

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ Inconel 718 В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2025 г. А.А. Голышев¹, Н.А. Маслов^{1,*}, С.А. Константинов¹, А.Г. Маликов¹

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
E-mail: *nmaslov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 13.11.2024; после доработки 10.02.2025
Принята к публикации 14.02.2025

С помощью атомной эмиссионной спектроскопии исследован газоплазменный факел, возникающей при лазерном селективном сплавлении различных сплавов. Показано, что тип используемого защитного газа влияет на спектральные характеристики. Использование гелия в качестве технологического газа по сравнению с аргоном снижает свечение в целом и вклады отдельных элементов в спектр в частности, что говорит о меньшей потере этих элементов через испарение при воздействии лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерная эмиссионная спектроскопия, волоконный иттербиевый лазер, Inconel 718.

REAL-TIME CONTROL OF DIRECT LASER DEPOSITION PROCESS OF Inconel 718 USING LASER EMISSION SPECTROSCOPY

© 2025 A.A. Golyshev¹, N.A. Maslov^{1,*}, S.A. Konstantinov¹, A.G. Malikov¹

¹Institute of Theoretical and Applied Mechanics S.A. Khristianovich Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Russia 630090 Novosibirsk, Institute Street, 4/1
E-mail: *nmaslov@itam.nsc.ru

Using atomic emission spectroscopy, the gas-plasma plume generated during laser selective melting of various alloys was investigated. It was demonstrated that the type of protective gas used affects the spectral characteristics. The use of helium as a process gas compared to argon reduces overall luminescence and the contributions of individual elements to the spectrum, indicating lower losses of these elements through evaporation under laser radiation exposure.

Keywords: laser emission spectroscopy, fiber ytterbium laser, Inconel 718.

DOI: 10.31857/S0130308225030058

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии, использующие мощное лазерное излучение для производства деталей из различных металлических сплавов, завоевывают все большую популярность [1]. Одним из перспективных методов для создания металлических изделий является прямое лазерное выращивание, при котором порошок подается через сопло в ванну расплава, формируемую лазерным излучением [2]. Образование ванны расплава сопровождается частичным испарением материала и образованием газоплазменного факела из атомов и ионов испаряющихся металлов и защитного газа. Динамика поведения этого факела во многом определяет качество получаемого материала.

Роль газоплазменного факела достаточно давно изучается для процесса лазерной сварки. Важно отметить, что факел не полностью прозрачен для лазерного излучения. В процессе прохождения лазерного пучка его интенсивность уменьшается, одновременно повышая температуру факела. При этом значительная часть энергии может уйти на разогрев факела, ослабляя энергию, затрачиваемую на расплавление металла [3]. Скоростная видеосъемка показала, что пульсации факела приводят к неоднородности глубины проплавления [4].

Однако наибольшее влияние на характеристики факела и, соответственно, сварного шва оказывают характеристики используемого защитного газа. Сварка в обычной атмосфере может привести к нежелательным химическим реакциям, пульсациям при образовании факела и, как результат, к дефектам. Поэтому сварку осуществляют с использованием инертных газов, защищающих ванну расплава. Из экономических соображений чаще всего используется аргон. Однако использование других, более дорогих газов, таких как гелий, может быть оправдано улучшением качества сварного соединения. При сварке углекислотным лазером тип защитного

газа особенно значим, так как он заметно влияет на ослабление лазерного пучка факелом и, как результат, на его однородность и размер [5]. Благодаря своей малой молекулярной массе, высокой теплопроводности и высокому потенциалу ионизации, гелий ограничивает образование газоплазменного факела и снижает пористость сварного шва [6], позволяя добиваться более глубокого проплавления [7].

С развитием аддитивных технологий эти работы получили новое развитие. Теперь необходимо учитывать, как факел взаимодействует с подаваемым или находящимся в зоне расплава порошком. Частицы порошка могут разлетаться, снижая качество материала, что можно наблюдать с помощью высокоскоростной съемки [8]. Динамика факела влияет на разбрызгивание расплава [9]. Большую роль играют также газодинамические процессы, происходящие в факеле: образующиеся под воздействием лазерного излучения пары и ионы расплавляемого материала распространяются в окружающую среду.

В качестве метода интегральной оценки состояния факела может использоваться эмиссионная спектроскопия. При лазерной обработке металла ванна расплава и образующийся газоплазменный факел излучают свет, и даже их яркостных характеристик может быть достаточно для диагностики [10]. Спектроскопия излучения от факела позволяет проводить диагностику при сварке изделий из нержавеющей стали [11], сплавов титана [12] и магния [13], алюминиевых сплавов [14, 15] при использовании различных типов лазеров. Удаётся связать спектры с глубиной проплавления, оценить влияние процессов отражения и преломления лазерного излучения в образующейся плазме, влияние технологического газа на процессы окисления и испарения элементов сплава, потерю легирующих элементов, трансформацию фаз материала, определить момент зарождения дефекта. По сплошному спектру излучения возможно определение температуры ванны расплава и ее влияния на размер зерна [16]. Установлено наличие связи спектральных свойств с мощностью излучения и особенностями формирования треков [17], влияние давления в камере, где осуществляется спекание, на результирующие параметры [18].

Таким образом, предыдущие исследования показывают, что влияние защитного газа на образование газоплазменного факела достаточно велико. Эмиссионная спектроскопия может давать информацию об этом процессе, однако ее свойства еще недостаточно изучены. Целью данной работы является проведение сравнительных спектроскопических исследований газоплазменного факела, образующегося в процессе прямого лазерного выращивания никелевого сплава Inconel 718 с использованием различных защитных газов (аргон, гелий).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении экспериментов использовался лазерный комплекс, включающий иттербиевый волоконный лазер фирмы IPG (длина волны излучения 1,07 мкм, максимальная мощность 3 кВт), порошковый питатель Metco Twin 150 и манипулятор Fanuc 710i. В качестве защитного и транспортирующего газа использовался аргон (Ar) или гелий (He).

В работе применялся метод прямого лазерного выращивания, при котором наплавка осуществлялась следующим образом. Лазерное излучение с помощью линзы фокусировалось на подложку соосно коаксиальному соплу, образуя «ванну» расплава. Одновременно через коаксиальное сопло с помощью транспортного газа подавалась наплавляемая порошковая смесь в зону «ванны» расплава (рис. 1а). При передвижении лазерного пучка ванна расплава затвердевала. Излучение от газо-плазменного шлейфа, возникающего в результате лазерного воздействия, напрямую попадало на входную щель спектрометра, расположенного в 1 м от положения фокуса лазерного излучения (рис. 1б).

Спектрометр состоял из монохроматора с голографической дифракционной решеткой, с дисперсией 16 нм/мм. Входная щель спектрографа устанавливалась на 0,05 мм, что обеспечивало спектральное разрешение порядка 1 нм. В качестве регистрирующего элемента использовался усилитель яркости — микроканальная пластина (электронно-оптический преобразователь, ЭОП) с фотокатодом на увиолевой подложке (ЭПМ 44Г-БУ, ОАО «Катод», Россия), обеспечивающий диапазон спектральной чувствительности детектора от 200 до 900 нм [19]. Коэффициент усиления на длине волны 555 нм составлял 10^4 , время послесвечения — около 1 мс. Перед входной щелью спектрометра устанавливали фильтр БС-6, что позволяло фотокатоду ЭОП охватывать участок спектра в диапазоне 360—680 нм в первом порядке дифракции, или фильтр УФС-1, что обеспечивало эффективный измеряемый спектральный диапазон 220—340 нм во втором порядке дифракции. Изображение с люминофора усилителя регистрировали с помощью промышленной CMOS камеры (UI-3242LE, IDS Imaging, Германия). Калибровку спектральной чувствительности спектрометра осуществляли с помощью вольфрамовой лампы.

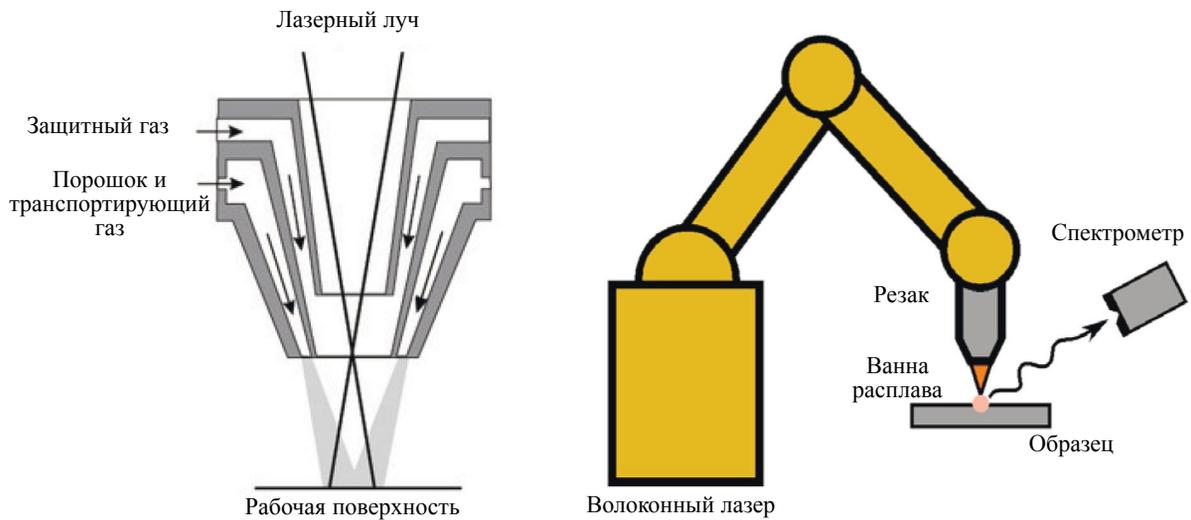


Рис. 1. Схемы газолазерного резака и проводимого эксперимента.

Исследования проводились для лазерной наплавки порошка из никелевого сплава Inconel 718 (химический состав приведен в табл. 1) на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В качестве защитного и транспортирующего газа использовался гелий или аргон. В ходе экспериментов все параметры лазерной наплавки оставались постоянными (скорость сканирования 12 мм/с, диаметр лазерного пятна $\approx 2,1$ мм, расход порошка ≈ 6 г/мин) за исключением мощности лазерного излучения, которая изменялась от 800 до 1300 Вт. Для каждой мощности проводилось пять измерений (треков).

Таблица 1

Элементный состав Inconel 718

Элемент	Fe	Ni	Cr	Nb + Ta	Mo	Co	Ti	Al	Mn	O
Концентрация, мас. %	Остал.	53,02	18,99	5,11	3,0	1	0,95	0,49	0,35	0,01

Спектры начинали регистрировать после прохождения первых двух сантиметров пути и установления стационарного режима проплавления. Экспозицию варьировали в диапазоне 10—500 мс в зависимости от уровня сигнала, чтобы обеспечить максимально возможный динамический диапазон. Кадры накапливали в течение двух секунд — в результате число зарегистрированных кадров зависело от экспозиции. При обработке каждый спектр получали, усредняя сигнал по 150 строкам изображения, и всем измеренным кадрам, и нормировали на выдержку, таким образом имея возможность сравнивать интенсивности измеренных спектров. Также вычитали фоновый сигнал, измеренный заранее.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ультрафиолетовой части спектра для всех образцов и типов технологических газов эмиссионный спектр отсутствовал. Основная диагностическая информация оказалась сосредоточена в видимой области.

На рис. 2 приведены спектры подложки из нержавеющей стали при лазерном воздействии мощностью 1000 Вт. При использовании аргона в качестве защитного газа наблюдается непрерывный спектр, принадлежащий в основном тепловому излучению, на фоне которого выделяются отдельные линии. При использовании гелия наблюдается только непрерывный спектр.

При лазерной наплавке порошка из никелевого сплава Inconel 718 мощность излучения в экспериментах варьировалась от 800 до 1300 Вт. Спектр состоит из суммы непрерывного и линейчатого. При использовании гелия линии практически незаметны. При использовании

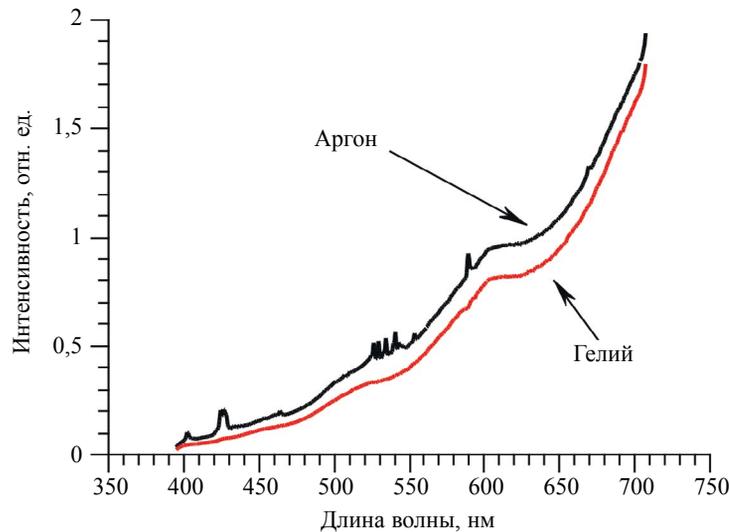


Рис. 2. Спектры, измеренные при лазерном воздействии на образцы подложки из нержавеющей стали при использовании гелия или аргона в качестве защитного технологического газа.

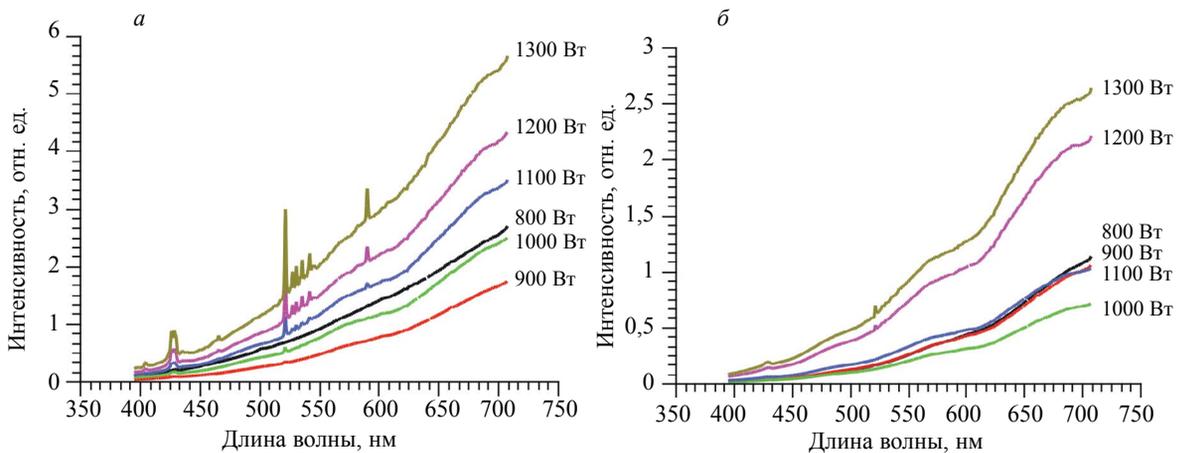


Рис. 3. Спектры, усредненные по 5 измерениям для разных мощностей лазерного излучения и типов защитного газа (*а* — аргон; *б* — гелий).

аргона на мощностях менее 1000 Вт линии также слабо обнаруживаются, а при дальнейшем увеличении мощности их интенсивность начинает резко расти.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа измеренные спектры были представлены в виде суммы непрерывной и линейчатой частей. Из исходного спектра (рис. 4*а*) удаляли пики, заменяя значениями, полученными аппроксимацией полиномом 4-го порядка по небольшой окрестности пика (рис. 4*б*), получая непрерывный спектр. Затем, вычитая из исходного спектра непрерывный, получали его линейчатую часть (рис. 4*в*).

Анализ линейчатой части спектра сводится к нахождению длин волн пиков и их вкладу в конечный спектр. В табл. 2 представлены основные линии и соответствующие им химические элементы, установленные по базе данных NIST.

У всех измеренных спектров вклады линейчатых компонент растут вместе с мощностью по одному закону. На рис. 5 приведены усредненные интенсивности линий хрома в диапазоне 521—541 нм. При использовании газов обоих типов линейчатая компонента начинает расти при мощностях выше 1000 Вт, но в случае гелия ее вклад на порядок меньше, чем в случае аргона.

Анализ сплошной части спектра представляет более сложную задачу. Попытки аппроксими-

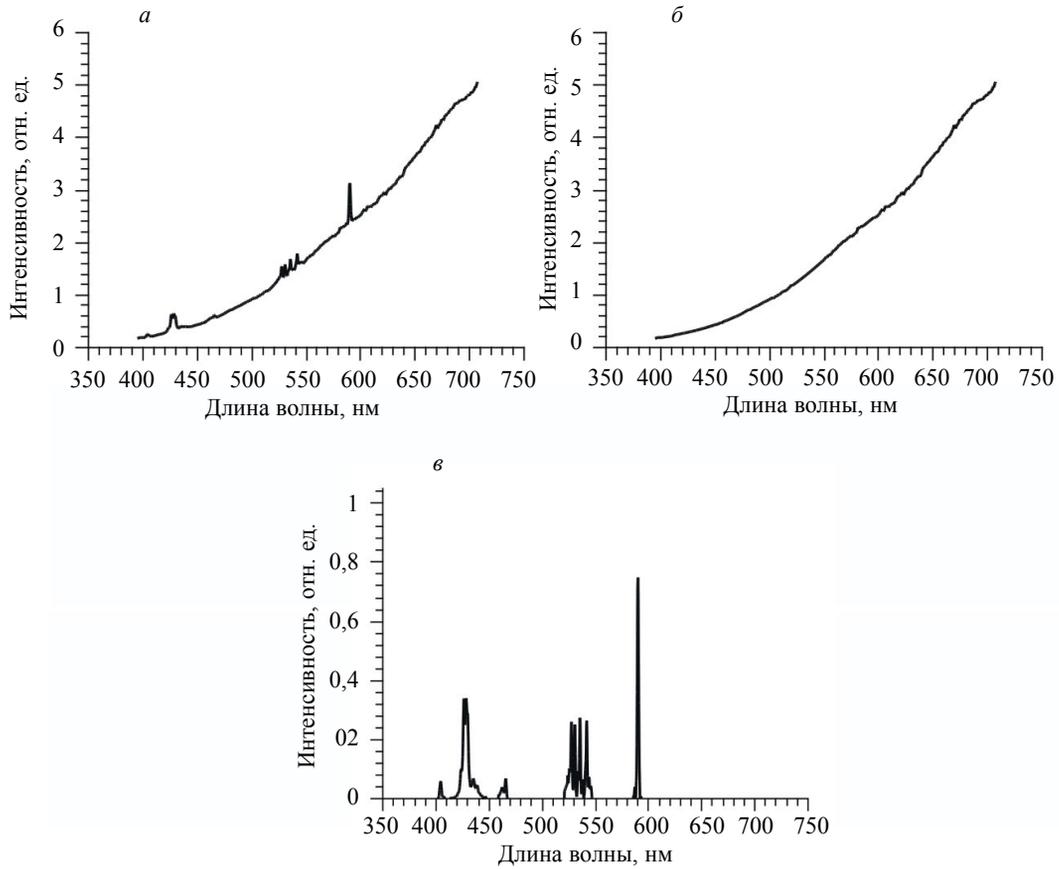


Рис. 4. Пример представления спектров в виде суммы (а — исходный спектр; б — его непрерывная часть; в — его линейчатая часть).

Таблица 2

Спектральные линии

Длина волны, нм	Элемент	Переход
403	Mn	$3d^5 4s^2 \rightarrow 3d^5 4s 4p$
426, 428	Cr	$3d^5 4s \rightarrow 3d^5 4p$
465	Cr	$3d^5 4s \rightarrow 3d^4 4s 4p$
521, 527, 530, 535, 541	Cr	$3d^4 4s^2 \rightarrow 3d^5 4p$

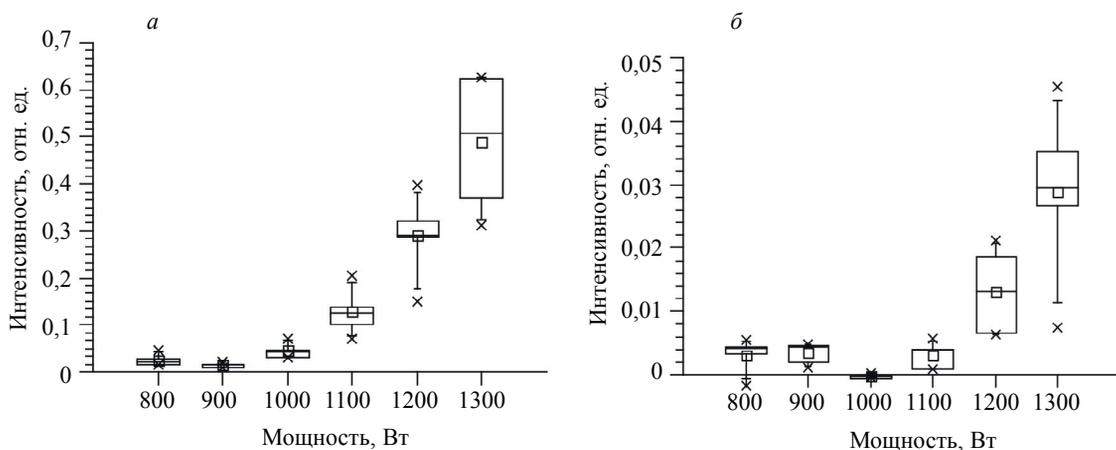


Рис. 5. Интенсивность линий хрома для разных мощностей лазерного излучения и типов защитного газа (а — аргон; б — гелий).

ровать его спектром излучения черного тела не увенчались успехом — наблюдались большие несоответствия, рассчитанные температуры не укладывались ни в какую физическую картину. Это является следствием того, что измерялся спектр свечения всей области, на которую воздействовало лазерное излучение, целиком. При этом в ней присутствуют разные фрагменты с различными физическими свойствами — ванна расплава, разные области газоплазменного факела и пр. Все они могут давать свои индивидуальные спектры, которые в данной постановке эксперимента суммируются, образуя некоторый смешанный спектр. Сканирование исследуемой области с целью установить спектр каждого интересующего фрагмента отдельно представляет собой существенно более сложную техническую задачу.

Для анализа статистических закономерностей измеренных спектров они были проанализированы методом главных компонент (МГК). Он заключается в том, что для исходного набора векторов данных ищется небольшой набор векторов, называемых главными компонентами (ГК), представляющих вектора данных в виде линейных комбинаций ГК с необходимой точностью. Обнаружено, что непрерывные части полученных спектров хорошо описываются суммой трех составляющих (рис. 6а). Это означает, что в исследуемой области имеется три разных фрагмента, спектр каждого из которых не меняется при изменении внешних параметров, однако меняется его вклад. ГК являются математическими абстракциями, описывающими статистические различия спектров, могут быть знакопеременными. Спектры истинных компонент являются их линейными комбинациями, которые в общем случае однозначно установить невозможно [20]. Условие неотрицательности компонент недостаточно для их точного установления — ему удовлетворяет множество линейных комбинаций. По крайней мере некоторые из компонент должны принадлежать тепловому излучению, то есть простираются во всем измеряемом спектральном диапазоне, а значит в соответствии с теоремами о разрешимости [21] не могут быть однозначно определены без дополнительных соображений.

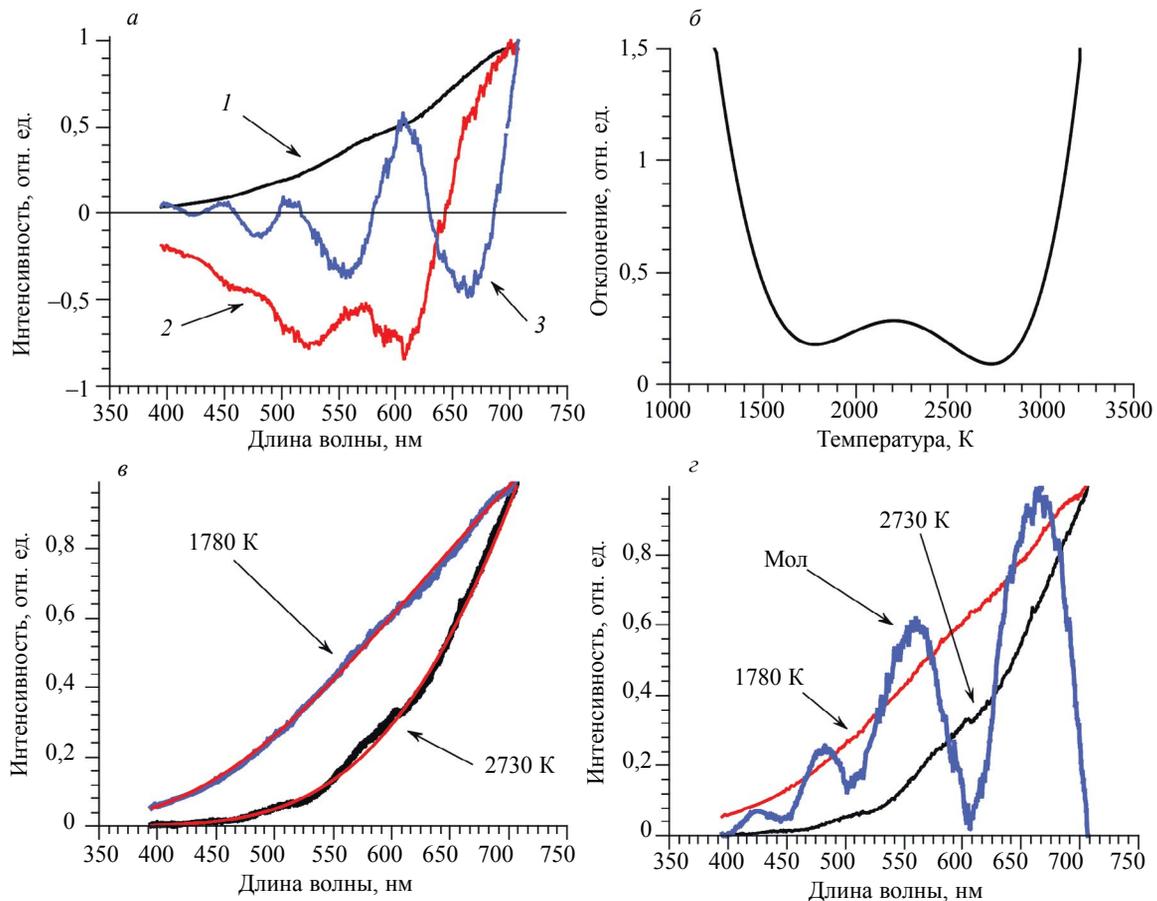


Рис. 6. Анализ спектров МГК: а — ГК; б — невязка аппроксимации теплового спектра с помощью ГК; в — сравнение найденных компонент (пунктир) с теоретической зависимостью (сплошная линия); г — полный набор компонент.

В качестве такого критерия было выбрано соответствие линейной комбинации ГК тепловому спектру. На рис. 6б представлено среднеквадратичное отклонение нормированных на 1 тепловых спектров при заданной температуре (с шагом в 10 град) от определенной с помощью линейной регрессии аппроксимации этого спектра главными компонентами. Видно, что у данной зависимости присутствует два минимума — при температурах 1780 ± 70 К и 2730 ± 50 К (точность оценена по уровню 5% изменения невязки). Полученные линейные комбинации ГК хорошо описываются формулой Планка (рис. 6в). Поскольку были установлены только две температуры, при которых линейная комбинация ГК соответствует тепловому спектру, поиск третьей линейной комбинации необходимо было произвести из других соображений — она была определена с помощью метода узких пиков. Ее спектр (рис. 6г, Мол) содержит четыре максимума на длинах волн 425, 482, 560 и 663 нм. Такая структура может принадлежать излучению молекулы с соответствующим расположением электронных термов и неразрешенной колебательной структурой. Поскольку волновые числа максимумов с хорошей точностью эквидистантны (2830 ± 50 см⁻¹), спектр также может принадлежать колебательной структуре электронно-колебательных переходов в молекуле. Поиск по базе данных NIST не позволил установить принадлежность обнаруженного спектра какому-либо соединению в рамках любой из этих двух моделей.

Таким образом, в измеренных спектрах присутствует излучение трех типов: тепловое с температурами 1780 ± 70 К, 2730 ± 50 К и молекулярное. Первая температура несколько выше температуры плавления сплава (1608 К) [22]. Таким образом, под воздействием лазерного излучения возникает область со средней температурой, определяющейся процессом плавления или кристаллизации материала. Вторая температура близка к температуре кипения хрома, которая при атмосферном давлении составляет 2945 К [23]. Отклонение, возможно, связано с локальными газодинамическими условиями, например из-за эффекта Бернулли в области интенсивного испарения может понижаться давление [24]. В обоих случаях, поскольку светимость областей определяется только температурой, уровень измеряемого сигнала пропорционален размерам светящейся области. В случае использования аргона видно, что размер первой области растет с ростом мощности излучения (рис. 7а). При использовании гелия при мощностях 800—900 Вт наблюдается область нестабильности, которая приводит к всплескам плавления, при повышении мощности сигнал стабилизируется и также растет (рис. 7з). При использовании обоих газов сигналы сравнимы, что говорит о том, что области плавления приблизительно одинаковы. Область с повышенной температурой, где происходит интенсивное испарение при использовании аргона на мощностях лазерного излучения 800 Вт также нестабильна, происходят всплески, которые приводят к большому разбросу сигнала (рис. 7б).

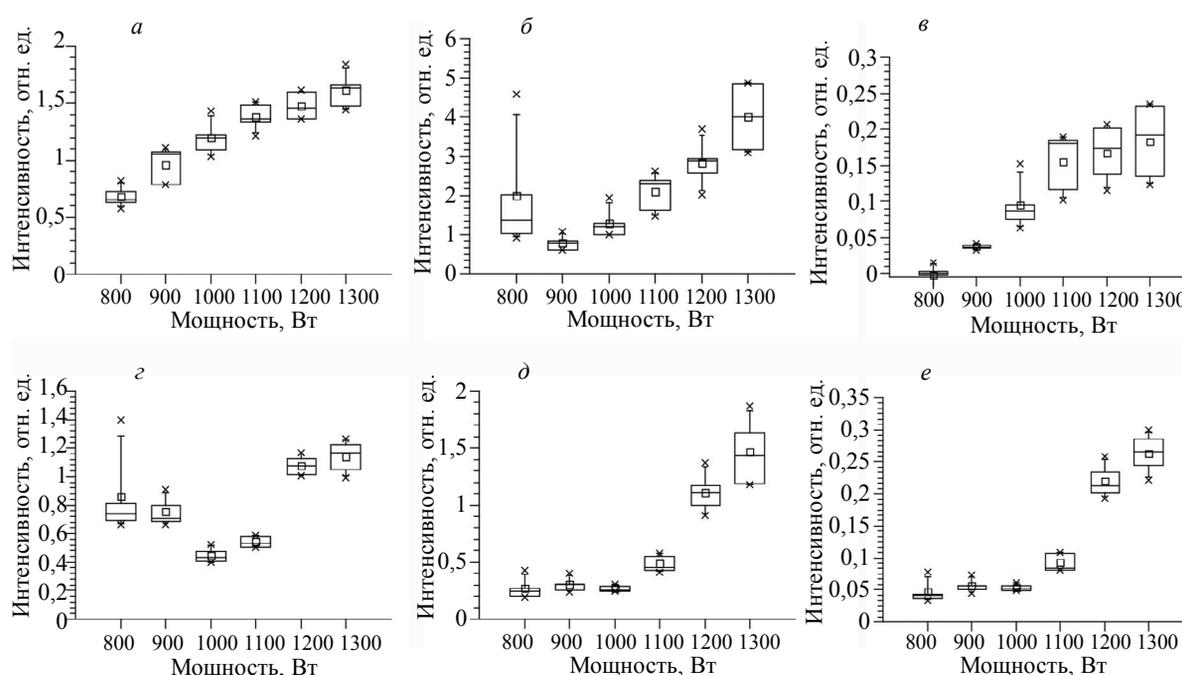


Рис. 7. Вклад компонент в сплошную часть спектра при использовании аргона (а — компонента 1780 К; б — компонента 2730 К; в — молекулярная компонента) и гелия (з — компонента 1780 К; д — компонента 2730 К; е — молекулярная компонента).

При мощностях 900 Вт и выше сигнал монотонно растет. При использовании гелия при мощностях 800—1000 Вт сигнал от области повышенной температуры близок к нулю, т.е. интенсивного испарения не происходит (рис. 7д). При дальнейшем повышении мощности сигнал растет, но остается в три раза меньшим, чем в случае аргона, т.е. наблюдается такая же картина, как и при анализе линейчатого спектра, связанного с излучением испаряющегося хрома (см. рис. 5). Принадлежность молекулярной компоненты установить не удалось, но ее сигнал коррелирует с линейчатой и высокотемпературной компонентами, так что, видимо, также связан с процессом испарения.

Таким образом, наблюдаемые в работе различия в получаемых спектрах показывают меньшую роль процессов испарения при использовании гелия. Авторы связывают это с лучшим теплоотводом газа, так как теплопроводность гелия на порядок выше по сравнению с аргоном: 155,3 мВт/(м·К) против 17,75 мВт/(м·К) соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы спектры при прямом лазерном выращивании никелевого сплава Inconel 718 с использованием различных защитных газов (аргон, гелий). Применение гелия в качестве технологического газа по сравнению с аргоном снижает свечение в целом и вклады отдельных элементов в спектр в частности, что говорит о меньшей потере этих элементов через испарение при воздействии лазерного излучения, меньших потерях из-за взаимодействия излучения с газо-плазменным факелом, влиянии факела на ванну расплава. Наблюдаемые различия могут объясняться разной температурой «ванны» расплава, влияющей на процессы испарения материала ввиду лучшего теплоотвода газом (теплопроводность гелия на порядок выше по сравнению с аргоном 155,3 мВт/(м·К) и 17,75 соответственно).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН № 124021500015-1. В работе использовалось оборудование ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malikov A.G., Golyshev A.A., Vitoshkin I.E. Recent trends in laser welding and additive technologies (Review) // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2023. V. 64. No. 1. P. 31—49.
2. Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Gulov M.A., Ancharov A.I. The effect of using repetitively pulsed laser radiation in selective laser melting when creating a metal-matrix composite Ti—6Al—4V—B4C // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. V. 117. P. 1891—1904.
3. Matsunawa A., Kim J.D. Basic understanding on beam-plasma interaction in laser welding // Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics. Laser Institute of America. 2006. V. 2006. No. 1. P. 128—133.
4. Mrňa L., Šarbort M. Plasma bursts in deep penetration laser welding // Physics Procedia. 2014. V. 56. P. 1261—1267.
5. Sun D., Cai Y., Wang Y., Wu Y., Wu Y. Effect of He—Ar ratio of side assisting gas on plasma 3D formation during CO2 laser welding // Optics and Lasers in Engineering. 2014. V. 56. P. 41—49.
6. Kuo T.Y., Lin Y.D. Effects of different shielding gases and power waveforms on penetration characteristics and porosity formation in laser welding of Inconel 690 alloy // Materials transactions. 2007. V. 48. No. 2. P. 219—226.
7. Ahn J., He E., Chen L., Dear J., Davies C. The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3 // Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 29. P. 62—73.
8. Bidare P., Bitharas I., Ward R.M., Attallah M.M., Moore A.J. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion // Acta Materialia. 2018. V. 142. P. 107—120.
9. Ye D., Zhu K., Fuh J.Y.H., Zhang Y., Soon H.G. The investigation of plume and spatter signatures on melted states in selective laser melting // Optics and Laser Technology. 2018. V. 111 (March). P. 395—406.
10. You D.Y., Gao X.D., Katayama S. Review of laser welding monitoring // Sci. Technol. Weld. Join. 2014. V. 19. No. 3. P. 181—201.
11. Collur M.M., Debroy T. Emission spectroscopy of plasma during laser welding of AISI 201 stainless steel // Metall. Mater. Trans. B. 1989. V. 20. No. 2. P. 277—286.
12. Szymański Z., Kurzyńska J., Kalita W. The spectroscopy of the plasma plume induced during laser welding of stainless steel and titanium // J. Phys. D. Appl. Phys. 1997. V. 30. No. 22. P. 3153—3162.
13. Dai J., Wang X., Yang L., Huang J., Zhang Ya., Chen J. Study of plasma in laser welding of magnesium alloy // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2014. V. 73. No. 1—4. P. 443—447.
14. Zhou L., Zhang M., Jin X., Zhang H., Mao C. Study on the burning loss of magnesium in fiber laser welding of an Al—Mg alloy by optical emission spectroscopy // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. V. 88. No. 5—8. P. 1373—1381.

15. Song L., Wang C., Mazumder J. Identification of phase transformation using optical emission spectroscopy for direct metal deposition process // High Power Laser Mater. Process. Lasers, Beam Deliv. Diagnostics, Appl. 2012. V. 8239. P. 82390G.
16. Hu Y., Chen H., Liang X., Xie J. Monitoring molten pool temperature, grain size and molten pool plasma with integrated area of the spectrum during laser additive manufacturing // Journal of Manufacturing Processes. 2021. V. 64 (February). P. 851—860.
17. Schmidt M., Gorny S., Rüssmeier N., Partes K. Investigation of Direct Metal Deposition Processes Using High-Resolution In-line Atomic Emission Spectroscopy // Journal of Thermal Spray Technology. 2023. V. 32 (2—3). P. 586—598.
18. Lough C.S., Escano L.I., Qu M., Smith C.C., Landers R.G., Bristow D.A., Chen L., Kinzel E.C. In-situ optical emission spectroscopy of selective laser melting // Journal of Manufacturing Processes. 2020. V. 53 (January). P. 336—341.
19. Maslov N.A., Konstantinov S.A., Malikov A.G. Development of approaches to optical diagnostics of laser weld formation process in real time based on laser emission spectroscopy // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. V. 59. No. 6. P. 736—742.
20. Tsibulskaya E., Maslov N. Decomposition of multi-component fluorescence spectra by narrow peak method based on principal component analysis // Journal of Chemometrics. 2021. V. 35. No. 6. P. e3343.
21. Manne R. On the resolution problem in hyphenated chromatography // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 1995. V. 27. No. 1. P. 89—94.
22. Abdullaev R.N., Khairulin R.A., Stankus S.V., Kozlovskii Yu.M. Density and volumetric expansion of the Inconel 718 alloy in solid and liquid states // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. No. 5. P. 785—788.
23. Halstead W.D. A review of saturated vapour pressures and allied data for the principal corrosion products of iron, chromium, nickel and cobalt in flue gases // Corrosion Science. 1975. V. 15. No. 6—12. P. 603—625.
24. Matthews M.J., Guss G., Khairallah S.A., Rubenchik A.M., Depond P.J., King W.E. Denudation of metal powder layers in laser powder-bed fusion processes / Additive manufacturing handbook. CRC Press, 2017. P. 677—692.