



УДК 621.793
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-95-100

Поступила 29.05.2018
Received 29.05.2018

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ С ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ЛЕНТЫ

А. П. ЕЛИСТРАТОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: alexeiye@gmail.com

Полупроводниковый лазер обладает рядом особенностей, делающих его эффективным инструментом для термической обработки металла, в частности, для поверхностного упрочнения. При этом обеспечивается достаточно высокая концентрация подводимой энергии и ее локальность и возможно регулирование параметров лазерной обработки в широких пределах. Невысокие по сравнению с другими типами лазеров плотности энергии в луче позволяют избежать глубокого проплавления, что особенно важно для поверхностной обработки – закалке и нанесения износостойких покрытий.

Представлен метод наплавки металлических слоев с применением металлической ленты, которая нагревалась до плавления лучом лазера. Исследованы металлургические особенности процесса формирования слоя, оптимизирована схема подачи и плавления ленты.

Ключевые слова. Металлическая лента, наплавка, полупроводниковый лазер, плоский луч, диффузия легирующих элементов, производительность процесса.

Для цитирования. Елистратов, А. П. Особенности лазерной наплавки с подачей присадочной ленты / А. П. Елистратов // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 95–100. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-95-100.

PECULIARITIES OF LASER CLADDING WITH FEEDING OF THE FILLER TAPE

A. P. YELISTRATOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: alexeiye@gmail.com

Semiconductor laser has some features that make it an efficient tool for surface treatment of metals, in particular for surface strengthening. It provides high enough concentration of energy in the heat spot, possibility to adjust process parameters in wide range. Insignificant, compare to other types of laser, energy density eliminates an extensive penetration and internal melting of the metal, which is very important for surface treatment and for the wear resistant covering.

Method of metal layers deposition by feeding a metal strip and its melting by laser beam was developed. Metallurgical processes of the deposit lay forming were investigated; method of feeding the filler strip was optimized.

Keywords. Metal strip, cladding, semiconductor laser, flat beam, alloy elements diffusion, process productivity.

For citation. Yelistratov A. P. Peculiarities of laser cladding with feeding of the filler tape. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 95–100. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-95-100.

Имеются сведения о применении лазера для нанесения покрытия из никелевого сплава путем оплавления предварительно уложенного листа фольги на поверхность стали с помощью 10 кВ CO₂-лазера, оснащенного специальным интегратором луча для получения пятна нагрева размером 10×10 мм [1]. При скорости перемещения 0,25–0,5 м/мин была достигнута глубина проплавления до 3 мм.

Методика проведения экспериментов

Цель экспериментальных исследований – разработка производительного метода лазерной наплавки. Используемый присадочный металл – лента из никелевого сплава, поперечное сечение 6×0,4 мм. Эксперименты проводили с использованием полупроводникового (диодного) лазера Nuvonux 4000L [2]. Химический состав основного и присадочного металлов приведен ниже.

Материал	C	Mn	Si	S/P	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al
Основа	0,23	1,35	–	0,04	–	–	–	–	–	–
Лента	0,1	0,5	0,5	0,015	58	20	10	3,5	0,4	0,3

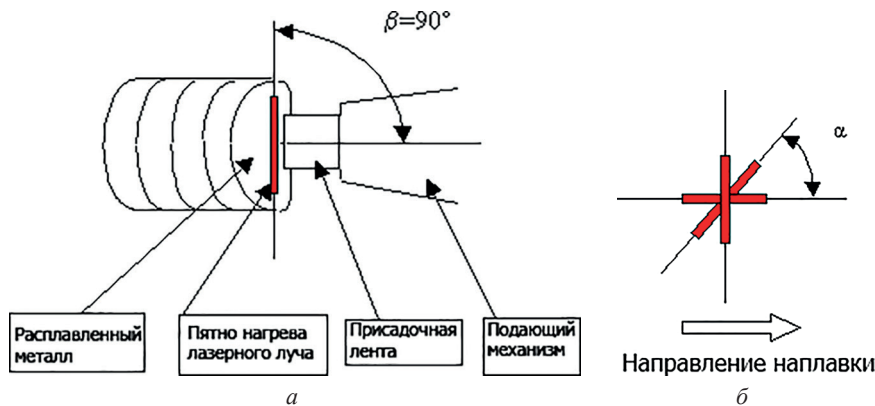


Рис. 1. Основные элементы системы «луч лазера – лента»: а – расположение ленты относительно пятна нагрева луча; б – ориентация луча относительно направления наплавки

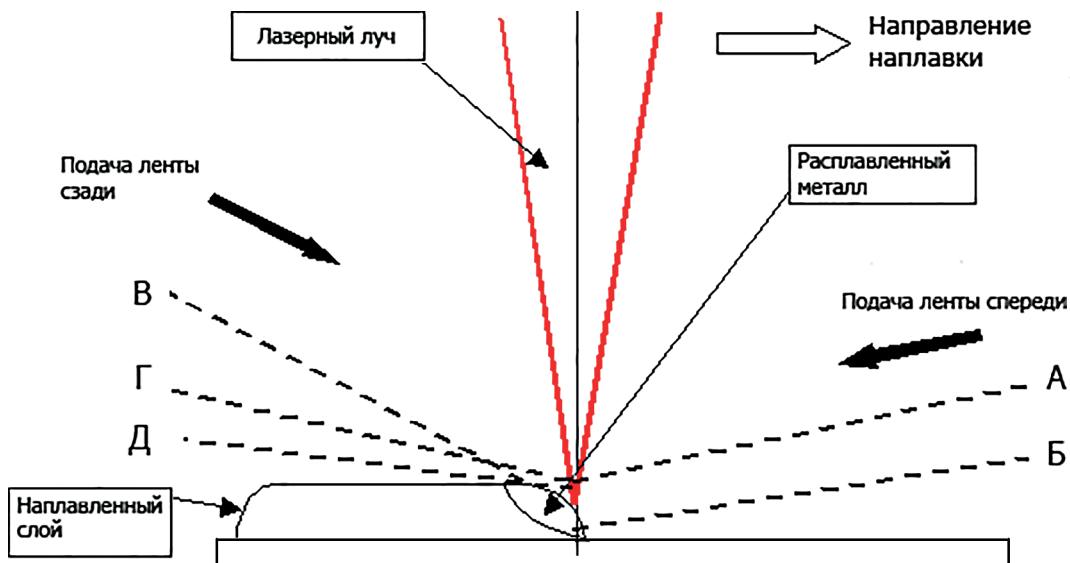


Рис. 2. Расположение ленты относительно поверхности ванны расплава при подаче ленты в переднюю часть ванны (положения А, Б) и сзади (по направлению наплавки, положения В, Г, Д)

Диапазон исследуемых параметров процесса: скорость подачи ленты – 80–150 см/мин; скорость наплавки – 10–20 см/мин; защитный газ – аргон, 25 л/мин.

Направление подачи ленты было только поперек пятна нагрева луча ($\beta = 90^\circ$, рис. 1, а). Наплавлялись прямые одиночные и многослойные валики.

Результаты исследований и их обсуждение

Эксперименты подтвердили равномерное распределение расплавленного металла ленты по объему ванны шириной до 12–14 мм, высотой до 9 мм. Для достижения равномерного формирования наплавленного валика требуется сохранять пропорцию между скоростью подачи ленты и скоростью наплавки, если скорость подачи ленты снижена, валик имеет малую высоту и значительную неравномерность.

Для равномерного формирования валика в значительном диапазоне изменения скорости наплавки можно варьировать расположением луча относительно направления наплавки (угол α , рис. 1, б). В этом случае направление подачи ленты $\beta = 90^\circ = \text{const}$, но ширина ванны расплавленного металла сокращается, что улучшает условия формирования валика при больших скоростях наплавки.

Плоская поверхность подаваемой в зону наплавки ленты абсорбирует световую энергию лазерного луча эффективнее, чем цилиндрическая поверхность проволоки, что способствует ее быстрому нагреву и оплавлению при расширенном диапазоне углов подачи. Следует отметить определенные трудности нагрева ленты вследствие отражения части светового потока ее гладкой поверхностью, но короткая длина волны луча диодного лазера (808 нм) обеспечивает ему адсорбцию до 40% на поверхности стали, в то время как лучи лазеров других типов имеют этот показатель ниже – 12–30%.

Были исследованы возможные комбинации в расположении ленты относительно луча, ванны и направления наплавки (рис. 2):

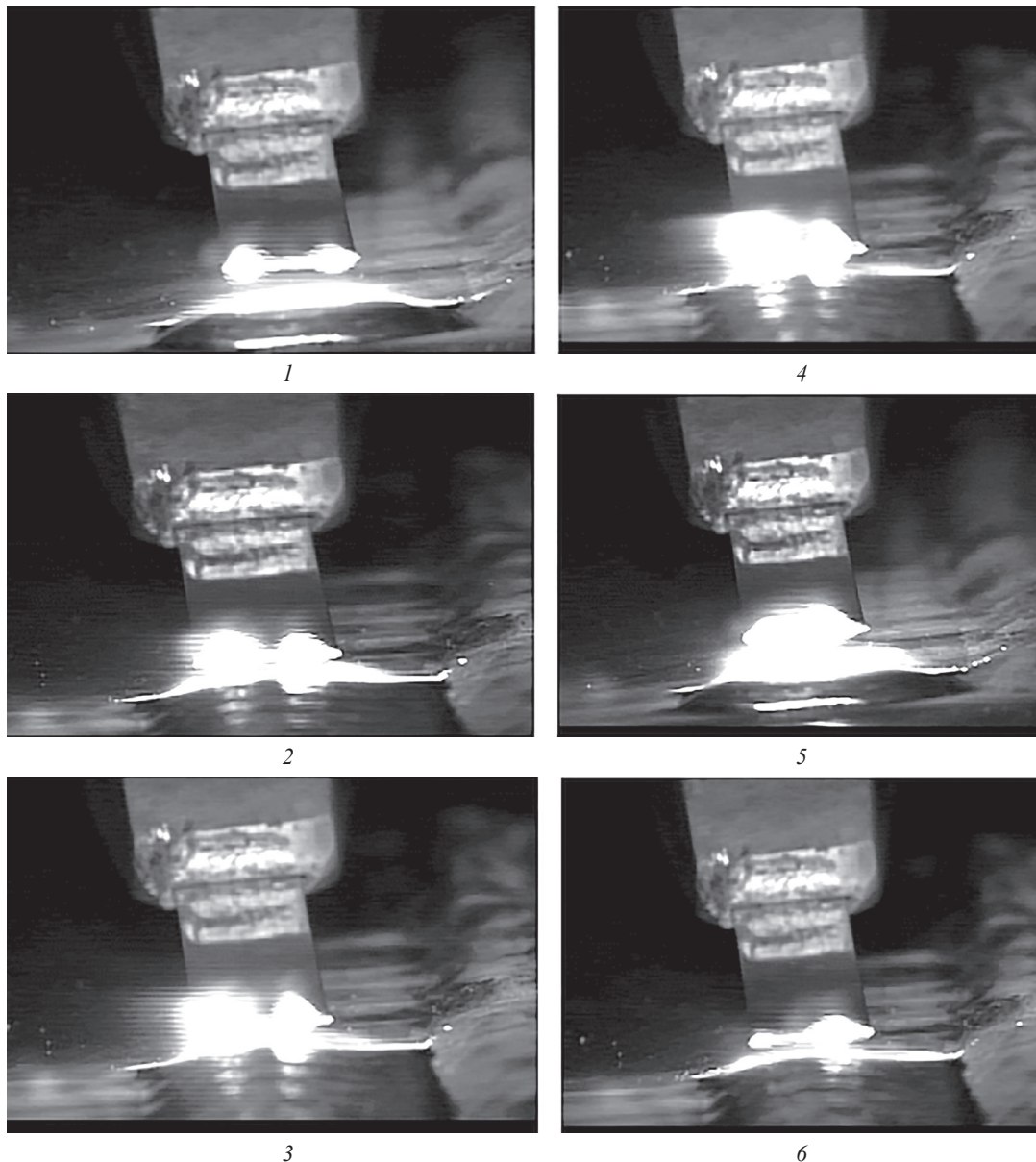


Рис. 3. Кинограммы процесса плавления ленты при подаче ее по схеме Б (см. рис. 2)

А. Подача ленты спереди, в переднюю часть ванны, ванна имеет небольшую толщину (2–3 мм) в направлении подачи ленты и поэтому диапазон скоростей подачи ленты ограничен: 80–140 см/мин.

Б. Подача ленты спереди, в нижнюю часть луча над ванной, обычно формируется несколько капель на торце ленты (рис. 3), мелкая чешуйчатость валика (рис. 4). Поперечное сечение валика – до 20 мм² при скоростях подачи ленты до 150 см/мин, площадь проплавления при максимальной энергии луча – 0,2–0,4 мм². При подаче ленты ниже, внутрь ванны (рис. 5) капельный перенос переходит в непрерывное оплавление и поверхность валика становится гладкой.

В. Подача ленты сзади луча под углом, в верхнюю часть ванны, лента расплавляется, не достигнув пятна нагрева, за счет энтальпии ванны. Ввиду незначительного перегрева последней ускоренная кристаллизация за счет теплоотвода в объем ленты может вызвать «приваривание» ленты. Во всем диапазоне режимов нам не удалось достичь равномерного формирования валика при такой схеме подачи.

Г. Подача ленты сзади луча в нижнюю часть луча над ванной, оптимальная форма валика, аналогичная подаче ленты по схеме Б. При этом высота установки торца ленты над ванной – 1–2 мм и расплавленный металл ленты переходит каплями в ван-

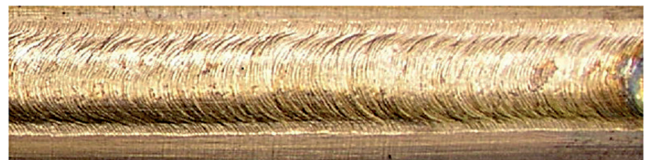


Рис. 4. Внешний вид валика наплавленного по схеме Б

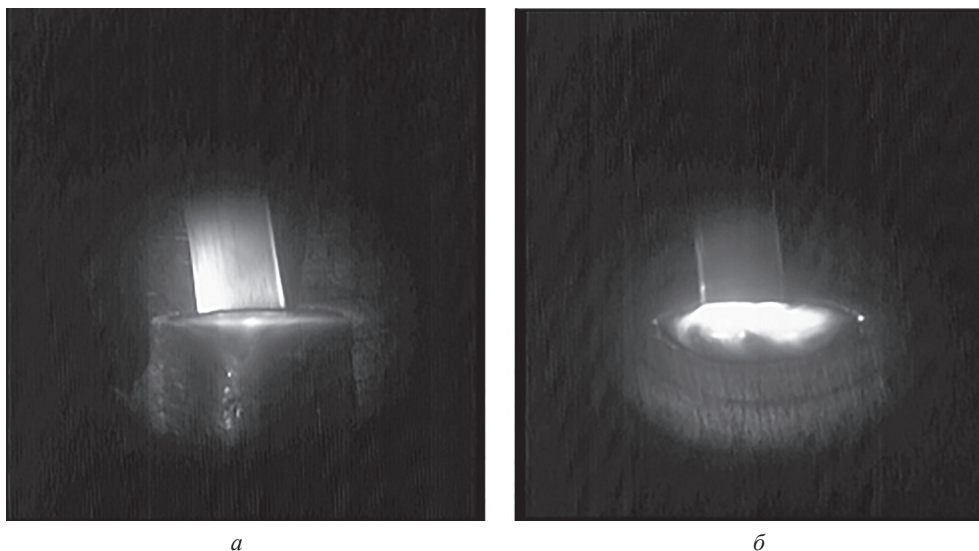


Рис. 5. Подача ленты в переднюю часть ванны (схема А) по середине ее высоты (а) и в ее нижнюю часть (схема Б (б))

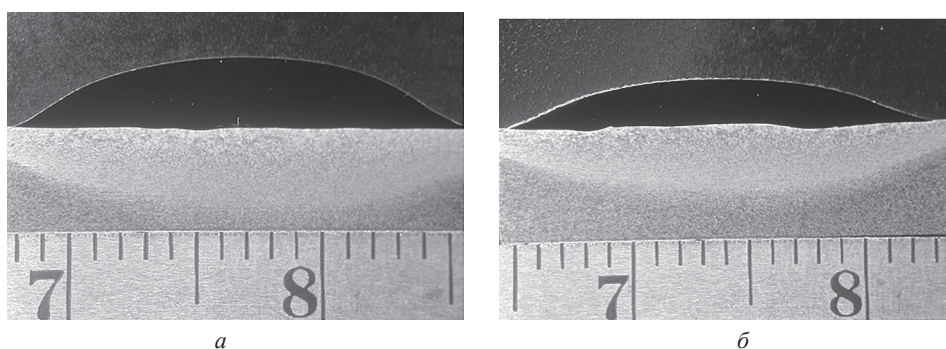


Рис. 6. Макрошлифы наплавленного слоя при скорости подачи ленты 130 см/мин и скоростях наплавки 10 см/мин (а) и 25 см/мин (б)

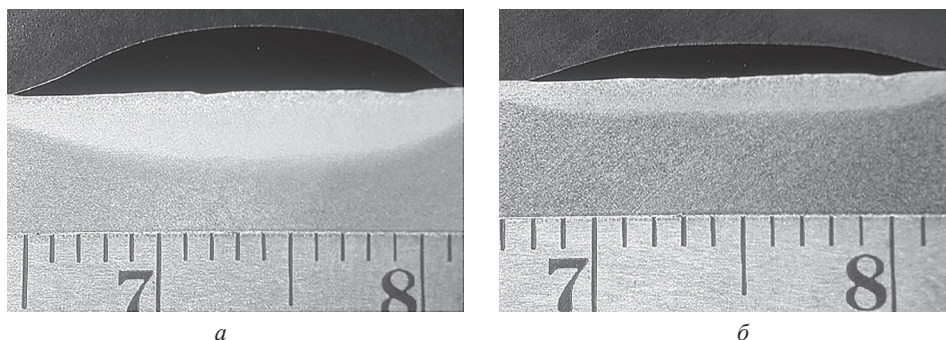


Рис. 7. Макрошлифы наплавленного слоя при скорости подачи ленты 150 см/мин и скоростях наплавки 10 см/мин (а) и 15 см/мин (б)

ну. При этом в случае недостаточной для данной скорости наплавки объема подаваемой ленты ширина зоны оплавления лазером поверхности основы становится больше, чем результирующая ширина наплавленного валика, так как сила поверхностного натяжения «стягивает» объем ванны и сужает валик.

Д. Подача ленты сзади параллельно поверхности ванны с их касанием в пятне нагрева, подаваемая лента оказывает действие скользящего кристаллизатора на ванну, делая валик плоским. Поперечное сечение валика – до 20 мм², максимальная скорость подачи ленты – до 100 см/мин, производительность расплавления ленты – до 27 г/мин.

Из рассмотренных вариантов наплавки для дальнейших экспериментов был выбран способ наплавки А. Снижение высоты расположения ленты над ванной до 2–3 мм позволило, таким образом, регулировать размер переходящих капель металла и получить плоские валики. Поперечное сечение наплавленных валиков приведено на рис. 6, 7.

Использование ленты в качестве присадочного металла обеспечивает значительную стабильность и жесткость процессу наплавки с минимальными корректировками его параметров в течение эксперимента.

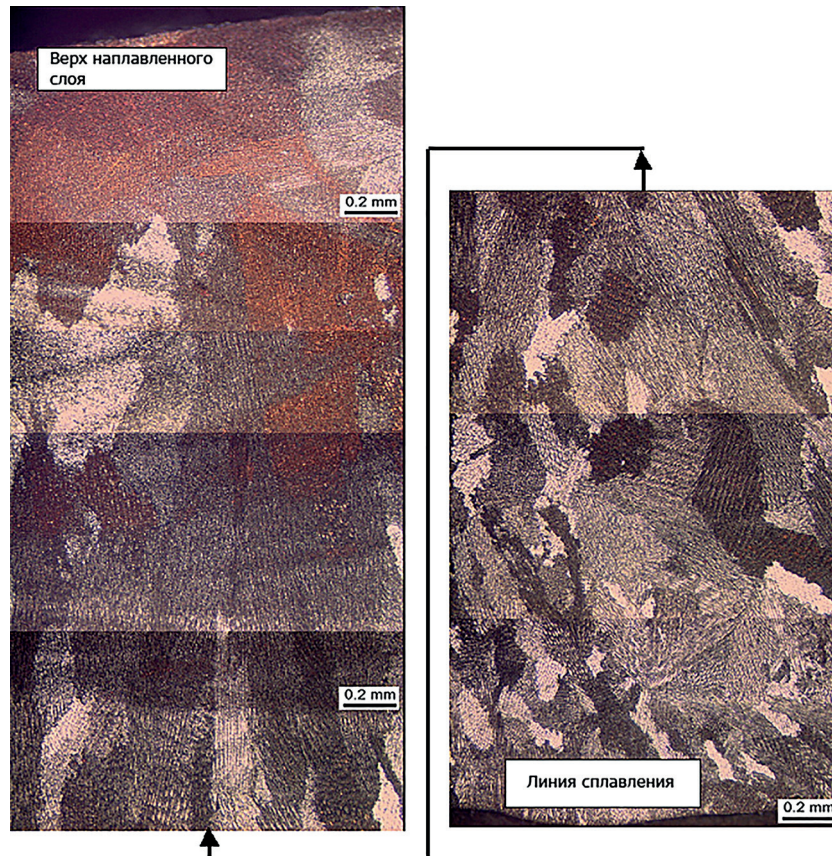


Рис. 8. Микроструктура многослойной наплавки

При наплавке протяженных поверхностей каждый валик должен быть перекрыт на 15–20% его ширины для достижения плоского профиля наплавки при максимальной его ширине. Вследствие небольших размеров ванны расплавленного металла и ее ускоренного охлаждения возможна наплавка на наклонные поверхности и края деталей.

Металлографические исследования

Чистый металл наплавки и отсутствие дефектов объясняются стабильностью нагрева металла световым лучом, отсутствием интенсивного перемешивания, турбулентностей, характерных для сварочных ванн при электродуговых способах сварки. Подвод тепловой энергии луча к верхней части ванны минимизирует конвективные потоки и снижает вероятность попадания оксидов и других примесей внутрь ванны.

Многослойные (восемь слоев) образцы наплавки (рис. 8) продемонстрировали дендритную структуру, ориентированную в соответствии с направлением теплоотвода при охлаждении. Границы между наплавленными слоями отсутствуют, а дезориентировка кристаллов в нижней части объясняется распространением тепла в различных направлениях при остывании. В то же время кристаллы имеют выраженную ориентировку в верхней части.

Зона термического влияния содержит относительно крупные кристаллы, расположенные непосредственно вдоль линии сплавления, которые измельчаются по мере удаления в основной металл.

В связи с высокой скоростью охлаждения наплавленного металла ширина зоны диффузии железа из основного металла в наплавленный слой через линию сплавления не превышает 200 мкм (рис. 9). Концентрация других легирующих элементов (хром, никель, молибден) в наплавленном слое несколько снизилась внутри зоны шириной менее 300 мкм.

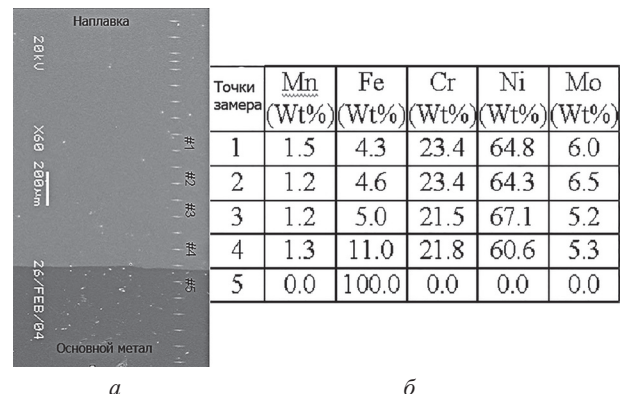


Рис. 9. Интенсивность диффузии легирующих элементов через линию сплавления: а – схема замеров; б – EDS-данные

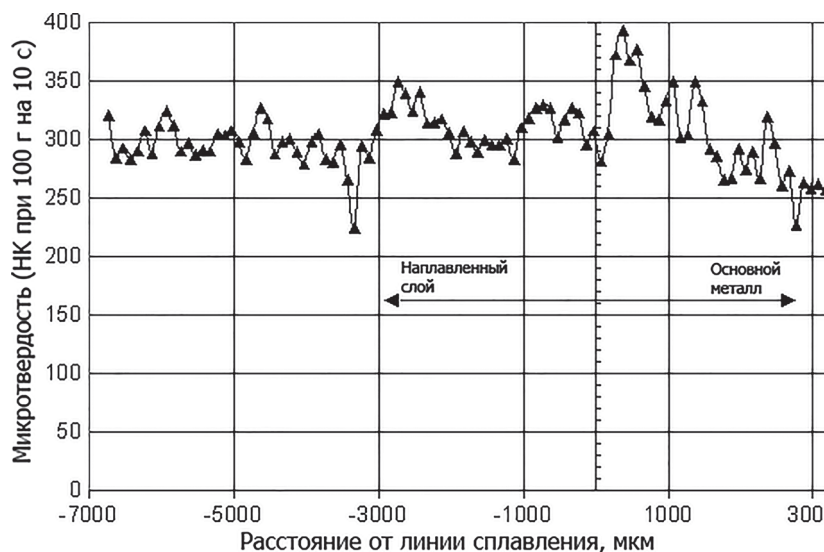


Рис. 10. Значения микротвердости в зоне сплавления

Исследования микротвердости наплавки проводили вдоль вертикальной оси по центру наплавленного слоя на расстоянии ± 4000 мкм в обоих направлениях от линии сплавления при нагрузке 100 г в течение 10 с (рис. 10). Некоторое увеличение твердости в основном металле обнаружено рядом с линией сплавления, что может быть объяснено явлениями в зоне термического влияния.

Выводы

Диодный 4 кВ лазер обладает рядом технологических особенностей, делающих его перспективным для применения при наплавке и других видах поверхностной обработки с целью увеличения или восстановления размеров детали. Низкая плотность энергии в пятне по сравнению с другими типами лазеров позволяет избежать интенсивного проплавления основного металла и повысить коэффициент перехода легирующих элементов. Эксперименты показали возможность расплавления лучом до $3,72$ см³/мин ленты из Ni-Cr-сплава.

В связи с прямоугольным профилем луча вводится новый параметр процесса: угол поворота луча относительно направления наплавки, который позволяет контролировать ширину ванны расплавленного металла и ширину валика, а также поддерживать минимальной глубину проплавления.

При подаче ленты в направлении поперек пятна нагрева процесс наплавки характеризуется высокой стабильностью, что позволяет получить равномерное формирование наплавленного слоя.

Процесс обеспечивает минимальное проплавление основного металла и минимальные потери легирующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vuoristo P., Vihinen J. 2002. High-Performance Laser Coatings for Manufacturing and Maintenance of Industrial Components and Equipment. Maintenance Research in Finland. Kunnossapito #5, 2002.
2. Nacey T. 2001. Diode Lasers Offer Welding Advantages. Welding Journal 80(6). 28–30.

REFERENCES

1. Vuoristo P., Vihinen J. 2002. High-Performance Laser Coatings for Manufacturing and Maintenance of Industrial Components and Equipment. Maintenance Research in Finland. Kunnossapito #5, 2002.
2. Nacey T. 2001. Diode Lasers Offer Welding Advantages. Welding Journal 80(6). 28–30.