

УДК 621.375.826:621.793

Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В.

ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА – ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПЛАВЛЯЕМЫХ СЛОЕВ

Одним из путей решения проблемы ресурсосбережения является продление эксплуатационного ресурса деталей машин и механизмов. Достичь увеличения ресурса возможно за счет применения различных технологий как на этапе изготовления детали, так и при восстановлении. При этом желательным является максимальное повышение свойств рабочих поверхностей (например, прочности, износостойкости и коррозионной стойкости).

В настоящее время для решения указанной проблемы разрабатываются новые способы поверхностной обработки. К ним относятся плазменные, электронно-лучевые и лазерные. К преимуществам первых относятся высокая производительность и сравнительно небольшая себестоимость, к преимуществам вторых и третьих – высокая стабильность и термическая локальность воздействия на обрабатываемый материал. Работы современных исследователей (например, [1–3]) свидетельствуют о том, что наибольший интерес представляют такие способы поверхностной обработки, которые объединяют преимущества плазменного и лазерного.

Одним из способов, который объединяет в себе преимущества лазерной наплавки с преимуществами микроплазменного напыления, является комбинированная лазерно-микроплазменная наплавка [4]. Она дает возможность устранения характерных для лазерной наплавки недостатков (образования внутренних пор и микротрещин) и при этом устраняет необходимую для микроплазменного напыления предварительную подготовку обрабатываемой поверхности, а также обеспечивает сплавление нанесенных слоев с основным металлом. Кроме того, при таком способе наплавки лазерная мощность частично заменяется более дешевой микроплазменной, что значительно уменьшает себестоимость оборудования и эксплуатационные затраты.

Целью работы является исследование технологических преимуществ объединения лазерной наплавки и микроплазменного напыления. Для этого нами проводились эксперименты по лазерно-микроплазменной наплавке слоев толщиной 0,3...1,0 мм износостойких и коррозионностойких покрытий системы Ni-Cr-B-Si на стали типа Ст 20 и 38ХНЗМФА.

В качестве источника лазерного излучения применялся CO₂-лазер TR-100 (производство ROFIN SINAR, Германия) мощностью до 10 кВт. В экспериментах использовали излучение этого лазера мощностью 2, 3 и 4 кВт совместно со струей микроплазмы мощностью до 1,5 кВт. Для получения микроплазмы использовалась установка МПН-004 с микроплазматроном МП-04 (разработка ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ).

Схема процесса наплавки представлена на рис. 1. Образец (пластина) устанавливался на рабочую станину под углом 45° к линии горизонта. Пучок лазерного излучения подавался вертикально сверху. Перпендикулярно ему в пятно фокусировки направлялась плазменная струя, транспортирующая наплавляемый порошок. В ходе эксперимента зоны действия лазерного излучения и струи микроплазмы были совмещены друг с другом и образовывали общую зону, относительно которой перемещалась станина с образцом.

В качестве наплавляемых материалов использовали порошки ПГ-12Н-01 и ПГ-12Н-02 (самофлюсующийся сплав, грануляция 40–100 мкм, ТУ 48-19-383-84, хим. состав – см. табл. 1). С целью установления зависимости величины высоты наплавляемого слоя h (мм) от параметров режима процесса сначала наплавку вели одиночными валиками на пластину из стали Ст3 ($\delta = 8$ мм). В качестве варьируемых параметров выбрали следующие: мощность лазерного излучения $P_{\text{лаз}}$, скорость перемещения образца V (см. табл. 2). Массовый расход порошка $G_{\text{п}}$ в ходе экспериментов изменялся в пределах 0,1...0,2 г/с. По всей вероятности, это

изменение зависело от нестабильности работы подающего дозатора-питателя. Прочие параметры режима оставались неизменными: диаметр пятна сфокусированного излучения $d_{\text{л}} = 5 \dots 6$ мм, сила тока плазмотрона $I = 43$ А, напряжение $U = 30$ В, расход рабочего газа (аргона) $Q_{\text{плазм}} = 80$ л/ч, расход защитного газа (аргона) $Q_{\text{защ}} = 240$ л/ч. Следующим шагом, для оптимизации величины перекрытия валиков по критерию шероховатости получаемого покрытия на аналогичную пластину, проводили наплавку нескольких валиков с перекрытием $10 \dots 50$ % от их ширины.

Таблица 1

Химический состав исследуемых порошковых сплавов

Марка материала	Cr, %	B, %	Si, %	Fe, %	C, %	Ni, %
ПГ-12Н-01	8–14	1,7–2,8	1,2–3,2	2–5	0,3–0,6	74,4–86,8
ПГ-12Н-02	10–16	2,0–4,0	3,0–5,0	3–6	0,4–0,8	68,2–81,6

Отметим, что снижение высоты наплавляемого валика с повышением мощности лазерного излучения (см. табл. 2, эксперимент № 1) отчасти связано с испарением определенной доли наплавляемого материала, а отчасти – с перегревом основного металла и проседанием в него наплавляемого валика. Повышение высоты валика в эксперименте № 5 (табл. 2) объясняется нестабильной подачей присадочного порошка.

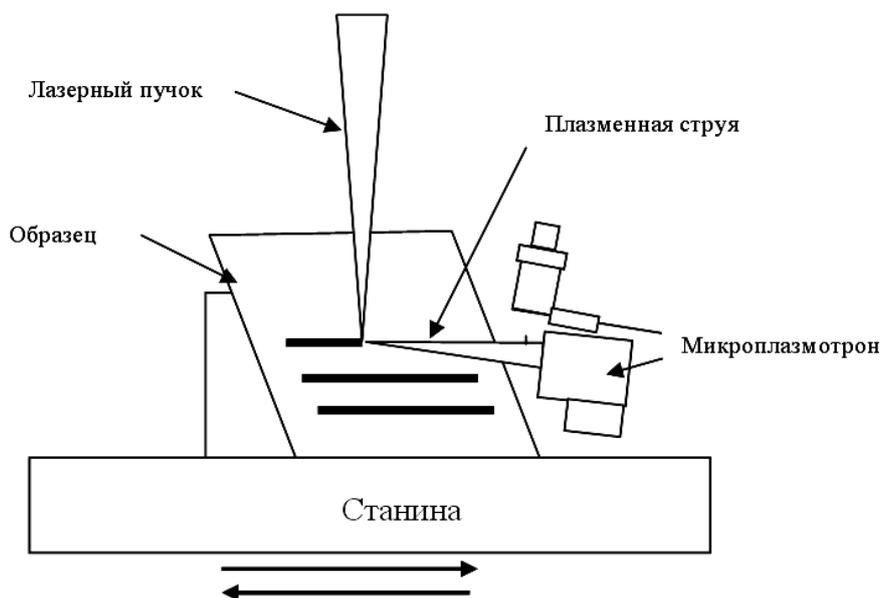


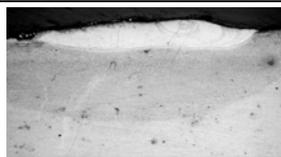
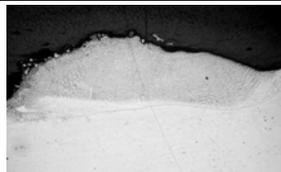
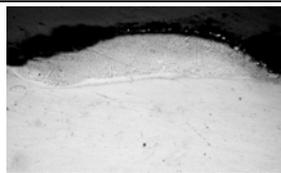
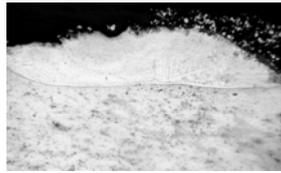
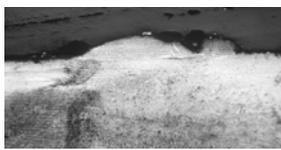
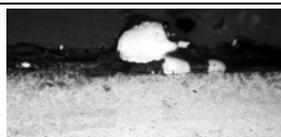
Рис. 1. Схема процесса комбинированной лазерно-микроплазменной наплавки

По результатам проведенных экспериментов для реализации процесса лазерно-микроплазменной наплавки сталей порошками системы Ni-Cr-B-Si был выбран режим, соответствовавший эксперименту № 4. Этот режим позволил получать бездефектные слои в сочетании со сравнительно невысокой погонной энергией процесса. Уменьшение последнего параметра привело к образованию такого дефекта наплавленного слоя, как микротрещины. Дальнейшие исследования показали, что при повышении массового расхода порошка до величин $G_{\text{л}} = 0,5 \dots 0,8$ г/с скорость процесса может быть поднята до 60 м/ч при сохранении прочих параметров режима неизменными. Это позволит обеспечивать геометрию наплавляемых валиков, аналогичную описанной в табл. 2, в сочетании со снижением погонной

энергии процесса и уменьшением величины ЗТВ. Кроме того, было установлено, что приемлемая шероховатость наплавляемых слоев (порядка Ra 200...300 мкм) имеет место при коэффициенте перекрытия валиков $K_{II} = 25...30\%$. Это означает, что при ширине валиков 6 мм поперечное перемещение для наплавки каждого последующего валика составит не менее 4 мм.

Таблица 2

Изменение высоты h наплавляемого валика в зависимости от изменения мощности $P_{\text{лаз}}$ и скорости V лазерно-микроплазменной наплавки образцов

№ эксперимента	Мощность $P_{\text{лаз}}$, кВт	Скорость V , м/ч	Погонная энергия, Дж/мм	Результат	
1	4	30	635		Наличие микротрещин, $h = 0,4$ мм
2	3	6,5	2380		$h = 1,2$ мм
3	3	10	1545		Качественный валик, $h = 0,8$ мм
4	3	20	770		Качественный валик, $h = 0,6$ мм
5	3	30	520		Качественный валик, $h = 1,0$ мм
6	2	10	1185		Ухудшение формирования валика, $h = 0,3$ мм
7	2	20	590		Нерегулярное формирование валика

Исследования наплавленных лазерно-микроплазменным способом слоев показали, что во всех образцах наплавленные слои имеют достаточно мелкодисперсные структуры. При этом в верхней части наплавленных слоев наблюдается образование столбчатых дендритов металла, рост которых происходил в направлении теплоотвода от зоны сплавления с основным металлом. В нижней части наплавленных слоев столбчатые дендриты, как правило, переходят в зону более мелких равноосных кристаллов, что сопровождается незначительным повышением микротвердости. Вообще, микротвердость слоев нанесенных на

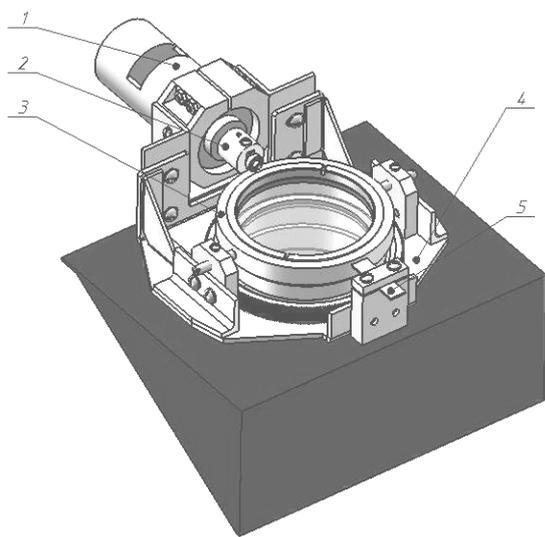
скоростях до 30 м/ч в большинстве случаев является значительно меньшей по сравнению с паспортной твердостью использованных наплавочных порошков. Это объясняется избыточным тепловложением в ванну расплава, которое происходит за счет совместного действия лазерного излучения со струей микроплазмы, а также предварительным подогревом частиц порошка в этой струе до пластического состояния. При комбинированной наплавке в ванне расплава происходит частичное выгорание твердых фаз (карбидов, боридов и карбоборидов). В случае уменьшения времени существования ванны для нейтрализации этого эффекта (например, за счет повышения скорости) уменьшается толщина наплавленного слоя и возникает вероятность увеличения коэффициента трещинообразования.

Сказанное выше является общим для всех рассмотренных случаев. Исследования структур наплавленных образцов показали следующее. Образец № 1 (табл. 2) отличается от прочих наличием дефектов структуры – поперечными трещинами в литой структуре. Эти трещины проходят по границам дендритов в наплавленном металле. ЗТВ в основном металле весьма велика – имеет ширину в 2,5 раза большую толщины наплавки. Образцы с № 2 по № 4 (табл. 2) не имеют трещин и отслоений от основы. В образце № 5 обнаружены микротрещины, аналогичные наблюдаемым в образце № 1. Это объясняется близкими погонными энергиями наплавки образцов № 1 и № 5. Во всех образцах структура наплавленного металла в нижней части дендритная, переходящая в верхней части в мелкодисперсную. По границам светлых дендритов наплавки, представляющих собой твердый раствор на основе γ -никеля, расположены прослойки, состоящие из боридов (Ni_3B) и силицидов (Ni_2Si) никеля и, возможно, их эвтектики из γ -Ni, а также карбидов хрома (Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3).

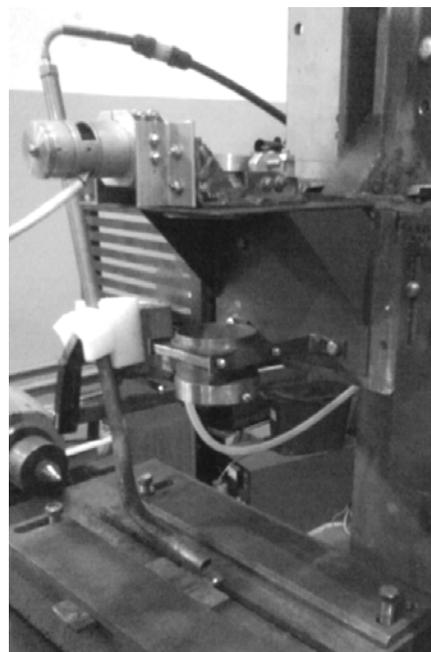
Общая закономерность в структуре образцов заключается в том, что дендритная структура наплавки возле зоны сплавления с основным металлом не имеет включений. Структура участка сплавления (белой полосы) состоит из γ -твердого раствора никеля и имеет пониженную твердость. Находящуюся ниже зоны сплавления ЗТВ по глубине можно разделить на две части: граничащий с зоной сплавления участок (имеет повышенную твердость) и расположенный ниже граничащий с основным металлом участок (имеет меньшую твердость). Наличие этих участков ЗТВ с различной твердостью объясняется тем, что произошло диффузионное перераспределение элементов. Легирующие элементы, в первую очередь С, В и Si из наплавки перешли в ЗТВ. Кроме того, углерод из нижней части ЗТВ перераспределился в верхнюю. Размер, твердость участков наплавки и ЗТВ зависят от сочетания режимов лазерного и микроплазменного процессов, массового расхода присадочного порошка, а также скорости наплавки.

Эксперименты показали, что увеличение пятна фокусирования лазерного излучения до значений $d_{\text{л}} = 5 \dots 6$ мм (см. табл. 2) приводит к необходимости использования значительной мощности излучения (порядка 3 кВт). Для уменьшения последнего параметра и улучшения равномерности наносимого слоя дополнительно ввели сканирование лазерного излучения поперек направлению наплавки с амплитудой 2 мм и частотой ~ 20 Гц. Излучение сканировали при помощи сканатора, показанного на рис. 2. Принцип работы данного приспособления следующий: двигатель постоянного тока 1 (рис. 2), частота вращения которого регулируется в пределах $10 \dots 200$ мин⁻¹, передает вращающий момент на эксцентрик 2, ось которого смещена относительно оси двигателя; эксцентрик контактирует с обоймой 3, заставляя ее колебаться относительно полуосей. Вместе с обоймой совершает колебания и закрепленная в ней линза. Это приводит к периодическим отклонениям оси фокусирования излучения от вертикального положения, что, в свою очередь, приводит к смещению положения фокального пятна. Как следствие, пятно фокусирования лазерного излучения на изделии начинает колебаться с определенной частотой, зависящей от частоты вращения двигателя 1. Амплитуда таких колебаний зависит от величины эксцентриситета, которая устанавливается при помощи эксцентрика 2. Возврат обоймы в начальное положение совершается при помощи пружины 5, постоянно находящейся в сжатом состоянии. Вся конструкция размещена на

поворотном кронштейне 4, что позволяет произвольно выбирать направление колебаний по отношению к направлению лазерной обработки. Это дает возможность совершать как поперечные, так и продольные колебания излучения.



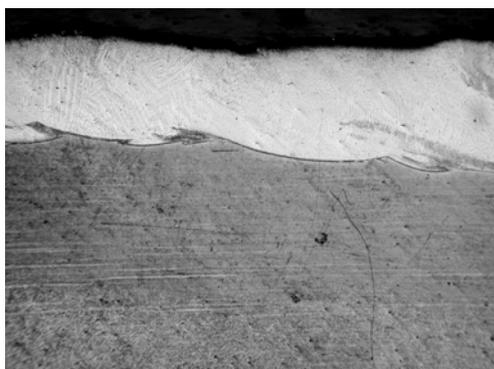
а



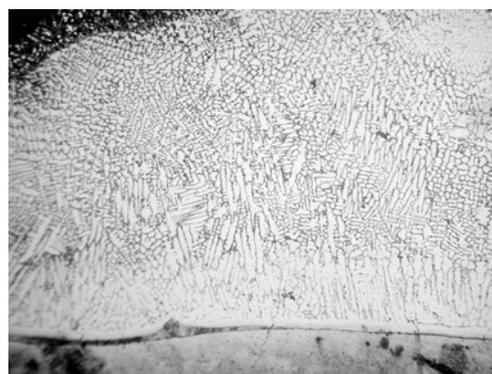
б

Рис. 2. Сканатор лазерного излучения:
а – узлы сканатора: 1 – двигатель постоянного тока; 2 – эксцентрик; 3 – обойма с линзой; 4 – кронштейн; 5 – пружина; б – внешний вид

Введение поперечного направлению лазерно-микроплазменной наплавки сканирования лазерного излучения, позволило уменьшить диаметр пятна, сфокусированного на обрабатываемой поверхности до 4 мм, и снизить мощность лазерного излучения до 2 кВт. Прочие параметры режима обработки остались при этом без изменения. Введение сканирования излучения уменьшило склонность к образованию трещин в наплавляемых слоях. Общие тенденции структурообразования в этих слоях остались неизменными (рис. 3).



× 25



× 100

Рис. 3. Слой порошка ПГ-12Н-02, наплавленного на сталь СтЗпс с поперечным сканированием лазерного излучения ($V = 20$ м/ч)

Полученные в вышеописанных экспериментах результаты сравнивали с результатами наплавки тех же материалов, проводимой по разработанному в ИЭС им. Е. О. Патона способу лазерной порошковой наплавки [5]. Так, по величине неровностей (шероховатости) и внешнему виду наплавленных поверхностей они были признаны достаточно близкими.

Основное отличие заключалось в налипании незначительного количества порошкового материала на поверхности, наплавленные лазерно-микроплазменным способом. Для оценки наличия микротрещин в наплавленных слоях ввели коэффициент трещинообразования $\alpha = \frac{3}{L}$, где L – расстояние между трещинами, мм. Было установлено, что слои из твердых сплавов системы Ni-Cr-B-Si, наплавленные лазерным способом, имеют коэффициент трещинообразования α порядка 40...60 % ($\alpha = 0,4...0,6$), в то время, как комбинированная наплавка позволяет снизить этот коэффициент от 10...20 % ($\alpha = 0,1...0,2$) до полного устранения микротрещин.

Для определения износостойкости наплавляемых слоев использовали как стандартную машину трения 2070 СМТ-1, так и машину трения собственной разработки. Стойкость к износу при сухом трении-скольжении определяли в процентах, приняв за 100 % износостойкость стали 38ХНЗМФА, имевшую твердость HRC 42...43. В результате было установлено (рис. 4), что показатели износостойкости при лазерно-микроплазменной наплавке могут превосходить показатели, характерные для лазерной наплавки. Однако, в случае несоблюдения теплового режима, т. е. перегрева образцов при низких скоростях наплавки, за счет разупрочнения твердых фаз износостойкость может значительно снижаться. Пример такого снижения износостойкости для сплава ПГ-12Н-01 приведен на рис. 4 – этот показатель уменьшился почти до 60 % относительно аналогичного показателя для стали 38ХНЗМФА.

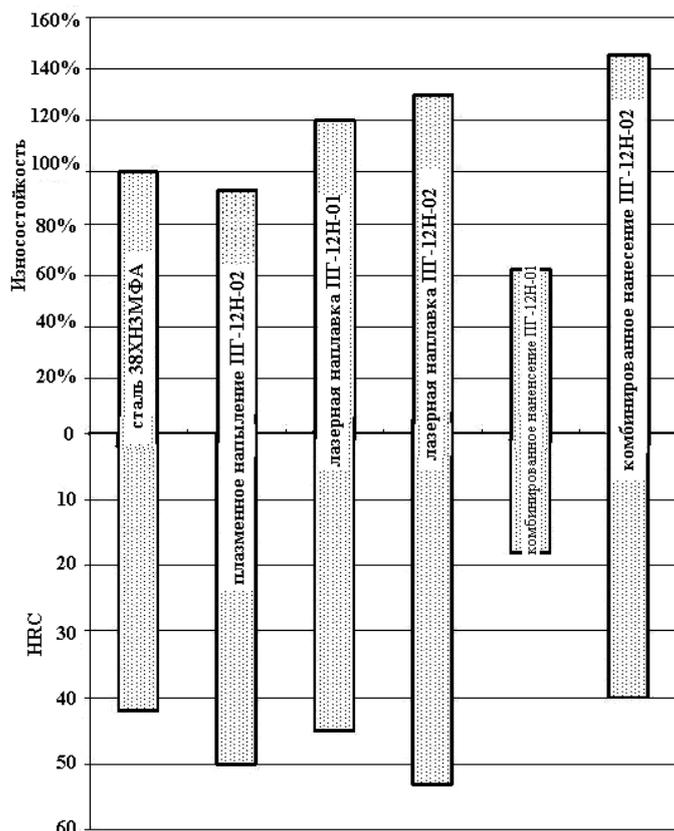


Рис. 4. Сравнение износостойкости и твердости HRC сплавов системы Ni-Cr-B-Si, нанесенных различными способами, со стойкостью стали 38ХНЗМФА к сухому трению

Еще одним важным показателем улучшения механических свойств наплавляемых слоев является снижение коэффициента трения μ наплавленных слоев. Определение этого коэффициента проводилось с использованием машины трения 2070 СМТ-1. Однако более существенным показателем является уменьшение величины μ на поверхностях, которые были легированы лазерно-микроплазменным способом (рис. 5). Такое легирование осуществлялось по способу наплавки с заглаблением зоны обработки до 1,5 мм в основной металл.

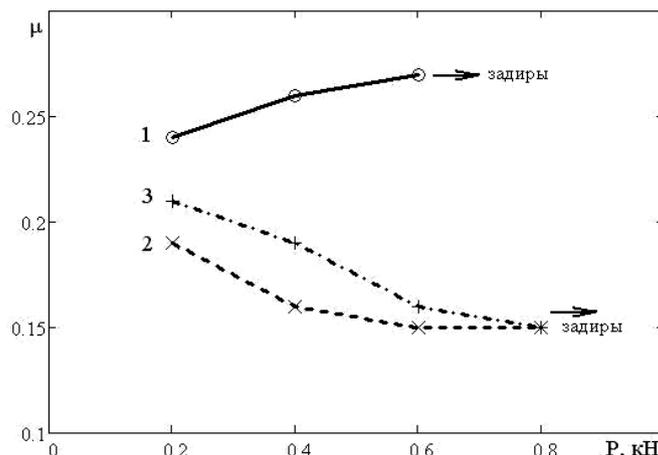


Рис. 5. Изменение коэффициента трения μ , измеренного на шлифованных поверхностях при помощи машины трения 2070 СМТ-1 на скорости скольжения 1,3 м/с, в зависимости от ступенчатой нагрузки P , кН:

1 – основной металл (сталь 38ХНЗМФА); 2 – комбинированное легирование хромом; 3 – комбинированное легирование смесью 50 % Cr + 44 % WC + 6 % Co

ВЫВОДЫ

По сравнению с лазерной порошковой наплавкой разработанный способ комбинированной лазерно-микроплазменной наплавки позволяет повышать качество наносимых слоев при сохранении основных преимуществ, характерных для лазерного способа. Сравнительные испытания на сухое трение образцов из основного металла (стали 38ХНЗМФА, износостойкость которой была принята за 100 %) и образцов, наплавленных одними и теми же сплавами системы Ni-Cr-B-Si, показали, что лазерная порошковая наплавка обеспечивает износостойкость порядка 120...130 %, а лазерно-микроплазменная – свыше 140 %. Эффективность применения лазерно-микроплазменной наплавки определяется снижением количества микротрещин в наплавленных слоях. Так, слои из твердых сплавов системы Ni-Cr-B-Si, наплавленные лазерным способом, имеют коэффициент трещинообразования порядка 40...60 %, в то время как комбинированная наплавка позволяет снизить этот коэффициент от 10...20 % до полного устранения микротрещин. Кроме того, лазерно-микроплазменная наплавка позволяет значительно (в 1,5–2 раза) снижать коэффициент трения и повышать задиристость наплавленных поверхностей. Все это делает целесообразным применение лазерно-микроплазменной наплавки для получения износостойких покрытий с пониженным коэффициентом трения как на этапе изготовления, так и при восстановлении деталей типа вал, работающих в парах трения (например, деталей двигателей внутреннего сгорания и ходовой части автомобильного и железнодорожного транспорта).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dilthey U. Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes / U. Dilthey, A. Wiseschmann // *Rivista Italiana della Saldatura*. – 2000. – Vol. 52, № 6. – P. 749–759.
2. Surface Preparation and Thermal Spray in a Single Step: the PROTAL process / C. Coddet, G. Montaron, T. Marchione, O. Freneaux // *Proc. of 15th ITSC, Nice, Franc.* – 1998. – Vol. 2. – P. 1321–1325.
3. Кривцун И. В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.10. / Игорь Витальевич Кривцун. – Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, 2002. – 393 с.
4. Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий / В. Д. Шелягин, И. В. Кривцун, Ю. С. Борисов, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Набок, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий, С. Г. Войнарович, А. Н. Кислица, Т. Н. Недей // *Сварка в Сибири*. – 2006. – № 1. – С. 32–36.
5. Лазерная наплавка цилиндрических деталей порошковыми материалами / О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко, И. В. Молчан, В. Д. Паламарчук // *Автоматическая сварка*. – 1990. – № 1. – С. 59–65.