

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 621.785.616.1

### ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ ПОРОШКОМ ИЗ СПЛАВА НИКЕЛЯ НА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБКАХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

© 2025 г. Е. С. Ермилова<sup>а</sup>, \*, И. Р. Овсянкин<sup>а</sup>, А. А. Гавриков<sup>а</sup>,  
В. Н. Петровский<sup>а</sup>, П. С. Джумаев<sup>а</sup>, В. И. Польский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: [ermilova275@gmail.com](mailto:ermilova275@gmail.com)

Поступила в редакцию 05.06.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Методом высокоскоростной лазерной наплавки нанесено покрытие порошком сплава никеля 1350-00 на тонкостенные трубки из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т. Наплавку выполнялась с помощью непрерывного излучения иттербиевого волоконного лазера мощностью до 10 кВт на роботизированном комплексе. Определена геометрия газопорошковой струи для сопла фирмы “Grauhofner”. Определено влияние мощности лазерного излучения и количество подаваемого порошка на структуру получаемых покрытий. Проведены металлографические исследования полученных образцов. Показано, что при выполнении лазерной наплавки на оптимальных режимах формируется практически беспористое покрытие с минимальным проплавлением материала основы, обеспечивающим металлургическое сплавление. По данным рентгеноспектрального микроанализа химический состав наплавленного покрытия практически не отличается от химического состава используемого порошка. Толщина наплавленного слоя в зависимости от режимов наплавки регулируется в пределах (100–300) мкм за один проход. Линия сплавления одинакова по строению, что показывает высокую однородность тепловложения при наплавке. Размер зоны термического влияния в материале подложки в зависимости от режимов наплавки изменяется в пределах (50–200) мкм.

**Ключевые слова:** высокоскоростная лазерная наплавка, сплав на основе никеля, параметры процесса, микроструктура, элементный состав, микротвердость

**DOI:** 10.56304/S2079562924060125

#### ВВЕДЕНИЕ

Среди различных материалов, успешно применяемых в технологии лазерного осаждения материалов (LMD – Laser material deposition), никелевые сплавы широко используются в различных инженерных приложениях благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как прочность при высоких температурах, стойкость к окислению и коррозии, хорошая металлургическая стабильность, технологичность и свариваемость. Недавние исследования показывают, что никелевые жаропрочные сплавы, изготовленные на ламинированной основе, находят широкое применение в аэрокосмической и автомобильной отраслях для изготовления инженерных компонентов, ремонта, переоборудования и наплавки [1–8].

Разработка новых технологий нанесения покрытий для защиты от износа и коррозии высококачественных деталей в обрабатывающей промышленности становится все более важной не только с экономической, но и с экологической точки зре-

ния. Это технологии термического напыления, особенно высокоскоростные кислородно-топливное (High-velocity oxygen-fuel – HVOF) термическое напыление и лазерное осаждение материалов (Laser material deposition – LMD). С помощью термического напыления HVOF можно наносить покрытия из широкого спектра материалов, которые отличаются высокой износостойкостью при относительно низких инвестиционных затратах. Тем не менее, покрытия с термическим напылением технологически ограничены в отношении адгезионной прочности из-за плохого механического сцепления между покрытием и подложкой. Кроме того, покрытия, нанесенные термическим напылением, как правило, трудно поддаются ремонту и часто имеют уровень пористости в диапазоне 1–2%. С помощью технологии LMD можно получать высококачественные покрытия без пор и трещин из широкого спектра материалов с использованием металлургического соединения и низкого разбавления. Однако ти-

**Таблица 1.** Параметры оптической системы лазера ЛС-10

Длина волны, $\lambda$	1.064 мкм
Коллимирующая линза, $f_f$	160 мм
Фокусирующая линза, $f_c$	300 мм
Диаметр транспортного волокна, $\varnothing_f$	200 мкм
Параметр качества пучка, BPP	8.0 мм мрад

пичная толщина покрытия ( $>500$  мкм) обычно слишком велика для защиты от износа и коррозии, а достижимая скорость обработки поверхности слишком мала для нанесения покрытия на крупные детали.

В этой статье рассмотрен новый подход к нанесению защитных покрытий на тонкостенные оболочечные трубки с использованием высокоскоростной лазерной наплавки с применением порошка 1350-00 на основе никеля с расходом до 180 г/мин и скоростью нанесения до 29 м/мин. Высокоскоростное лазерное осаждение материалов, известное под немецкой аббревиатурой (ENLA — Extreme high-speed laser material deposition) [9–12], представляет собой новый вариант лазерного осаждения материалов (LMD — Laser material deposition). Управление процессом в этом варианте отличается от управления процессом в LMD, где порошок плавится при контакте с ванной расплава. В процессе ENLA лазерный луч расплавляет порошок над поверхностью подложки для подачи расплавленных частиц в ванну расплава. При заданном распределении интенсивности в лазерном луче нагрев частиц порошка на пути прохождения луча в значительной степени зависит от трехмерного распределения плотности частиц порошка (PDD — Particle density distribution) и относительного положения каустики потока порошка внутри лазерного луча. Ключевыми факторами, влияющими на нагрев частиц порошка на

пути прохождения луча над ванной расплава, являются траектории частиц порошка, скорость частиц, фракция частиц и относительное положение каустики струи порошка относительно каустика лазерного луча. Удельная теплоемкость порошка, плотность, коэффициент поглощения и другие теплофизические и оптические свойства также оказывают влияние.

В данной статье с использованием данного метода исследовано влияние основных параметров обработки на толщину слоя и внешний вид зоны соединения наплавочного и основного материала. С помощью этого нового варианта технологического процесса можно получить гораздо более тонкие, не содержащие пор и трещин слои для защиты от износа и коррозии толщиной примерно 10–250 мкм.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

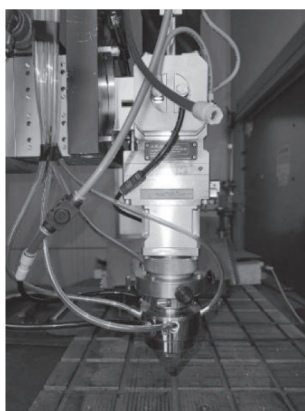
### 1.1. Экспериментальные модули

В работе использовался отечественный непрерывный иттербиевый волоконный лазер ЛС-10 производства компании ООО НТО “ИРЭ-Полюс” и порошковый питатель PF 2/2. Конструкция лазера ЛС-10 выполнена в виде отдельной стойки, из которой выходит транспортное волокно с оптическим коннектором, подключаемым в оптическую систему. Охлаждение лазера осуществляется при использовании внешнего чиллера с температурой воды не менее  $20^{\circ}\text{C}$  и потоком не менее 25 л/мин. Управление лазером возможно как в ручном режиме с использованием компьютера, так и через интерфейсы внешнего управления.

Параметры и внешний вид оптической системы лазера ЛС-10 приведены в табл. 1 и на рис. 1.

В работе использовалась оптическая система, состоящая из коллимирующего и фокусирующего блока, систем водяного охлаждения, а также подачи защитного газа и металлического порошка. Оптическая голова оснащена системой защиты от столкновений, как со стенками модуля, так и с внутренними объектами.

Существует несколько различных конфигураций подачи порошка через сопло: коаксиально с лазерным излучением, сбоку, а также многоструйным способом. В работе использовалось коаксиальное сопло. Данный выбор объясняется тем, что это позволяет достичь изотропности в направлении нанесения порошковых материалов, что невозможно при боковой подаче порошка. Лазерное излучение распространяется через внутреннее коническое сопло. Металлический порошок при этом подается между двумя коническими соплами. Благодаря этому исключается взаимодействие излучения с порошком внутри сопла.

**Рис. 1.** Внешний вид оптической системы.

Исследования проводились при конфигурации экспериментального модуля, с возможностью реализации технологии высокоскоростной лазерной наплавки.

В этом случае, исследуемые образцы размещались в высокоскоростном вращателе (до 4500 об./мин), специально созданного модуля, состоящего из импульсного источника питания EDR-150-24, коллекторного двигателя постоянного тока BMD-20DIN со специальной переходной муфтой упругой SJC-20C-RD  $8 \times 8$  и блока управления коллекторным двигателем (рис. 2). Скорость вращения вала созданного модуля определялась с помощью бесконтактного лазерного тахометра.

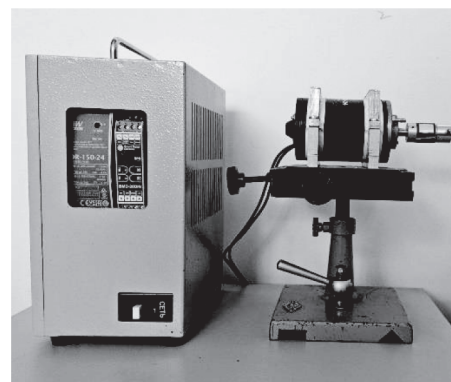


Рис. 2. Специально созданный высокоскоростной вращатель образцов.

### 1.2. Материалы

Коммерчески доступные трубки из нержавеющей стали марки 12X18H10T (Fe – до 67; Nb – 1.1; Sn – 0.1; Cr – (17–19); Ni – (9–11); Mn – до 2; Ti – (0.4–1); Si – до 0.8; Cu – до 0.3 мас. %) с наружным диаметром 10.15 мм и толщиной стенки 0.9 мм использовались в экспериментах. Перед нанесением покрытия трубки (длиной 70 мм) были очищены ацетоном для удаления загрязнений или пятен, обработаны в этаноле под воздействием ультразвука в течение 5 мин и высушены.

В технологии прямого лазерного нанесения материала в качестве присадочного материала обычно используются металлические порошки. В данной работе использовался порошок никеля 1350-00 (фракция 45–125 мкм) производства фирмы Hoganas (Швеция). Химический состав порошка 1350-00 приведен в табл. 2.

### 1.3. Аналитическая аппаратура

Микроструктура полученных покрытий и зоны термического влияния после формирования покрытий исследовались с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 производства фирмы Carl Zeiss JENA (Германия) с увеличением до 2500 крат. Глубина анализируемого слоя составляла ~1 мкм.

Определение элементного состава образцов проводилось методами рентгеновского микроанализа в аналитическом растровом электронном микроскопе EVO-50 при ускоряющем напряжении 10–20 кВ (ток зонда 5–50 нА) с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA x-ACT с разрешением 133 эВ производства фирмы Oxford Instruments (Великобритания) и волнового спектрометра INCA Wave-500 с разрешением 5 эВ и чувствительностью 0.01 мас. % производства фирмы Oxford Instruments (Великобритания).

Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса на приборе HVS-1000 (Китай) с авто-

матическим нагружением индентора при величине нагрузки  $P = 200$  г. Время выдержки под нагрузкой было выбрано  $\tau = 20$  с.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Исследование влияния геометрии сопел на формирование газопорошковой струи

Несмотря на значительное количество работ, в которых анализируется проблема газопорошкового потока [13–21], комплексных исследований траектории движения потока по-прежнему немного. Порошковый поток является ключевым компонентом процесса высокоскоростной лазерной наплавки, но его зависимость от конструкции сопла и струй несущего и защитного газов затрудняет его контроль и управление. Невозможно не отметить значительное влияние характеристик порошка на качество наплавляемого покрытия с точки зрения толщины, плотности, микроструктуры и др. Формирование струи порошкового газа (скорость и траектория частиц) и, следовательно, распределение плотности частиц порошка зависит не только от фракции зерен порошка и параметров процесса подачи порошка (массовый расход порошка, объемный расход носителя и защитного газа), но и от таких ключевых определяющих факторов, как конструкция и геометрия используемого сопла.

Таблица 2. Химический состав порошка никеля 1350-00

№	Показатели качества	Количество
1	Массовая доля никеля (Ni), %	База
2	Массовая доля кремния (Si), %	3.9
3	Массовая доля бора (B), %	2.3
4	Массовая доля железа (Fe), %	2.9
5	Массовая доля хрома (Cr), %	11.0

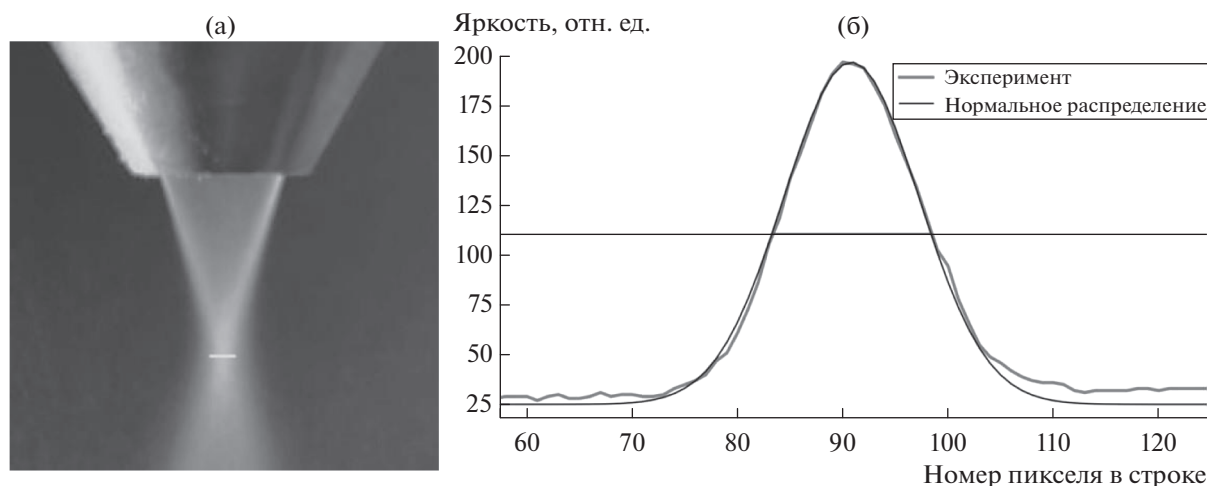


Рис. 3. (а) Определение минимального диаметра в области фокусировки порошка по (б) кривой яркости снимков газопорошкового потока.

Для анализа геометрии порошкового потока и его распределения до подложки была подготовлена программа на языке Python, позволяющая определять минимальный диаметр потока порошка в области фокусировки и расстояние от торца сопла до него.

В программу загружается серия grayscale фотографий (фотографий в оттенках серого), которая подвергается покадровому усреднению. Затем происходит определение размеров фокуса порошка по зависимости яркости пикселей от их положения относительно строки (рис. 3). Распределение газопорошкового потока вблизи области фокусировки аппроксимировалось гауссовым распределением. Положение наименьшего фокуса определялось в строке пикселей с наименьшей дисперсией у моделированного распределения.

С помощью этой программы становится возможным отслеживание влияния формы сопла, ширины зазора и параметров процесса подачи порошка на газопорошковый поток с целью достижения его оптимальных характеристик и, как следствие, однородного и равномерного наплавленного слоя. Программа является универсальной для всех типов сопел.

Диаметр газопорошкового потока при выбранном режиме подачи порошка — 180 г/мин и расходе транспортного газа — 5 норм.л/мин составляет 2.5 мм. Расстояние от края сопла до фокуса порошка равно 15 мм.

Опираясь на данные о расстоянии до фокуса порошка, полученные из программы, становится возможным реализовать главную отличительную черту высокоскоростной наплавки: расположить фокус лазерного излучения выше уровня обрабатываемой детали.

Диаметр лазерного пятна в фокусе определялся по формуле:

$$2\omega_0 = \frac{f_f}{f_c} \varnothing_f, \quad (1)$$

где  $f_f$  — фокусное расстояние фокусирующей линзы,  $f_c$  — фокусное расстояние коллимирующей линзы,  $\varnothing_f$  — диаметр оптического волокна,  $\omega_0$  — радиус пучка излучения. Диаметр пучка составил 0.375 мм. Плотность мощности равна  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при мощности 2 кВт.

Пороговая плотность мощности для нержавеющей стали была оценена по формуле:

$$q = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{T_{пл} \kappa}{A \sqrt{a \tau_i}}, \quad (2)$$

где  $T_{пл}$  — температура плавления,  $A$  — поглощательная способность,  $\tau_i$  — длительность лазерного воздействия,  $\kappa$  — теплопроводность,  $a = \frac{\kappa}{\rho}$  — коэффициент температуропроводности,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость.

Плотность мощности составила  $3 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ .

Таким образом, плотность мощности в фокусе лазерного излучения является избыточной, поэтому целесообразным является подстроить каустическую лазерного излучения для более эффективного расплавления порошка. Так, на практике, диаметр порошка в фокусе составил 2.5 мм, и, как следствие, была произведена дефокусировка излучения по формуле (3) до получения плотности мощности  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при мощности 2 кВт.

**Таблица 3.** Подбор режимов наплавки на трубку из нержавеющей стали

№ режима	Угловая скорость, об/мин	Скорость сканирования, мм/сек	Мощность излучения, кВт	Давление газа, норм.л/мин	Подача порошка, г/сек
1	1054	5	1.75	3	1
2	1054	5	2	5	1.5
3	1054	5	1.7	5	1.5
4	840	5	1.7	3	1
5	1054	5	2.5	3	1.5

$$d = 2\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{P_F}{z_R}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $P_F$  — положение фокуса над поверхностью детали, а  $z_R$  — длина Релея выражается как

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2 n}{\lambda}. \quad (4)$$

Диаметр пятна равен 2.8 мм при дефокусировке в 30 мм.

Расстояние до области фокусировки порошка в процессе наплавки составило 15 мм, а расстояние от сопла до подложки — 18 мм. В результате меньший процент излучения идет на нагрев детали, а больший — на частицы порошка, тем самым минимизируются фазовые преобразования материала детали.

## 2.2. Подбор режимов высокоскоростной наплавки на трубки из нержавеющей стали

Одна из основных проблем нанесения покрытия на поверхность оболочечных труб — это малая толщина стенок трубки. Требуется сохранить ее основные механические и тепловые свойства, а также ее геометрию, для этого следует не допускать перегрев трубки. При этом необходимо качественно нанести покрытие, что невозможно при недостаточной мощности излучения. Таким образом, оптимальными будут такие режимы наплавки, при которых порошок качественно приплавляется к подложке при минимальном ее нагреве.

Эксперименты по нанесению покрытий были выполнены для режимов, приведенных в табл. 3.

## 2.3. Металлографический анализ полученных покрытий

Наплавленные образцы были проанализированы с использованием металлографии.

На рис. 4а—4г при режимах 1—4 четко видно два слоя: верхний, толщиной в несколько сотен мкм, это лазерная наплавка порошка на основе никеля и нижний (внутренняя стенка трубки) толщиной ~900 мкм. В области наплавки наблюдаются

поры округлой формы диаметром 30—80 мкм. Наружная поверхность защитного слоя неровная и обладает высокой степенью шероховатости.

Помимо этого, после реализации режима №2 (рис. 4б) наблюдается расслоение наносимого материала и основного, что может говорить об избыточной скорости подачи порошка и дальнейшей низкой адгезии.

Рассмотрим микроструктурный анализ слоев после наплавки на режиме № 1 (рис. 4а) более подробно. Верхний слой — наплавка никеля толщиной 280 мкм. В верхнем слое, наплавке порошка на основе никеля толщиной 280 мкм, видны две поры округлой формы размером 50—80 мкм в диаметре.

Однако, при большем увеличении (рис. 5) видно, что верхний слой состоит в свою очередь из двух. Самый верхний состоит из сплавившихся наплавов в виде продольных (вдоль трубки) дорожек шириной ~150 мкм, а нижний слой — зона термического влияния (ЗТВ) по глубине ~200 мкм, представляющий — зарождающуюся дендритную структуру. Слой ЗТВ резко переходит в исходную структуру коррозионно-стойкой хромоникелевой стали с характерным полиэдрическим зерном аустенита.

Мелкодисперсные выделения в первых двух областях в виде пятен с темным контрастом скорее всего представляют собой первичные фазы, которые выделяются непосредственно из расплава в процессе остывания (рис. 6).

На рис. 7 представлена фотография верхнего слоя поперечного шлифа покрытия для режима № 1 с точками определения химического состава.

**Таблица 4.** Химический состав в выделенных точках наплавки

Элемент, ат. %	B	C	Si	Cr	Fe	Ni
Спектр 1	47.24		0.53	44.16	1.75	6.32
Спектр 2		26.95	0.89	39.60	3.72	28.84
Спектр 3			7.24	6.00	7.75	79.01
Спектр 4			0.74	44.37	4.67	25.42
Спектр 5			1.27	3.07	4.61	91.04



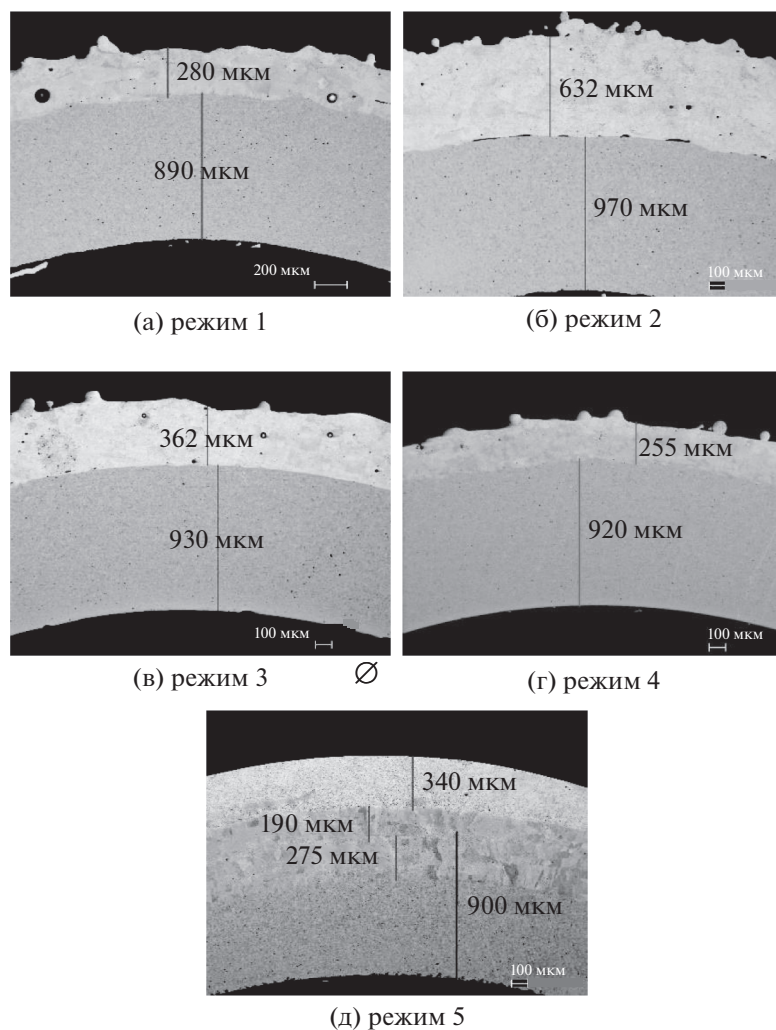


Рис. 4. Шлифы образцов с нанесенным покрытием.

В табл. 4 представлен химический состав в выделенных областях наплавки.

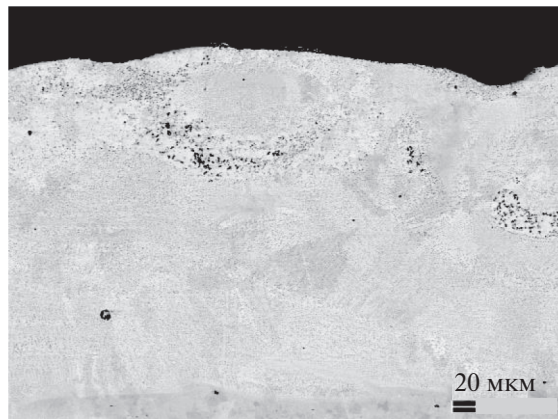


Рис. 5. Поперечный шлиф покрытия для режима № 1.

Элементный анализ, проведенный для режима №1, в областях, указанных выше, показал, что:

- темные выделения неправильной формы (спектр 1 на рис. 7) представляют выделения борид хрома состава примерно 50 на 50 ат. %;
- выделения серого оттенка неправильной формы (спектры 2 и 4 на рис. 7) представляют сплав Ni с Cr, по составу схожий с нихромом;
- светлый фон (спектры 3 и 5 на рис. 7) – это почти чистый Ni.

На рис. 11–13 представлены фотографии поперечного шлифа покрытия для режима № 5, полученные для различного увеличения. В отличие от образца № 1, наружная поверхность трубки после нанесения покрытия чистая и гладкая, без следов шероховатости. Однако есть отдельные поры округлой формы в верхнем слое (рис. 11). На шлифе отчетливо наблюдается три области: верхняя – толщиной 340 мкм, средняя 465 мкм и нижняя ~600 мкм. Верхний слой на зерно не травится,

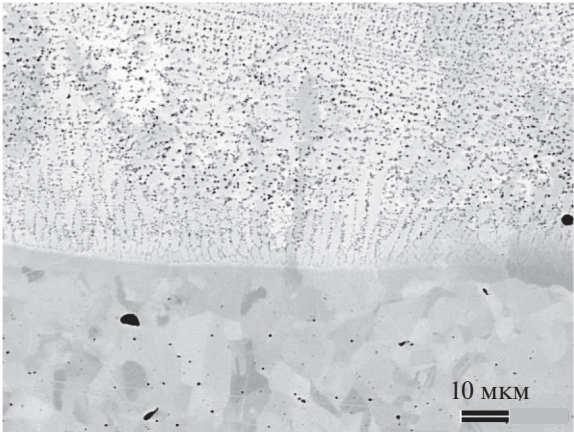


Рис. 6. Поперечный шлиф покрытия для режима № 1 с большим увеличением.

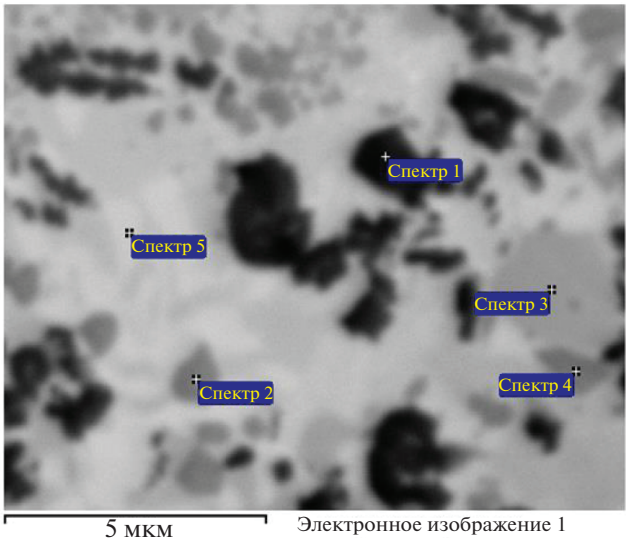


Рис. 7. Верхний слой поперечного шлифа покрытия для режима № 1 с точками определения химического состава.

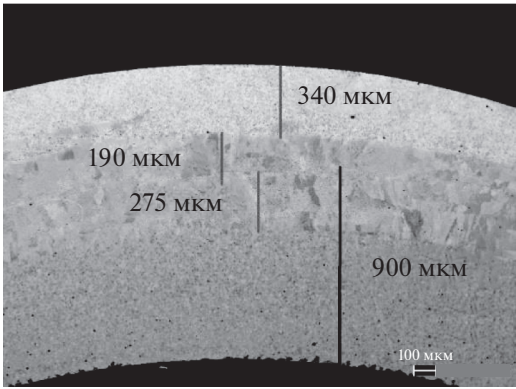


Рис. 8. Поперечный шлиф покрытия для режима № 5.

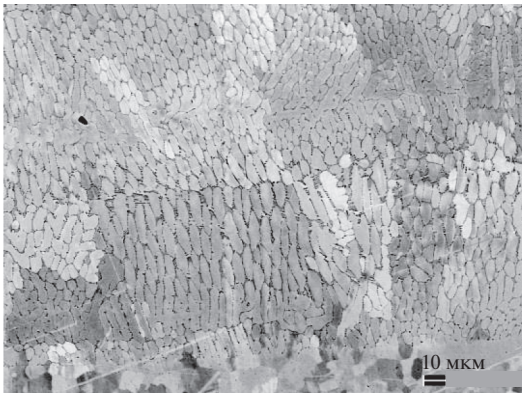


Рис. 9. Поперечный шлиф покрытия для режима № 5 под большим увеличением (область перехода между зонами термического влияния).

местами есть поры округлой формы диаметром до 100 мкм.

Второй слой, ЗТВ, представляет слой застывшего расплава с зернами дендритной формы. При увеличении изображения (рис. 9) видна граница раздела зон термического влияния. Происходит смешивание основного материала с материалом наплавки. ЗТВ перемешивания материала – 190 мкм, ЗТВ трубки – 275 мкм. Во всех случаях сцепление (адгезия) между слоями прочная без зазоров, пор и трещин.

Далее был проведен элементный анализ образце для режима № 5 с целью определения химического состава зоны наплавки и стенки трубки. Разделение исследуемых зон показано на рис. 10.

Данные металлографического анализа, представленные в табл. 5, показали, что при соответствующем выборе режима высокоскоростной лазерной наплавки в поперечной структуре в верхней ее части не наблюдается перемешивание химических элементов, входящих в состав используемого порошка и материала оболочки и об-

Таблица 5. Химический состав наплавки и стенки трубки

Элемент, ат. %	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Спектр 1	4.04	0.00	11.45	0.00	5.09	79.42
Спектр 2	1.47	0.48	17.21	0.22	51.63	28.99
Спектр 3	0.47	0.77	19.34	0.39	68.58	10.47

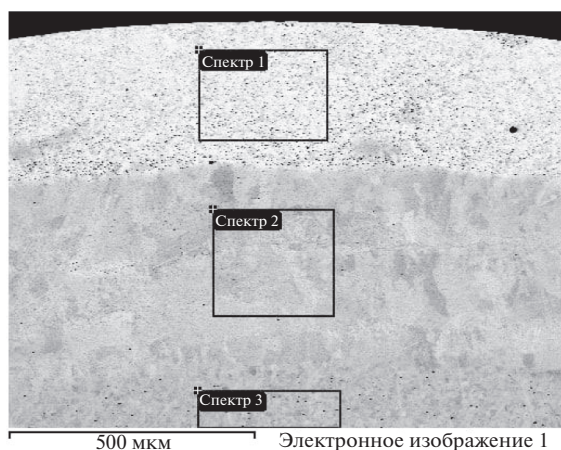


Рис. 10. Трехзонная структура трубки для режима № 5.

разование новых соединений. Таким образом, оптимальным режимом является режим № 5.

#### 2.4. Анализ полученных покрытий на микротвердость

Завершающим этапом работы стало исследование образцов № 1 и № 5 на микротвердость.

На рисунках (№ 11 и № 12) видно, что в обоих случаях, первым участком на графиках является область плато, соответствующая значению твердости наплавленного слоя. Следующий переходный участок — ЗТВ. После его преодоления значения твердости образца значительно понижается и достигает своего минимума (второе плато). После чего происходит плавный рост показателя твердости (показан на графиках точками) по мере отдаления от внешней стороны.

Вертикальными линиями на графиках произведено разделение на аналогичные области (наплавленный слой, ЗТВ и основной материал), но

в соответствии с данными о размерах этих областей, полученных после металлографического анализа (см. пред. раздел).

Пунктирные линии соответствуют теоретическим значениям твердости для никеля — 260  $HV$  и для нержавеющей стали — 185  $HV$ . На рис. 11 теоретическое значение для никеля совпадает с экспериментальным. Расхождение в значениях для стали заключается в большем тепловложении на обрабатываемую деталь при наплавке на режиме № 1. На рис. 12 теоретическое значение для стали практически совпадает с экспериментальным.

Наблюдаемое увеличение микротвердости никеля по сравнению с исходным значением при лазерных наплавках увеличенной мощности связано, во-первых, с наличием значительных термических напряжений, что свойственно более высоким температурам нагрева и более высокой скорости охлаждения. И, во-вторых, с образованием более мелкого зерна в зоне термического влияния.

Так как величина твердости растет с отдалением от зоны воздействия лазерного излучения и ее показатели для области основного материала в режиме № 5 (где защитный слой больше, чем у режима № 1) превышают аналогичные показатели у режима № 1, можно предположить, что под действием нагрева произошла перестройка структуры нержавеющей стали с понижением у нее твердости. Погрешность измерительного устройства твердости равна 7%. Погрешность расстояния определяется как точность микрометрового стола — 10 мкм. Таким образом имеется возможность определения максимальной температуры нагрева различных областей объекта по средством нахождения ее твердости в области, где материалы не перемешались.

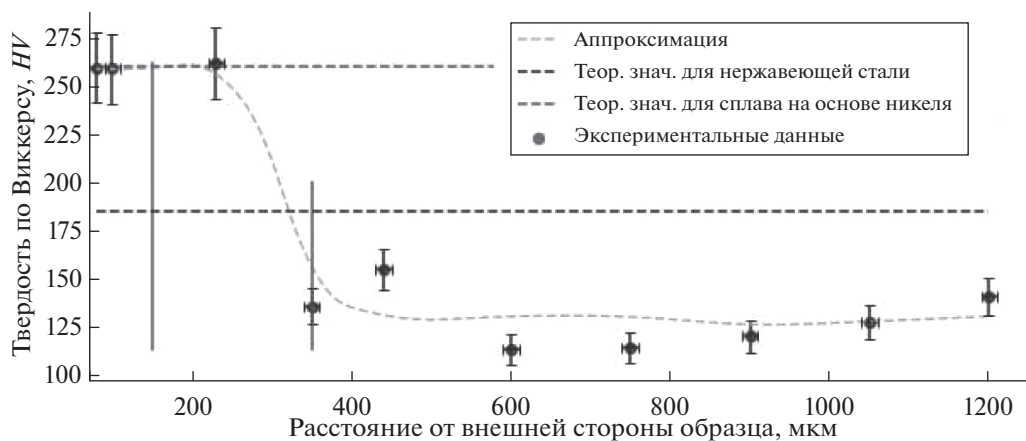


Рис. 11. График зависимости твердости от расстояния для режима № 1.



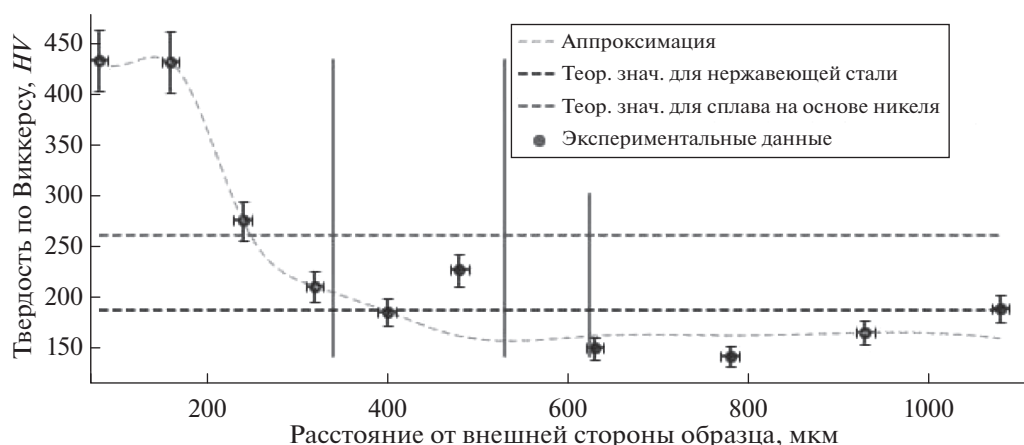


Рис. 12. График зависимости твердости от расстояния для режима № 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы методом высокоскоростной лазерной наплавки нанесено покрытие порошком сплава никеля 1350-00 на тонкостенные трубы из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Наплавку выполняли с помощью непрерывного излучения итербиевого волоконного лазера мощностью 10 кВт на роботизированном комплексе. Проведены металлографические исследования полученных образцов. Показано, что при выполнении лазерной наплавки на оптимальных режимах формируется практически беспористое покрытие с минимальным проплавлением материала основы, обеспечивающим металлургическое сплавление. По данным рентгеноспектрального микроанализа химический состав наплавленного покрытия практически не отличается от химического состава используемого порошка. Толщина наплавленного слоя в зависимости от режимов наплавки регулируется в пределах (100–300) мкм за один проход. Трещин в плоскости шлифа не обнаружено. Линия сплавления одинакова по строению, что показывает высокую однородность тепловложения при наплавке. Размер зоны термического влияния в материале подложки в зависимости от режимов наплавки изменяется в пределах (50–200) мкм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Yu Z., Li L., Zhang D., et al. // Chin. J. Mech. Eng. 2021. V. 34. P. 92–106. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00599-8>
2. Jinoop A.N., Paul C.P., Bindra K.S. // Proc. Inst. Mech. Eng., Part L: J. Mater.: Des. Appl. 2019. V. 233 (11). P. 2376–2400.
3. Tobar M.J., Álvarez C., Amado J.M., Rodríguez G., Yáñez A. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 200 (22–23). P. 6313–6317.
4. Lin Y.H., Ping X.L., Kuang J.C., et al. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2020. V. 59 (1). P. 340–351.
5. Джумаев П.С., Петровский В.Н., Польский В.И., Якушин В.Л. // Цветн. металлы. 2015. № 1. С. 31–36.
6. Петровский В.Н., Штamm В.Г., Джумаев П.С., Польский В.И. // Ядерн. физ. инжинир. 2012. Т. 3 (4). С. 333.
7. Geng T.Y., Wang C.S. // Mater. Sci. 2019. V. 25 (3). P. 252–258.
8. Shen Y.F., Fu H.G., Pan X.L., et al. // Materialwissenschaft Werkstofftechnik. 2020. V. 51 (1). P. 54–65.
9. Schopphoven T., Gasser A., Wissenbach K. // J. Laser Appl. V. 28 (2). P. 022501.
10. Li T., Zhang L., Bultel G.P., Schopphoven T., Gasser A., Schleifenbaum J.H., Poprawe R. // Coatings. 2019. V. 9. P. 778. <https://doi.org/10.3390/coatings9120778>
11. Wang K., Du D., Liu G., Pu Z., Chang B., Ju J. // Corros. Sci. V. 176. P. 108922.
12. Li T., Zhang L., Chen G., Schopphoven T., Gasser A., Poprawe R. // J. Manuf. Processes. 2023. V. 85. P. 1054–1065.
13. Yan J., Battiatto I., Fadel G. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. V. 91. P. 605–616.
14. Cortina M., Arrizubieta J.I., Ruiz J.E., et al. // Procedia CIRP. 2018. V. 68. P. 387–392.
15. Liu Z., Zhang H.C., Peng S., et al. // Addit. Manuf. 2019. V. 105. P. 4107–4121.
16. Lin J. // J. Mater. Process. Tech. 2000. V. 105 (1–2). P. 17–23.
17. Kovalev O.B., Kovaleva I.O., Smurov I.Y. // J. Mater. Process. Technol. 2017. V. 249. P. 118–127.
18. Nie P., Ojo O.A., Li Z. // Surf. Coat. Technol. 2014. V. 258. P. 1048–1059.
19. Eisenbarth D., Borges Esteves P.M., Wirth F., Wegener K. // Surf. Coat. Technol. 2019. V. 362. P. 397–408.
20. Khamidullin B.A., Tsvil'skiy I.V., Gorunov A.I., Gilmudinov A.Kh. // Surf. Coat. Tech. 2019. V. 364. P. 430–443.
21. Zhang J., Yang L., Zhang W., Qiu J., Xiao H., Liu Y. // Opt. Laser Eng. 2020. V. 126. P. 105873.

## Formation of a Nickel Alloy Powder Coating on Thin-Walled Tubes by High-Speed Laser Cladding

E. S. Ermilova<sup>1, \*</sup>, I. R. Ovsyankin<sup>1</sup>, A. A. Gavrikov<sup>1</sup>,  
V. N. Petrovskiy<sup>1</sup>, P. S. Dzharmaev<sup>1</sup>, and V. I. Polsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: ermilova275@gmail.com

Received June 5, 2024; revised June 5, 2024; accepted June 11, 2024

**Abstract**—A 1350-00 nickel alloy powder coating has been deposited on thin-walled 12Kh18N10T stainless steel tubes by high-speed laser cladding. Cladding has been performed using cw radiation from a 10-kW ytterbium fiber laser on a robotic complex. The shapes of the gas–powder jet for Fraunhofer nozzles have been determined. The influence of the laser radiation power and the amount of supplied powder on the structure of the coatings obtained has been evaluated. Metallographic studies of the obtained samples have been carried out. It has been shown that laser cladding under optimal conditions provide an almost non-porous coating with minimal penetration of the base material, ensuring metallurgical fusion. According to the X-ray spectral microanalysis, the chemical composition of the deposited coating practically does not differ from the chemical composition of the used powder. The thickness of the deposited layer is adjusted within 100–300 μm in one pass, depending on the deposition modes. The fusion line is identical in structure, which shows a high uniformity of heat input during cladding. The size of the thermal influence region in the substrate material varies within 50–200 μm, depending on the deposition modes.

**Keywords:** high-speed laser cladding, nickel-based alloy, process parameters, microstructure, elemental composition, microhardness