



УДК 621.316

Поступила 25.05.2017

ФОРМИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ ЛАЗЕРОМ С ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ THE FORMATION OF BIMETALLIC CONNECTION IN WELDER DEPOSITION UNDER LASER WELDING WITH THE FILLER WIRE FEED

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

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

В работе проанализированы металлургические и технологические особенности процесса наплавки на роботизированной установке с полупроводниковым лазером. Показана перспективность использования луча с низкой плотностью энергии в пятне нагрева для нанесения металлических слоев с использованием присадочной проволоки.

The metallurgical and technological features of welding deposition in a robotic unit with a semiconductor laser are analyzed. The prospects of using beam with low energy density in the spot heating for applying metallic layers using filler wire are shown.

Ключевые слова. *Плоский луч, формирование ванны металла, проплавление основы, диффузионные процессы через линию сплавления.*

Keywords. *Flat beam, molten metal pool forming, penetration of base metal, diffusion processes through the line of fusion.*

Использование высокоэнергетического светового луча современных лазеров позволяет успешно решить многие проблемы, связанные с резкой, сваркой и поверхностной обработкой металлов.

Особую группу технологий представляет изготовление биметаллических деталей, состоящих из металла основы и легированного металлического слоя на рабочей поверхности, нанесенного с целью повышения износостойкости или восстановления размеров. Большое значение при этом имеет не только минимальное проплавление основного металла, но и исключение перегрева и выгорания легирующих элементов, обеспечивающих высокую износостойкость наплавленному слою. Поэтому необходим источник нагрева с плотностью энергии в пятне нагрева, позволяющей эффективно плавить присадочный металл – металлический порошок, проволоку и др., но исключающий перегрев основы и ее интенсивное испарение в пятне нагрева. Опубликованные результаты исследований упоминают трудности с оплавлением проволоки лучом лазера, отмечается незначительная абсорбция энергии луча, увеличивающаяся с возрастанием скорости подачи проволоки, и неравномерное плавление проволоки. Рекомендуется использование лазерной газопорошковой наплавки [1, 2], что не представляется достаточно эффективным процессом для промышленного применения. Стабильные результаты были достигнуты лишь с подачей тонкой проволоки (0,4 мм) в луч 4 кВ YAG-лазера [3] и при подаче 0,9-миллиметровой проволоки в луч 5 кВ CO₂-лазера при скорости ее подачи до 90 см/мин и дефокусированном луче с плотностью энергии в пятне нагрева $0,6 \cdot 10^5$ Вт/см² [4].

Были проанализированы технические характеристики лазеров различных типов, и для дальнейших экспериментов был выбран диодный лазер HPDDL-ISL-4000L Nuvonux (4 кВ), имеющий достаточную плотность энергии в пятне нагрева (10^3 Вт/см²), фокальное расстояние 94 мм и размер пятна нагрева на этом расстоянии: 12×0,5 мм при длине волны светового луча 805 нм. Такой размер пятна нагрева делает этот тип лазера очень привлекательным для поверхностного упрочнения и наплавки, тем более что его энергетическая эффективность составляет 40–50% вместо 3–20% для приведенных выше лазеров.

Для экспериментов диодный лазер был установлен на робот и оснащен системой подачи присадочной проволоки и другим вспомогательным оборудованием (рис. 1). Вследствие прямоугольной формы

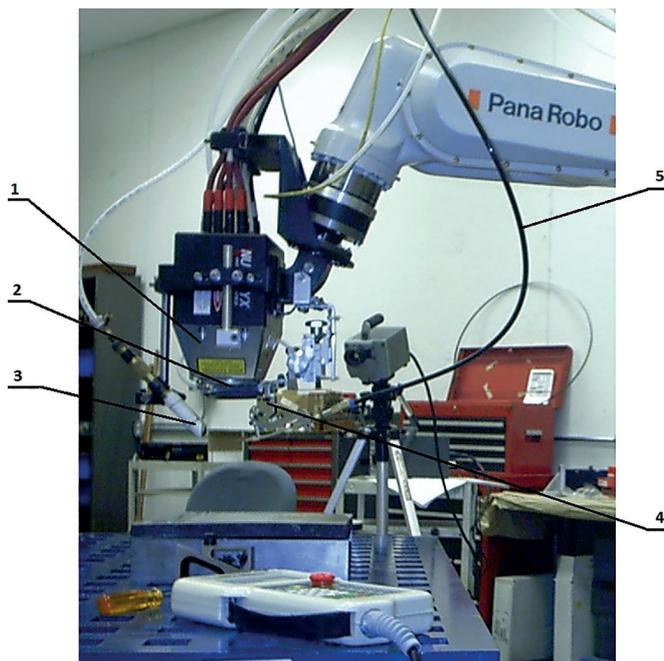


Рис. 1. Основные элементы экспериментальной установки: 1 – головка лазера Nivonux 4000L; 2 – оптическая система и защитное стекло; 3 – система подачи защитного газа; 4 – система подачи и регулировки положения присадочной проволоки; 5 – гибкий кабель для подачи проволоки

пятна нагрева был введен дополнительный параметр режима наплавки – угол расположения луча относительно направления наплавки (рис. 2). В экспериментах использовали сплошную стальную (ER-420) и порошковую (S-134) проволоку диаметром 1,0 мм, а также несколько образцов были наплавлены с подачей металлического порошка стали 420 и смеси карбида вольфрама (50%) и никеля (50%) через обычный порошковый питатель при подаче 50 г/мин. Химический состав используемых материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Материал	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P/S	Fe
Проволока ER-420	0,35	0,6	0,5	13	0,6	0,7	0,75	0,03	Осн.
Проволока S-134	2–7	1–3	1–3	20–30	–	0,5–4	–	0,04	Осн.
Основной металл	0,25	1,15	0,3	–	–	–	–	0,04	Осн.

Предварительные эксперименты показали, что при подаче проволоки в пятно нагрева только узкий участок поверхности проволоки, расположенный перпендикулярно лучу (верхняя часть поверхности проволоки), поглощает определенную часть энергии луча, но боковые участки поверхности проволоки интенсивно отражают луч. В случае подачи проволоки в луч над поверхностью ванны расплавленного металла плавление проволоки и формирование капли металла происходят аналогично, как по дуговой сварке плавящимся электродом на режимах крупнокапельного переноса. Но в данном случае отсутствуют силы, связанные с использованием сварочного тока, и отрыв, и перемещение капли расплавленного металла происходят под действием только сил тяжести и поверхностного натяжения. Капли расплавленного металла проволоки имеют значительный диаметр (до 2–3 мм) и при своем отрыве от торца проволоки и переходе в ванну вызывают колебания ее поверхности, тем более, что объем ванны всего лишь в 3–4 раза превышает объем капли. В результате колебаний поверхности ванны образуются чешуйки на поверхности наплавленного валика. Предварительные эксперименты выявили некоторые

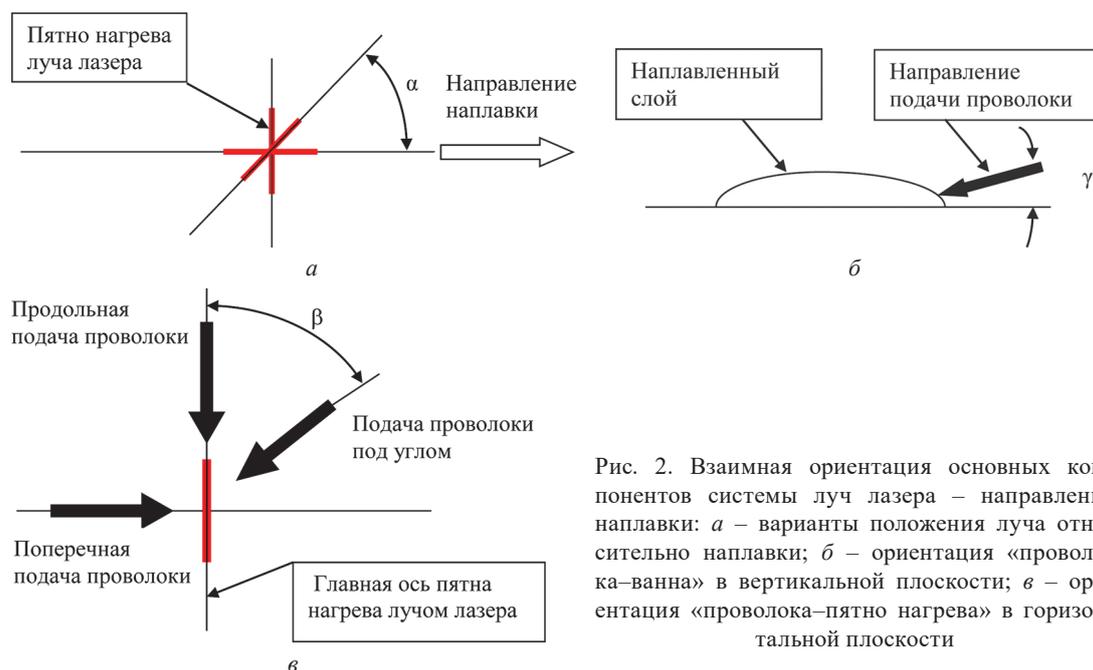


Рис. 2. Взаимная ориентация основных компонентов системы луч лазера – направление наплавки: а – варианты положения луча относительно наплавки; б – ориентация «проволока–ванна» в вертикальной плоскости; в – ориентация «проволока–пятно нагрева» в горизонтальной плоскости

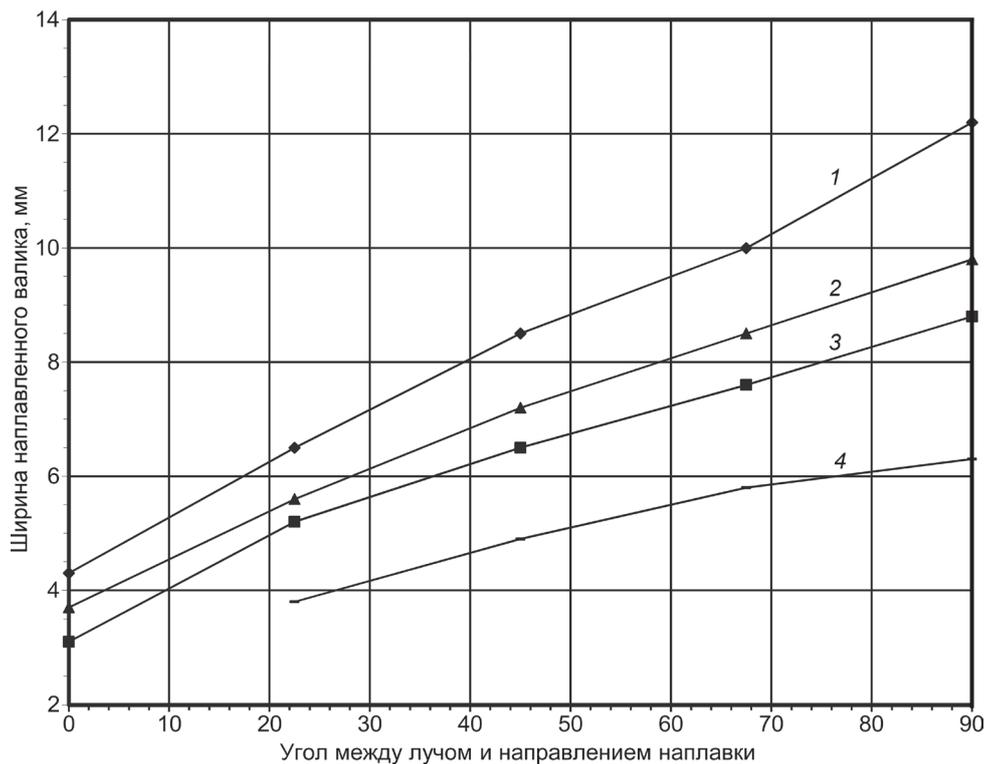


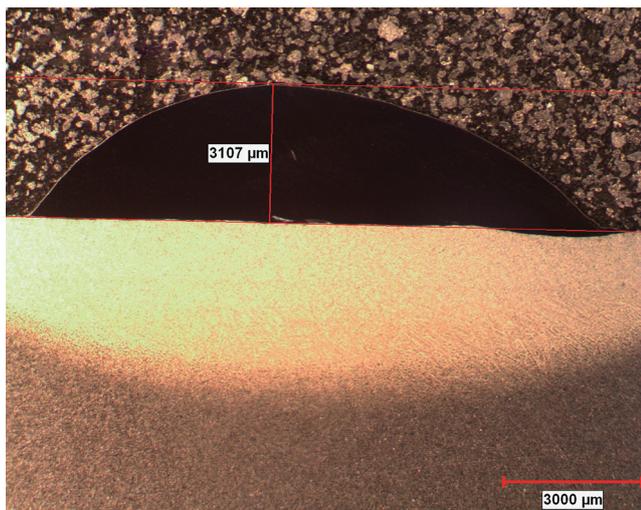
Рис. 3. Ширина наплавленного валика в зависимости от угла «проволока – луч», рабочего расстояния и энергии луча: 1 – 4 кВ, 95 мм; 2 – 3 кВ, 95 мм; 3 – 4 кВ, 105 мм; 4 – 3 кВ, 105 мм

технические трудности, связанные с подачей проволоки в лазерный луч над ванной расплавленного металла и для дальнейших экспериментов был выбран способ подачи проволоки непосредственно в ванну. Это позволило уменьшить экранирующий эффект, оказываемый проволокой на край валика, и обеспечить более эффективный ее нагрев, так как в этом случае вся наружная поверхность проволоки адсорбирует тепло. Следует отметить, что подача проволоки в ванну может производить определенный охлаждающий эффект, что необходимо учитывать при выборе диаметра проволоки для конкретных условий наплавки.

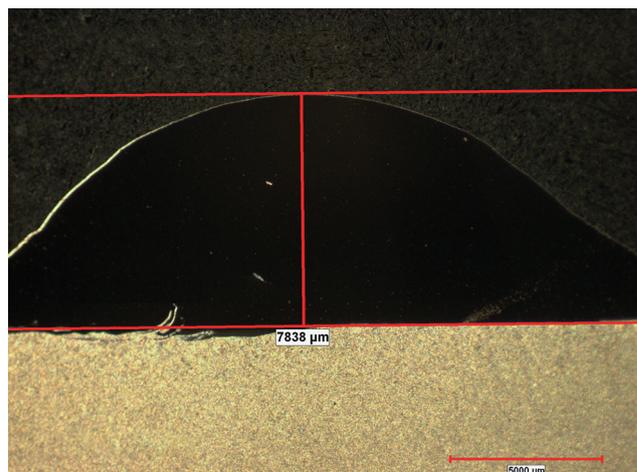
Максимальная ширина валика достигается при расположении луча перпендикулярно направлению наплавки и изменение рабочей дистанции (расстояние между лазером и поверхностью образца) на 10 мм оказывает больший эффект, чем снижение энергии луча с 4 до 3 кВ (рис. 3). Рабочая дистанция – важный параметр, что объясняется значительной степенью дивергенции луча, присущей данному типу лазера.

Особенностью этого процесса наплавки является существование двух размеров, относящихся к ширине наплавленного слоя: ширина зоны, оплавленной лучом, и ширина валика наплавленного металла. При расположении луча перпендикулярно направлению наплавки ванна расплавленного металла широкая и мелкая и при ее остывании развиваются значительные силы поверхностного натяжения, стягивающие расплавленный металл к оси валика. Это способствует образованию узкой оплавленной зоны вдоль валика, а такой узкий валик обычно формируется при значительной тепловой мощности луча и недостаточной скорости подачи проволоки. При увеличенной подаче проволоки и большем объеме ванны валик становится шире и располагается на всей оплавленной лучом зоне. Эта особенность типична для перпендикулярного расположения луча и при уменьшении угла α (см. рис. 2) валик становится более равномерным, а ванна – более высокой, что облегчает подачу в нее проволоки.

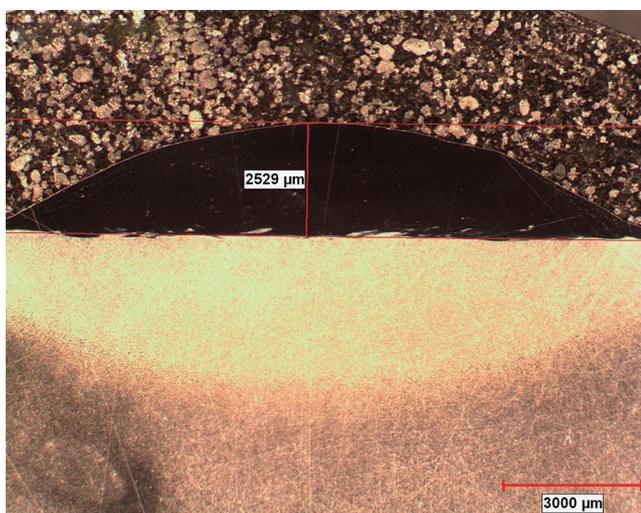
Главным достоинством исследуемого процесса наплавки является минимальное проплавление основного металла. В широком диапазоне исследуемых параметров средняя глубина проплавления составляла $0,4 \pm 0,2$ мм. При этом на малых скоростях наплавки глубина проплавления была неравномерная, с местными «углублениями», но при увеличении скорости наплавки она снижалась и становилась равномерной. Равномерное проплавление достигается и при меньшей мощности луча, а увеличение рабочей дистанции на 10 мм от фокальной высоты нарушает форму валика. Изменения рабочей дистанции могут быть скомпенсированы скоростью наплавки. В этом случае ширина валика (7–8 мм) остается такой же, как при меньшей мощности луча и меньшей скорости наплавки.



a



б



в

Рис. 4. Поперечные размеры наплавленных валиков проволокой 420: *a* – скорость подачи проволоки – 0,62 м/мин, скорость наплавки – 0,1 м/мин; *б* – скорость подачи проволоки – 0,62 м/мин, скорость наплавки – 0,2 м/мин; *в* – скорость подачи проволоки – 0,8 м/мин, скорость наплавки – 0,1 м/мин с поперечными колебаниями при амплитуде 3 мм

Поперечные сечения валиков, наплавленных проволокой ER-420 при мощности луча 4 кВ с использованием фокусировки луча 12×6 мм и параметрах процесса (скорость подачи проволоки/скорость наплавки, м/мин) соответственно 0,63/0,1; 0,63/0,24; 0,76/0,1, приведены на рис. 4, *a*, *б*, *в*.

Металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе (рис. 5) подтвердили отсутствие дефектов и наличие очень узкой зоны сплавления. Так, при наплавке исследованными проволоками длина зоны диффузии хрома в основной металл составила менее 5 мкм (рис. 6). На рисунке маркировка линий соответствует марке используемого наплавочного материала и режиму наплавки (табл. 2).

Таблица 2

Номер образца	5,1	6,2	8,3	9,5	10,3
Мощность луча, кВт	4	4	4	4	4
Размер пятна, мм	12×0,5	12×0,5	12×6	12×6	12×6
Подача проволоки, м/мин	–	–	0,62	0,62	0,80
Скорость наплавки, м/мин	0,4	0,3	0,1	0,2	0,1

Наплавка с подачей порошкового присадочного металла (порошок 420) выявила определенные сложности, связанные со значительной абсорбцией газов частицами порошка и интенсивным газовыделением при наплавке. При этом удовлетворительное формирование наплавленного валика наблюдалось в довольно узком диапазоне режимов (рис. 7, *a*, *б*), где представлены шлифы образцов, наплавленных с подачей смеси порошков карбида вольфрама (65%) и никеля (35%). Как видно из рисунка, наплавленный слой не имеет дефектов, а частицы карбида вольфрама сохранили свои острые грани, что гарантирует высокие прочностные свойства этого композиционного слоя в условиях эксплуатации. На рис. 7, *б*

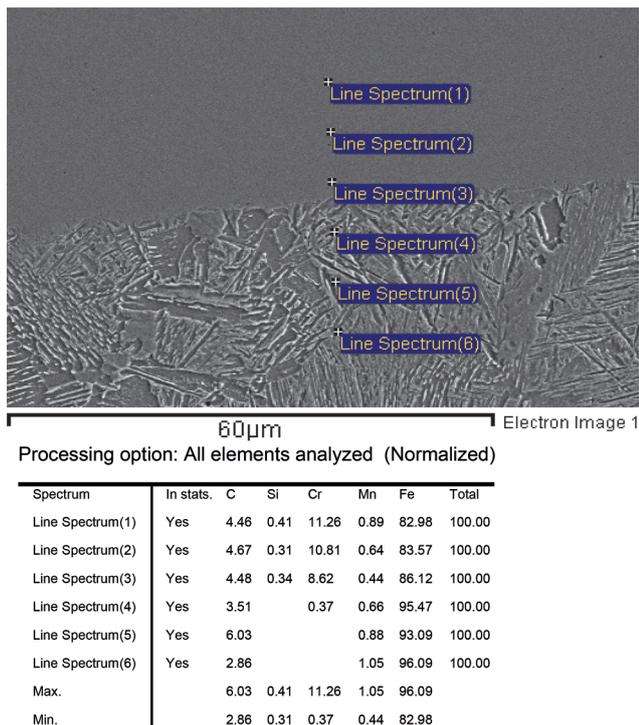


Рис. 5. Распределение химических элементов поперек линии сплавления, исследования на SEM наплавки проволокой 420 (образец 8,3)

Концентрация хрома поперек линии сплавления

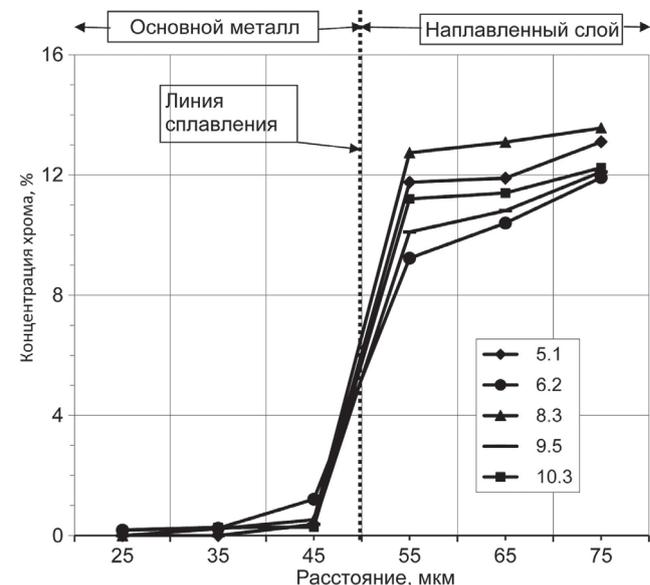
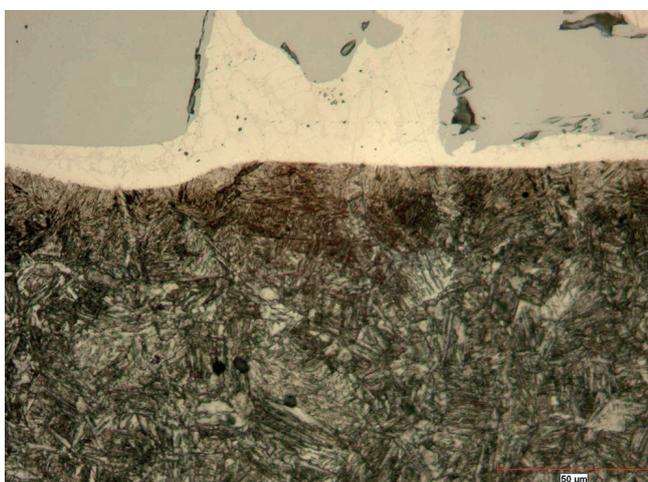
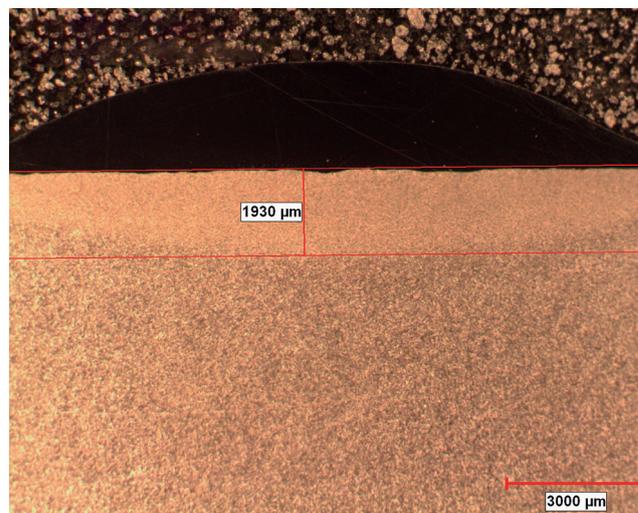


Рис. 6. Концентрация хрома поперек линии сплавления для различных присадочных проволок и режимов наплавки



а



б

Рис. 7. Наплавленный слой с подачей порошковой смеси Stellite (65% карбида вольфрама и 35% никелевого сплава), луч 4 кВ, размер пятна нагрева – 12×0,5 мм, скорость наплавки – 0,5 м/мин (а); наплавленный слой с подачей порошка из стали S-420 (б)

показан слой, наплавленный с использованием металлического порошка из стали S-420 (табл. 2, образец 6,2).

Выводы

1. Полупроводниковый лазер HPDDL-4000 обладает рядом технологических особенностей, делающих его перспективным для применения при наплавке и других видах поверхностной обработки. Низкая плотность энергии в луче по сравнению с другими типами лазеров позволяет избежать интенсивного проплавления основного металла и повысить коэффициент перехода легирующих элементов в покрытие.

2. При лазерной наплавке использование легированных порошковых проволок сопровождается интенсивным разбрызгиванием металла, что представляет опасность для оптической системы лазера и не может быть рекомендовано.

3. Глубина проплавления основного металла составляла 0,1–0,6 мм, ширина диффузионной зоны вдоль линии сплавления – до 5 мкм. Производительность расплавления стальной проволоки – до 2,9 см³/мин.

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

5. Вследствие высокой эффективности процесса диодный лазер может быть успешно применяться при изготовлении биметаллических деталей, восстановлении и упрочнении деталей машин, обеспечивая высокие служебные характеристики наносимого металлического слоя путем устранения перегрева легирующих элементов при достаточной производительности процесса наплавки.

Литература

1. **Иванов В. П., Ивашко В. С. и др.** Восстановление и упрочнение деталей: справ. Минск: Наука и технологии, 2013. 367 с.
2. **Ивашко В. С.** Прогрессивные технологии при ремонте машин, восстановлении и упрочнении деталей. Минск: Тонпик, 2006. 284 с.
3. **Hendel R.** 2002. Tooling corner: laser deposition technology: option for mold repair. *Plastic Machinery and Auxiliaries*, no. 4.
4. **Breinan E. M., Kear B. H.** 1998. Rapid solidification laser processing for control of microstructures and properties, Conference on Rapid Solidification Processing. Claitor's Publishing Div., Baton Rouge, La., p. 87.

References

1. **Ivanov V. P., Ivashko V. S.** *Vosstanovlenie i uprochnenie detalej* [Restoration and hardening of parts]. Minsk, Nauka i tehnologii Publ., 2013, 367 p.
2. **Ivashko V. S.** *Progressivnyye tehnologii pri remonte mashin, vosstanovlenii i uprochnenii detalej* [Progressive technologies for repairing machines, restoring and strengthening parts]. Minsk, Tonpik Publ., 2006, 284 p.
3. **Hendel R.** 2002. Tooling corner: laser deposition technology: option for mold repair. *Plastic Machinery and Auxiliaries*, no. 4.
4. **Breinan E. M., Kear B. H.** 1998. Rapid solidification laser processing for control of microstructures and properties, Conference on Rapid Solidification Processing. Claitor's Publishing Div., Baton Rouge, La., p. 87.