

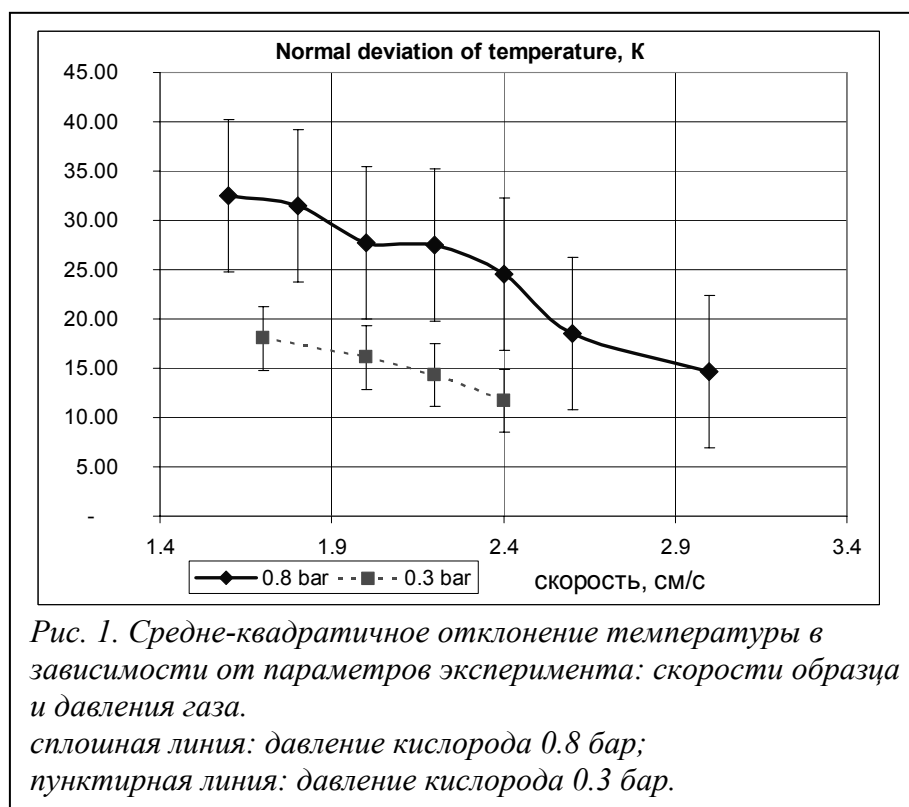
## Алгоритмы оптимизации для систем мониторинга качества лазерных технологических процессов

А.В. Дубров, Ю.Н. Завалов, В.Д. Дубров

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

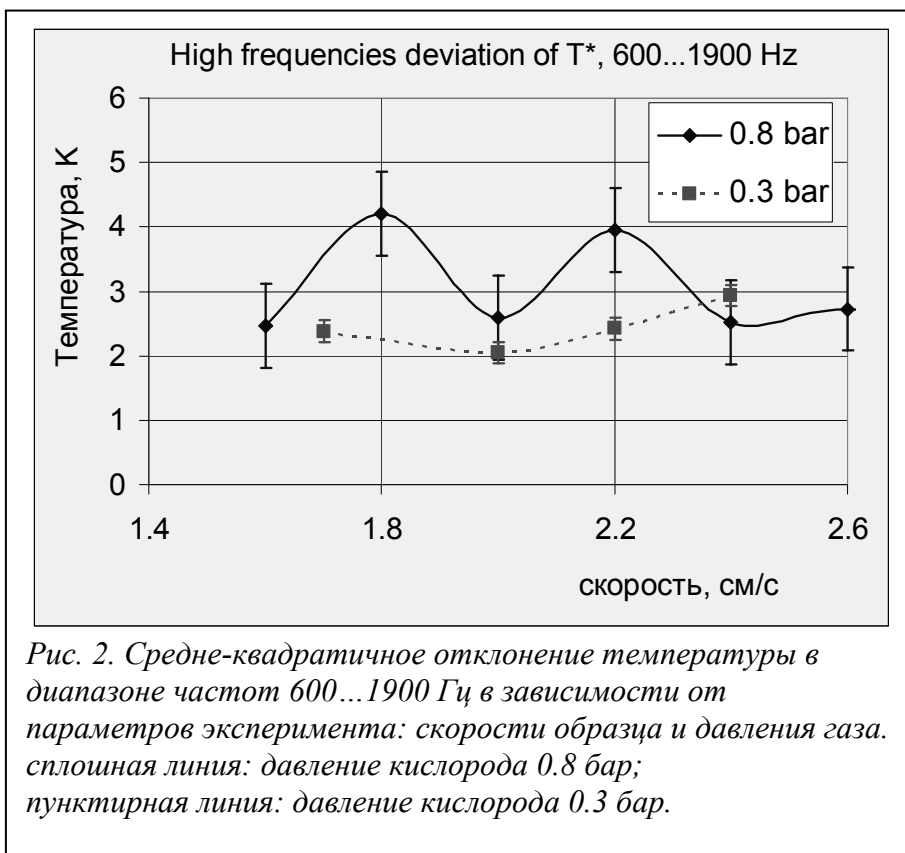
E-mail: avdaemon@mail.ru

Вопрос использования оптических сенсоров для он-лайн контроля шероховатости боковой кромки листа при лазерной резке металлов была рассмотрена в многочисленных публикациях, например, [1-6]. Нами ранее была измерена временная динамика пульсаций локального свечения внутри канала, формирующегося в листе материала под воздействием сфокусированного мощного излучения CO<sub>2</sub>-лазера, используя двухцветный фотодатчик [7]. Были проведены измерения яркости свечения наиболее горячих областей внутри канала с использованием не только Si-диода, но InGaAs-диода, что впервые позволило получить данные как о спектре и амплитуде пульсаций яркости излучения, так и оценить временную динамику, пространственный спектр и амплитуду пульсаций яркостной температуры расплава в зоне воздействия излучения на материал в зависимости от глубины канала.



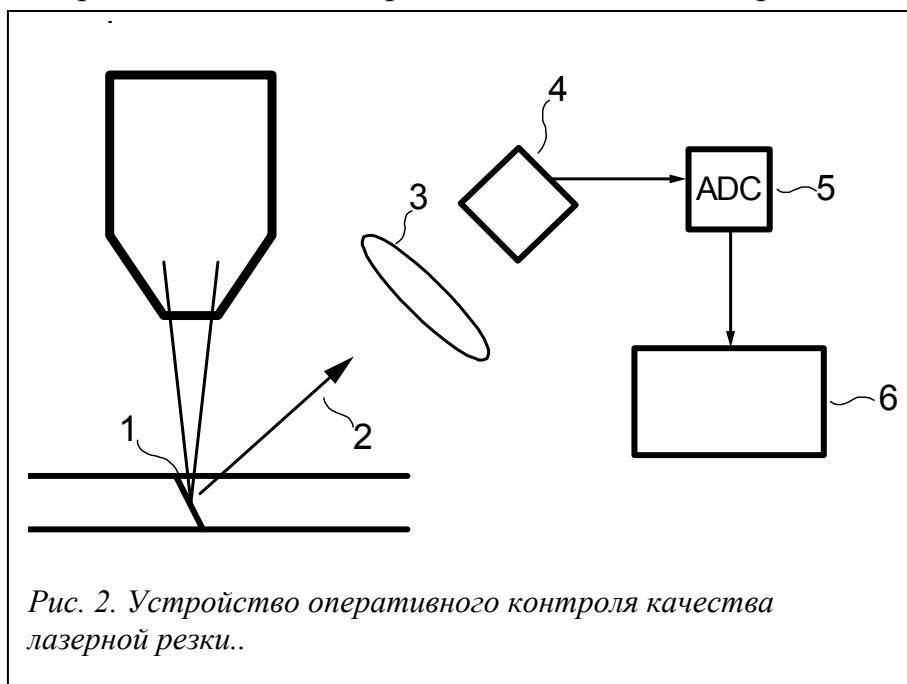
Из рис. 1 следует, что использование данных «текущей средней температуры» [7] и среднеквадратичного отклонения температуры от средней температуры в канале не позволяют построить эффективных алгоритмов контроля качества реза. В данных измерениях отсутствует дополнительная информация об оптимальном по минимуму шероховатости режиме реза: давление газа 0,8 бар, скорость перемещения

образца 20 мм в сек. Как видно из рис.2, использование спектральной обработки данных пирометра позволяет использовать алгоритм слежения за локальным минимумом амплитуды высокочастотных пульсаций для



стабилизации режима резки.

На основе проведенных измерений при резке толстых листов малоуглеродистой стали толщиной 6, 8 и 10 мм был разработан и опробован оригинальный алгоритм стабилизации процессов удаления



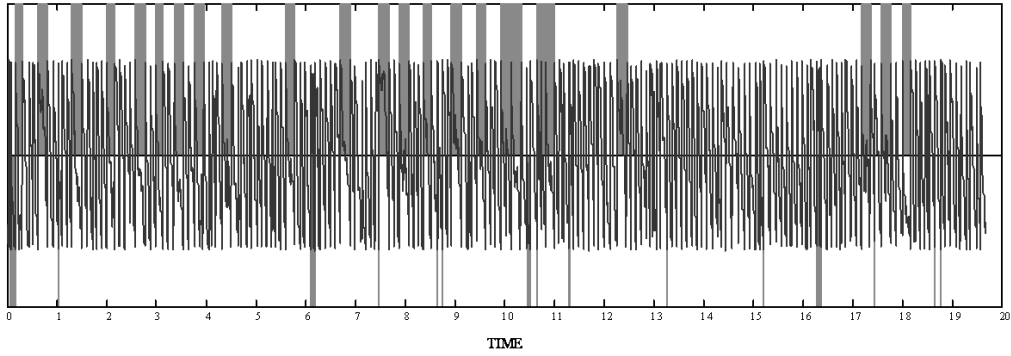
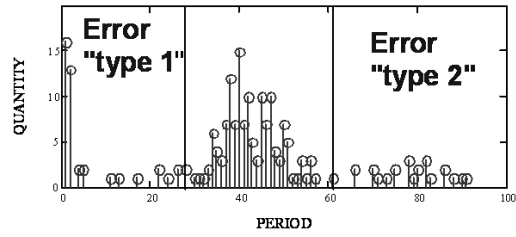
расплава при канализированном проникновении лазерного пучка в

материал. А именно, с этой целью излучение (1) из зоны воздействия лазерного излучения на металл (2), рис.3, с помощью оптической системы (3) передается на датчик (4). Датчик состоит из двух фотодатчиков, имеющих чувствительность в различных частотных диапазонах и конструктивно выполненных таким образом, что излучение попадает на оба фотодатчика. Сигналы с выходов фотодатчиков оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя (5) и поступают на вход устройства обработки (6). В устройстве обработки проводится анализ сигналов, в результате которого на выходе получают характеристику качества технологического процесса. Такое устройство может быть реализовано различными способами, включая исполнение на основе микроконтроллера или персонального компьютера. Анализ состоит из последовательности шагов, описанных ниже. Первый шаг состоит в определении яркостной температуры  $T^*$  зоны резки методами пирометрии. На следующем шаге полученный сигнал яркостной температуры поступает в устройство выборки-хранения, которое группирует поступающие в течение предустановленного периода времени значения, соответствующие изменению температуры в зоне резки за предустановленный период, и отправляет их в виде вектора  $X_{orig}$  в следующий блок. На следующем шаге из полученного вектора  $X_{orig}$  с помощью преобразования Гильберта формируется аналитический сигнал в виде вектора  $X_{Hilb}$ . Затем путем вычисления аргументов значений вектора  $X_{Hilb}$  генерируется вектор  $X_{arg}$ , представляющий собой действительный сигнал с разрывами (рис. 4). Далее проводятся поиск и локализация разрывов: определяется их общее количество и формируется массив  $X_{res}$ , каждый элемент которого содержит длину  $L_N$  интервала между текущим и предыдущим разрывами. В логическом цикле длины интервалов последовательно сравниваются с предустановленными верхним и нижним порогами. Если интервал оказывается меньше нижнего порога, увеличивается значение счетчика ошибок 1-го рода, в случае превышения интервалом величины верхнего порога происходит увеличение значения счетчика ошибок 2-го рода. По общему количеству ошибок 1-го и 2-го родов за время выборки делается вывод о качестве резки в данной области.

Алгоритм был применен к выполненным ранее, [7], записям временных диаграмм измерения многоканальным пирометром яркостной температуры на фронте реза. Результаты приведены на рис.4, а-в, в зависимости от скорости реза. На основном рисунке представлена диаграмма вектора  $X_{arg}$ . Выделены локализованные по описанному выше алгоритму отрезки времени, когда зафиксированы отклонения от предустановленного порога, отдельно для отклонения ниже первого порога, и отдельно, для отклонения выше второго порога, распределение отклонений представлены на графике в верхней правой части рисунка.

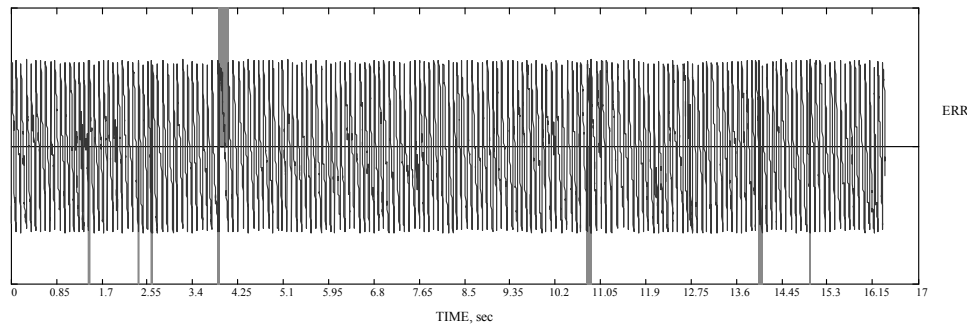
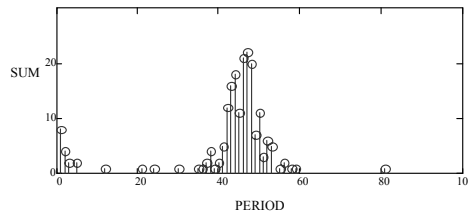
LowThreshold= 25 HighThreshold= 60  
errType1Num= 39 errType2Num= 24

$v=2,4$  см/сек



LowThreshold= 30 HighThreshold= 72  
errType1Num= 19 errType2Num= 1

$v=2$  см/сек



LowThreshold= 37.5 HighThreshold= 90  
errType1Num= 56 errType2Num= 0

$v=1,6$  см/сек

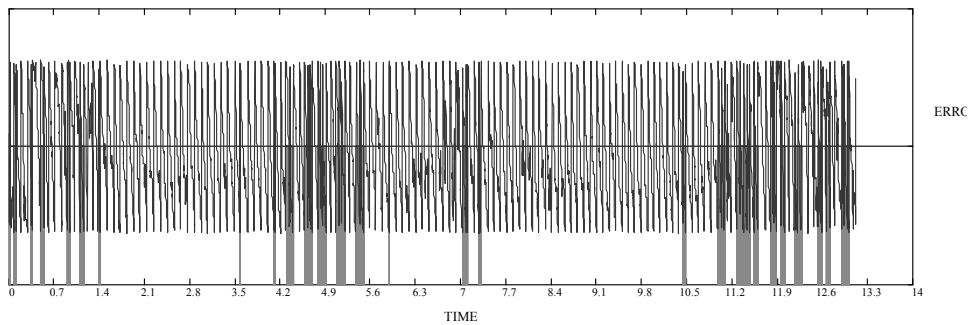
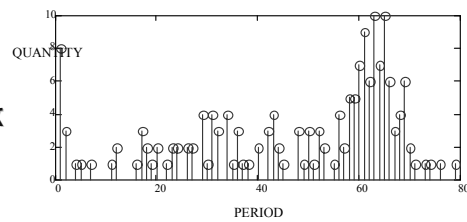


Рис.4 Результат обработки осциллограмм сигнала с пирометрического датчика при резке листа стали Ст.3 толщиной 10 мм. Синим цветом обозначены моменты образования дефектов шероховатости боковой

Минимум дефектов при скорости 2 см в сек, что соответствует и минимуму шероховатости боковой кромки образующегося сквозного канала.

Выводы: Показано, что использование данных «текущей средней температуры» и ее среднеквадратичной девиации, а также «амплитуды высокочастотных пульсаций» температуры в канале не позволяют построить эффективных алгоритмов контроля качества реза. Разработан алгоритм обработки данных пирометрического датчика с использованием преобразования Гильберта, в котором на основе данных короткой выборки (0,3..1 сек) рассчитывается параметр качества резки. Алгоритм был опробован на имеющейся базе экспериментальных данных реза толстых листов малоуглеродистой стали толщиной 6, 8 и 10 мм. Практическая значимость в том, что разработан алгоритм, который можно использовать для он-лайн контроля технологических процессов воздействия излучения на материал.

1. P. Sforza, V. Santacesaria, «CO2 laser cutting: analytical dependence of the roughness of the cut edge on the experimental parameters and process monitoring» //Proceed. SPIE Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, E.Beyer; M. Cantello; A.V. La Rocca; L.D. Laude; F.O. Olsen; G. Sepold: Eds, vol. 2207, pp. 836-847 (1994)
2. Heyn H., Decker I., Wohlfahrt H. «Tools and requirements for in-process quality control in laser beam welding» //Proceed. SPIE Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, E. Beyer; M. Cantello; A. V. La Rocca; L. D. Laude; F. O. Olsen; G. Sepold:Eds, vol. 2207, pp.381-391 (1994)
3. A.F.H. Kaplan Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting. Series: Berichte Aus Der Fertigungstechnik, Shaker Verlag GmbH: Aachen (2002) ISBN-13: 978-3-8322-0803-5
4. Kaplan, A. F. H, D. Schuocker and O. Wangler “Laser cutting: Fundamentals of the periodic striations and their on-line detection” //Lasers in Engineering, v 6, pp 103-126, (1996).
5. Kaplan, A. F. H. und O. Wangler «Quality monitoring during laser beam cutting» //Laser und Optoelektronik, v 28, n 3, pp 68-74 (1996) (in German)
6. Leidinger D., A. Penz and D. Schuocker “Improved manufacturing processes with high power lasers” //Infrared Physics Technology, v 36, n 1, pp 251-266 (1995).
7. Дубров А.В., Завалов Ю.Н «Он-лайн диагностика процесса газолазерной резки металлов с помощью многоканального пирометра» // В сб. Труды IX Межвузовской школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине” 24-25 ноября 2008 г., Москва, с.136-141 (2008).