

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(БНТУ)

УДК 621.793
Рег. № 20161177

УТВЕРЖДАЮ
Директор филиала БНТУ НИПИ
_____ В.М. Трепачко
« ____ » _____ 2020 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Разработка физико-технических методов оптимального проведения и контроля прецизионной лазерной обработки функциональных и конструкционных материалов с целью улучшения их поверхностных и объемных свойств с учетом требований промышленности и прикладных оптических технологий»

по теме:

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЯТНА ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ЗАКАЛКИ, СВАРКИ, ЛЕГИРОВАНИЯ, НАПЛАВКИ (заключительный)

ГПНИ «Фотоника, опто-, микроэлектроника»
Задание 1.4.04, ГБ 16-37

Руководитель НИР,
Зав. ОНИЛ ПиЛТ,
д.т.н., профессор

_____ О.Г. Девойно

Минск 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, Зав. ОНИЛ ПиЛТ, д.т.н., профессор	_____	О.Г. Девойно (раздел 2, заключение)
Вед. науч. сотр.	_____	М.А. Кардаполова (раздел 1,3)
Науч. сотр.	_____	Н.И. Луцко (раздел 4,5)
Науч. сотр.	_____	А.С. Лапковский (раздел 4,5)
Нормоконтроль	_____	А.С. Володько

РЕФЕРАТ

Отчет 85 с., 1 кн., 48 рис., 6 табл., 31 источн.

ЛАЗЕРНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ, ЛАЗЕРНАЯ ЗАКАЛКА, ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА, ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА, ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР, КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ, ТЕМПЕРАТУРА ВАННЫ РАСПЛАВА, КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ, ТЕПЛОВИЗОР, ПИРОМЕТР, СПЕКТРОМЕТРИЯ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ЯРКОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ГЛУБИНА ЗАКАЛЕННОГО СЛОЯ, ГЛУБИНА СВАРОЧНОГО ШВА, ВЫСОТА НАПЛАВЛЕННОГО ВАЛИКА.

Объектом исследования являлись бесконтактные методы контроля различных видов лазерной обработки в режиме реального времени, а также зависимости свойств спектральной яркости обрабатываемой лазером поверхности с физико-механическими свойствами получаемых поверхностных слоев, сварных соединений и покрытий.

Цель исследований: исследование зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процессов лазерной закалки, сварки, легирования, наплавки.

Задачи исследований:

- Исследовать зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процесса закалки;

- Исследовать зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процесса легирования;

- Исследовать зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процесса сварки;

- Исследовать зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процесса наплавки;

- Разработать методику контроля протекания процессов лазерной обработки путем оценки спектральных характеристик пятна лазерного нагрева.

Методология проведения исследований включала в себя: исследования методов контроля процессов лазерной обработки в режиме реального времени, установление влияния спектральных характеристик пятна лазерного нагрева на свойства обработанных поверхностей, исследования микротвердости поверхностных слоев, сварных соединений и покрытий.

В процессе исследований установлены методические особенности контроля процессов при лазерной обработке, методики измерения и расчета температур ванны расплава, связь между спектральными характеристиками пятна лазерного нагрева поверхности и получаемыми физико-механическими свойствами поверхностных слоев.

На данный момент результаты работы находятся на стадии внедрения.

Разработанную методику рекомендуется внедрять в качестве обратной связи при управления процессами лазерной обработки для повышения качества полученных поверхностных слоев, соединений и покрытий.

Внедрение разработанных методик контроля процессов лазерной обработки позволит осуществлять эффективную обратную связь для корректировки параметров обработки, повышения физико-механических и эксплуатационных свойств обработанных деталей, оптимизации процессов лазерной обработки по различным критериям.

Целесообразно развивать теоретические и технологические основы методик контроля процессов лазерной обработки.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Исследование состояния вопроса.....	8
1.1 Виды лазерной обработки.....	8
1.2 Применяемое оборудование и материалы.....	9
1.3 Методики исследований.....	13
1.3.1 Градуировка спектрофотометра.....	16
1.3.2 Спектральная яркость свечения стали в области воздействия лазерного излучения CO ₂ лазера.....	21
1.3.3 Определение температуры в области контакта лазерного пучка с поверхностью металла.....	24
1.4 Исследования в области контроля температур при лазерной обработке	29
2 Исследование процесса лазерной закалки.....	43
2.1 Исследование параметров процесса закалки газовым лазером.....	44
2.2 Исследование параметров процесса закалки волоконным лазером.....	49
3 Исследование процесса лазерного легирования.....	54
3.1 Исследование параметров процесса лазерного легирования газовым лазером.....	54
3.2 Исследование параметров процесса лазерного легирования волоконным лазером.....	64
4 Исследование процесса лазерной наплавки.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	82

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лазерная обработка занимает все больше позиций во всех отраслях промышленности и является перспективным направлением науки и техники. В промышленном производстве лазерная обработка применяется для раскроя листовых материалов и объемной резки; для сварки; для термообработки; поверхностного легирования конструкционных материалов; наплавки слоев со специальными свойствами на материалы основы; а также в качестве аддитивных технологий получения деталей. Интенсификации применения лазерной обработки способствует, наблюдающееся в течение последнего времени, снижение цены на компоненты лазерного оборудования и его комплектующие. Все виды лазерной обработки обладают рядом преимуществ, позволяющих им эффективно конкурировать и вытеснять общепринятые технологии обработки и получения материалов. Преимущества лазерной обработки:

1 высокий КПД;

2 энергоэффективность;

3 экологичность;

4 точность обработки;

5 отсутствие механического контакта с обрабатываемым материалом, что, с одной стороны, позволяет обрабатывать тонкие материалы, чувствительные к механическим и термическим деформациям, с другой стороны, позволяет отказаться от сложных зажимных и установочных приспособлений;

6 возможность получения высоких концентраций энергии в узких временных и пространственных интервалах, что позволяет получать материалы и соединения с особыми свойствами, которые невозможно получить другими методами обработки;

7 низкий уровень или отсутствие термических деформаций, вследствие отсутствия объемного нагрева детали;

8 легкость автоматизации лазерного оборудования, а также легкость его переналадки на выпуск одиночных деталей или малых партий;

9 возможность получения принципиально новых материалов, сварных соединений, покрытий, с уникальным комплексом свойств, не имеющим аналогов.

Однако, процессы лазерной обработки отличаются высокой сложностью моделирования и прогнозирования, ввиду целого комплекса одновременно протекающих процессов: плавления и кристаллизации материала, изменения его химического состава, перераспределения температурных полей и других теплофизических свойств зоны обработки, плазмохимических явлений в зоне обработки и т.д. В связи с этим, в процессе технологической подготовки процессов лазерной обработки (лазерной закалки, сварки, наплавки и т.д.) необходимо использовать не только результаты математического моделирования, но и средства оперативного контроля процессов, непосредственно протекающих в зоне лазерной обработки.

Использование в технологиях лазерной обработки конструкционных материалов и модифицирования функциональных материалов и метаматериалов, серийно производимых лазерных систем, позволяет сделать соответствующие процедуры технологически простыми и доступными широкому кругу исследователей и инженеров, а, следовательно, и удобными для дальнейшего промышленного освоения.

В данной работе предложены методики контроля протекания процессов лазерной обработки путем оценки спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для различных технологических процессов. Установленные закономерности и зависимости послужили основой для разработки приборов контроля процессов лазерной обработки, систем онлайн мониторинга и корректировки параметров обработки, а также для оптимизации процессов лазерной обработки по различным критериям.

1 Исследование состояния вопроса

1.1 Виды лазерной обработки

В настоящей работе методы контроля параметров изучены применительно к следующим видам лазерной обработки: лазерной закалке, легированию, сварке и наплавке.

Лазерная закалка – вид поверхностной термической обработки с использованием лазерного излучения, при котором обрабатываемую поверхность нагревают до сверхкритических температур, а охлаждение происходит за счет теплоотвода во внутренние слои металла. В отличие от общепринятых процессов, лазерная закалка является не объемным, а поверхностным процессом, в результате чего снижаются или исключаются термические деформации, а поверхность приобретает высокую твердость, дисперсность структуры, уменьшение коэффициента трения и т.д. Лазерная закалка делится на два вида – без фазового перехода и с фазовым переходом (с плавлением поверхности) [1].

Лазерное легирование – насыщение поверхностных слоев металла легирующими компонентами посредством плавления непрерывным или импульсным лазерным излучением для получения сплавов или композиций требуемого состава. Легирующие материалы наносят на обрабатываемую поверхность в виде порошков, паст, обмазок либо подают в зону обработки в виде присадочных материалов через специальные питатели. В качестве легирующих могут использоваться неметаллические (углерод, азот, бор, кремний) и металлические (хром, железо, никель, титан, вольфрам, ванадий, сплавы системы Ni-Cr-B-Si, Co-Cu, Cr-Mo-W, Ni-Nb и др.) элементы, а также соединения – карбиды (TiC, VC, NbC, WC, TaC), бориды, силициды, оксиды. Лазерное поверхностное легирование позволяет повысить твердость, износостойкость, тепло- и коррозионную стойкость, снизить расход дорогих материалов, таких как высоколегированные стали [1].

Лазерная сварка – процесс получения неразъемного соединения путем местного расплавления металлов по примыкающим поверхностям [2].

Особенностью лазерной сварки является: отсутствие необходимости в вакуумных камерах – сварка производится в воздухе или в среде защитных газов (азота, аргона, гелия); отсутствие влияния на лазерный луч магнитных полей свариваемых материалов и сварочных приспособлений; высокая удельная плотность мощности на единицу поверхности, что позволяет получать узкие глубокие сварные швы; возможность влияния на качество шва путем введения в сварочную ванну порошковых присадок, регулирующих химический состав, структуру и свойства материала. С помощью лазерной сварки достигается стабильность параметров и качество сварного шва; высокие скорости сварки, в том числе в автоматическом режиме; малая ширина шва и зоны термического влияния при большой его глубине; повышение свариваемости материалов – то есть, получение сварных соединений, недостижимых при использовании других методов сварки [3, 1].

Лазерная наплавка – процесс получения на поверхности материала слоя, со специальными свойствами, путем введения порошковых материалов непосредственно в зону воздействия лазерного луча с последующим расплавлением и кристаллизацией в виде покрытия. Свойства получаемого покрытия определяются свойствами состава для напыления, а также режимами лазерной обработки. В качестве наплавляемых материалов используют металлы и их сплавы, керамические материалы, полимерные материалы, в зависимости от требований, предъявляемых к покрытиям. Данный метод используется для упрочнения, восстановления и придания особых свойств дорогостоящим деталям, ответственным парам трения, металлорежущему и штамповому инструменту.

1.2 Применяемое оборудование и материалы

Лазерная обработка производилась с помощью двух технологических установок, мощность которых составила 1 кВт: лазерной технологической установки непрерывного действия «Комета» на базе газового CO₂-лазера с длиной волны излучения $\lambda=10,6$ мкм; и лазерной технологической установки

непрерывного действия ЛК-1 на базе волоконного иттербиевого лазера YLR-1000 с длиной волны излучения $\lambda=1,064$ мкм, оснащенной системой сканирования лазерного луча. Перемещения объективов в обеих установках обеспечиваются 3-х координатными системами, оснащенными ЧПУ; повторяемость позиционирования по осям X и Y в установках равна 60 мкм.

Измерения распределения температур в ванне расплава при различных видах лазерной обработки производилось с помощью трехзонального термовизора ИТ-3СМ, предназначенного для бесконтактного измерения и визуализации температуры горячих тел в диапазоне температур 800 – 1700⁰С. Термовизор может применяться для наладки и последующего периодического контроля сложных высокотемпературных технологических процессов. Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 10^0$ С. По сравнению с традиционными пирометрами функции термовизора значительно расширены, регистрация теплового поля в трех участках спектра позволяет определить приблизительные значения эффективных коэффициентов теплового излучения в этих участках и формировать поле истинных температур контролируемого объекта.

Также при измерениях спектральной яркости пятна лазерного излучения применялась оптическая система, состоящая из: спектрометра Avantes AvaSpec 2048-USB2-VA-50 с фильтром, отсекающим излучение более 1050 нм (рисунок 1); объектива Daiwon DW9711 с $D_{об} = 14$ мм и $f = 16$ мм; оптоволокна с диаметром 600 мкм и косинусного корректора с установленной перед ним диафрагмой диаметром 0,6 мм. Этот корректор располагается перед торцом оптоволокна на расстоянии от главной плоскости объектива, меньшем $2f$. При этом расстояние от объектива до контролируемой поверхности составляет примерно 12 см, диаметр контролируемой поверхности составляет примерно 6 мм.

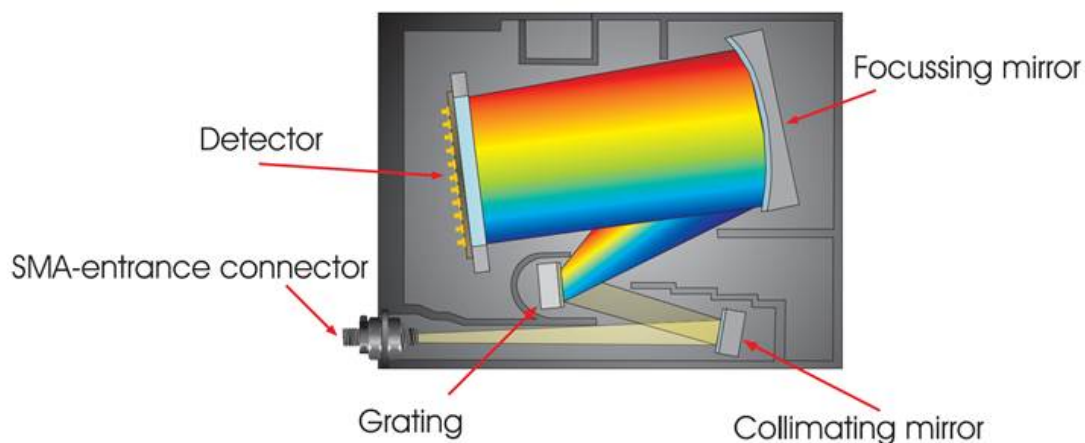


Рисунок 1 – Схема спектрометра Avantes AvaSpec 2048-USB2-VA-50

Параметры дифракционной решетки спектрометра Avantes AvaSpec 2048-USB2-VA-50:

- дифракционная решетка VA – 300 линий/мм;
- угол блеска 500 нм;
- спектральный диапазон – от 300 до 1100 нм;
- ширина щели 50 мкм;
- разрешение FWHM – 2,4 нм;

Детектор ПЗС линейка Sony2048 ILX554B – 2048 пикселей, размер пикселя 14x56мкм, отношение сигнал/шум – 200:1. На детектор установлена кварцевая цилиндрическая линза, позволяющая увеличить чувствительность в 3-5 раз в зависимости от используемого диаметра оптоволоконна. Также, перед детектором установлен фильтр (long pass filter) на 590 нм, для уменьшения влияния рассеянного света и устранения эффектов второго порядка решетки.

Исследования микротвердости материалов и покрытий, а также глубины обработанных слоев и наплавленных валиков, полученных в процессе лазерной обработки производилось с помощью микротвердомера ПМТ-3 по стандартной методике.

Для изучения процессов закалки и легирования использовались образцы шлифованной стали 45.

Для исследования процесса наплавки, в качестве материала для нанесения покрытия использовался самофлюсующийся сплав ПГ-12Н-01. Химический состав порошка приведен в таблице 1:

Таблица 1 – Химический состав порошка ПГ-12Н-01

	Cr	B	Si	Fe	C	Ni
Содержание элемента	8-14	1,7-2,5	1,2-3,2	1,3-3,2	0,3-0,6	Основа

Покрытия из самофлюсующихся сплавов, при плазменном напылении требуют оплавления в соответствии с технологическими инструкциями их нанесения, что позволяет получать плотные беспористые покрытия. Однако, покрытия из данных сплавов, можно использовать и без последующего оплавления. В их состав входит никелевая основа, хрома, углерод и железо, а также добавки бора и кремния. Данные покрытия обладают высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и стойкостью к окислению при высокой температуре. Чаще всего данные материалы выпускаются в порошковой форме для напыления и наплавки [4].

Покрытия их самофлюсующихся сплавов производители рекомендуют использовать в качестве износостойких, в том числе в коррозионных средах и под воздействием высоких температур с умеренными ударными нагрузками [5]. Они содержат бор и кремний, которые улучшают смачиваемость обрабатываемой поверхности частицами расплавленного материала и обеспечивают самофлюсование материала покрытия. Бор и кремний также образуют с никелем и хромом эвтектики с относительно низкой температурой плавления (950-1080°C), а также восстанавливают оксиды, образовавшиеся в процессе напыления, которые всплывают на поверхность покрытия при самофлюсовании в виде боросиликатных шлаков и впоследствии удаляются механической обработкой. Эти элементы также увеличивают твердость и износостойкость сплавов.

Лазерное легирование производилось с помощью обмазок на основе бора и смеси бора и хрома.

Легирование бором конструкционных сталей вызывает образование в материале основы большого количества боридов Fe_3B , Fe_2B , FeB , при этом микротвердость может достигать 21000 МПа. В структуре упрочненного слоя отсутствует остаточный аустенит, как при азотировании и цементации, что положительно влияет на твердость и износостойкость, в том числе абразивную, и стойкость к ударным воздействиям [1].

При совместном легировании бором и хромом кроме вышеописанных эффектов наблюдается также возрастание коррозионной стойкости ввиду увеличения электрохимического потенциала стали, ударной прочности и износостойкость по сравнению с нелегированными поверхностями [1].

Лазерная поверхностная закалка производилась по критериям увеличения значений твердости закаленного слоя без значительного переплава поверхности.

Критериями при лазерной сварке служило получение прочного сварного соединения без сварочных пор и раковин.

1.3 Методики исследований

С учетом специфики процессов лазерной обработки, а именно: изменения коэффициента отражения при плавлении и испарении обрабатываемого лазером материала; наличия парогазового канала при резке и сварке, возникающих гидродинамических явлений в ванне расплава, наличия плазменного факела и т. д., была разработана методика оценки температурных полей в процессе лазерной обработки.

Стандартный пирометрический контроль температуры T обрабатываемой поверхности осложняется неоднородностью светового поля, которое формируется в области контакта мощного лазерного пучка с поверхностью металла. Также оказывается неизвестным и спектральный коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ поверхности, где λ – длина волны. Требуемый мониторинг в области высоких температур можно проводить с помощью высокотемпературных термографов, использующих матрицы

фотоприемников на основе кремния. Из них термографы, которые используют регистрацию теплового излучения в трех участках спектра, обладают небольшой погрешностью измерения температуры при неизвестной зависимости $\varepsilon(\lambda)$. Однако лазерные процессы разогрева тонкого слоя поверхности сильно отличаются от традиционных технологий нагрева. Главные отличия – малая область воздействия, большая разность температур между нагреваемой поверхностью и более глубокими слоями металла, а также другой физический механизм передачи энергии лазерного пучка атомам кристаллической решетки.

Передача энергии происходит путем многократного увеличения кинетической энергии свободных электронов, которые колеблются в тонком (около десяти нанометров) поверхностном слое металла под воздействием мощного электромагнитного поля светового излучения, и последующей ее отдачи атомам кристаллической решетки. Лазерные процессы нагрева имеют неравновесный характер с разными постоянными времени нагрева электронного газа и кристаллической решетки. Поэтому спектр светового излучения, которое формируется в области контакта лазерного пучка с поверхностью металла, может заметно отличаться от классического распределения равновесного теплового излучения, описываемого формулой Планка. Аналогично, спектральный коэффициент теплового излучения $\varepsilon_1(\lambda)$ обрабатываемой поверхности, может не совпадать с коэффициентом $\varepsilon(\lambda)$, который характерен для этого металла при равномерном нагреве толстого слоя объема.

Очевидно, что для уверенного контроля температуры поверхности в области контакта лазерного пучка излучения с металлом необходимо знать характер спектральной зависимости коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ этой поверхности.

При использовании формулы Вина можно связать между собой поверхностную спектральную светимость нагретого тела и его температуру с помощью следующих выражений:

$$\ln \frac{\lambda^5}{c_1} M(\lambda, T) - \ln \varepsilon(\lambda) = -\frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda} \quad \text{или:} \quad \ln \varepsilon(\lambda) - \ln \frac{\lambda^5}{c_1} M(\lambda, T) = \frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda}, \quad \text{т. е.} \quad y = bx - \ln \varepsilon(\lambda), \quad (1)$$

где $M(\lambda, T)$ – поверхностная спектральная светимость абсолютно черного тела (АЧТ), c_1 и c_2 – первая и вторая постоянные излучения, $y = -\ln[(\lambda^5/c_1)M(\lambda, T)]$. Находя коэффициент наклона b , зависимости левой части уравнений от переменной $x = c_2/\lambda$, можно найти для «серых» тел ($\varepsilon(\lambda) = \text{const}$) значение искомой температуры $T = 1/b$. Обычно авторы соответствующих публикаций [6] считают, что коэффициент теплового излучения контролируемых процессов слабо зависит от λ , и ограничиваются определением температуры с помощью выражения (1), находя температуру T по коэффициенту наклона b , который рассчитывают с помощью метода наименьших квадратов в участке спектра, где есть основания полагать тепловое излучение равновесным. При расчете искомой температуры они обычно выбирают наиболее линейный участок получаемой зависимости (1), что дает им повод утверждать о высокой точности такого способа определения температуры, не требующего проведения абсолютных измерений яркости теплового излучения.

Проведенное моделирование процессов определения температуры металлов методами спектральной пирометрии, описанными в [6], показывает, что для тел с $\varepsilon(\lambda) \neq \text{const}$ возникают существенные погрешности измерения T . Для их устранения требуется более сложный метод, основанный не на относительных, а на абсолютных измерениях поверхностной спектральной светимости $M_b(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot M(\lambda, T)$ тел или их спектральной яркости $L_b(\lambda, T)$.

Измерения абсолютной спектральной яркости $L_b(\lambda, T)$ излучения тел ведут спектрофотометрами, которые должны быть отградуированы в соответствующих единицах.

1.3.1 Градуировка спектрофотометра

Абсолютная спектральная чувствительность спектрофотометров $S(\lambda)$ определяется с помощью эталонных излучателей. Наибольшую точность воспроизведения спектральной светимости при заданной температуре обеспечивают модели абсолютно черных тел. Можно использовать и другие излучатели с более простой конструкцией, например, вольфрамовую ленту эталонной лампы накаливания. Спектральный коэффициент теплового излучения вольфрама $\varepsilon_w(\lambda, T)$ известен, что позволяет достаточно точно рассчитывать его поверхностную спектральную светимость $M_w(\lambda, T)$, которая градуируется по току при сличении ее светимости со светимостью АЧТ. Проецируя на торец оптоволоконна спектрофотометра изображение участка ленты лампы, который имеет максимальную температуру, можно гарантированно воспроизводить спектральную светимость вольфрама при выбранном значении тока через лампу.

Результатом измерения спектральной светимости вольфрама в выбранном участке спектра при использовании в спектрометре линейки кремниевых фотоприемников на ПЗС структурах, является определение спектральной зависимости среднего значения скорости нарастания \bar{V}_i цифровых сигналов \bar{D}_i , получаемых от i -ых фоточувствительных элементов линейки, которые зависят от температуры T :

$$\bar{V}_i(T) = \frac{\bar{D}_i(T, \tau)}{\tau} = K g k_{QD} \frac{e s_{эл}}{h c} \beta(\lambda_i) \eta(\lambda_i) \varepsilon_w(\lambda_i, T) M_{АЧТ}(\lambda_i, T) \lambda_i \Delta \lambda_i, \quad (2)$$

где λ_i – длина волн регистрируемого излучения, соответствующая i -ому элементу линейки фотоприемников спектрофотометра, τ – время экспозиции или накопления сигналов; g – коэффициент усиления предусилителя, встроенного в линейку фотоприемников; k_{QD} – коэффициент преобразования зарядов, накапливаемых в светочувствительных элементах линейки, в

цифровые отсчеты; e , h и c – заряд электрона, постоянная Планка и скорость света, соответственно; $S_{эл}$ – площадь каждого фоточувствительного элемента линейки; $\beta(\lambda_i)$ – спектральная зависимость угла блеска дифракционной решетки, используемой в спектрофотометре; $\eta(\lambda_i)$ – спектральная зависимость квантовой эффективности элементов линейки; $\Delta\lambda_i$ – ширина элементарного участка спектра, приходящегося на один элемент линейки, под которой может подразумеваться ее спектральное разрешение; $K = \tau_{об} \left(D_{об}^2 / 4f^2 \right) (1 - f/Z)^2$ – коэффициент связи между освещенностью элементов линейки и светимостью вольфрамовой ленты; $\tau_{об}$, $D_{об}$ и f – пропускание, диаметр и фокусное расстояние объектива; Z – расстояние от объектива спектрофотометра до градуировочного источника.

Тогда выражение для вычисления цифровых сигналов на выходе линейки фотоприемников будет иметь вид:

$$D_w(\lambda_i, T, \tau) = k_i K g k_{QD} \tau \cdot e S_{эл} \left[\beta(\lambda_i) \eta(\lambda_i) \varepsilon_w(\lambda_i, T) \frac{1}{hc} \frac{c_1}{\lambda_i^4} \left(e^{c_2/\lambda_i T} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda_i + i_T \right], \quad (3)$$

где i_T – темновой ток матрицы, k_i – коэффициент, определяющий неоднородность чувствительности элементов линейки фотоприемников, в среднем равный 1 со среднеквадратичным отклонением около 0.01. При использовании операции определения среднего значения i_T с его последующим вычитанием, влиянием i_T можно пренебречь.

Сопоставление расчетных зависимостей $D_w(\lambda_i, T, \tau)$, которые вычислены с использованием $\eta(\lambda_i)$ и $\beta(\lambda_i)$, приведенных в документации на используемый оптоволоконный спектрометр AvaSpec 2048, с зависимостями, которые получены полученными при градуировке, показало их существенное несовпадение. Поэтому абсолютная спектральная чувствительность $S(\lambda)$ должна определяться путем обязательной градуировки спектрофотометра по эталонному излучателю.

Размерность абсолютной спектральной чувствительности спектрофотометра, которая находится при градуировке по эталонному излучателю, будет определяться величиной, измеряемой спектрофотометром. Для сопоставления и дальнейшей интерпретации результатов измерений спектральных зависимостей удобнее всего определять зависимость яркости излучения контролируемого тела $L(\lambda_i, T) = L_\lambda(\lambda_i, T) \cdot \Delta\lambda_i$ от длины волны:

$$L(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \Theta}, \quad (4)$$

где $d\Phi(\lambda)$ – спектральный поток излучения, распространяющийся в телесном угле $d\Omega$ с единичной площадки тела, имеющей площадь dS , в направлении, составляющем угол Θ с нормалью к этой площадке. Яркость излучения L в системе СИ измеряется в Вт/(м²·ср). Для ламбертовских излучателей, которые имеют одинаковую яркость излучения во всех направлениях, можно пользоваться связью между их светимостью M и яркостью L в виде $M = \pi L$. Тогда общее выражение для вычисления зависимости яркости излучения от λ_i будет иметь вид:

$$L(\lambda_i) = S_L(\lambda_i) D_w(\lambda_i, \tau) / \tau, \quad (5)$$

а абсолютная спектральная чувствительность спектрофотометра при проведении градуировки по вольфрамовой лампе и выполнении условия $Z \gg f$ определяется выражением:

$$S_L(\lambda_i) = \frac{L(\lambda_i, T)}{D(\lambda_i, T, \tau) / \tau} = \frac{M_w(\lambda_i, T)}{\pi D_w^*(\lambda_i, T, \tau) / \tau} = \frac{\varepsilon_w(\lambda_i, T) \left(c_1 / \lambda_i^5 \right) \left(e^{c_2 / \lambda_i T} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda_i}{\pi D_w^*(\lambda_i, T, \tau) / \tau}, \quad (6)$$

где $D_w^*(\lambda_i, T, \tau)$ – цифровые сигналы, регистрируемые в процессе проведения градуировки.

При регистрации спектров, формирующихся в области контакта мощного лазерного пучка излучения с поверхностью обрабатываемого металла, необходима невысокая крутизна преобразования спектрофотометра. Для ослабления потока фотонов, попадающих на линейку фотоприемников спектрометра AvaSpec 2048 через объектив с $D_{об} = 10$ мм и $f = 65$ мм, оптоволокну с диаметром 600 мкм и входную щель, использовался косинусный корректор с установленной перед ним диафрагмой с диаметром 0,6 мм. Этот корректор располагается перед торцом оптоволокну на расстоянии от главной плоскости объектива, меньшем $2f$. При этом расстояние от объектива до контролируемой поверхности составляет примерно 20 см, что требует учета ослабления освещенности формируемого изображения с помощью коэффициента K . Результат определения спектральной чувствительности созданного спектрофотометра на базе AvaSpec 2048 при использовании эталонной вольфрамовой лампы накаливания СИ10-300 и расстоянии $Z = 20$ см приведен на рисунке 2.

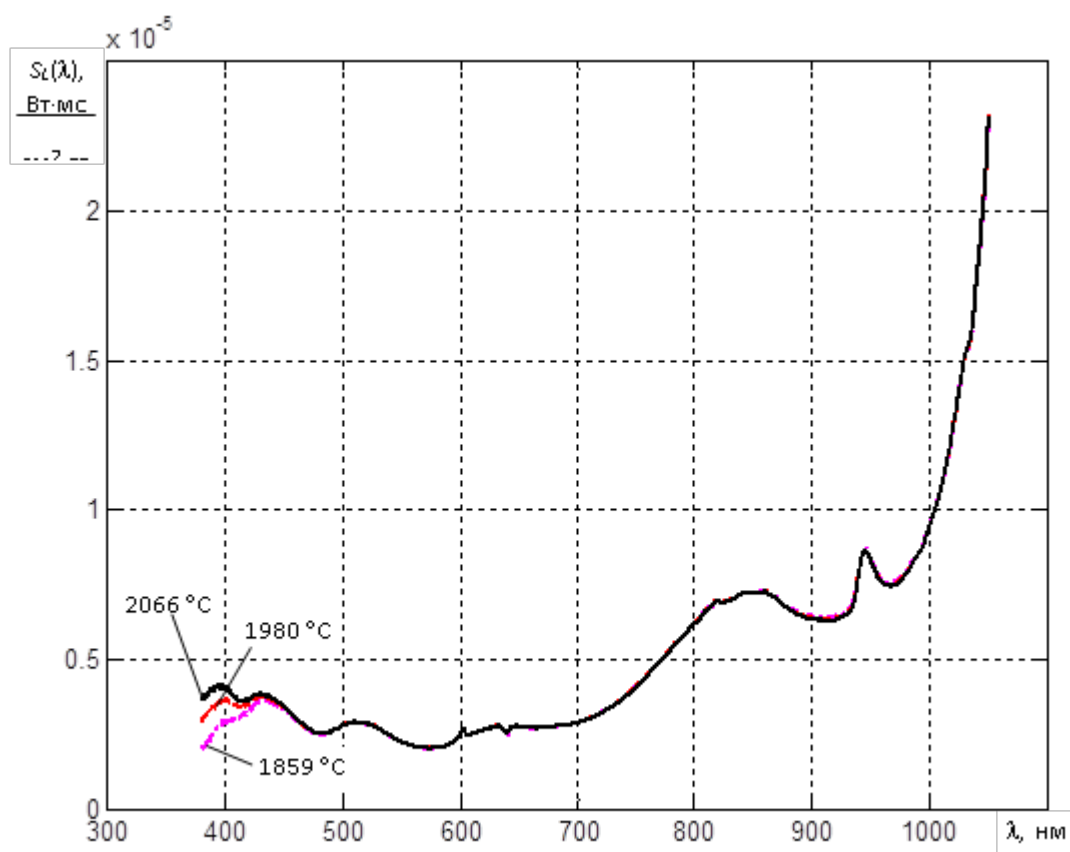


Рисунок 2 – Полученные абсолютные спектральные чувствительности спектрофотометра на базе оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048 при использовании эталонной лампы накаливания СИ10-300 и трех температур вольфрамовой ленты лампы 1859⁰С (штрихпунктирная линия), 1980⁰С (штриховая) и 2066⁰С (сплошная линия)

При градуировке использовалась размерность измеряемой спектральной яркости $L(\lambda)$ в Вт/(см²·ср·мкм). Поэтому полученные значения $S_L(\lambda_i)$ имеют размерность Вт·мс/(см²·ср), поскольку при вычислении спектральной яркости $L(\lambda)$ приходится учитывать ширину элементарных спектральных участков $\Delta\lambda_i$ и время экспозиции τ . Градуировка велась при использовании пересчета зависимости яркостной температуры вольфрамовой ленты от тока через лампу, полученной при сличении яркости излучения вольфрамовой ленты с яркостью излучения модели АЧТ на стандартной длине волны 655 нм, в значения истинной температуры T . Правильность установки требуемых значений температуры вольфрамовой ленты контролировалась с помощью высокотемпературного тепловизора [7]. Отметим, что на коротковолновом

участке полученной зависимости $S_L(\lambda_i)$ проявляется влияние процессов захвата фотогенерированных носителей заряда ловушками, которые существуют в поверхностном слое кремниевой пластины линейки фотоприемников Sony ILX554B на ПЗС структурах. Ловушки формируются поверхностными дислокациями решетки Si и активно захватывают заряды, возникающие у поверхности фоточувствительного слоя линейки при поглощении фотонов коротковолнового участка спектра электронами кремниевой пластины. Это приводит к нелинейности световой характеристики линейки Sony ILX554B, заметно проявляющейся при длинах волн $\lambda < 460$ нм. При увеличении светового потока (с ростом температуры вольфрамовой ленты лампы) относительная доля захваченных фотогенерированных зарядов уменьшается, и крутизна спектрофотометра $S_L(\lambda_i)$ в коротковолновом участке спектра растет.

1.3.2 Спектральная яркость свечения стали в области воздействия лазерного излучения CO₂ лазера

С помощью созданного спектрофотометра измерялась спектральная яркость излучения поверхности стальной пластины в области ее контакта с пучком излучения CO₂ лазера, имеющего эффективный диаметр пучка 2 мм и мощность 1 кВт. Направление пучка излучения лазера совпадало с нормалью к поверхности пластины. Измерения проводились как при неподвижном пучке, так и при четырех значениях скорости v его перемещения (300, 700, 1000 и 1400 мм/мин) по пластине вдоль выбранного направления. Регистрация яркости излучения, формирующегося в области контакта, проводилась при угле наблюдения 49° относительно плоскости пластины.

Лазерное излучение при взаимодействии со свободными электронами металла формирует сложное интерференционное электромагнитное поле. Глубина его проникновения в металл определяется толщиной скин-слоя, составляющий около 10 нм [8]. Часть энергии этого поля поглощается

свободными электронами, скорость движения которых возрастает. Процесс передачи избыточной энергии другим электронам, ионам кристаллической решетки и ее дефектам имеет многостадийный характер. Поэтому эффективное перераспределение энергии происходит в более толстом слое металла, равном примерно 100 нм [8]. Этот слой быстро нагревается с характерным временем передачи энергии свободных электронов атомам кристаллической решетки порядка нескольких пикосекунд. При достаточной мощности лазерного излучения этот слой быстро плавится и тепло далее передается вглубь материала за счет механизмов его теплопроводности.

Зарегистрированные зависимости спектральной яркости излучения стали показаны сплошными линиями на рисунке 3. Диапазон зарегистрированных значений спектральной яркости излучения стали примерно соответствует диапазону спектральной яркости модели АЧТ с температурами от 1850 до 2650⁰ С, что указывает на наличие жидкой фазы на поверхности стальной пластины.

Анализируя рисунок 3 можно отметить, что нелинейность световой характеристики фоточувствительного слоя линейки фотоприемников ILX554В спектрофотометра AvaSpec 2048 приводит к заметному искажению регистрируемых спектров на коротковолновом участке спектра при высоких температурах жидкого слоя стали.

Хорошо видно, что с увеличением скорости движения пучка лазера спектральная яркость излучения, формирующегося в области его контакта с поверхностью стальной пластины, уменьшается, что говорит о снижении температуры расплавленного слоя. При увеличении эффективного диаметра пучка лазерного излучения путем его расфокусировки, происходит аналогичное снижение спектральной яркости излучения стали, поскольку плотность мощности результирующего поля снижается, что часто используется технологами при выборе режима лазерной закалки с помощью СО₂ лазеров, мощность излучения которых изменять нежелательно.

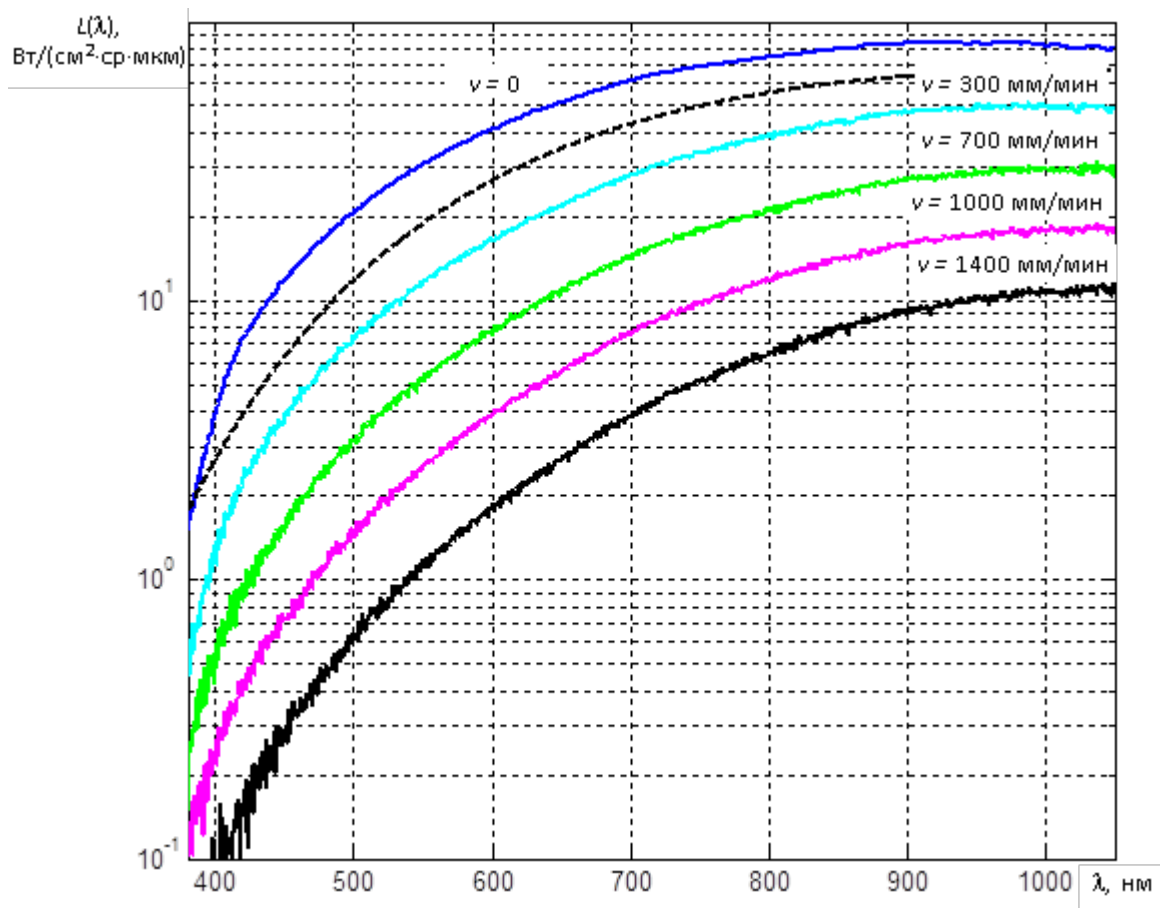


Рисунок 3 – Спектральные яркости излучения стали (сплошные линии) при нескольких скоростях продольного движения v пучка излучения CO_2 лазера и угле наблюдения 49° относительно плоскости поверхности пластины, а также расчетная спектральная яркость излучения модели АЧТ с температурой $T = 2500^\circ\text{C}$ (штриховая линия)

Таким образом, регистрация свойств излучения, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, формирующегося в области контакта лазерного пучка с поверхностью металла, позволяет вести непрерывный контроль процесса передачи энергии лазерного пучка атомам кристаллической решетки. При этом возникает проблема, какие из параметров или характеристик этого процесса будут наиболее информативными при организации обратной связи, например, регулировки мощности лазерного излучения, необходимой для удержания технологического процесса в заданном диапазоне значений.

Использование спектральной яркости излучения целесообразно при контроле процессов с образованием плазменного факела, что дает возможность контроля интенсивности испарения и состава формирующейся плазмы. Для процессов закалки, нанесения упрочняющих покрытий, сварки и

т. п., желательно контролировать один параметр, например, температуру T или ее распределение в области контакта лазерного пучка с поверхностью материала.

1.3.3 Определение температуры в области контакта лазерного пучка с поверхностью металла

Распределение температуры $T(x,y,z,t)$ широко используется при создании численных моделей процессов лазерного нагрева, задании граничных условий и решении уравнений теплопроводности. Очевидно, что эффективное применение анализа распределения температуры обрабатываемой поверхности для создания обратной связи с целью поддержания оптимальных параметров процесса лазерной модификации возможно только при использовании бесконтактных методов определения T . Непрерывный контроль распределения $T(x,y)$ можно обеспечить применением малогабаритной высокотемпературной термографической техники [9 - 11], встроенной в лазерную головку. Основная трудность при определении $T(x,y)$ обусловлена неизвестностью спектрального коэффициента теплового излучения материала $\varepsilon(\lambda)$ в контролируемой области.

В высокотемпературной пирометрии широко используется метод спектрального отношения, который обеспечивает неплохую достоверность измерения температуры «серых» тел с $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$ [12]. Поскольку полученные графики спектральной яркости на рисунке 3 имеют монотонный характер, можно использовать известный спектральный метод определения температуры по коэффициенту наклона b зависимости (1), т. е. при предположении, что $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$.

Отметим, что анализ зависимостей $\varepsilon(\lambda)$, полученных в результате многочисленных экспериментальных исследований для разных веществ [13], позволяет выделить три типичные для ближнего инфракрасного диапазона спектра зависимости, показанные на рисунке 4, которые характерны для диэлектриков, «серых» тел и металлов. У металлов ε в инфракрасной области

снижается с ростом λ , т. е. коэффициент наклона $d = \Delta\varepsilon/\Delta\lambda$ у них меньше нуля. Для «серых» тел он равен нулю, а для диэлектриков $d > 0$.

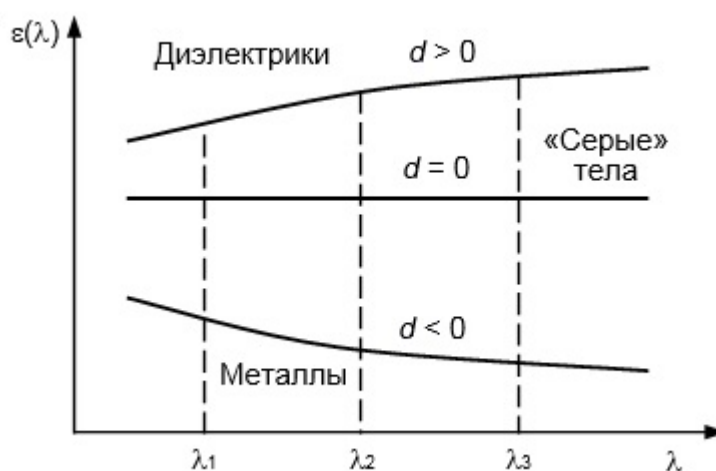


Рисунок 4 – Наиболее типичные зависимости поведения спектрального коэффициентов теплового излучения в ближней инфракрасной области спектра

При зависимостях $\varepsilon(\lambda)$, характерных для металлов, отношение эффективных значений коэффициентов теплового излучения в двух участках спектра со средними длинами волн λ_1 и λ_2 (рисунок 4) будет больше единицы. Это ведет к увеличению отношения сигналов U_{c1}/U_{c2} по сравнению с их отношением для АЧТ или «серого» тела при той же температуре. Поэтому температура спектрального отношения T_{co} оказывается больше истинной температуры $T_{и}$ (рис. 4). Для диэлектриков картина обратная $T_{co} < T_{и}$. Поскольку обычно отклонение $|T_{co} - T_{и}|$, меньше, чем разность $T_{и} - T_{чр}$, где $T_{чр}$ – температура частичной радиации, пирометры спектрального отношения используют для определения температуры поверхности раскаленных металлов с образовавшейся окисной пленкой.

Используя стандартную методику [6], т. е. выражение (1), можно рассчитать температуру расплавленного слоя стали при предположении, что $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$. На рисунке 5 приведены полученные спектральные зависимости, которые представлены в системе координат x и y , согласно (1). Выбирая спектральный участок в диапазоне 610-910 нм, в котором наблюдаются минимальные искажения зарегистрированных спектров, можно по величине

наклона b прямых участков зависимостей $y(x)$ определить температуру расплавленного слоя стали при разных скоростях движения лазерного пучка.

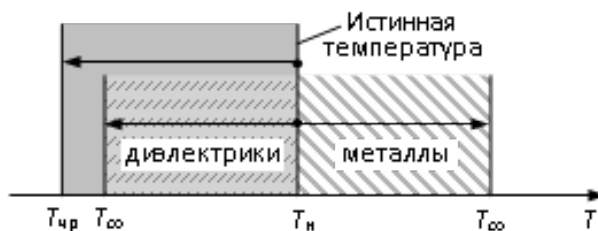


Рисунок 5 – Диапазоны возможных значений температур частичной радиации $T_{чр}$ и спектрального отношения $T_{со}$

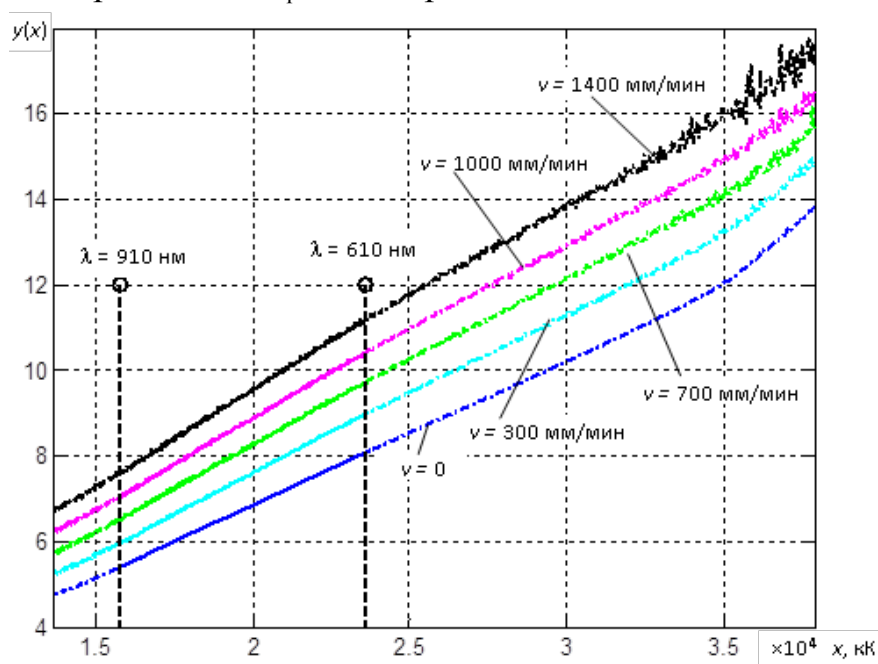


Рисунок 6 – Зарегистрированные спектральные яркости излучения стали, пересчитанные в координаты x и y

Аппроксимируя выделенные участки зависимостей $y(x)$, которые показаны на рисунке 6 сплошными линиями, полиномом 1-ой степени, можно с помощью полиномиальной регрессии определить значения температуры при разных скоростях движения пучка лазерного излучения, которые представлены на рисунке 6 кружками на штриховой линии. Поскольку при этих расчетах предполагалось, что $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$, оценки значений коэффициента теплового излучения оказываются завышенными и близкими к 0,9.

При использовании более адекватной модели, т. е. при предположении, что спектральный коэффициент теплового излучения стали описывается зависимостью:

$$\varepsilon(\lambda) = \exp[a + d(\lambda_2 - \lambda)] = \exp(a + d\Delta\lambda), \quad (7)$$

где λ_2 выбирается в центре используемого диапазона 610–910 нм, можно регрессионными методами найти другие значения температуры, которые приведены на рисунке 7 кружками на сплошной линии. Они имеют большие значения, что указывает на меньшие чем 0,9 величины зависимостей $\varepsilon(\lambda)$. Рассчитанные для этих значений T спектральные зависимости $\varepsilon(\lambda)$ представлены на рисунке 8.

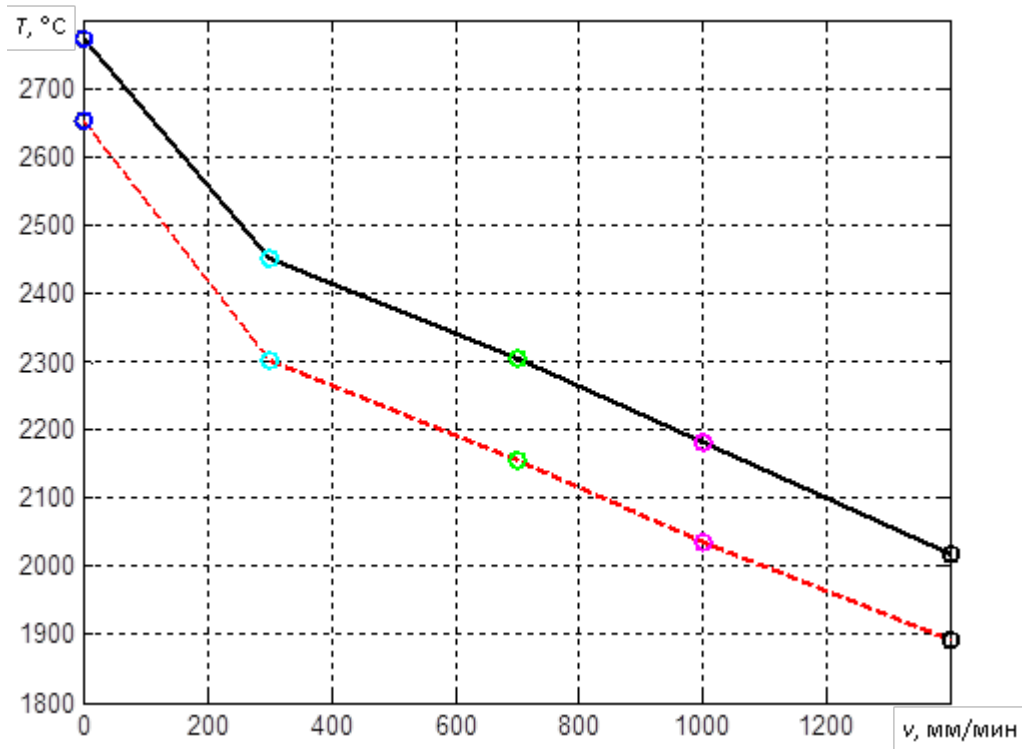


Рисунок 7 – Значения температуры T поверхности расплавленного слоя стали, вычисленные по спектральной яркости ее излучения $L(\lambda)$ при предположении, что $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$, (штриховая линия) и с помощью регрессионной методики (сплошная линия)

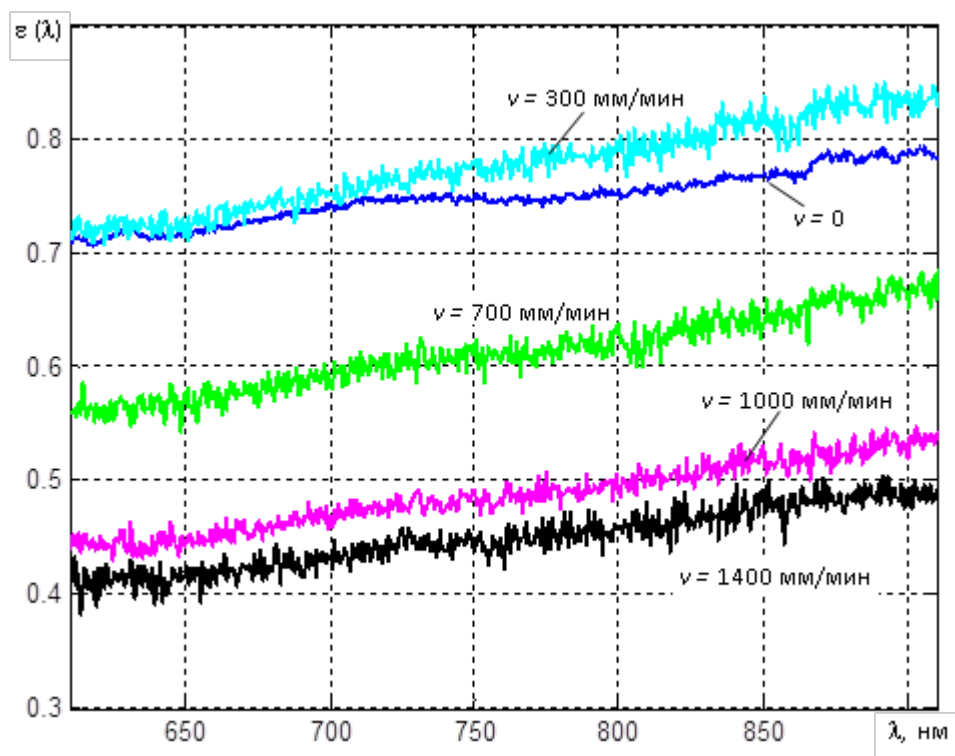


Рисунок 8 – Полученные зависимости спектрального коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ расплавленного слоя стали при разных скоростях движения пучка лазерного излучения

Анализируя рисунок 8, можно отметить, что поведение $\varepsilon(\lambda)$ расплавленного слоя стали имеет наклон $d > 0$, что характерно для диэлектриков. Атмосферный кислород при больших температурах активно взаимодействует с расплавом, что приводит к возникновению окислов железа и изменению знака параметра d зависимости $\varepsilon(\lambda)$ на противоположный по сравнению с металлами. Поэтому, как показано на рисунке 4, температура спектрального отношения T_{co} для диэлектриков занижается по сравнению с истинным значением, что и подтверждают графические зависимости на рисунках 7 и 8. С увеличением скорости движения лазерного пучка, значения зависимости $\varepsilon(\lambda)$ снижаются, но величина параметра d остается положительной, что свидетельствует о насыщенности тонкого поверхностного слоя стали атомами кислорода.

Анализируя представленные зависимости можно оценить влияние скорости движения лазерного пучка на формируемые значения температуры

жидкого слоя стали, что дает ценную информацию при настройке моделей лазерных процессов нагрева.

1.4 Исследования в области контроля температур при лазерной обработке

При наладке процессов лазерного упрочнения, сварки и наплавки, серьезной проблемой является активный контроль зоны взаимодействия лазерного луча с обрабатываемым материалом. Самым показательным параметром лазерных процессов является температура ванны расплава и скорость ее изменения, так как они характеризуют явления плавления и кристаллизации ванны расплава при лазерной обработке, фазовые переходы в материале, а, соответственно, структуру и свойства полученного слоя либо сварного шва. При этом измерение температуры в процессе лазерной обработки является довольно сложной задачей, стоящей перед инженерами и исследователями. Это обусловлено следующими причинами:

- необходимость измерения широкого диапазона температур – до 3000⁰С и более;
- высоким градиентом температур в области лазерной обработки и зоне термического влияния (ЗТВ), $\sim 10^5 \dots 10^7$ °С/м;
- различием диаметра лазерного луча в зоне обработки (50 мкм ... 1 см);
- переотражением лазерного излучения от несовершенств поверхности обработки;
- наличием плазмохимических явлений у поверхности обработки;
- изменения излучательной способности при различных температурах и состояниях поверхности [14, 15].

Решению этих проблем применительно к различным видам лазерной обработки посвящено большое количество отечественных и зарубежных исследований.

Авторы работы [14] для измерения температуры в зоне воздействия использовали инфракрасную камеру FLIR Phoenix RDAC и результаты

математического моделирования согласно линейной модели полубесконечного тела непрерывно действующим Гауссовым тепловым источником. Обработку проводили непрерывным волоконным лазером с длиной волны $\lambda=1,07$ мкм, мощностью излучения 20 и 30 Вт, скоростью сканирования 50...300 мм/с. Профили истинной температуры вдоль оси перемещения лазерного луча и значения температурных градиентов в зоне обработки получали сопоставлением результатов измерения камерой с результатами математического моделирования.

Цифровая камера для контроля температуры в зоне спекания в режиме реального времени применялась также автором в работе [16]. Контроль температуры производился применительно к СЛС-процессу получения функционально-градиентных материалов из порошка титана ВТ1-0 импульсным волоконным лазером, с длиной волны $\lambda=1064$ нм. Установлено, что управление процессом получения функционально-градиентных материалов позволяет регулировать структурную неоднородность материалов, а соответственно и физические свойства.

В работе [17] температура в зоне обработки при лазерном термоупрочнении стали У8А измерялась пирометром Кельвин Арто 2300Т. Упрочнение производилось волоконным иттербиевым лазером ЛС-5 мощностью 5 кВт. Установлено, что с помощью данного пирометра установить температуру самого фокального пятна невозможно, из-за образования лазерной плазмы, температура которой превышает 2000°C . Результаты измерений фиксировались на расстоянии 2 мм от фокального пятна, а истинная температура восстанавливалась по аппроксимированным графикам зависимости температуры от времени воздействия, которая возрастала по линейному закону, а также по графикам влияния температуры на твердость обработанной поверхности и влияния мощности лазерного излучения на температуру. Авторами сделан вывод об информативности значений температуры, измеренной на расстоянии от зоны непосредственного

воздействия лазерного луча в качестве параметра, для управления процессом лазерного термоупрочнения.

Авторами работы [18] поставлена задача определения химического состава ванны расплава в процессе аддитивного выращивания деталей. Для этого, был разработан зонд спектromетрии лазерно-индуцированной плазмы (СЛИП) на базе импульсного Nd: АИГ лазера с диодной накачкой и кварцевой оптической системой для сбора излучения и передачи его в спектрометр. Выращивание детали проводили на установке лазерной наплавки, на основе промышленного робота (IRB-2600, АВВ) и непрерывного волоконного лазера, мощностью 2 кВт (мощность обработки составила 1,2 кВт), коаксиальным методом. Исследовали химический состав ванны расплава при наплавке никелевого самофлюсующегося сплава, упрочненного карбидом вольфрама, при этом интерес представляло содержание вольфрама, никеля и, особенно, углерода. В процессе исследований установлено корректное соответствие результатов измерений с помощью зонда и стандартного химического анализа. Также установлена возможность онлайн определения дефектов наплавки для эффективного контроля над процессом, в том числе при выращивании изделий с заданным градиентом свойств.

Авторы работы [19] для комплексного оптического мониторинга процесса лазерной наплавки использовали пирометр, инфракрасную камеру и высокоскоростную камеру видимого диапазона. При этом пирометр и инфракрасную камеру использовали для измерения яркостной температуры ванны расплава и зоны термического влияния; а высокоскоростную камеру видимого диапазона – для визуализации процесса формирования валика. Наплавка производилась непрерывным дисковым Yb:YAG-лазером мощностью 2 кВт, для наплавки использовался порошковый материал – коррозионно-стойкая аустенитная сталь 12Х18Н10Т. Установлена корреляционная связь результатов измерения яркостной температуры заявленными методами с мощностью лазерного излучения.

В работе [20] рассматривается процесс сканирующей лазерной эпитаксии – аддитивного процесса с непрерывным переходом основного металла в покрытие (Scanning Laser Epitaxy, SLE), рассматриваемый как вариант выращивания деталей из никелевых суперсплавов. Для осуществления процесса использовался волоконный иттербиевый лазер мощностью 1 кВт, для контроля процесса использовались тепловизор, и термическая камера с обратной связью по температуре. Разработана система управления с обратной связью в реальном времени для процесса SLE. Первоначально обсуждалась реализация двух алгоритмов машинного зрения для определения средней температуры ванны расплава с помощью тепловизора. Было обнаружено, что алгоритм приема данных может быстро определять размер и форму ванны расплава и вычислять среднюю температуру ванны расплава без потери частоты кадров камеры во времени. Используя данные обратной связи по температуре, были проведены эксперименты по идентификации системы, чтобы определить модель передаточной функции для системы. Передаточная функция второго порядка была разработана и использована для успешного моделирования и реализации регулятора для управления температурой ванны расплава во время обработки путем изменения входной мощности лазера. Было обнаружено, что для правильной настройки коэффициентов усиления регулятора для каждого обрабатываемого сплава потребуется чрезмерное количество экспериментов, поэтому была реализована адаптивная схема управления для быстрого определения параметров регулятора. Адаптивный контроллер использовался для демонстрации того, что следование эталонному температурному профилю оказало значительное влияние на результирующую высоту наплавленных валиков, полученных на образцах с помощью SLE. Было обнаружено, что при использовании профилей постоянной эталонной температуры были получены наиболее однородные образцы, что значительно улучшило процесс и потенциально позволило использовать данную схему управления для многослойной наплавки в будущем.

Процесс SLE (Scanning Laser Epitaxy) изучался также в работе [21], посвященной наплавке никелевого суперсплава IN100, применительно к ремонту компонентов турбинных двигателей. Наплавка производилась иттербиевым волоконным лазером, мощностью 1 кВт, на установке, оснащенной 3-х осевой гальванометрической сканирующей системой (Cambridge Technology), камерой обработки с управляемой атмосферой, тепловизионной камерой (Mikron MCS 640) и специально изготовленным видеомикроскопом для ванны расплава (Control Vision Inc.). Для анализа изображения использовались цифровые оптические микрофотографии в качестве входных данных, в качестве выходных микроструктурных параметров рассматривались такие показатели как: деформация, пористость, наличие трещин, однородность поверхности, глубина ванны расплава и изменение глубины ванны расплава по длине образца. Количественная металлография была дополнена исследованием на основе методов планирования эксперимента. Была построена двумерная модель процесса в среде ANSYS Workbench, для сравнения расчетных данных с экспериментальными. Было обнаружено, что мощность лазерного излучения и скорость сканирования влияют на размер пор, глубину ванны расплава и однородность наплавленного слоя. В ходе исследований установлено увеличение твердости покрытия по сравнению с основой на 10%, отсутствие горячих трещин в материале покрытия, также установлено, что оптимизация параметров процесса SLE на основе планирования экспериментов позволяет получать наплавленные слои хорошего качества. Профиль средней температуры ванны расплава и размер ванны расплава, зарегистрированные инфракрасной камерой, показали удовлетворительное соответствие с аналогичными параметрами, полученными в ходе моделирования.

В работе [22] авторы, посредством математической модели процесса лазерной наплавки и данных высокоскоростной CCD-камеры, осуществляли контроль геометрических параметров ванны расплава при лазерной наплавке порошкового сплава Ni60. Наплавка производилась с помощью 3-х

киловаттного CO₂-лазера и 5-ти осевого станка с ЧПУ, оснащенного подсистемами подачи порошка и мониторинга процесса (ССD-камера). Система мониторинга получает 256-цветные растровые изображения шкалы серого и отправляет их в модуль обработки, который затем вычисляет геометрические параметры и показывает их в режиме реального времени. За ключевые характеристики процесса, которыми можно управлять, приняты размер ванны расплава и площадь ее поперечного сечения, определяемые распределением температуры от теплового источника; управление осуществляется с использованием метода обработки цифровых изображений в режиме онлайн. Авторами была разработана математическая модель для описания взаимодействия между лазером и частицами порошка, а также для прогнозирования и управления площадью поперечного сечения. Результаты исследований показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, данная математическая модель может быть использована при выборе параметров процесса коаксиальной лазерной наплавки, что сокращает количество экспериментов и их стоимость.

Авторами работы [23] проведено обширное исследование, посвященное проблемам диагностики процессов в аддитивном производстве металлических деталей. Из обзора приведенной в монографии литературы следует, что в области аддитивных технологий (АТ) существует потребность в надежных методах контроля в процессе производства детали «на месте» и методах управления процессами посредством обратной связи, в связи с чем многие организации активно проводят исследования в этой области. Часть систем, применяемых на сегодняшний день, позволяют визуализировать процессы АТ, однако не позволяют определять наличие дефектов в материале в процессе выращивания детали. Согласно проведенным исследованиям, визуальные методы, в которых использовалась камера, использовались для выявления дефектов обработки в процессе порошкового спекания (Powder bed fusion, PBF), таких как состояние наплавленного слоя и его геометрическая точность. Для осаждения материалов при помощи направленного энергетического

воздействия (Directed energy deposition, DED) была реализована обратная связь при мониторинге высоты наплавленного слоя с помощью систем технического зрения. Пирометрия и использование ИК-камер позволили реализовать обратную связь в процессе PBF для поддержания постоянного температурного градиента по всей площади наплавки, хотя существующие патенты и лицензионные соглашения, ограничивают интеграцию оборудования для мониторинга в АТ.

Методы измерения и контроля процессов АТ «на месте», реализованные на сегодняшний день, в основном дают только информацию о поверхности наплавленного слоя; более совершенные методы неразрушающего контроля, позволяющие обследовать подповерхностные слои, были испытаны, но еще не интегрированы в АТ. Идентификация в реальном времени и управление параметрами с обратной связью для минимизации неоднородностей материала ограничены плохим пространственным разрешением, ограниченными полями обзора, высокой температурной нагрузкой и большими объемами обрабатываемых данных. Для эффективного управления с обратной связью требуется априорное знание детали и процесса наплавки. Необходима разработка новых датчиков, которые позволят проводить контроль с разрешением, соответствующим часто встречающимся неоднородностям материала.

В работе [24] предложен метод обеспечения точности лазерной наплавки путем контроля высоты наплавленного валика, которая может изменяться под действием случайных колебаний параметров процесса лазерной наплавки. Контроль высоты основан на принципе триангуляции, в котором используется плоскость структурированного света для непосредственного измерения высоты всего поперечного сечения наплавленного слоя. Процедура измерения реализована в LabVIEW, чтобы воспользоваться преимуществами существующих функций обработки изображений. Система измерения состоит из камеры Pulnix TM-1402 с объективом Fujinon HF12.5SA-1 и лазера SUWTECH с длиной волны

излучения 532 нм, мощностью 300 мВт. Лазер и камера смонтированы на трехосной портальной системе, на которой также установлено оборудование для лазерного напыления. Лазер устанавливается на 130 мм выше поверхности валика; он создает световую плоскость, которая пересекает профиль валика. Камера установлена позади лазера под углом 55° к световой плоскости. Расстояние от объектива камеры до пересечения поверхности валика и лазерной линии выбирается таким образом, чтобы соответствовать минимальному рабочему расстоянию камеры, для обеспечения максимального разрешения изображения. Процесс наплавки осуществляется непрерывным Nd:YAG лазером мощностью 1,0 кВт, длиной волны излучения 1064 нм. Процесс измерения состоит фиксации камерой линии, полученной проекцией световой плоскости от лазера на поверхность валика, а затем извлечения физического местоположения лазерной линии из изображения. Полная процедура извлечения линии может состоять из трех основных этапов: определение местоположения линии, обрезка выступов и масштабирование, каждый шаг реализован в коде LabVIEW, который может быть выполнен в среде LabVIEW Real-Time. В процессе исследований установлено, что алгоритмы обнаружения линии успешно определяют ее местоположение, несмотря на дифракцию и изменение профиля яркости. Эксперименты показывают, что предложенный метод измерения может надежно воспроизводить измеренные поверхности с погрешностью около 50 мкм. Основным преимуществом этого метода на основе технического зрения по сравнению с другими автономными методами является его способность быстрого сканирования и измерения трехмерной геометрии наплавленного валика.

Мониторинг процессов в реальном времени является задачей исследователей, не только в сфере лазерных технологий. Примером может служить работа [25], авторы которой разработали систему мониторинга процесса аргодуговой сварки вольфрамовым электродом (Gas Tungsten Arc, GTA). Мониторинг сварочной ванны в режиме реального времени

производился с помощью инфракрасной (ИК) термографии. Инфракрасная камера, установленная на узле горелки, контролирует ванну расплава и распределение температуры вокруг сварочной ванны во время ГТА-сварки. Температурные профили были измерены на пластинах с помощью термопар в сочетании с ИК-термографией для определения излучательной способности поверхности пластины. ГТА-сварка проводилась на пластинах из нержавеющей стали 316LN толщиной 3 мм на различных режимах сварки. ИК-тепловые изображения были получены и проанализированы в режиме онлайн. Была получена линейная зависимость между шириной валика, определенной методом линейного сканирования, и фактической шириной валика, измеренной с помощью оптической микроскопии. Расчетный градиент температуры и фактическая глубина проплавления показали обратную зависимость. Полнокадровый анализ был проведен для оценки распределения температуры поверхности для стыковых сварных соединений квадратного сечения. Для сварных соединений из нержавеющей стали 316LN были получены инфракрасные тепловые сигнатуры для различных дефектов сварных швов, таких как отсутствие плавления, отсутствие проплавления и включения вольфрама, для использования в качестве эталонных сигнатур для оперативного мониторинга во время ГТА-сварки. Установлено, что существует линейная зависимость между шириной сварного шва, рассчитанной на основе теплового профиля инфракрасного излучения, и фактическими измеренными значениями; также наблюдается обратная линейная зависимость между макроскопическим градиентом температуры, вычисленным из теплового профиля ИК-излучения, и измеренной глубиной проплавления сварного шва. Распределение температуры вокруг сварного шва на поверхности пластины можно оценить, как изотермические контуры ИК-тепловизионных изображений. Изображения ИК-тепловых сигнатур, созданные для дефектов сварных швов, таких как отсутствие плавления, отсутствие проплавления и включения вольфрама, можно использовать в качестве эталонных изображений для оперативного контроля качества сварки

с помощью ИК-термографии во время GTA-сварки нержавеющей стали 316LN.

На основе данных исследований в настоящее время разрабатывается и тестируется система управления на основе вычислительного интеллекта (СИ) для управления глубиной проникновения с помощью ИК-тепловизоров в режиме реального времени с обратной связью. Эта система управления на основе СИ будет выполнять оперативную коррекцию любого отклонения глубины проплавления, регулируя сварочный ток в реальном времени, посылая соответствующие сигналы на источник питания через ПЛК.

В работе [26] исследование процесса лазерной наплавки вольфрам-кобальтовых сплавов производилось с помощью высокоскоростной CCD-камеры для характеристики температурных градиентов и скорости охлаждения вблизи ванны расплава и конечно-элементного моделирования, для наплавленного слоя целиком. Результаты трехмерного конечно-элементного моделирования демонстрируют те же закономерности и удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, учитывая допущения и ограничения, примененные в работе. Таким образом, данную математическую модель можно использовать для моделирования теплового поля всего образца.

Также методом активного контроля процесса сварки является измерение инфракрасными датчиками, как описано в работе [27], где подобный метод применялся для контроля ширины сварного шва, глубины проплавления и положения горелки. Было обнаружено, что изменения каждого из этих параметров однозначно влияют на распределение температуры на поверхности пластины при сварке, измеренное инфракрасным датчиком. Инфракрасная камера была установлена на блоке горелки, чтобы облегчить оперативный мониторинг процесса сварки; для измерения ширины сварного шва были приняты два отдельных метода: один использует изменение наклона теплового профиля в сварочной ванне, а другой – фактические измерения температуры для определения границы раздела жидкого и твердого металла.

Граница раздела выглядит как изменение наклона точек перегиба термического профиля в сварочной ванне, разница в излучательной способности твердого и жидкого металла приводит к изменению наклона теплового профиля на границе раздела. В этом подходе граница раздела твердое тело-жидкий металл была нанесена на карту путем картирования распределения абсолютной температуры свариваемых пластин. Это было достигнуто путем установления зависимости между интенсивностью инфракрасного излучения и абсолютной температурой. Эксперименты по установлению этой взаимосвязи включали синхронное измерение температуры с помощью инфракрасной камеры и линейного массива из 11 термопар. Калиброванная интересующая линия на пластине контролировалась через регулярные временные интервалы. Абсолютные температуры, полученные с помощью термопар, сравнивали с интенсивностью инфракрасного излучения, измеренной инфракрасной камерой. Температурный градиент и подвод тепла можно использовать для отслеживания изменений глубины проплавления и толщины свариваемых пластин.

В работе [28] рассмотрены активные методы тепловидения и их приложения к композитным материалам. Рассмотрены такие методы как транзитная термография, сканирующая тепловая микроскопия и сканирующая термозондовая микроскопия. Рассмотрены факторы, влияющие на изображения, создаваемые как импульсной, так и периодической формами активного нагрева. Для импульсного нагрева используются результаты экспериментального и численного моделирования пластика, армированного углеродным волокном, чтобы показать, как обнаружение подповерхностных компонентов зависит от их размера и глубины, а также от анизотропии свойств композитных материалов. Для периодического нагрева вводятся характеристики тепловых волн, чтобы показать, как обнаружение подповерхностных компонентов зависит от частоты модуляции и радиуса фокального пятна. Приведены примеры применения сканирующей

термической микроскопии и сканирующей термозондовой микроскопии, которые иллюстрируют потенциал этих методов для получения изображений композитных материалов.

Макроскопическое тепловидение композитов стало широко использоваться в ряде приложений для неразрушающего контроля, этот метод широко исследован и хорошо известен. Его преимущества заключаются в том, что он позволяет быстро обследовать большие площади на предмет обнаружения подповерхностных дефектов и представляет собой простой практический метод, который дает наглядные результаты. Недостаток данного метода – зависимость точности определения дефекта от его размера и глубины залегания, что ограничивает возможности метода в области дефектов, расположенных близко к поверхности. На сегодняшний день проведено сравнительно немного тепловизионных исследований композитов в микроскопическом масштабе. Завершенные исследования указывают на потенциал для получения большого количества новых данных с использованием методов, которые хорошо разработаны и широко используются в других областях.

Тепловизионные исследования оказываются эффективны и в других областях исследований, связанных с распределением температурных полей нагретых элементов. Например, в работе [29] авторами исследованы тепловые характеристики плоской пластинчатой тепловой трубки с помощью инфракрасной (ИК) тепловизионной камеры. Плоская пластинчатая тепловая трубка, также называемая тепловой трубкой с паровой камерой, является одним из устройств теплопередачи, способных рассеивать высокие тепловые потоки для охлаждения силовых электронных систем, в ней используется пассивная двухфазная среда для передачи тепла от испарителя к поверхности конденсатора с минимальными потерями энергии. Для измерений использовалась ИК-камера с высоким разрешением и коррекцией излучательной способности FLIR ThermoCAM SC3000 с температурной чувствительностью 0,02 К при 30°C, точностью 1% (или 1 К) и 2% (или 2 К)

для температур ниже и выше 150°C от полной шкалы соответственно. Поверхность испарителя тепловой трубы, находящейся в поле зрения ИК-камеры, была окрашена в черный цвет, чтобы увеличить излучательную способность открытой медной поверхности и, следовательно, снизить вероятность ошибок при измерении температуры. Первоначальная калибровка ИК-камеры проводилась путем измерения температуры определенной точки на открытой поверхности тепловой трубы с помощью термопары Т-типа и ИК-камеры. Затем разница между двумя показаниями температуры использовалась для определения излучательной способности поверхности и соответствующей калибровки показаний ИК-камеры. В настоящей работе калиброванное значение излучательной способности было установлено равным 0,83.

Для сравнения также были протестированы медный блок и дефектная плоская тепловая трубка аналогичных размеров. ИК-изображения распределения температуры на поверхности испарителя полностью функционирующей тепловой трубы показали отличное распределение тепла в широком диапазоне подводимого теплового потока. Сплошной медный блок и неисправная тепловая трубка демонстрируют большие градиенты температуры на соответствующей поверхности испарителя. Экспериментальные измерения показывают, что формирование изображения с помощью ИК-камеры может быть быстрым и эффективным методом оценки характеристик плоских пластинчатых тепловых трубок.

Диагностике процесса лазерной сварки посвящена работа [30], в которой авторы поставили задачу оптимизации процесса лазерной сварки пластин из нержавеющей стали толщиной 5 мм непрерывным Nd:YAG-лазером, мощностью 4 кВт. Оптимизация включала в себя 2 подхода: регулирование температуры поверхности ванны расплава, а также регулирование ширины сварочной ванны. Свариваемые образцы шлифовали непосредственно перед сваркой, чтобы минимизировать окисление поверхности, затем на эту поверхность был нанесен тонкий слой графита для

усиления поглощения лазерного луча материалом. Сварку вели с защитой верхней части сварного шва инертным газом для предотвращения окисления затвердевающего металла шва. Оценку температуры производили с помощью стандартной цветной камеры CMOS с помощью метода пирометра с двумя длинами волн. Исследования показали, что система обеспечивает измерения в диапазоне температур 1600–3000 К, который охватывает полный рабочий диапазон температур лазерной сварки нержавеющей стали.

В работе [31] автором использован тепловизор ThermoCAM S65 с обратной связью по температуре для контроля и управления процессом лазерного термоупрочнения ножей из стали 40X13. При этом, тепловизионные измерения в инфракрасной области невозможно провести напрямую, вследствие образования облака лазерной плазмы, искажающего тепловые поля. Автором предложено проводить измерения через 0,05-0,10 с после окончания процесса лазерного воздействия на материал, а корректирование параметров процесса лазерной обработки осуществлять в режиме накопления данных. Полученные данные использованы для построения модели процесса, с помощью которой была разработана система управления процессом лазерного термоупрочнения, что позволило обеспечить температуру процесса 1300...1350 °С. Установлено увеличение твердости обработанных изделий до 65...70 HRC (вместо 38...42 HRC при объемной закалке), глубина упроченного слоя составила 0,25-0,30 мм. Данные характеристики обеспечивают увеличение срока службы упрочненных изделий 2-3 раза.

2 Исследование процесса лазерной закалки

Как уже упоминалось, лазерная закалка – вид поверхностной термической обработки, придающей поверхностным слоям материала высокую твердость, дисперсность структуры, уменьшение коэффициента трения. Процесс лазерной закалки заключается в нагреве поверхности лазерным излучением до сверхкритических температур, с последующим охлаждением теплоотводом во внутренние слои металла. В общем случае, чем выше скорости обработки, тем выше значения получаемой микротвердости, так как повышаются скорости охлаждения, влияющие на твердость и микротвердость материала. Однако, данное правило справедливо лишь до определенной скорости обработки, выше которой поверхность материала не успевает нагреться до температур, обеспечивающих фазовые превращения в твердом состоянии.

Исследования проводились на установках, оснащенных двумя типами лазерных источников: газового CO_2 и оптоволоконного иттербиевого, мощность которых составила 1 кВт. Управляемыми технологическими параметрами в случае обработки газовым лазером являлись: диаметр лазерного луча и скорость его перемещения относительно обрабатываемой поверхности. В случае обработки волоконным лазером технологическими параметрами являлись скорость перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности, а также ширина и высота дорожки сканирования лазерного луча.

В ходе исследований измерялись геометрические параметры пятна светимости при лазерной обработке в режиме реального времени, а также количество фотонов по всему спектру за 1 мс, которое впоследствии преобразовывалось в графики изменения спектральной яркости в процессе обработки с установлением смещения графика d_y относительно оси ординат. Данное смещение использовалось при вычислении значения температуры в зоне обработки.

Измеряемыми физико-механическими свойствами, которые характеризуют процесс закалки, являются микротвердость закаленного слоя и глубина закаленного слоя.

2.1 Исследование параметров процесса закалки газовым лазером

Режимы закалки образцов из стали 45 газовым CO₂-лазером приведены в таблице 2

Таблица 2 – Режимы лазерной закалки CO₂-лазером

Диаметр лазерного луча, мм	Скорость обработки, мм/мин	Плотность мощности излучения, Вт/мм ²	Удельная энергия, Дж/мм ²
2	500	318,5	1,00
	1000		0,50
	1500		0,33
3	500	141,4	0,67
	1000		0,33
	1500		0,22
4	500	79,6	0,50
	1000		0,25
	1500		0,17

Зависимость средней температуры, полученной в результате измерений и вычислений от скорости лазерной обработки при различных диаметрах лазерного луча приведена на рисунке 9.

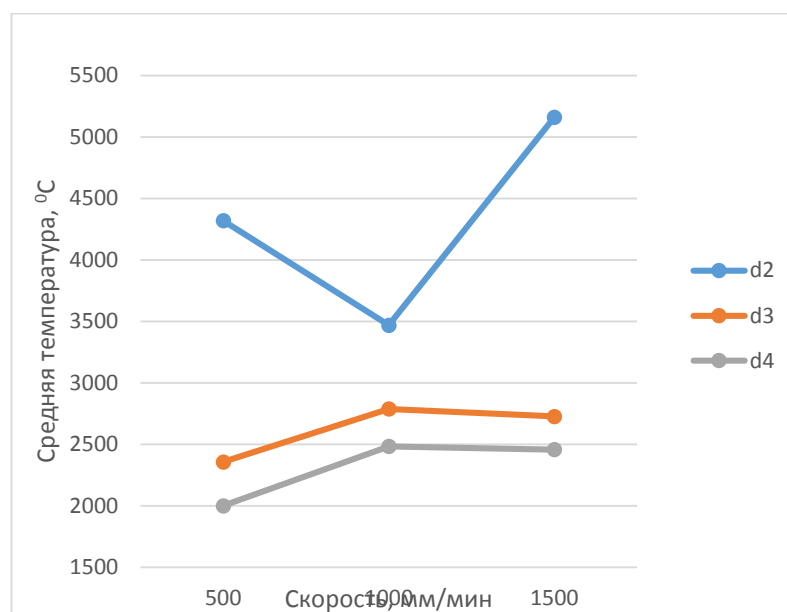


Рисунок 9 – Средняя температура в зоне обработки

Приведенные графики иллюстрируют, что на средний уровень температур для всех скоростей обработки влияет диаметр лазерного луча, определяющий плотность мощности лазерного излучения на единицу поверхности: чем меньше диаметр, и, соответственно, выше плотность мощности, тем выше средний уровень температур в зоне обработки. Графики температур при диаметрах лазерного луча, равных 3 мм и 4 мм имеют сходный характер: при повышении скорости от 500 до 1000 мм/мин наблюдается рост средней температуры на 16-20% (для диаметров луча 3 и 4 мм соответственно) с последующим сохранением уровня температуры при повышении скорости до 1500 мм/мин. График температуры при диаметре луча равном 2 мм демонстрирует значительное понижение средней температуры при значении скорости обработки 1000 мм/мин.

Зависимость смещения графиков спектральной яркости d_y при разных диаметрах лазерного луча от скорости обработки приведено на рисунке 10.

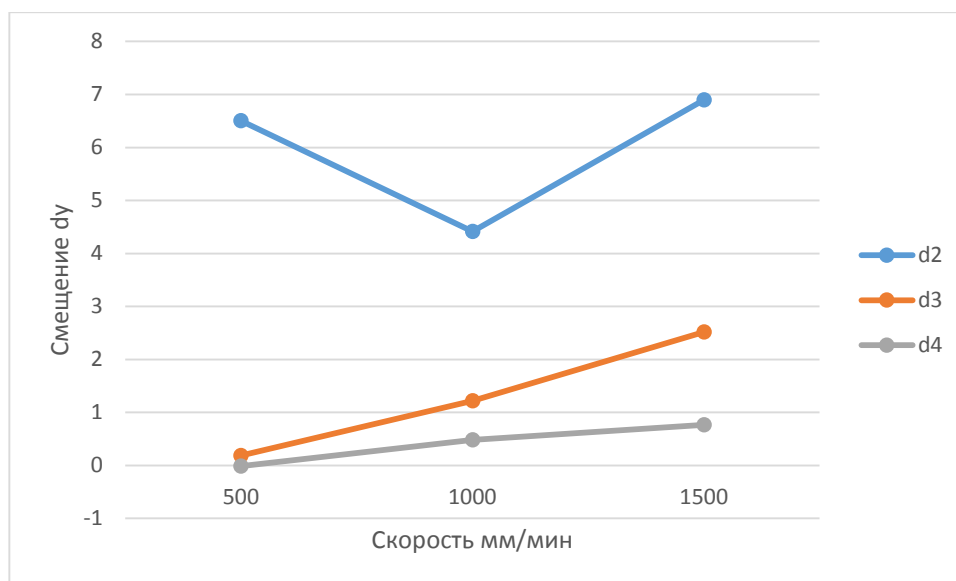


Рисунок 10 – Смещение спектральной яркости d_y

Так как смещение d_y связано с вычисленной средней температурой, графики зависимости демонстрируют сходный характер, с падением значения d_y при диаметре лазерного луча 2 мм и скорости обработки 1000 мм/мин; и восходящим характером графиков при диаметрах лазерного луча 3 мм и 4 мм. Зависимости уровня средних значений d_y от диаметра лазерного луча также сохраняются.

Что касается зависимостей физико-механических свойств от технологических параметров, они демонстрируют классический характер изменения. Зависимость средней микротвердости поверхности, полученной в результате закалки газовым лазером от скорости обработки и диаметра лазерного луча представлены на рисунке 11.

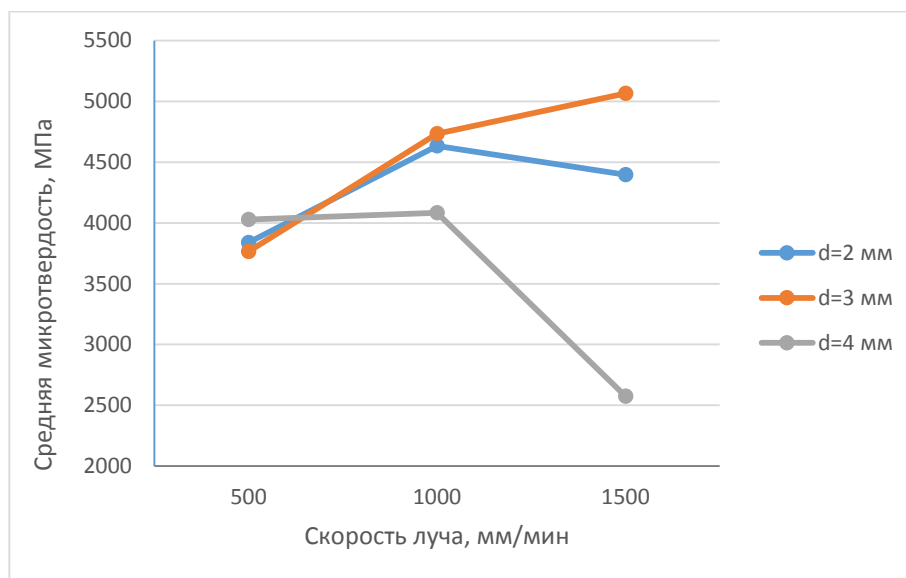


Рисунок 11 – Средняя микротвердость закаленной газовым лазером поверхности стали 45

Как видно из графиков, при диаметре лазерного луча равном 2 и 3 мм наблюдается возрастание средней микротвердости при увеличении скорости обработки, что объясняется увеличением скорости охлаждения под закалку, определяющей уровень твердости, при сохранении достаточной плотности мощности для разогрева поверхности. При диаметре лазерного луча 4 мм тенденции к возрастанию микротвердости при увеличении скорости не наблюдается, а при скорости обработки равной 1500 мм/мин упрочнение материала вообще отсутствует, что говорит о недостаточной плотности мощности лазерного излучения при данном диаметре луча. Можно сделать вывод, что для осуществления процесса закалки газовым лазером, удельная энергия лазерного излучения, для обеспечения повышения микротвердости закаленной поверхности стали 45, должна составлять не менее 0,25-1,00 Дж/мм².

Одни из главных показателей эффективности процесса лазерной закалки является глубина упрочненного слоя. Для закалки стали 45 газовым лазером зависимость глубины упрочнения от скорости обработки и диаметра лазерного луча представлена на рисунке 12.

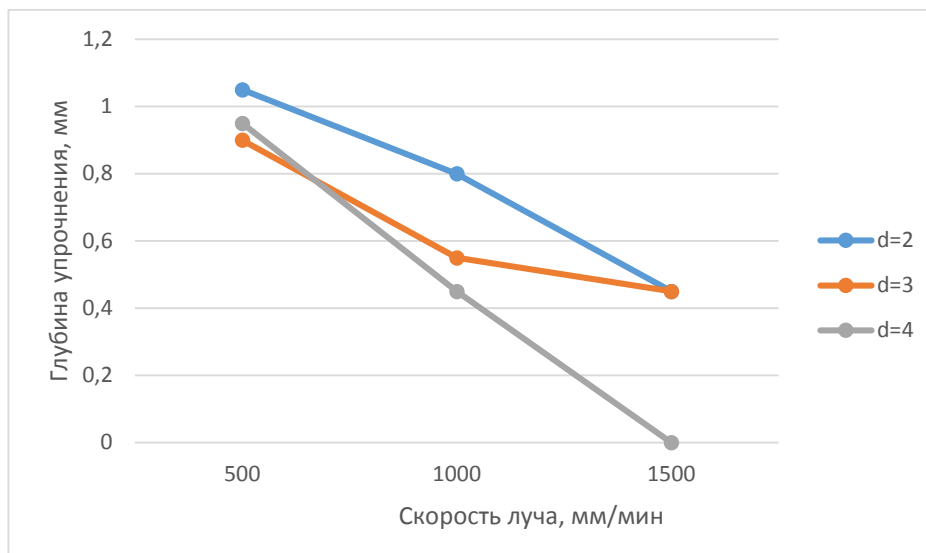
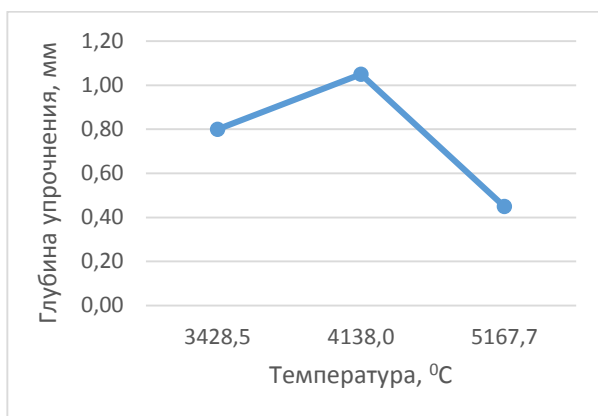


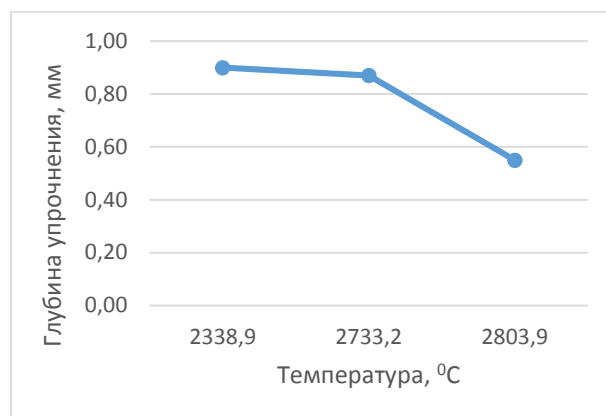
Рисунок 12 – Глубина упрочнения при закалке газовым лазером

Глубина упрочнения обратно пропорциональна диаметру лазерного луча, определяющему удельную энергию, попадающую на обрабатываемую поверхность: чем меньше диаметр луча, тем больше глубина упрочнения. При увеличении скорости обработки, глубина упрочнения уменьшается на 24-57% при диаметре луча 2 мм; на 39-50% при диаметре луча 3 мм и на 50% вплоть до нуля (зона упрочнения отсутствует) при диаметре 4 мм.

Зависимость глубины упрочненного слоя от измеренной температуры пятна представлена на рисунке 13.



а



б

а – диаметр луча 2 мм; б – диаметр луча 3 мм

Рисунок 13 – Глубина упрочненного слоя при лазерной закалке газовым лазером

Представленные графики зависимостей демонстрируют классический характер: при повышении температуры в зоне обработки до определенного уровня наблюдается либо увеличение глубины закаленного слоя, либо сохранение его примерно на том же уровне (при диаметрах луча 2 и 3 мм соответственно); при дальнейшей повышении температур наблюдается падение уровня глубины, связанное с усилением процесса теплоотвода во внутренние слои металла. При этом средний уровень температур в зоне обработки при диаметре луча 2 мм превышает данный параметр при диаметре 3 мм, так как плотность мощности в первом случае значительно выше.

Зависимость средней микротвердости упрочненного слоя от измеренной температуры пятна представлена на рисунке 14.

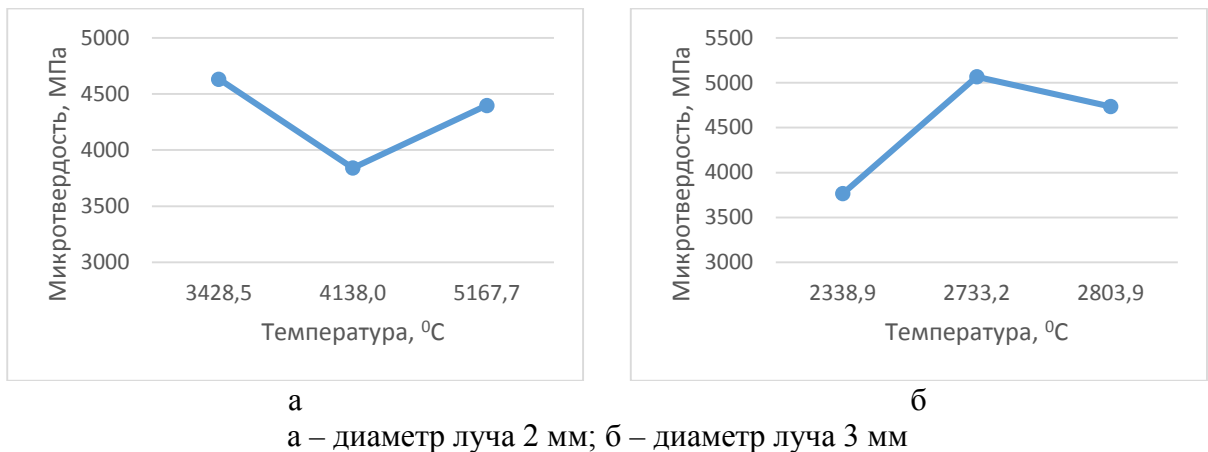


Рисунок 14 – Микротвердость упрочненного слоя при лазерной закалке газовым лазером

Данные графики демонстрируют изменение средней микротвердости закаленных слоев в зависимости от изменения температур: при диаметре лазерного луча равном 2 мм, и повышенной плотности мощности лазерного излучения, наблюдается вначале понижение средней микротвердости, а затем ее повышение с ростом температур. Данные эффекты связаны с недостаточным теплоотводом на начальном этапе, вызывающем образование крупнозернистой микроструктуры материала вследствие перегрева, обладающей меньшей микротвердостью; а с увеличением теплоотвода во

внутренние слои, образуется структура с меньшим зерном, обладающая более высокой микротвердостью.

2.2 Исследование параметров процесса закалки волоконным лазером

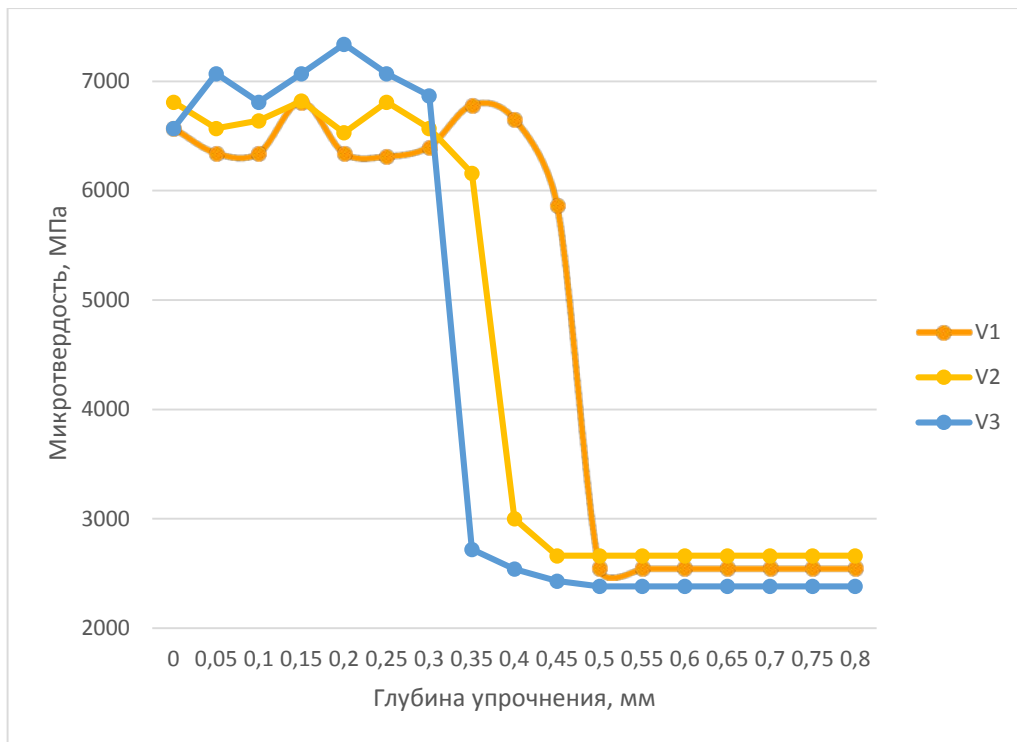
Закалка с использованием в качестве источника лазерного излучения волоконного лазера осуществлялась посредством сканирования лазерного луча в направлении, перпендикулярном траектории обработки. Обработка со сканированием производится для увеличения производительности, путем расширения дорожки лазерной обработки до 10 мм без потерь плотности мощности. Режимы лазерной закалки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы лазерной закалки волоконным лазером

Мощность, Вт	Частота сканирования, Гц	Скорость обработки, мм/мин	Высота пятна сканирования, мм	Ширина дорожки обработки, мм
1	200	550 - 1200	0,2	6,0

Пределы скоростей выбраны исходя из критериев наличия микротвердости закаленного слоя и минимального дефектного слоя на поверхности материала: при скорости обработки менее 550 мм/мин происходит сильный переплав поверхности, при котором значительно увеличивается глубина дефектного слоя, который впоследствии подлежит удалению механической обработкой; при повышении скоростей свыше 1200 мм/мин в поверхностном слое материала отсутствует упрочнение из-за недостаточного нагрева.

Распределение микротвердости упрочненных лазером слоев по глубине в зависимости от скорости лазерной обработки представлено на рисунке 15.



V1=550 мм/мин; V2 = 800 мм/мин; V3=1000 мм/мин
 Рисунок 15 – Микротвердость стали 45 после закалки волоконным лазером

Графики распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя демонстрируют зависимость значений микротвердости от скорости обработки. С повышением скорости обработки, возрастает микротвердость обработанного слоя, также наблюдается резкое падение значений микротвердости при переходе из зоны термического влияния в основной материал. Зависимости средней микротвердости упрочненного слоя и глубины упрочнения от скорости лазерной обработки представлены на рисунке 16.

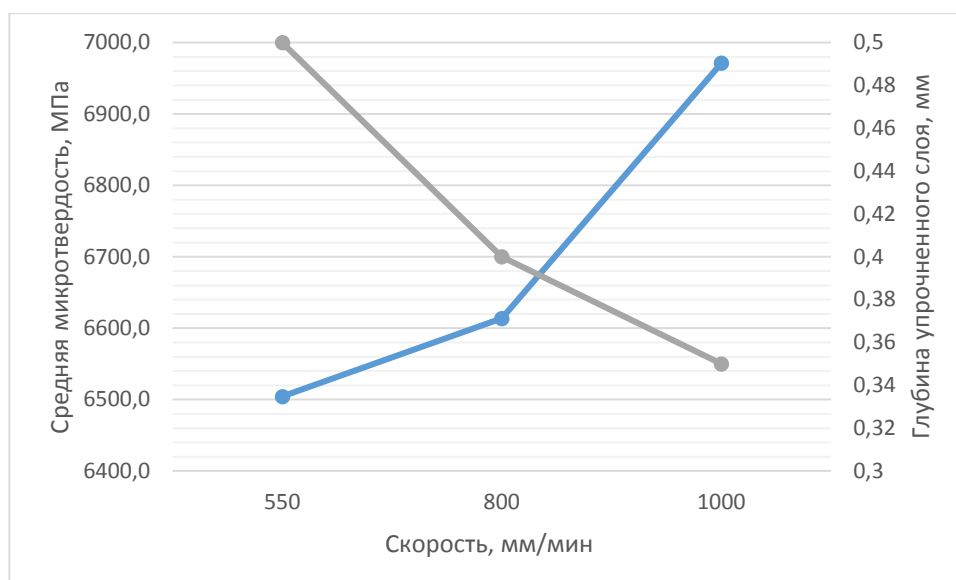


Рисунок 16 – Зависимость микротвердости и глубины упрочненного слоя от скорости обработки волоконным лазером

Из графиков видно, что с повышением скорости лазерной обработки от 550 до 1000 мм/мин, наблюдается увеличение значений средней микротвердости закаленного слоя на 5,1-6,7%, связанное с возрастанием скорости охлаждения обработанного слоя посредством теплоотвода во внутренние слои металла, вследствие которого формируется мелкозернистая мартенситная структура, обладающая повышенной микротвердостью. При этом, влияние повышения скорости обработки на глубину упрочненного слоя носит обратный характер: с повышением скорости глубина закаленного слоя уменьшается на 20-30%, вследствие уменьшения удельной энергии лазерного излучения, воздействующего на обрабатываемую поверхность.

График зависимости измеренной средней температуры пятна лазерного излучения при ширине дорожки лазерной обработки равной 6 мм и частоте сканирования равной 200 Гц от скорости лазерной обработки представлен на рисунке 17.

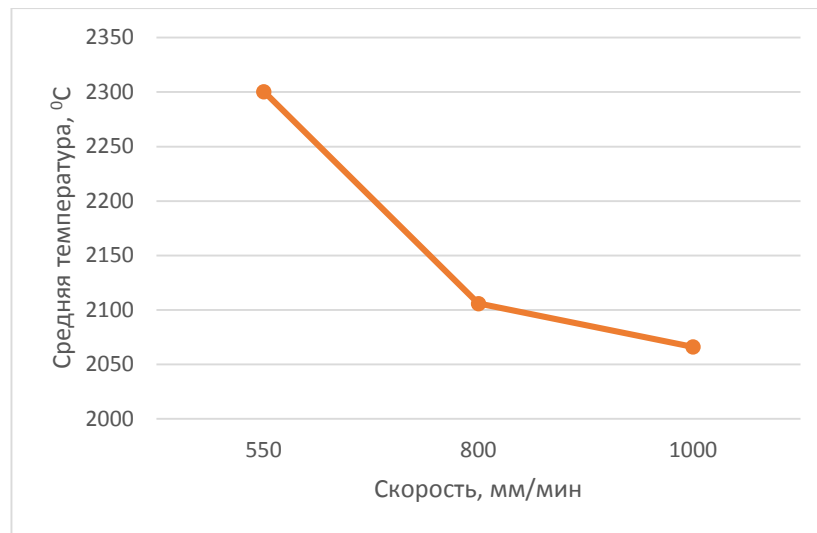


Рисунок 17 – Зависимость средней температуры в зоне лазерной обработки от скорости обработки

Представленная на графике зависимость демонстрирует классический характер, представляющий собою падение средней температуры в зоне обработки, с увеличением скорости лазерной обработки, которое объясняется уменьшением энерговклада в обрабатываемую поверхность. Падение температуры при повышении скорости обработки от 550 до 800 мм/мин и до 1000 мм/мин составляет 8,5-10,2% соответственно.

График зависимости глубины упрочненного лазерной закалкой слоя от измеренной средней температуры пятна лазерного излучения при описанных выше параметрах обработки представлен на рисунке 18.

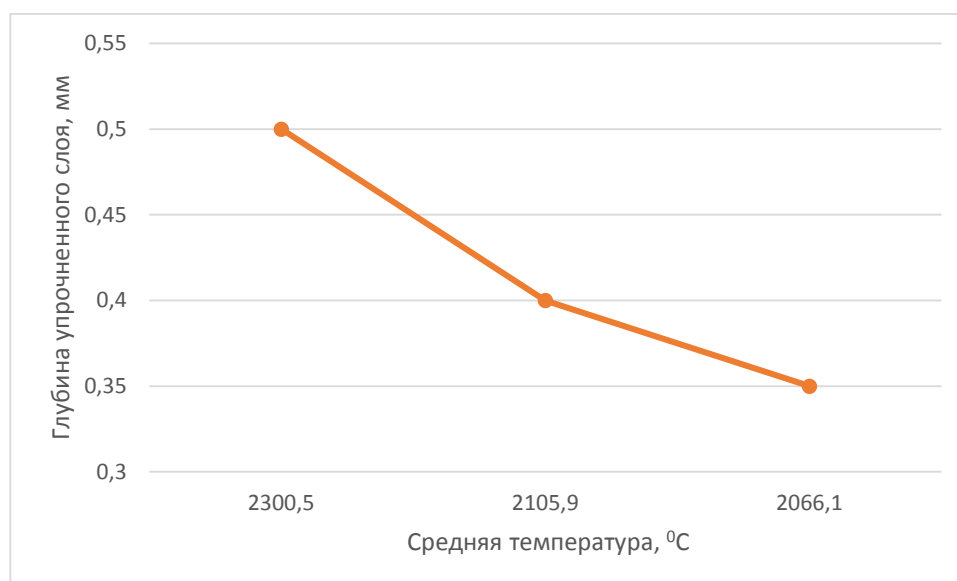


Рисунок 18 – Зависимость глубины упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения

Из представленной на графике зависимости видно, что с уменьшением температуры в зоне пятна лазерного излучения происходит уменьшение глубины упрочненного слоя, также объясняемое уменьшением энерговклада лазерного излучения в обрабатываемую поверхность; падение закалочной глубины составляет 20-30%.

На рисунке 19 представлена зависимость средней микротвердости упрочненного слоя от средней измеренной температуры пятна лазерного излучения, полученной в ходе измерений.

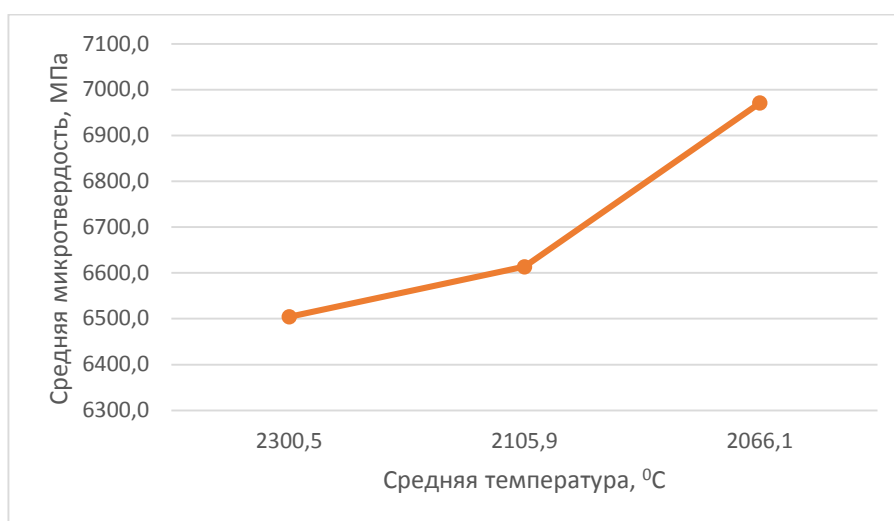


Рисунок 19 – Зависимость средней микротвердости упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения

Данная зависимость демонстрирует возрастание средней микротвердости закаленной поверхности с возрастанием температуры в зоне контакта лазерного излучения с обрабатываемым материалом; данный эффект связан с увеличением скорости охлаждения разогретого материала, определяющей микротвердость закалочных структур, из-за ускорения теплоотвода во внутренние слои металла, который обуславливает измельчение структуры металла и повышение его микротвердости.

3 Исследование процесса лазерного легирования

В главе 1 упоминалось, что лазерное легирование – это модифицирование поверхностного слоя металла легирующими элементами для придания ему специальных свойств, посредством одновременного плавления непрерывным или импульсным лазерным излучением. В проведенных исследованиях, в качестве элементов для лазерного легирования использовались бор, а также и смесь равных частей бора и хрома. Легирование бором производилось для повышения микротвердости и износостойкости стали 45; легирование смесью бора и хрома производилось для повышения микротвердости, износо- и коррозионной стойкости стали 45.

Лазерное легирование производилось посредством обмазок на основе смеси воды и клея БФ-6; с плавлением поверхности материала основы, для обеспечения перемешивания его с легирующими компонентами и для образования эвтектик. Также, как и в случае лазерной закалки, исследования производились на установках, оснащенных двумя типами источников постоянного лазерного излучения: газового CO₂-лазера и оптоволоконного иттербиевого, мощностью 1 кВт.

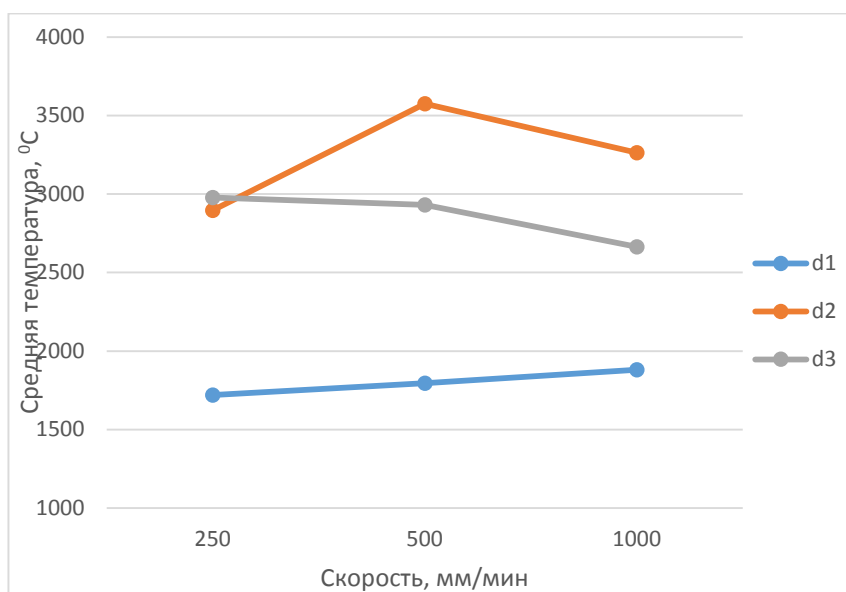
3.1 Исследование параметров процесса лазерного легирования газовым лазером

Режимы легирования образцов из стали 45 газовым CO₂-лазером для обмазок бором и смесью бора и хрома приведены в таблице 4:

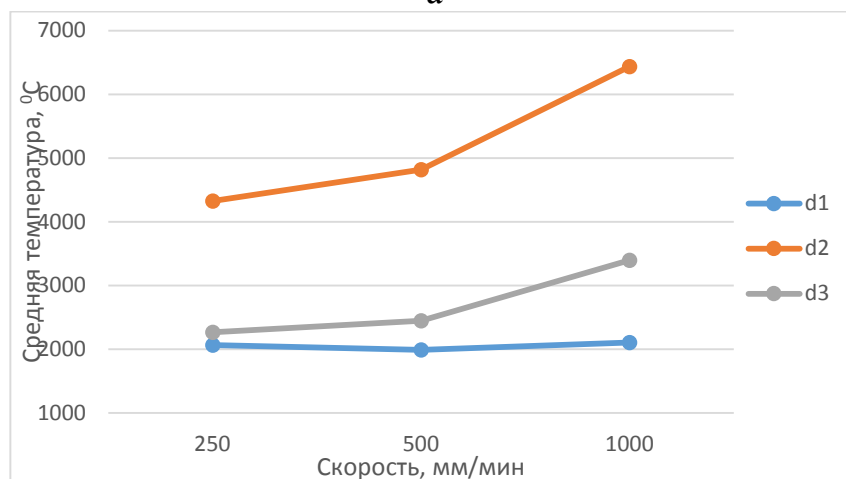
Таблица 4 – Режимы лазерного легирования CO₂-лазером

Диаметр лазерного луча, мм	Скорость обработки, мм/мин	Плотность мощности излучения, Вт/мм ²	Удельная энергия, Дж/мм ²
1	250	1273,9	4,00
	500		2,00
	1000		1,00
2	250	318,5	2,00
	500		1,00
	1000		0,50
3	250	141,4	1,33
	500		0,67
	1000		0,33

Зависимость средней температуры, полученной в результате измерений и вычислений от скорости лазерной обработки при различных диаметрах лазерного луча при легировании приведена на рисунке 20.



а



б

а – лазерное легирование бором; б – лазерное легирование бор + хром
d1=1 мм; d2=2 мм; d3=3 мм

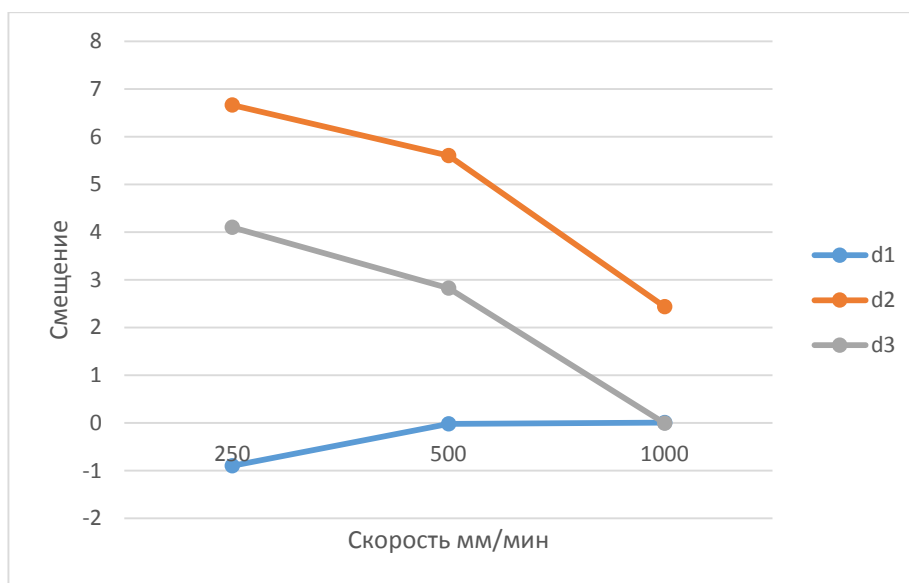
Рисунок 20 – Средняя температура в зоне обработки

Из графиков на рисунке 20а видно, что при легировании бором с использованием газового лазера, температура в зоне обработки сильно зависит от диаметра лазерного луча: самый низкий уровень средних температур наблюдается при наименьшем диаметре луча, равном 1 мм; при диаметре луча 2 мм уровень средних температур наиболее высок, при 3 мм уровень температур средний. Также, изменения температур от скорости носят

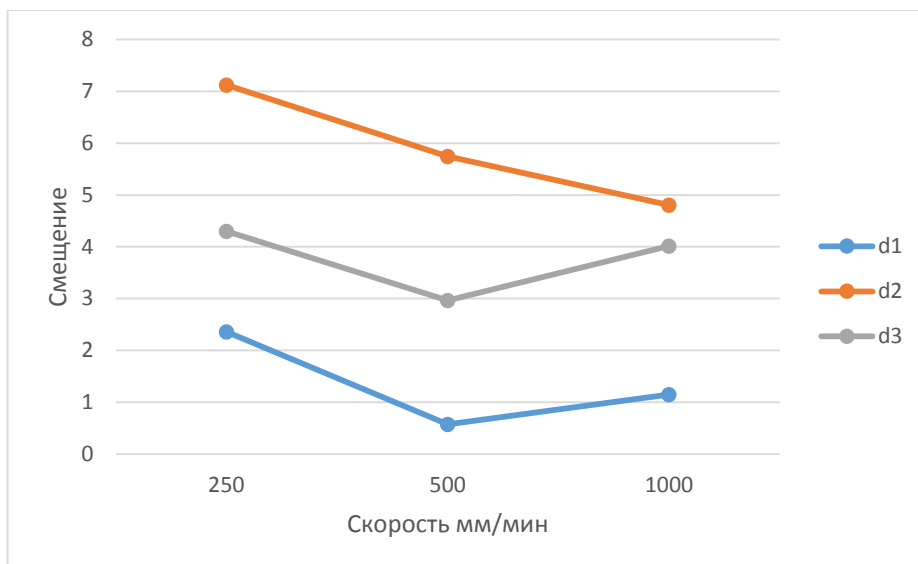
довольно случайный характер, демонстрирующий как повышение, так и понижение температур в зависимости от изменений скорости. Данные эффекты объясняются тем, что легирование бором повышает легкоплавкость поверхности стали 45, а также усиливает раскисление расплава.

Графики на рисунке 20б демонстрируют зависимость средней температуры от скорости для легирования смесью бора и хрома. При этом, как и в случае легирования чистым бором, наблюдается зависимость уровня температуры в зоне обработки не только от скорости обработки, но и от диаметра лазерного луча: при диаметре равном 1 мм уровень температур наименьший, при 2 мм – наибольший. Также в этом случае наблюдается рост температур в ванне расплава при повышении скоростей обработки для всех исследуемых диаметров лазерного луча.

Зависимость смещения графиков спектральной яркости d_y при разных диаметрах лазерного луча от скорости обработки приведено на рисунке 21.



а



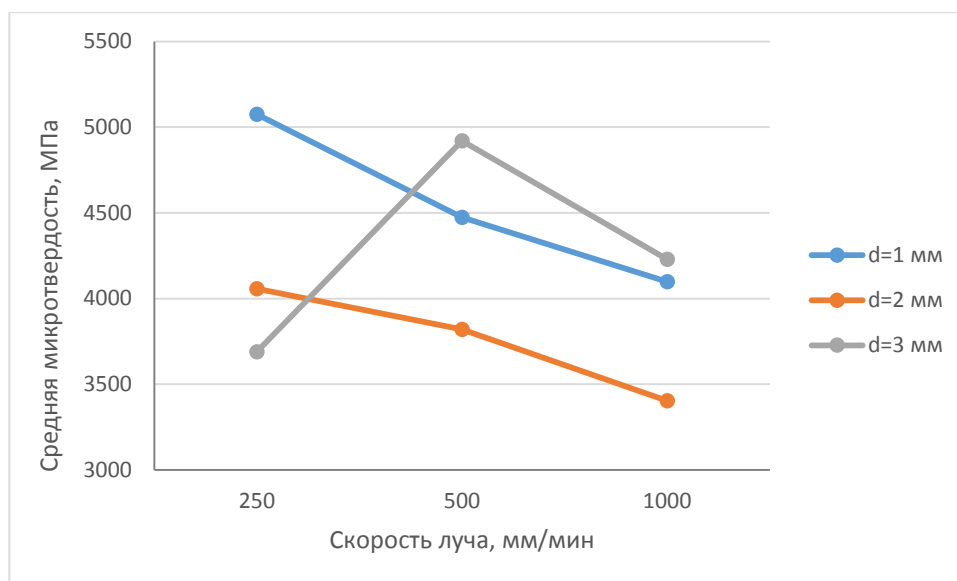
б

а – лазерное легирование бором; б – лазерное легирование бор + хром

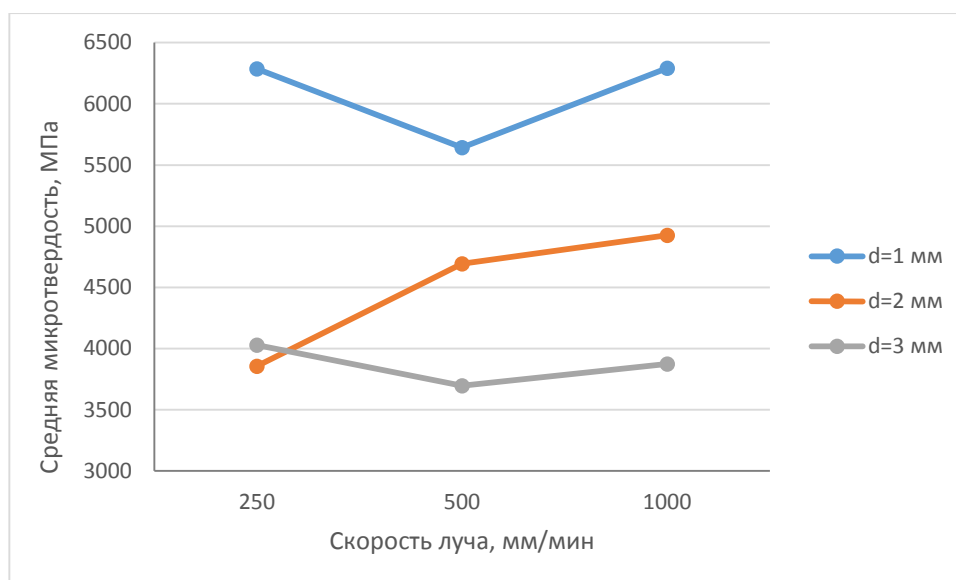
Рисунок 21 – Смещение спектральной яркости d_y

Величина смещения спектральной яркости d_y связана с измеренной средней температурой ванны расплава при лазерном легировании, что объясняет сходный характер графиков d_y с графиками температуры, как для случая легирования бором, так и для легирования смесью бор + хром.

Зависимость средней микротвердости поверхности, полученной в результате легирования поверхности стали 45 с помощью газового лазера от скорости обработки и диаметра лазерного луча представлены на рисунке 22.



а



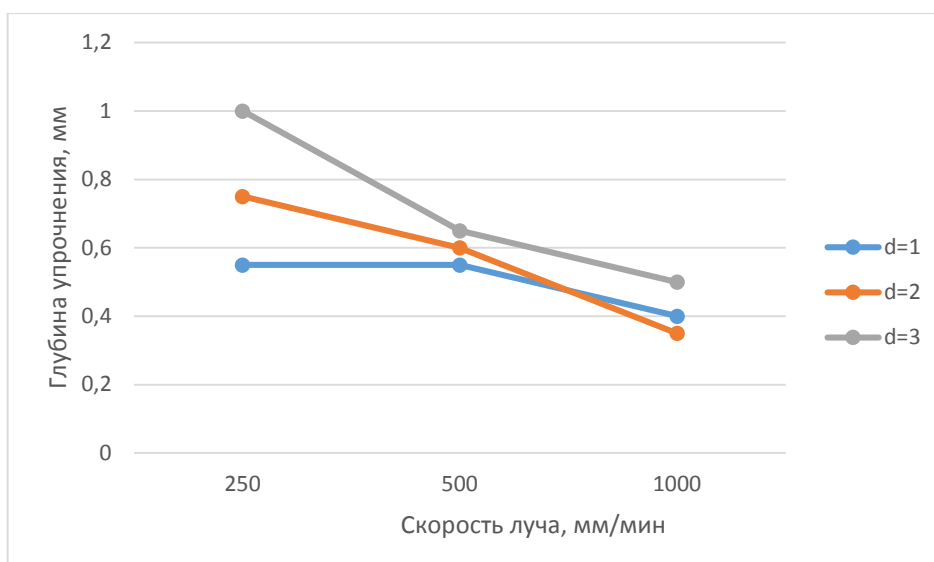
б

а – лазерное легирование бором; б – лазерное легирование бор + хром

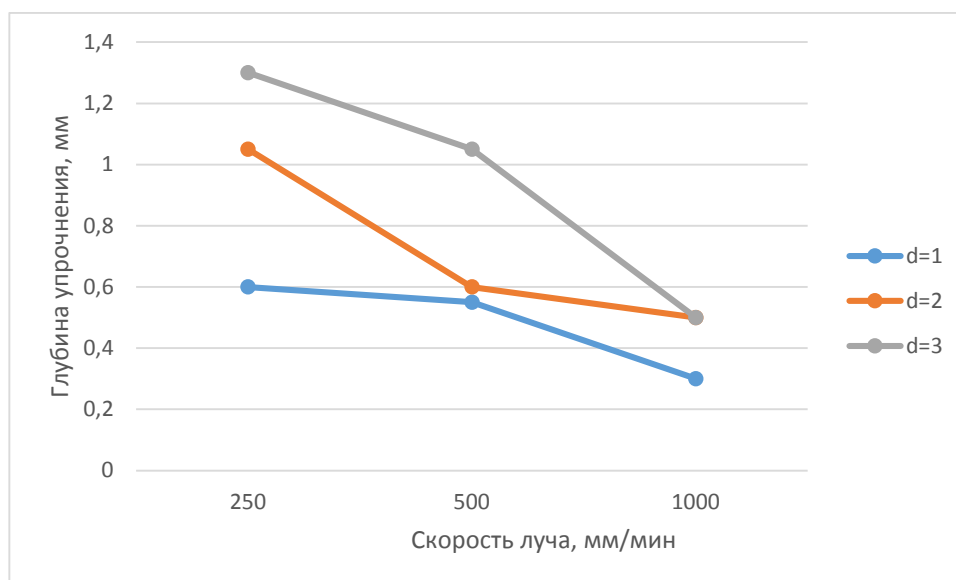
Рисунок 22 – Средняя микротвердость при легировании с помощью газового лазер поверхности стали 45

Микротвердость легированных слоев при легировании бором и диаметрах луча 1 мм и 2 мм демонстрирует уменьшение с повышением скорости обработки; при диаметре луча равном 3 мм микротвердость вначале возрастает, затем падает. При легировании смесью бор + хром микротвердость демонстрирует случайный характер зависимости от скорости обработки и диаметров лазерного луча; уровень средних температур при диаметре луча 1 мм выше, чем при диаметрах 2 и 3 мм. Данные эффекты связаны со сложными процессами расплава-кристаллизации обрабатываемого материала, а также образованием в структуре обработанного металла сложных точечных эвтектик с мелкодисперсными высокотвердыми включениями фаз FeB и Fe₂B.

Зависимость глубины упрочнения от скорости обработки и диаметра лазерного луча при легировании стали 45 газовым лазером представлена на рисунке 23.



а



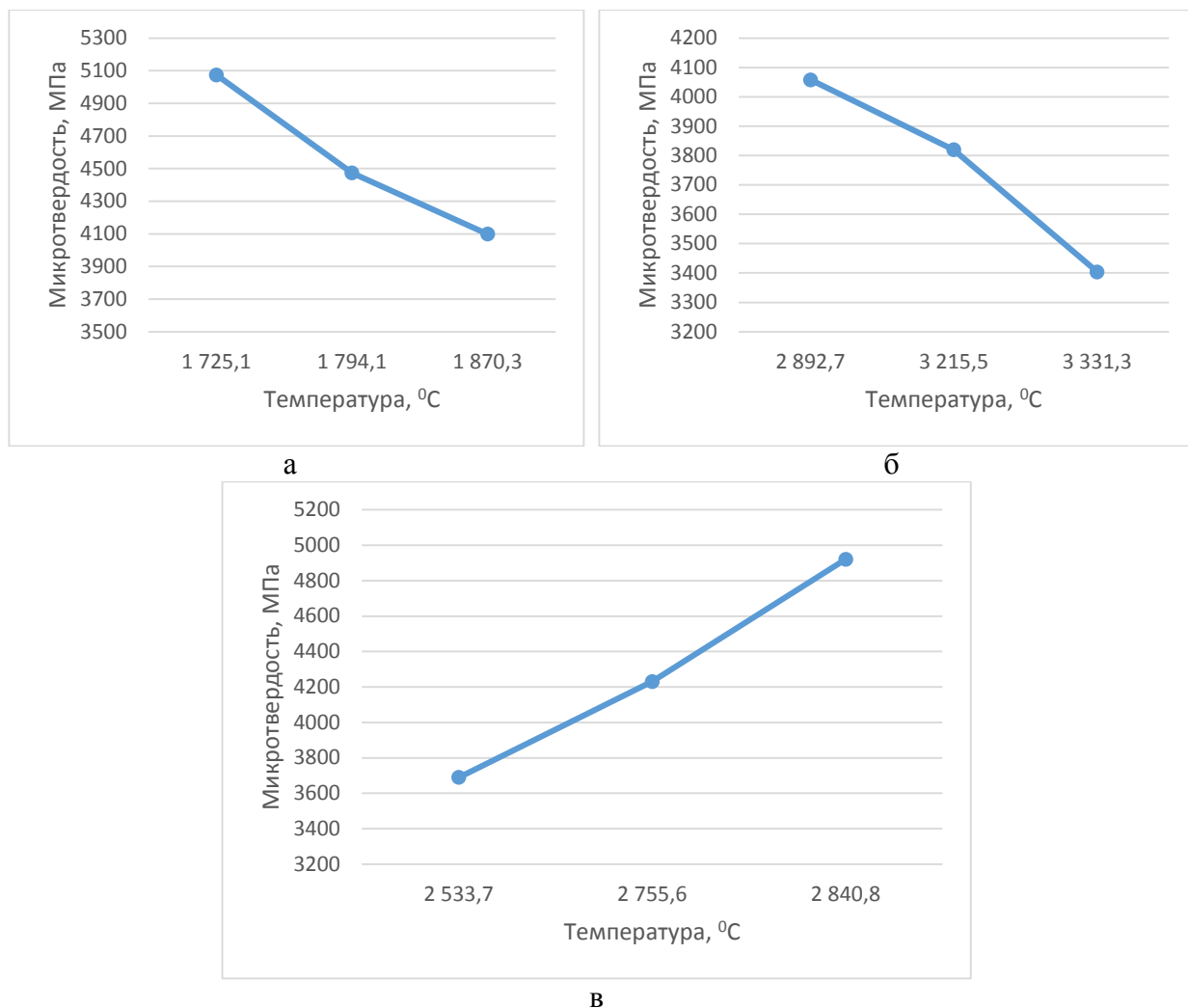
а

а – лазерное легирование бором; б – лазерное легирование бор + хром
 Рисунок 23 – Глубина упрочненного слоя при легировании газовым лазером

При легировании поверхности чистым бором, глубина упрочненного слоя обратно пропорциональна скорости обработки и прямо пропорционально увеличению диаметра лазерного луча и; из-за падения удельной энергии лазерного излучения, вкладываемого в обрабатываемую поверхность. Уменьшение глубины упрочнения составляет 27-53% при увеличении диаметра луча от 1 до 3 мм. При легировании поверхности стали смесью бора и хрома, сохраняется установленная в случае легирования бором тенденция зависимости увеличения среднего уровня глубины упрочнения от увеличения

диаметра лазерного луча и уменьшения глубины упрочнения с увеличением скорости обработки; уменьшение глубины составляет 50% при диаметре луча 1 мм и 61,5% при диаметре луча 3 мм.

Зависимость микротвердости упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения для различных диаметров лазерного луча при легировании бором с использованием газового лазера представлена на рисунке 24.



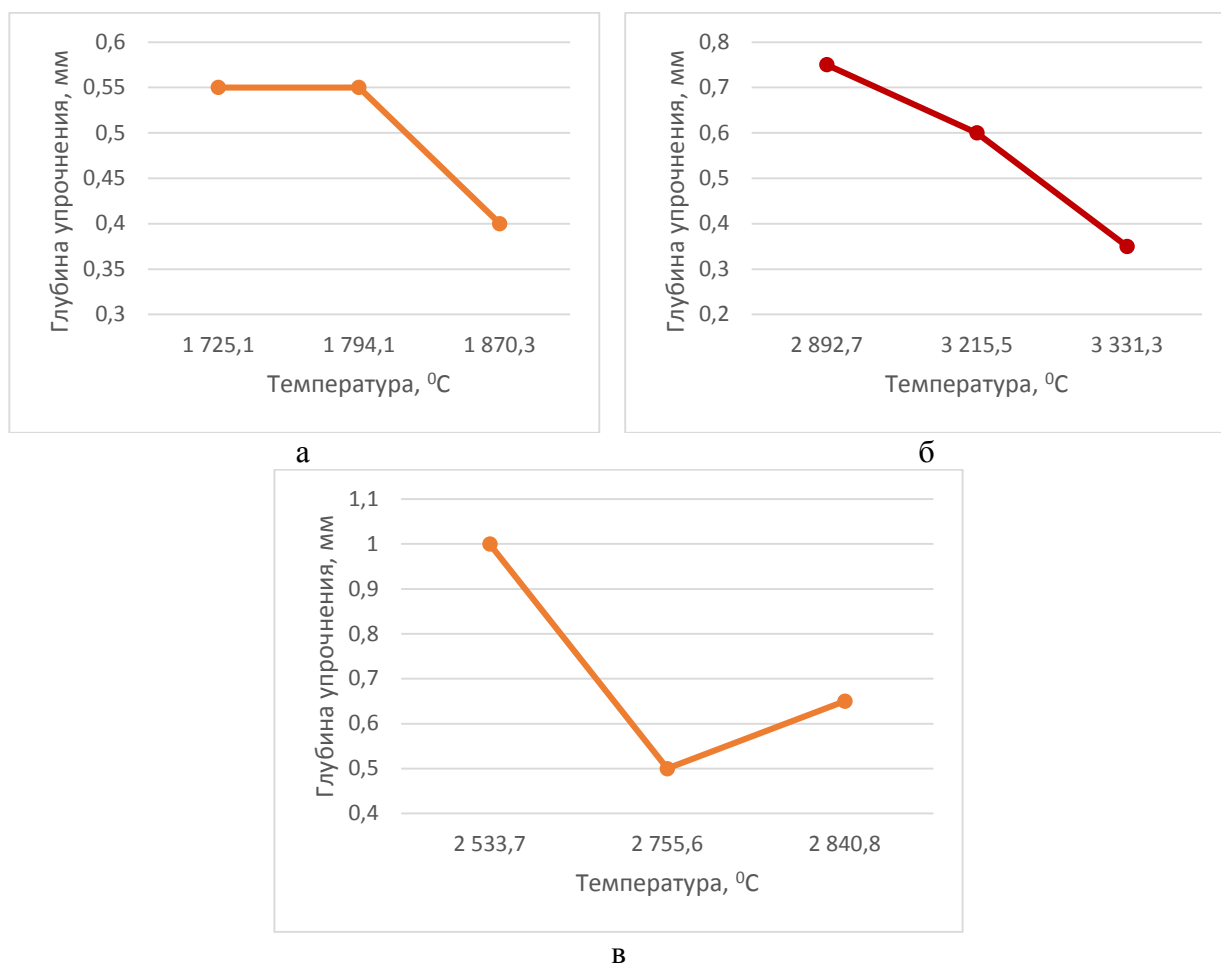
а – диаметр луча $d=1$ мм; б – $d=2$ мм; в – $d=3$ мм

Рисунок 24 – Зависимость микротвердости от температуры при легировании бором

Для диаметров лазерного луча, равных 1 и 2 мм наблюдается падение микротвердости легированных слоев с увеличением температуры в ванне расплава; для диаметра луча 3 мм, микротвердость увеличивается с ростом

температуры. Данные эффекты связаны с описанным выше явлением образования сложных эвтектик при кристаллизации ванны расплава.

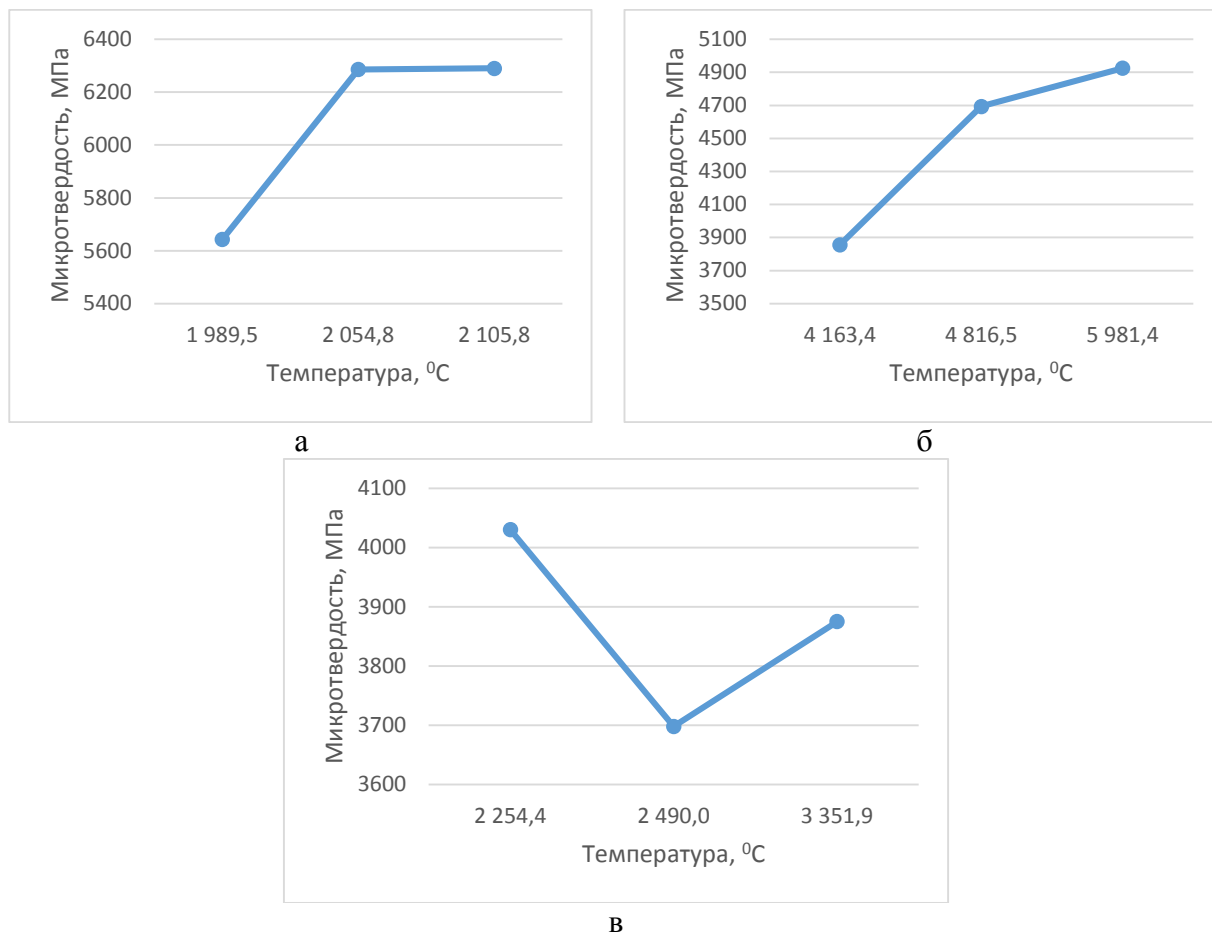
Зависимость глубины упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения для различных диаметров лазерного луча при легировании бором с использованием газового лазера представлена на рисунке 25.



а – диаметр луча $d=1$ мм; б – $d=2$ мм; в – $d=3$ мм
Рисунок 25 – Зависимость глубины упрочненного слоя от температуры при легировании бором

Глубина упрочненного слоя демонстрирует тенденцию к уменьшению, с увеличением температуры ванны расплава, что говорит, скорее всего, о том, что при повышении температур выше оптимальных, начинает изменяться ширина ванны расплава, без достаточного воздействия на нижележащие слои металла.

Зависимость микротвердости упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения для различных диаметров лазерного луча при легировании смесью бора и хрома с использованием газового лазера представлена на рисунке 26.

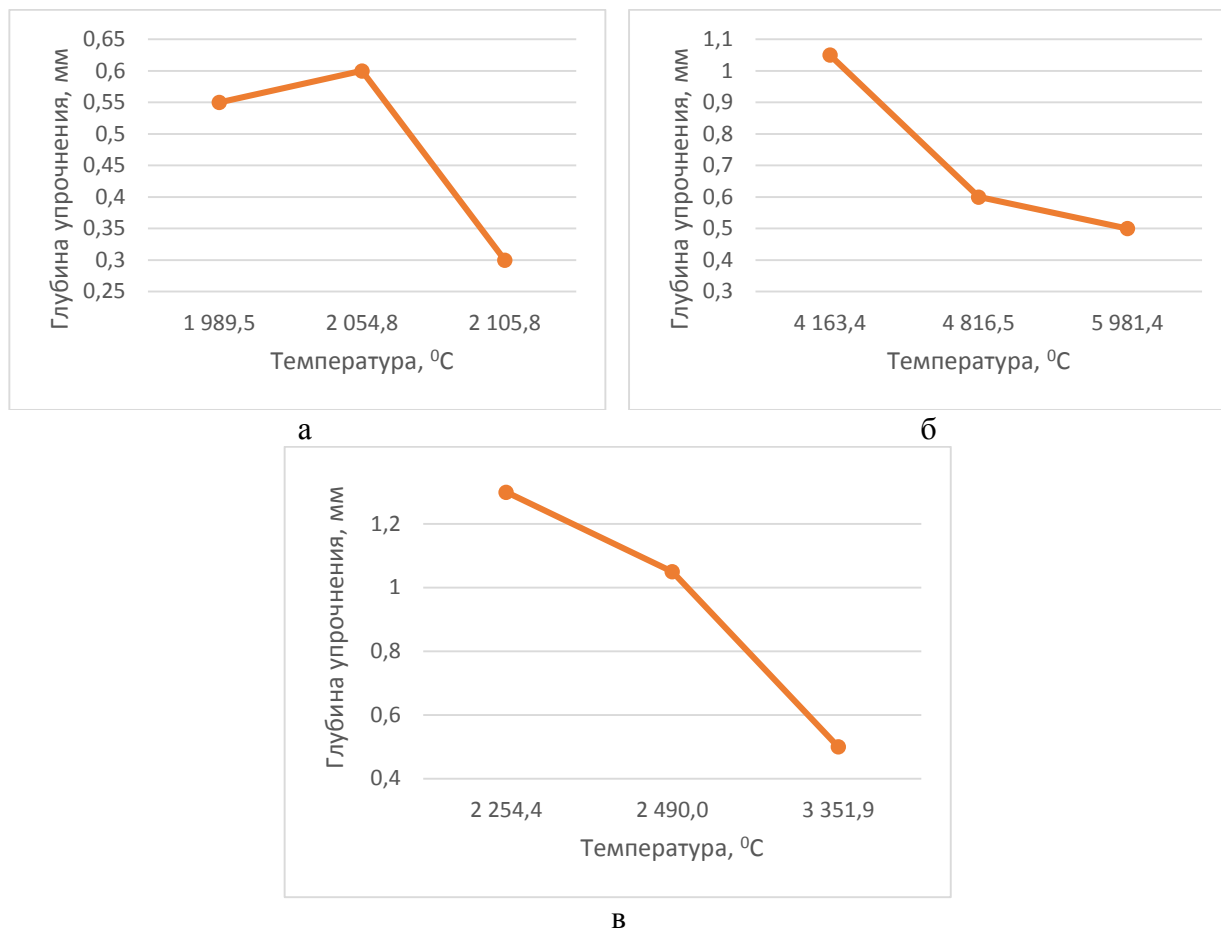


а – диаметр луча $d=1$ мм; б – $d=2$ мм; в – $d=3$ мм

Рисунок 26 – Зависимость микротвердости от температуры при легировании бором и хромом

Также, как и в случае легирования бором, при легировании смесью бор + хром наблюдается различие характера зависимости микротвердости легированных слоев от температуры для разных диаметров лазерного луча: для диаметров 1 и 2 мм наблюдается увеличение микротвердости с увеличением температуры, связанное с образованием точечной эвтектики и более высокотвердой фазы FeB; для диаметра луча равного 3 мм, микротвердость падает с увеличением температуры, что может быть связано с недостаточной удельной энергией лазерной обработки для образования высокотемпературных упрочняющих фаз.

Зависимость глубины упрочненного слоя от температуры пятна лазерного излучения для различных диаметров лазерного луча при легировании смесью бора и хрома с использованием газового лазера представлена на рисунке 27.



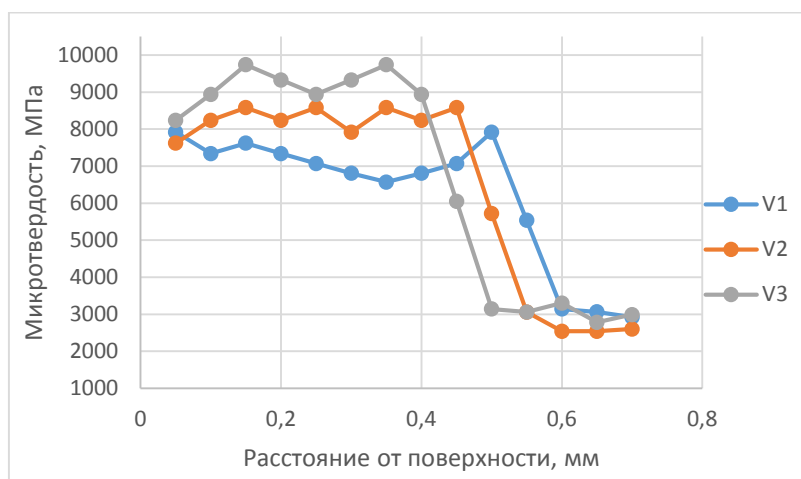
а – диаметр луча $d=1$ мм; б – $d=2$ мм; в – $d=3$ мм
 Рисунок 27 – Зависимость глубины упрочненного слоя от температуры при легировании бором и хромом

При совместном легировании смесью бора и хрома, как и в случае легирования чистым бором, глубина упрочненного слоя уменьшается с увеличением температуры ванны расплава, что указывает на увеличение ширины ванны расплава.

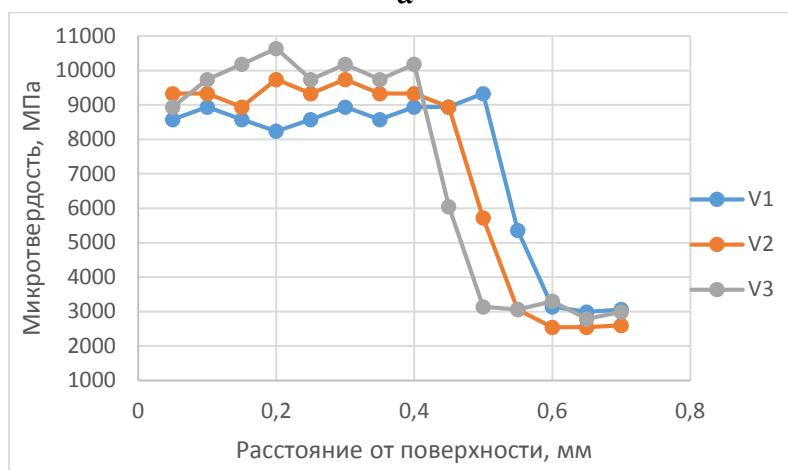
3.2 Исследование параметров процесса лазерного легирования волоконным лазером

Режимы лазерного легирования с использованием волоконного лазера аналогичны режимам закалки на данном лазере и представлены в таблице 3. Лазерное легирование предполагает плавление поверхности материала совместно с обмазкой легирующими элементами, для образования эвтектик в поверхностном слое.

Распределение микротвердости легированных слоев по глубине в зависимости от скорости лазерной обработки, в направлении от поверхности к основе представлено на рисунке 28.



а

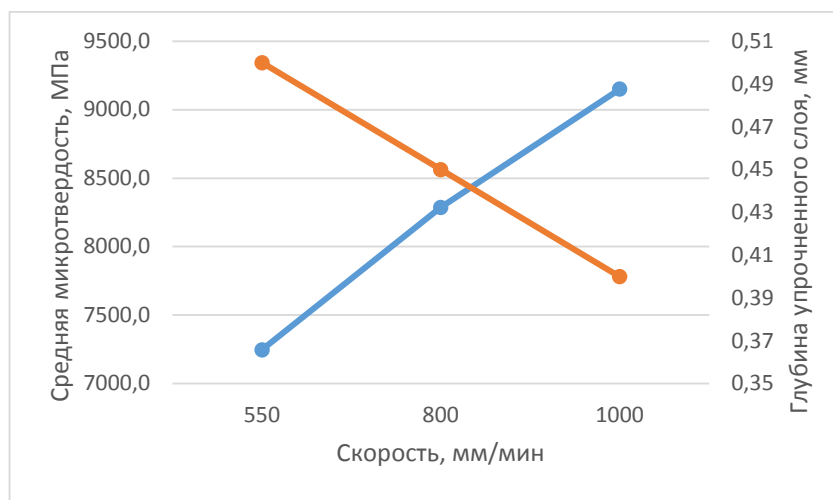


б

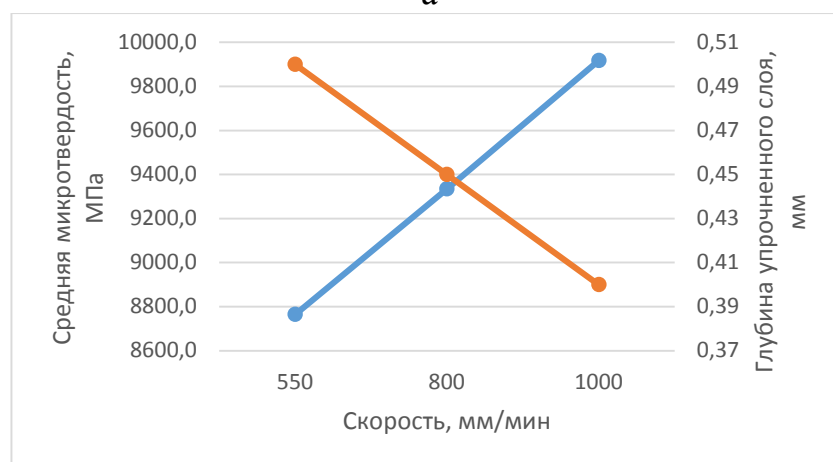
а – легирование бором; б – легирование бором и хромом
V1=550 мм/мин; V2 = 800 мм/мин; V3=1000 мм/мин
Рисунок 28 – Микротвердость стали 45 после легирования с использованием волоконного лазера

Из графиков видно, что повышение скорости обработки вызывает возрастание уровня микротвердости обработанного слоя, как при легировании бором, так и при использовании смеси бора и хрома. Данный эффект при легировании с использованием волоконного лазера сходен с процессами закалки и связан с повышением скорости охлаждения ванны расплава вследствие теплоотвода во внутренние слои металла. При этом формируется более мелкодисперсная структура металла, обладающая повышенной твердостью, по сравнению со структурами, образованными при низших скоростях охлаждения.

Зависимости средней микротвердости легированных слоев и глубины упрочненного слоя от скорости лазерной обработки представлены на рисунке 29.



а



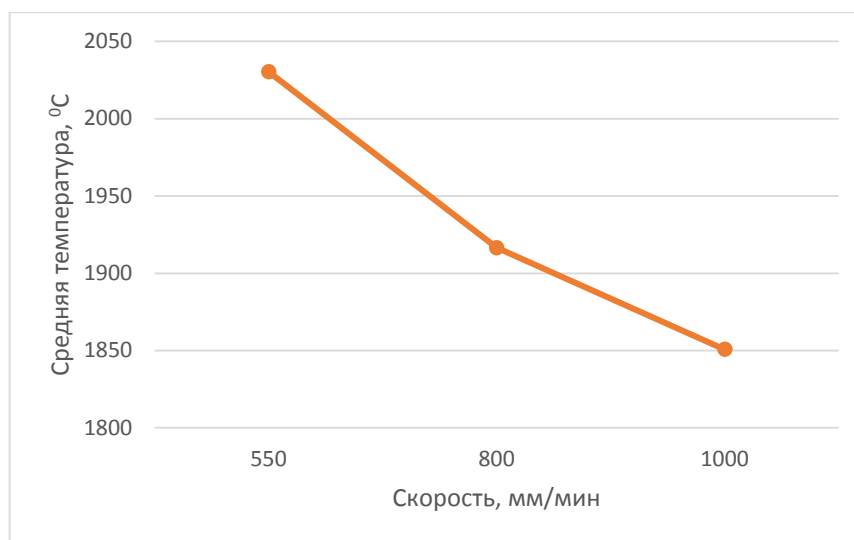
б

а – легирование бором; легирование бором и хромом

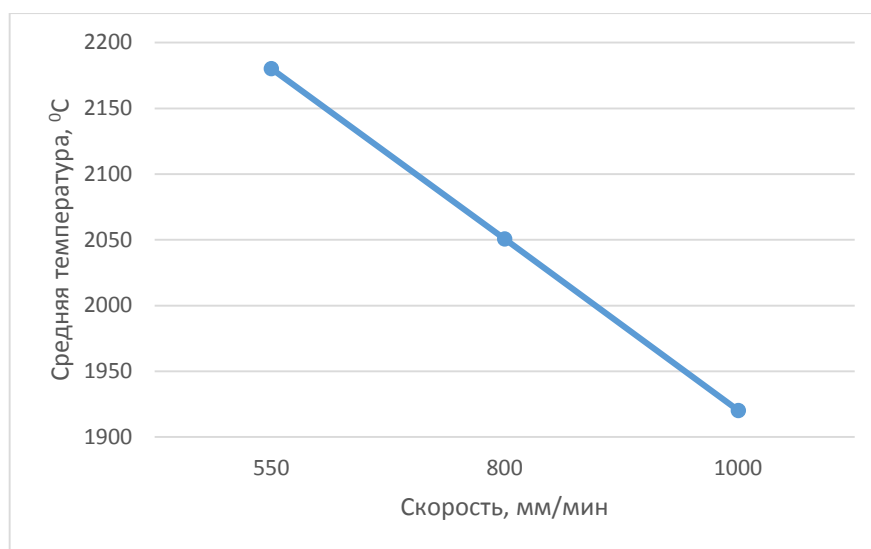
Рисунок 29 – Зависимость микротвердости и глубины легированных слоев от скорости обработки волоконным лазером при легировании бором, и смесью бора и хрома

Из приведенных выше графиков видно, что легирование с использованием волоконного лазера обладает более стабильными характеристиками, что выражается в возрастающих зависимостях микротвердости обработанных слоев от скорости обработки и убывающих зависимостях глубины упрочненного слоя от скорости обработки, как для легирования бором, так и для смеси бор + хром. Возрастание средней микротвердости при увеличении скорости обработки от 550 до 1000 мм/мин для случая легирования бором составило 20,8%; для легирования смесью бор + хром – 11,6%. Глубина упрочненного слоя при аналогичном увеличении скорости в обоих случаях составила 20%.

График зависимости измеренной средней температуры пятна лазерного излучения при ширине дорожки лазерной обработки равной 6 мм и частоте сканирования равной 200 Гц от скорости лазерного легирования представлен на рисунке 30.



а



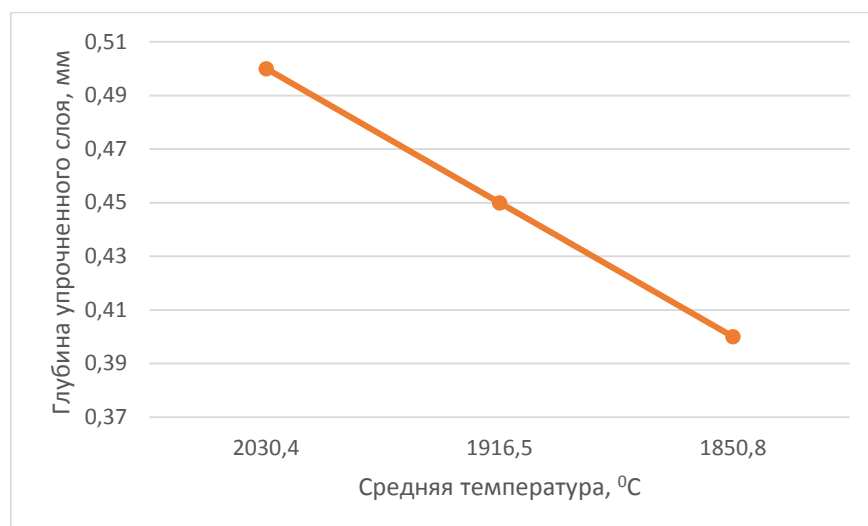
б

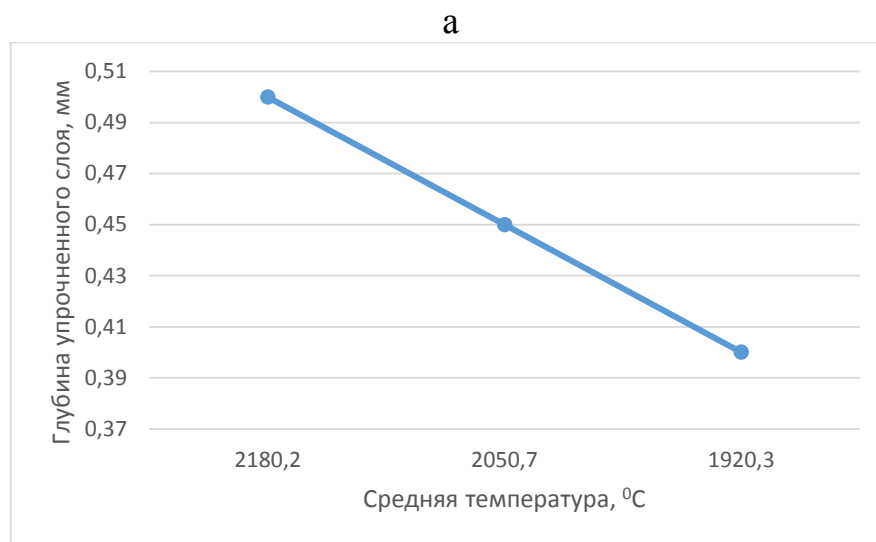
а – легирование бором; легирование бором и хромом

Рисунок 30 – Зависимость средней температуры в зоне лазерного легирования от скорости лазерной обработки

Представленные на графике зависимости температуры от скорости обработки демонстрируют обратную пропорциональность указанных параметров: с увеличением скорости обработки температуры в зоне пятна лазерного излучения падают, как для легирования бором, так и для легирования смесью бор + хром. При легировании бором падение температуры составило 8,8%, при легировании бором и хромом – 11,9% при увеличении скорости обработки от 550 до 1000 мм/мин.

График зависимости глубины упрочненного лазерным легированием слоя от измеренной средней температуры пятна лазерного излучения при описанных выше параметрах обработки представлен на рисунке 31.





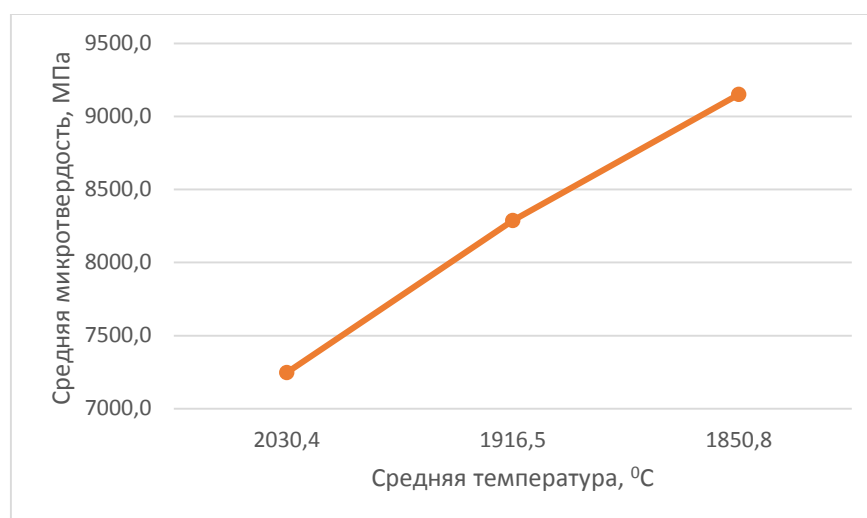
б

а – легирование бором; легирование бором и хромом

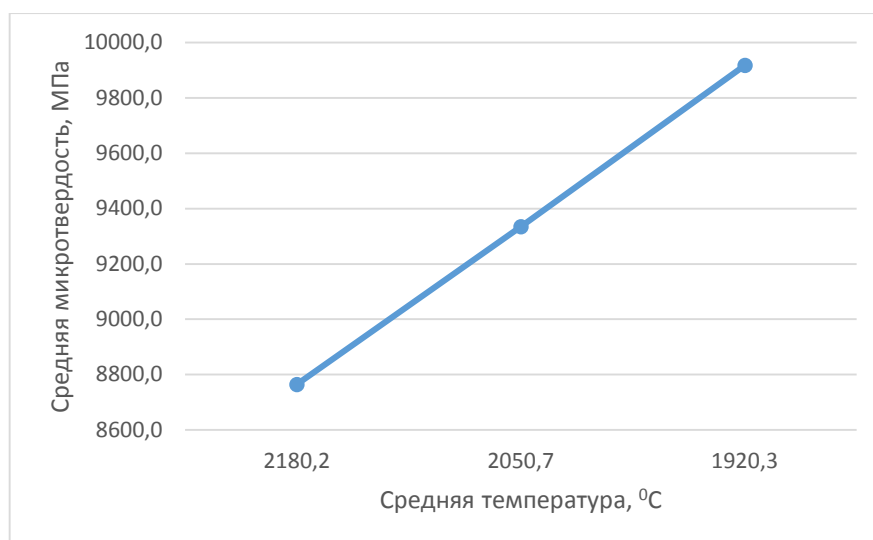
Рисунок 31 – Зависимость глубины легирования слоя от температуры пятна лазерного излучения

Представленные графики демонстрируют уменьшение глубины упрочненного слоя при уменьшении температуры ванны расплава, связанного с энерговыделением в обрабатываемую поверхность; в обоих рассмотренных случаях легирования глубина упрочненного слоя при падении температуры, вследствие меньшего энерговыделения в обрабатываемую поверхность, уменьшается на 20%.

На рисунке 32 представлена зависимость средней микротвердости легированных слоев от средней измеренной температуры пятна лазерного излучения, полученной в ходе измерений.



а



б

а – легирование бором; легирование бором и хромом
 Рисунок 32 – Зависимость средней микротвердости легированных слоев от температуры пятна лазерного излучения

При использовании в качестве легирующих компонентов как чистого бора, так и смеси бора с хромом, наблюдается возрастание уровня микротвердости с уменьшением температуры ванны расплава, что говорит о возрастающих скоростях охлаждения расплава и формировании закалочных структур, обладающих повышенной микротвердостью.

4 Исследование процесса лазерной наплавки

Лазерная порошковая наплавка имеет целый ряд преимуществ перед другими традиционными технологиями наплавки, в частности небольшую зону термического влияния и малую диффузию материала покрытия в основу. Эти преимущества способствуют широкому промышленному применению технологии лазерной наплавки для улучшения сопротивления коррозии и эрозии и увеличения износостойкости как новых деталей, так и деталей, подвергаемых ремонту. Одним из важнейших условий для применения этой технологии в промышленности является ее способность удовлетворять требованиям качества продукции, что приводит к уменьшению брака и увеличению экономической эффективности. Выполнение таких требований неизбежно приводит к необходимости использования методов мониторинга и контроля процесса наплавки в онлайн режиме.

Наиболее важными для лазерной наплавки параметрами, которые позволяют управлять геометрическими размерами валиков, являются мощность лазерного излучения, расход порошка и скорость наплавки. В тоже время средняя температура на поверхности наплавки зависит от различных параметров процесса, которые могут быть измерены одновременно с геометрическими характеристиками наплавки. Но и сама температура влияет на геометрию и свойства наплавляемого материала. Поскольку в настоящее время выполнен минимальный объем исследований температурного сигнала при лазерной наплавке и практически нет систематизированных данных влияния основных технологических параметров на температурный сигнал, было принято решение выполнить исследование средней температуры в зоне наплавки при различных скоростях наплавки, различном расходе порошка и различной мощности лазерного излучения. Одновременно изучались ширина и высота валиков наплавки и микротвердость наплавленного материала, полученные при аналогичных технологических режимах.

Для выполнения исследований использовался лазерный технологический комплекс на основе многомодового иттербиевого лазера

YLR-1000 мощностью 1000 Вт и координатной системы с числовым программным управлением «ПУХ 4.0». Принципиальная схема установки представлена на рисунке 33.

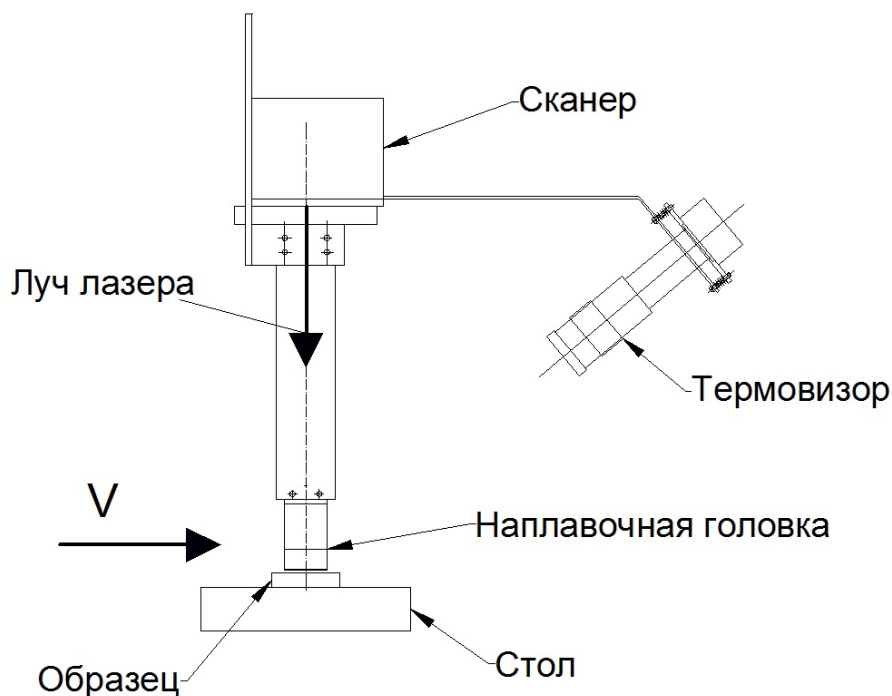


Рисунок 33 – Схема установки для исследований

Образец для наплавки единичных валиков устанавливался на столе комплекса. Наплавочная головка с боковой подачей наплавляемого порошка в виде полосы шириной от 2 до 7 мм вместе со сканером крепилась к подвижному порталу стола. Сканер использовался для формирования пятна лазерного излучения в виде прямоугольника с размерами 4x0,1 мм. Сканирование излучения производилось на наплавляемой поверхности перпендикулярно плоскости рисунка. Портал стола передвигался относительно наплавляемого образца со скоростью наплавки V в направлении, указанном стрелкой. Так как температура в ванне расплава при лазерной наплавке может достигать высоких значений, для измерения средней температуры использовался бесконтактный трехзональный термовизор ИТ-ЗСМ (УП «Унитехпром БГУ»), который позволяет измерять температуру в экстремальных, в том числе промышленных условиях и имеет необходимое

программное обеспечение для онлайн мониторинга. Термовизор оснащался необходимыми светофильтрами для обеспечения чувствительности в диапазоне излучения 400-2600 нм и устанавливался на специальном кронштейне, закрепленном на сканере с возможностью регулировки относительно ванны расплава. Калибровка термовизора осуществлялась в соответствии с абсолютной температурой, значения температуры записывались в градусах Цельсия. Порошок в зону наплавки подавался при помощи дискового порошкового питателя, имевшего регулируемый расход порошка от 2 до 200 г/мин. Контроль расхода порошка осуществлялся методом взвешивания на аналитических весах ВЛА 200г-М. Геометрические размеры валиков наплавки определялись на микрошлифах поперечного сечения при помощи металлографического микроскопа «Микро Р200». Микротвердость наплавленного материала измерялась на поперечных шлифах наплавленных валиков, по глубине валиков из основы в покрытие с шагом 0,05 мм. Для измерения микротвердости использовался микротвердомер ПМТ-3. Для каждого режима наплавки рассчитывалась средняя микротвердость.

В качестве наплавочного материала использовался порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01, имевший грануляцию 20-80 мкм. Состав материала приведен в таблице 5. Единичные валики наносили на образцы из стали 45, имевшие размеры 40x70x8 мм.

Таблица 5 – Состав порошка сплава ПГ-12Н-01

Марка	Содержание компонентов, % (по массе)									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-12Н-01	8-14	1,7-2,5	1,2-3,2	1,2-3,2	0,3-0,6	Основа	-	-	-	-

Для изучения влияния технологических параметров на инфракрасный температурный сигнал, геометрические параметры валиков наплавки и микротвердость наплавленного материала производилась лазерная наплавка единичных валиков из сплава ПГ-12Н-01 на образцы. Для каждого режима наплавлялось пять валиков. Переменными параметрами наплавки являлись скорость наплавки (от 80 мм/мин до 140 мм/мин), мощность лазерного

излучения (от 200 Вт до 1000 Вт) и расход порошка (от 26 г/мин до 36 г/мин). Когда переменным фактором являлась скорость наплавки, мощность излучения составляла 1000 Вт и расход порошка 36 г/мин. Когда переменным фактором являлась мощность излучения, скорость наплавки составляла 100 мм/мин и расход порошка 36 г/мин. Когда переменным фактором являлась подача порошка, мощность излучения составляла 1000 Вт и скорость наплавки 100 мм/мин. Во всех случаях считывался температурный сигнал из зоны наплавки и программно вычислялось его среднее значение.

На рисунках 34-36 показаны результаты, полученные при изменении скорости наплавки.

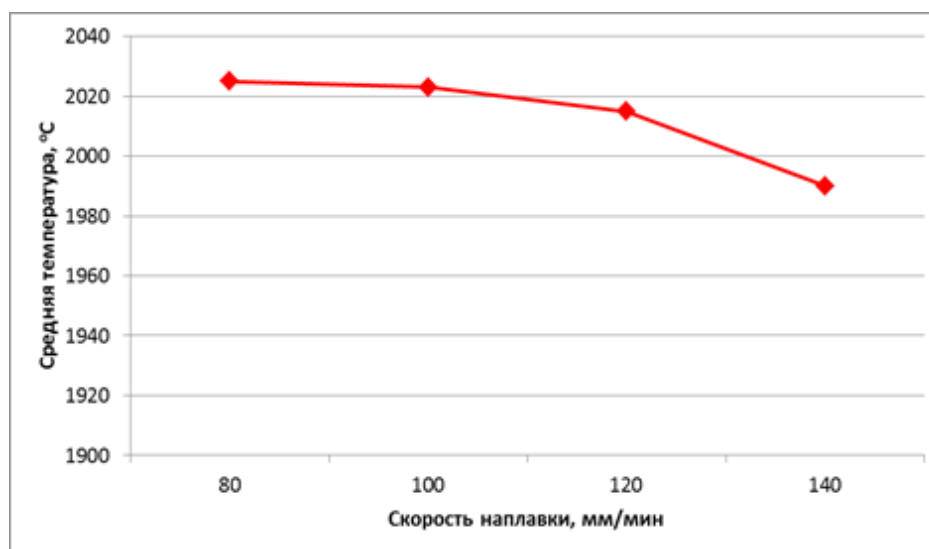


Рисунок 34 – Зависимость средней температуры в ванне расплава от скорости наплавки

На графиках, изображенных на данных рисунках, можно видеть влияние скорости наплавки на среднюю температуру ванны расплава, ширину и высоту валиков наплавки и на среднюю микротвердость по глубине валиков. Из графика на рисунке 34 видно, что средняя температура ванны расплава с увеличением скорости наплавки немного уменьшается. Также заметно уменьшение с увеличением скорости наплавки высоты и ширины валиков (рисунок 35). Средняя микротвердость по глубине валиков наплавки, при увеличении скорости наплавки, вначале не изменяется (до скорости наплавки 100 мм/мин), а затем несколько уменьшается (рисунок 36). Скорее всего, все

происходящие изменения можно объяснить уменьшением отношения мощности излучения к скорости наплавки, при росте последней и уменьшением, в то же время, средней температуры ванны расплава и ее величины.

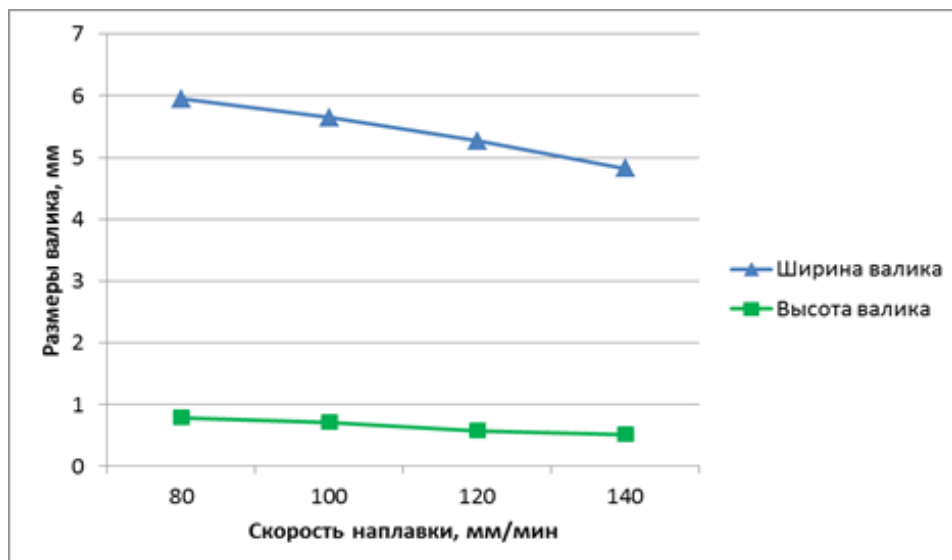


Рисунок 35 – Зависимость геометрических параметров валиков от скорости наплавки

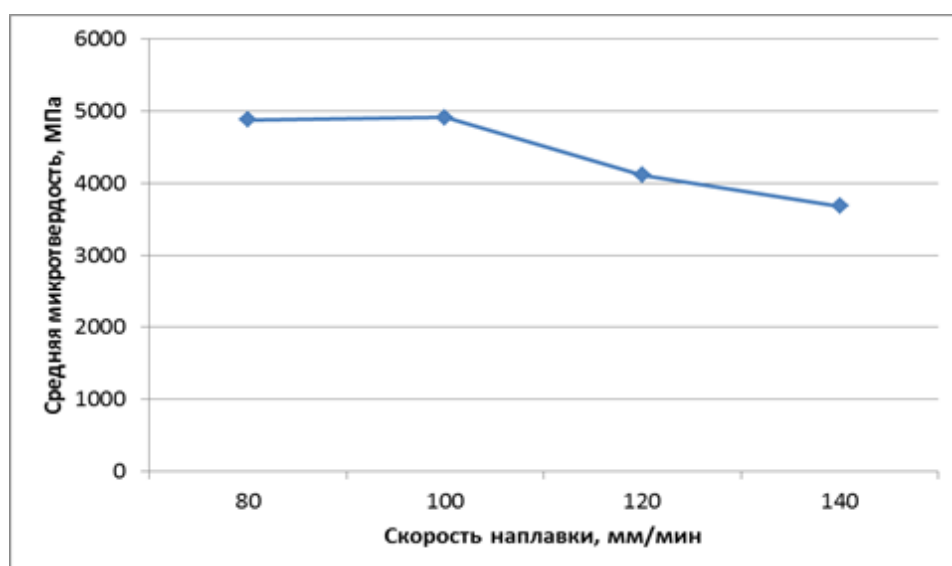


Рисунок 36 – Зависимость средней микротвердости по глубине валиков от скорости наплавки

На рисунках 37-38 показаны результаты, полученные при изменении мощности излучения.

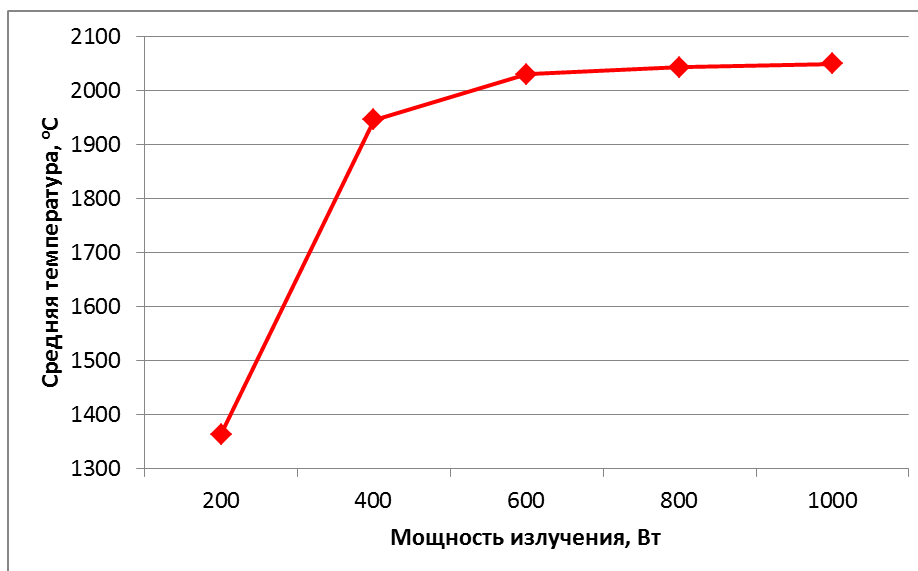


Рисунок 37 – Зависимость средней температуры в ванне расплава от мощности лазерного излучения

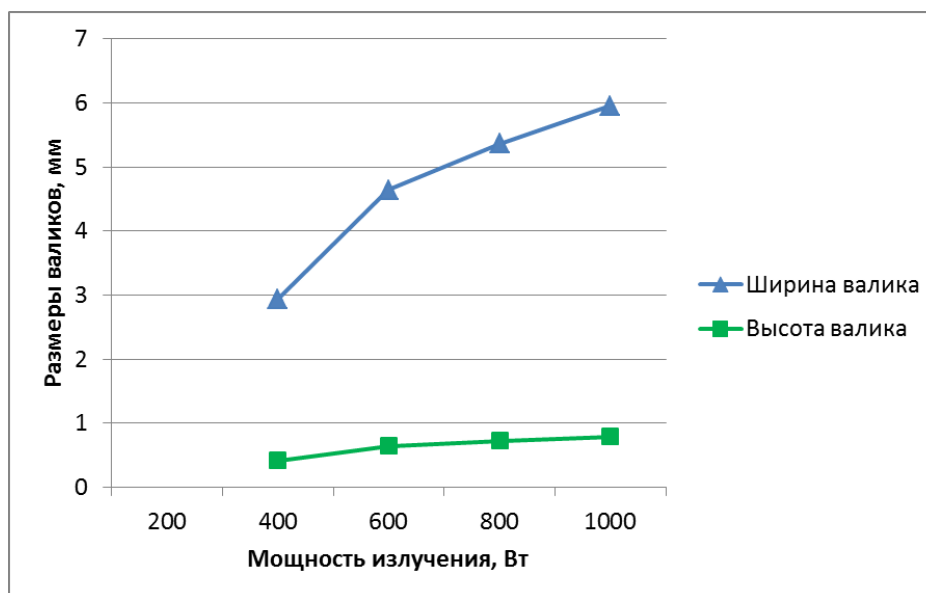


Рисунок 38 – Зависимость геометрических параметров валиков от мощности лазерного излучения

На данных графиках можно видеть влияние мощности излучения на среднюю температуру ванны расплава и геометрические размеры валиков наплавки. Из графика на рисунке 37 видно, что в интервале мощности излучения 200-600 Вт средняя температура ванны расплава растет более интенсивно, чем в интервале мощности излучения 600-1000 Вт. На графике на рисунке 38 показано влияние мощности лазерного излучения на ширину и высоту поперечного сечения валиков наплавки. На графике наблюдается явная зависимость как ширины валиков, так и их высоты от мощности излучения.

Обе кривые имеют сходство с кривой средней температуры в ванне расплава. Однако, мощность излучения более сильно влияет на ширину валика наплавки, ее влияние на высоту валика менее значительно. Видимо, по краям пятна лазерного излучения не хватает мощности для образования сцепления между частицами порошка и подложкой вследствие особенностей формирования прямоугольного пятна лазерного воздействия сканером. Таким образом, ширина валика оказывается меньше ширины лазерного пятна на поверхности наплавки и ширина валика уменьшается. При мощности 200 Вт покрытие не образовывалось, поскольку мощности лазерного излучения было недостаточно, чтобы расплавить подаваемый порошок.

На рисунках 39-40 показаны результаты, полученные при изменении расхода порошкового материала.

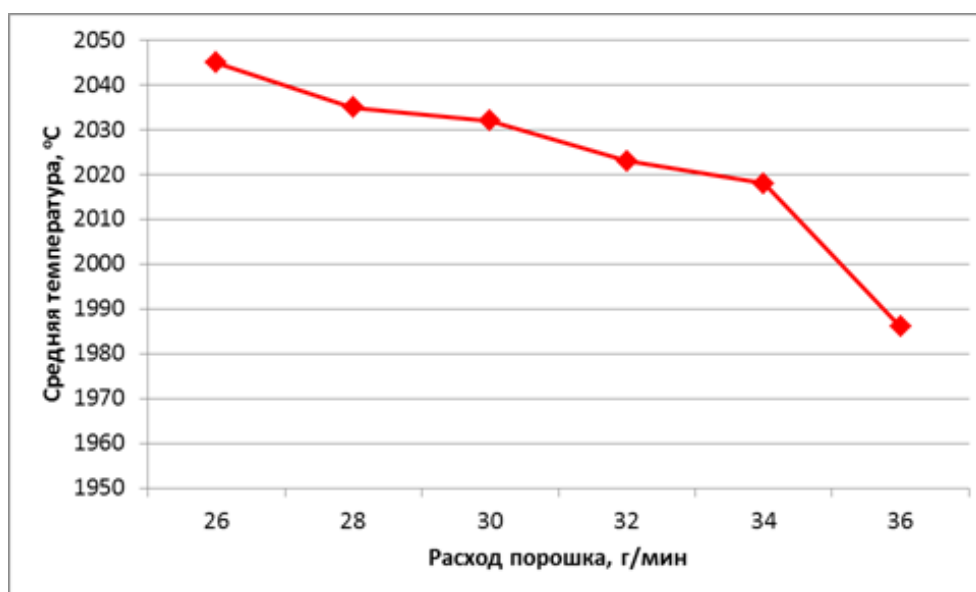


Рисунок 39 – Зависимость средней температуры в ванне расплава от расхода порошка

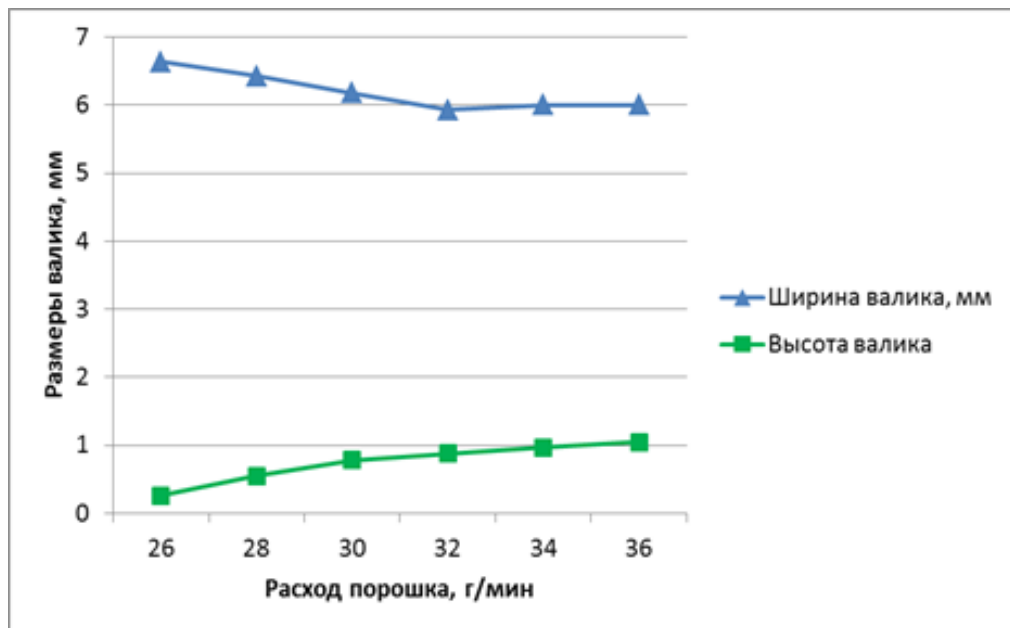


Рисунок 40 – Зависимость геометрических параметров валиков от расхода порошка

На данных графиках показано влияние расхода порошка на среднюю температуру ванны расплава, а также на ширину и высоту валиков наплавки. Из графика на рисунке 39 видно, что средняя температура в ванне расплава мало изменяется в интервале расходов порошка 26-34 г/мин, а затем несколько уменьшается при расходе порошка 36 г/мин. Из графика на рисунке 40 видно, что высота валика при изменении расхода порошка изменяется довольно сильно. Особенно быстро она изменяется при увеличении расхода порошка до 32 г/мин, при дальнейшем увеличении расхода порошка высота валика изменяется незначительно. также из графика на рисунке 40 видно, что ширина валика незначительно уменьшается при увеличении расхода порошка до 32 г/мин, а затем остается почти постоянной. Здесь опять сказывается недостаток мощности излучения по краям прямоугольного пятна излучения, формируемого сканером, когда при увеличении расхода порошка по краям пятна не хватает мощности, чтобы расплавить весь подаваемый порошок.

На основании проведенных исследований можно сказать, что средняя температура ванны расплава достаточно сильно зависит от режимов процесса лазерной наплавки. Регистрируемый температурный сигнал тесно связан с основными параметрами процесса лазерной наплавки. Трехзональный

термовизор ИТ-3СМ можно уверенно рекомендовать для регистрации средней температуры в ванне расплава. Наибольшее влияние на среднюю температуру в ванне расплава оказывает мощность лазерного излучения, так как при увеличении мощности излучения средняя температура в ванне расплава значительно увеличивается. Таким образом, средняя температура в ванне расплава вполне пригодна для мониторинга и управления процессом лазерной наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы «Исследование зависимости геометрических и физико-механических параметров, зоны лазерного воздействия, от спектральных характеристик пятна лазерного нагрева для процессов закалки, сварки, легирования, наплавки» получены следующие результаты:

1. Разработана система регистрации спектральных характеристик пятна лазерного излучения, позволяющая осуществлять корректировку параметров процесса лазерной обработки.

2. Разработана методика оценки температурных полей в процессе лазерной обработки, с учетом специфики процессов лазерной обработки: изменения коэффициента отражения при плавлении и испарении обрабатываемого материала; наличия парогазового канала при резке и сварке, гидродинамических явлений в ванне расплава, наличия плазменного факела и т. д.

3. Спроектирована и изготовлена технологическая оснастка для крепления регистрирующих приборов на координатных системах лазерных станков и обеспечения ее перемещения в соответствии с зоной обработки.

4. Установлено, что для осуществления процесса закалки газовым лазером, удельная энергия лазерного излучения, для обеспечения повышения микротвердости закаленной поверхности стали 45, должна составлять не менее 0,25-1,00 Дж/мм².

5. Установлено, что глубина упрочнения при закалке газовым лазером обратно пропорциональна диаметру лазерного луча, определяющему удельную энергию, попадающую на обрабатываемую поверхность, при увеличении скорости обработки, глубина упрочнения уменьшается на 24-57% при диаметре луча 2 мм; на 39-50% при диаметре луча 3 мм и на 50% вплоть до нуля (зона упрочнения отсутствует) при диаметре 4 мм.

6. Установлено, что средний уровень температур в зоне обработки при диаметре луча 2 мм превышает данный параметр при диаметре 3 мм, так как плотность это обусловлено повышением уровня плотности мощности.

7. Установлено, что при повышении температуры в зоне обработки до определенного уровня наблюдается либо увеличение глубины закаленного слоя, либо сохранение его примерно на том же уровне (при диаметрах луча 2 и 3 мм соответственно); при дальнейшей повышении температур наблюдается падение уровня глубины, связанное с усилением процесса теплоотвода во внутренние слои металла.

8. Установлено влияние диаметра лазерного луча и температуры в зоне обработки на характер изменения микротвердости слоев, упрочненных газовым лазером.

9. Установлены зависимости микротвердости закаленных слоев, глубины упрочнения, а также средней температуры в зоне лазерного пятна, от скорости закалки волоконным лазером.

10. Установлены зависимости глубины упрочнения и средней микротвердости упрочненных слоев от температуры в зоне лазерного пятна при осуществлении закалки волоконным лазером.

11. Установлены зависимости физико-механических характеристик лазерно-легированных слоев от технологических параметров лазерного легирования, а также от параметров спектральной яркости пятна лазерной обработки при легировании поверхности стали 45 бором и смесью бора и хрома. Также установлены зависимости температур в зоне лазерной обработки от технологических параметров процесса лазерного легирования бором и смесью бор + хром.

12. Установлено, что средняя температура ванны расплава при лазерной наплавке достаточно сильно зависит от режимов процесса лазерной наплавки. Регистрируемый температурный сигнал тесно связан с основными параметрами процесса. Трехзональный термовизор ИТ-3СМ можно уверенно рекомендовать для регистрации средней температуры в ванне расплава при

наплавке. Наибольшее влияние на среднюю температуру в ванне расплава оказывает мощность лазерного излучения, так как при увеличении мощности излучения средняя температура в ванне расплава значительно увеличивается. Таким образом, средняя температура в ванне расплава вполне пригодна для мониторинга и управления процессом лазерной наплавки.

Задачи по изучению методов контроля процессов лазерной обработки, а также связи спектральных характеристик пятна лазерной обработки со свойствами получаемых поверхностных слоев, поставленные в ходе проведения всех этапов научно-исследовательской работы выполнены полностью.

Внедрение в данных технологий в производство позволит повысить уровень физико-механических и эксплуатационных свойств деталей с поверхностями, сварными соединениями и покрытиями, полученными в процессе лазерной обработки, что обеспечит больший срок службы деталей, а также повысит производительность и точность лазерной обработки.

Научно-технический уровень выполненной научно-исследовательской работы соответствует уровню разработок стран СНГ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов/ А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров/ Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с.
- 2 Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов/ А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
- 3 Коваленко, В.С. Лазерная технология: учебник / В.С. Коваленко. – Киев: Выща шк., 1989. – 280 с.
- 4 Хасуи, А., Наплавка и напыление/ А. Хасуи, О. Моригаки/ Под ред. В.С. Степанина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 5 Витязь, П.А. Теория и практика газопламенного напыления/ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1983. – 295 с.
- 6 Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия / А. Н. Магунов. – М.: Физматлит, 2012. – 248 с.
- 7 Firago, V., High-temperature three-colour thermal imager/ V. Firago, W. Wojcik // Przegląd Elektrotechniczny. – R. 91. – NR 2/2015. – P. 208-214.
- 8 Либенсон, М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе/ М.Н. Либенсон, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина/ Под общей редакцией В. П. Вейко. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
- 9 Фираго, В. А. Принципы бесконтактного контроля параметров процессов лазерной обработки конструкционных материалов / В. А. Фираго // В кн: X Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника», Минск, 2015: материалы. Минск: РИВШ, 2015 г. – С. 202-205.
- 10 Firago V. High-temperature three-colour thermal imager/ V. Firago, W. Wojcik // Przegląd Elektrotechniczny. – R. 91. – NR 2/2015. – P. 208-214.
- 11 Firago V., Wojcik W., Volkova I. The principles of reducing temperature measurement uncertainty of modern thermal imaging system/ V. Firago,

W. Wojcik, I. Volkova// Przegląd Elektrotechniczny. – R. 92. – NR 8/2016. – P. 117-120.

12 Фираго, В. А. Пирометрический контроль температуры нагреваемых металлов на предприятиях машиностроения/ В.А. Фираго, А.Г. Сеньков, Е.Н. Савкова, Т.В. Голуб// Контроль. Диагностика. – 2011. – № 5. – С. 17-25.

13 Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

14 Жирнов, И.В. Определение истинной температуры на основе измерений ИК камеры применительно к поверхностному плавлению стальных пластин лазерным лучом/ И.В. Жирнов, М.А. Дубенская, И.Ю. Смуров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 4 (35). – С. 69-73.

15 Синопальников, В.А. Надежность и диагностика технологических систем/ В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. – М.: Высшая школа, 2005. – 342 с.

16 Минько, Д.В. Влияние параметров импульсного лазерного воздействия на формирование градиента структуры пористых материалов из порошка титана / Д.В. Минько// Литье и металлургия. – 2018. – № 3(92). – С. 88-94.

17 Бывшев, А.В. Методика оценки температуры в окрестности фокального пятна лазерного излучения/ А.В. Бывшев, А.Б. Люхтер, Д.И. Казанцев// Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2017. – № 1(1). – С. 45-47.

18 Леднев, В.Н. Спектрометрия лазерно-индуцированной плазмы для многоэлементного анализа состава изделия в процессе его выращивания методом коаксиальной лазерной наплавки [электронный ресурс]/ В.Н. Леднев [и др.]// В кн.: V Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», Москва, 2019: материалы. М.: ВИАМ, 2019. – С.237-252. – режим доступа: http://elibrary.ru/download/elibrary_37615958_39845406.pdf, свободный.

- 19 Котобан, Д.В. Интегральная оптическая диагностика лазерной наплавки/ Д.В. Котобан [и др.]// Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 4(39). – С. 17-22.
- 20 Bansal R. Analysis and feedback control of the scanning laser epitaxy process applied to nickel-base superalloys: Diss. ... PHD/ Rohan Bansal; – Georgia Tech. - Georgia, 2013. – 185 p.
- 21 Ranadip, A. Additive Manufacturing of IN100 Superalloy Through Scanning Laser Epitaxy for Turbine Engine Hot- Section Component Repair: Process Development, Modeling, Microstructural Characterization, and Process Control/ A. Ranadip, D. Suman// Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – V. 46. – iss. 9. – P. 3864-3875.
- 22 Liangliang, N. Sensing and Control for Geometry Stability of the Melt Pool and the Cross Sectional Area in Laser Cladding/ N. Liangliang, L. Weijun// In book: First International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06), Beijing, 2006: proceedings. Beijing: China, 2006. – P. 521-524.
- 23 Everton, Sarah K. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing/ Sarah K. Everton [and oth.] // Materials & Design. – 2016. – № 95. – P. 431-445.
- 24 Davis, Tyler A. Vision-based clad height measurement/ Tyler A. Davis, Yung C. Shin// Machine Vision and Applications. – 2011. – № 22(1). – P. 129-136.
- 25 Vasudevan, M. Real-time monitoring of weld pool during GTAW using Infra-Red thermography and analysis of Infra-Red thermal images/ M. Vasudevan [and oth.]//Welding in the world. – 2011. – V. 55. – № 07. – P. 83-89.
- 26 Yuhong, X. In situ thermal imaging and three-dimensional finite element modeling of tungsten carbide–cobalt during laser deposition/ X. Yuhong [and oth.]// Acta Materialia. – 2009. – № 57. – P. 5419-5429.
- 27 Sundaram, N. Control of the welding process using infrared sensors/ N. Sundaram [and oth.]// Transactions on robotics and automation. – 1992. – V.8. – № 1. – P. 86-93.

- 28 Almond, D.P. Thermal imaging of composites/ D.P. Almond, W. Peng// Journal of Microscopy. – 2000. – V. 201. – № 2. – P. 163-170.
- 29 Boukhanouf, R. Experimental investigation of a flat plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera/ R. Boukhanouf [and oth.]// Applied Thermal Engineering. – 2006. – № 26. – P. 2148-2156.
- 30 Bardin, F. Process control of laser conduction welding by thermal imaging measurement with a color camera/ F. Bardin [and oth.]// Applied optics. – 2005. – V. 44. – № 32. – P. 6841-6848.
- 31 Кирилина, А.Н. Применение средств тепловизионного контроля в системе управления процессом лазерного термического упрочнения/ А.Н. Кирилина// «Автоматизация в промышленности». – 2007. – № 1. – С. 5-7.