

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В. А. Фираго^{1*}, О. Г. Девойно², А. С. Лапковский², А. Н. Собчук³

УДК 53.082.5;621.373.826

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-568-579>

¹ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: firago@bsu.by

² Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

³ Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

(Поступила 17 апреля 2022)

Проанализированы возможности тепловизионной и спектральной техники при организации контроля лазерных технологических процессов высокотемпературной модификации конструкционных материалов. Показано, что применение тепловизионной техники целесообразно при наладке этих процессов. Для непрерывного контроля более перспективно применение малогабаритной спектральной техники. Предложены решения, которые позволяют с ее помощью вести непрерывный контроль на основе определения двух параметров — эффективной температуры нагрева обрабатываемой поверхности в области воздействия лазерного излучения и параметра, связанного с эффективной площадью нагрева. Показана перспективность внедрения малогабаритных спектральных устройств непрерывного контроля в петлю обратной связи системы управления лазерными установками.

Ключевые слова: мультиспектральная техника, термография, спектральная пирометрия, контроль лазерных процессов.

The possibilities of thermal imaging and spectral technology in organization of the control of laser technological processes of high-temperature modification of structural materials are analyzed. It is shown that the application of thermal imaging technology is reasonable when adjusting these processes. For continuous control it is more perspective to apply small spectral technique. Solutions are proposed that allow continuous monitoring on the basis of determination of two parameters: the effective heating temperature T_e of the treated surface in the area of influence of laser radiation and parameter a associated with the effective heating area. It is shown that introduction of small-sized spectral devices for continuous monitoring into the feedback loop of the control system for laser set-ups is promising.

Keywords: multispectral technology, thermography, spectral pyrometry, laser process control.

Введение. Лазерная обработка конструкционных материалов — динамично развивающееся направление современного машиностроения [1, 2]. Лазерная резка, гравировка, закалка, сварка, нанесение износостойких покрытий и т. п. являются популярными энергосберегающими технологиями обработки различных материалов [3, 4]. Появившаяся с развитием мощных оптоволоконных лазеров возможность обрабатывать и изготавливать из порошковых материалов сложные трехмерные изделия, совмещающая в одной конструкции разнородные трудно соединяемые материалы, чрезвычайно привлекательна для предприятий машиностроения [5, 6]. Снижение стоимости оптоволоконных лазеров позволяет шире внедрять различные лазерные установки в технологические процессы современного машиностроения. Для обеспечения стабильного качества результатов обработки эти установки оснащаются устройствами непрерывного контроля проводимых процессов [7, 8], которые должны быть бесконтактными [9].

CONTROL OF LASER PROCESSING OF STRUCTURAL MATERIALS USING THERMAL IMAGING AND SPECTRAL TECHNOLOGY

V. A. Firago^{1*}, O. G. Devoino², A. S. Lapkovsky², A. N. Sobchuk³ (¹ Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: firago@bsu.by; ² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;

³ B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)

В процессе длительной эксплуатации мощных лазерных установок возникает деградация их параметров, обусловленная старением и постепенным выходом из строя используемых источников излучения, фокусирующих линз, сканирующих элементов и т. д. Поэтому непрерывный контроль проводимых лазерных процессов — обязательное условие поддержания качества выполняемой обработки. Контроль необходим и на стадии наладки и оптимизации технологической операции, поскольку при настройке процесса определяются оптимальные параметры (мощность лазерного излучения, эффективный диаметр его пучка, воздействующего на обрабатываемый материал, скорость сканирования, температура в области воздействия и т. д.) и границы их допустимых отклонений.

При разработке технологий лазерной обработки применяются трехмерные математические модели, основанные на нелинейных уравнениях теплопроводности с нелинейными краевыми условиями [10, 11]. В качестве параметров используются пространственное и временное распределение интенсивности лазерного излучения в пятне контакта, коэффициент отражения излучения, теплопроводность материала, его плотность, состав, удельная теплоемкость и т. д. [12]. Принимаются во внимание изменения коэффициента отражения при плавлении материала и его испарении, а также наличие парогазового канала, возникающие гидродинамические явления, параметры плазменного факела и т. д.

Поскольку процессы лазерной сварки, наплавки, легирования сопровождаются изменением химического состава и, соответственно, теплофизических свойств зоны обработки, возможности расчетных моделей этих процессов ограничены. Поэтому при наладке процессов упрочнения, сварки и наплавки необходимо ведение объективного бесконтактного контроля наиболее существенных параметров в области воздействия лазерного излучения [13, 14]. Подробное обсуждение проблем непрерывного контроля лазерных процессов представлено в обзорах [15, 16], однако там не дано ясных указаний, какая аппаратура и какие бесконтактные способы должны использоваться при контроле лазерных процессов обработки материалов. Из перечисленных выше параметров размеры лазерного пучка, сфокусированного на обрабатываемой поверхности, и температура в области его контакта с обрабатываемым материалом подлежат обязательному контролю, поскольку они в первую очередь определяют реальную мощность воздействия лазерного излучения.

В настоящей работе рассматриваются проблемы создания устройств, обеспечивающих надежный непрерывный контроль основных параметров и минимизацию затрат на их внедрение в систему управления лазерной установкой.

Непрерывный контроль поверхностного распределения температуры $T(x,y)$. Для контроля процессов высокотемпературной лазерной обработки в ведущих лабораториях мира используются высокоскоростные RGB-видеокамеры, а также пирометры и тепловизоры или термографы, работающие в диапазоне 8—14 мкм [17, 18]. Например, при создании перспективных технологий 3D-печати изделий из композиционных материалов оптимизацию режимов процессов спекания порошков предлагается проводить с применением скоростных видеокамер [19]. Температура в зоне плавления определяется на основе температуры частичной радиации $T_{\text{чр}}$, которая измеряется с помощью ИК-видеокамеры с матрицей фотоприемников на основе InGaAs с диапазоном 1.1—1.7 мкм [20, 21]. Коэффициент теплового излучения ϵ , необходимый для пересчета температуры частичной радиации $T_{\text{чр}}$ в истинную T , определяют расчетным путем с использованием измеренных тепловых потоков в точках плавления порошкового материала с заданными температурами. Для определения электронной температуры плазменного факела применяют спектроскопию в видимой области, а для измерений температуры поверхности стали в области воздействия лазерного пучка — сложную технику двухцветной и четырехцветной термографии с использованием дополнительной тепловизионной камеры диапазона 3—5 мкм [21]. Применяются и гиперспектральные способы визуализации температурных полей в пятне воздействия лазерного излучения [22], которые основаны на использовании мультиспектральных видеокамер, регистрирующих тепловое излучение в восьми участках спектра, и последующей подгонке получаемых зависимостей к функции Планка.

Подробно проблемы, возникающие при определении температурных полей $T(x,y)$ с помощью тепловизионной техники, рассмотрены в [23, 24]. Показано, что для ее эффективного использования необходимо: минимизировать неопределенность результатов измерения температуры T путем оптимального выбора спектральных участков регистрации теплового излучения и исключения влияния отклонения градуировочных кривых от расчетных зависимостей; определять максимальную температуру тела T_{max} и ее зависимость от времени; обеспечивать инвариантность результатов определения максимальной температуры T_{max} к изменению размеров изображения контролируемых тел; минимизировать влияние на измеряемые значения T нестационарности дисперсии шумов используемой мат-

рицы фотоприемников при изменении интенсивности регистрируемых потоков теплового излучения за счет неоднородности состояния обрабатываемой поверхности; существенно снизить потоки поступающих данных для их обработки контроллером системы управления лазерной установкой; а также определять временные зависимости эффективных значений температуры $T_{\text{eff}}(t)$ и параметра $a(t)$, связанного с эффективным диаметром пятна контакта d_{eff} , при воздействии как непрерывным, так и импульсным лазерным излучением.

При использовании регистрации теплового излучения в одном участке спектра возможно определение только температуры $T_{\text{чр}}$. При необходимости измерения истинной температуры T используются сведения о коэффициенте теплового излучения ε обрабатываемого материала. Регистрация теплового излучения в двух участках спектра дает возможность измерять температуру T “серых” тел с постоянным спектральным коэффициентом теплового излучения $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$. При использовании трех участков спектра можно определять температуру материалов, у которых $\varepsilon(\lambda)$ аппроксимируется зависимостью, описываемой двумя параметрами, например $\varepsilon(\lambda) = a + b\lambda$, с очевидным ограничением $0 < \varepsilon(\lambda) < 1$. Это позволяет составить систему из трех нелинейных уравнений [24] и при ее решении найти T [25].

Дальнейшему наращиванию количества используемых участков спектра препятствуют отклонение реальной зависимости $\varepsilon(\lambda)$ от ее аппроксимаций с тремя и более параметрами, которое непременно возникает при расширении области спектра, а также возрастающее влияние нестационарности шумов матрицы фотоприемников, вызываемое как изменением интенсивности регистрируемых потоков [26], так и неоднородностью поверхности обрабатываемого материала. К тому же возможности мультиспектральных матриц фотоприемников при измерении T по тепловому излучению ограничены, поскольку заметное перекрытие их спектральных характеристик [27] существенно снижает устойчивость решения системы нелинейных уравнений. Очевидно, что практическое применение при контроле температуры поверхностей с неизвестным спектральным коэффициентом теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ может найти только достаточно простая тепловизионная техника, регистрирующая тепловое излучение не более чем в трех участках спектра, расположенных в неширокой области, оптимальной для диапазона измеряемых температур.

Большая часть требований к современной высокотемпературной тепловизионной технике реализована в мультиспектральном термографе ТМ-3, разработанном в ИТМО им. А. В. Лыкова совместно с сотрудниками БГУ. Нормированный диапазон измеряемых температур ТМ-3 составляет 900—2250 °С с возможностью его расширения до 3000 °С путем экстраполяции градуировочных зависимостей. Тепловое излучение регистрируется одновременно в трех участках в диапазоне 640—840 нм. Имеются опции определения T_{max} и коэффициента теплового излучения ε . Питание регистрирующей камеры осуществляется от интерфейса USB ноутбука или планшета, которые используются для управления камерой и визуализации исследуемых температурных полей.

Опыт применения ТМ-3 для контроля лазерных процессов показал его эффективность при проведении наладочных работ. Однако включение его в состав аппаратуры для непрерывного контроля нецелесообразно по ряду причин, связанных в основном с увеличением габаритов используемого объектива, требования его защиты от паров обрабатываемых металлов, сложными алгоритмами расчета температурных полей, а также большим объемом обрабатываемых видеопотоков. Поэтому для организации непрерывного контроля необходимы более простые технические решения.

Возможности спектральной техники. Спектральная пирометрия [28] основана на выражениях, следующих из приближения Вина, которое справедливо в ограниченном диапазоне спектра теплового излучения:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda}\right) \rightarrow \ln \varepsilon(\lambda) - \ln \frac{\lambda^5}{c_1} M(\lambda, T) = \frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda} \rightarrow \gamma(\chi) = \frac{1}{T} \chi - \ln \varepsilon(\chi), \quad (1)$$

где $M(\lambda, T)$ — спектральная плотность светимости абсолютно черного тела (АЧТ); c_1 и c_2 — первая и вторая постоянные излучения; $\chi = c_2/\lambda$; $\gamma = -\ln[(\lambda^5/c_1)M(\lambda, T)]$. С помощью (1) можно точно определить температуру T абсолютно черных и “серых” тел по коэффициенту наклона b линейной зависимости $\gamma = f(\chi) = a + b\chi$:

$$T = \frac{\Delta\chi}{\Delta\gamma + \ln[\varepsilon(\chi)/\varepsilon(\chi + \Delta\chi)]} = \frac{\Delta\chi}{\Delta\gamma}. \quad (2)$$

Для “серых” тел с $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$ наклон линейной зависимости (1) не изменяется, но регистрируемые значения линеаризованного спектра $\gamma(\chi)$ сдвигаются вверх за счет величины $\ln(\varepsilon)$, поскольку $0 < \varepsilon \leq 1$. При этом линейной экстраполяцией зависимости $\gamma(\chi)$ легко найти значение $\varepsilon = \exp[-\gamma(\chi = 0)]$. В случаях $\varepsilon(\lambda) \neq \text{const}$ определение температуры осложняется наличием множества равноправных вариантов. Действительно, для некоторого диапазона температур всегда можно подобрать набор зависимостей $\varepsilon(\lambda)$, которые формируют при разных T одну и ту же зависимость $\gamma(\chi)$ [26]. Необходимо вводить ограничения на возможную форму зависимости $\varepsilon(\lambda)$, уменьшать диапазон спектра регистрации теплового излучения и применять аппроксимационные выражения для $\varepsilon(\lambda)$ с минимумом варьируемых параметров.

Лазерные процессы обработки отличаются малой областью воздействия и наличием сильного изменения T как по поверхности обрабатываемого материала, так и по его глубине [29]. Поэтому для определения T_{max} по спектру используют схему измерений, представленную на рис. 1. При применении оптоволоконной техники на торце приемного оптоволоконна 2 спектрометра 3 формируется изображение центрального участка пятна контакта лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью, что позволяет на основе (2) определять T_{max} [29]. Однако в лазерных головках современных установок на мощных оптоволоконных лазерах используется быстрое периодическое сканирование обрабатываемой поверхности лазерным пучком с помощью подвижных оптических элементов, что значительно усложняет конструкцию лазерной головки. Дихроичное зеркало 7 в канале подвода лазерного излучения пропускает мощный лазерный пучок с длиной волны λ_{lw} и ответвляет часть обратно распространяющегося более коротковолнового излучения с $\lambda < \lambda_{\text{lw}}$, которое формируется в области обработки, на объектив спектрофотометра 1. В его фокусе размещают торец оптоволоконна 2 спектрометра 3. Очевидно, при наличии системы периодического сканирования пучком обрабатываемой поверхности необходимо решение, которое позволяет непрерывно определять временные зависимости эффективной температуры $T_{\text{eff}}(t)$ поверхности во всей зоне воздействия лазерного излучения и параметра $a(t)$, связанного с эффективным диаметром d_{eff} пятна контакта лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью.

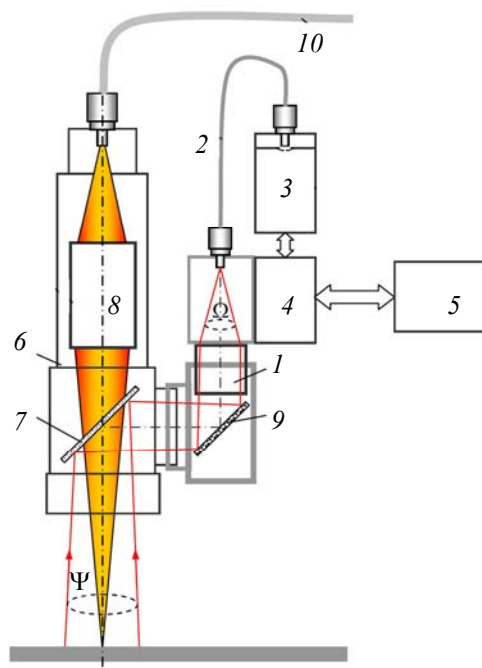


Рис. 1. Схема устройства для непрерывной регистрации спектра светового излучения, формирующегося в области контакта мощного лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью: 1 — приемный объектив спектрофотометра, 2 — оптоволоконно, 3 — спектрофотометр, 4 — микропроцессор спектрофотометра, 5 — устройство управления лазерной установкой, 6 — корпус лазерной головки, 7 — поворотное дихроичное зеркало, 8 — коллиматор лазерного излучения, 9 — поворотное зеркало, 10 — оптоволоконно, через которое подводится мощное лазерное излучение

Предлагаемое решение заключается в расширении мгновенного поля зрения традиционной схемы измерений исходного спектра $s(\lambda, x_0, y_0)$ с одновременным пространственным интегрированием по нему, обеспечивающим одинаковый вклад излучения каждой точки этого поля в результирующий спектр $S(\lambda)$. Для этого используются поворотное зеркало 9 и малогабаритный объектив 1, в фокальной плоскости которого размещается торец оптоволокну 2. Фокусное расстояние объектива f и диаметр его выходного зрачка подбираются такими, чтобы границы телесного угла Ω не выходили за пределы плоского угла α (α соответствует $2\arcsin(NA)$, где NA — числовая апертура оптоволокну 2, определяется как синус половины плоского угла α при вершине конуса собираемых оптоволокну лучей $NA = \sin(\alpha/2)$). В спектрометрии обычно используют оптоволокну с $NA = 0.22$, поэтому $\alpha \approx 26^\circ$. Тогда диаметр входного зрачка объектива 1, его фокусное расстояние f и диаметр d_F световода оптоволокну 2 определяют телесный угол Ψ , в котором собирается излучение обрабатываемой поверхности.

Излучение, попадающее в световод оптоволокну 2, в процессе распространения за счет многократного полного внутреннего отражения перемешивается, и формируется однородная освещенность $E(x, y)$ выходного торца оптоволокну 2. Излучение, выходящее из торца оптоволокну 2, равномерно освещает входную щель спектрометра 3. Применение оптоволокну обеспечивает пространственное интегрирование, т. е. одинаковый вклад излучения каждой точки внутри площадки, ограниченной мгновенным полем зрения, в регистрируемый спектрометром 3 интегральный спектр $S(\lambda)$. Это позволяет проводить регистрацию $S(\lambda)$ с периодом дискретизации порядка нескольких миллисекунд и при применении достаточно быстрого микропроцессора 4 оперативно рассчитывать эффективную температуру $T_{\text{eff}}(t_i)$ и параметр $a(t_i)$. Предлагаемое определение интегрального по мгновенному полю зрения спектра $S(\lambda)$ позволяет примерно на три порядка по сравнению с тепловизионной техникой снизить поток данных, которые должны обрабатываться при расчете $T_{\text{eff}}(t_i)$ и $a(t_i)$. Их можно непрерывно передавать в контроллер управления лазерной установкой для использования в петле обратной связи контура автоматического поддержания параметров проводимого технологического процесса. Поскольку расширение мгновенного поля зрения приводит к вкладу в интегральный спектр $S(\lambda)$ излучения участков обрабатываемой поверхности с разной температурой, необходимо провести оценку отклонения регистрируемых значений $\gamma(\chi)$ от линейной зависимости (1) при неоднородном распределении температуры $T(x, y)$.

Оценка влияния профиля лазерного пучка и его расфокусировки на отклонение от линейности регистрируемой зависимости $\gamma(\chi)$. Неравномерный профиль освещенности в области контакта лазерного пучка с поверхностью обрабатываемого материала приводит к неравномерному нагреву и неоднородности температурного поля $T(x, y)$. Это вызывает сильную неоднородность спектральной плотности яркости оптического излучения $L[\lambda, T(x, y), \varepsilon]$ в области обработки. Для оценки отклонения зависимостей $\gamma(\chi)$, получаемых при контроле лазерных процессов, от линейного закона ($b\chi + a$) необходимо проинтегрировать $L[\lambda, T(x, y), \varepsilon]$ в пределах мгновенного поля зрения спектрофотометра 3. Для этого используем выражение, описывающее пространственное распределение спектральной плотности яркости излучения $L[\lambda, T(x, y), \varepsilon]$ материала в области воздействия мощного лазерного излучения.

В случаях, когда профиль распределения освещенности $E(x, y)$ по сечению пятна контакта лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью примерно равномерный, распределение $T(x, y)$ вследствие перемещения пучка и наличия теплопроводности материала неравномерно. При использовании пучков с гауссовым или супергауссовым распределением $E(x, y)$ неравномерность нагрева $T(x, y)$ больше, поэтому даже приблизительная оценка отклонения $\gamma(\chi)$ от линейности для этих случаев более объективна.

В оптике радиус гауссова пучка излучения r_G определяется через соотношение

$$\Phi_p = \Phi_0 \left[1 - e^{-2\rho^2/r_G^2} \right], \quad (3)$$

где Φ_p — поток через сечение, ограниченное радиусом ρ ; Φ_0 — полный поток излучения в лазерном пучке. При определении r_G на уровне, когда освещенность $E(\rho)$ в пятне контакта лазерного пучка спадает в e^2 раз по сравнению с $E(\rho = 0)$, r_G соответствует радиусу сечения пучка, через которое проходит 0.865 полной мощности пучка, т. е. $\Phi_p/\Phi_0 = 0.865$. На основе такого определения получаем освещенность обрабатываемой поверхности:

$$E(\rho) = \frac{2\Phi_0}{\pi r_G^2} e^{-2\rho^2/r_G^2}. \quad (4)$$

При описании зависимости освещенности $E(\rho)$ от расфокусировки лазерного пучка вдоль его оси, т. е. при смещении сечения вдоль оси z , как показано на рис. 2:

$$r_G(z) = r_{G0} \sqrt{1 + (z/z_R)^2}. \quad (5)$$

Здесь z — смещение от перетяжки, т. е. точки на оси пучка, где радиус пучка r_G минимален, z_R ($2z_R$ — “глубина резкости”) — расстояние от перетяжки, на котором радиус пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз:

$$z_R = \pi \frac{r_G^2}{\lambda_{lw}}, \quad (6)$$

λ_{lw} — длина волны лазерного пучка.

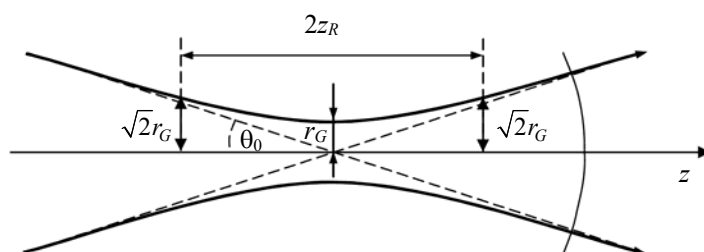


Рис. 2. Определение зависимости радиуса гауссова пучка r_G от расстояния z от перетяжки пучка

Конечное выражение для описания освещенности в пятне контакта лазерного пучка с поверхностью при нормальном падении пучка:

$$E(\rho, z) = \frac{2\Phi_0}{\pi r_G^2(z)} e^{-2\rho^2/r_G^2(z)}. \quad (7)$$

Для приближенного расчета распределения приращений температуры $\Delta T(\rho, z)$ за счет нагрева поверхности неподвижным пучком импульсного лазерного излучения без учета расплывания температуры в стороны воспользуемся выражением

$$\Delta T(\rho, z) = \frac{\varepsilon_b(\lambda_{lw}) E(\rho, z)}{\zeta} \sqrt{\frac{4\alpha t_p}{\pi}}, \quad (8)$$

где $\alpha = \zeta/(\rho_m C)$ — температуропроводность обрабатываемого материала ($\text{см}^2/\text{с}$); ζ — удельный коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$); ρ_m и C — удельные плотность и теплоемкость материала ($\text{г}/\text{см}^3$ и $\text{Дж}/\text{К}$); $\varepsilon_b(\lambda_{lw})$ — коэффициент теплового излучения материала на длине волны излучения лазера; t_p — длительность лазерного импульса.

На рис. 3, а показаны рассчитанные зависимости сечения распределения приращений температуры $\Delta T(\rho)$ поверхности листа нержавеющей стали в пятне контакта лазерного пучка с длительностью импульса излучения $t_p = 3.5$ мкс, длиной волны 1.06 мкм, мощностью $\Phi_0 = 1$ кВт для трех значений z и r_G . При расчетах использованы коэффициенты теплопроводности и температуропроводности нержавеющей стали $\zeta = 0.2$ $\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ и $\alpha = 0.06$ $\text{см}^2/\text{с}$, коэффициент поглощения лазерного излучения $\varepsilon_b(\lambda_{lw}) = 0.35$. Поскольку распределение приращений температуры $\Delta T(\rho, z)$ осесимметричное, его можно дискретизировать, используя систему колец в полярной системе координат, и рассчитать спектральную плотность яркости излучения в каждом кольце. На рис. 3, б показаны спектральные плотности яркости излучения $L(\lambda)$ нержавеющей стали при распределении $\Delta T(\rho, z = 0)$ (рис. 3, а) в разных кольцах с радиусами их осей $5, 45, 65, 85, 105, 125$ мкм и температурами $2828, 2412, 2032, 1620, 1234, 911$ К соответственно, которые расположены в плоскости перетяжки пучка, т. е. при $z = 0$. Полагалось, что коэффициент теплового излучения стали за счет образования при быстром нагреве тонкого слоя окисла равен $\varepsilon_b(\lambda) = 0.6$. Подавляющий вклад в суммарный спектр вносят центральные кольца с высокой температурой, так как по мере удаления от центра сечения пучка спектральная плотность яркости спадает быстрее по сравнению с ростом площади колец.

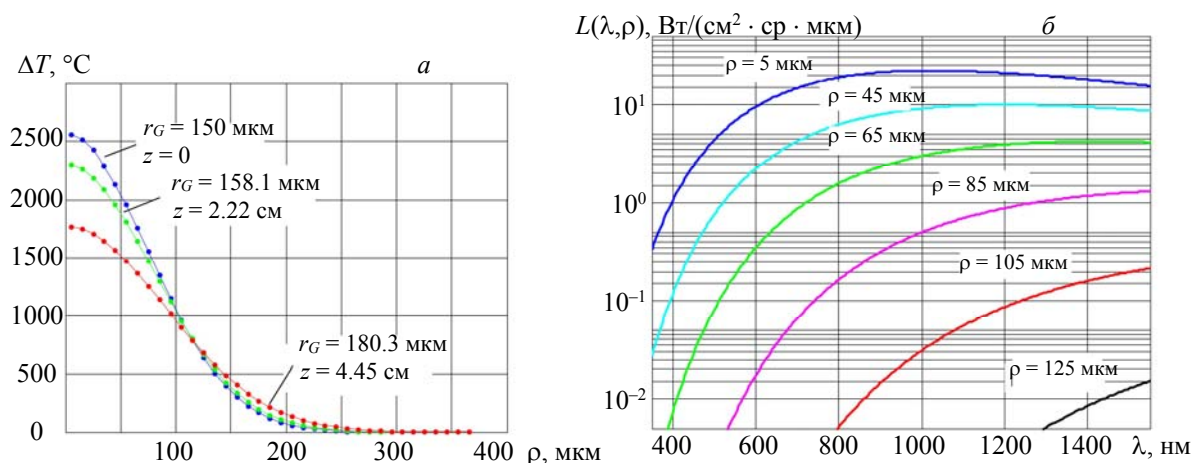


Рис. 3. Смоделированные зависимости температуры нагрева ΔT листовой нержавеющей стали лазерным импульсом с гауссовым профилем мощностью 1 кВт и длительностью 3.5 мкс от расстояния ρ от центра пятна контакта (а) и смоделированные спектральные плотности яркости излучения нержавеющей стали при различных температурах, зависящих от радиуса ρ (б)

Интегрируя спектральную плотность яркости теплового излучения $L(\lambda, \rho)$ поверхности стали в пределах пятна контакта в полярной системе координат, получаем спектральную плотность силы излучения в области воздействия:

$$I_{\Sigma}(\lambda) = \int_0^{\rho_{ul}} L(\lambda, \rho) 2\pi \rho d\rho = \frac{1}{\pi} \int_0^{\rho_{ul}} \varepsilon_b[\lambda, T(\rho)] M[\lambda, T(\rho)] 2\pi \rho d\rho, \quad (9)$$

где $\varepsilon_b[\lambda, T(\rho)]$ — спектральный коэффициент теплового излучения; $M[\lambda, T(\rho)]$ — поверхностная плотность спектральной светимости модели АЧТ при температуре $T(\rho)$; ρ_{ul} — радиус кольца, в котором тепловое излучение в ближней ИК-области $\lambda < 1.5$ мкм мало, т. е. $T(\rho_{ul}) < 500$ °C. Очевидно, мгновенное поле зрения системы для непрерывного контроля процесса нагрева при сканировании поверхности лазерным пучком должно быть намного больше круга радиусом ρ_{ul} . На рис. 4 показаны смоделированные суммарные спектральные плотности силы излучения $I_{\Sigma}(\lambda)$ для различных z в предположении $\varepsilon_b[\lambda, T(\rho)] = 0.6$. Смоделированная форма $I_{\Sigma}(\lambda)$ нелинейная и имеет сходство с функцией Планка. Поскольку расфокусировка лазерного пучка приводит к снижению температуры в области его контакта с поверхностью нержавеющей стали, наблюдаются существенные изменения зависимостей $I_{\Sigma}(\lambda, z)$ при расфокусировке, т. е. при увеличении z .

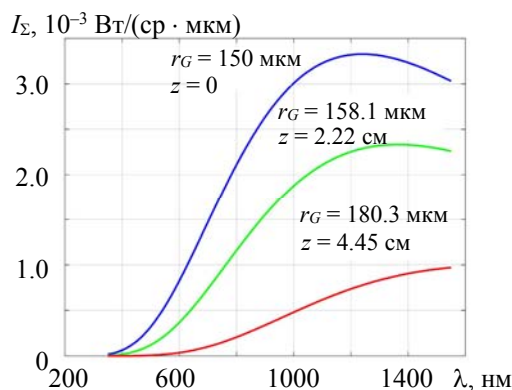


Рис. 4. Смоделированные суммарные спектральные плотности силы теплового излучения $I_{\Sigma}(\lambda)$, формирующиеся в области контакта лазерного пучка с нержавеющей сталью, при различных z

Для правильного измерения температуры T обрабатываемой поверхности необходима предварительная градуировка спектрофотометра, содержащего объектив 1, оптоволокно 2, спектрометр 3 и микропроцессор 4, по излучению модели АЧТ. Тогда при введении понятия эффективной площади теплового излучения поверхности, нагреваемой лазерным пучком, т. е. площади s_{ah} , излучение которой участвует в формировании $S(\lambda)$, можно считать, что составляющие $S(\lambda)$ ослабляются в s_{ah}/s_q раз по сравнению с излучением модели АЧТ, где s_q — площадь выходной апертуры АЧТ, которая полностью вписывается в телесный угол Ψ . Это позволяет представить линеаризованную зависимость (1) в виде

$$\gamma(\chi) = b\chi + a = \frac{1}{T_{\text{eff}}} f\chi - \ln \varepsilon(\chi) - \ln(s_{ah}/s_q) \approx \frac{1}{T_{\text{eff}}} \chi + \ln \left(\frac{s_q}{s_{ah} \bar{\varepsilon}_{\Delta\chi}} \right), \quad (10)$$

где $\bar{\varepsilon}_{\Delta\chi}$ — средний коэффициент теплового излучения нагреваемой поверхности.

На рис. 5 показаны зависимости $\gamma(\chi)$, рассчитанные для линеаризованной спектральной плотности поверхностной светимости излучения АЧТ при температурах 2828, 2573 и 2043 К, которые соответствуют температурам в центральном кольце распределения $T(\rho)$ при z , указанных на рис. 3, а.

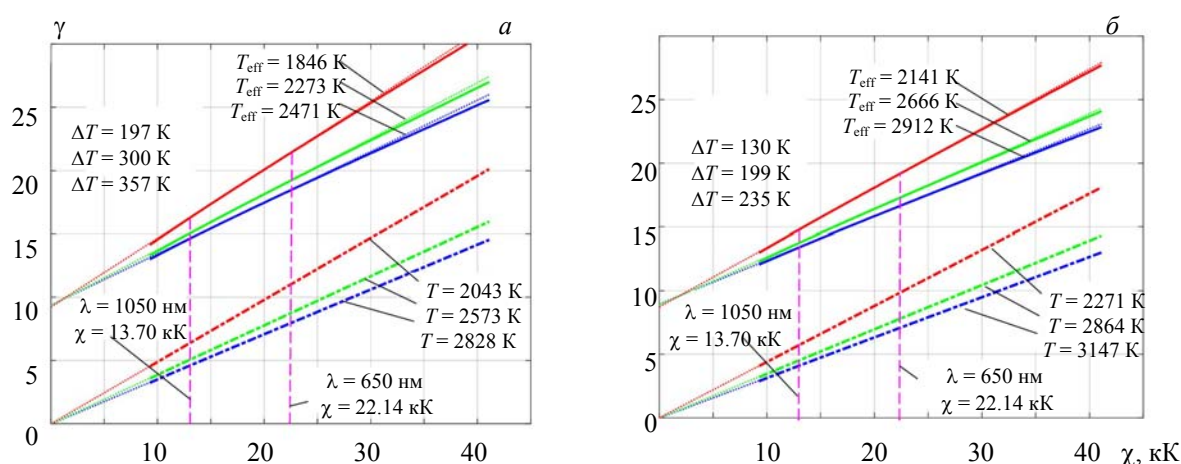


Рис. 5. Линеаризованные спектральные зависимости $\gamma(\chi)$ для модели АЧТ (штриховые линии) с температурами, соответствующими T в центральном кольце смоделированных распределений $T(\rho)$ и усредненной по полю зрения спектрофотометра спектральной силы излучения поверхности нержавеющей стали (сплошные линии), нагреваемой гауссовым (а) и супергауссовым (б) лазерным пучком излучения для различных z

Рассчитанные зависимости $\gamma(\chi)$ (10) для суммарной спектральной силы излучения (9) выше, чем для АЧТ, вследствие малой площади нагреваемого лазером участка поверхности стали, так как $\ln[\varepsilon(\chi)] < 0$ и $\ln(s_{ah}/s_q) < 0$. Их наклон больше, поскольку T_{eff} по участку нагрева, который вносит вклад в спектр $S(\lambda)$, всегда ниже, чем в центре пятна контакта лазерного пучка с нагреваемой поверхностью.

Линейная аппроксимация $\gamma(\chi) = b\chi + a$ рассчитанных зависимостей, которая проводилась на участке от 13.7 до 22.14 кКал, показана на рис. 5 (пунктир). Излучение модели АЧТ в этом диапазоне температур и длин волн точно соответствует линейной зависимости при $a = 0$. Для моделируемого случая наблюдаются отклонения суммарного спектра от приближения Вина, поэтому зависимости, показанные сплошными линиями, содержат небольшую нелинейность, вклад которой заметно снижается при использовании более равномерных распределений интенсивности пучка. Из сравнения рис. 4 и 5, а видно, что при увеличении расфокусировки гауссова пучка разность ΔT между температурой в центре пятна нагрева и T_{eff} уменьшается.

При изменении формы распределения интенсивности в сечении пучка, например в случае лазерного пучка с супергауссовым распределением освещенности

$$E_{sG}(\rho, z) = \frac{2\Phi_0}{\beta\pi r_G^2(z)} e^{-[2\rho^2/r_G^2(z)]^2} \quad (11)$$

($\beta = 0.8867$ — параметр нормировки распределения $E_{sG}(\rho, z)$), изменяется и распределение температу-

ры. При этом суммарная спектральная сила излучения нагретого пятна увеличивается за счет более плоской вершины $E_{sG}(\rho, z)$ и роста средней по пятну температуры, изменяется также форма суммарной зависимости $I_{\Sigma}(\lambda)$ (максимум сдвигается в коротковолновую область). Вследствие более равномерного распределения температуры в пятне контакта супергауссова пучка линейаризованная суммарная спектральная сила излучения более линейная (рис. 5, б), а разность между максимальными в пределах пятна контакта температурами и условными усредненными меньше при увеличении z , т. е. при расфокусировке пучка, что следует из рис. 5.

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод о целесообразности применения эффективной температуры T_{eff} и смещения $a = \gamma$ ($\chi = 0$) при непрерывном контроле лазерных процессов, поскольку они являются интегральными параметрами, зависящими от основных показателей проводимой лазерной обработки.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальная апробация предлагаемого спектрального метода непрерывного контроля осуществлена с помощью макетного образца устройства, состоящего из оптоволоконного спектрофотометра Avantes AvaSpec-2048-USB2-VA-50 с ноутбуком, кварцевого оптоволоконна с диаметром световода 600 мкм и малогабаритного оптического блока фокусировки с встроенным фильтром, подавляющим ИК-излучение на участке ~ 1.06 мкм, в котором генерируют мощные оптоволоконные лазеры. Градуировка образца спектрофотометра проведена по излучению модели АЧТ М395. Измерения проводились на лазерной установке с квазинепрерывным иттербиевым волоконным лазером с $\lambda_{lv} = 1.07$ мкм и максимальной выходной мощностью 1 кВт.

Оптический блок фокусировки с малогабаритным объективом крепился к корпусу двигающейся лазерной головки. Ось объектива оптического блока при регистрации спектров, формирующихся в области воздействия лазерного пучка, направлена под углом 45° к поверхности образцов. Скорость перемещения лазерного пучка по поверхности пластин для образцов пластин из стали марки 45 составляет 500 мм/мин, мощность лазера $\Phi_0 = 0.5$ кВт для образца 1 и $\Phi_0 = 1.0$ кВт для образцов 2 и 3 (рис. 6 и 7). Поверхность образцов шлифовали, что обеспечивало примерно одинаковую шероховатость и очистку от загрязнений и коррозионных участков.

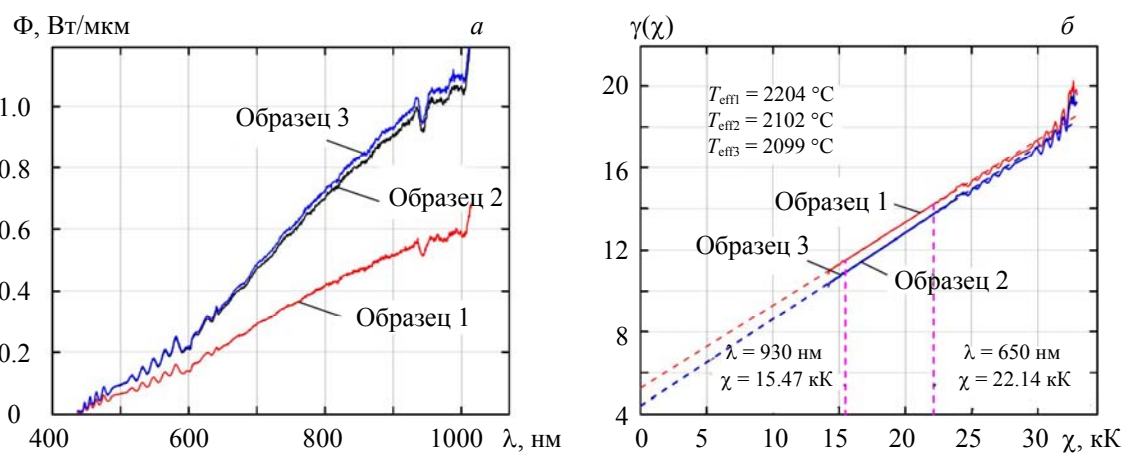


Рис. 6. Зарегистрированные плотности спектральных потоков излучения $\Phi(\lambda)$ поверхности трех образцов стали в полусферу, которые формируются при воздействии лазерного пучка волоконного лазера (а), и их линейаризованные зависимости $\gamma(\chi)$ (б)

При измерениях регистрировались массивы из 850 кадров, т. е. спектров $S(\lambda)$ оптического излучения, с временем экспозиции каждого кадра 5 мс. Частота регистрации спектров 200 Гц достаточна при организации непрерывного контроля многих технологических процессов. Плотности спектральных потоков излучения поверхности исследуемых образцов в полусферу $\Phi(\lambda)$, которые рассчитаны по спектрам $S(\lambda)$, и их линейаризованные зависимости $\gamma(\chi)$ приведены на рис. 6. Примеры демонстрируют эффект экранировки обрабатываемой поверхности плазменным факелом, размеры которого существенно увеличиваются при повышении мощности лазерного пучка от 0.5 до 1 кВт. При этом возрастает как поглощение, так и рассеяние плазмой факела части мощности лазерного пучка, что вы-

зывает увеличение площади нагрева s_{ah} поверхности стали и снижение эффективной температуры T_{eff} поверхности образцов 2 и 3 по сравнению с T_{eff1} . Меньшая площадь нагрева s_{ah} для образца 1 обуславливает смещение линеаризованной зависимости $\gamma(\chi)$ вверх и снижение $\Phi(\lambda)$ по сравнению с образцами 2 и 3 несмотря на то, что температура T_{eff1} на ~ 100 °C больше.

Спектральные зависимости в диапазоне 650—930 нм (рис. 6, а) примерно соответствуют приближению Вина. Поэтому зависимости $\gamma(\chi)$ в области $\chi = 15.47$ — 22.14 кК (рис. 6, б) близки к линейным. Это экспериментально подтверждает целесообразность применения T_{eff} при непрерывном контроле температуры в области воздействия мощного лазерного пучка, а также линейной экстраполяции $\gamma(\chi)$ в область малых χ для определения $a = \gamma(\chi = 0)$. Значение a , как следует из (10), определяется в основном логарифмом отношения $\ln(s_q/s_{ah})$, поскольку вследствие окисления обрабатываемой поверхности атмосферным кислородом коэффициент теплового излучения ванны расплава примерно соответствует излучению диэлектриков со средним значением $\varepsilon \sim 0.6$ [29].

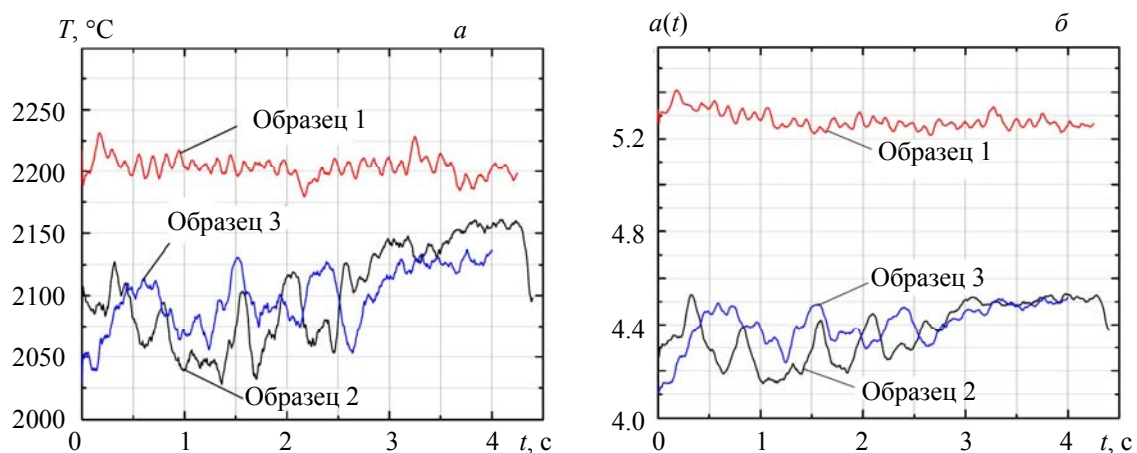


Рис. 7. Зарегистрированные временные зависимости эффективной температуры $T_{eff}(t)$ в области воздействия лазерного пучка (а) и зависимости смещения $a(t)$ линеаризованных значений $\gamma(t)$ (б) для трех образцов стальных пластин

Полученные временные зависимости эффективной температуры $T_{eff}(t)$ и смещения $a(t)$ линеаризованных зависимостей $\gamma(\chi)$ для трех образцов пластин приведены на рис. 7. Видно, что при мощности лазерного пучка 0.5 кВт эффективная температура T_{eff} флуктуирует в небольших пределах. При увеличении мощности лазерного пучка Φ_0 от 0.5 до 1 кВт сильнее проявляется временная нестационарность процесса нагрева, хотя мощность лазерного пучка поддерживается достаточно стабильной. Это связано с процессами развития и поддержания плазменного факела над перемещающейся ванной расплава в форме “замочной скважины” при сканировании лазерным пучком обрабатываемой поверхности. При меньшей мощности лазерного пучка Φ_0 зависимости $T_{eff}(t)$ и $a(t)$ более стабильны вследствие меньших размеров плазменного факела и снижения его влияния на нагрев поверхности. Несмотря на меньшие T_{eff} для образцов 2 и 3, энергия лазерного пучка, идущая на нагрев стали в области воздействия, и площадь нагрева при $\Phi_0 = 1$ кВт увеличиваются, что приводит к почти двукратному росту ширины w формирующегося сварного шва и глубины d его провара по сравнению с образцом 1 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Глубина провара и ширина шва, измеренные для трех образцов

Образец	$\bar{T}_{eff}, ^\circ\text{C}$	a	Глубина провара шва d , мм	Ширина шва w , мм	Мощность пучка P_n , кВт
1	2204	5.28	1.55	2.23	0.5
2	2102	4.37	3.07	3.32	1
3	2099	4.40	3.07	3.50	1

Применение $T_{\text{eff}}(t)$ и $a(t)$ позволяет создавать наглядные технологические карты лазерных процессов, например, для мощности пучка лазерного излучения, скоростей линейного движения пучка и параметра Δz его фокусировки (рис. 8). При точной фокусировке пучка лазерного излучения ($\Delta z = 0$) эффективные температуры нагрева выше, поэтому в плоскости значений $\bar{T}_{\text{eff}}, \bar{a}$ участки, соответствующие разным режимам используемой мощности пучка и скорости его перемещения, сдвигаются вправо по сравнению с расфокусированным пучком ($\Delta z = -2$ мм). Увеличение скорости перемещения пучка также приводит к росту T_{eff} , поскольку плазменный факел в фронтальной зоне пучка имеет меньшие размеры по сравнению с тыловой зоной, т. е. экранирующее влияние плазменного факела на эффективную температуру при больших скоростях движения пучка меньше. Несмотря на некоторый рост T_{eff} , глубина провара и ширина шва при увеличении скорости движения пучка уменьшаются, что обусловлено снижением поглощаемой энергии лазерного излучения в расчете на единицу объема шва. Таким образом, задавая границы диапазона изменений $T_{\text{eff}}(t)$ и $a(t)$, можно поддерживать проводимый процесс в заданных пределах, что гарантирует его повторяемость.

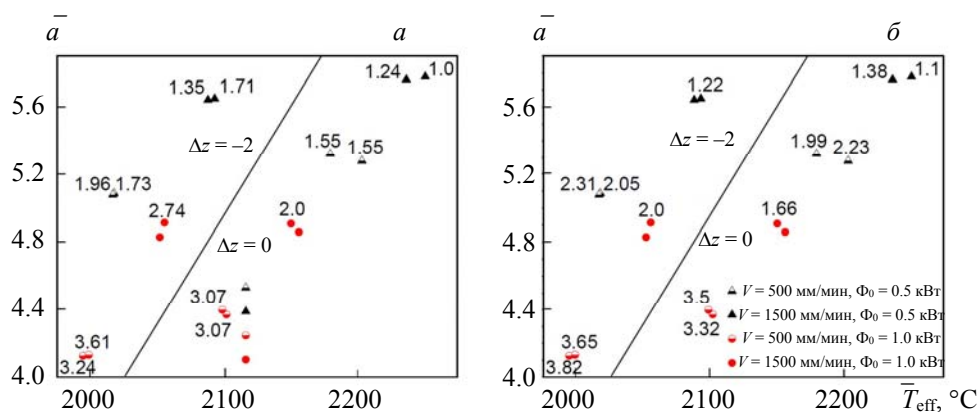


Рис. 8. Технологические карты средней глубины d провара шва (а) и ширины w шва (б), представленные на плоскости $\bar{T}_{\text{eff}}, \bar{a}$ для образцов пластин стали марки 45 при мощностях лазерного пучка $\Phi_0 = 0.5$ и 1.0 кВт, скоростях его сканирования $V = 500$ и 1500 мм/мин и значениях его фокусировки $\Delta z = 0$ и -2 мм

Заключение. Анализ условий регистрации световых потоков, формируемых в области воздействия мощного лазерного излучения на обрабатываемые материалы, указывает на возможность применения при оптимизации проводимого технологического процесса как тепловизионной, так и спектральной техники. Показана нецелесообразность использования тепловизионной техники, которая регистрирует формирующееся в области обработки тепловое излучение более чем на трех участках спектра. При наладке лазерных процессов целесообразно применять тепловизионную технику на основе матриц кремниевых фотоприемников, которая регистрирует тепловое излучение в области $0.6\text{—}1.0$ мкм, где излучение плазменного факела гораздо меньше по сравнению с видимой областью спектра. При организации непрерывного контроля лазерных процессов более перспективно использование спектрофотометрической техники, позволяющей непрерывно определять наиболее информативные для петли обратной связи системы управления лазерной установкой параметры — эффективную температуру T_{eff} в области воздействия и смещение линеаризованной зависимости $a = \gamma(\chi = 0)$, связанное с эффективной площадью нагрева поверхности лазерным пучком. При этом можно снизить объем обрабатываемых данных примерно на три порядка по сравнению с использованием тепловизионной техники. Проведенная оценка формы спектра излучения, формирующегося в области воздействия мощного лазерного пучка излучения, подтверждена экспериментальными результатами, что указывает на перспективность широкого применения техники спектрального контроля для обеспечения устройства управления лазерной установкой текущими значениями $T_{\text{eff}}(t)$ и $a(t)$.

- [1] **J. Dowden.** The Theory of Laser Materials Processing, Springer Series in Materials Sciences, **119**, New York, Springer (2009) 23—75
- [2] **H. Kyogoku, T. Ikeshoji.** Mech. Eng. Rev., **7**, N 1 (2020) 1—19, doi: 10.1299/mer.19-00182
- [3] **H. Helvajian.** J. Laser Micro/Nanoengineering, **4**, N 1 (2009) 1—6, doi: 10.1299/mer.19-00182
- [4] **W. Xizhao, D. Jun, J. Ming, K. Shanhao, W. Baoye, Z. Xiaoyan.** Int. J. Adv. Manuf. Technol., **92** (2017) 4571—4581, doi: 10.1007/s00170-017-0413-z
- [5] **F. Calignano, M. Galati, L. Iuliano.** Mashines, **7**, N 4 (2019) 72—93, doi: 10.3390/machines7040072
- [6] **M. Skalon, B. Meier, A. Gruberbauer, S. Amancio-Filho.** Materials, **13**, N 3 (2020) 808—824, doi: 10.3390/ma13030808
- [7] **H. Wang, W. Liu, Z. Tang, Y. Wang, X. Mei, K. M. Saleheen, Z. Wang, H. Zhang.** Opt. Eng., **59**, N 7 (2020) 070901(1—18), doi: 10.1117/1.OE.59.7.070901
- [8] **S. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. Leach, A. N. Clare.** Materials and Design, **95**, N 5 (2016) 431—445, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.099
- [9] **I. Eriksson.** Optical Monitoring and Analysis of Laser Welding. Printed by Universitetsstryckeriet, Lulee University of Technology (2011) 1—82
- [10] **X. He, T. Deb Roy.** J. Appl. Phys., **94**, N 10 (2003) 6949—6958, doi: 10.1063/1.1622118
- [11] **А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев.** Теплофизика и аэромеханика, **20**, № 2 (2013) 239—253
- [12] **В. И. Богданович, М. Г. Гиорбелидзе, А. В. Сотов, Н. Д. Проничев, В. Г. Смелов, А. В. Агаповичев.** Изв. Самарского науч. центра Российской АН, **19**, № 4 (2017) 105—114
- [13] **T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi, P. Lugara.** Sensors, **9**, N 5 (2009) 3376—3385 doi.org/10.3390/s90503376
- [14] **Y. Saadlaoui, J. Sijobert, M. Doubenskaia, F. Bertrand, E. Feulvarch, J. M. Bergheau.** Crystals, **10**, N 4 (2020) 246, doi: org/10.3390/cryst10040246
- [15] **D. You, X. Gao, S. Katayama.** Science and Technology of Welding and Joining, **19**, N 3 (2014) 81—201, doi: 10.1179/1362171813Y.00000000180
- [16] **J. Stavridis, A. Papacharalampopoulos, P. Stavropoulos.** Int. J. Advanced Manufacturing Technology, **94** (2017) 1825—1847, doi: 10.1007/s00170-017-0461-4
- [17] **Q. Pengyuan, W. Gang, G. Zhen, L. Xianghua, W. Liu.** Materials, **12**, N 20 (2019) 3322—3333, doi: 10.3390/ma12203322
- [18] **G. Repossini, V. Laguzza, G. Marco, B. Colosima.** Additive Manufacturing, **16** (2017) 35—48, doi: 10.1016/j.addma.2017.05.004
- [19] **I. Zhirnov, D. Kotoban, A. Gusarov.** Appl. Phys. A, **124**, N 2 (2018) 157—166, doi: 10.1007/s00339-017-1532-y
- [20] **I. Zhirnov, C. Protasov, D. Kotoban, A. Gusarov.** J. Thermal Spray Technol., **26**, N 4 (2017) 648—660, doi: 10.1007/s11666-017-0523-z
- [21] **D. Dagel, G. Grossetete, O. Danny.** Measurement of Laser Weld Temperatures for 3D Model Input. Sandia National Laboratories, United States, New Mexico, 4—28 (2016)
- [22] **D. Qu, J. Berry, N. Calta, M. Crumb, G. Guss, M. J. Mathews.** Phys. Rev. Appl., **14** (2020) 014031—014043, doi: 10.1103/PhysRevApplied.14.014031
- [23] **L. Jacquemetton, M. Piltch, D. Beckett.** Thermal Calibration of Commercial Melt Pool Monitoring Sensors on a Laser Powder Bed Fusion System. Natl. Inst. Stand. Technol. Adv. Man. Ser., 100-35 (2020) 1—20, doi: 10.6028/NIST.AMS.100-35
- [24] **W. Wójcik, V. Firago, A. Smolarz, I. Shedreyeva, D. Yeraliyeva.** Sensors, **22** (2022) 742—764, doi: 10.3390/s22030742
- [25] **V. Firago, W. Wojcik.** Przegląd Elektrotech., **91**, N 2 (2015) 208—214
- [26] **В. А. Фирого.** Цифровая термография, Минск, БГУ (2019) 195, 236
- [27] IMEC. Hyperspectral Imaging. Sensors. Available online: <https://www.imecint.com/en/hyper-spectral-imaging> (accessed on 17 September 2018)
- [28] **А. Н. Магунов.** Спектральная пирометрия, Москва, Физматлит (2012) 23—38
- [29] **V. A. Firago, W. Wojcik, M. S. Dzhunisbekov.** Russ. Metallurgy (Metally), **11** (2019) 1224—1230, doi: 10.1134/S0036029519110053