

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.22-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P. 22-29.

Научная статья
УДК 621.373.826
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-22-29

Определение энергетических характеристик сопутствующего излучения при лазерных технологических процессах обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Ольга Алексеевна Крючина^{1,2} аспирант
¹ ООО НТО «ИРЭ-Полюс», РФ, Фрязино, МО

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, Москва

^{1,2} oKryuchina@ntoire-polus.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7592-0790>

Аннотация. Приведены результаты исследования сопутствующего излучения, возникающего при лазерных технологических процессах обработки материалов, определены энергетические характеристики в различных диапазонах длин волн. Данный вопрос является актуальным как в технологической сфере, так и в сферах медицины и охраны труда. Теоретическое и экспериментальное определение спектров сопутствующего излучения позволит оценить наличие конкретных длин волн, которые могут дестабилизировать процесс лазерной обработки, в частности, нержавеющей стали 12Х18Н10Т, как одной из наиболее востребованных в промышленном применении. Оценка зависимости спектра сопутствующего излучения от химического состава обрабатываемого материала проводилась с использованием специализированного программного обеспечения. Теоретически было установлено, что спектры эмиссии нержавеющей стали 12Х18Н10Т находятся в УФ-А, фиолетовом и зелёном диапазонах длин волн. В экспериментальной работе для определения спектрального состава сопутствующего излучения использовался автоматизированный монохроматор-спектрограф модели M266 (фирма Solar laser systems). Полученные результаты спектрального анализа подтверждают теоретические данные и дополняют их, что связано с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые программное обеспечение для расчётов не учитывает. Результаты исследований свидетельствуют о наличии в составе сопутствующего излучения при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т по технологии лазерной маркировки линий спектра в УФ-диапазоне длин волн. Сравнение значений, полученных в теоретической и экспериментальной частях исследования, показало необходимость совмещать эти два способа исследования сопутствующего излучения, поскольку именно комбинация теоретических и экспериментальных данных позволяет нивелировать недостатки каждого метода и получить наиболее полную спектральную картину сопутствующего излучения. Зафиксированные результаты исследований, в частности наличие УФ-линий спектра, обуславливают необходимость проведения измерений энергетических характеристик сопутствующего излучения в УФ-диапазоне не только в процессе лазерной маркировки, но и во время других лазерных технологических процессов, для определения конкретных уровней с целью оценки потенциальной опасности для персонала.

Ключевые слова: лазерная технологическая обработка, сопутствующее излучение, ультрафиолетовое излучение, конструкционная высоколегированная коррозионноустойчивая сталь 12Х18Н10Т, спектры сопутствующего излучения

Для цитирования: Крючина О.А. Определение энергетических характеристик сопутствующего излучения при лазерных технологических процессах обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 22–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-22-29

Characterization of accompanying radiation under laser processing of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

Olga A. Kryuchina^{1,2} PhD student

¹ IRE-Polyus LLC, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation

² Moscow State Technical University named after Bauman, Russian Federation, Moscow

^{1,2} oKryuchina@ntoire-polus.ru

Abstract. Research results of accompanying radiation produced by laser processing of material handling are presented, and energy characteristics in various wavelength ranges are determined. This issue is relevant both in the technological sphere and in the fields of medicine and labor protection. The theoretical and experimental determination of the accompanying radiation spectra will make it possible to assess the presence of specific wavelengths that can destabilize laser processing, in particular, stainless steel 12Cr18Ni10Ti, as one of the most in demand in industrial applications. The dependence of accompanying

radiation spectrum on the chemical composition of the handled material was assessed using specialized software. By theory, it was found that the emission spectra of 12Cr18Ni10Ti stainless steel are in the UV, violet and green wavelength ranges. In the experimental work, an automated monochromator spectrograph model M266 (Solar laser systems) was used to determine the spectral composition of the accompanying radiation. The obtained spectral analysis results confirm the theoretical data and give supplement information, which is due to the presence of intense thermal effects that software does not take into account. The research results indicate the presence of accompanying radiation in the processing of 12Cr18Ni10Ti stainless steel using the technology of laser marking of spectral lines in the UV wavelength range. A comparison of the values obtained in the theoretical and experimental parts of the study showed the need to combine these two methods of studying accompanying radiation, since it is the combination of theoretical and experimental data that allows levelling disadvantages of each method and obtain the most complete spectral picture of accompanying radiation. The recorded research results, in particular the presence of UV spectral lines, necessitate measurements of the energy characteristics of accompanying radiation in the UV range, not only when laser marking, but also under various laser processing, determining specific levels in order for potential hazard rating to personnel.

Keywords: laser processing, accompanying radiation, ultraviolet radiation, structural high-alloy corrosion-resistant steel 12Cr18Ni10Ti, accompanying radiation spectra

For citation: Kryucina O.A. Characterization of accompanying radiation under laser processing of stainless steel 12Cr18Ni10Ti / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 22–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-22-29

Введение

Технологические процессы лазерной обработки материалов всегда сопровождаются отражённым и рассеянным лазерным излучением, и сопутствующим излучением от пароплазменного факела, раскалённого материала, нагретых вырывающихся частиц и др. Сопутствующее излучение можно охарактеризовать величиной энергетических характеристик, таких как яркость, освещённость и энергетическая освещённость от ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) излучения, а также линиями спектра, которые в зависимости от химического состава обрабатываемого материала будут отличаться по диапазонам длин волн [1].

Лазерные технологии применяются для решения разнообразных производственных задач для обработки изделий из разных материалов. Одной из самых производимых и используемых в различных отраслях промышленности, в том числе для изготовления деталей машин и аппаратов продовольственного и торгового машиностроения, товаров народного потребления и т.д., является конструкционная высоколегированная коррозионностойкая сталь 12X18H10T. Хорошая сопротивляемость атмосферной и межкристаллитной коррозии в совокупности с жаростойкостью, стабильностью, прочностью, легкостью обработки, возможностью использования в широком диапазоне температур сделали эту марку стали

возможной для применения в конструкциях химического и атомного энергетического машиностроения, сосудов и резервуаров, работающих в агрессивных средах, корпусов и трубной обвязки химических реакторных колонн, и других деталей, к которым предъявляются повышенные требования. Эти факты обуславливают выбор именно этой стали, как наиболее приоритетной, для проведения исследований [2].

Исследование сопутствующего излучения является актуальной задачей как для технологов, с целью определения конкретных факторов, вносящих дестабилизацию в технологический процесс, так для медиков, с целью установления вероятности неблагоприятного воздействия на человека, так и для специалистов по охране труда, с целью определения необходимости предусматривать дополнительные средства защиты для персонала, работающего на лазерном технологическом оборудовании [3].

В настоящей публикации приведены результаты теоретического и экспериментального исследования спектрального состава сопутствующего излучения при обработке выбранной стали 12X18H10T.

Теоретическая часть

Первым этапом исследования является теоретическое определение спектров нержавеющей стали 12X18H10T для оценки

зависимости спектра сопутствующего излучения от химического состава обрабатываемого материала, с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) [4]. В интерфейсе можно указать состав плазмы и приблизительные начальные оценки параметров наблюдения, таких как температура и плотность электронов, диапазон длин волн и спектральное разрешение. Первоначальное моделирование Саха-Больцмана выполняется на стороне сервера, и все соответствующие данные, такие как спектральные линии и данные

об уровнях энергии, передаются на компьютер пользователя, который строит график моделируемого спектра. Интерфейс для спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя позволяет строить теоретические спектры практически любой комбинации химических элементов, в зависимости от электронной температуры T_e (эВ) [5].

Для расчёта в программе выбрана температура испарения железа (Fe), как базового химического элемента стали 12X18H10T (табл. 1) [6].

1. Химический состав нержавеющей стали 12X18H10T

1. Chemical composition of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mn	Ti	Si	C	P	S
%	~70	17...19	9...11	до 2	5 · e...0,8	до 0,8	до 0,12	до 0,035	до 0,02

Спектр эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T при достижении температуры испарения порядка 3135,15 К (2862 °С) или 0,27 эВ показан на рис. 1. Слева от линий спектров указаны химические элементы и уровни излучения, красными рамками

выделены наиболее спектрально значимые элементы, зафиксированные на графике. При температуре испарения наиболее интенсивно испускают излучение атомы Fe I, Mn I, Cr I, Ni I, входящие в хим. состав материала (табл. 1).

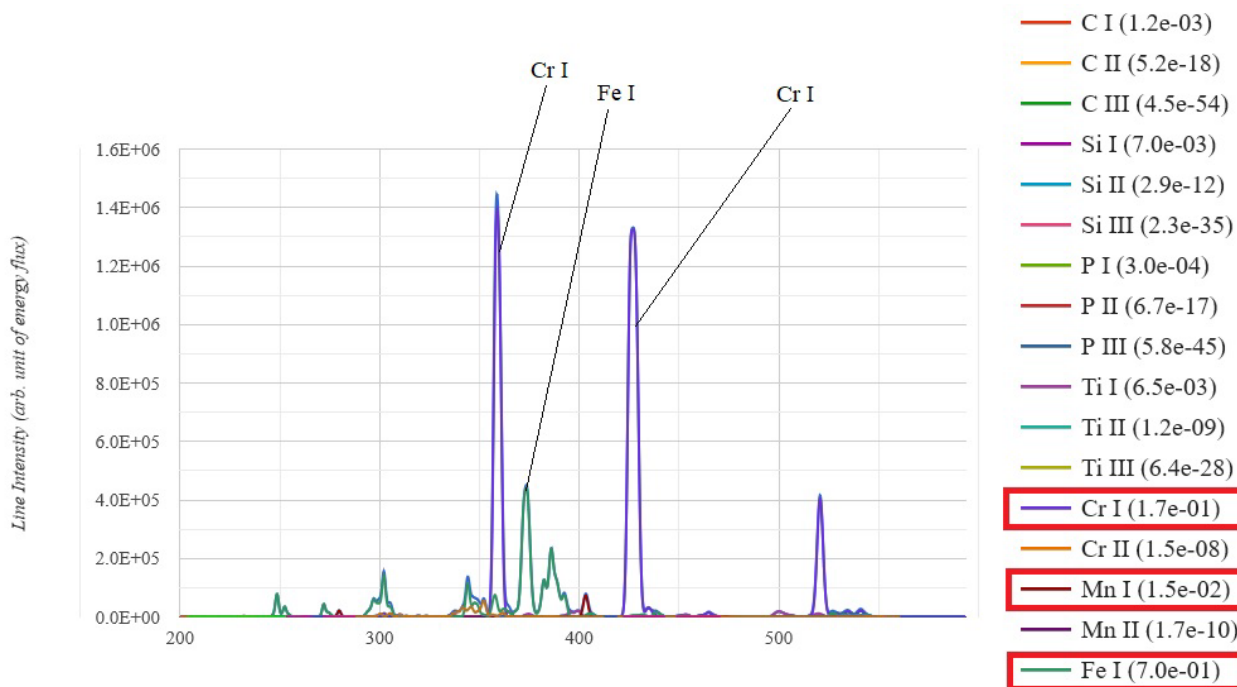


Рис. 1. Спектр эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T при достижении температуры испарения

Fig. 1. Emission spectrum of stainless steel 12Cr18Ni10Ti upon reaching the evaporation temperature

Основные значимые спектральные линии излучения Fe I получены на длинах волн 373,3 нм (УФ-А), 386,1 нм (видимый спектр в фиолетовой области) Cr I на 358,3 нм (УФ-А), 426,5 нм (видимый спектр в фиолетовой области), 520,3 нм (видимый спектр в зелёной области).

Полученные теоретические результаты говорят о том, что химический состав исследуемой стали обуславливает появление в составе сопутствующего излучения УФ- линий спектра. Для подтверждения теоретических данных будет проведён практический эксперимент по фиксации спектральной картины в процессе лазерной обработки стали 12X18H10T.

Экспериментальное исследование

В экспериментальной работе для определения спектрального состава сопутствующего излучения использовался автоматизированный монохроматор-спектрограф модели M266 (фирма Solar laser systems) (рис. 2.) [7]



Рис. 2. Монохроматор/спектрограф M266

Fig. 2. Monochromator/spectrograph M266

Управление M266 полностью автоматизировано. Сканирование спектра по длинам волн, смена дифракционных решеток, смена фильтров разделения порядков, регулировка ширины щелей и выбор выходного порта производится автоматически и управляется с помощью интеллектуального и простого в использовании ПО. Автоматический затвор предназначен для автоматического вычитания фона, а также для защиты детектора от излишней засветки источником излучения.

В качестве оптической схемы в M266 используется оригинальная модифицированная схема Черни-Тернера (рис. 3) с одним

входом и двумя выходами. [8] Оптическая схема монохроматора/спектрографа M266 представлена на рис. 4.

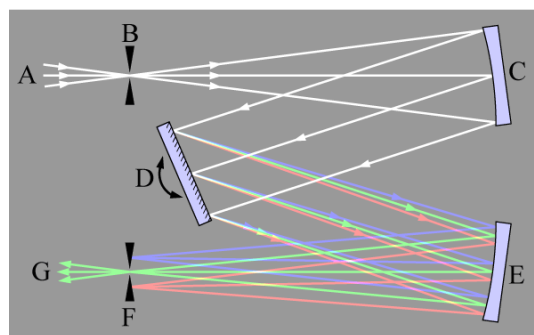


Рис. 3. Схема Черни-Тёрнера

Fig. 3. Cherny-Turner scheme

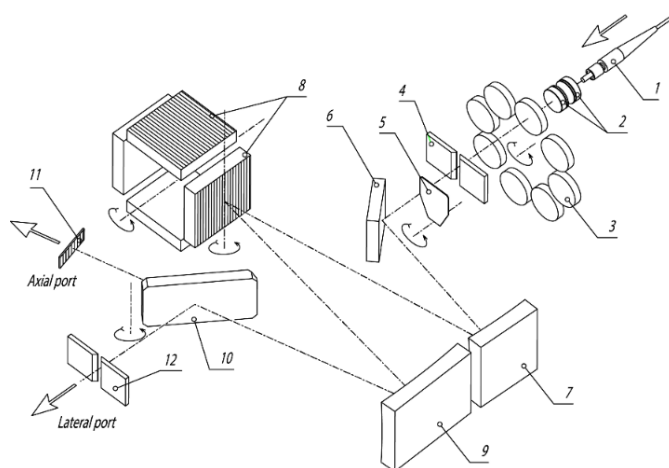


Рис. 4. Оптическая схема монохроматора/спектрографа M266:

1 – оптическое волокно; 2 – конденсор; 3 – турель фильтров; 4 – входная щель; 5 – затвор; 6 – поворотное зеркало; 7 – коллиматорное зеркало; 8 – дифракционные решётки; 9 – камерное зеркало; 10 – поворотное зеркало; 11 – осевой порт; 12 – боковой порт

Fig.4. Optical scheme of the M266 monochromator/spectrograph: 1 – optical fiber; 2 – condenser; 3 – filter turret; 4 – inlet slit; 5 – shutter; 6 – rotary mirror; 7 – collimator mirror; 8 – diffraction gratings; 9 – chamber mirror; 10 – rotary mirror; 11 – axial port; 12 – side port

Входная щель 4, установленная в фокальной плоскости коллиматорного зеркала 7, освещается исследуемым излучением. Излучение, прошедшее входную щель 4 и поворотное зеркало 6, направляется коллиматорным зеркалом 7 на дифракционную решётку 8 в виде параллельных пучков лучей от каждой точки входной щели. Дифракционная

решётка 8 отклоняет лучи на различные углы в зависимости от длины волны излучения, превращая параллельный пучок от каждой точки входной щели в совокупность монохроматических параллельных пучков. Камерное зеркало 9 создаёт на своей фокальной поверхности 11 совокупность монохроматических изображений входной щели, формирующую спектр. [9]

Изменение длины волны осуществляется поворотом дифракционной решётки вокруг вертикальной оси, проходящей через центр решётки. Смена спектральных диапазонов (дифракционных решёток) осуществляется поворотом турели решёток вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр турели.

Плоское зеркало 10 поворачивается вокруг вертикальной оси; в нерабочем положении оно обеспечивает беспрепятственное прохождение излучения на осевой выходной порт 11, а в рабочем – направляет спектр на боковой выходной порт 12. Каждый из выходных портов может содержать либо выходную щель, либо детектор.

Монохроматор снабжён турелью фильтров разделения порядков 3, ахроматическим осветителем 2 и оптическим волокном 1. Все перечисленные элементы легко снимаются и вновь устанавливаются в прибор.

Измерения на монохроматоре-спектрографе проводились по схеме, показанной на рис. 5.

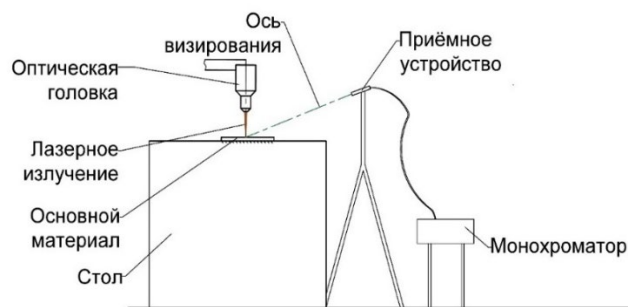
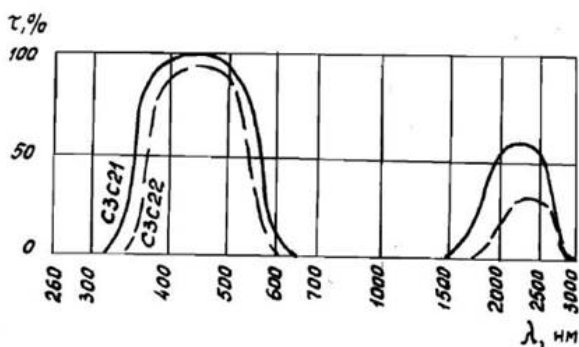


Рис. 5. Схема измерений

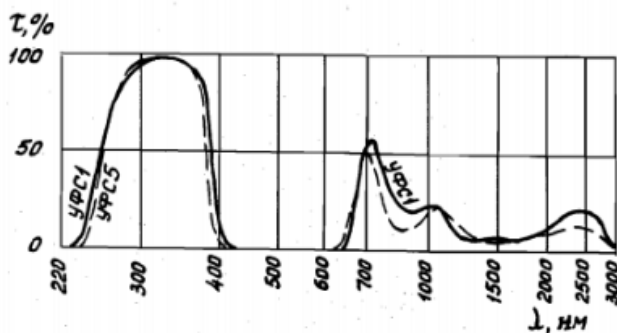
Fig. 5. Measurement scheme

Приёмное устройство монохроматора-спектрографа размещалось на штативе на расстоянии ≈ 300 мм от зоны обработки, блок управления прибором размещался на тележке в непосредственной близости от лазерной установки, данные с прибора выводились на персональный компьютер в виде графиков спектров в режиме реального времени. Спектры пропускания снимались в диапазоне 300...900 нм с шагом сканирования 2 нм.

Измерения проводились в два этапа: на первом этапе использовался светофильтр СЗС-22 (рис. 6, а) (в работе выделялись участки спектра в области от 420 до 600 нм), на втором этапе использовался светофильтр УФС-1 (рис.6, б) (выделяет участки спектра в области от 240 до 420 нм и от 600 нм). [10]



а)



б)

Рис. 6. Графики зависимости коэффициентов пропускания светофильтров от длины волны: а – светофильтр СЗС-22; б – светофильтр УФС-1

Fig. 6. Graphs of the dependence of the transmission coefficients of light filters on the wavelength: а – the SZS-22 light filter; б – the UVS1 light filter.

Спектральный анализ проводился непосредственно в процессе обработки излучением волоконного лазера с длиной волны 1070 нм по технологии лазерной маркировки. Обработка проводилась на мощности 150 Вт, что позволяло получить факел необходимого размера и не расплавлять металл до разбрызгивания.

Полученные по результатам исследований спектры сопутствующего излучения при технологическом процессе лазерной маркировки нержавеющей стали 12X18H10T

представлены на рис. 7. По оси ординат указано число отсчетов фотоумножителя, которое пропорционально относительной интенсивности, а по оси абсцисс длина волны излучения. Ширина спектральных линий обусловлена шумами. Графики спектров имеют характерный спад интенсивности в областях 400 нм и 600 нм. Это связано с тем, что при измерениях использовались светофильтры, которые имеют переходные зоны именно в этих местах.

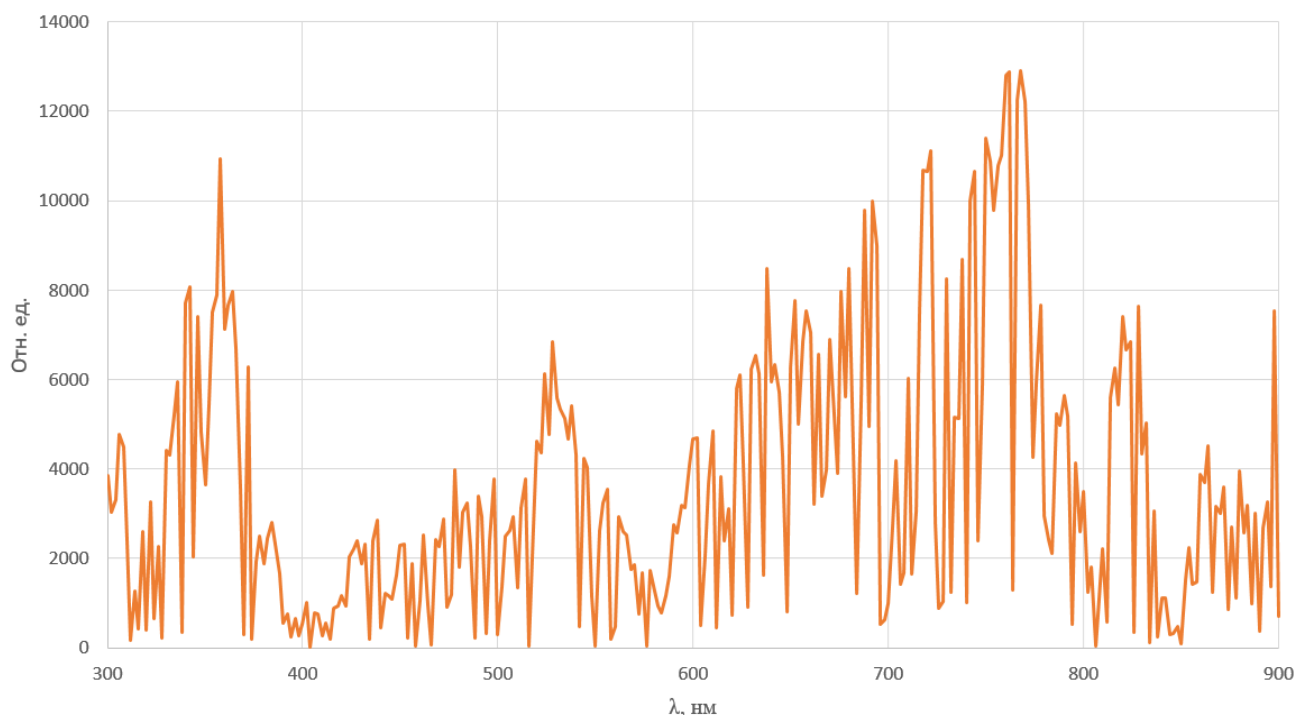


Рис. 7. Линии спектра отражённого излучения при технологическом процессе лазерной маркировки нержавеющей стали 12X18H10T

Fig. 7. Lines of the reflected radiation spectrum during the technological process of laser marking of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

На графиках спектра (рис. 7) наблюдается большое количество пиков и широких спектральных линий. Наибольшую интенсивность имеют линии в УФ-А области спектра ($\approx 342, 358, 363$ нм), в зелёном (≈ 528 нм) и оранжевом диапазонах (≈ 621 нм), и самый активный спектр в красном ($\approx 633, 640, 694, 724$ нм) и ближнем ИК-диапазоне ($\approx 744, 750, 762, 768$ нм).

Сравнение пиков спектральных линий, полученных теоретическим и эксперимен-

тальным методами представлено в таблице 2. В диапазонах УФ-А и зелёной области спектра зафиксированы совпадения пиков по длинам волн, точные и в пределах погрешности, что свидетельствует о подтверждении теоретической модели экспериментальными результатами. В области спектра от 380 до 440 нм (фиолетовый) теоретическая модель не подтверждена, что связано с использованием светофильтра.

2. Сводная таблица пиковых значений относительной интенсивности спектров

2. Summary table of peak values of the relative intensity of the spectra

Диапазон длин волн, нм	300...315	315...380	380...440	440...485	485...500	500...565	565...590	590...625	625...740	740...900
	УФ-В	УФ-А	фиолетовый	синий	голубой	зеленый	жёлтый	оранжевый	красный	ИК
Теория		358,3, 373,3	386,1 426,5			520,3				
Эксперимент		≈ 342, 358, 363				≈ 528		≈ 621	≈ 633, 639, 694, 724	≈ 744, 750, 762, 768

Измерения проводились не в лаборатории, а в условиях цеха, поэтому на результаты экспериментальных исследований оказывали влияние окружающие световые факторы. Пики, полученные на практике в диапазоне от 590 до 900 нм связаны с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые ПО для расчётов не учитывает, соответственно в теоретических данных их нет.

Сравнение значений, полученных в теоретической и экспериментальной частях исследования, показало необходимость совмещать эти два способа исследования сопутствующего излучения, поскольку именно комбинация теоретических и экспериментальных данных позволяет нивелировать недостатки каждого метода и получить наиболее полную спектральную картину сопутствующего излучения.

Выводы

1. Теоретически установлено, что спектры эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T находятся в УФ-А, фиолетовом и зелёном диапазонах длин волн.

2. Полученные результаты спектрального анализа подтверждают теоретические данные и дополняют их, что связано с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые ПО для расчётов не учитывает.

3. Результаты исследований свидетельствуют о наличии в составе сопутствующего излучения при обработке

нержавеющей стали 12X18H10T по технологии лазерной маркировки линий спектра в УФ-диапазоне длин волн.

Заключение

Зафиксированные результаты исследований, в частности наличие УФ-линий спектра, обуславливают необходимость проведения измерений энергетических характеристик сопутствующего излучения в УФ-диапазоне не только в процессе лазерной маркировки, но и во время других лазерных технологических процессов, для определения конкретных уровней с целью оценки потенциальной опасности для персонала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Научно-практическая** конференция рабочей группы №3 технологической платформы «Фотоника-2023» «Лазерная макрообработка промышленных материалов и аддитивные технологии». Доклад О.А. Крючина «Измерение энергетических характеристик отражённого излучения при лазерных технологических процессах». URL:<https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw> (дата обращения 29.09.2024).
2. **Нержавеющая** сталь 12X18H10T. URL:<https://td-mc.ru/material/nerzhaveyushchaya-stal-12h18n10t> (дата обращения 29.09.2024).
3. **Толкачёва А.В., Крючина О.А., Садовников И.Э.** Лазерная безопасность. Решение есть! Новый стандарт. Передовые концепции. // Лазер-Информ. 2024. №4 (763). С. 6–9.

4. **National** Institute of standards and technology. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/LIBS/lib-form.html> (дата обращения 29.09.2024).

5. **LIBS** Input Form. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Html/libshelp.html> (дата обращения 29.09.2024).

6. **Марочник** стали и сплавов. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения 29.09.2024).

7. **Автоматизированный** монохроматор-спектрограф M266. URL: <https://solar-laser.com/devices/automated-monochromator-spectrograph-m266/?ysclid=lwrfrh5lep395822790> (дата обращения 29.09.2024).

8. **M266** монохроматор-спектрограф. Руководство по эксплуатации. Минск: Solar Laser System, 2017. 32 с.

9. **Светофильтры** из цветного стекла. URL: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (дата обращения 29.09.2024).

REFERENCES

1. Scientific and practical conference of the working group No. 3 of the Photonics-2023 technological platform "Laser macroprocessing of industrial materials and additive technologies". O.A. Kryuchin's report "Measuring the energy characteristics of reflected radiation in laser technological processes". URL: [\[tube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw\]\(https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw\) \(date of access: 29.09.2024\).](https://www.you-</p></div><div data-bbox=)

2. Stainless steel 12Cr18Ni10Ti. URL: <https://tdmc.ru/material/nerzhaveyushchaya-stal-12h18n10t> (date of access: 29.09.2024).

3. A.V. Tolkacheva, O.A. Kryuchina, I.E. Sadovnikov. Laser safety. There is a solution! New standard. Advanced concepts. // Laser-Inform. 2024, no. 4 (763), pp. 6–9.

4. National Institute of Standards and technology. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/LIBS/lib-form.html> (date of access: 29.09.2024).

5. LIBS Input Form. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Html/libshelp.html> (date of access: 29.09.2024).

6. Grades of steel and alloys. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (date of access: 29.09.2024).

7. Automated monochromator-spectrograph M266. URL: <https://solar-laser.com/devices/automated-monochromator-spectrograph-m266/?ysclid=lwrfrh5lep395822790> (date of access: 29.09.2024).

8. M266 monochromator spectrograph. User manual. Minsk: Solar Laser System, 2017, 32 p.

9. Light filters made of colored glass. URL: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (date of access: 29.09.2024).

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 21.03.2025; принята к публикации 01.04.2025.

The article was submitted 24.10.2024; approved after reviewing 21.03.2025; accepted for publication 01.04.2025.