



ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ И НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук, **Ю. Н. ПЕРЕВЕРЗЕВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен гибридный процесс лазерно-микроплазменного легирования и нанесения покрытий, свободный от недостатков лазерной наплавки и микроплазменного напыления. Установлены основные параметры процесса, характерная структура переходной зоны и распределение микротвердости.

Ключевые слова: лазерная наплавка, микроплазменное напыление, порошковые материалы, прочность сцепления, подготовка поверхности, комбинированное нанесение покрытий, микроплазмотрон, микротрещины, параметры процесса, структуры

Одним из направлений использования лазерной технологии является ее комбинация с существующими промышленными технологиями, например использование лазерного излучения при газотермическом нанесении покрытий. С целью уплотнения и оплавления напыленных слоев применяется лазерная термообработка [1]. В последнее время получило развитие сочетание лазерного нагрева поверхности с плазменным нанесением покрытий при совмещении пятна фокусирования лазерного излучения с зоной формирования покрытия [2]. Такая технология получила название плазменного напыления, сопровождаемого лазерным нагревом, или LAAPS (Laser Assisted Atmospheric Plasma Spraying) [2, 3]. Реализация процесса дает возможность получения плотного слоя с повышенной прочностью сцепления. Фирмы «LERMPS-IPSe» и «IREPA-Laser» разработали и запатентовали технологию «Протал», которая в результате неполного перекрытия зоной лазерного нагрева зоны плазменного напыления обеспечивает эффект подготовки поверхности, исключает необходимость струйно-абразивной обработки [4]. В настоящей статье представлены результаты экспериментов по применению лазерного излучения совместно с микроплазменной струей для нанесения покрытий.

Способы газотермического нанесения покрытий получили широкое промышленное распространение для создания как декоративных, так и износостойких коррозионностойких поверхностных слоев [5]. Одним из перспективных является способ микроплазменного нанесения покрытий [6], имеющий следующие преимущества: малое термическое воздействие на изделие (деталь), сравнительно малые мощности плазмотронов (до 2...3 кВт), повышенный по сравнению с плазменным нанесением покрытий коэффициент использования материала, малый размер пятна напыления (2...5 мм), низкий уровень шума.

Оборудование и технология микроплазменного нанесения покрытий разработаны в ИЭС им. Е. О.

Патона [7]. Оборудование отличается высокой мобильностью, сравнительно небольшой массой и габаритами, простое в эксплуатации. В его состав входят микроплазмотрон, генерирующий тонкую ламинарную плазменную струю из аргона (2...5 мм), и дозатор, обеспечивающий дозирование и подачу порошков в плазменную струю. Покрытия, полученные таким способом, придают поверхности изделия износостойкие свойства, однако они могут иметь поры и невысокую прочность сцепления с изделием (20...40 МПа). Для нанесения покрытий необходима предварительная подготовка поверхности изделия.

Обеспечение качества покрытия достигается повышением его сплошности, отсутствием пор и трещин. Для увеличения прочности сцепления с изделием желательно наличие узкой переходной зоны [8]. С целью повышения производительности процесса, расширения номенклатуры изделий следует уменьшить количество вспомогательных технологических операций. К последним относится механическая предварительная подготовка поверхности, связанная с созданием разветвленного рельефа, который обеспечивает сцепление покрытия с изделием. Наиболее часто подготовка заключается в песко- или дробеструйной обработке поверхности [5].

Одним из способов, в достаточной мере удовлетворяющим указанным требованиям, является лазерная порошковая наплавка [9]. Она имеет ряд преимуществ, связанных не только с высокой прочностью сцепления наносимых слоев, удовлетворительным регулированием геометрии и толщины (в пределах 0,1...6,0 мм), локальным термическим влиянием на изделие, но и отсутствием необходимости предварительной подготовки поверхности. Основным недостатком лазерной наплавки при использовании самофлюсующихся сплавов является наличие микротрещин в наплавленном слое в случае превышения его твердости значений HRC 35...40 [10, 11].

Наиболее эффективным способом устранения трещин является предварительный (сопутствующий) подогрев изделия и присадочного материала, а также снижение высоты наплавленного слоя до значений, при которых остаточные напряжения

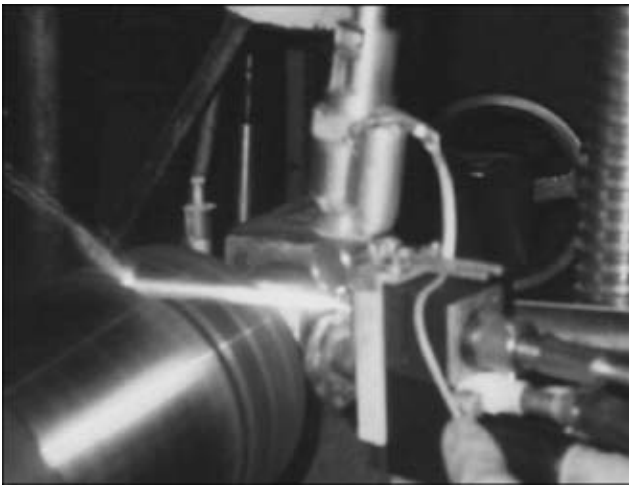


Рис. 1. Лазерно-микроплазменное нанесение покрытий и легирование цилиндрических изделий

не превышают предел прочности [12]. На практике высота наплавляемого слоя связана с минимизацией припуска под финишную механическую обработку. Оптимальный наплавленный слой получают, регулируя профиль поперечного сечения дорожек наплавки (или легирования), оказывая влияние на характер конвективного массопереноса в ванне расплава [13]. Так, при нанесении покрытий высотой 0,1...0,5 мм припуск под финишное шлифование должен составлять 0,05...0,25 мм, что означает необходимость получения профиля неровностей покрытия не более 0,05...0,10 мм. На сегодня удалось получить профиль неровностей в пределах 0,15...0,30 мм. Решить задачу минимизации неровностей покрытия, наносимого на стали, в сочетании с предотвращением образования в нем трещин, позволило сочетание способов микроплазменного напыления и лазерной наплавки.

Нами использован комбинированный способ лазерно-микроплазменного нанесения покрытий как вариант LAAPS, при котором напыляемый порошок подается в струю микроплазмы, которая нагревает и ускоряет его, транспортируя в зону действия лазерного излучения (рис.1). Последнее нагревает металл изделия до температур, близких к температуре плавления, или создает на его поверхности тонкий скин-слой расплава. В результате на поверхность металла изделия за один проход наносится покрытие высотой 0,1...0,5 мм. Свойства покрытия зависят от выбранных параметров технологического режима и могут изменяться от свойств слоев, нанесенных микроплазменным напылением, до полученных лазерной наплавкой. В случае, если плотность мощности лазерного излучения и скорость процесса позволяют расплавить основной металл на глубину 0,1...1,0 мм, аналогичным способом может вестись лазерно-микроплазменное легирование. При этом присадочный материал, транспортируемый струей микроплазмы, смешивается в ванне расплава с материалом изделия в результате конвективного массопереноса [13].

На рис. 2 показана схема процесса лазерно-микроплазменного нанесения покрытий (легирования) на изделиях, имеющих ось вращения. Согласно этой схеме образец 4 вращается вокруг своей

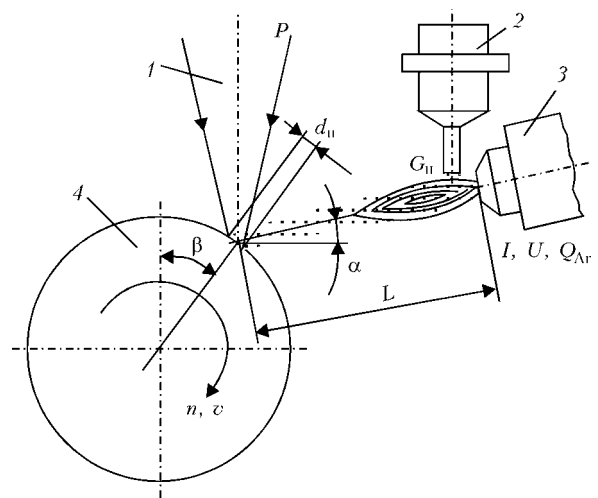


Рис. 2. Схема процесса лазерно-микроплазменного нанесения покрытий (легирования): 1-4 см. в тексте

оси, а лазерный луч 1 с микроплазмотроном 3 и дозатором 2 перемещаются вдоль нее. Можно выделить четыре основные группы параметров режима этого процесса. К первой, связанной с лазерным излучением, относятся плотность мощности излучения W_p и угол β , определяющий место введения лазерного излучения в цилиндрический образец относительно его вертикальной оси. Ко второй группе, связанной с микроплазмотроном, относятся сила тока I , напряжение U , расход плазмообразующего $Q_{пл}$ и защитного $Q_{защ}$ газа (аргона), расстояние L от сопла микроплазмотрона до зоны действия лазерного излучения, а также угол α встречи струи микроплазмы с поверхностью образца. К третьей группе параметров, связанной с дозатором присадочного материала, относятся массовый расход $G_{п}$ порошкового материала, коэффициент использования материала, его грануляция, химический состав, точка подачи в плазменную струю относительно анодного пятна. К последней группе, связанной с образцом, относятся линейная скорость v перемещения образца и коэффициент перекрытия дорожек $K_{п}$.

Высота h наносимого слоя (или глубина легирования) и его шероховатость зависят от сочетания этих параметров. Для определения указанных параметров процесса проведен ряд экспериментов. Использовали технологический лазер ЛТ 104 мощностью до 10 кВт [14] и микроплазменное оборудование, описанное в работе [7]. В качестве материала образцов использовали стали 3пс, 20 и 38ХНЗМФА, присадочные порошки ПГ-АН9 (грануляция 50...160 мкм) системы Ni-Cr-B-Si и ПГ-Н1 (грануляция 50...160 мкм) системы Ni-Fe-B-Si, а также хром (грануляция 0...40 мкм).

В ходе экспериментов установлены зависимости, приведенные на рис. 3. Можно отметить весьма слабое влияние углов α и β на высоту h наносимого слоя. Так, изменение угла β в пределах 5...30° и α в пределах 5...50° не выявили относительных отклонений величины h , превышающих ошибку измерений. Параметры режима, связанные с микроплазмотроном, в экспериментах не изменяли. В условиях поставленных экспериментов можно

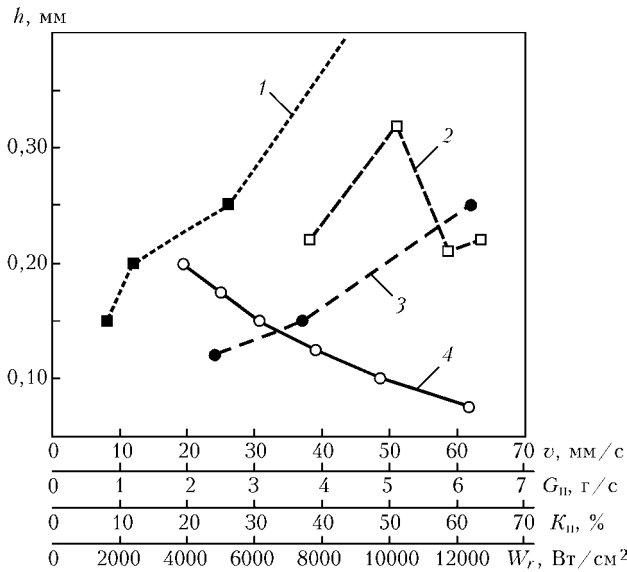


Рис. 3. Зависимости высоты h слоя от параметров комбинированного нанесения покрытий из порошков ПГ-АН9 и ПГ-Н1, полученные при следующих условиях: 1 — $W_p = 10,19 \text{ кВт/см}^2$, $v = 30,6 \text{ мм/с}$, $K_n = 24 \%$; 2 — $v = 30,6 \text{ мм/с}$, $G_n = 0,26 \text{ г/с}$, $K_n = 62 \%$; 3 — $W_p = 10,19 \text{ кВт/см}^2$, $v = 30,6 \text{ мм/с}$, $G_n = 0,26 \text{ г/с}$; 4 — $W_p = 10,19 \text{ кВт/см}^2$, $G_n = 0,26 \text{ г/с}$, $K_n = 37 \%$

заключить, что наиболее значимыми при комбинированном нанесении покрытий являются четыре параметра, влияние которых на высоту слоя h показано на рис. 3.

Как отмечалось выше, для повышения прочности сцепления покрытия с изделием необходимо наличие переходной зоны, т. е. полученные комбинированным способом покрытия по своей структуре должны быть подобны покрытиям, полученным лазерной наплавкой. Металлографические исследования показали, что структура лазерно-микроразплавленных покрытий является дендритной, од-

нако размеры дендритов (как и величина переходной зоны) в 3...5 раз меньше, чем при лазерной наплавке (рис. 4), а ЗТВ не выявляется, что объясняется высокими скоростями перемещения образца, малым (0,05...0,25 с) временем существования ванны расплава и пониженной в 2...3 раза плотностью мощности излучения по сравнению с лазерной наплавкой. Твердость покрытий обусловлена химическим составом присадочного материала, однако она может быть меньше на 20...30 % по сравнению с исходной твердостью наплавочного порошка. Это может быть связано с частичным выгоранием бора и кремния в плазменной струе при расплавлении и транспортировке порошка к изделию.

В случае комбинированного легирования сталей в зависимости от содержания в них углерода в переплавленных дорожках происходит частичное или полное образование бейнита или мартенсита и его легирование присадочным материалом. Содержание легирующих элементов в поверхностном слое тем выше, чем дольше время существования ванны расплава. Типичная структура дорожек гибридного легирования, проведенного на цилиндрическом образце по спирали с перекрытием, показана на рис.5. При легировании без перекрытия дорожки внедряются в основной металл, как показано на рис. 6, а. Распределение микротвердости по глубине дорожек легирования в последнем случае приведено на рис. 6, б. Из-за значительно больших плотностей мощности излучения вокруг дорожек легирования наблюдается ЗТВ. Ее размер прямо пропорционален глубине дорожек, зависит от плотности мощности и скорости перемещения образца, а также склонности стали к образованию закалочных структур. В верхней части дорожек легирования происходит некоторое разупрочнение (снижение твердости). Это явление связано с пе-

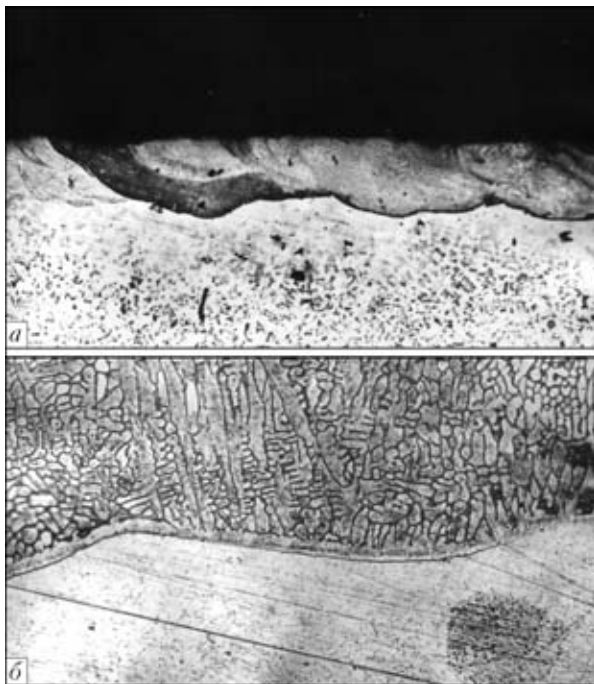


Рис. 4. Микроструктура покрытия из сплава ПГ-Н1, нанесенного комбинированным способом на сталь 20: а, $\times 63$; б, $\times 1000$



Рис. 5. Микроструктура хромистого слоя, нанесенного комбинированным способом на сталь 38ХНЗМФА (процесс вели с перекрытием дорожек, $K_n = 24 \%$): а — структура дорожек, $\times 50$; б — переходная зона, $\times 500$

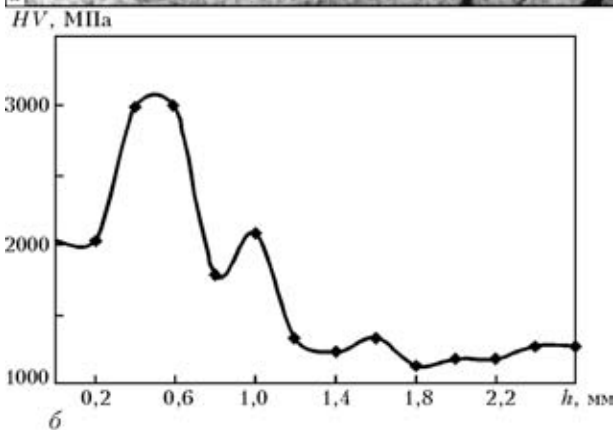
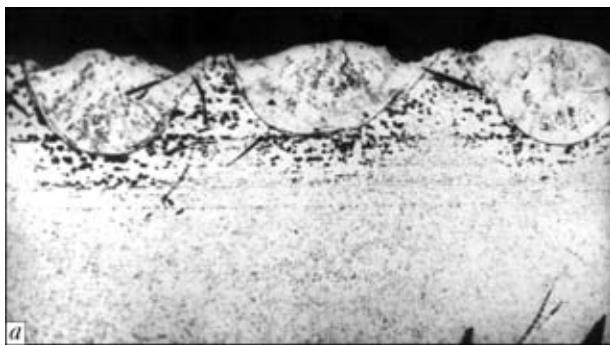


Рис. 6. Структура дорожек легирования хромом на Ст3пс без перекрытия, X32 (а) и распределение микротвердости по глубине h в центральной части дорожек (б)

регревом приповерхностных слоев и наблюдается также в покрытиях, нанесенных комбинированным способом, что однако не является недостатком, поскольку при финишной механической обработке разупрочненный слой удаляется.

Примером практического применения разработанного способа нанесения покрытий может быть восстановление шеек осей железнодорожных вагонов.

Выводы

1. Исследован комбинированный процесс нанесения тонких (0,05...0,50 мм) износ- и коррозионностойких покрытий систем Ni-Cr-B-Si и Ni-Fe-B-Si на низкоуглеродистые стали, объединяющий преимущества лазерной наплавки и микроплазменного напыления. Предложено проведение родственного технологического процесса — лазерно-микроплазменного легирования.

2. Использованный процесс нанесения покрытий повышает прочность сцепления покрытий с изделием и устраняет микротрещины в наносимых слоях, а также необходимость струйно-абразивной подготовки поверхности.

3. Установлены основные параметры процессов нанесения покрытий и легирования. В условиях проводимых экспериментов определены наиболее

значимые из этих параметров. Проведены металлографические исследования, показавшие наличие переходной зоны и отсутствие ЗТВ при нанесении покрытий, а также наличие ЗТВ при легировании. В обоих случаях в верхних слоях покрытий (дорожек легирования) имеет место падение твердости, не являющееся критичным, поскольку размер этих слоев сопоставим с припуском под финишную механическую обработку.

4. На высоту наносимых за один проход покрытий наибольшее влияние оказывают массовый расход порошка и коэффициент перекрытия дорожек. В меньшей степени влияет скорость перемещения образца и плотность мощности лазерного излучения. Изменение угла между осями лазерного излучения и микроплазменной струи на высоту покрытия практически не влияет.

1. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
2. Sasaki S., Shimura H., Kawakami Y., Shahzad A. Laser assisted plasma spray coating method for surface modification of tribo-materials // Proc. of ITSC'95, Kobe, May, 1995. — Vol. 1. — P. 267–271.
3. Zreris R., Nowotny S., Berger L.-M., Hambold L., Beyer E. Characterization of coatings deposited by laser-assisted atmospheric plasma spraying // Proc. of Thermal Spray Conf. 2003, Orlando, USA, 2003. — P. 567–572.
4. Coddet C., Montaron G., Marchione T., Freneaux O. Surface preparation and thermal spray in a single step: the PROTAL process // Proc. of 15th ITSC, Nice, France, 1998. — Vol. 2. — P. 1321–1325.
5. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.
6. Богачек В. Л., Цыбина Л. Н. Качество покрытий, полученных микроплазменным напылением // Автомат. сварка. — 1988. — № 8. — С. 58–60.
7. Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления / Ю. С. Борисов, Ю. Н. Переверзев, С. Г. Войнарович, В. Г. Бобрик // Там же. — 1999. — № 6. — С. 53–55.
8. Хаскин В. Ю., Величко О. А. Прочность сцепления слоя, наплавленного лазерным излучением, с металлом основы // Там же. — 1994. — № 7/8. — С. 51–52.
9. Лазерная наплавка цилиндрических деталей порошковыми материалами / О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко, И. В. Молчан, В. Д. Паламарчук // Там же. — 1990. — № 1. — С. 59–65.
10. Грезев А. Н., Сафронов А. Н. Трещинообразование и микроструктура хромборникелевых сплавов, наплавленных с помощью лазера // Свароч. пр-во. — 1986. — № 3. — С. 6–8.
11. Анализ условий образования трещин при лазерной наплавке порошков системы Ni-Cr-B-Si / В. П. Морозов, А. И. Мисюров, А. Г. Григорьянц и др. // Там же. — 1987. — № 5. — С. 32–35.
12. Kovalenko V., Haskin V. The selection of self-fluxing powder materials for laser cladding // Informatysatsiya ta novi tekhnologii. — 1995. — № 1. — P. 36–39.
13. Майоров В. С., Матросов М. П. Влияние поверхностно-активных веществ на гидродинамику лазерного легирования металлов // Квант. электроника. — 1989. — № 4. — С. 806–810.
14. Технологический CO₂-лазер ЛТ 104 мощностью 10 кВт / В. П. Гарашук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.

The hybrid process is suggested for laser-microplasma alloying and coating. The process is free from drawbacks of laser cladding and microplasma spraying. Main process parameters, characteristic structure of the transition zone and distribution of microhardness have been studied.

Поступила в редакцию 17.02.2005