

15

Оценка скорости выноса расплава в технологии лазерной резки металлов оптическим корреляционным методом

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

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,
Шатура, Московская область
E-mail: dubrovav@gmail.com

В окончательной редакции 13 февраля 2014 г.

Для оценки скорости выноса расплава металла из зоны воздействия излучения в технологии лазерной резки со вспомогательным газом был использован многоканальный пирометр. Измерялись локальные пульсации яркостной температуры в 4 областях диаметром ~ 0.1 mm каждая, расположенных через 0.6 mm вдоль фронта реза. Приведена методика определения скорости перемещения температурных неоднородностей при движении расплава путем расчета взаимной корреляции пульсаций яркостной температуры в соседних областях. Необходимость предварительной частотной фильтрации данных измерения может быть связана с распространением под воздействием струи газа нелинейной волны расплава по поверхности металла.

В настоящее время лазерная резка широко применяется в промышленности, и для надежного выполнения этой операции, а также повышения качества образующейся боковой кромки необходимо создание средств оперативного контроля процессов в зоне воздействия на металл лазерного излучения [1,2]. Понимание процессов, происходящих на фронте реза, необходимо для создания приборов такого рода. В статье приведены экспериментальные данные, полученные с помощью многоканального пирометра, описанного в [3], а также результаты их численной обработки описываемыми алгоритмами.

Эксперименты проводились на лазерном комплексе по раскрою металла Trumatic L2530 (CO₂-лазер, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, выходная мощность 1500 W, нестабильность мощности излучения не превышала 0.5% в диапазоне частот наблюдения). Образцы для реза — пластины размером 600 × 600 mm, толщиной 6 mm (сталь Ст. 3). Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве вспомогательного

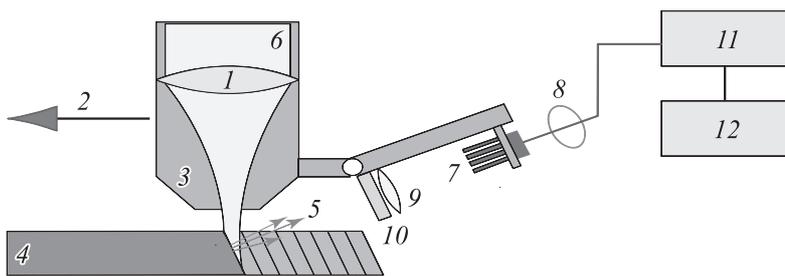


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — линза режущей головки; 2 — направление движения режущей головки; 3 — сопло газа; 4 — образец; 5 — тепловое излучение расплава; 6 — пучок лазерного излучения; 7 — торцы оптоволокон; 8 — жгут оптоволокон; 9 — линза пирометра; 10 — защитный фильтр; 11 — блок сенсоров K1713-05; 12 — блок предварительного усиления, аналого-цифрового преобразования и компьютерной обработки сигналов сенсоров.

газа использовался кислород, давление газа P на входе в сопло составляло 0.45 МПа. Диапазон использовавшихся скоростей резки v_{cut} 20–40 мм/с. Фокусное расстояние режущей линзы 127 мм, диаметр отверстия дюзы 0.8 мм, расстояние между дюзой и стальной пластиной поддерживалось на уровне 0.4 мм. Тепловое излучение собиралось пирометрической линзой из ZnSe с области диаметром ~ 0.1 мм. С этой целью в плоскости изображения линзы светящегося фронта реза были размещены торцы оптоволокон. Торцы оптоволокон, с сердечником примерно $60\ \mu\text{m}$ каждое, располагались на расстоянии 0.8 мм друг от друга в одну вертикальную линейку. Расстояния от линзы до фронта реза и от линзы до плоскости изображения выбраны таким образом, что в плоскости изображения размер предмета увеличивался в 1.3 раза. Это позволило измерять четырехканальным пирометром локальные пульсации яркостной температуры поверхности расплава, отстоящие друг от друга на $d \approx 0.6$ мм. На другом конце жгута оптоволокон каждое оптоволокон освещало рабочую поверхность своего оптического датчика. В качестве датчика в каждом канале пирометра использовался сенсор K1713-05 (Hamamatsu Photonics), состоящий из расположенных один под другим полупрозрачного Si-диода и InGaAs-диода, что позволяло определять яркостную темпера-

туру по отношению фототоков этих диодов. Для оцифровки сигналов использовалась система сбора данных на базе АЦП L-Card 1450, при частоте дискретизации $f_{\Delta} = 40 \text{ kHz}$ на канал. Абсолютная точность измерения глубины залегания точки наблюдения локальной пульсации температуры не превышает $\pm 0.5 \text{ mm}$. Она измерялась по отдельной методике, в которой лист металла заменялся специальной конструкцией, позволяющей тарировать положение пирометра относительно режущей линзы.

Характерный вид полученных таким образом временных зависимостей яркостной температуры поверхности расплава в 4 областях, а также результаты исследования спектров температурных пульсаций изложены в [4]. Нами были проанализированы временные зависимости температуры. Были рассчитаны автокорреляционные функции. С этой целью массив данных был поделен на равные по длительности (400 отсчетов или примерно 10 ms) выборки данных, для каждой выборки была рассчитана автокорреляционная функция, а затем было проведено усреднение по 49 выборкам. Исходя из полученных результатов и используя методы корреляционного анализа [5], было показано наличие двух процессов, приводящих к изменениям температуры на существенно отличающихся временных масштабах.

Процесс, приводящий к температурным колебаниям с частотами свыше $f_1 = 300 \text{ Hz}$, проявляется резко спадающей по величине автокорреляционной функцией. Характерное время спада составило около $t_0 = 0.3 \text{ ms}$ для диапазона параметров экспериментов. На масштабах времени более t_0 автокорреляционная функция близка к нулю, пульсации температуры носят хаотичный характер. Такая картина типична для турбулентных режимов [5], связанных с возбуждением колебаний в широкой полосе частот.

Другой процесс — низкочастотное изменение температуры — придает колебательный характер автокорреляционной функции. На масштабах времени более $1/f_1 \sim 3.3 \text{ ms}$ луч лазера перемещается вдоль пластины на расстояние более $v_{cut}/f_1 \sim 70\text{--}130 \mu\text{m}$. Пульсации температуры на этом масштабе времени связаны с образованием поперечных бороздок на боковой кромке в процессе реза: шаг бороздок примерно того же масштаба.

Локальная температура поверхности расплава определяется балансом нагрева и отвода тепла. Нагрев в процессе локального поглощения лазерного излучения поверхностью металла дополняется притоком

расплава, получившим тепло ранее — выше по течению. Отвод тепла, в свою очередь, определяется выносом нагретого расплава вдоль по фронту реза и теплопередачей в глубину листа металла. Быстрая осцилляция температуры связана, прежде всего, с локальным поглощением излучения. Для металлов характерна сильная зависимость коэффициента поглощения излучения от угла падения. В результате переменный локальный наклон поверхности приводит к модуляции поглощения сфокусированного лазерного излучения [6] и, следовательно, к модуляции температуры вдоль по фронту реза. Образовавшаяся в данный момент времени локальная температурная неоднородность сносится вниз по фронту. Если измерить время перемещения неоднородности на известное расстояние между точками наблюдения, можно определить скорость течения расплава. В наших условиях минимально разрешимая скорость составит $(d/t_0) \approx 2$ m/s. Максимальная скорость, которую можно измерить, определяется временем оцифровки температуры в 4 каналах. В наших условиях оцифровка занимает время $1/f_{\Delta} = 0.025$ ms, и верхняя граница оценки скорости составит $(d^* \cdot f_{\Delta}) \approx 24$ m/s.

Время перемещения температурной неоднородности рассчитывалось следующим образом. Массив данных пульсаций температуры, измеренных в 4 областях вдоль по фронту реза при неизменных параметрах резки, был поделен на равные по длительности (10 ms) выборки данных. Для каждой выборки были рассчитаны взаимные корреляционные функции пульсаций температур в соседних областях. Временная задержка определялась по смещению максимума функции взаимной корреляции, если значение максимума превышало пороговое значение, характеризующее качество корреляции. Этот порог варьировался при расчетах в диапазоне 0.28–0.45. Затем выполнялось усреднение оценок задержки по 49 выборкам для всех пар соседних каналов. В результате обработки данных измерений по описанному алгоритму была получена оценка задержки 0.025 ms. Полученный результат не соответствовал ранее сделанным оценкам скорости выноса расплава [7,8], т.е. описанный алгоритм не учитывает особенностей процессов течения расплава на фронте реза. Поэтому в схему обработки данных эксперимента были внесены изменения.

Представим, что за длительность выборки скорость течения изменялась и принимала значения: $V_{m1} > V_{m2} > V_{m3}$. Соответствующие времена перемещения температурных неоднородностей между соседними областями наблюдения будут распределены обратным образом:

$t_{m1} < t_{m2} < t_{m3}$. Для случайных сигналов уровень взаимной корреляции тем больше, чем меньше временное запаздывание между ними. Тогда при реализации за выборку нескольких скоростей определена будет лишь максимальная.

Регистрируемая частота температурных колебаний определяется скоростью перемещения температурных неоднородностей и пространственным периодом их повторения. Для приведенного выше примера изменения скорости произойдет соответствующее изменение частоты температурных колебаний: $F_{m1} > F_{m2} > F_{m3}$. Тогда следует проводить корреляционный анализ в относительно узких спектральных диапазонах: использовалось множество перекрывающихся окон фильтрации шириной 300 Hz со смещением в 100 Hz в диапазоне частот 400–4000 Hz. Для каждой полосы фильтра использовалась собственная разбивка на выборки длиной в 3 периода центральной частоты фильтра. Огибающие отфильтрованных в различных диапазонах сигналов достигают максимумов в разные моменты времени. Измеряя сдвиг максимума взаимной корреляционной функции для отфильтрованных сигналов, можно получить значения скорости перемещения пульсаций температуры в тот или иной отрезок времени. В моменты, когда отфильтрованный сигнал минимален, происходит случайный сдвиг по фазе. Корреляция сигналов на таком отрезке времени ниже порога, и расчет сдвига в этом случае не производится. Результаты обработки данных по усовершенствованному алгоритму представлены на рис. 2, а. Известно, что скорость течения расплава случайно меняется с течением времени [7,10]. Полученный массив скоростей также носит хаотичный характер.

Рассмотрим гидродинамику течения тонкой пленки расплава, образующегося под воздействием лазерного излучения в верхней части фронта реза в щели, ширина которой примерно составляет ~ 0.35 mm, чуть более размера лазерного пучка в фокусе. Расплав стекает вдоль по фронту реза, увлекаемый струей вспомогательного газа. Как показано в [7], стационарный случай гладкой поверхности „расплав–газ“ неустойчив, на поверхности расплава неизбежно будут образовываться изгибы и распространяться поверхностные волны, прежде всего капиллярной природы. В работе [9] показано, что турбулентная струя газа может способствовать образованию на поверхности пленки расплава нелинейных гидродинамических волн, увлечение которых газовым потоком ускоряет общее течение пленки. Более подробно течение тонкой пленки по твердой стенке под действием струи газа рассмотрено в

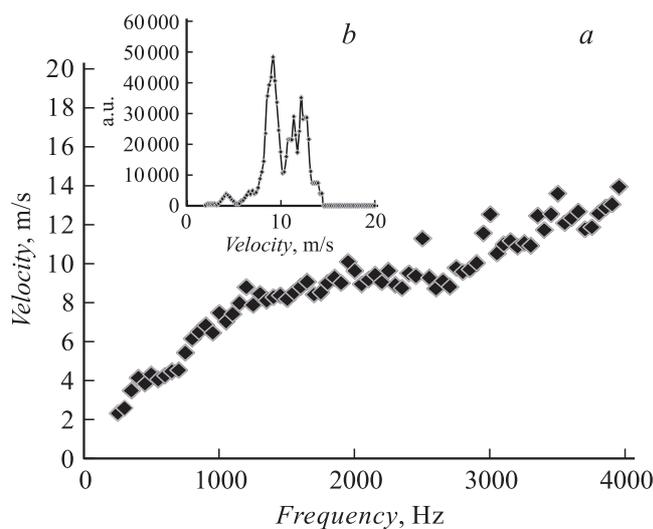


Рис. 2. Результаты обработки экспериментальных данных: *a* — зависимость скорости перемещения температурных неоднородностей на поверхности расплава от частоты окна фильтрации; *b* — плотность распределения скоростей температурных неоднородностей.

работе [10], показано, что наравне с кинематической волной, скорость которой примерно в 3 раза больше скорости течения расплава, могут образовываться так называемые быстрая и медленная динамические волны.

На рис. 2, *b* представлена статистика обнаружения тех или иных скоростей перемещения температурных неоднородностей. Полученный результат показывает, что измеренная описанным способом скорость — это, вероятнее всего, или скорость перемещения поверхностной волны, образованной воздействием газовой струи, или скорость течения расплава на поверхности. На полученных статистических распределениях скоростей искались два пика, симметрично расположенных вокруг третьего. Симметричные пики интерпретировались как скорости медленной и быстрой волн, а положение центрального пика выбиралось за оценку скорости течения расплава на поверхности при данных параметрах лазерной резки.

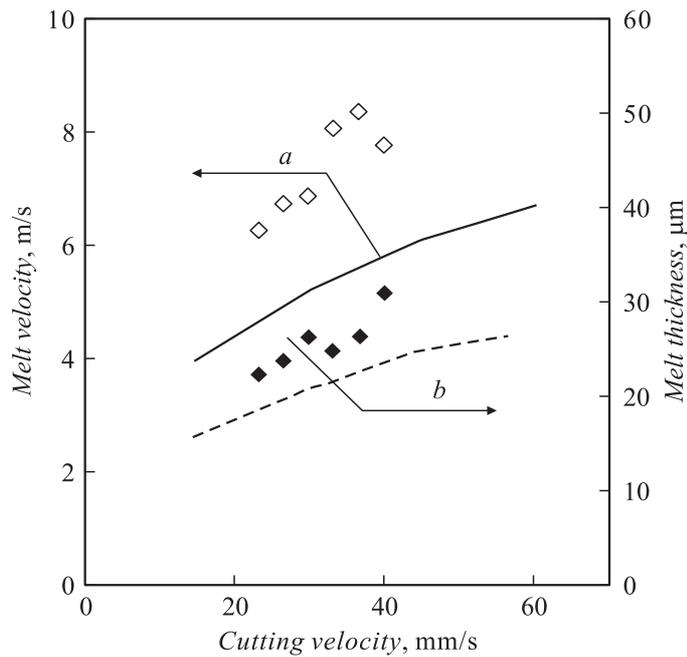


Рис. 3. Зависимость средней скорости движения расплава (*a*) и толщины пленки расплава (*b*) от скорости лазерной резки. Точки — эксперимент, линия — расчет из [8].

Полученные в результате экспериментальные данные средней скорости движения расплава и толщины пленки расплава представлены на рис. 3, где они сравниваются с данными расчета [8], в котором была учтена генерация волн на поверхности тонкой пленки струей газа. Оценки толщины пленки расплава в расчете и в эксперименте удовлетворительно совпадают, так что приведенная методика обработки экспериментальных данных позволяет выполнить оценку скорости выноса расплава из зоны воздействия лазерного излучения.

Таким образом, разработана методика определения скорости перемещения температурных неоднородностей при движении расплава путем расчета взаимной корреляции пульсаций яркостной температуры в соседних областях. С помощью этой методики были проведены оценки

скорости выноса расплава металла из зоны воздействия лазерного излучения в зависимости от скорости резки. Полученные результаты могут быть использованы для оперативного контроля процессов на фронте реза в технологии лазерной резки металла. Необходимость предварительной частотной фильтрации данных измерения может быть связана с распространением под воздействием струи газа нелинейной волны расплава по поверхности металла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00987а.

Список литературы

- [1] *Keuster J., Duflou J.R., Kruth J.-P.* // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2007. V. 35. P. 115–126.
- [2] *Rizzi D., Sibillano T., Calabrese P.P.* et al. // Opt. Lasers Eng. 2011. V. 49. P. 892–898.
- [3] *Dubrov A.V., Dubrov V.D., Zavalov Y.N.* et al. // Appl. Phys. B. 2011. V. 105. P. 537–543.
- [4] *Dubrov A.V., Dubrov V.D., Zavalov Y.N.* et al. // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8433. P. 843 30W.
- [5] *Yaglom A.M.* Correlation theory of stationary and related random functions. V. 1, 2. New York: Springer-Verlag, 1987.
- [6] *Kaplan A.F.H.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 151 605.
- [7] *Vicanek M., Simon G., Urbassek H.M.* et al. // J. Phys. D. 1987. V. 20. P. 1540.
- [8] *Chen K., Yao Y.L.* // J. Manufacturing Processes. 1999. V. 1. P. 43–53.
- [9] *Jurman L.A., McCready M.J.* // Phys. Fluids. A. 1989. V. 1. P. 522–536.
- [10] *Alekseenko S.V., Aktershev S.P., Cherdantsev A.V.* // Int. J. Multiph. Flow. 2009. V. 35. P. 617–627.