

Термические потери в процессе газолазерной резки металлов

И.О.Базылева, М.Г.Галушкин, В.С.Голубев, Е.А.Дубровина, В.А.Карасев

Газолазерная резка (ГЛР) сопровождается образованием зоны термического воздействия. На это затрачивается часть мощности лазерного пучка. Термические потери могут не только понижать КПД ГЛР, но вызывать термические деформации обрабатываемого материала. Проведены измерения температуры нагрева образцов при ГЛР. Получена зависимость температуры образцов от скорости резания при продувке азотом и кислородом. В первом случае образовывались граты, вклад которых в нагрев пластины учитывали при оценке баланса энергии процесса ГЛР. В результате найдена предельная величина тепловых потерь и ее зависимость от скорости. Обнаружено, что доля термических потерь при малых скоростях резки существенна. Предложена качественная теоретическая модель, наиболее адекватно описывающая полученные экспериментальные результаты. Определены условия ГЛР, при которых термические потери становятся минимальными.

1. Введение

Газолазерная резка (ГЛР) листовых металлов по сравнению с газовой и плазменной имеет ряд преимуществ. К ним относятся: высокая скорость и точность, узкий рез, прямые и параллельные кромки, отсутствие грата, малая з.т.в. и низкая шероховатость поверхности реза. Известно, что высокое качество ГЛР достигается, прежде всего, за счет сравнительно малого тепловложения и, как следствие, малой деформации заготовки и вырезаемой детали.

В теории ГЛР широко используется баланс энергии в виде сравнительно простой формулы Свифта-Хука-Джика [3]. Эта формула учитывает затраты энергии на нагревание и плавление удаляемой газовым потоком массы материала. При этом используется приближение ее мгновенного выноса, т.е. по существу сублимационное приближение. Однако в реальном процессе ГЛР существуют термические потери, связанные с нагревом материала на границе реза. Эти термические потери обычно малы и поэтому их пренебрежение часто оправдано. На практике встречаются случаи, когда из одной заготовки необходимо вырезать большое число мелких деталей или изготовить плотно решетное с малым размером ячейки. Незначительный нагрев заготовки при вырезании отдельных

деталей суммируется. Естественное конвективное охлаждение металлического листа, как правило, мало. В результате температура заготовки повышается до такой величины, что происходит ее коробление, которое в отдельных случаях может носить необратимый характер, приводящий к увеличению числа бракованных деталей. Другим случаем, когда термические потери играют существенную роль, является ГЛР с малой скоростью и на предельной глубине резания.

В настоящее время газолазерная резка широко применяется в отечественной и зарубежной промышленности, поэтому представляется актуальным изучение возможности снижения термической нагрузки на обрабатываемый материал путем оптимизации основных параметров процесса.

2. Результаты экспериментов

Эксперименты по изучению влияния мощности лазера и скорости резки на величину термических затрат проводились с малоуглеродистой листовой сталью толщиной 2 мм. Предварительно вырезанные образцы в виде прямоугольников, размером 110×70 мм охлаждались до температуры окружающего воздуха. Стальная пластина закреплялась на термоизолирующих опорах двухкоординатного

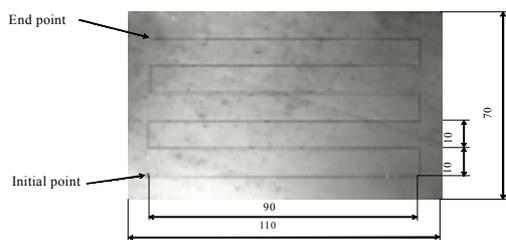


Рис.1. Вид образца и геометрия реза.

стола и подвергалась лазерной резке. Внешний вид образца и геометрические размеры контура резки приведены на рис.1. Температура образца после резки измерялась хромель-алюмелевой термопарой.

В качестве источника непрерывного лазерного излучения использовался CO_2 -лазер ТЛ-1,5, мощность излучения которого на длине волны 10,6 мкм варьировалась в пределах от 500 до 1000 Вт. Качество, близкое к одномодовому, излучения составляло величину $M^2=1,1$. Размер пучка на выходе лазера 17 мм. Преобразование линейной поляризации излучения лазера в круговую, обеспечивалось 90° -фазосдвигающим зеркалом, установленным в тракте транспортировки излучения.

Фокусирующим элементом режущей головки являлась плоско-выпуклая линза из ZnSe, диаметром 38,1 мм. Полное поглощение проходящего через линзу излучения — 0,6%. Во всех случаях положение фокуса $F=127$ мм выбиралось на поверхности образца ($\Delta F=0$). Диаметр выходного отверстия медного сопла составлял $d_c=1,0$ мм, форма сопла — конус, переходящий в цилиндр. Расстояние между соплом и образцом в процессе резки $h_z=1,0$ мм. Режущая головка, закрепленная на каретке X-Y стола, могла перемещаться относительно образца со скоростью от 5 до 200 мм/с при ускорениях до 1250 мм/с². Задержка при врезке не превышала 0,7 с. В качестве вспомогательного газа использовался азот, воздух и кислород. Давление газа в сопле составляло 0,5 бар.

Зависимость температуры образцов после резки контура от скорости представлена на рис.2. Данные получены при варьировании мощности лазера $P_{\text{л}}$ от 0,5 до 1 кВт и рода режущего газа. Как видно из рис.2, кислородная резка при мощности лазера $P_{\text{л}}=737$ Вт приводит к наименьшему нагреву образцов в интервале скоростей от 40 до 70 мм/с. Этим же параметрам соответствовало лучшее качество резки (отсутствие грата и наибольшая параллельность кромок реза, рис.3). Следует отметить, что как

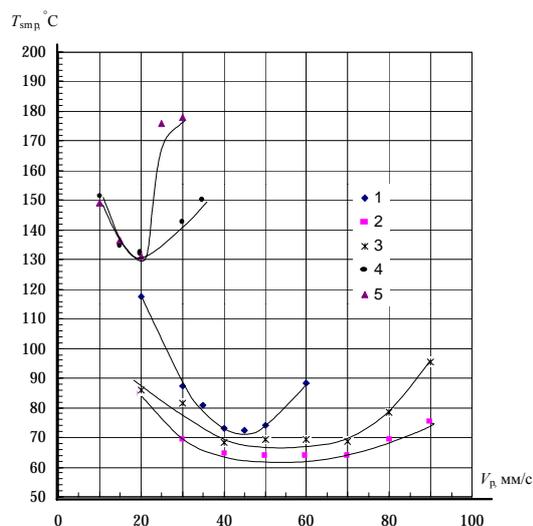


Рис.2. Зависимость температуры нагрева образцов от скорости резки. 1 — $P=518$ Вт (резка с кислородом); 2 — $P=737$ Вт (резка с кислородом); 3 — $P=1000$ Вт (резка с кислородом); 4 — $P=1000$ Вт (резка с воздухом); 5 — $P=1000$ Вт (резка с азотом).

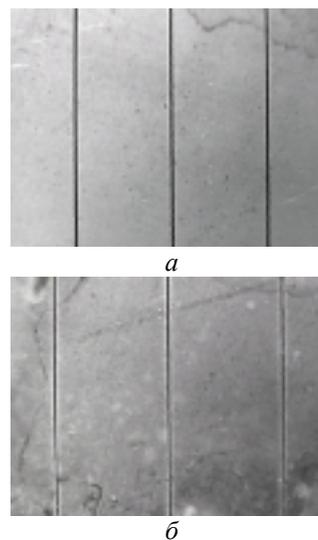


Рис.3. Вид реза с кислородом. $P=737$ Вт. а — вид сверху; б — вид снизу.

увеличение $P_{\text{л}}$ до 1000 Вт, так и уменьшение до 518 Вт при сохранении других параметров резки приводило к увеличению температуры образцов и уменьшению диапазона скоростей качественной резки. При мощности лазера $P_{\text{л}}=518$ Вт качественная резка наблюдалась в узком диапазоне скоростей от 40 до 50 мм/с.

Эксперименты показали, что в случаях поддува в зону резки воздуха или азота получить сквозное прорезание образца, при мощности лазера 500-

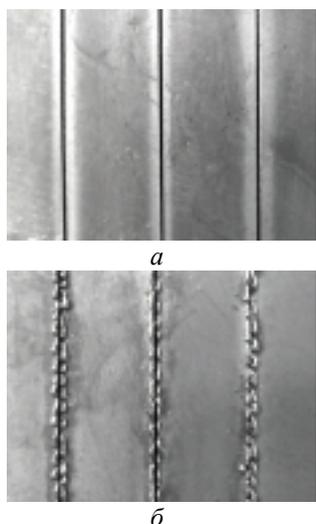


Рис.4. Вид реза с азотом, $P=1000$ Вт. *a* — вид сверху; *б* — вид снизу.

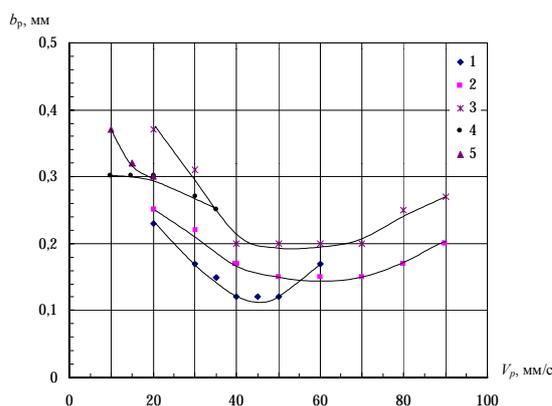


Рис.5. Зависимость ширины реза от скорости (давление вспомогательного газа 0,5 атм.). 1 — $P=518$ Вт, кислород; 2 — $P=737$ Вт, кислород; 3 — $P=1000$ Вт, кислород; 4 — $P=1000$ Вт, воздух; 5 — $P=1000$ Вт, азот.

700 Вт и скорости резки более 10 мм/с не представлялось возможным. Более того, даже при мощности 1000 Вт не была получена резка без грата. Расплав, выдуваемый струей воздуха или азота, практически не удалялся, застывая на нижней кромке реза в виде капель неокисленного металла (рис.4). Наименьшая температура, до которой нагревались образцы, в 2 раза превышала температуру образцов при газокислородной резке (рис.2).

Для более полного представления общей картины процесса на рис.5 приведены зависимости ширины реза от скорости. Из рисунка видно, что эти зависимости при разных условиях близки друг к другу и не противоречат общей закономерности: ширина реза

при одинаковой скорости растет с ростом мощности лазерного излучения.

3. Обсуждение

3.1. О термических затратах энергии на нагрев образца

Насколько нам известно, вопрос о затратах энергии на нагрев образца при ЛР в литературе [1-4] специально не обсужден. Рассмотрим уравнение баланса энергии при ЛР в упрощенной форме:

$$AP = E_s v h b + E_m v h 2x_{\perp}, \quad (1)$$

где A — доля мощности P лазерного пучка, затраченная на процесс резки, которая учитывает как неполноту поглощения излучения материалом (характеризуемую коэффициентом поглощения A_n), так и потерю мощности пучка из-за его “пролета” при несогласованности толщины образца h и скорости резки v . Величина

$$E_s \approx E_m (T_s/T_m) + H_m \quad (2)$$

— энергия единицы объема материала образца на поверхности фронта реза, T_s — температура поверхности расплава там же, T_m — температура плавления, $E_m \approx c_p T_m$ — энергия единицы объема при $T=T_m$, H_m — энтальпия фазового перехода при плавлении, c_p — теплоемкость единицы объема материала, b — ширина реза, x_{\perp} — зона прогрева в глубь материала от боковой поверхности реза по уровню e^{-1} от величины T_s :

$$x_{\perp} \approx \sqrt{\frac{2\chi}{v} \left(b + \frac{\chi}{v} \right)}, \quad (3)$$

χ — температуропроводность материала.

В уравнении (1) не учтено дополнительное энерговыделение за счет реакции окисления материала при поддуве кислородом.

Отношение мощности P_T , затрачиваемой на боковой нагрев материала ($P_T = E_m v h 2$) к полезной мощности P_n , затрачиваемой на нагрев и плавление материала на фронте реза ($P_n = E_s v h b$) с учетом (3), равно:

$$\frac{P_T}{P_n} \approx \frac{T_m}{T_s} \frac{2x_{\perp}}{b} \approx 2\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\chi}{bv} \right) + \left(\frac{\chi}{bv} \right)^2}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что при $v \rightarrow 0$ вся мощность лазера расходуется на нагрев материала. На основании выражений (1) и (4) следует, что в случае $v \rightarrow 0$ при заданной величине AP существует предельно достижимая глубина прорезания, равная

$$h_T = A_n P (2\sqrt{2} E_m \chi)^{-1}. \quad (5)$$

Если дана толщина материала h , то при малой скорости резки ($v \ll \chi/b$) существует минимальная (пороговая) мощность

$$P^* = 2\sqrt{2} A_n^{-1} E_m \chi h, \quad (5a)$$

начиная с которой (и выше) резка материала данной толщины энергетически возможна. (При поддуве кислорода в величину P^* входит мощность реакции окисления; практически такой поддув позволяет снизить пороговую мощность лазера в 2-3 раза).

Заметим, что при малых скоростях ЛР, когда $v \ll \chi/b$, величина P_T перестает зависеть от v :

$$P_T \cong A E_m h b \left(2\sqrt{2} \frac{\chi}{b} + v \right) \rightarrow A_n 2\sqrt{2} E_m h \chi, \quad (6)$$

при $v \rightarrow 0$

При больших скоростях резки ($v \gg \chi/b$) отношение P_T/P_n равно:

$$\frac{P_T}{P_n} \cong 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{\chi}{vb} \frac{T_m}{T_s}} \ll 1. \quad (7)$$

Для оценок можно принимать, что $T_s = T_T$, поскольку скорость удаления расплава с фронта реза, зависящая от давления режущего газа, в оптимальном режиме резки должна быть достаточно велика: при этом превышение величины T_s над T_T незначительно, $|T_s - T_T| \ll T_T$

Абсолютное значение P_T при этом равно:

$$P_T \cong 2\sqrt{2} \chi E_m h \sqrt{1 + vb/\chi}. \quad (8)$$

Максимальная толщина разрезаемого материала при $v \gg \chi/b$ равна

$$h_m \cong \frac{AP}{E_m vb}. \quad (9)$$

Эти рассуждения применимы, если толщина образца $h_0 = h$ не превышает максимальную глубину резки h_m , определяемую формулами (5) при $v \ll \chi/b$, и (9) при $v \gg \chi/b$.

Высказанные соображения позволяют сделать выводы об оптимальных энергетических условиях ЛР. Из (1) и (4) следует, что погонные затраты энергии лазерного пучка на осуществление 1 см реза образца толщиной h равны

$$\frac{P}{v} \cong A_n^{-1} E_T h_0 b \left[1 + 2\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\chi}{bv} \right) + \left(\frac{\chi}{bv} \right)^2} \right], \quad (10)$$

где A_n — коэффициент поглощения излучения. Величина (P/v) уменьшается с ростом v , стремясь к значению $A_n^{-1} E_T h_0 b$.

Если потребовать, чтобы $P_T/P_n \ll 1$, то из (7) следует, что $v \gg 8\chi/b$, тогда из (10) вытекает требование к мощности лазера, при которой энергозатраты на производство 1 погонного см реза относительно невелики $P > A_n^{-1} 8\chi E_m h_0 \approx 10^4 h_0$ (Вт) (цифры взяты для параметров стали, т.е. $\chi \approx 10^{-1}$ см²/с; $E_m \approx 10^4$ Дж/см³; $A_n \approx 1$).

Таким образом, для энергетически экономного процесса ЛР нужны большие значения как мощности пучка, так и скорости резки.

3.2. О методике измерения термических потерь

Экспериментальное определение величины P_T можно осуществить, производя рез одной и той же длины L на образце площадью S и толщиной h_0 , с плотностью ρ и теплоемкостью c . Время резки составит L/v , а увеличение температуры образца при малых v за это время составит:

$$\Delta T_{\text{обр}} = \frac{P_T L/v}{\rho c S h_0} = T_m \frac{h}{h_0} \frac{bL}{S} \times$$

$$\times 2\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\chi}{bv} \right) + \left(\frac{\chi}{bv} \right)^2} \rightarrow T_m \frac{h}{h_0} \frac{L}{S} 2\sqrt{2} \frac{\chi}{v}, \quad (11)$$

(при малых v).

Здесь h — глубина прорезания. При $h_m < h_0$ (несквозное прорезание) величина $h = h_m$. При $h_m > h_0$ (т.е. в случае, когда при заданных значениях P , v возможно прорезание образцов с большими, нежели h_0 , толщинами) величина $h = h_0$.

В случае малых скоростей ЛР ($v \ll \chi/b \approx 2$ см/с, если $b = 2$ мм), величина h_T определяется формулой (5a).

При *несквозном прорезании* ($h_m < h_0$), т.е. в соответствии с (5a), при $P < P^*$ оптимальным энергетическим условием ЛР, т.е. $h = h_m = h_0$ при данном значении v , соответствует величина $P = P^*$.

С помощью (5) и (9) определяем:

$$\Delta T_{\text{обр}} = \frac{\sqrt{2} L A_n P}{(\rho c h_0 S) v}. \quad (12)$$

Как следует из (12), при *несквозном прорезании* ($h_m < h_0$) величина $\Delta T_{\text{обр}}$ пропорциональна P .

При сквозном прорезании ($h_m > h_0$, $h = h_0$, т.е. при $P \geq P^*$), согласно (11) величина $\Delta T_{обр}$ равна:

$$\Delta T_{обр} = T_m \frac{bL}{S} 2\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\chi}{bv}\right) + \left(\frac{\chi}{bv}\right)^2}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что в случае $h_0 < h_T$ величина $\Delta T_{обр}$ не зависит от P .

Подставив в (13) параметры нашего эксперимента: $L=65$ см; $S=77$ см²; $h_0=0,2$ см; $\rho c=5$ Дж/(см³·К); $\chi=10^{-1}$ см²/с; $\Delta p=0,5$ бар; диаметр сопла 1мм; $A_n \approx 1$ ("кинжальное" проплавление материала), найдем для $v=5$ см/с (минимум кривых на рис.2 для случая сквозного реза): $\Delta T_{обр} \approx 110$ К. При этом, в соответствии с (5а), величина $P^* \approx 360$ Вт, т.е. кривые 1, 2 и 3 на рис.2 должны действительно удовлетворять условию сквозного реза $P \geq P^*$.

Более низкие измеренные значения $\Delta T_{обр}$ (рис.2), вероятно, следует объяснить конвективным охлаждением образца веерной струей режущего газа, обдувающей поверхность образца со стороны сопла.

Оценки с помощью стандартных справочных формул для конвективного теплообмена показали, что охлаждение поверхности образца режущим газом следует учитывать уже при продолжительности цикла резки > 10 с, т.е. при скоростях резки $v < 7$ см/с.

Соответствующую поправку к величине $\Delta T_{обр}$ можно найти по экспериментально снятой кривой падения температуры образца после выключения лазерного пучка, но без выключения струи режущего газа.

Таким образом при $v \ll \chi/b$ и при любой мощности лазерного пучка, превышающей величину P^* ($P^* \sim h_0$, см. (5а)), нагрев образца определяется формулой (13), если только скорость резки v не настолько мала, чтобы учитывать конвективное охлаждение образца.

Рассмотрим теперь случай *больших скоростей* ЛР, ($v \gg \chi/b \approx 2$ см/с). Величина h_T определяется формулой (9).

При *несквозном прорезании*, т.е. при $h = h_m < h_0$ и, соответственно, (см. (9)), при:

$$P < P^{**} \equiv \frac{E_m}{A_n} h_0 b v \quad (14)$$

величина $\Delta T_{обр}$ растет с P и изменяется $\sim v^{-3/2}$:

$$\Delta T_{обр} = \frac{2\sqrt{2} A_n L (\chi/b)^{1/2}}{c \rho h_0 s} P v^{-3/2} \quad (15)$$

(в соответствии с (9) и (10)).

При *сквозном прорезании*, т.е. при $h_m \geq h_0$ и $P \geq P^{**}$, величина $\Delta T_{обр}$ не зависит от P на основании (11):

$$\Delta T_{обр} = T_m 2\sqrt{2} \frac{L}{S} \sqrt{\frac{\chi b}{v}}. \quad (16)$$

Из (16) видно, что с ростом v , величина $\Delta T_{обр}$ должна падать, вопреки экспериментально наблюдаемым зависимостям (рис.2).

3.3. Влияние грата на нагрев образца при ЛР

Учтем, с целью объяснения экспериментально обнаруженного роста $\Delta T_{обр}$ при больших скоростях v , что с ростом v повышается вероятность *образования грата* на нижней кромке реза. Грат представляет собой затвердевшие капли расплава, выносимого с фронта реза. Эти капли могут образоваться, во-первых, за счет их периодического срыва [11] с верхней кромки слоя расплава на фронте реза; эта кромка должна, по нашему мнению, перемещаться периодически вниз вдоль фронта в виде уступа, размер которого определяется условиями нагрева материала кромки частью падающего сверху пучка (согласно модели [12]). Размер отрывающейся капли r_k согласно [11] по порядку величины составляет:

$$r_k = \sqrt{\frac{\sigma b (1 - M^2)}{\gamma \rho M^2}} \approx 3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2} \text{ см} \quad (17)$$

(при $\sigma \approx 1,5 \cdot 10^3$ дин/см, $p = 10^6 - 10^7$ дин/см² = 1-10 атм., $M \approx 0,5$, $b = 2 \cdot 10^{-2}$ см), где σ — поверхностное натяжение расплава, p — полное давление режущего газа, M — число Маха потока режущего газа на входе в щель реза, γ — постоянная адиабаты ($\gamma = 1,4$).

Другой причиной образования капель может явиться ветровая неустойчивость поверхности расплава (называемая также неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца [8], являющейся частным случаем неустойчивости тангенциального разрыва [9]). Размеры капель, образуемых при этой неустойчивости, определяются нижеприводимой формулой (18) если толщина погранслоя газового потока над расплавом меньше величины r_k , определяемой по этой формуле.

$$r_k \approx \frac{2\sigma}{C_f (\rho_g v_g^2 / 2)} \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ см}, \quad (18)$$

где C_f — коэффициент скоростного напора ($C_f \approx 0,4$); v_g — скорость потока газа над фронтом реза; ρ_g —

плотность газа; σ — поверхностное натяжение расплава.

В (17) мы положили, что $\sigma=1,5 \cdot 10^3$ дин/см; $\rho_g v_g^2/2 \approx 10^5 \cdot 10^6$ дин/см²=0,1-1 атм.

Если же толщина погранслоя велика, (превышает размер r_k по (18), то размеры капель должны быть одного порядка величины с этой толщиной. Если в щели реза имеет место установившееся Пуазейлево течение режущего газа (т.е. при большой толщине материала h), то размер капель по порядку величины должен быть равен полуширине реза $b/2$. Условия образования грата, т.е. охлаждения и затвердевания жидких капель, прикоснувшихся из-за существования поперечной к плоскости щели реза компоненты скорости капли к нижней части боковых стенок и фронта реза, можно упрощенно представить следующим образом:

$$\frac{\chi}{v^2} < \frac{4r_k^2}{\chi} < \frac{r_k}{v_g} \sqrt{\frac{8 \rho}{3C_f \rho_g}} \quad (19)$$

Здесь χ/v^2 — характерное время остывания поверхности боковой стенки реза; $4r_k^2/\chi$ — время остывания капли; r_k/v_g — время отрыва капли от поверхности стенки за счет её ускорения скоростным напором набегающего потока газа. Из (19) оценивается размер r_k капель, которые скорее “примерзнут”, чем оторвутся от стенки, а также скорость лазерной резки v , при которой стенка охладится быстрее, чем затвердеет капля:

$$\left. \begin{aligned} r_k &\leq \frac{\chi}{v_g} \sqrt{\frac{8 \rho}{3C_f \rho_g}} \cong (1-3) \cdot 10^{-3} \text{ см} \\ v &\geq v^* = \frac{\chi}{2r_k} \cong 15 - 40 \text{ см/с} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(при $v_g \approx (1-3) \cdot 10^4$ см/с; $\chi \approx 10^{-1}$ см²/с; $\rho/\rho_g \approx 10^4$).

Таким образом, при увеличении скорости ЛР должна возрастать масса капель расплава, “примерзших” к нижним кромкам стенок реза; соответствующая добавка к тепловой мощности, поглощаемой образцом, равна $\eta E_m h v b$, где $\eta = \eta(v) \leq 1$ — относительная доля массы расплава, удаляемого при ЛР, отдавшая свое тепло образцу в результате превращения расплава в грат. Как следует из (20), с ростом v величина $\eta \rightarrow 1$.

Определение температуры $\Delta T_{\text{обр}}$ нагрева образца с учетом обсуждаемой дополнительной тепловой энергии, поступающей при $v \gg \chi/b$ от остывающего грата, можно произвести обобщая формулу (16) с помощью (11), где величина P_T определяется

согласно (8), с добавлением дополнительной мощности $\eta E_m h v b$.

$$\Delta T_{\text{обр}} = T_m \frac{bL}{S} \left[2\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\chi}{bv}\right) + \left(\frac{\chi}{bv}\right)^2} + \eta \right] \quad (21)$$

При росте v и, соответственно, росте η величина $\Delta T_{\text{обр}}$ может прекратить свое снижение и затем возрасти (рис.2). Численное решение тепловой задачи для количественного объяснения кривых рис.2 требует разработки сложных физических моделей образования, динамики и теплообмена капельной фазы, твердого образца и газового потока. Здесь мы ограничились качественными рассуждениями, практически на уровне гипотез. Помимо создания численных моделей процесса ЛР, необходимо также проведение специальной экспериментальной программы измерений теплофизических параметров процесса ЛР.

3.4. Влияние химической активности режущего газа на нагрев образца

В случае поддува кислорода или другого химически активного газа в левую часть уравнения баланса энергии (1) нужно добавить мощность $P_{\text{хим}}$ нагрева материала на фронте реза, выделяющуюся в результате химической реакции окисления расплава. По некоторым данным [10], величина $P_{\text{хим}}$ сопоставима с величиной $P_{\text{пол}} = E_m v h b$. Заметим качественно, что увеличение мощности, подводимой к фронту реза, должно приводить к увеличению максимальной глубины реза h_m (см. (5): здесь справа вместо $A_n P$ уже нужно подставить $A_n P + P_{\text{хим}}$).

Пусть задача поставлена так, что нужно разрезать подбором скорости v образец заданной толщины h_0 (но при условии $h_0 \leq h_m$) при разных уровнях подводимой суммарной мощности: в первом случае резки с инертным газом это будет мощность $P_{\Sigma} = A_n P$ (только от лазера), и во втором случае резки с кислородом, это будет мощность $P_{\Sigma} = A_n P + P_{\text{хим}}$. Тогда в первом случае для выполнения условия $h_0 \leq h_m$ величина v должна быть меньше, чем эта же величина во втором случае.

Действительно, из уравнения баланса энергии в форме (10) следует, что чем меньше суммарная мощность P_{Σ} , тем при меньшей скорости v_0 можно разрезать материал толщины h_0 (на пороге (по скорости) сквозного прорезания). Но повышение температуры образца, как видно из (11), на пороге (по скорости) сквозного прорезания не зависит от

абсолютной величины суммарной мощности, но возрастает с уменьшением скорости реза. Это объясняется тем, что при малых v ($v \ll \chi/b$), почти вся подводимая к образцу мощность расходуется на его нагрев, не зависит от скорости и пропорциональна толщине h_0 образца (см. (5a)). Нагрев образца $\Delta T_{\text{обр}}$ (см. (11)) пропорционален скорости резки (если не учитывать охлаждение образца во время резки). Поскольку пороговая скорость прорезания уменьшается с уменьшением P_{Σ} , то температура нагрева образца увеличивается.

Так можно попытаться качественно объяснить различие температур нагрева образца при поддуве азотом и кислородом (рис.2). В случае построения точной теоретической модели баланса энергии ЛР анализ кривых типа рис.2 позволит определить количественно величину $P_{\text{хим}}$, трудно поддающуюся прямому экспериментальному измерению.

Литература

1. В.П. Бабенко, В.П. Тычинский. Газовая резка материалов. Квантовая электроника, 5(11), с.3-21, 1972.
2. Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.Н. Кокора. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Машиностроение, Москва, 296 с., 1985.
3. А.А.Веденов, Г.Г.Гладуш. Физические процессы при лазерной обработке материалов. Энергоатомиздат, Москва, 207 с., 1985.
4. W.Steen. Laser Materials Processing. London, 256 p., 1991.
5. F.O.Olsen. Proc. SPIE 2207, p.402-413, 1994.
6. V.V.Semak, J.A. Hopkins, H.M. McCay. Proc. SPIE 2500, p.641-650, 1994.
7. H.Schlichting. Grenzschicht-Theorie. Verlag G.Braun, Karlsruhe, 742 p., 1968.
8. Н.В.Карлов, Н.А.Кириченко, Б.С.Лукьянчук. Лазерная термохимия. Наука, Москва, 215 с., 1992.
9. L.D.Landou, E.M.Lifshitz. Mechanique des Fluids. Mir, Moscow, 669 p., 1971.
10. P. Sforza, V. Santacesaria. Proc. SPIE 2207, p.836-847, 1994.
11. Н.К.Макашев, Е.С.Асмолов, В.В.Блинков и др. Квантовая электроника, 19(9), с.910-915, 1992.
12. В.С.Коваленко, В.В.Романенко, Л.М. Олещук. Малоотходные процессы резки лучом лазера. Техніка, Киев, 112 с., 1987.