

О ЗАКОНАХ ПОДОБИЯ ТЕЧЕНИЯ МНОГОФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

В.М. Фомин, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев, А.А. Голышев

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Россия г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1*

Введение. Одно из интересных и практически значимых применений результатов исследования воздействия мощного лазерного излучения на вещество является лазерная резка металлов [1,2]. Однако, несмотря на большое количество исследований, полная и взаимосвязанная физическая картина лазерной резки к настоящему времени не создана [2-4]. Существующие теоретические модели газолазерной резки не позволяют обосновать взаимосвязь оптимальных для резки параметров и закон их изменения с толщиной разрезаемого материала.

Важнейшей характеристикой лазерной резки металлов является ее качество [5]. Трудность оптимизации качества реза связана, прежде всего, с многообразием и сложным взаимодействием протекающих при лазерной резке физических процессов. В узком, масштаба 0.2-0.5 мм, канале происходит течение (кислород, азот), паров и капель металла, плавление железа и движение расплава, выделение энергии лазерного излучения и окисление железа при использовании кислорода в качестве технологического газа, отвод тепла вглубь металла.

Цель настоящей работы – экспериментальный поиск методов обобщения разрозненных экспериментальных данных на основе экспериментального поиска безразмерных параметров и законов подобия, определяющих свойства течения многофазной жидкости в условиях лазерной резки металлов толщиной 5-25 мм с использованием лазеров с различной, отличающейся в 10 раз длиной волны. Важнейшей задачей работы является поиск критериальных зависимостей, определяющих качественный рез. В качестве критерия качества реза выбрана минимальная шероховатость поверхности реза при отсутствии грата.

Методика экспериментов. Эксперименты по резке проводились на созданном в ИТПМ СО РАН лазерном технологическом комплексе на основе непрерывного CO₂-лазера с параметром качества пучка ВРР (Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне), равном 4,7 мм*мрад. Применялся также иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus мощностью 2 кВт и ВРР параметром 3.8 мм* мрад.

Шероховатость поверхности R_z может быть представлена, как функция следующих параметров:

$$R_z = F(W, v_c, t, b, \Delta P, \rho_g, \mu_g, C_m, \lambda_m, \rho_m, T_m, L_m), \quad (1)$$

где W - мощность излучения, v_c - скорость резки, t - толщина стального листа, b - ширина реза, ΔP - перепад давления технологического газа на толщине листа, ρ_g, μ_g – плотность и динамическая вязкость технологического газа, $C_m, \lambda_m, \rho_m, T_m, L_m$ – теплоемкостью, теплопроводностью, плотность, температура и теплота плавления разрезаемого материала.

Для проведения оптимизации условий резки, т. е. нахождения минимума функции R_z , в данных опытах в качестве основных исходных параметров, которые последовательно варьировались при лазерной резке, являлись толщина разрезаемого листа, мощность

лазерного излучения, скорость резки, избыточное давление вспомогательного газа (кислорода) на входе в канал реза и ширина реза. Из этих параметров можно составить следующие безразмерные комбинации: числом Пекле: $Pe^* = V_c^* b^* \rho_m C_m / \lambda_m = V_c^* b^* / \gamma$ - отношение скорости резки к характерной скорости распространения тепловой волны от цилиндрического источника тепла диаметром, равным ширине канала реза - b , $\gamma = \lambda_m / (\rho_m C_m)$ - температуропроводность; отношения мощности лазерного излучения к потерям энергии в единицу времени за счет теплопроводности $Be_1 = W / (t \lambda_m T_m)$ и затратам на нагрев и плавление удаляемой в процессе массы стали $Be_2 = W / (V_c t b E_m)$, где $E_m = \rho_m (C_m T_m + L_m)$; отношение пространственных размеров b/t , которое можно рассматривать как параметр, характеризующий силовое воздействие газового потока на пленку расплава. При течении газа в трубе постоянного сечения при постоянном градиенте давления на длине t (течение Пуазейля) величина b/t определяет соотношение сил вязкого трения и сил давления: $b/t = 4\tau / \Delta P \approx 8 / (Re E_u)$, где $\tau = \mu_g \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \approx \mu_g (2 \mu_g / b)$ - касательное напряжение; $E_u = \Delta P / (\rho_g u_g^2)$ - число Стефана; $Re = \rho_g b u_g / \mu_g = \Delta P / (E_u \mu_g (u_g / b)) \approx \Delta P / \tau E_u$ - число Рейнольдса [14]. Так как в экспериментах использовались небольшие значения $\Delta P \leq 0.5$ кГ/см², то течение можно считать несжимаемым $E_u \approx const$.

При этом три параметра связаны между собой следующим соотношением: $Be_1 = Be_2 \cdot Pe(1 + S_f)$, где $S_f = \rho_m L_m / \rho_m C_m T_m$ - число Стефана, определяемое свойствами разрезаемого материала и в нашей работе являвшееся константой. Следовательно, в качестве независимых переменных задачи можно использовать следующие параметры: $Be_1, Pe, b/t$.

Таким образом, выражение (1) можно представить в виде:

$$R_z/t = \Phi(Pe, Be_1, b/t, A), \quad (2)$$

где символом A_i обозначен набор безразмерных параметров, характеризующих систему фокусировки излучения, качество лазерного пучка, свойства и химический состав разрезаемого материала

Необходимо отметить, что саму возможность существования функции (2), т.е. описание всего многообразия экспериментальных данных шероховатости поверхности резки через указанные безразмерные параметры, требовало экспериментальной проверки. Второй фундаментальной задачей, имеющей практически важное значение, являлось экспериментальное доказательство наличия минимума этой функции, которое соответствовало бы оптимальному режиму резки.

Названным безразмерным параметрам соответствуют размерные комбинации W/t , bV_c , b/t , которые могут быть определены экспериментально. Эти величины (в размерном или безразмерном виде) используются при решении тепловых и газодинамических задач, том числе и задач, связанных с лазерной обработкой материалов [10].

Результаты экспериментов и их обсуждение. Оптимизации качества реза по двум параметрам V_c и b представлены на рис.1. Приведены обобщенные данные оптимальной скорости при различных мощностях и толщинах 5, 10, 16, 20 и 25 мм. Каждая точка на этих рисунках соответствует минимуму R_z при последовательной оптимизации по скорости - V_c и ширины резки - b , для заданной мощности излучения - W .

Результаты оптимизации, представленные в координатах $(V_c - W)$ (Рис.1), образуют некую довольно широкую область оптимальных параметров. На рис. 2 те же данные представлены с использованием безразмерных переменных $Be_1 = W / (t \lambda_m T_m)$ и

$Pe^* = V_c^* b^* \rho_m C_m / \lambda_m = V_c^* b^* / \gamma$, рассчитанных по оптимальной скорости и оптимальной ширине реза. Теплофизические характеристики приняты для железа: удельная теплопроводность $\lambda_m=80$ Вт/(м·К), удельная теплоемкость $C_m=450$ Дж/(кг·К), удельная плотность $\rho_m =7900$ кг/м³, $T_m=1538$ °С, и для нержавеющей стали: $\lambda_m=27$ Вт/(м·К) и $C_m=596$ Дж/(кг·К).

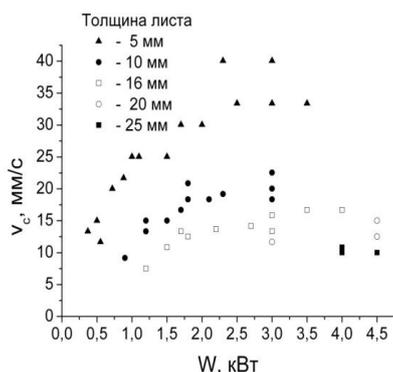


Рис.1. Зависимость оптимальной скорости резки от мощности при различной толщине листа: а – в координатах W, V_c, b – в координатах $W/t, bV_c$.

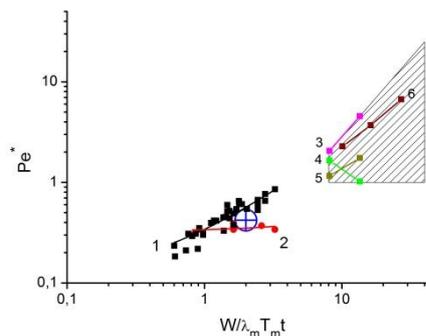


Рис. 2. Оптимальные числа Пекле в зависимости от безразмерной мощности.

- 1 – резка низкоуглеродистой стали CO₂-лазером, $t=5, 10$ и 16 мм;
- 2 – резка низкоуглеродистой стали волоконным лазером, $t=3, 5$ и 10 мм;
- 3 – резка нержавеющей стали волоконным лазером, $t=3$ и 5 мм, при $V_{opt(max)}$;
- 4 – резка нержавеющей стали волоконным лазером, $t=3$ и 5 мм, при $V_{opt(min)}$;
- 5 – резка нержавеющей стали CO₂-лазером, $t=3$ и 5 мм, при $W=2$ кВт;
- 6 – резка нержавеющей стали CO₂-лазером, $t=3$ и 5 мм, при $W=4$ кВт;

Из рис. 2 видно, что в безразмерных координатах все точки рис.1 можно описать одной зависимостью. Эта зависимость близка к линейной с коэффициентом наклона $W/(tbV_c) = 19.4$ Дж/мм³. То есть, во всем диапазоне толщин и мощностей при условии минимума R_2 вклад лазерной энергии в единицу объема удаляемого вещества остается постоянным. Данный результат наглядно демонстрирует эффективность использования выбранных безразмерных параметров для обобщения экспериментальных данных по лазерной резке.

На рис.2 представлены также обобщенные данные для резки разных толщин с кислородом и азотом для двух лазеров. Видно, что в безразмерных координатах данные для разных толщин при кислородной резке описываются одной зависимостью, вид которой определяется типом лазера. В случае волоконного лазера и низкоуглеродистой стали (рис.2) зависимость оптимизированного по двум параметрам числа Пекле от мощности для толщин 3-10 мм является «вырожденной» – разным значениям лазерной мощности и независимо от толщины разрезаемого листа соответствует одинаковая в пределах погрешности эксперимента оптимальная величина числа Пекле $Pe^* = 0.35$. В случае CO₂-лазера оптимальное число Пекле возрастает с ростом безразмерной мощности и не зависит от толщин описывается единой зависимостью $Pe^*(W/\lambda_m t T_m)$, близкой к линейной.

На втором этапе проводилась оптимизация по трем параметрам, т.е. кроме скорости и ширины реза учитывалась зависимость шероховатости при кислородной резке от мощности лазеров, т.е. ее изменение вдоль линий, представляющих на рис.2 зависимостей $Pe^*(W/\lambda_m t T_m)$. Оптимальная зона резки с кислородом показана на рис 2 заштрихованным кругом. Отметив, что оптимальные условия оказались слабо зависимыми от типа лазера. Параметр R_2/t имеет минимум, лежащий в интервале: $R_2/t = (1.7 \div 2.3) \cdot 10^{-3}$, который достигается при значениях $Be_1 = (1.45 - 1.78)$, $Pe = (0.5 - 0.69)$.

При резке с инертным газом (рис.2) минимальная шероховатость наблюдается в широком диапазоне скоростей и мощности лазеров. Зона качественной резки с азотом представлена на рис. 2 заштрихованной областью. Верхняя граница этой зоны определяется условием не прорезания пластины, а нижняя ухудшением шероховатости.

Заключение. Проведено сравнительное исследование течения многофазной жидкости в условиях лазерной резки низкоуглеродистой и нержавеющей стали с помощью волоконного лазера с длиной волны 1.07 мкм и CO₂-лазера с длиной волны 10.6 мкм. В результате показана эффективность применения безразмерных параметров для обобщения экспериментальных данных и нахождению условий лазерной резки, при которых шероховатость поверхности реза минимальна. Показано, что безразмерные переменные – число Пекле $V_c b / \gamma$ и лазерная мощность на единицу толщины листа $W / \lambda_m t T_m$ применимы для описания резки волоконным и CO₂-лазерами, с использованием кислорода и азота в качестве технологического газа.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о определяющей роли термодинамических процессов, формируемого поля температур на течение многофазной жидкости в щели лазерного реза, которое обуславливает структуру поверхности реза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Powell J.** LIA Guide to Laser cutting // Orlando: Laser Institute of America, 2008. 104 p.
2. **Petring D., Schneider F., et al.** The relevance of brightness for high power laser cutting and welding // Proc. of 27th Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Oct. 20-23, 2008, USA, pp. 95-103.
3. **Powell J., Petring D., et al.** Laser–oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction // D:Appl. Phys. 42,015504 (2009).
4. **Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E.** Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation // Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, **69**, 30 (2013)
5. **Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б.** Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO₂-лазеров // *Квант. электроника*, 2015, **45** (9), 873–878