Проблемы контроля температуры при лазерной обработке металлов с использованием тепловизора

A.A. Гайна 1* A.A. Можайко 2

¹Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Институт компьютерных наук и кибербезопасности, киберфизические системы и технологии Россия, 194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29

²НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» Россия, 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная улица, д. 49

(Поступила в редакцию 09.06.2025; подписана в печать 16.06.2025)

В работе проведены исследования относительной погрешности измерений температуры во время лазерного упрочнения конструкционной стали с использованием тепловизора, работающего в среднем инфракрасном диапазоне (8–14 мкм). Исследовано влияние коэффициента излучения и размера области воздействия лазера (диаметр лазерного луча) на относительную погрешность измерений. Эксперименты проводились на установках LENS 750 и ЛС 10 с диаметром лазерного луча, составляющим 600 мкм и 6 мм соответственно. Установлено, что изменение коэффициента излучения оказывает слабое влияние на относительную величину разброса значений, измеренных тепловизором. При сравнении результатов, полученных на разных установках, продемонстрировано, что увеличении области воздействия лазера с 600 мкм до 6 мм приводит к уменьшению относительной погрешности измерений с 8.36% до 4.61 %. Результаты исследования показали необходимость комплексной калибровки системы для обеспечения точного измерения температуры поверхности.

PACS: 81.70.-q УДК: 620.179.132

Ключевые слова: лазерная обработка, сталь, тепловизор, коэффициент излучения, разрешающая способность, относительная погрешность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерные технологии являются ключевым элементом современной промышленности благодаря своей многофункциональности и высокой точности. Они находят применение в широком спектре областей, включая резку, сварку, наплавку, маркировку, аддитивные технологии, а также поверхностное упрочнение материалов, такие как закалка, поверхностное легирование [1-6]. Высокая концентрация энергии лазерного излучения позволяет достигать экстремальных температур и скоростей нагрева/охлаждения, что способствует формированию уникальных структурных и физикомеханических характеристик обрабатываемых материалов. Эффективность процессов лазерной обработки, в частности термоциклических методов упрочнения, таких как закалка, зависит от строгого контроля температурных полей [7].

В процессе лазерной закалки необходимо обеспечить достижение температуры выше точки фазового превращения с последующим быстрым охлаждением. Особое внимание следует уделять предотвращению локальных перегревов и неоднородностей в распределении тепловой энергии, что особенно критично при обработке деталей сложной геометрической формы [8]. Для этого требуется внедрение систем прецизионного мониторинга температуры поверхности в реальном времени, что позволит адаптировать параметры лазерного излучения и обеспечит высокое качество упрочненного слоя [9].

Цель данной работы — исследовать влияние параметров тепловизора, таких как коэффициент излучения и размер области воздействия лазера, на точность измеряемой температуры.

Традиционно для мониторинга температуры используются пирометрические устройства, обеспечивающие измерение температуры в одной точке, что существенно ограничивает их применение при контроле сложных технологических процессов [10]. Тепловизионные системы, в свою очередь, обладают рядом преимуществ, таких как устойчивость к экстремальным условиям эксплуатации, возможность дистанционного и неконтактного контроля, а также способность визуализировать тепловые поля зоны обработки. Это позволяет осуществлять мониторинг распределения температур, выявлять области перегрева и оперативно корректировать параметры процесса [11].

Таким образом, тепловизионные системы представляют собой перспективный инструмент для обеспечения высокого качества лазерной обработки, в особенности деталей сложной конфигурации. Тем не менее, их внедрение требует тщательного анализа специфических проблем, связанных с интеграцией в производственные процессы и адаптацией к условиям промышленного применения.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОЛЫ

В качестве исходного материала для проведения эксперимента использовался образец конструкционной судостроительной стали марки E40. Химический состав данной марки стали представлен в таблице.

Для проведения экспериментальных исследований

^{*} gajna.aa@edu.spbstu.ru

Таблица. Химический состав стали марки Е40 в процентном соотношении

Fe	С, не более	Si	Mn	Ni, не более	Cr, не более	V
96	0,18	0,15-0,5	0,9-1,6	0,4	0,2	0,05-0,1

были задействованы две установки: LENS 750 [13] и ЛС-10 [14]. С помощью установки LENS 750 были обработаны квадратные участки размером 1 см \times 1 см, а также были нанесены единичные треки с разной мощностью лазерного излучения. Толщина образца составляла 5 мм.

Установка LENS 750 оснащена лазером с длиной волны 1.064 мкм и максимальной мощностью 500 Вт. Механическая система движения включает перемещение платформы в плоскости XY и лазерной головки в вертикальном направлении Z. Режимы лазерной обработки поверхности характеризовались постоянным диаметром лазерного луча, составляющим 600 мкм, и скоростью сканирования 17 мм/с. Мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 100 до 500 Вт.

Установка ЛС-10 оснащена иттербиевым волоконным лазером длиной волны 1.070 мкм и максимальной мощностью 10 кВт. Механическая система движения включает перемещение лазерного луча по прямой траектории. Режимы лазерной обработки характеризовались постоянным диаметром лазерного луча, составляющим 6 мм и скоростью сканирования 10.7 мм/с. Мощность лазерного излучения изменялась в диапазоне от 0.27 до 2.5 кВт.

Для оценки температур в процессе лазерной обработки поверхности использовалась тепловизионная камера KARNEEV UR-160 4, оснащённая современным неохлаждаемым микроболометрическим детектором с разрешением в 160×120 пикселей. Тепловизор работает в среднем инфракрасном диапазоне, охватывая спектральный интервал от 8 до 14 мкм. Этот диапазон соответствует характеристикам теплового излучения большинства объектов, что делает устройство универсальным инструментом для различных областей применения, включая мониторинг тепловых процессов. Погрешность тепловизора, заявленная производителем, составляет 2%.

При проведении эксперимента по лазерной обработке образца из стали марки E40 с помощью тепловизора проведены измерения температурного поля. Тепловизор размещался на расстоянии 35–45 см от образца под углом 45°. На основе полученных данных построены зависимости максимальной температуры от времени при разных мощностях лазерного излучения и различных настройках коэффициента излучения на тепловизоре. Стандартное значение коэффициента излучения для стали составляет 0.96. Это значение было выставлено при измерениях на LENS 750. Далее значение было изменено на 0.1 для исследования влияния значения коэффициента излучения на результаты измерений тепловизора. При проведении эксперимента

на установке ЛС-10, значение коэффициента излучения было скорректировано до 0.3. Такое значение коэффициента излучения было выбрано с учётом состояния поверхности обрабатываемого материала при помощи параллельного измерения пирометром, регистрирующим коротковолновое инфракрасное излучение.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента по лазерной обработке образца из стали марки E40 на установке LENS 750 при использовании тепловизора были обнаружены значительные расхождения в полученных значениях температуры. На рис. 1 представлена зависимость максимальной температуры от времени при мощности лазерного излучения 400 Вт и коэффициенте излучения 0.96. Плотность энергии излучения составила 39.2 МДж/м², среднее значение максимальной температуры составило 349.6°C, среднеквадратичное отклонение составило 33°C. Относительная погрешность измерений составила 7.42%.

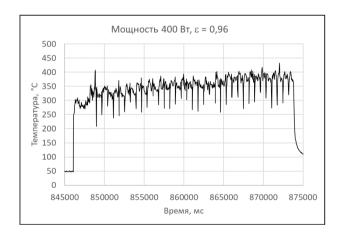


Рис. 1. График изменения максимальной температуры образца во время лазерного воздействия на установке LENS 750 при мощности 400Вт и коэффициенте излучения 0.96

Такое высокое значение относительной погрешности измерений может быть вызвано несколькими факторами. Во-первых, разрешающая способность тепловизора может быть недостаточной для точного определения области с максимальной температурой, т.е. размер пикселя сопоставим или больше ванны расплава. Таким образом, тепловизор усредняет температуру, что приводит к нестабильности показаний. Чтобы обеспечить точность измерений температуры, заявленную производителем, необходимо, чтобы размер мишени на поверхности образца соответствовал разрешаю-

УЗФФ 2025 2541101-2

щей способности используемого тепловизионного оборудования. Во-вторых, отражённое лазерное излучение может исказить результаты измерений. Для минимизации этого влияния рекомендуется использовать оптические фильтры перед камерой тепловизора, которые блокируют свет с длиной волны, близкой к длине волны используемого лазера [15]. Альтернативным решением может быть регулировка угла наклона тепловизора для снижения количества отражённого света. В результате проведенного эксперимента были зафиксированы резкие перепады температуры и заниженные значения максимальной температуры, что связано с некорректным подбором коэффициента излучения для тепловизора и низким разрешением.

При уменьшении коэффициента излучения до 0.1, максимальная температура значительно повысилась, как видно из рис. 2.

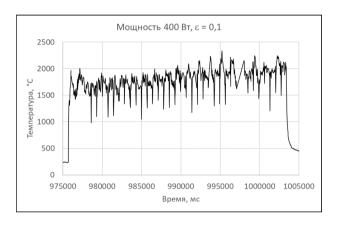


Рис. 2. График изменения максимальной температуры образца во время лазерного воздействия на установке LENS 750 при мощности 400 Вт и коэффициенте излучения 0.1

Среднее значение температуры составило 1809.2°С, среднеквадратичное отклонение значений максимальной температуры составило 198.1°С. Относительная погрешность измерений составила 8.36%, что соизмеримо со значением, полученным в эксперименте с коэффициентом излучения 0.96. Можно сделать вывод, что изменение коэффициента излучения оказывает слабое влияние на относительную величину погрешности значений, измеренных тепловизором. Сохраняется нестабильность измерений.

Для точного подбора значения коэффициента излучения следует применять дополнительные внешние измерения в коротковолновом спектре инфракрасного излучения [16], где коэффициент излучения имеет более стабильное значения, приближённое к единице.

На рис. З представлено изменение максимальной температуры во время лазерной обработки поверхности стали E40 с помощью установки ЛС-10 при мощности 2.5 кВт, что соответствует плотности энергии излучения при проведении эксперимента на LENS 750 при мощности 400 Вт. При помощи параллельных измерений с помощью пирометра был выбран коэффи-

циент излучения 0.3. Результаты эксперимента показали, что в первые 1–1.5 с лазерной обработки стали Е40 наблюдаются значительные скачки температуры до 5000°С. Исходя из того, что в эксперименте на установке LENS 750 данных скачков не наблюдалось, то можно сделать вывод, что скачки вызваны оптическими эффектами, такими как образование плазмы или газового пара при взаимодействии лазерного излучения с воздухом [?]. Кроме того, фиксированное значение коэффициента излучения тепловизора 0.3 не учитывало динамическое изменение эмиссионной способности материала, что приводило к завышенным значениям температуры.

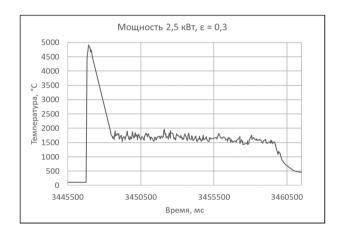


Рис. 3. График изменения максимальной температуры образца во время лазерного воздействия на установке ЛС 10 при мощности 2,5 кВт и коэффициенте излучения 0.3

Среднее значение температуры составило 1655.9°С, среднеквадратичное отклонение значений максимальной температуры составило 96.1°С. Относительная погрешность измерений получилась 4.61%, что значительно меньше аналогичного значения в предыдущих двух экспериментах. Можно сделать вывод, что при увеличении размера мишени (лазерного пучка) уменьшается относительная погрешность значений температуры, что приводит к более стабильным измерениям максимальной температуры поверхности и минимизирует ошибки в измерениях. Но при этом, заявленная производителем относительная погрешность в 2% так и не была достигнута.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования на установках LENS 750 (диаметр луча 600 мкм) и ЛС-10 (диаметр луча 6 мм) с использованием тепловизора позволили выявить ключевые факторы, ограничивающие точность температурных измерений при тепловизионном контроле лазерной обработки конструкционной стали. Анализ относительной погрешности измерений максимальной температуры показал, что изменение коэффициента излучения оказывает незначитель-

УЗФФ 2025 2541101-3

ное влияние на величину относительной погрешности регистрируемых тепловизором значений. Установлено, что увеличение диаметра области лазерного воздействия с 600 мкм до 6 мм приводит к существенному уменьшению относительной погрешности измерений — с 8.36% до 4.61% соответственно.

Учитывая выявленные факторы, для повышения точности тепловизионного контроля предложено несколько решений. Точное определение и задание коэффициента излучения, соответствующего состоянию поверхности материала и условиям эксперимента, обеспечит достоверность измерений температуры поверх-

ности. Оптимизация расстояния и угла наблюдения позволит снизить разброс значений при измерениях тепловизором. В дальнейшем планируется применение оптического фильтра, блокирующего длину волны используемого лазера, что позволит устранить влияние паразитного отраженного излучения. Реализация указанных рекомендаций позволит снизить суммарную погрешность измерений до уровня, сопоставимого с метрологическими характеристиками тепловизора, и обеспечить требуемую точность контроля температуры в процессе лазерной обработки стальных поверхностей.

- [1] Филипов А.И. // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее. 2020. С. 178–181
- [2] *Маликов А.Г., Гольшев А.А., Витошкин И.Е.* // Прикладная механика и техническая физика. **64**, № 1. 36 (2023).
- [3] *Можайко А.А., Геращенков Д.А., Старицын М.В.* // Вопросы материаловедения. **110**, № 2. 44 (2022).
- [4] *Гайна А.А., Можайко А.А., Давыдов В.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физикоматематические науки. **17**, № 3.1. 84 (2024).
- [5] Минаев И.В. и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. № 3. 50 (2014).
- [6] Mozhayko A.A., Gerashchenkov D.A., Davydov V.V. // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. **68**, N 3.1. 227 (2023).
- [7] Jach J. // Crystals. 14, N 8. 726 (2024).
- [8] *Idan A.F.I.* et al. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. **2**, № 5 (80). 69 (2016).

- [9] Klocke F., Schulz M., Grôfe S. // Coatings. 7, N 6. 77 (2017).
- [10] Young-Tae Yoo, Ho-Jun Shin Advanced Nondestructive Evaluation II: Volume 1. 2008. P. 752–756.
- [11] Tesar J. et al. // Advances in Optical Technologies. 2012, N 1. 593893 (2012).
- [12] Hofmeister W., Griffith M., Ensz M., Smugeresky J. // JOM. N 53, 30 (2001).
- [13] *Шамов Е.М.* и др. // Сварочное производство. № 6. 17 (2020).
- [14] Kalyani V.L., Sharma V. // Journal of Management Engineering and Information Technology. 3, N 3. 12 (2016).
- [15] Прошкин С.С. // Вестник Международной академии холода. № 1. 51 (2014).
- [16] Kartashov D.V. et al. // Optics Express. 14, N 17. 7552 (2006).

Problems of temperature control in laser metalworking using a thermal imager A.A. Gajna^{1,a}, A.A. Mozhayko²

¹Institute of Computer Science and Cybersecurity, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg 194064, Russia

²SIC «Kurchatov Institute» – Central Research Institute of KM «Prometheus».
St. Petersburg 191015, Russia
E-mail: ^agajna.aa@edu.spbstu.ru

The paper investigates the relative error of temperature measurements during laser hardening of structural steel using a thermal imager operating in the mid-infrared range (8–14 μ m). The effect of the radiation coefficient and the size of the laser exposure area (diameter of the laser beam) on the relative measurement error is investigated. Experiments were carried out on LENS 750 and π C 10 installations with laser beam diameters of 600 μ m and 6 mm, respectively. It is established that changing the radiation coefficient has a weak effect on relative magnitude spread of values measured by thermal imagers. When comparing results obtained at different installations, increasing laser exposure areas from 600 μ m to 6 mm leads to a decrease relative measurement error from 8.36% to 4.61%. The results of the study showed the need for comprehensive calibration of the system in order to ensure accurate measurement of surface temperature.

PACS: 81.70.-q

Keywords: laser treatment, steel, thermal imager, emissivity coefficient, thermal imager resolution, relative measurement error.

Received 09 June 2025.

Сведения об авторах

- 1. Гайна Анна Алексеевна студент; e-mail: gajna.aa@edu.spbstu.ru.
- 2. Можайко Анна Анатольевна инженер; тел.: (812) 335-58-44, e-mail: annaanna-1996@mail.ru.

УЗФФ 2025 2541101-4