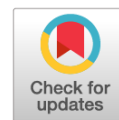


Оригинальное исследование

УДК 621.373.826

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_253

EDN: WJCPRD



Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов

О.А. Крючина¹, И.Н. Шиганов²¹ ООО «ВПГ Лазеруан», Москва, Россия;² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Лазерные технологические процессы, особенно высокомошные, всегда сопровождаются отраженным, рассеянным излучением различного спектра, повышенной яркостью света, которые до настоящего времени подробно изучены не были. С учётом развития технологического оборудования, появления и широкого внедрения ручных систем лазерной обработки, роста мощностей лазеров, задача исследования сопутствующих излучений в лазерных технологических процессах становится особо актуальной.

Цель работы — определение спектральных диапазонов, интенсивности отражённого и рассеянного лазерного и сопутствующего излучения при выполнении основных технологических процессов лазерной обработки различных металлов и сплавов.

Материалы и методы. В качестве исследуемых материалов выбраны углеродистая сталь 09Г2С, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ6, алюминиевый сплав АМг6. Измерения проводились на специализированном стенде, созданном для проведения указанных работ, по специально разработанной методике.

Выводы. Результаты измерений показали превышения предельно допустимых уровней и интенсивностей для отражённого и рассеянного лазерного излучения и УФ-С излучения во всех исследуемых процессах и в ряде случаев превышения для УФ-В излучения. Полученные результаты говорят о необходимости применения средств защиты и от лазерного, и от УФ- излучения при обработке указанных материалов в исследованных технологических процессах.

Ключевые слова: лазерное технологическое оборудование; технологическая среда оптического спектра; лазерные технологические процессы; облученность от лазерного излучения; энергетическая освещенность сопутствующего излучения; спектральный анализ.

Как цитировать

Крючина О.А., Шиганов И.Н. Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 253–258. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_253 EDN: WJCPRD

Original study article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_253

EDN: WJCPRD

Optical Spectrum Process Environment in Laser Material Processing: A Study

Olga A. Kryuchina¹, Igor N. Shiganov²¹ LLC NTO IRE-Polus, Moscow, Russia;² Moscow State Technical University named after Bauman, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Laser processes—especially high-power ones—are usually associated with reflected and scattered radiation of various spectra and increased light intensity, which have not yet been studied in detail. Due to the development of process equipment, the development and widespread use of manual laser processing systems, and the growth of laser power, the studies of collateral radiation in laser processes are becoming particularly relevant.

AIM: To determine the spectral ranges and the intensity of reflected and scattered laser and collateral radiation during basic laser processing of various metals and alloys.

MATERIALS AND METHODS: We tested carbon steel (C345), stainless steel (AISI 321), a titanium alloy VT6 (Grade 5), and an aluminum alloy (AlMg6). The tests were performed on a special test bench using a special method.

CONCLUSIONS: The tests showed that the maximum permissible levels and intensity of reflected and scattered laser radiation, UV-C radiation, and—in some cases—UV-B radiation were exceeded in all studied processes. The results indicate the need to use both laser and UV radiation protection equipment when processing the specified materials in the studied processes.

Keywords: laser process equipment; process environment of the optical spectrum; laser processes; laser radiation exposure; collateral irradiation; spectral measurement.

To cite this article

Kryuchina OA, Shiganov IN. Optical Spectrum Process Environment in Laser Material Processing: A Study. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):253–258. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_253 EDN: WJCPRD

Submitted: 04.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 25.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время насчитываются сотни областей практического применения лазеров. В различных отраслях промышленности наиболее популярными и востребованными считаются технологические установки, системы и роботизированные комплексы, спроектированные на базе волоконных лазеров [1].

Лазерные технологические процессы (ЛТП), особенно высокоомощные, всегда сопровождаются отраженным, рассеянным излучением различного спектра и повышенной яркостью света. В зависимости от типа лазерной технологии и обрабатываемого материала вид и интенсивность сопутствующих факторов варьируются [2].

Для того чтобы описать процессы взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с обрабатываемыми материалами, сформулирован термин «технологическая среда оптического спектра» (ТСОС), под которым понимается совокупность таких факторов, как отраженное и рассеянное ЛИ, сопутствующее излучение от пароплазменного факела и обрабатываемого материала, возникающих во время ЛТП, влияющих на протекание процесса и на персонал.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В общем случае существуют два типа исследования ТСОС: качественный и количественный (рис. 1). К качественному типу относятся методы по определению спектральных характеристик ТСОС, которые позволяют оценить спектральный состав, определить наиболее интенсивные линии и области спектра и наличие излучения в невидимых диапазонах длин волн (УФ, ИК). К количественному типу относятся методики по измерению энергетических характеристик излучения в конкретных диапазонах длин

волн для определения значений и оценки степени потенциальной опасности излучения.

Для определения спектрального состава ТСОС выбран метод оптической спектроскопии, в основе которого лежит исследование излучения лазерной плазмы. Данный метод наиболее простой и доступный для проведения спектрального анализа во время ЛТП. Для измерения спектрального состава выбран автоматизированный монохроматор/спектрограф M266 фирмы SOLAR (рис. 2) [3].

Спектральный анализ проводился непосредственно в процессе обработки (лазерной маркировки) различных материалов (углеродистая сталь 09Г2С, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ6, алюминиевый сплав АМг6) излучением волоконного лазера с длиной волны 1070 нм. Обработка проводилась на мощности 150 Вт (с плотностью мощности $2,4 \cdot 10^6$ Вт/см²), что позволило получить факел необходимого размера и не расплавлять металл до разбрызгивания.

На рис. 3 показаны спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов в наложении друг на друга. По оси ординат указано число отсчетов фотомножителя, которое пропорционально относительной интенсивности, а по оси абсцисс — длина волны излучения. Ширина спектральных линий обусловлена шумами. Спектры имеют характерные спады 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 [4].

Из рис. 3 видно, что самый интенсивный спектр зафиксирован при обработке титанового сплава ВТ6. Спектры плазмы образцов стали 09Г2С и 12Х18Н10Т по многим линиям совпадают. Спектр плазмы образца алюминиевого сплава АМг6 имеет наименьшую относительную интенсивность по сравнению с остальными. Экспериментально было установлено, что плазма, возникающая от воздействия ЛИ на обрабатываемый материал, создает спектр излучения, образованный многочисленными полосами, которые располагаются в УФ, видимой и ИК-областях спектра. Эти значения характерны для исследованных материалов [5].



Рис. 1. Иллюстрация концепции исследования технологической среды оптического спектра.

Fig. 1. Illustrated concept of the study on the process environment of the optical spectrum.



Рис. 2. Внешний вид автоматизированного монохроматора/спектрографа M266 фирмы SOLAR.

Fig. 2. View of SOLAR M266 automated monochromator / spectrograph.

Для комплексной количественной оценки энергетических характеристик ТСОС сотрудниками ООО НТО «ИРЭ-Полюс» был разработан специализированный измерительный стенд, который включает в себя приборы серии АРГУС: радиометры, люксметр, яркомер и лазерный дозиметр. Фотография стенда приведена на рис. 4 [6].

Для проведения измерений стенд с приборами помещается в зоне нахождения оператора во время ЛТП. Точки контроля выбраны на траекториях зеркального отражения лазерного излучения на расстоянии 1000 мм от поверхности основного материала. Приборы включаются до начала ЛТП. Во время ЛТП происходит измерение требуемых параметров. Поскольку приборы типа АРГУС не имеют функции запоминания измеренных значений, то для регистрации показаний используется видеофиксация. Получение итоговых значений происходит путем обработки видеофайлов [7, 8].

В табл. 1 приведены сводные результаты измерений уровней максимальной облученности от отраженного ЛИ при рабочих режимах различных технологических процессов для указанных марок металлов и сплавов. Для оценки потенциальной опасности измеренные значения сравниваются с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) и при превышении делается вывод о необходимости применения средств защиты. В рамках исследований время технологических процессов составляло 10 с, в соответствии с этим значение ПДУ для глаз $E_{пду} = 0,32 \cdot 10^{-3}$ Вт/см².

В представленных результатах прослеживаются различия уровней облученности при технологиях лазерной очистки, маркировки, роботизированной и ручной сварки, причем самый большой уровень зафиксирован при ручной сварке алюминиевого сплава типа АМг6. Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т наибольшая интенсивность определена при технологии лазерной маркировки, что может

показаться неочевидным, поскольку данная технология менее энергозатратная по сравнению со сваркой. Одну из ключевых ролей в формировании ТСОС играет плотность мощности ЛИ. Значения плотности мощности при лазерной маркировке, очистке и при ручной сварке находятся в диапазоне $1,6-7,9 \cdot 10^6$ Вт/см². Для оценки влияния плотности мощности при роботизированной сварке намеренно был увеличен диаметр пятна ЛИ, что привело к уменьшению плотности мощности по сравнению с остальными процессами на два порядка ($5 \cdot 10^4$ Вт/см²), при этом зафиксированы значения облученности на порядок ниже, чем во всех остальных исследуемых процессах. Еще одной особенностью сравнения ТСОС при разных ЛТП является пароплазменный факел. Процесс лазерной маркировки носит поверхностный характер обработки, что обуславливает отсутствие интенсивного пароплазменного факела и способствует наиболее активному отражению ЛИ. При уменьшении плотности мощности возникает интенсивное сопутствующее излучение, которое запирает в себе ЛИ, поэтому активного отражения ЛИ не происходит. Несмотря на существенную разницу в значениях облученности, все полученные результаты превышают ПДУ, что свидетельствует о необходимости применения средств защиты глаз от ЛИ [2, 8].

Сводные результаты измерений уровней энергетических характеристик сопутствующего УФ-излучения с указанием предельно допустимой интенсивности (ПДИ) при различных ЛТП обработки выбранных материалов приведены в табл. 2. Три главных факта, зафиксированных при всех

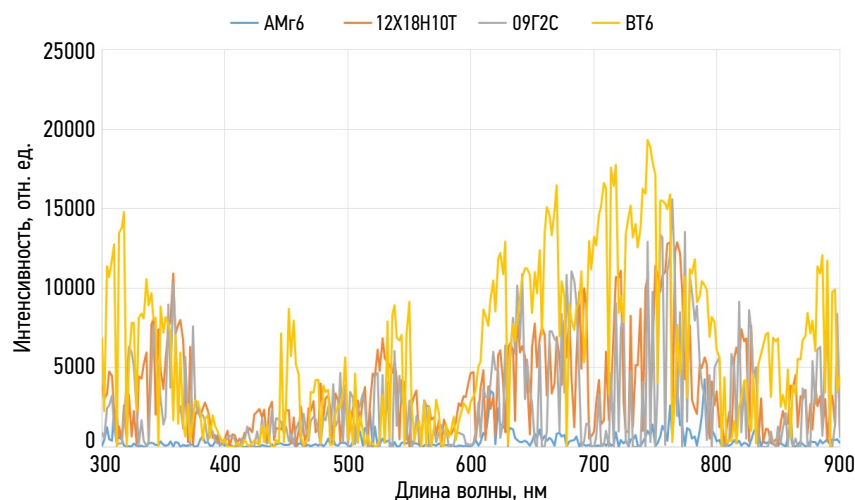


Рис. 3. Спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов.
Fig. 3. Laser plasma spectra of the studied samples.



Рис. 4. Фотография специализированного стенда измерения энергетических характеристик отраженного излучения.
Fig. 4. Photo of a special bench used to measure reflected radiation energy parameters.

Таблица 1. Сводные результаты измерений максимальной облученности от лазерного излучения (E_{\max} , Вт/см²)Table 1. Summary measurements of maximum irradiance of laser radiation (E_{\max} , W/cm²)

Материал / Технология	Маркировка	Очистка	Ручная сварка	Роботизированная сварка
AMr6	$3,47 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$5,37 \cdot 10^{-4}$
BT6	–	–	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$4,69 \cdot 10^{-4}$
12X18H10T	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{-4}$
09Г2С	$7,84 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2. Сводные результаты энергетической освещенности от УФ-излучения с указанием ПДИ

Table 2. Summary UV irradiance measurements with PDI

Марка материала	Энергетическая характеристика / технология	Маркировка	Очистка	Ручная сварка	Роботизированная сварка
ПДИ УФ-А, Вт/м ²				<u>50</u>	
AMr6		0,0066	0,0064	0,0336	0,0632
BT6	УФ-А	–	–	0,189	1,3704
12X18H10T	Е, Вт/м ²	0,0254	0,008	0,0078	0,057
09Г2С		0,0106	0,0068	0,005	0,0116
ПДИ УФ-В, Вт/м ²				<u>0,05</u>	
AMr6		0,0078	0,0072	0,0802	0,1134
BT6	УФ-В	–	–	0,0615	0,4276
12X18H10T	Е, Вт/м ²	0,0162	0,0094	0,0192	0,12
09Г2С		0,0052	0,0074	0,0176	0,0396
ПДИ УФ-С, Вт/м ²				<u>0,001*</u>	
AMr6		0,0834	0,1002	0,0088	0,12
BT6	УФ-С	–	–	0,5944	3,4326
12X18H10T	Е, Вт/м ²	0,491	0,1586	0,0052	0,029
09Г2С		0,1602	0,0708	0,0056	0,011

* Период облучения до 5 минут, общая продолжительность воздействия за смену не более 60 минут.

* The irradiation time is max. 5 minutes, the total shift exposure time is max. 60 minutes.

процессах: в УФ-А диапазоне превышений не выявлено; в УФ-С диапазоне все полученные значения превышают ПДИ; в диапазоне УФ-В излучения измеренные значения отличаются в зависимости от типа обрабатываемого материала и применяемой технологии [6].

Проведенными измерениями было показано, что ТСОС содержит уровни УФ-излучения во всех трех диапазонах (УФ-А, УФ-В, УФ-С), что подтвердило результаты спектрального анализа. Поскольку в УФ-В и УФ-С диапазонах зафиксированы превышения ПДИ, необходимо предусматривать средства защиты глаз и кожи от излучения и в УФ-диапазоне длин волн.

ВЫВОДЫ

1. Характерными особенностями ТСОС при ЛТП являются различия спектров излучения и уровней их энергетических характеристик при обработке различных материалов.

2. На состав ТСОС влияет химический состав обрабатываемого материала и параметры режима работы.

3. Во всех исследованных процессах зафиксировано наличие УФ-излучения, в том числе превышающего ПДИ.

4. Все исследуемые технологические процессы сопровождаются отраженным лазерным излучением, превышающим ПДУ.

5. Наличие повышенных уровней энергетических характеристик ТСОС обуславливает необходимость использования средств защиты от излучений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.А. Крючина — проведение исследований и экспериментов, анализ результатов, написание текста рукописи; И.Н. Шиганов — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: O.A. Kryuchina: investigation, formal analysis, writing—original draft; I.N. Shiganov: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed

to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: The study was not supported by any external sources.
Disclosure of interests: The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г. Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. ISBN: 5-7038-2701-9 EDN: WPEVRY
2. Крючина О.А. Безопасная эксплуатация лазерного технологического оборудования // РИТМ Машиностроения. 2022. № 10. С. 34–37.
3. Автоматизированный монохроматор-спектрограф M266. Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: Монохроматор-спектрограф автоматизированный Модель M266, купить спектрограф M266 (solar-laser.com)).
4. Светофильтры из цветного стекла. Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/>
5. Крючина О.А., Шиганов И.Н. Энергетические характеристики отраженного излучения при лазерных технологических процессах. В кн.: Научные технологии в машиностроении: XV Международная научно-техническая конференция (Москва, 1–3 ноября 2023 года): материалы конференции: в 2 т. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. Т. 2. С. 216–219. EDN: GYSTBA

6. Доклад О.А. Крючиной «Измерение энергетических характеристик отраженного излучения при лазерных технологических процессах». Научно-практическая конференция рабочей группы № 3 технологической платформы «Фотоника-2023» «Лазерная макрообработка промышленных материалов и аддитивные технологии». Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw>
7. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Совершенствование методики контроля отраженного и рассеянного излучения при лазерных технологических процессах // Технология машиностроения. 2021. № 1. С. 63–67. EDN: HXLLQQ
8. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Особенности энергетических характеристик световой технологической среды при лазерной и лазерно-дуговой обработке металлов волоконными лазерами // Сварочное производство. 2024. № 1. С. 29–36. EDN: BCWXLL

REFERENCES

1. Grigor'yanc AG, Shiganov IN, Misyurov AI. *Laser processing technologies*. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2006. (In Russ.) ISBN: 5-7038-2701-9 EDN: WPEVRY
2. Kryuchina OA. Safe operation of laser technological equipment. *RITM Mashinostroeniya*. 2022;10:34–37. (In Russ.)
3. Automated monochromator-spectrograph M266. Accessed: 13.09.2024. Available from: Monohromator-spektrograf avtomatizirovannyj Model' M266, kupit' spektrograf M266 (solar-laser.com)
4. Colored glass filters. Accessed: 13.09.2024. Available from: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (data obrashcheniya: 13.09.2024).
5. Kryuchina OA, Shiganov IN. Energy characteristics of reflected radiation in laser technological processes. In: High-tech in mechanical engineering: XV International scientific-technical conference (Moscow, November 1–3, 2023): conference proceedings: in 2 vol. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2024;2:216–219. (In Russ.) EDN: GYSTBA

6. Scientific and practical conference of the working group № 3 of the technological platform «Fotonika-2023» «Laser macroprocessing of industrial materials and additive technologies». Presentation by O.A. Kryuchinoy «Measuring the energetic characteristics of reflected radiation in laser technological processes». Accessed: 13.09.2024. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw>
7. Kryuchina OA, Shiganov IN, Sadovnikov IE. Improving the methodology for monitoring reflected and scattered radiation in laser technological processes. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2021;1:63–67. (In Russ.) EDN: HXLLQQ
8. Kryuchina OA, Shiganov IN, Sadovnikov IE. Features of energy characteristics of the light technological environment during laser and laser-arc processing of metals with fiber lasers. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2024;1:29–36. (In Russ.) EDN: BCWXLL

ОБ АВТОРАХ

***Ольга Алексеевна Крючина**, начальник отдела сертификации, аттестации и стандартизации, ООО «ВПГ Лазеруан»; адрес: 141190, Фрязино, площадь академика Б.А. Введенского, д. 3 стр. 5; ORCID: 0000-0001-7592-0790; eLibrary SPIN: 6825-1469; e-mail: oKryuchina@vpglaserone.ru

Игорь Николаевич Шиганов, д-р техн. наук, профессор кафедры лазерные технологии в машиностроении, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; eLibrary SPIN: 7316-1459; e-mail: inshig@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

***Olga A. Kryuchina**, Head of the Certification, Attestation and Standardization Department, LLC NTO IRE-Polus; address: 141190, Fryazino, Academician B.A. Vvedensky Square, 3 bld. 5; ORCID: 0000-0001-7592-0790; eLibrary SPIN: 6825-1469; e-mail: oKryuchina@ntoire-polus.ru

Igor N. Shiganov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Moscow State Technical University named after Bauman; eLibrary SPIN: 7316-1459; e-mail: inshig@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author