Общероссийский математический портал

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев, Разработка процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла и устройства для его реализации, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 26, 134–140

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu203>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.81.137.203

26 апреля 2023 г., 11:19:54

Физика твердого тела

УДК 621.373.826

Г.Д. Гуреев, Д.М. Гуреев

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСКРОЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Разработано устройство и создан стенд для реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла. В результате проведенных исследований теоретически обоснована и экспериментально показана принципиальная возможность осуществления качественного раскроя листового металла без графообразования относительно маломощным лазерным источником при условии соосного с лазерным лучом ввода в зону реза ультразвуковых колебаний. Разработанный процесс реализован на практике при вырезке заготовок стопорных колец толщиной от 1 до 3 мм.

Введение. В настоящее время все более широкое распространение в машиностроении получает процесс лазерной резки металла по сложному контуру в сочетании со штамповой пробивкой отверстий простых форм [1, 2]. При этом преимущественно реализуется схема газолазерной резки с обдувом зоны лазерного воздействия струей кислорода, при которой большая часть энергии, затрачиваемой на резку, поступает от экзотермической реакции кислорода с металлом. В присутствии кислородной струи скорость лазерной резки оказывается примерно в 1.5 раза выше скорости лазерной резки в присутствии струи инертного газа. Однако для ряда металлов таких, как титан и его сплавы во избежание их самопроизвольного горения в кислороде принципиальным является использование при лазерной резке только инертного газа. В этом случае более остро встает проблема борьбы с графообразованием, решение которой до сих пор остается актуальной задачей.

При лазерной резке максимальная толщина разрезаемого металла и производительность процесса при прочих равных условиях лимитируются мощностью лазера. В соответствии с этим перспективность лазерных технологий, базирующихся на использовании относительно маломощных лазерных источников, во многом будет определяться разработкой комплексных подходов к их реализации, и, в частности, созданием и применением комбинированных источников энергии, таких, как лазерно-ультразвуковой [3]. Использование комбинированного лазерно-ультразвукового источника для улучшения качества раскроя металла является наиболее актуальным для отечественного лазерного оборудования, характеризующегося многомодовостью и высокой расходимостью излучения. В основе улучшения качества раскроя металла лазерно-ультразвуковым источником лежит возможность избежания графообразования в результате проявления таких физических процессов, как кавитация и ультразвуковые вибрации в уменьшении коэффициента поверхностного натяжения и в ускоренном отрыве капель расплава металла от твердой основы края реза.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния ультразвуковых колебаний на изменение геометрии поверхности и глубины ванн лазерных расплавов в соотношении с теоретическим анализом их влияния на гидродинамику и теплофизику последних; разработка устройства для реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла и на базе созданного стенда изучение влияния ультразвуковых колебаний на отрыв капель расплава в зоне лазерного раскроя, глубину и качество реза.

Влияние ультразвуковых колебаний на гидродинамику и теплофизику ванн лазерных расплавов. Рассмотрим теоретические аспекты влияния ультразвуковых колебаний на гидродинамику и теплофизику ванн лазерных расплавов [3]. На рис. 1 схематически показаны гидродинамические течения в ванне лазерного расплава при условии, что ее ширина больше глубины. Последнее является характерным для процессов плавления в отсутствии развитого испарения, когда в качестве единственного механизма возникновения вихрей выступает термокапиллярный эффект.

Для большинства металлов коэффициент поверхностного натяжения s уменьшается с ростом температуры T . Поэтому на поверхности лазерного расплава действует сила, направленная от центра к периферии и приводящая расплав в движение. Другими словами, на поверхности лазерного расплава происходит зарождение и развитие вихря скорости. Составляющая скорости распространения вихрей по глубине мелкой ванны лазерного расплава равна

$$v_z^n = \frac{n}{h_m} \text{Re}, \quad (1)$$

где $\text{Re} = \frac{h_m^4 q}{I_T d^2 h n} \left| \frac{ds}{dT} \right|$ – число Рейнольдса, характеризующее течение вязкой жидкости; q – плотность поглощаемой мощности лазерного излучения; d – диаметр пятна фокусировки; I_T – коэффициент теплопроводности; h_m – глубина ванны лазерного расплава; h и n – динамическая и кинематическая вязкости расплава соответственно; $\frac{ds}{dT} = -B \left(\frac{r}{m} \right)^{\frac{2}{3}}$ – температурное изменение коэффициента поверхностного натяжения [4]; $B = 2.1 \frac{z \cdot \text{см}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{град}}$; r – плотность; m – молекулярная масса.

Р и с. 1. Гидродинамические течения в ванне расплава при лазерном воздействии:
1 – термокапиллярные вихри, 2 – слой неподвижной жидкости

Р и с. 2. Гидродинамические течения в ванне расплава при лазерно-ультразвуковом воздействии:
1 – вихревой слой, 2 – кавитационный отрыв вихрей, 3 – термокапиллярное течение

Спецификой жидких металлов является малое число Прандля $\text{Pr} = \frac{\eta}{a_T} \ll 1$ (a_T – коэффициент температуропроводности), характеризующее соотношение между интенсивностями молекулярного переноса количества движения и переноса теплоты теплопроводностью. Число Прандля является физической характеристикой среды и зависит только от ее термодинамического состояния. Для лазерного расплава можно записать

$$\frac{d_T}{d_n} = \frac{1}{\sqrt{\text{Pr}}}, \quad (2)$$

где d_T – толщина теплового слоя, равная глубине ванны лазерного расплава h_m , d_n – толщина поверхностного вязкого слоя. В соответствии с (1) из (2) следует, что скорость распространения термокапиллярных вихрей много меньше скорости распространения тепла. Поэтому для того, чтобы термокапиллярные вихри распространились на всю глубину ванны лазерного расплава, нужно относительно большое время. Это накладывает ограничение на временную составляющую, определяющую эффективность процесса проплавления.

Совершенно другие процессы доминируют при лазерно-ультразвуковом воздействии (рис. 2). Хотя термокапиллярный эффект здесь также имеет место, определяющую роль в данном случае начинают играть процессы, протекающие на границе раздела жидкой и твердой фаз

из-за сильного затухания ультразвука на градиентах температуры и вязкости. Граница раздела фаз становится источником вихрей, которые, в основном, и приводят в движение расплав. Толщина вихревого слоя равна

$$d_u = \sqrt{\frac{2\eta}{f}}, \quad (3)$$

где f – частота ультразвуковых колебаний. Для $f = 22 \text{ кГц}$ $d_u \sim d_n \sim 2 \dots 7 \text{ мкм}$, однако амплитуда ультразвуковых вихрей существенно (в $10^2 \dots 10^3$ раз) выше амплитуды вязких вихрей. Скорость движения расплава в силу известных граничных условий в данном случае можно определить как

$$v_z^u = f x. \quad (4)$$

где x – амплитуда ультразвуковых колебаний. При импульсном лазерном воздействии с длительностью импульса в несколько миллисекунд диффузионная длина соответственно составляет $\sim 10^3 \text{ мкм}$, что примерно на порядок превышает характерную глубину ванны лазерного расплава. Ультразвуковые вихри, значительно эффективнее возбуждая мелко- и крупномасштабные течения в расплаве, ведут к его более существенному перемешиванию даже при импульсном лазерном воздействии. Фактически при лазерно-ультразвуковом воздействии скорости вихревого и теплового фронтов становятся соизмеримыми.

Дополнительные эффекты возникают, если интенсивность ультразвука достаточна для возбуждения кавитации в ванне лазерного расплава. Как показывают расчеты, развитие кавитации на частоте 22 кГц происходит за время $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Это указывает на то, что процесс возможен даже при импульсном лазерном воздействии. Кавитация, как известно, ведет к более интенсивному перемешиванию и измельчению структуры расплава, снижению коэффициента поверхностного натяжения, выравниванию температурных градиентов и, как следствие этого, к сглаживанию рельефа поверхности и большей глубине ванны расплава.

Влияние ультразвуковых вибраций на отрыв капель расплава при лазерном раскрое листового металла. Для оценки влияния ультразвуковых вибраций на отрыв капли расплава от края реза воспользуемся соотношением

$$F_s = F_w + F_u, \quad (5)$$

не учитывающим воздействие газового потока. Воздействие газового потока при поддуве инертного газа сводится к оттеснению расплава из зоны реза к его краям с обратной стороны листа, и потому оно не решает кардинальным образом вопрос об избавлении от гратообразования. В соотношении (5) F_s – сила сцепления капли расплава с твердофазной основой металла, F_w – вес капли, F_u – сила, действующая на каплю вследствие ультразвуковых вибраций. Будем

исходить из того, что капля формируется путем расплавления металла объемом $V = \frac{pd^2h}{4}$, где h

– толщина листа. Для сил F_s , F_w и F_u можно соответственно записать следующие выражения:

$$F_s = pdh, \quad (6)$$

$$F_w = \frac{pd^2hrg}{4}, \quad (7)$$

$$F_u = \frac{pd^2hrxf^2}{4}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения.

Используя выражения (6) – (8), из соотношения (5) получим условие на минимальную амплитуду ультразвуковых колебаний, при превышении которой ультразвуковые вибрации будут отрывать каплю расплава от края реза:

$$x = \frac{4s - dhr g}{dhr f^2}. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что амплитуда колебаний x требуется тем меньшая, чем выше будут частота колебаний f и температура расплава T . Последняя влияет опосредованно через s , которое задается соотношением

$$s = s_m - B \left(\frac{r}{m} \right)^{\frac{2}{3}} (T - T_m), \quad (10)$$

где s_m – коэффициент поверхностного натяжения при температуре плавления T_m .

В привязке к нашим достаточно общим экспериментальным условиям оценка x из выражения (9) дает значения $x \approx 5 \dots 10 \text{ мкм}$. Таким образом, для эффективного влияния ультразвуковых вибраций на отрыв капель лазерного расплава при раскрое листового металла толщиной 1 ... 3 мм амплитуда ультразвуковых колебаний при частоте 22 кГц должна превышать 10 мкм, что в полной мере реализуется в наших экспериментах.

Методика эксперимента по исследованию влияния ультразвуковых колебаний на формирование ванн лазерных расплавов. При исследовании влияния ультразвуковых колебаний на развитие гидродинамических и теплофизических процессов в ваннах лазерных расплавов поверхности стальных образцов подвергались воздействию импульсного и непрерывного излучения твердотельных лазеров ГОС-1001 (стекло:Nd) и ЛТН-103 (YAG:Nd) с длиной волны 1.06 мкм. Используемые при этом параметры воздействия импульсного лазера ГОС-1001: длительность импульса ~1 мс, энергия в импульсе до 300 Дж, диаметр пятна фокусировки ~9 мм; непрерывного лазера ЛТН-103: мощность излучения 200 ... 220 Вт, скорость перемещения луча 4 мм/с, диаметр пятна фокусировки ~1 мм. Лазерное воздействие осуществлялось на воздухе.

Ультразвуковые колебания вводились в лазерный расплав непрерывно в течение всего времени лазерного воздействия перпендикулярно поверхности, что соответствовало продольной схеме их ввода по отношению к направлению лазерного луча и преимущественного отвода тепла из зоны расплава (рис. 3). Генерация ультразвуковых колебаний и их ввод в образцы осуществлялись с помощью промышленных ультразвукового генератора УЗГ1-1 и магнитострикционного преобразователя ПМС1-1, обеспечивавших частоту ультразвуковых колебаний 22 кГц при их амплитуде до 20 мкм и мощности до 1 кВт. Вследствие частичного преобразования механической энергии ультразвуковых колебаний в тепловую образцы при вводе в них ультразвука нагревались до 100 °С.

Экспериментальный стенд лазерно-ультразвукового раскроя листового металла. Для реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла толщиной от 1 до 3 мм был создан стенд (рис. 4) на базе непрерывного твердотельного YAG:Nd-лазера ЛТН-103 (1) с фокусирующей оптической системой СОК-1 (2), программируемого устройства перемещения на основе скрайбера Алмаз-М (3), устройства ввода в металл ультразвуковых колебаний (4) и лабораторного ультразвукового генератора (5).

Р и с. 3. Схема лазерно-ультразвуковой обработки образцов:
1 – фокусирующая оптическая система; 2 – образец; 3 – трансформатор амплитуды ультразвуковых колебаний; 4 – магнитострикционный преобразователь.

Р и с. 4. Общий вид стенда лазерно-ультразвукового раскроя листового металла:
1 – лазер ЛТН-103; 2 – оптическая система СОК-1; 3 – скрайбер Алмаз-М; 4 – устройство ввода ультразвука; 5 – лабораторный ультразвуковой генератор; 6 – осциллограф С1-68.

Оптическая система СОК-1 обеспечивала перевод лазерного луча из горизонтальной плоскости в вертикальную и его фокусировку на фокусном расстоянии 100 мм в пятно диаметром 0,1 мм. Скрайбер Алмаз-М позволял реализовывать двухкоординатное перемещение листового металла под лучом лазера со скоростью до 8 мм/с. Лабораторный ультразвуковой генератор и разработанное нами устройство ввода ультразвука служили для формирования и соосного с лазерным лучом ввода ультразвуковых колебаний в зону лазерного расплава. По сравнению с промышленными образцами использованный в схеме лабораторный ультразвуковой генератор имел более широкий диапазон выходных частот (от 10 до 1600 кГц) и обеспечивал автоподстройку резонансной частоты при вводе ультразвука в металл.

Внешний вид в сборке и деталировка разработанного нами устройства для реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла показаны на рис. 5. Устройство крепится к оптической системе СОК-1 и спроектировано для фокусного расстояния 100 мм. Оно состоит из корпуса со штуцером для подачи газа под давлением до 20 атм (1); пьезоэлектрического преобразователя, изготовленного в виде кольца из керамики ЦТС-23 (2); трансформатора амплитуды ультразвуковых колебаний мембранного типа из стали Ст60Г (3) с вплавленным и закаленным импульсным лазерным излучением до твердости 80 НV наконечником из стали Р6М5 (4); противовеса из бериллиевой бронзы (5); устройства прижима, состоящего из направляющих (6), пружин (7) и прижимных гаек (8) для обеспечения прижима наконечника трансформатора к поверхности листового металла с усилием до 150 Н. Колебательная система устройства, в которую входят пьезокерамический преобразователь, трансформатор амплитуды и противовес, рассчитана на рабочую частоту преобразователя 22 кГц.

Устройство имеет осевое отверстие для подачи сквозь него лазерного луча и струи газа. В зону лазерно-ультразвукового раскроя поддувался сжатый воздух при исходном давлении 5 атм. Схема реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла показана на рис. 6.

Р и с. 5. Внешний вид в сборке и деталировка устройства ввода ультразвука:

1 – корпус со штуцером для подачи газа; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – трансформатор амплитуды ультразвуковых колебаний; 4 – наконечник трансформатора; 5 – противовес; 6 – направляющие устройства прижима; 7 – пружины; 8 – прижимные гайки.

Р и с. 6. Схема реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла:

1 – корпус устройства ввода ультразвука; 2 – стеклянная пластинка; 3 – пьезоэлектрический преобразователь; 4 – трансформатор амплитуды ультразвуковых колебаний; 5 – наконечник трансформатора; 6 – противовес; 7 – листовой металл; 8 – устройство перемещения

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 7 приведены поверхности образцов, подвергнутые импульсному лазерному оплавлению в отсутствии и при наложении

ультразвуковых колебаний. В соответствии с теоретическими предпосылками наблюдается весьма сильное различие рельефов поверхности формирующихся лазерных расплавов, обусловленное возникновением акустических течений и развитием кавитации в лазерном расплаве при вводе в него ультразвука.

Р и с. 7. Поверхности ванн лазерных расплавов, сформированных в отсутствии (а) и при наложении (b) ультразвуковых колебаний

Р и с. 8. Поперечные шлифы ванн лазерных расплавов, сформированных в отсутствии (а) и при наложении (b) ультразвуковых колебаний

Сопоставление глубин ванн лазерных расплавов показывает, что они заметно возрастают, когда в лазерный расплав в процессе его формирования вводятся ультразвуковые колебания (рис. 8). Последнее обусловлено протеканием в расплаве процесса ускоренного тепломассопереноса, с одной стороны, и повышением температуры массы образца при воздействии на него мощного ультразвука – с другой.

Сопоставительные эксперименты по лазерному и лазерно-ультразвуковому раскрою листового металла показали хорошее согласие полученных результатов с теоретическими предпосылками влияния ультразвуковых колебаний на качество реза и возможности осуществления раскроя без гратообразования. Как видно из рис. 9, влияние ультразвука весьма существенно отражается на качестве реза, оно тем заметнее, чем толще листовая металл. Последнее объясняется возрастанием коэффициента поверхностного натяжения расплава вследствие уменьшения его температуры на противоположной стороне листа при заданной плотности мощности лазерного излучения на поверхности. С ростом толщины листа гратообразование при лазерном раскросе возрастает. Ввод ультразвуковых колебаний интенсифицирует процессы тепломассопереноса в лазерном расплаве и тем самым повышает его температуру и уменьшает коэффициент поверхностного натяжения на противоположной стороне листа. Последнее облегчает отрыв капель расплава от края реза потоком поддуваемого газа. Дополнительный эффект приносят ультразвуковые вибрации, сами по себе в отсутствии газового потока способствующие отрыву капель расплава от края реза.

Р и с. 9. Зоны лазерного (а) и лазерно-ультразвукового (b) реза в листовом металле толщиной 2.5 мм

Р и с. 10. Заготовки стопорных колец толщиной 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 и 3.0 мм, вырезанные лазерно-ультразвуковым источником

Отработанный процесс реализован при вырезке заготовок стопорных колец из листового стали толщиной до 3 мм (рис. 10). В результате использования комбинированного лазерно-ультразвукового источника достигнут высококачественный раскрой листового металла.

Заключение. Таким образом, получены экспериментальные результаты, в полной мере подтверждающие справедливость теоретических предпосылок существенного влияния ультразвука на изменение характера протекания физических процессов в ваннах лазерных расплавов. Введение ультразвуковых колебаний в лазерный расплав интенсифицирует в нем процессы тепломассопереноса, что ведет к сглаживанию температурных неоднородностей и выравниванию рельефа поверхности. Интенсивный тепломассоперенос наряду с частичным преобразованием механической энергии ультразвуковых колебаний в тепловую способствует возрастанию глу-

бин ванн лазерных расплавов. Последнее является важным с точки зрения повышения эффективности процесса газолазерной резки металла источником с наперед заданной мощностью излучения.

Разработано устройство и создан стенд для реализации процесса лазерно-ультразвукового раскроя листового металла. В результате проведенных исследований теоретически обоснована и экспериментально показана принципиальная возможность осуществления лазерного раскроя листового металла без графообразования при условии ввода в зону реза ультразвуковых колебаний. Полученные результаты лазерно-ультразвукового раскроя листового металла уже на данном этапе могут быть широко использованы на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Реди Дж.* Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981. 638 с.
2. *Григорьянц А.Г., Соколов А.А.* Лазерная резка металлов. М.: Высшая школа, 1988. 127 с.
3. *Гуреев Д.М., Ямщиков С.В.* Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов. Самара: Самарский гос-университет, 2001. 392 с.
4. *Таблицы физических величин / Справочник.* Под ред. академика И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Поступила 18.02.2003 г.