

Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO₂-лазеров

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

Проведено сравнительное экспериментальное исследование лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали излучениями волоконного лазера с длиной волны 1.07 мкм и CO₂-лазера с длиной волны 10.6 мкм при толщине разрезаемых листов 3–16 мм. Для двух лазеров измерена зависимость скорости резки от мощности излучения и определена скорость резки, при которой шероховатость поверхности реза минимальна. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе резки для двух лазеров при разной скорости резки и мощности излучения. Установлено, что минимальная шероховатость поверхности реза достигается при значении поглощенной лазерной энергии в единице объема удаленного материала, равном 11–13 Дж/мм³, причем оно одинаково для двух лазеров и не зависит от толщины листа.

Ключевые слова: лазерно-кислородная резка, волоконный лазер, CO₂-лазер, качество реза, оптимизация, коэффициент поглощения излучения, удельная поглощенная энергия.

1. Введение

В течение последнего десятилетия активно исследуется и применяется лазерная резка металлов с помощью излучения твердотельных волоконных и дисковых лазеров с длиной волны около 1 мкм. Уже первые экспериментальные результаты показали, что характеристики резки – скорость, качество поверхности реза и их зависимость от толщины разрезаемого листа – различны при использовании твердотельного и CO₂-лазеров. Волоконные лазеры позволяют получить высокую скорость резки и высокое качество реза в случае тонких листов (не более 3–4 мм) [1]. При большой толщине листов разница в скорости уменьшается и становится несущественной, а шероховатость поверхности реза (характерная величина неоднородностей, которую в большинстве случаев принимают за основной показатель качества реза) в случае волоконного лазера больше, чем в случае CO₂-лазера.

В исследованиях по лазерной резке ведется поиск фундаментальных физических механизмов, которые позволили бы объяснить это различие характеристик реза исходя из параметров излучения [2–4]. Коэффициент поглощения металлами излучения с длиной волны 1.07 и 10.6 мкм по-разному зависит от угла падения. При нормальном падении коэффициент поглощения больше для излучения волоконного лазера, а при малых углах между осью пучка и поверхностью – для излучения CO₂-лазера [5]. Различаются также пространственные характеристики излучения двух лазеров, что обуславливает разную форму канала реза и разную величину поглощения на стенках канала [5, 6].

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская 4/1; e-mail: elexgol@cn.ru, smalik@ngs.ru, orishich@itam.nsc.ru, laser@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2014 г., после доработки – 1 апреля 2015 г.

В [7] проанализирована устойчивость волнового фронта по отношению к малым изменениям интенсивности излучения волоконного и CO₂-лазеров. Согласно результатам [7], при характерной для каждого лазера зависимости коэффициента поглощения от угла падения локальные изменения кривизны фронта реза приводят к таким изменениям коэффициента поглощения, которые способствуют увеличению возникших неоднородностей в случае волоконного лазера и их уменьшению в случае CO₂-лазера. Сделано предположение, что это может быть причиной неустойчивости фронта реза и повышенной шероховатости поверхности реза в случае волоконного лазера. В [8] в экспериментах по резке инструментальной стали дисковым и CO₂-лазерами установлено, что поверхность фронта реза может быть нерегулярной и иметь участки с отрицательным наклоном. В случае дискового лазера наблюдается больший наклон и волнистость фронта. Авторы объясняют это возможным многократным отражением излучения от стенок канала реза, более выраженным для излучения с длиной волны 1 мкм. В [4] проведено численное моделирование лазерной резки и сделан вывод о необходимости учета многократных отражений в энергетическом балансе резки и при формировании фронта реза. При длине волны лазерного излучения 1 мкм многократные отражения могут приводить к образованию внутри канала реза «горячих пятен» – областей с повышенным выделением энергии, что также может быть причиной образования дефектов поверхности и ухудшения качества реза.

В [3, 8] измерен коэффициент поглощения лазерного излучения и проведено сравнение баланса энергии при резке инструментальной стали дисковым и CO₂-лазерами с нейтральным газом. По результатам исследования, в случае дискового лазера расплав имеет более низкую температуру. Этим авторы [8] объясняют больший объем переплавленного слоя металла, оставшегося на стенках реза, и худшее качество поверхности реза по сравнению со случаем CO₂-лазера, так как при пониженной температуре расплав имеет большую вязкость и менее эффектив-

но удаляется из канала реза. Однако в расчетах [4] при резке волоконным лазером получена более высокая температура фронта реза по сравнению со случаем CO_2 -лазера, а возможной причиной появления большего объема переплавленного металла авторы [4] считают повышенное поглощение излучения на стенках при многократных отражениях.

Таким образом, к настоящему времени нет полной ясности относительно причин, по которым разные характеристики излучений волоконного и CO_2 -лазеров приводят к разным характеристикам реза. Предложенные объяснения не имеют надежного физического обоснования. Это связано, в том числе, и с недостатком экспериментальных данных сравнительных исследований резки двумя типами лазеров в сопоставимых условиях. В особенности это касается лазерно-кислородной резки. В недавней работе [9] проведено экспериментальное сравнение лазерно-кислородной резки излучениями волоконного и CO_2 -лазеров по энергии разделения (лазерной энергии, затрачиваемой на создание единицы площади поверхности лазерного реза). Но энергия разделения рассчитывалась по отношению к падающей мощности, измерения коэффициента поглощения лазерного излучения и баланса энергии не проводились. В настоящей работе впервые измерен коэффициент поглощения лазерного излучения и проведено детальное экспериментальное сравнение затрат поглощенной лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO_2 -лазеров.

2. Методика эксперимента

Для резки применялся иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus мощностью 2 кВт с коллиматором IPG (модель D5-WC/AC). Параметр качества пучка лазера BPP (Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне), равен 3.8 мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе после коллиматора равен 17 мм, фокусное расстояние линзы – 200 мм. Мощность излучения варьировалась в диапазоне от 0.5 до 2 кВт. Применялся также непрерывный CO_2 -лазер с параметром BPP, равным 4.7 мм·мрад [10]. Резка проводилась излучением с круговой поляризацией по традиционной схеме при мощности излучения от 0.5 до 3.5 кВт. Излучение фокусировалось линзой из ZnSe с фокусным расстоянием 190.5 мм. Диаметр пучка на линзе был равен 25 мм. Волоконным лазером разрезались листы низкоуглеродистой стали Ст3пс толщиной 3, 5 и 10 мм, CO_2 -лазером – толщиной 5, 10 и 16 мм. Струя кислорода формировалась коническим соплом при избыточном давлении газа в камере лазерного резака 0.25 МПа при резке листов толщиной 3 мм и 0.05 МПа при всех остальных толщинах.

Величина шероховатости поверхности реза (характерная высота неоднородностей) измерялась при помощи лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT вблизи верхней и нижней поверхностей листа. Большее значение из двух измеренных принималось как характеристическое для данного образца. Методика определения оптимальных значений скорости и ширины реза основана на измерении зависимости параметров резки от шероховатости и подробно описана в [11, 12].

Коэффициент поглощения A измерялся в процессе резки по методу [13, 14] и находился из соотношения

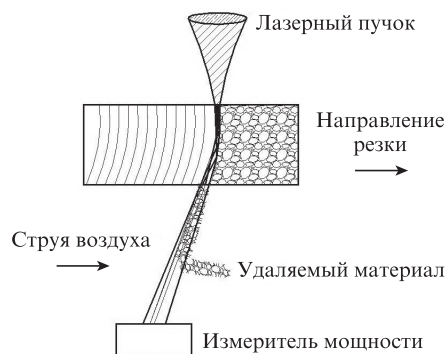


Рис.1. Схема измерения коэффициента поглощения лазерного пучка в канале реза.

$$A = \frac{W - W_{\text{тр}}}{W},$$

где $W_{\text{тр}}$ – мощность излучения, прошедшая через лазерный рез. Процесс измерения схематически показан на рис.1.

Измеритель мощности устанавливался на штативе, который был механически связан с лазерным резаком и двигался вместе с ним в процессе резки. Использовался измеритель мощности OPHIR 5000W-CAL-SH. Поток частиц металла и окислов из канала реза сдувался боковой струей воздуха и не попадал на приемную площадку измерителя.

3. Экспериментальные результаты

В предварительной серии экспериментов осуществлялся выбор фокусирующей линзы и давления кислорода в камере лазерного резака, при которых качество реза максимально. Листы толщиной 5 мм разрезались с использованием линз с фокусным расстоянием 127 и 190.5 мм в случае CO_2 -лазера, 150 и 200 мм в случае волоконного лазера. Минимальная величина шероховатости, которая была получена при резке с каждой парой линз, была приблизительно одинаковой (с экспериментальным разбросом не более 10%). Далее все эксперименты проводились при использовании линзы 200 мм в случае волоконного лазера и 190.5 мм в случае CO_2 -лазера.

На рис.2 показаны картины прожигания пластины из винипласта лазерным пучком после фокусирующей линзы без резки и во время резки после выхода пучка из канала реза. Отпечатки сделаны перед приемной площадкой измерителя мощности на расстоянии 150 мм от нижней поверхности разрезаемого листа при скорости резки 0.8 м/мин.

Все отпечатки делались при времени экспозиции 2 с. При мощности 0.5 кВт во время резки прожигания не зафиксировано. На photographиях видно, что пространственная структура пучков без резки и во время резки существенно различается. В процессе резки часть пучка проходит через канал реза, не взаимодействуя с материалом. Этой части пучка соответствует компактное пятно, центр которого совпадает с центром пятна при свободном распространении пучка без резки. Другая часть пучка отражается от фронта реза, ей соответствует пятно, смещенное от оси пучка в направлении, противоположном направлению резки, и вытянутое поперек направления резки. Величина этого смещения зависит от скорости резки. При помощи термочувствительной бумаги уточнялось

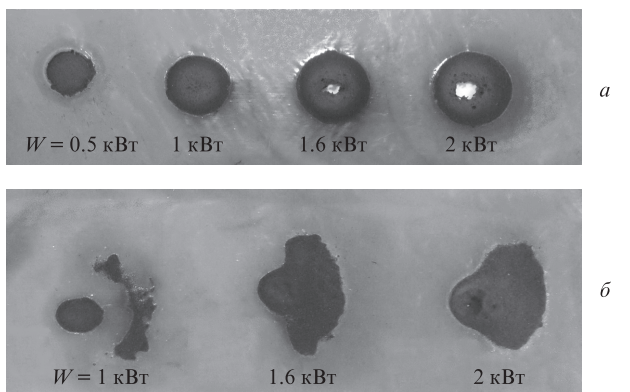


Рис.2. Картины прожигания винилпластовой пластины лазерным пучком: без резки (а) и во время резки после выхода из канала реза (б).

положение низкоинтенсивной периферийной части пучка, и положение измерителя мощности корректировалось так, чтобы все пятно попадало в измерительную систему.

На рис.3 результаты измерения коэффициента поглощения для волоконного и CO₂-лазеров представлены в виде зависимостей от скорости при разной мощности излучения и толщине листа $h = 5$ мм. Видно, что и для волоконного, и для CO₂-лазеров коэффициент поглощения линейно зависит от скорости резки для данной мощности излучения и уменьшается с ростом мощности при одинаковой скорости. Отметим, что при одинаковых параметрах резки (при мощности излучения более 0.5 кВт)

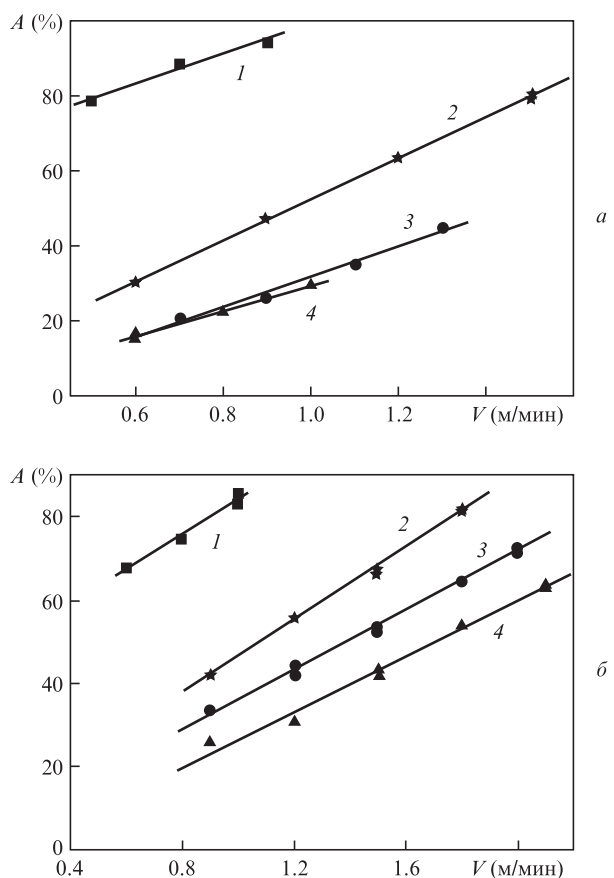


Рис.3. Зависимость коэффициента поглощения от скорости резки и лазерной мощности для волоконного лазера (а) и для CO₂-лазера (б) при $W = 0.5$ (1), 1.0 (2), 1.6 (3) и 2.0 кВт (4); $h = 5$ мм.

коэффициенты поглощения для излучений двух лазеров близки (в пределах 10%).

Однако учет качества реза приводит к принципиально другому результату. Коэффициенты поглощения излучений волоконного и CO₂-лазеров существенно различаются, если сравнивать их не при одинаковой скорости, а при оптимальной, при которой шероховатость поверхности реза минимальна для каждого лазера. При оптимизации для каждого значения мощности определялись оптимальная скорость V^* , оптимальное положение перетяжки и соответствующая ему ширина реза b^* , при которых шероховатость поверхности минимальна. Вторым условием было отсутствие грата. На рис.4 показана зависимость оптимальной скорости V^* от лазерной мощности при $h = 5$ мм. Здесь же показана максимальная скорость резки V_{max} . Видно, что максимальная скорость для двух лазеров приблизительно одинакова и зависит от лазерной мощности сходным образом. Но оптимальные скорости существенно различаются как по величине, так и по характеру зависимости от мощности. В случае CO₂-лазера оптимальная скорость растет с ростом мощности, при малых мощностях она ненамного меньше максимальной скорости и далее с ростом мощности имеет тенденцию к насыщению. Различие между максимальной скоростью и скоростью качественного реза для случая CO₂-лазера не слишком велико, об этом сообщалось также в [6]. Но при резке излучением волоконного лазера оптимальная скорость, соответствующая минимуму шероховатости, остается постоянной в диапазоне мощности 0.5–2 кВт. При мощности 2 кВт максимальная скорость превышает оптимальную в три раза.

Оптимальные скорости, ширины реза (при заданной мощности) и соответствующие им коэффициенты поглощения измерены также при толщинах 3, 10 и 16 мм. На рис.5 показана зависимость поглощенной в канале реза лазерной мощности от мощности на входе в канал при оптимальных условиях резки, величина мощности здесь отнесена к толщине листа h . Видно, что при выборе в качестве переменной величины W/h эта зависимость различна для двух типов лазеров и не зависит от толщины листа. В случае волоконного лазера и оптимальная скорость, и соответствующая ей поглощенная мощность остаются постоянными при повышении мощности на входе в канал реза, в то время как для CO₂-лазера с ростом входной мощности возрастает и поглощенная мощность,

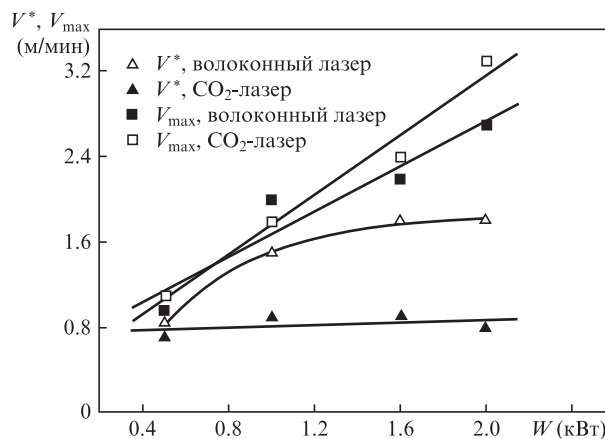


Рис.4. Оптимальная и максимальная скорости резки для излучений волоконного и CO₂-лазеров; $h = 5$ мм.

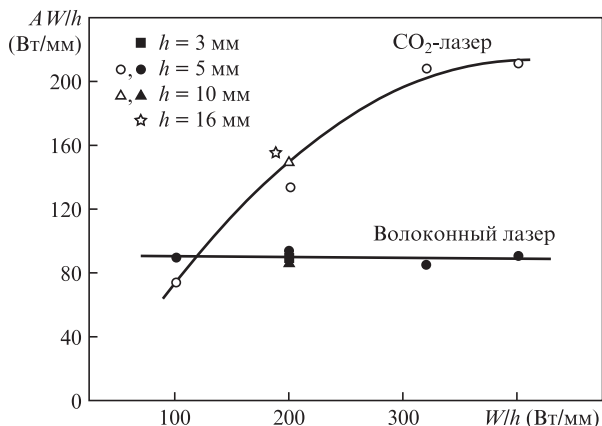


Рис.5. Зависимость поглощенной лазерной мощности при оптимальной скорости резки от мощности на входе в канал; мощность отнесена к толщине разрезаемого листа.

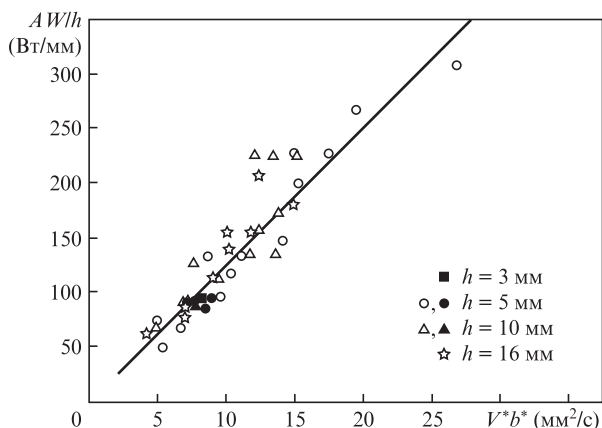


Рис.6. Экспериментальные данные, соответствующие минимальной шероховатости, в координатах AW/h и $V*b^*$; темные точки – данные для волоконного лазера, светлые – для CO_2 -лазера.

хотя при больших ($W/h \geq 300$ Вт/мм) удельных мощностях наблюдается насыщение.

На рис.6 показаны результаты оптимизации в координатах AW/h и $V*b^*$. Видно, что данные для CO_2 -лазера при разных толщинах хорошо аппроксимируются одной линейной зависимостью, а данные для волоконного лазера занимают расположенную на этой линии компактную область. Наклон линии на рис.6 дает величину поглощенной лазерной энергии $E_{abs} = AW/(V*b*h)$ в единице объема удаляемого из канала реза материала при параметрах резки, соответствующих минимуму шероховатости. Из рис.6 видно, что E_{abs} для случаев волоконного и CO_2 -лазеров близки. Усредненное по всей совокупности данных значение E_{abs} равно 10.9 Дж/мм^3 для резки излучением волоконного лазера и 12.7 Дж/мм^3 для резки излучением CO_2 -лазера. Разница между этими значениями находится в пределах экспериментальной погрешности.

4. Обсуждение результатов

Обобщенный результат исследования можно сформулировать следующим образом: для получения минимума шероховатости поверхности реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали поглощенная лазерная энергия E_{abs} , вложенная в единицу объема удаляемого из канала реза материала, должна быть равна $11-13 \text{ Дж/мм}^3$.

Важно подчеркнуть, что E_{abs} одинакова для случаев волоконного и CO_2 -лазеров. Минимальная величина шероховатости различается для двух лазеров – при толщине листа 5 мм шероховатость R_a (среднеарифметическая величина неоднородности) равна $2-3 \text{ мкм}$ в случае CO_2 -лазера и $5-6 \text{ мкм}$ в случае волоконного лазера. Оптимальная скорость резки и ее зависимость от лазерной мощности также существенно различны для двух лазеров, но E_{abs} остается постоянной и не зависит от длины волны лазерного излучения и толщины разрезаемого листа.

Удельная поглощенная энергия определена для оптимальной, а не для максимальной скорости резки, поэтому ее нельзя рассматривать как энергию, необходимую для плавления материала. Лазерно-кислородная резка стали представляет собой вынужденное горение железа в кислороде [15]. При экзотермической реакции окисления железа выделяется дополнительная энергия и меняется химический состав материала в зоне реза, расплав состоит преимущественно из смеси FeO и Fe [15, 16]. Можно предположить, что существует оптимальная температура расплава, превышающая температуру плавления Fe и FeO , при которой шероховатость поверхности реза минимальна. Формирование поверхности лазерного реза происходит при участии различных физических процессов (их обзор дан, например, в [17]), и зависимость высоты неоднородностей поверхности от температуры расплава может различаться для разных процессов.

Температуру расплава можно оценить из баланса мощности в канале лазерного реза, который может быть записан следующим образом [18, 19]:

$$AW + W_{ox} = W_{melt} + W_{cond}, \tag{1}$$

где W_{ox} – мощность, выделяющаяся в результате экзотермической реакции окисления железа; W_{melt} – мощность, затрачиваемая на нагрев и плавление удаляемого материала; W_{cond} – потери мощности на нагрев образца из-за отвода тепла из зоны реза вследствие теплопроводности. Потери мощности включают также потери на конвективное охлаждение образца потоком вспомогательного газа и мощность, затрачиваемую на испарение части материала. Затраты энергии на испарение материала в условиях лазерной резки малы по сравнению с затратами на плавление, и ими обычно пренебрегают. Потери мощности на конвективное охлаждение также не оказывают существенного влияния на баланс мощности [19, 20]. Таким образом, термические потери мощности на нагрев образца можно считать единственным каналом затрат энергии, не связанным с плавлением и нагревом удаляемой из канала реза части материала. Термические потери при лазерной резке численно рассчитаны в [21]. Для чисел Пекле $0.2 \leq Pe \leq 10$ предложена следующая аппроксимационная формула: $W_{cond} = 3.2k_m h \Delta T_m Pe^{0.868}$, где k_m – теплопроводность, а $\Delta T = T - T_m$ – превышение температуры расплава над температурой плавления материала. С учетом этого уравнение (1) записывается следующим образом:

$$AW + Vhb\rho k_{ox} \Delta H = Vhb\rho (C_{sm} \Delta T_m + C_{lm} \Delta T + L_m) + 3.2k_m h \Delta T_m Pe^{0.868}. \tag{2}$$

Здесь b – ширина реза; ρ – плотность материала; k_{ox} – массовая доля железа, которая окисляется в процессе резки; ΔH – удельная теплота экзотермической реакции окис-

ления железа; C_{sm} – удельная теплоемкость; C_{lm} – удельная теплоемкость вещества расплава; $\Delta T_m = T_m - T_0$; T_0 – температура окружающей среды; L_m – скрытая теплота плавления.

Из (2) можно определить среднее по объему превышение температуры расплава над температурой плавления материала:

$$\Delta T = \frac{1}{C_{lm}} \left[\frac{E_{abs}}{\rho} + k_{ox} \Delta H - L_m - C_{sm} \Delta T_m (1 + 3.2Pe^{-0.132}) \right]. \quad (3)$$

Видно, что ΔT слабо зависит от числа Пекле и определяется главным образом объемной плотностью поглощенной лазерной энергии и долей окисленного железа, другие величины являются характеристиками вещества.

Величины E_{abs} и k_{ox} взаимосвязаны, причем рост одной из них вызывает рост другой. С увеличением E_{abs} возрастают температура расплава, скорость реакции окисления, толщина окисной пленки на поверхности и доля FeO в расплаве. Повышение концентрации окисла приводит к росту коэффициента поглощения, E_{abs} и температуры расплава.

При лазерно-кислородной резке процесс окисления железа имеет циклический характер. Распространение фронта реза происходит в виде периодически возникающих и затухающих волн горения [13, 15, 16], которые распространяются и в направлении резки, и в боковом направлении, создавая на боковой поверхности реза периодические борозды. Скорость реакции окисления растет с ростом температуры [22], при этом растет линейная скорость движения фронта реза и глубина бороздок на боковой поверхности реза. Поскольку, согласно (3), температура расплава прямо связана с величиной поглощенной лазерной энергии, глубина бороздок растет с ростом E_{abs} .

Влияние нестационарного характера распространения фронта реза в виде волн горения на структуру поверхности проявляется в наибольшей степени в верхней части реза, где толщина пленки расплава невелика. При течении расплава вдоль фронта реза возрастают толщина пленки и масса расплава, и в нижней части реза значительную роль начинают играть гидродинамические явления. Для обеспечения высокого качества реза расплав должен эффективно удаляться из канала реза струей газа. Если расплав имеет слишком высокую вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения, то он скапливается в нижней части реза, создавая при затвердевании неоднородности на боковой поверхности реза [17]. Кроме того, если силы поверхностного натяжения расплава достаточно велики, часть расплава не уносится с нижней кромки листа, а остается в виде застывших капель и образует грат. Соотношение капиллярных сил и сил инерции расплава характеризуется числом Вебера We , которое для течения расплава в канале лазерного реза может быть записано следующим образом [23]:

$$We = \frac{h_m \rho_m V_m^2}{\sigma}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения вещества расплава; h_m – толщина пленки расплава; ρ_m – плотность расплава; V_m – скорость течения расплава.

Грат возникает при слишком малых числах Вебера. Для того, чтобы грат отсутствовал, число Вебера расплава в нижней части реза должно превышать некоторую критическую величину [23]. И коэффициент вязкости, и

коэффициент поверхностного натяжения расплава, состоящего из смеси жидких FeO и Fe, уменьшаются с ростом температуры расплава [16]. При этом расплав эффективнее удаляется из канала реза, меньше затвердевшего металла и окислов остается на стенках и нижней кромке реза в виде неоднородностей и грата. Именно благодаря наличию FeO обеспечивается эффективное удаление расплава, так как жидкий FeO обладает меньшей вязкостью и значительно меньшим поверхностным натяжением по сравнению с Fe при одинаковой температуре [15, 16]. Доля FeO в расплаве возрастает с ростом скорости окисления и с повышением температуры расплава.

Таким образом, изменение удельного объемного вклада лазерной энергии вызывает изменение температуры и химического состава расплава в канале реза. К увеличению неоднородностей поверхности реза может приводить как увеличение E_{abs} и соответствующие рост температуры и повышение доли FeO, так и их уменьшение. С ростом температуры увеличивается глубина борозд, связанных с нестационарным распространением фронта реза в виде периодически возникающих волн горения. С уменьшением температуры и доли FeO вязкий расплав неэффективно удаляется из канала реза и создает неоднородности при затвердевании на боковой стенке и нижней кромке реза. При некотором оптимальном значении E_{abs} достигается минимум шероховатости.

5. Выводы

1. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения при лазерно-кислородной резке листов низкоуглеродистой стали толщиной 3, 5, 10 и 16 мм излучениями волоконного и CO₂-лазеров. При толщине листа 5 мм для обоих лазеров коэффициент поглощения при постоянной лазерной мощности растет с ростом скорости резки приблизительно линейно и уменьшается с ростом мощности при постоянной скорости.

2. Для волоконного и CO₂-лазеров определена поглощенная лазерная мощность при резке в оптимальном режиме, когда шероховатость поверхности реза минимальна. В случае CO₂-лазера поглощенная в канале реза лазерная мощность, отнесенная к толщине листа, растет с ростом мощности и имеет тенденцию к насыщению, в случае волоконного лазера поглощенная мощность в оптимальном режиме остается постоянной при изменении мощности на входе в канал.

3. При лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали минимум шероховатости поверхности реза достигается при условии постоянства поглощенной лазерной энергии в единице объема материала, удаляемого из канала реза. Эта энергия имеет одинаковое значение (11–13 Дж/мм³) при резке излучениями волоконного и CO₂-лазеров в диапазоне толщин 3–16 мм.

4. Предложено качественное объяснение существования оптимальной величины удельной поглощенной лазерной энергии. С ростом поглощенной энергии и температуры расплава шероховатость поверхности растет из-за возрастания амплитуды периодически возникающих волн горения и уменьшается из-за уменьшения вязких и капиллярных сил и более эффективного удаления расплава из канала реза.

1. Powell J., Kaplan A.F.H. *Proc. 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Anaheim, CA, USA, 2012, p. 277).

2. Stelzer S., Mahrle A., Wetzig A., Beyer E. *Physics Procedia*, **41**, 399 (2013).
3. Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **69**, 30 (2013).
4. Petring D., Shneider F., Wolf N. *Proc. 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Anaheim, CA, USA, 2012, p. 43).
5. Mahrle A., Beyer E. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 175507 (2009).
6. Petring D., Shneider F., Wolf N., Nazery V. *Proc. 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Temecula, CA, USA, 2008, p. 95).
7. Hirano K., Fabbro R. *J. Laser Appl.*, **24**, 012006 (2012).
8. Scintilla L.D., Tricarico L., Mahrle A., Wetzig A., Himmer T., Beyer E. *Proc. 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Anaheim, CA, USA, 2010, p. 249).
9. Pocerri J.K., Petring D., Powell J., Deichsel E., Kaplan A.F.H. *Proc. 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (San Diego, CA, USA, 2014, p. 905).
10. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).
11. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 1152 (2009).
12. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **39**, 547 (2009).
13. Miyamoto I., Maqao H. *Weld. World*, **29**, 283 (1991).
14. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **42**, 640 (2012).
15. Powell J., Petring D., Kumar R.V., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H., Voisey K.T. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 015504 (2009).
16. Ivarson A., Powell J., Kamalu J., Magnusson C. *J. Mater. Process. Tech.*, **49**, 359 (1994).
17. Dahotre N.B., Harimkar S.P. *Laser Fabrication and Machining of Materials* (New York: Springer, 2008, p. 171).
18. Ready J.F. (Ed.) *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (Orlando: Magnolia Publishing Inc., 2001, p. 428).
19. Steen W. *Laser Material Processing* (London: Springer-Verlag, 2003).
20. Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. *Сб. трудов ИПЛИТ РАН «Современные лазерно-информационные и лазерные технологии»* (М.: Интерконтакт Наука, 2005, с. 221).
21. Prusa J.M., Venkitachalam G., Molian P.A. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **39**, 431 (1999).
22. Бункин Ф.В., Кириченко С.А., Лукьянчук Б.С. *Квантовая электроника*, **9**, 1959 (1982).
23. Riveiro A., Quintero F., Lusquinos F., Comesana R., Pou J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 135501 (2011).