стержни диаметром 100 мм и длиной 500 мм из низкоуглеродистых сталей (S235, S355). В качестве на-

плавляемых порошков использовались порошки на основе никеля (Inconel 625), кобальта (Stellite 6) и железа (3.33LC).

Лазерная наплавка с использованием присадочной проволоки проводилась на пластины из низколегированной конструкционной стали 09Г2С. Подача присадочной проволоки в зону лазерного воздействия осуществлялась с помощью стандартной дуговой горелки и сварочного полуавтомата ПДГО-601. В качестве наплавляемого материала при реализации данной схемы лазерной наплавки использовалась присадочная проволока из нержавеющей стали AISI 316L (Ø = 1,0 мм), а также жаропрочного сплава Инконель 625 (Ø = 1,6 мм).

Экспериментальная установка для лазерной порошковой наплавки со сканированием с использованием некоаксиального щелевого сопла показана на рис. 1, а. Сопло оснащено циклоном, предназначенным для разделения частиц порошка и транспортного газа и формирования гравитационного потока порошка к поверхности мишени. Щелевое сопло формирует поток порошка шириной около 20 мм (см. рис. 2, б). Однородность потока порошка к соплу обеспечивает дисковый питатель Medicoat AG. Образцы перемещались относительно технологической головки с помощью двухкоординатного стола. Для наплавки на цилиндрические образцы дополнительно использовался вращатель. В качестве коаксиального сопла для лазерной наплавки со сканированием использовалось сопло COAX 11 (см. рис. 1, б), разработанное и изготовленное в Институте материалов и лучевой техники (Fraunhofer IWS, Дрезден, Германия) для наплавки с помощью диодных лазеров мощностью 8–10 кВт.

Структура потока порошка анализировалась с использованием теневого (шлирен) метода.

Наплавляемый материал может подаваться в зону лазерного воздействия также в виде лент, в том числе порошковых. При использовании лазерного излучения высокой мощности со сканированием или другими способами формирования лазерного пятна заданной геометрии этот метод весьма перспективен [10].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, а представлен поперечный макрошлиф одиночного валика, полученный способом порошковой наплавки сплава Inconel

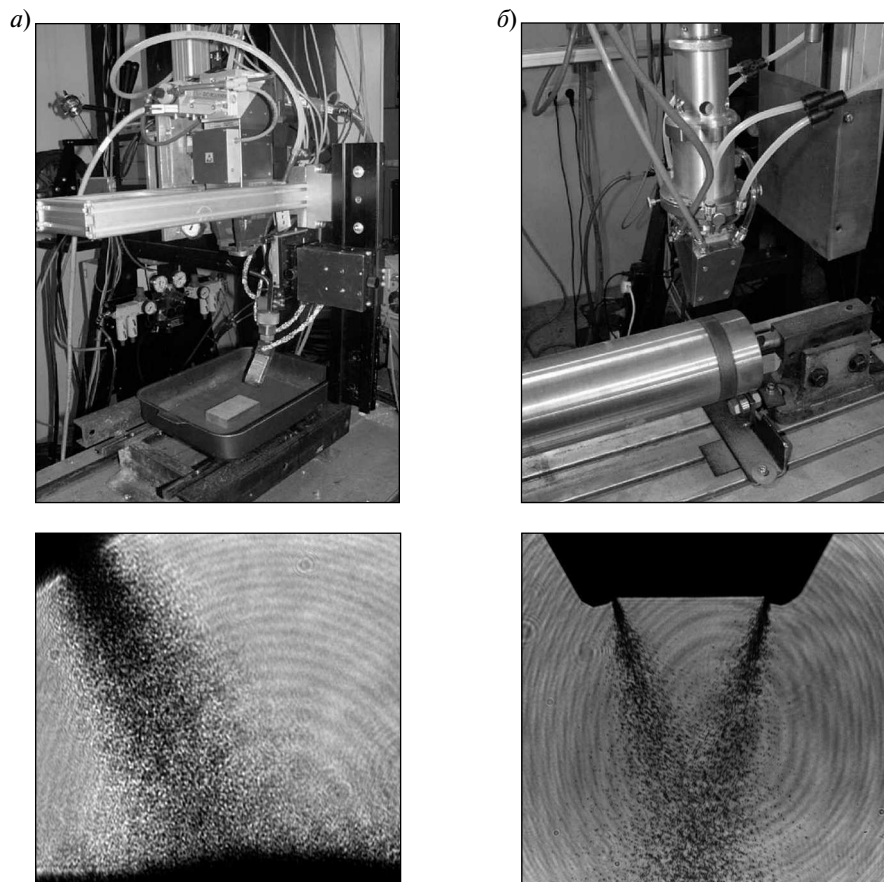


Рис. 1. Экспериментальная установка для лазерной порошковой наплавки со сканированием:

a — с некоаксиальным щелевым соплом; *b* — с коаксиальным соплом COAX 11

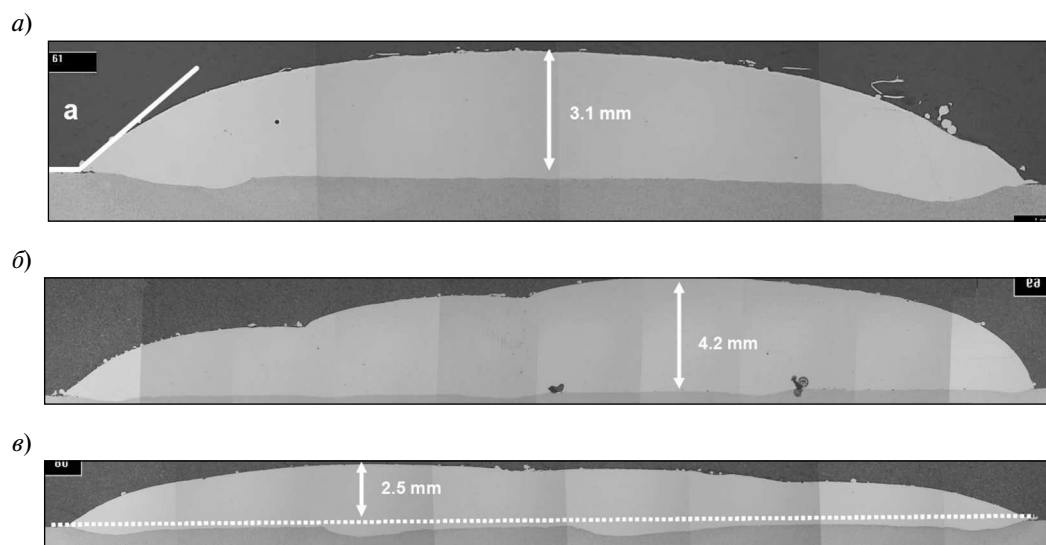


Рис. 2. Макрошлиф наплавленного слоя (Inconel 625):

a — одиночный валик; *b* — сплошное покрытие (три одиночных валика с перекрытием 9 мм); *c* — сплошное покрытие (три одиночных валика с перекрытием 10 мм), скорость перемещения — 1000 мм/мин

625 на плоский образец с использованием некоаксиального щелевого сопла при следующих технологических параметрах: мощность лазерного излучения — 15 кВт; скорость перемещения образца — 750 мм/мин; расход порошка — 295 г/мин. Лазерный луч был расфокусирован до диаметра 5 мм и сканировался с частотой 100 Гц и амплитудой 20 мм. Сканирование осуществлялось в «треугольном» режиме работы сканатора. Эти технологические параметры обеспечили производительность процесса около 14 кг/ч при эффективности использования порошка 77 %. Перемешивание наплавляемого материала с материалом подложки металла основы составило 3 % и было вызвано в основном перегревом металла в поворотных точках сканирования.

На рис. 2, б показан пример формирования сплошных покрытий при последовательной наплавке одиночных валиков с перекрытием. Сплошные покрытия также наплавлялись при скорости перемещения образца 750 мм/мин. Расход порошка был увеличен до 315 г/мин. Коэффициент перемешивания при этом составил 4 %, производительность наплавки — 15,6 кг/ч, эффективность использования порошка — 79 %.

На макрошлифе сплошного покрытия в зоне перекрытия валиков были обнаружены неметаллические включения (окислы) (см. рис. 2, б). При увеличении скорости перемещения образца до 1000 мм/мин, а величины перекрытия до 10 мм уменьшилась толщина покрытия и исчезли неметаллические включения (см. рис. 2, в).

Содержание железа в этих слоях было 1,8 (рис. 2, б) и 4 масс. % (рис. 2, в). Рентгено-спектральный анализ покрытия с большей толщиной показал равномерность распределения железа по всему поперечному сечению образца.

Основной целью проведения экспериментов по лазерной наплавке на цилиндрические образцы было получение информации о нагреве сопла и оптических элементов фокусирующей головки отраженным лазерным излучением при продолжительных технологических операциях. Продолжительность одного эксперимента в среднем составляла 6 минут при мощности лазерного излучения от 10 до 15 кВт. Во время экспериментов перегрев сопла и оптики не наблюдался, несмотря на высокий уровень отра-

женного от ванны расплава лазерного излучения, характерный для лазерной наплавки. Для снижения негативного влияния отраженного лазерного излучения на технологический инструментарий во время экспериментов сопло было смещено на 10 мм относительно оси цилиндрического образца (см. рис. 3, а). В качестве наплавляемого материала в этом эксперименте использовался порошок на основе кобальта (Stellite 6). Наплавка проводилась с использованием некоаксиального сопла при следующих режимных параметрах: мощность лазерного излучения — 12,5 кВт, линейная скорость вращения образца — 750 мм/мин; расход порошка — 170 г/мин; величина перекрытия — около 8 мм. Микротвердость полученного покрытия составила 500 HV₅. Поперечное сечение центральной части покрытия показано на рис. 3, а.

На рис. 3, б показано покрытие, полученное при лазерной наплавке порошка на основе железа (3.33LC) с использованием коаксиального сопла. Наплавка проводилась при следующих режимных параметрах: максимальная мощность лазерного излучения — 15 кВт (средняя мощность — 10,7 кВт); линейная скорость вращения образца — 500 мм/мин; расход порошка — 186 г/мин; величина перекрытия — около 5 мм. Сканатор работал при этом в синусоидальном режиме. Для снижения перегрева металла в поворотных точках при сканировании использовалась функция контроля мощности, что позволило избежать чрезмерного подплавления основного материала в точках остановки лазерного луча (см. рис. 3, б). Однако при использовании функции управления мощностью заметно снизилась производительность процесса наплавки по сравнению с результатами, полученными без регулировки мощности. Но при этом, благодаря используемой программе управления мощностью лазерного излучения, задающей в крайних точках линии сканирования нулевую мощность, а в нескольких точках вдоль линии сканирования — значения менее 100 % от максимальной мощности, энергетическая эффективность процесса значительно выше, чем в опытах без регулировки мощности.

Металлографический анализ одиночных валиков и сплошных покрытий, полученных при лазерной наплавке присадочной проволоки, показал, что все покрытия характеризуются высо-

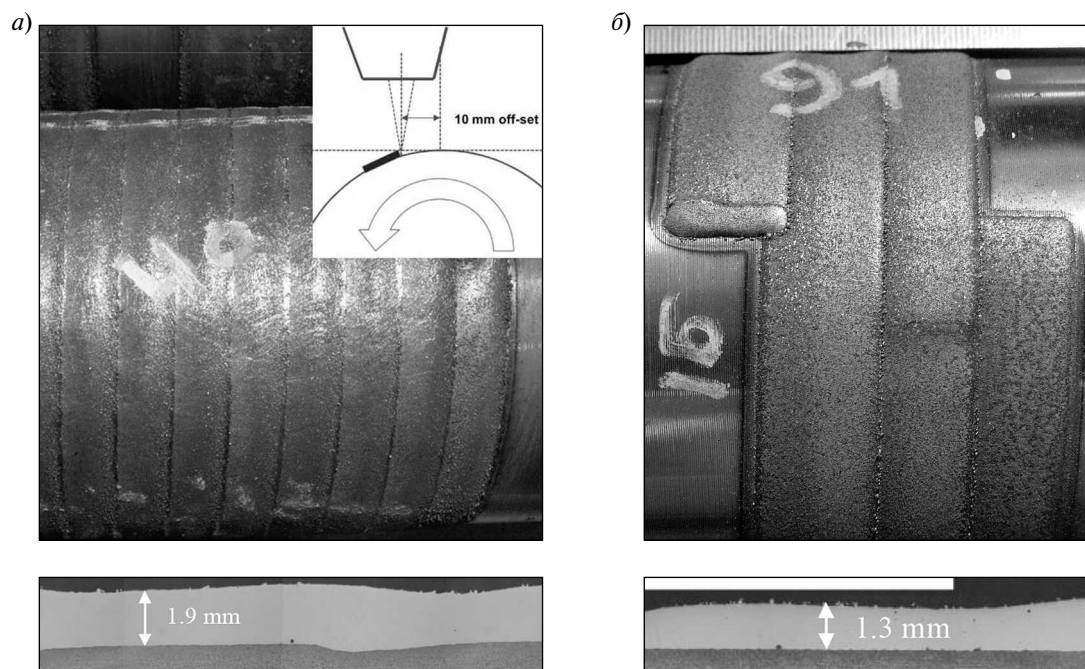


Рис. 3. Сплошные покрытия, полученные при лазерной наплавке порошков на основе кобальта (а) и железа (б) с использованием некоаксиального (а) и коаксиального сопла (б)

ким коэффициентом перемешивания наплавляемого и основного металла. Пример покрытия, полученного при наплавке стали сплава Инконель 625, с наименьшим коэффициентом перемешивания 19 % показан на рис. 4, а. Данный образец был получен при следующих режимных параметрах: скорость перемещения образца — 1000 мм/мин, скорость подачи проволоки — 5,5 м/мин, мощность лазерного излучения — 15 кВт, диаметр лазерного пятна — 10 мм.

Высокое переплавление и трудность его контролируемого изменения главным образом свя-

зано с неоднородностью распределения плотности мощности в сильно расфокусированном с помощью стандартной сварочной оптики лазерном луче. Производительность лазерной наплавки присадочной проволоки с помощью волоконного лазера мощностью 15 кВт составляла 130–170 г/мин.

На рис. 4, б показан пример лазерной наплавки ленты из нержавеющей стали 316L на низкоуглеродистую сталь. Из-за довольно большой ширины сканирования (~30 мм) и ограниченной мощности лазерного излучения (~4,4 кВт) на-

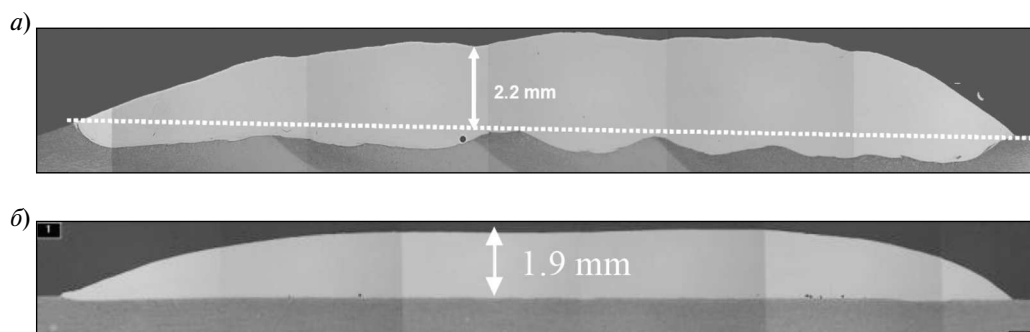


Рис. 4. Результаты лазерной наплавки компактных материалов:

а — сплошное покрытие при наплавке присадочной проволоки (Inconel 625); б — одиночный валик, полученный при наплавке металлической ленты (сталь 316L)

плавка осуществлялась на низких скоростях (60–70 мм/мин). Сканирование осуществлялось в «треугольном» режиме с частотой 20–30 Гц.

Незначительное перемешивание наплавляемого и основного материалов, наблюдаемое при наплавке металлической ленты, а также большой контактный угол с обеих сторон валика позволяют прогнозировать получение бездефектных покрытий при последовательной наплавке валиков с некоторым перекрытием.

Современные мощные твердотельные и волоконные лазеры, характеризующиеся высоким КПД и низкими эксплуатационными расходами, открывают новые возможности для лазерной обработки материалов и внедрения лазерных технологий в промышленность. Результаты проведенных экспериментов показали, что с использованием волоконного лазера мощностью

15 кВт и одномерного сканирования могут быть реализованы высокопроизводительные процессы получения различных функциональных покрытий. Наиболее эффективны процессы лазерной порошковой наплавки. Применение лазеров высокой мощности (15 кВт и более) позволяет значительно увеличить производительность технологического процесса при сохранении качества наплавляемых покрытий, характерного для уже существующих и используемых в промышленности технологий лазерной наплавки.

Весьма перспективное направление развития технологии лазерной наплавки с помощью мощных лазеров — использование наплавляемого материала в виде сплошных и порошковых металлических лент.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12–08–31165.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oh, Y.** Low-dilution electroslag cladding for ship-building [Текст] / Y.K. Oh, J.H. Devletian, J. Chen // *Welding Journal*.— 1990.— August.— P. 37–43.
2. **Takano, G.** Welding of stainless steel in nuclear energy industry [Текст] / G. Takano, O. Matsumoto, Y. Uratani.— *Welding in the World*.— 1995. Vol. 36.— P. 193–200.
3. **Paschold, R.** Electroslag strip cladding for corrosion resistance [Текст] / R. Paschold.— *Svetsaren*, 2001. № 2–3.— P. 62–67.
4. **Consonni, M.** Electroslag strip cladding of steam generators with alloy 690 [Текст] / M. Consonni, F. Maggioni, F. Brioschi // *Proc. of the ICON14*.— Miami, USA.— P. 539–545.
5. **Brennan, M.S.** Laser cladding of nickel and iron base alloys on boiler waterwall panels and tubes [Текст] / M.S. Brennan, R.C. Gassmann // *Proc. of the CORROSION 2000, NACE International*.— Orlando, USA.— P. 13–19.
6. **Grupp, M.** Welding of high thicknesses using a fibre optic laser up to 30 kW [Текст] / M. Grupp, K. Klinker, S. Cattaneo // *Welding International*.— 2011.— DOI: 10.1080/09507116.2011.600043.
7. LDF Series Diode laser for industrial needs [Текст] / *Materials of Laserline Inc.*— 2011.— P. 4
8. **Martukanitz, R.** Deposition Technology: Current Trends and Future Direction [Текст] / R. Martukanitz, S. Kelly, E. Reutzel, [et al.] // *Proc. of LAM2010*.— Laser Institute of America, Houston, USA.
9. **Туричин, Г.А.** Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров [Текст] / Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, Е.Ю. Поздеева, Я. Туоминен, П. Вуористо // *МиТОМ*.— 2012. № 3.— С. 35–40.
10. **Tuominen, J.** Recent developments in high power laser cladding techniques [Текст] / J. Tuominen, J. Näkki, H. Pajukoski, T. Peltola, P. Vuoristo // *Proc. of 31st ICALEO*.— 2012.— P.192–196