

ВЫБОР РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКА ПР-08Х17Н8С6Г

А. Н. ГОЦ, А. Б. ЛЮХТЕР, Д. С. ГУСЕВ, А. В. ЗАВИТКОВ*

Дан краткий анализ распространенных в промышленности покрытий, повышающих износостойкость рабочих поверхностей ответственных деталей. Приведены результаты экспериментальных исследований по выбору режимов газопорошковой наплавки. Процесс наплавки проводили на лазерном роботизированном комплексе с использованием коаксиальной подачи. В качестве подложки применяли сталь марки 08Х18Н10Т, на которую наносили металлический порошок марки ПР-08Х17Н8С6Г. Использование иттербиевого волоконного лазера позволило снизить подвод теплоты к наплавляемым поверхностям, что существенно уменьшило остаточные напряжения в обрабатываемой детали. Варьируемыми параметрами процесса наплавки являлись выходная мощность лазерного излучения, скорость обработки, массовый расход порошка. При визуальном контроле в качестве оценочных показателей покрытия выступали отсутствие пор и трещин. Макрогеометрию единичных валиков изучали на поперечных микрошлифах. При измерениях качество единичного валика определяли по его высоте, ширине, контактному углу между касательной к поверхности валика и плоскости подложки, а также глубине слоя перемешивания наплавляемого и основного (подложки) материалов. По результатам экспериментальных исследований выбран оптимальный режим, обеспечивающий наплавку слоя с высотой выше 1 мм, шириной 2,5 мм, глубиной слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов 0,2 мм, контактном углом между касательной к поверхности валика и подложкой больше 50°.

Ключевые слова: лазерная наплавка, высота валика, ширина валика, глубина слоя перемешивания, мощность лазерного излучения, скорость наплавки, расход порошка.

DOI: 10.17580/chm.2020.11.07

Введение

В целях повышения долговечности и износостойкости ответственных деталей оборудования на их рабочие поверхности наплавляют покрытия, что снижает себестоимость при производстве. Так, основную металлоемкую часть детали выпускают из относительно дешевой стали, а на рабочие поверхности наносят металлические или композитные покрытия, обладающие повышенными механическими характеристиками, коррозионной, радиационной стойкостью, жаростойкостью, износостойкостью, хорошими антифрикционными свойствами [1–3]. В судостроении, энергетике, нефтегазовой и горнодобывающей, металлообрабатывающей, бумажной отраслях [4–6] широко применяют детали с такими покрытиями на большой поверхности. В настоящее время появились

и развиваются различные способы нанесения наплавленных покрытий, при этом, естественно, конечные результаты различаются [7, 8]. При лазерной наплавке покрытий порошок потоком транспортирующего газа доставляют в зону воздействия лазерного излучения, при этом происходит разогрев подложки и гранул порошкового материала до температур, превышающих их температуру плавления, что приводит к образованию зоны перемешивания [3].

Так как при обработке поверхности происходит последовательная наплавка валиков с некоторым перекрытием, то важно обеспечить определенную высоту наплавленного валика. Незначительное перемешивание наплавляемого материала и подложки, а также большой контактный угол (образованный пересечением касательной к поверхности валика и поверхностью подложки) с обеих сторон валика позволяют прогнозировать получение бездефектных покрытий при последовательной наплавке валиков с некоторым перекрытием [9].

Наплавляемый слой не должен содержать таких дефектов, как поры, раковины, мелкая сетка трещин, а также иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой (подложкой). Этого можно добиться выбором рациональных режимов лазерной газопорошковой наплавки [10, 11]. Известно, что способы подачи порошка в зону лазерной наплавки можно условно разбить на две

*ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», Владимир, Россия; докт. техн. наук А. Н. Гоц, профессор кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки»;

Научно-образовательный центр внедрения лазерных технологий:

канд. техн. наук А. Б. Люхтер, директор;
Д. С. Гусев, младший научный сотрудник;
А. В. Завитков, инженер-исследователь.

эл. почта: hotz@mail.ru; 3699137@mail.ru; gusev@laser33.ru; zavitkov@laser33.ru

© Гоц А. Н., Люхтер А. Б., Гусев Д. С., Завитков А. В., 2020

основные группы. Первая — нанесение шликерных обмазок на обрабатываемую поверхность, куда затем вместе с лазерным лучом подают присадочный материал. Из-за наличия связующего материала такие способы отличает высокий коэффициент использования присадочного материала благодаря большой поглощательной способности шликерного покрытия. Также их существенным недостатком является невозможность автоматизации нанесения шликерных покрытий, а нанесение покрытий вручную, по данным исследований, характеризуется низкой воспроизводимостью [12].

Вторую группу способов объединяет нанесение присадочного материала путем его принудительной подачи непосредственно на нагретую наплавляемую поверхность (подложку), и благодаря автоматизации процесса такой метод обладает высокой воспроизводимостью [13, 14].

Выбор параметров газопорошковой лазерной наплавки является достаточно важной задачей в плане обеспечения качества при невысоких затратах энергии и материалов. Лазерную наплавку осуществляют при низком подводе тепла к обрабатываемым деталям, что уменьшает остаточные напряжения по сравнению с другими ее видами.

Отметим, что лазерная наплавка обладает рядом преимуществ. Во-первых, высокая концентрация энергии в пятне нагрева позволяет провести процесс при повышенных скоростях обработки. Во-вторых, малый диаметр сфокусированного луча (0,8–1,0 мм) обеспечивает минимизацию объемов расплавленного металла и тепловложения в основную деталь. Это значительно уменьшает деформации при обработке и тем самым позволяет сохранить геометрические размеры детали, на которую происходит наплавка, в заданном поле допуска, иногда даже несколько единиц микрометров.

Исследования газопорошковой лазерной наплавки проводили для единичного валика, для которого определяли высоту и ширину, а в дальнейшем при использовании полученных материалов для наплавки находили величину перекрытия, глубину проплавления в подложке [10, 13].

На рис. 1 приведена схема, по которой изучали влияние мощности излучения лазера, скорости наплавки, массового расхода порошка ПР-08Х17Н8С6Г на геометрические размеры единичного валика: высоту h , ширину b , а также на глубину d слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов и величину контактного угла β между касательной к поверхности валика и плоскости подложки.

Проведение экспериментальных исследований с единичным валиком позволяет выбрать наиболее оптимальные режимы лазерной наплавки на детали, а также прогнозировать его форму. Нанесение покрытий после проведения сертификационных

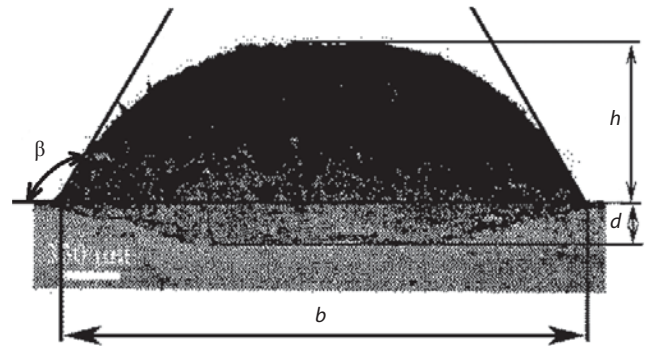


Рис. 1. Схема для анализа размеров в поперечном сечении наплавляемых валиков:

h — высота валика; b — ширина валика; d — глубина слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов; β — контактный угол между касательной к поверхности валика и подложкой

работ планируется применять для уплотнительных поверхностей деталей задвижек и клапанов трубопроводной арматуры АЭС.

Цель исследования — определить влияние мощности лазерного излучения P , Вт; скорости перемещения оптической головки V , мм/с; массового расхода, подаваемого в зону наплавки порошка q_p , г/мин на такие линейные размеры валика (мм), как высота h , ширина b , а также глубина слоя перемешивания наплавляемого материала и подложки d .

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить рациональные режимы лазерной наплавки единичного валика: мощность лазерного излучения P , Вт, скорость наплавки V , мм/с, массовый расход порошка q_p , г/мин, обеспечивающий по результатам экспериментальных исследований наибольшие размеры и форму валика при минимальной глубине проплавления;

- найти контактный угол с обеих сторон валика для получения бездефектных покрытий при последовательной наплавке валиков с некоторым перекрытием.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований по выбору режимов лазерной наплавки использовали лазерный роботизированный комплекс наплавки ЛРК-Н в состав которого входят: 6-осевой промышленный робот-манипулятор; однокольбовый порошковый питатель, предназначенный для дозированной подачи порошкового материала к наплавочной головке; экспериментальная лазерная наплавочная головка с четырехструйной насадкой для подачи порошка. Источником излучения являлся иттербиевый волоконный лазер мощностью 3 кВт. Для обеспечения безопасной работы эксперименты проводили в модульной

защитной кабине с системой активной лазерной безопасности.

В качестве наплавочного материала для получения эрозионностойких покрытий использовали металлический порошок ПР-08Х17Н8С6Г (ЦН-6Л) с частицами размером 63–125 мкм, изготовленный по ТУ 14-22-250–2013, наплавляемый на подложку из стали 08Х18Н10Т. Состав порошка, % (мас.): около 66 Fe; легирующие компоненты: 17,7 Cr; 7,97 Ni; 5,55 Si; 1,93 Mn, остальные компоненты (C, Co) — сотые доли процента.

Твердость наплавленного валика с использованием порошка ПР-08Х17Н8С6Г после термической обработки (640 °С, 2 ч) составляет 30–39 HRC.

Лазерную наплавку выполняли с использованием непрерывного лазерного излучения в среде защитного и транспортирующего газа аргона (Ar ВЧ 99,998 %), подаваемых со скоростью 25 л/мин и 6 л/мин соответственно.

В эксперименте участвовали 58 образцов с наплавленными валиками, в которых варьировались параметры, указанные ранее. Так, мощность лазерного излучения P_l изменялась от 400 до 2000 Вт с интервалом 200 Вт при скорости наплавки V 4, 6, 10, мм/с и массовом расходе порошка q 15 и 21 г/мин соответственно. Длина наплавляемой дорожки составила 100 мм. Для уточнения полученных данных по высоте валика и глубине проплавления дополнительно были проведены эксперименты при скоростях 10 и 14 мм/с и расходе порошка 18 и 28 г/мин.

Выбор мощности лазерного излучения имеет важное значение для получения качества наплавляемых покрытий. В соответствии с исследованиями, [15] при высокой плотности энергии лазерного луча часть легирующих элементов и углерода выгорает, что приводит к снижению микротвердости в наплавленном слое, появляются дефекты в виде пор.

При низких значениях плотности энергии лазерного излучения происходит неполное сплавление порошкового материала. Вполне естественно, что микротвердость наплавленного слоя при этом также снижается.

Из наплавленных дорожек путем электроэрозионной резки, шлифовки, полировки и травления были подготовлены шлифы для оценки макрогеометрии. Исследования макрогеометрии проводили с применением металлографического микроскопа Leica DM PLM. Фотографирование поперечных сечений валиков и слоев проводилось при увеличении $\times 50$.

Результаты исследований

На рис. 2 приведены линии тренда изменения высоты единичного валика h в зависимости от мощности лазерного излучения P_l при изменении скорости перемещения оптической головки V , мм/с, и массового расхода порошка q , г/мин.

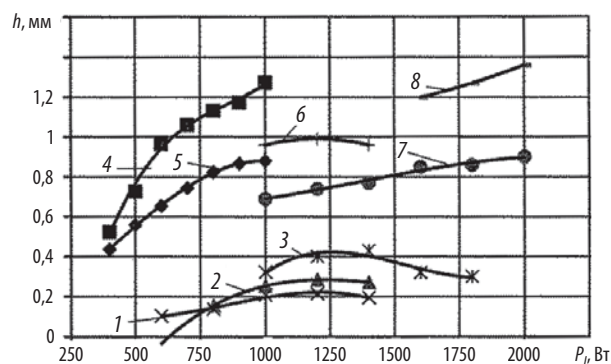


Рис. 2. Зависимость высоты единичного валика h при лазерной наплавке порошка ПР-08Х17Н8С6Г от мощности лазерного излучения P_l при значениях скорости перемещения оптической головки V , мм/с, и массовом расходе порошка q , г/мин:
 1 — $V=6$, $q=6$; 2 — $V=10$, $q=10$; 3 — $V=6$, $q=12$; 4 — $V=4$, $q=21$; 5 — $V=4$, $q=15$; 6 — $V=6$, $q=22$; 7 — $V=6$, $q=18$; 8 — $V=6$, $q=28$

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение массового расхода порошка при наплавке требует наращивания мощности лазерного излучения (см. рис. 2, кривые 6, 7 и 8), что, в свою очередь, как будет показано далее, приводит к увеличению глубины слоя перемешивания основного и наплавляемого материалов. По результатам предварительных исследований наплавки единичных валиков было отмечено, что при недостаточной мощности лазерного излучения P_l повышается доля неполного сплавления порошковых материалов, а при значительном увеличении P_l , видимо, происходит выгорание легирующих материалов и, соответственно, падает качество наплавки за счет появления в поперечном сечении неметаллических включений (оксидов легирующих материалов). При этом высота валика недостаточна для обеспечения качественной наплавки (см. рис. 2, кривые 1, 2, 3). Если не учитывать другие параметры лазерной наплавки единичного валика, то наиболее рациональными являются кривые 4 и 5 (см. рис. 2) при значениях скорости перемещения оптической головки $v = 4$ мм/с и массовом расходе порошка $q = 15$ и 21 г/мин и мощности лазерного излучения $P_l \approx 1000$ Вт. Заметим, что контактный угол между касательной к поверхности валика и подложкой $\beta \approx 130^\circ$. В то же время при высоких значениях P_l этот угол увеличивается, что, видимо, вызвано значительным разогревом расплавленного порошка и подложки.

На рис. 3 приведены линии тренда изменения ширины единичного валика b в зависимости от мощности лазерного излучения P_l при изменении скорости перемещения оптической головки V и массового расхода порошка q по результатам экспериментальных исследований.

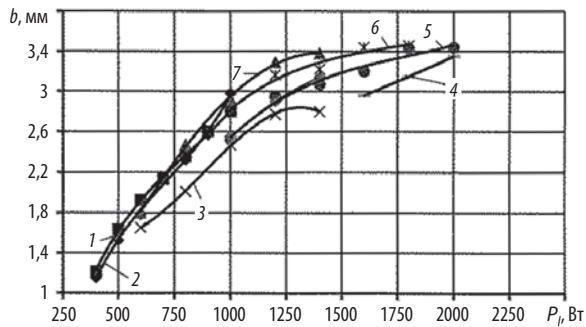


Рис. 3. Зависимость ширины единичного валика b при лазерной наплавке порошка ПР-08Х17Н8С6Г от мощности лазерного излучения P_l при значениях скорости перемещения оптической головки V , мм/с и массовом расходе порошка q , г/мин:
 1 — $V=6$, $q=6$; 2 — $V=4$, $q=21$; 3 — $V=10$, $q=10$; 4 — $V=6$, $q=28$; 5 — $V=6$, $q=18$; 6 — $V=6$, $q=12$; 7 — $V=6$, $q=6$

Как следует из материалов экспериментальных исследований, при повышении мощности лазерного излучения P_l ширина валика b увеличивается. При этом его высота h уменьшается, контактный угол между касательной к поверхности валика и подложкой β растет. Это повлияет на качество наплавки при использовании валиков с перекрытием. Исходя из этого, наиболее применимы для повышения качества наплавки режимы 5, 6 и 7 (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены линии тренда изменения глубины слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов d в зависимости от мощности лазерного излучения P_l при изменении скорости перемещения оптической головки V и массового расхода порошка q по результатам экспериментов.

Прежде всего нетрудно заметить: чем выше значение мощности лазерного излучения P_l , тем больше величина d . Это вызвано в основном перегревом металла и подложки. В этом случае увеличивается ширина единичного валика и уменьшается его высота. Так, при скорости перемещения оптической головки $V=6$ мм/с, массовом расходе подаваемого в зону обработки порошка $q=18$ г/мин и мощности лазерного излучения около 2000 Вт глубина слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов составляет $d \geq 1,4$ мм (см. рис. 4, кривая 8). Заметим, что при увеличении глубины слоя перемешивания d увеличиваются температурные деформации подложки, а, соответственно, после охлаждения и остаточные напряжения. При этом, по данным исследований, величина d никак не влияет на когезионную прочность наплавленных покрытий.

Однако при тех же параметрах лазерной наплавки ширина единичного валика чуть больше $b \geq 3,4$ мм (см. рис. 3, кривая 5), а высота головки $h < 1$ мм (см.

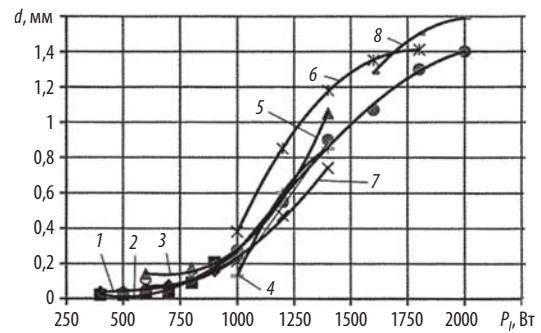


Рис. 4. Зависимость глубины слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов d единичного валика при лазерной наплавке порошка ПР-08Х17Н8С6Г от мощности лазерного излучения P_l при значениях скорости перемещения оптической головки V , мм/с и массовом расходе порошка q , г/мин:
 1 — $V=4$, $q=18$; 2 — $V=4$, $q=21$; 3 — $V=6$, $q=$; 4 — $V=6$, $q=22$; 5 — $V=6$, $q=6$; 6 — $V=6$, $q=12$; 7 — $V=6$, $q=28$; 8 — $V=6$, $q=18$

рис. 2, кривая 7). Как показывают результаты исследований микрошлифов таких единичных валиков, контактный угол β увеличивается.

Значительное перемешивание наплавляемого и основного материалов и увеличение значения d , наблюдаемое при наплавке на таких режимах, а также уменьшение контактного угла β с обеих сторон валика позволяют прогнозировать получение существенных дефектов покрытий при последовательной наплавке валиков с большим перекрытием. Кроме того, при большой мощности лазерной наплавки и перегреве металла возникает опасность выгорания легирующих добавок в наплавляемом порошке и появление в сечении неметаллических включений (оксидов), что также снижает качество покрытия. Для исключения этого дефекта следует увеличить скорость перемещения оптической головки или уменьшить величину P_l . В работе [9] показано, что для снижения перегрева металла использовали функцию контроля мощности, что позволило избежать чрезмерного подплавления основного материала в точках остановки лазерного луча. Однако при использовании функции управления мощностью заметно снизилась производительность процесса наплавки по сравнению с результатами, полученными без регулировки мощности.

Также вполне объяснимы результаты наплавки единичных валиков при скорости перемещения оптической головки $V=4$ мм/с, массовом расходе подаваемого в зону обработки порошка $q=18$ и 21 г/мин, мощности лазерного излучения около $P_L=900$ Вт. Глубина слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов составила $d < 0,2$ мм (см. рис. 4, кривые 1 и 2). В этом случае возможно неполное сплавление порошкового материала.

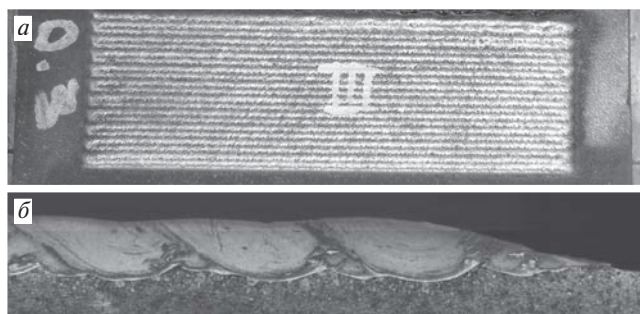


Рис. 5. Экспериментальный образец с наплавкой (а) и его поперечное сечение (б)

На рис. 5, а приведена фотография экспериментального образца с наплавкой, а на рис. 5, б — поперечное сечение полученного слоя. Лазерную наплавку выполняли при следующем режиме: мощность лазерного излучения $P_l \approx 1200$ Вт, скорость перемещения оптической головки $V = 4$ мм/с, массовый расход порошка $q = 15$ г/мин. Глубина слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов по всей ширине образца не превышала $d < 0,2$ мм.

Выбранные режимы наплавки единичных валиков были успешно использованы при создании экспериментальных изделий. По данным заказчика, с учетом производственного выпуска участка трубопроводной арматуры при изготовлении задвижек общее снижение себестоимости по наплавочным работам может составить более 14 млн р на годовую программу.

Выводы

Проведенные исследования по лазерной наплавке порошком ПР-08Х17Н8С6Г на подложку из стали 08Х18Н10Т единичных валиков позволяют сделать следующие выводы:

— наиболее оптимальными являются режимы наплавки при значениях скорости перемещения оптической головки $V = 4$ мм/с и массовом расходе порошка $q = 15$ и 21 г/мин и мощности лазерного излучения $P_l \approx 1000 \dots 1200$ Вт, при которых геометрические размеры валика: высота $h \geq 1$ мм; ширина $b \geq 2,5$ мм; глубина слоя перемешивания наплавляемого и основного материалов $d < 0,2$ мм, контактный угол между касательной к поверхности валика и подложкой $\beta \approx 130^\circ$;

— для повышения качества наплавки необходимо провести работы по управлению параметрами режимов наплавки, а также энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию наплавленной структуры и зоны перемешивания. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1833 от 03 декабря 2019 г. Уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60419X0245.

Библиографический список

1. Морунов И. В., Крылова С. Е. Применение лазерной наплавки для упрочнения и восстановления деталей машиностроения / Мат-лы Всерос. науч.-метод. конф. Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург, 01–03 февраля 2017 г.) — Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2017. С. 159–162.
2. Польский В. И., Якушин В. Л., Джумаев П. С., Петровский В. Н. Поверхностное упрочнение конструкционных материалов методом лазерной наплавки жаропрочных никелевых сплавов // Цветные металлы. 2015. № 3. С. 31–36. DOI: 10.17580/tsm.2015.03.07
3. Бирюков В. П., Татаркин Д. Ю., Христович Е. В., Фишков А. А. Определение влияния режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на износостойкость покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 63–66.
4. Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е. Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 6. С. 82–87.
5. Грачев О. Е., Неуймин В. М., Настека Д. В. Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 6. С. 53–61.
6. Неуймин В. М. Инновационные разработки для повышения ресурса, эффективности энергооборудования: лазерная наплавка кромок рабочих лопаток ЦНД турбин и плазменная наплавка молотков дробилки ГРЭС // Сб. докл. Восьмой всеросс. конф. «Реконструкция энергетики - 2016» (Москва, 7–8 июня 2016 г.) — М.: ООО «ИНТЕХЭКО», 2016. С. 80–83.
7. Масайло Д. В., Попович А. А., Орлов А. В., Гюлиханов Е. Л. Исследование структуры и механических характеристик образцов, полученных газопорошковой лазерной наплавкой и селективным лазерным плавлением из сфероидизирующего порошка на основе железа // Черные металлы. 2019. № 4. С. 73–77.
8. Литвинова Т. А., Могилевский Д. В., Подрезов Н. Н., Егоров С. Н., Пирожков Р. В. Металлографические исследования структуры защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. С. 20–28.
9. Землякова Е. В., Туоминен Я., Поздеева Е. Ю., Туричин Г. А., Комарова Е. А. Формирование поверхностных слоев при лазерной наплавке с использованием мощных волоконных лазеров // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1. С. 231–236.
10. Goodarzi D. M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry // Welding in the World. 2017. Vol. 61, Iss. 5. P. 883–891. DOI: 10.1007/s40194-017-0495-0
11. Apolinario L. H. R., Wallerstein D., Montealegre M. A., Urtiga Filho S. L., Torres E. A. et al. Predominant Solidification Modes of 316 Austenitic Stainless Steel Coatings Deposited by Laser Cladding on 304 Stainless Steel Substrates // Metallurgical and Materials Transactions. A. 2019. Vol. 50, Iss. 8. P. 3617–3628. DOI: 10.1007/s11661-019-05293-y
12. Григорьянц А. Г., Мисюров А. И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 32–56.
13. Xi W., Song B., Zhao Y., Yu T., Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103. Iss. 9-12. P. 4695–4702. DOI: 10.1007/s00170-019-03932-7
14. Campanelli S. L., Angelastro A., Signorile C. G., Casalino G. Investigation on direct laser powder deposition of 18 Ni (300) marage steel using mathematical model and experimental characterization // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 89, Iss. 1-4. P. 885–895. DOI: 10.1007/s00170-016-9135-x
15. Бирюков В. П., Фишков А. А., Татаркин Д. Ю. и др. Влияние режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на абразивную износостойкость покрытий // Фотоника. 2016. Т. 57. № 3. С. 32–42.

SELECTION OF MODES FOR LASER CLADDING OF PR-08KH17N8S6G POWDER

A. N. Gots¹, Dr. Eng., Prof., Dept. of Heat Engines and Power Plants;

A. B. Lyukhter¹, Cand. Eng., Director of the Scientific and Educational Center for the Implementation of Laser Technologies;

D. S. Gusev¹, Junior Researcher, Scientific and Educational Center for the Implementation of Laser Technologies;

A. V. Zavitkov¹, Research Engineer, Scientific and Educational Center for the Implementation of Laser Technologies.

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, Russia)

E-mail: hotz@mail.ru; 3699137@mail.ru; gusev@laser33.ru; zavitkov@laser33.ru

Abstract: A brief analysis of powders used in the industry for surfacing on the work surfaces of critical parts is given in order to increase their wear resistance. The results of experimental studies on the choice of parameters of gas-powder cladding modes are presented. The cladding process was carried out by a laser robotic complex with a coaxial feed of powder to the surfacing zone. The substrate used steel grade 08H18N10T, which was applied to the melt of wear-resistant powder grade PR-08H17N8S6G. The use of ytterbium fiber laser allowed to reduce the heat supply to the surfaces, which significantly reduced the residual stresses in the workpiece.

Variable parameters of the laser cladding process were the output power of laser radiation, processing speed, and powder mass flow rate. During visual inspection, the absence of pores and cracks were used as the estimated indicators of the cladding. The study of macro geometry single clad track was conducted on cross section of the clad. During measurements, the quality of a single clad track was determined by its geometric dimensions: clad height, clad width, contact angle between the tangent to the cladding surface and the substrate plane, as well the depth of the mixing layer of the surfaced and substrate materials. According to the results of experimental studies of the selected optimal mode, providing a cladding track with a clad height above 1 mm; clad width 2.5 mm; the depth of the mixing layer – 0.2 mm; contact angle between the tangent to the clad surface and the substrate more than 50°.

Keywords: laser cladding, clad height, clad width, depth of the mixing layer, laser power, processing speed, powder mass flow rate

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Agreement on the provision of subsidies No. 075-15-2019-1833 dated December 03, 2019. Unique identifier PNI RFMEFI60419Kh0245.

References

1. Morunov I. V., Krylova S. E. Application of laser surfacing for hardening and restoration of mechanical engineering parts. *Materials of the All-Russian Scientific and Methodological Conference “The University Complex as a Regional Center for Education, Science and Culture” (Orenburg, 01–03 February 2017)* Orenburg: Orenburg State University, 2017. pp. 159–162.
2. Polskiy V. I., Yakushin V. L., Dzhumayev P. S., Petrovskiy V. N. Surface hardening of construction materials by method of

- laser cladding of heat-resistant nickel alloys. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 3. pp. 31–36.
3. Biryukov B. P., Tatarkin D. Yu., Khriptovich E. V., Fishkov A. A. Determination of the influence of laser surfacing modes and the powder materials composition on wear resistance of coatings. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2017. No. 1. pp. 63–66.
4. Pogodaev L. I., Ezhov Yu. E. Increasing the durability of working devices of technical fleet vessels by wear-resistant surfacing. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2014. No. 6. pp. 82–87.
5. Grachev O. E., Neuymin V. M., Nasteka D. V. Improving the efficiency of repairs, manufacturing and operation of TPP equipment through the use of technologies of thermal spray coating and laser cladding. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obiedineniy SNG*. 2015. No. 6. pp. 53–61.
6. Neuymin V. M. Innovative developments to increase the resource, efficiency of power equipment: laser cladding of the turbine low-pressure cylinder blade edges and plasma cladding of the hammers of the HPP crusher. *Proceedings of the 8th All-Russian Conference “Energy Reconstruction – 2016”* (Moscow, 7–8 June 2016) Moscow: INTEKHEKO Ltd. 2016. pp. 80–83.
7. Masaylo D. V., Popovich A. A., Orlov A. V., Gyulikhhandanov E. L. Investigation of the structure and mechanical characteristics of specimens made by laser cladding and selective laser melting processes spheroidized iron based powder. *Chernye Metally*. 2019. No. 4. pp. 73–77.
8. Litvinova T. A., Mogilevsky D. V., Podrezov N. N., Egorov S. N., Pirozhkov R. V. Metallographic studies of the structure of protective coatings made by gas-powder surfacing. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2014. No. 3. pp. 20–28.
9. Zemlyakov E. V., Tuominen Ya., Pozdeeva E. Yu., Turichin G. A., Komarova E. A. Formation of surface layers during laser cladding using high-power fiber lasers. *Nauchno-tekhnicheskoe vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 1. pp. 231–236.
10. Goodarzi D. M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Welding in the World*. 2017. Vol. 61, Iss. 5. pp. 883–891.
11. Apolinario L. H. R., Wallerstein D., Montealegre M. A., Urtiga Filho S. L., Torres E. A. et al. Predominant Solidification Modes of 316 Austenitic Stainless Steel Coatings Deposited by Laser Cladding on 304 Stainless Steel Substrates. *Metallurgical and Materials Transactions : A*. 2019. Vol. 50, Iss. 8. pp. 3617–3628.
12. Grigoryants A. G., Misyurov A. I. Possibilities and prospects of laser cladding application. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2005. No. 10. pp. 32–56.
13. Xi W., Song B., Zhao Y., Yu T., Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 103, Iss. 9-12. pp. 4695–4702.
14. Campanelli S. L., Angelastro A., Signorile C. G., Casalino G. Investigation on direct laser powder deposition of 18 Ni (300) marage steel using mathematical model and experimental characterization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 89, Iss. 1-4. pp. 885–895.
15. Biryukov V. P., Fishkov A. A., Tatarkin D. Yu. et. al. Influence of laser cladding modes and powder materials composition on abrasive wear resistance of coatings. *Fotonika*. 2016. Vol. 57. No. 3. pp. 32–42.