



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: alexeiye@gmail.com.*

*A. P. YELISTRATOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.  
E-mail: alexeiye@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 CO<sub>2</sub>-лазера при скорости ее подачи до 90 см/мин и дефокусированном луче с плотностью энергии в пятне нагрева  $0,6 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> [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/см<sup>2</sup>), 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

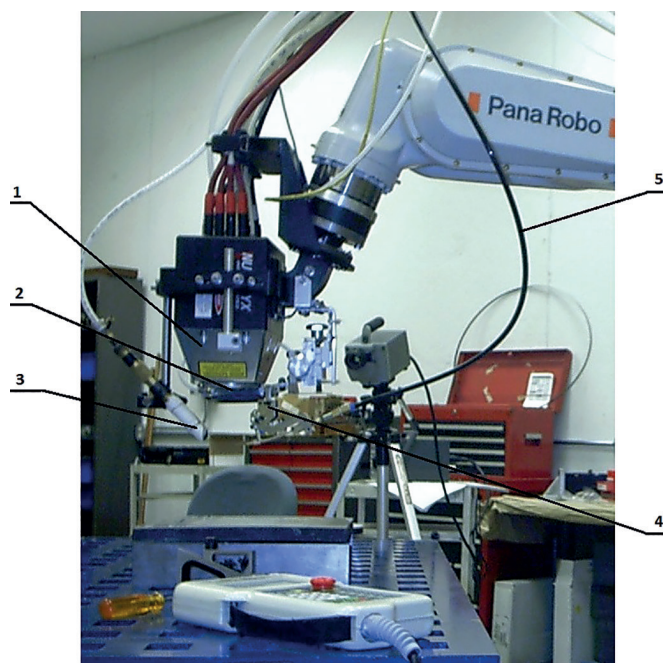


Рис. 1. Основные элементы экспериментальной установки: 1 – головка лазера Nuvonux 4000L; 2 – оптическая система и защитное стекло; 3 – система подачи защитного газа; 4 – система подачи и регулировки положения присадочной проволоки; 5 – гибкий кабель для подачи проволоки

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

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

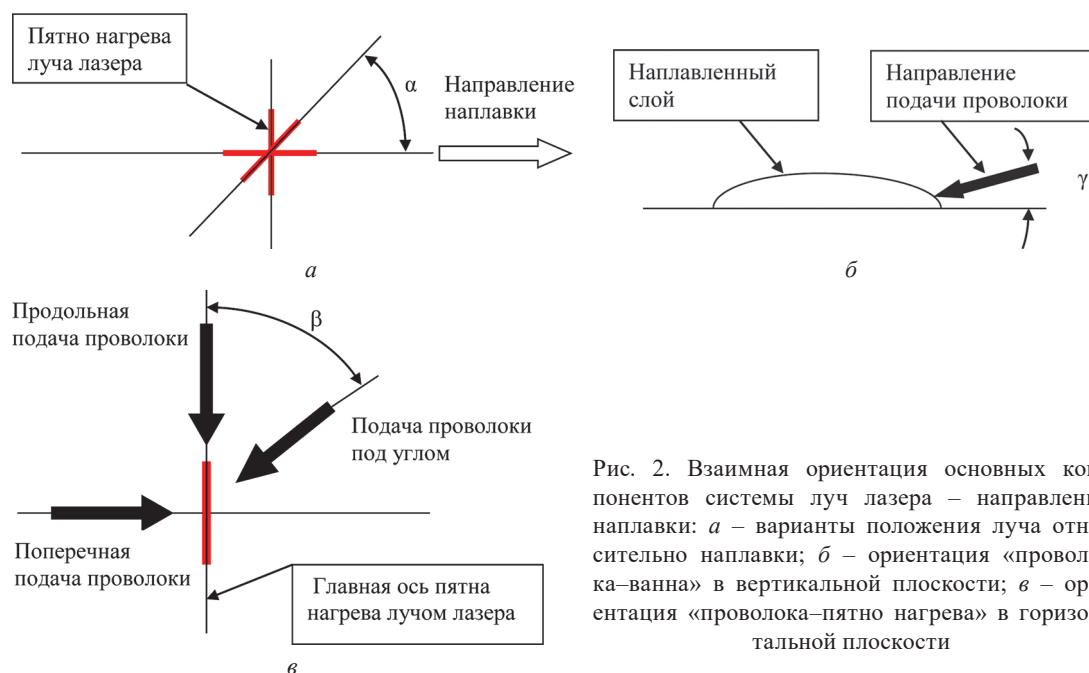


Рис. 2. Взаимная ориентация основных компонентов системы луч лазера – направление наплавки: а – варианты положения луча относительно наплавки; б – ориентация «проволока–ванна» в вертикальной плоскости; в – ориентация «проволока–пятно нагрева» в горизонтальной плоскости

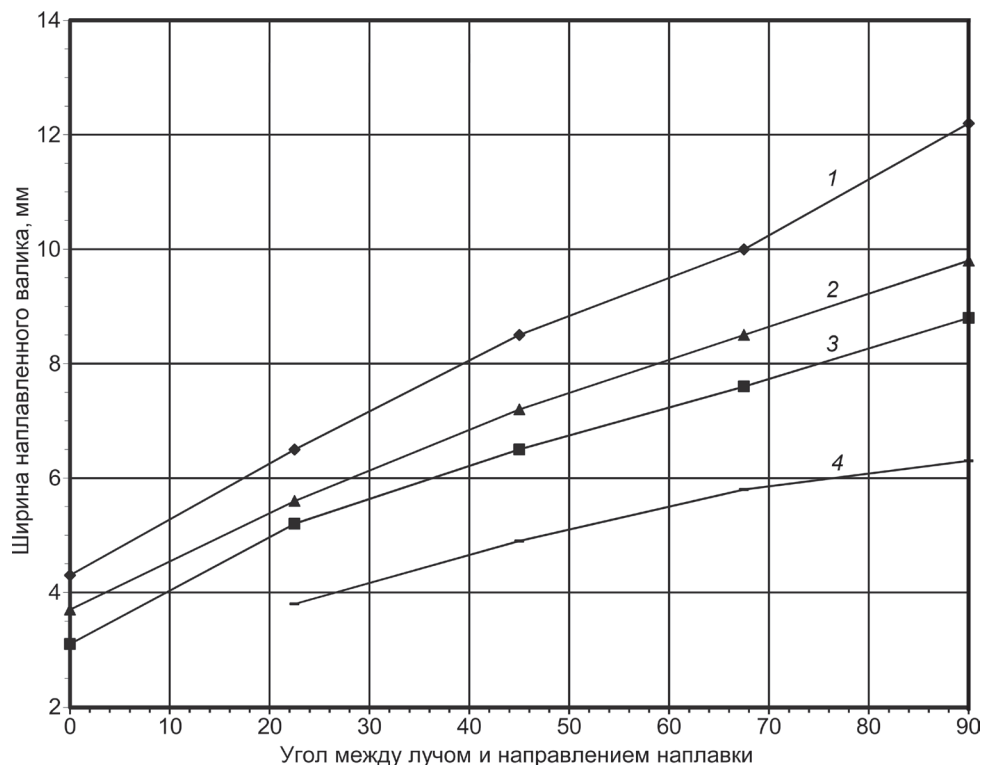


Рис. 3. Ширина наплавленного валика в зависимости от угла «проволока – луч», рабочего расстояния и энергии луча: 1 – 4 кВ, 95 мм; 2 – 3 кВ, 95 мм; 3 – 4 кВ, 105 мм; 4 – 3 кВ, 105 мм

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  $\alpha$  (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.



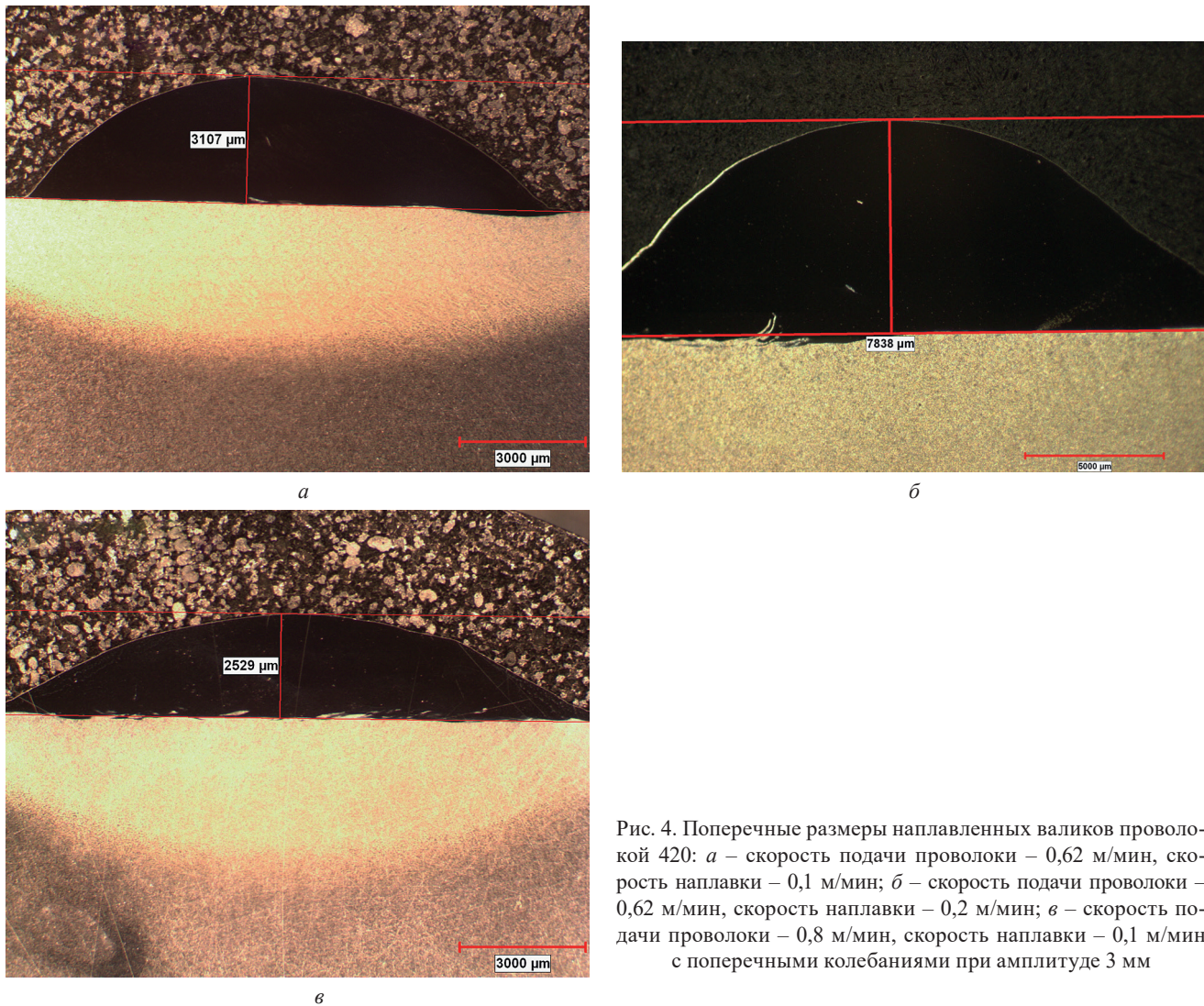


Рис. 4. Поперечные размеры наплавленных валиков проволокой 420: *а* – скорость подачи проволоки – 0,62 м/мин, скорость наплавки – 0,1 м/мин; *б* – скорость подачи проволоки – 0,62 м/мин, скорость наплавки – 0,2 м/мин; *в* – скорость подачи проволоки – 0,8 м/мин, скорость наплавки – 0,1 м/мин с поперечными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

Поперечные сечения валиков, наплавленных проволокой ER-420 при мощности луча 4 кВт 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, *а*, *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, *а*, *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*



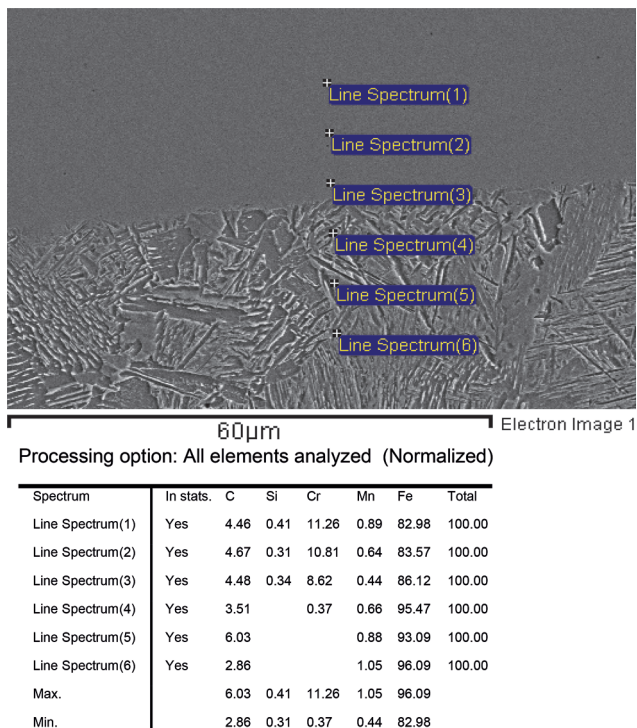


Рис. 5. Распределение химических элементов поперек линии сплавления, исследования на SEM наплавки проволокой 420 (образец 8,3)

### Концентрация хрома поперек линии сплавления

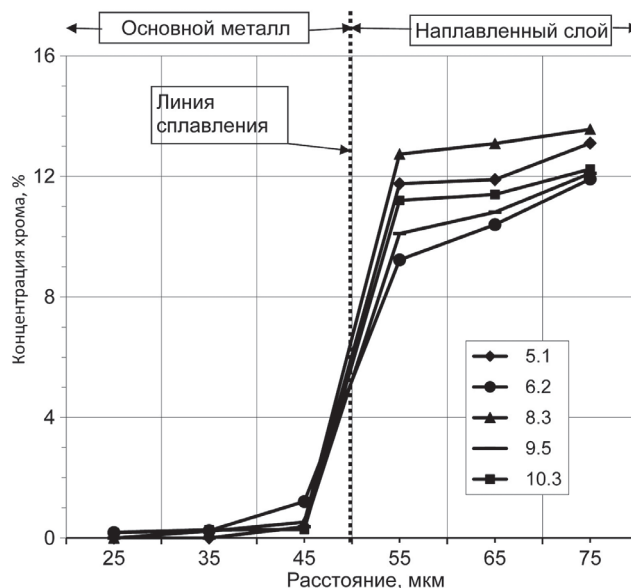
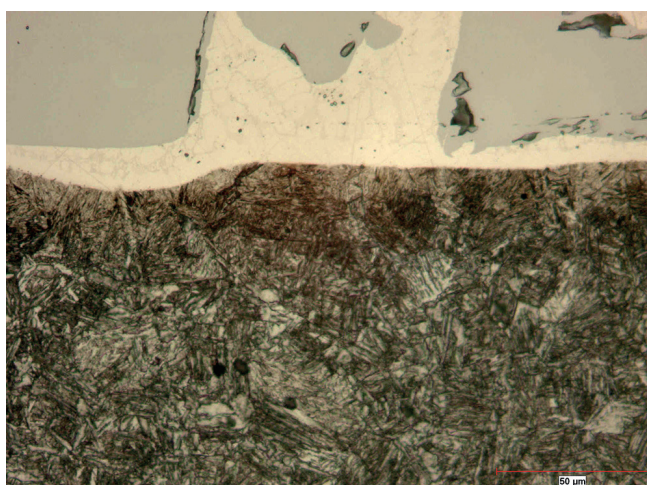
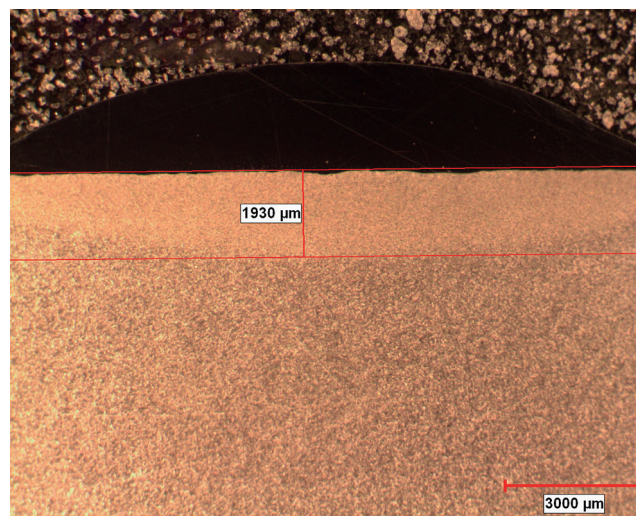


Рис. 6. Концентрация хрома поперек линии сплавления для различных присадочных проволок и режимов наплавки



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 см<sup>3</sup>/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.** *Progressivnye 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.