

На правах рукописи

Гольшев Александр Анатольевич

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ ЛАЗЕРНОЙ
РЕЗКИ СТАЛИ ВОЛОКОННЫМ И СО₂-ЛАЗЕРОМ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Оришич Анатолий Митрофанович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных технологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Якимов Михаил Юрьевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерных разрядов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Князев Борис Александрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 8-1, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится «3» марта 2017 г. в 9:30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, <http://itam.nsc.ru/ru/thesis/>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан _____
(дата)

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.



С. А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С развитием наукоемких технологий происходит активное внедрение мощных автоматизированных лазерных технологических комплексов (АЛТК) в различные отрасли промышленности. Одним из направлений, в которых лазерные комплексы приобрели широкое применение, является резка как металлических, так и неметаллических материалов. В первую очередь это связано с высокой скоростью и точностью обработки заготовок по сравнению с механическими способами. Кроме того, резка с использованием лазерного излучения позволяет достигать высокого качества обработки, которая определяется в первую очередь величиной неровности боковой поверхности (шероховатости) и отсутствием застывшего расплава в виде капель на нижней кромке листа (грат). Как результат, исследование лазерной резки, характеризующейся минимальной шероховатостью поверхности, является приоритетной задачей.

На сегодняшний день наиболее широкое применение для лазерной резки во всем мире приобрели газоразрядные CO_2 -лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм и твердотельные лазеры с $\lambda \approx 1$ мкм. В связи с этим, проведение сравнительного исследования лазерной резки разными типами лазеров вызывает огромный научный интерес. Однако выполнение теоретических и экспериментальных работ по изучению лазерной резки сильно затруднено. Это связано с тем, что данная технология включает в себя целый ряд различных взаимосвязанных физических процессов, таких как поглощение и распространение лазерного излучения в канале реза, нагрев и плавление металла, течение вспомогательного газа и расплавленного металла в канале реза, образование оксидной пленки при лазерно-кислородной резке и др.

Вопросы влияния длины волны излучения на процессы, протекающие при лазерной резке, активно обсуждаются в научном сообществе (J. Powell, W. Steen, L.D. Scintilla, K. Hirano, А.Г. Григорьянц, О.Б. Ковалев, А.М. Оришич и другие). Однако, несмотря на большое количество исследований, существующие теоретические и экспериментальные модели лазерной резки различными типами лазеров недостаточно развиты, особенно лазерно-кислородная резка низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Слабо исследовано влияние длины волны лазерного излучения на качество поверхности реза. Как результат, поиск общих закономерностей высококачественной лазерной резки излучением с разной длиной волны на сегодняшний день остается актуальным.

Целью работы является сравнительное исследование энергетики высококачественной лазерной резки стали излучением с длиной волны 10,6 и 1,07 мкм.

Задачи исследования

1. Сравнительное исследование условий получения качественного реза при резке низкоуглеродистой и высоколегированной стали лазерами с длиной волны 10,6 и 1,07 мкм.
2. Исследование баланса мощности для разных типов лазерной резки излучением с длиной волны 10,6 и 1,07 мкм в случае, когда шероховатость поверхности минимальна.
3. Обобщение экспериментальных результатов для развития модели, описывающей процесс лазерной резки.

Научная новизна

1. Впервые проведено комплексное сравнение параметров высококачественной лазерной резки низкоуглеродистой и высоколегированной стали излучением с длиной волны 1,07 и 10,6 мкм. Показано, что условия получения качественного реза при длине волны 1,07 мкм могут быть выражены в виде законов подобия и эти законы имеют одинаковый вид для лазеров с длиной волны 1,07 и 10,6 мкм.
2. Для лазерно-кислородной резки стали впервые проведено сравнительное исследование поглощения лазерного излучения в канале реза для лазеров с длиной волны 10,6 и 1,07 мкм при оптимальных условиях резки. Для двух типов лазеров определен удельный вклад поглощенной лазерной энергии, соответствующий минимуму шероховатости поверхности реза.
3. Впервые установлено, что для двух типов резки (лазерной резки низкоуглеродистой стали с кислородом и высоколегированной стали с химически нейтральным газом) максимальное качество реза достигается при определенной величине полной энергии (поглощенной энергии лазерного излучения и энергии экзотермической реакции окисления), приходящейся на единицу объема удаляемого материала. Величина этой энергии не зависит от длины волны излучения и толщины листа.

Научная и практическая значимость работы

На основе проведенного экспериментального исследования сформулированы практические рекомендации, которые позволяют увеличить эффективность лазерной резки, и определены области оптимальной резки волоконным и

СО₂-лазером. Полученные данные могут быть использованы как на промышленных предприятиях, применяющих лазерную резку (в Новосибирске «Элсиб-Лазер», «Оптикон» и др.), так и компаниями, деятельность которых направлена на создание лазерных технологических комплексов (IPG, TRUMPF и др.).

Разработана методика обобщения всего многообразия параметров, характеризующих процесс высококачественной лазерной резки, и найдены общие закономерности резки для излучений с разной длиной волны. Полученные в работе эмпирические зависимости, основанные на критериях подобия, могут быть использованы при теоретическом моделировании процесса лазерной резки.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием надежных апробированных методик и средств измерений, а так же совпадением результатов работы с результатами других авторов в сопоставимых частных случаях. Ключевые результаты диссертационной работы многократно докладывались и обсуждались на различных международных и всероссийских конференциях.

На защиту выносятся:

1. Результаты параметрических исследований лазерно-кислородной резки стали волоконным лазером. Условия получения реза с минимальной шероховатостью, сформулированные в виде безразмерных критериев (число Пекле $Re_{\text{опт}} = V_{\text{с\text{опт}}} \cdot b_{\text{опт}} / \gamma = 1,2$ и безразмерная удельная мощность $Q_{\text{w\text{погл}}} = W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m) = 4,2 \dots 6,8$).
2. Результаты сравнительного экспериментального исследования лазерной резки листов нержавеющей стали излучением с длиной волны 1,07 мкм и 10,6 мкм по критерию минимальной шероховатости поверхности реза и отсутствия грата.
3. Результаты измерений коэффициента поглощения лазерного излучения при лазерной резке стали лазерами с длиной волны 10,6 мкм и 1,07 мкм. Найдены энергетические условия получения реза с максимальным качеством. Вклад полной энергии в единицу объема расплава составляет 24...28 Дж/мм³ и не зависит от длины волны излучения.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и семинарах, таких как:

51-я Международная научная студенческая конференция (Новосибирск, 2013); Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, 2013, 2015); Дни науки НГТУ (Новосибирск 2013, 2014); Всероссийская конференция молодых ученых. Наука Технологии Инновации (Новосибирск, 2013); 32st Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (Miami, 2013); Conference on High-Power Laser Materials Processing – Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II (San Francisco, 2013, 2014); 17th Int. Conference on Methods of Aerophysical Research (Novosibirsk, 2014); Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2014, 2016); LANE Int. Conference on Photonics Technologies (Furth, 2014, 2016); Conference on High-Power Lasers and Applications VII (Beijing, 2014); Conference Lasers in Manufacturing (Munich, 2015); XIV Всероссийский семинар "Динамика многофазных сред" приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В.М. (Новосибирск, 2015); 18th Int. Conference on Methods of Aerophysical Research (Perm, 2016).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 статьях и докладах, среди которых 6 статей в рецензируемых журналах входящих в перечень ВАК, 2 статьи в рецензируемых журналах и 18 публикаций в трудах конференций.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в обсуждении целей и задач исследований, в планировании, подготовке и проведении экспериментальных работ, в обработке и анализе полученных результатов, в написании научных трудов. Основные результаты диссертации получены при личном участии автора. Демонстрация в диссертации данных, полученных в совместных работах, согласована с соавторами.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 85 наименований. Объем диссертационной работы составляет 113 страниц, в том числе 44 рисунка, 11 таблиц и одно приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обосновывается актуальность выбранной темы, формируется цель и основные задачи исследования, определяется научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, а также приводятся защищаемые положения диссертации. В конце введения представлена структура диссертации, кратко изложено содержание работы.

Глава 1 включает в себя ознакомление с основными принципами и характеристиками лазерной резки, а также содержит обзор литературы, посвященный исследованию различных процессов, протекающих при данном виде лазерной обработки. Показана роль качества поверхности лазерной резки, которая главным образом определяется величиной шероховатости кромки (высота бороздчатой структуры на поверхности, рис. 1). Представлены основные модели, описывавшие механизмы образования бороздок на поверхности реза.



В данной главе рассмотрены как теоретические, так и экспериментальные работы по исследованию течения газового потока в канале реза, влияния длины волны на процесс резки, баланс мощности. Особое внимание уделялось работам, посвященным обобщению результатов лазерной резки с помощью метода подобия и размерности.

Глава 2 посвящена описанию экспериментального оборудования и методик измерений, используемых в работе.

В пункте 2.1 дано описание используемых в работе комплексов на базе газоразрядного CO₂-лазера с длиной волны излучения 10,6 мкм и иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1,07 мкм. Кратко представлены основные понятия о качестве излучения.

В пункте 2.2 даны ключевые понятия о шероховатости поверхности. Представлены способы определения значения величины измерения R_z и R_a , показана роль базовой длины l .

Величина R_z определяется как сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов $H_{i \min}$ и пяти наибольших максимумов $H_{i \max}$ рассматриваемого профиля в пределах базовой длины: $R_z = (\sum_{i=1}^5 H_{i \max} + \sum_{i=1}^5 H_{i \min})/5$.

Величина R_a определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины: $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y_i| dx$.

В пункте 2.3 дано краткое описание конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS3000, с помощью которого производились измерения шероховатости поверхности R_z и R_a и ширины реза b .

В пункте 2.4 изложена методика измерения коэффициента поглощения излучения в процессе лазерной резки. Суть используемого метода состоит в том, что в процессе лазерной резки под разрезаемым листом устанавливается измеритель мощности таким образом, чтобы прошедшее излучение попадало на поглощающую поверхность. Затем сигнал с приемника поступает и обрабатывается на ПК. Измерив падающую W и прошедшую мощность $W_{\text{прош}}$, легко рассчитать поглощенную мощность по формуле $W_{\text{погл}} = W - W_{\text{прош}}$, а коэффициент поглощения вычисляется как $A = W_{\text{погл}}/W$. Под коэффициентом поглощения здесь понимается интегральный коэффициент, который учитывает также мощность, поглощенную при многократных отражениях от фронта и стенок реза.

Глава 3 посвящена сравнительному исследованию лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали излучением с длиной волны 10,6 и 1,07 мкм.

В пункте 3.1 представляются результаты оптимизации лазерно-кислородной резки разными лазерами по критерию минимума шероховатости поверхности реза и отсутствию грата. Несмотря на то, что для резки CO₂-лазером метод подобия и размерности был применен ранее [1], данная работа содержит исследования, посвященные резке излучением с обеими длинами волн для проведения качественного и количественного сравнения результатов, полученных при одинаковых начальных условиях и по одним критериям. В результате установлено, что для всех исследуемых толщин резка CO₂-лазером позволяет достигнуть лучшего качества поверхности реза по сравнению с резкой волоконным лазером (табл. 1).

Таблица 1

Значения шероховатости для высококачественной лазерно-кислородной резки

| Толщина металла t , мм | 3 | | 5 | | 10 | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z | R_a |
| CO ₂ -лазер | 6,8 | 1,6 | 12,7 | 2,0 | 13,1 | 2,8 |
| Волоконный лазер | 11,2 | 2,7 | 19,3 | 3,9 | 29,4 | 6,1 |

На рис. 2 представлены обобщенные данные для лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали толщиной $t = 5$ мм, показывающие результат оптимизации по трем параметрам: скорость резки V_c , ширина реза (положение фокуса относительно поверхности листа) b и мощность лазерного излучения W . Аналогичные зависимости получены для толщин 3 и 10 мм.

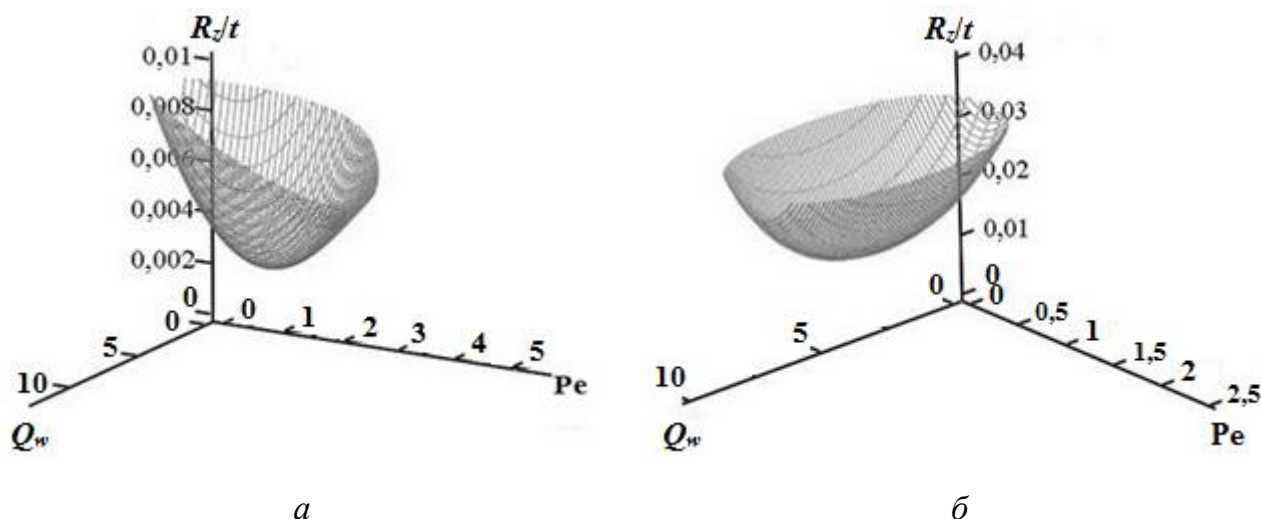


Рис. 2. Обобщение экспериментальных данных в виде зависимости шероховатости поверхности реза R_z/t от числа Пекле Pe и безразмерной мощности Q_w для $t = 5$ мм.
а – CO₂-лазер [1], б – волоконный лазер

Фактически, на рис. 2 представлен экспериментально определенный функционал $R_z/t = f(Q_w, Pe)$ для двух типов лазеров, где $Pe = V_c \cdot b / \gamma$ ($\gamma = \lambda_m / (C_m \cdot \rho_m)$ – удельная теплопроводность металла, C_m – удельная теплоемкость металла, ρ_m – плотность металла) и $Q_w = W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m)$ (здесь λ_m – удельная теплопроводность материала, T_m – температура плавления). Видно, что данная функция имеет чашеобразную форму с минимумом, который соответствует оптимальным условиям резки: $Pe_{\text{опт}} = \text{const}$, $Q_{w\text{опт}} = \text{const}$. Оптимальные значения безразмерных параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры, характеризующие высококачественную лазерно-кислородную резку

| Безразмерные параметры | $Pe_{\text{опт}} = V_{c\text{опт}} \cdot b_{\text{опт}} / \gamma$ | $Q_{w\text{опт}} = W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m)$ |
|--|---|---|
| CO ₂ -лазер, $\lambda = 10,6$ мкм | 1,6 | 4,2 |
| Волоконный лазер, $\lambda = 1,07$ мкм | 1,2 | 4,2 ... 6,8 |

Результаты оптимизации позволяют провести сравнение основных параметров резки для разных типов лазеров. Установлено, что ширина реза при высококачественной резке волоконным лазером зависит от толщины разрезаемого листа следующим образом: $b_{\text{опт}} = 0,32 + 0,027 \cdot t$. Это позволяет исключить ширину реза из полученного условия $V_{c_{\text{опт}}} \cdot b_{\text{опт}} = \text{const}$ и выразить оптимальную скорость резки через толщину листа аналитической зависимостью $V_{c_{\text{опт}}} = 7 / (0,32 + 0,027 \cdot t)$. При высококачественной резке CO₂-лазером зависимость оптимальной скорости и ширины реза от толщины имеет следующий вид $V_{c_{\text{опт}}} = 11 / (0,35 + 0,02 \cdot t)$ и $b_{\text{опт}} = 0,35 + 0,02 \cdot t$. Стоит отметить, что полученные в работе экспериментальные данные с хорошей точностью совпадают с результатами исследований, приведенными в работе [2].

В пункте 3.2 исследуется энергетика лазерной резки. Проведены экспериментальные работы по исследованию коэффициента поглощения лазерного излучения A в процессе резки по методике, описанной в главе 2. Получено, что

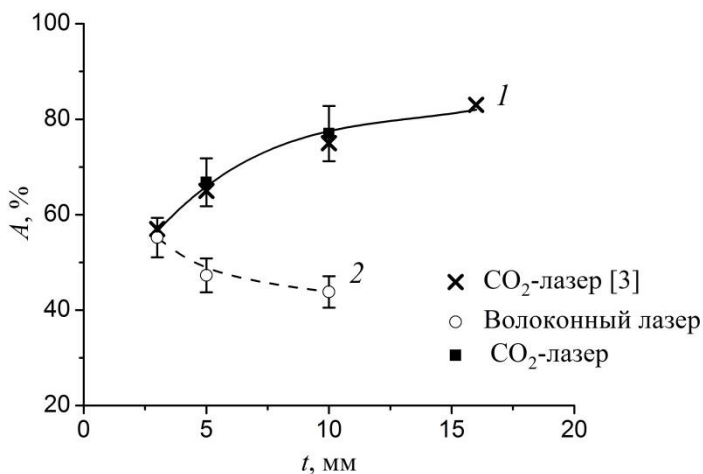


Рис. 3. Интегральный коэффициент поглощения в зависимости от толщины разрезаемого листа при максимальном качестве реза.

1 – резка CO₂-лазером, 2 – резка волоконным лазером

зависимость коэффициента поглощения от толщины разрезаемого металла при высококачественной резке разными типами лазеров имеет принципиально разный вид (рис. 3). Если при резке CO₂-лазером с ростом толщины листа коэффициент поглощения увеличивается, то при резке волоконным лазером наблюдается обратная ситуация.

Измерение коэффициента поглощения при высококачественной лазерно-кислородной

резке позволяет рассчитать целый ряд различных энергетических параметров. Однако наибольший интерес представляет величина поглощенной лазерной энергии в единицу объема удаляемого из канала реза материала для случая, когда шероховатость поверхности минимальна: $E_{\text{погл}} = A \cdot W / (V_c \cdot b \cdot t)$.

На рис. 4 представлено обобщение экспериментальных данных, характеризующихся минимальной шероховатостью, в координатах $A \cdot W / t$ и $V_c \cdot b$. Видно, что при резке CO₂-лазером точки выстраиваются в единую линейную зави-

симось. В свою очередь, при резке волоконным лазером полученные значения располагаются в небольшой зоне, которая находится в единой зависимости с результатами для резки CO₂-лазером.

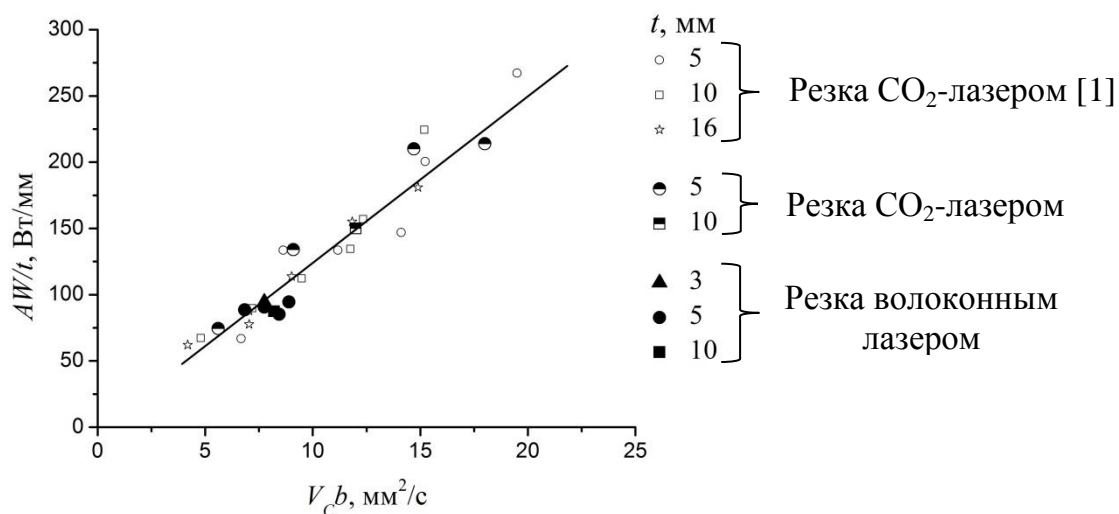


Рис. 4. Экспериментальные данные, соответствующие минимальной шероховатости, в координатах $A \cdot W/t$ и $V_c \cdot b$

При анализе экспериментальных данных, представленных на рис. 4, установлено, что величина поглощенной лазерной энергии в единицу объема, удаляемого из канала реза материала, составляет 11...13 Дж/мм³ и не зависит от длины волны излучения и толщины разрезаемого листа.

Глава 4 посвящена сравнительному исследованию лазерной резки с химически нейтральным газом нержавеющей стали излучением с разной длиной волны (10,6 и 1,07 мкм).

В пункте 4.1 приводятся результаты оптимизации лазерной резки разными лазерами по критерию минимума шероховатости поверхности реза и отсутствию графа. Получено, что при резке CO₂-лазером значение величины шероховатости падает с ростом скорости резки и достигает наименьшего значения при максимальной скорости. Следует отметить, что под максимальной скоростью подразумевается критическая скорость резки, при превышении которой происходит непрорез (рис. 5).

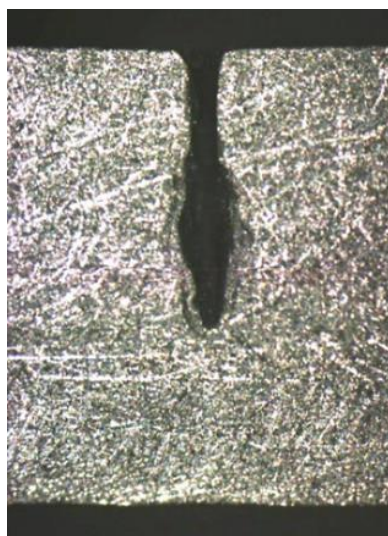


Рис. 5. Фотография шлифа канала реза с частичным заплавлением при резке CO₂-лазером ($t = 3$ мм)

При резке волоконным лазером наблюдается аналогичная картина, однако наименьшая шероховатость достигается не только при максимальной скорости резки, а в некотором диапазоне скоростей (рис. 6). Получено, что при резке разными типами лазеров минимальные величины шероховатости поверхности имеют близкие значения.

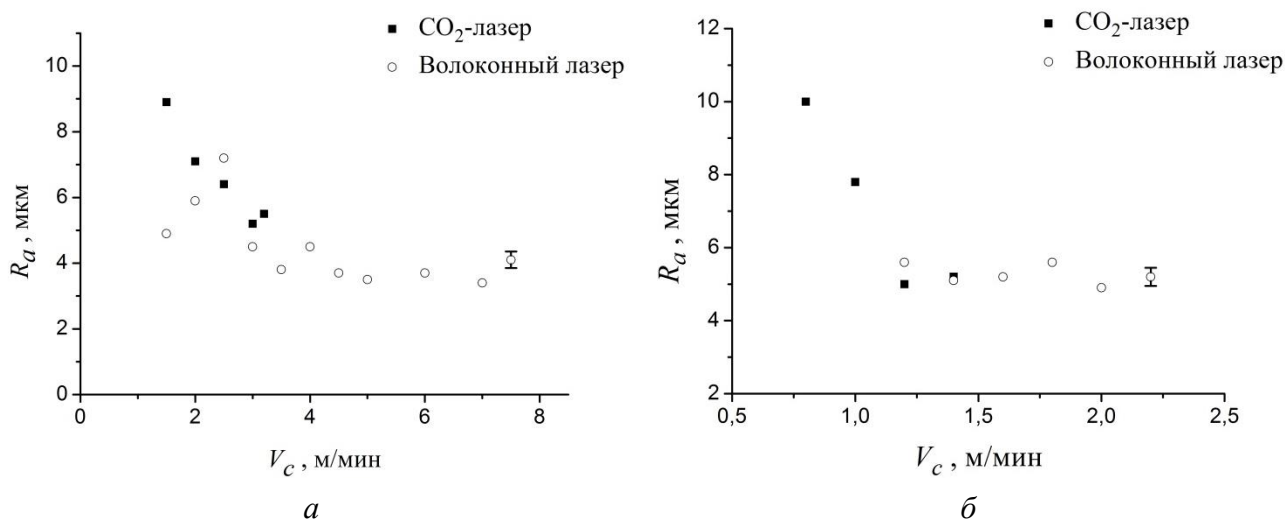


Рис. 6. Зависимость средней по толщине листа шероховатости реза от скорости резки для $t = 3$ мм (а) и $t = 5$ мм (б)

Установлено, что максимальная скорость при резке волоконным лазером в 1,5–2 раза выше, чем при резке CO₂-лазером. Данное различие может быть объяснено разной энергетикой процесса. Для рассмотрения данного вопроса необходимо исследовать баланс мощности, характеризующий лазерную резку. Для этого в первую очередь необходимо измерить коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе резки.

В пункте 4.2 подробно исследуется баланс мощности лазерной резки. С использованием экспериментально полученных данных проведены теоретические расчеты температуры расплавленного металла в канале реза. Как итог, высказано предположение, что разница в максимальной скорости резки волоконным и CO₂-лазером объясняется разным распределением энергии лазерного излучения на поверхности канала реза и большим отражением излучения для длины волны 10,6 мкм. Другими словами, при высокой скорости резки CO₂-лазером недостаточно энергии, что бы сформировать широкий рез на верхней поверхности листа для оптимальной продувки канала вспомогательным газом. На рис. 5 видно, что в случае, когда скорость резки выше максимальной, ширина реза на верхней поверхности уже, чем в центральной части разрезаемого листа, это подтверждает высказанное ранее предположение.

В пункте 4.3 проводится сравнение основных энергетических параметров при высококачественной резке волоконным и CO₂-лазером низкоуглеродистой и нержавеющей стали.

Уравнение баланса мощности для резки с кислородом (1) и химически нейтральным газом (2) имеет вид

$$A \cdot W + W_{\text{окис}} = W_{\text{пл}} + W_{\text{теп}} \quad (1)$$

$$A \cdot W = W_{\text{пл}} + W_{\text{теп}} \quad (2)$$

где A – интегральный коэффициент поглощения; W – мощность лазерного излучения; $W_{\text{окис}}$ – мощность, выделяемая при экзотермической реакции окисления железа; $W_{\text{пл}}$ – мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза; $W_{\text{теп}}$ – мощность, теряемая из зоны реза за счет теплопроводности.

В работе [4] было показано, что при резке с кислородом в условиях получения минимальной шероховатости энергетический вклад лазерного излучения приблизительно (экспериментальный разброс не превышал 15 %) совпадал с энергетическим вкладом от экзотермической реакции окисления железа $A \cdot W \cong W_{\text{окис}}$. В этом случае баланс мощности можно записать в виде

$$2(A \cdot W)_{\text{кисл}} \cong (A \cdot W)_{\text{азот}} = V_c \cdot b \cdot t \cdot \rho_m [C_m \cdot \Delta T + L_m] + W_{\text{теп}} \quad (3)$$

где ρ_m – удельная плотность разрезаемого металла, C_m – удельная теплоемкость металла, $\Delta T = T_m - T_0$ – разница между температурой плавления T_m и начальной температурой T_0 . L_m – удельная теплота плавления.

Уравнение баланса (3) может быть упрощено путем введения обобщенных безразмерных переменных. В работе [5] рассчитаны потери энергии за счет теплопроводности в условиях лазерной резки и показано, что выражение для тепловых потерь может быть записано в виде $W_{\text{теп}} = \lambda_m \cdot t \cdot \Delta T \cdot f(\text{Pe})$, где $f(\text{Pe})$ – безразмерная функция, описывающая тепловые потери в зависимости от числа Пекле $\text{Pe} = V_c \cdot b \cdot \rho_m \cdot C_m / \lambda_m$. Введя параметр безразмерной мощности излучения $Q_{\text{погл}} = A \cdot W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m)$, баланс мощности (3) преобразуем в безразмерный вид

$$2(Q_{\text{погл}})_{\text{кисл}} \cong (Q_{\text{погл}})_{\text{азот}} = \text{Pe} \left(1 + \frac{L_m}{C_m \cdot \Delta T} \right) + f(\text{Pe}) \quad (4)$$

Таким образом, вместо пяти переменных A , W , V_c , t и b в соотношении (3), которые могут быть легко измерены экспериментально, получен баланс энергии лазерной резки (4), зависящий только от двух безразмерных параметров $Q_{\text{погл}} = A \cdot W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m)$ и $Re = V_c \cdot b / \gamma$.

Из рис. 7 видно, что использование параметров $Q_{\text{погл}} = A \cdot W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m)$ и $Re = V_c \cdot b / \gamma$ позволяет обобщить все многообразие экспериментальных данных в виде единой зависимости, близкой к линейной $Q_{\text{погл.опт}} \sim Re_{\text{опт}}$. Коэффициент наклона данной зависимости постоянен и приблизительно равен $Q_{\text{погл.опт}} / Re_{\text{опт}} = (A_{\text{опт}} \cdot W / (V_c \cdot t \cdot b)_{\text{опт}}) \cdot (\gamma / (\lambda_m \cdot T_m)) \approx 3,7$.

Учитывая, что $\gamma / (\lambda_m \cdot T_m) = 1 / (C_m \cdot \rho_m \cdot T_m)$, выражение для поглощенной энергии в единицу объема удаляемого материала из канала реза можно записать в виде $E_{\text{погл.опт}} = A_{\text{опт}} \cdot W / (V_c \cdot t \cdot b)_{\text{опт}} \approx 3,7 \cdot C_m \cdot \rho_m \cdot T_m$. Между тем установлено, что для температуры $T_{\text{ср}} = (T_m - T_0) / 2$ комбинация $C_m \cdot \rho_m \cdot T_m$, которая состоит из теплофизических характеристик, имеет близкое значение для обоих типов разрезаемых металлов (7,6 и 6,4 Дж/мм³ для низкоуглеродистой и нержавеющей стали соответственно).

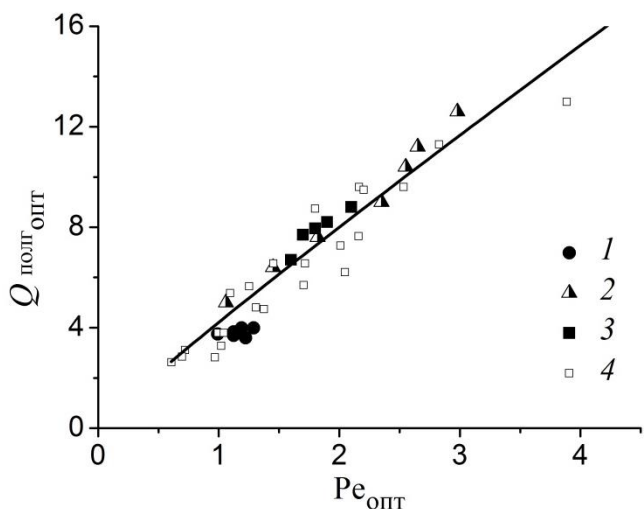


Рис. 7. Зависимость оптимального значения числа Пекле от оптимального значения безразмерной мощности.

1 – резка низкоуглеродистой стали волоконным лазером, 2 – резка нержавеющей стали волоконным лазером, 3 – резка низкоуглеродистой стали CO₂-лазером, 4 – резка низкоуглеродистой стали CO₂-лазером [1]

Таким образом, в пределах экспериментального разброса получено, что вклад общей энергии в единицу объема удаляемого материала из канала реза составляет $E_{\text{погл.опт}} \approx 24 \dots 28$ Дж/мм³ и не зависит от длины волны излучения. Причем при резке с инертным газом вся эта энергия должна быть обеспечена излучением лазера, а при использовании кислорода этот вклад на 50 % обусловлен излучением (13 Дж/мм³) и на 50% экзотермической реакцией окисления железа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное сравнение параметров высококачественной лазерной резки низкоуглеродистой и высоколегированной стали излучением с длиной волны 1,07 мкм и 10,6 мкм.

1. Для лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали волоконным лазером с длиной волны 1,07 мкм экспериментально исследована зависимость шероховатости поверхности реза от параметров резки. Установлено, что минимальная шероховатость реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали иттербиевым волоконным лазером достигается при значении числа Пекле $Re_{\text{опт}} = V_{\text{опт}} \cdot b_{\text{опт}} / \gamma = 1,2$ и безразмерной удельной мощности $Q_{\text{опт}} = W / (\lambda_m \cdot t \cdot T_m) = 4,2 \dots 6,8$.
2. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в канале реза при лазерно-кислородной резке волоконным и CO_2 -лазером. Установлено, что оптимальная скорость резки (соответствующая минимуму шероховатости) достигается при определенной величине вклада лазерной энергии в единицу объема удаляемого материала. Эта величина равна $11 \dots 13$ Дж/мм³ и не зависит от толщины листа и длины волны излучения.
3. Для лазерной резки высоколегированной стали волоконным и CO_2 -лазерами экспериментально исследована зависимость шероховатости поверхности реза от параметров резки. Показано, что минимальная шероховатость достигается при максимальной скорости резки. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе резки обоими типами лазеров.
4. Показано, что независимо от длины волны лазерного излучения и типа разрезаемого металла (низкоуглеродистая сталь или высоколегированная сталь) вклад общей энергии в единицу объема расплава оказывается одинаковым и составляет около $24 \dots 28$ Дж/мм³.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 6. С. 547–551.
2. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. О законах подобия газолазерной резки толстых стальных листов // Доклады академии наук. 2009. Т. 428. № 3. С. 325–329.
3. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические условия газолазерной резки толстых стальных листов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 3. С. 16–25.
4. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO₂-лазера // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 7. С. 640–644.
5. Prusa J.M., Venkitachalam G., Molian P.A. Estimation of heat conduction losses in laser cutting // Int. Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999. V. 39. P. 431–458.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых журналах входящих в список ВАК:

1. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного итербиевого и CO₂-лазеров // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 3. С. 233–238.
2. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное исследование лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали с использованием волоконного и CO₂-лазеров при условии минимума шероховатости // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 10. С. 970–974.
3. 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 // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 9. С. 873–878.
4. Фомин В.М., Гольшев А.А., Маликов А.Г. и др. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO₂-лазерами // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 4. С. 215–225.
5. Гольшев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов. 2016. Т. 70. № 1. С. 16–21.
6. Гольшев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов // Обработка металлов. 2016. Т. 72. № 3. С. 15–22.

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Golyshev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Experimental comparison of laser cutting of steel with fiber and CO₂-lasers on the basis of minimal roughness // *Physics Procedia*. 2014. V. 56. P. 875–884.
2. Golyshev A.A., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. The utmost thickness of the cut sheet for the qualitative oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel // *Physics Procedia*. 2016. V. 83. P. 296–301.

Материалы, опубликованные в сборниках научных трудов конференций:

1. Гольшев А.А. Исследование процесса лазерной резки тонких листов нержавеющей стали лазером с длиной волны 10,6 мкм и 1,07 мкм // *Студент и научно-технический прогресс. Квантовая физика: Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции*. Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2013. С. 21.
2. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное исследование лазерной резки тонких листов нержавеющей стали с использованием CO₂-лазера и волоконного лазера // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады V Всероссийской конференции*. Т. 1. Новосибирск: Параллель, 2013. С. 67–71.
3. Гольшев А.А. Экспериментальное исследование процесса лазерной резки тонких листов нержавеющей стали на разных длинах волн излучения // *Дни науки НГТУ-2013: Материалы научной студенческой конференции*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. С. 37.
4. Гольшев А.А. Сравнение характеристик лазерной резки нержавеющей стали используя волоконный и CO₂-лазер // *Наука Технологии Инновации: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых*. Ч. 4. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. С. 133–137.
5. Golyshev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Energy conditions of a high-quality cut at the laser-oxygen cutting with fiber and CO₂ laser // *32st Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO-2013: Proceedings of SPIE*. V. 503. Miami, 2013. P. 70.
6. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М. и др. О законах подобия при лазерно-кислородной резки стали на различных длинах волн излучения // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады V Всероссийской конференции*. Т. 1. Новосибирск: Параллель, 2013. С. 62–66.
7. Golyshev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Energy characteristics of cutting of thick steel sheets by a CO₂ and fiber laser // *Int. Conference “Photonics West”: Proceedings of SPIE*. V. 8603. San Francisco, 2013. P. 860312–1.
8. Golyshev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shuljat'ev V.B. Effect of the laser wave length on the energy characteristics of high-quality fusion cutting of steel // *Int. Conference on the*

- Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. II / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Avtograf, 2014. P. 70–71.
9. Гольшев А.А. Исследование высококачественной лазерной резки нержавеющей стали с использованием иттербиевого волоконного и CO₂-лазера // Дни науки НГТУ-2014: Материалы научной студенческой конференции. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 29.
 10. Golyshev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Oxygen-assist laser cutting of low-carbon steel at various laser wave // Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. II / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Avtograf, 2014. P. 68–69.
 11. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное сравнение резки низкоуглеродистой и нержавеющей стали волоконным и CO₂-лазером // 6-й Российский семинар по волоконным лазерам: Материалы семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. С. 115–116.
 12. Golishev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Experimental comparison of the cutting speed and quality for mild and stainless steel sheets with fiber and CO₂-lasers // Int. Conference “Photonics Asia”: Proceedings of SPIE. V. 926603. Beijing, 2014. P. 926619.
 13. Golishev A.A., Orishich A.M., Malikov A.G., Shulyatyev V.B. Experimental comparison of the oxygen-assist laser cutting with a fiber and CO₂-laser under the condition of minimal roughness // Int. Conference “Photonics West”: Proceedings of SPIE. V. 8963. San Francisco, 2014. P. 89630Z.
 14. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Исследование высококачественной лазерно-кислородной резки с использованием волоконного и CO₂-лазера // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции. Т. 1. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 66–69.
 15. Golyshev A.A., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Effect of the laser beam polarization state on the laser cut surface quality // Lasers in Manufacturing Conference 2015: Abstracts. Munich, 2015. P. 30.
 16. Фомин В.М., Оришич А.М., Маликов А.Г. и др. О законах подобия течения многофазной жидкости в условиях газолазерной резки металлов // Динамика многофазных сред: труды XIV Всероссийского семинара, приуроченного к 75-летию академика РАН Фомина В.М. Новосибирск. 2015. С. 105-108.
 17. Golyshev A.A., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Energetics of the multi-phase fluid flow in a narrow kerf in laser cutting conditions // Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstracts. Pt. II / Ed. V.M. Fomin. Perm, 2016. P. 158–160.
 18. Гольшев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетика качественного реза металлов иттербиевым волоконным лазером // 7-й Российский семинар по волоконным лазерам: Материалы семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 215–116.

Ответственный за выпуск А.А. Гольшев

Подписано в печать 09.12.2016

Формат бумаги 60 × 84/16, Усл. печ. л. 1.16
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 9

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1