

УДК 621.373.826

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ СТАЛИ ВОЛОКОННЫМ И СО₂-ЛАЗЕРАМИ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: fomin@itam.nsc.ru, alexgol@itam.nsc.ru, smalik@ngs.ru,
laser@itam.nsc.ru, shulyat@rambler.ru

Приведены результаты сравнения качества резки низкоуглеродистой и нержавеющей стали излучением волоконного и СО₂-лазеров при использовании кислорода или азота в качестве технологического газа. Определены значения шероховатости поверхности реза для листов толщиной от 3 до 10 мм. В пространстве безразмерных параметров (числа Пекле и безразмерной мощности) установлены области оптимального (по критерию минимума шероховатости) применения лазеров различного типа. Показано, что применение СО₂-лазера является более эффективным при лазерно-кислородной резке, а применение волоконного лазера — при резке с использованием нейтрального газа.

Ключевые слова: лазерная резка, СО₂-лазер, волоконный лазер, критерии качества реза, скорость резки.

DOI: 10.15372/PMTF20150420

Введение. В последнее время для резки металлов наряду с традиционными СО₂-лазерами (длина волны $\lambda = 10,6$ мкм) часто применяются волоконные или дисковые лазеры ($\lambda = 1,07$ мкм). Накоплены экспериментальные данные о резке различных металлических материалов преимущественно с использованием азота в качестве технологического газа (достаточно подробный обзор работ приведен в [1]). Известно, что при одной и той же мощности излучения в случае резки с помощью инертного газа твердотельные лазеры обеспечивают большую по сравнению с СО₂-лазерами скорость резки тонких листов, например при толщине листов $1 \div 2$ мм — в 3–4 раза [2, 3]. При резке листов толщиной порядка 4 мм различие оптимальных значений скорости является менее существенным, а при резке листов толщиной 10 мм оно практически отсутствует, причем при резке толстых листов СО₂-лазер обеспечивает лучшее качество кромки. Ограничение скорости резки или ее прекращение может быть обусловлено недостаточной мощностью энергии или низкой скоростью удаления расплава и заплавлением реза при больших скоростях резки (более $10 \div 15$ м/мин) [4]. Различие скоростей резки лазерами обоих типов обычно объясняется различием величин френелевского поглощения на фронте реза [5] для излучений с длинами волн $\lambda = 1,07; 10,60$ мкм.

Сравнению характеристик лазерно-кислородной резки при различных длинах волн уделялось существенно меньшее внимание.

В настоящее время причины различий характеристик резов, выполненных лазерами двух типов, четко не сформулированы. По мнению большинства исследователей, они имеют фундаментальный характер и обусловлены особенностями распространения и поглощения лазерного пучка с длинами волн $\lambda = 1,07; 10,60$ мкм в канале реза [5–7].

Следует отметить, что во многих теоретических и экспериментальных работах принимается максимальная скорость резки без учета качества реза. Важным показателем качества реза является шероховатость его поверхности. Максимальная скорость резки не всегда является оптимальной с точки зрения качества реза.

В работах [8–12] сформулирована и экспериментально решена задача оптимизации резки по критерию минимума шероховатости в случае лазерно-кислородной резки стальных листов CO₂-лазером. Условия качественной резки были сформулированы в виде законов подобия, кроме того, были найдены значения обобщенных безразмерных переменных, при которых шероховатость поверхности минимальна. В качестве безразмерных переменных были выбраны мощность лазера и число Пекле. Насколько известно авторам данной работы, подобное обобщение экспериментальных данных о лазерно-кислородной резке волоконным лазером ранее не проводилось. Также не проводилось сравнение результатов резки листов из нержавеющей стали с использованием инертного газа для волоконного лазера и CO₂-лазера.

В настоящей работе продолжено исследование задачи оптимизации лазерной резки и впервые проведено детальное сравнение механических характеристик резки волоконным лазером и CO₂-лазером по критерию минимальной шероховатости.

Методика экспериментов. Для резки применялся иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus с мощностью излучения $W = 2$ кВт и параметром $BPP = 3,8$ мм·мрад (BPP (beam parameter product) — произведение радиуса пучка в ближней зоне и углового радиуса пучка в дальней зоне) с коллиматором IPG (модель D5-WC/AC). Диаметр пучка на фокусирующей линзе за коллиматором равен 17 мм, фокусное расстояние линзы — 200 мм. Использовался также CO₂-лазер [13] с $BPP = 4,7$ мм·мрад и самофильтрующим резонатором мощностью до 8 кВт. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составлял 25 мм при фокусных расстояниях ZnSe-линзы, равных 127 и 190 мм. Резка осуществлялась излучением с круговой поляризацией. Распределение интенсивности излучения в фокальном пятне близко к гауссову. Диаметр фокального пятна оценивался как сумма дифракционного диаметра пучка и диаметра области рассеяния вследствие сферической аберрации. Рассчитанный суммарный диаметр для волоконного лазера равен 180 мкм, для CO₂-лазера — 160 мм.

Разрезались листы низкоуглеродистой стали марки Ст.3 толщиной 3, 5, 10 мм при мощности излучения $W = 0,5 \div 2,0$ кВт. Также выполнялась резка листов нержавеющей стали марки 12X18H10T толщиной 3, 5, 8 мм. Давление азота в резачке во всех случаях составляло $1,3 \div 1,6$ МПа, давление кислорода при резке листов толщиной 3 мм равно 0,25 МПа, при резке листов другой толщины — 0,05 МПа.

В качестве меры шероховатости приняты характерная высота элемента неоднородности R_z и среднее арифметическое отклонение формы профиля R_a . Эти величины измерялись с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT и профилометра Rank Taylor Hobson серии Form Talysurf.

Оптимальные параметры определялись в два этапа. На первом этапе проводилась оптимизация лазерной резки по двум параметрам: для данного значения мощности определялись оптимальное положение перетяжки и скорость резки V_C^* . От положения фокуса пучка зависела ширина реза, оптимальное значение которой b^* определялось для каждого

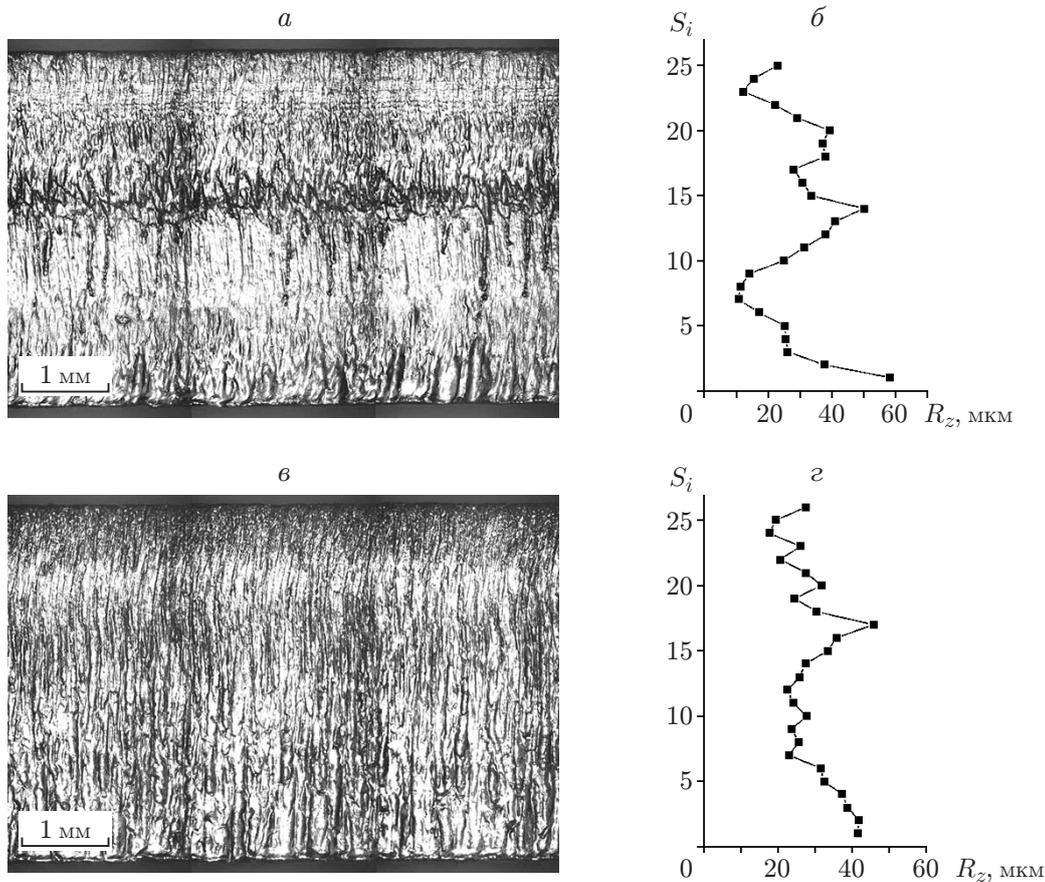


Рис. 1. Поверхности реза (*а, в*) и распределение шероховатости по толщине листа нержавеющей стали (*б, г*) при $t = 5$ мм, $W = 2$ кВт:

а, б — резка CO₂-лазером ($V_C = 1,4$ м/мин), *в, г* — резка волоконным лазером ($V_C = 2,2$ м/мин)

значения мощности и скорости. На втором этапе проводилась оптимизация лазерной резки по мощности излучения. Среди пар значений V_C^* и b^* , соответствующих разным мощностям, выбирались такие, при которых шероховатость поверхности реза минимальна. Эти значения обозначены V_{opt} и b_{opt} , соответствующая им лазерная мощность принималась в качестве оптимальной.

Результаты экспериментов и их обсуждение. На рис. 1 приведены фотографии поверхности и распределение шероховатости R_z по толщине листа нержавеющей стали при резке волоконным и CO₂-лазерами. Установлено, что скорость, при которой шероховатость минимальна, для CO₂-лазера равна $V_C = 1,4$ м/мин, для волоконного лазера — $V_C = 2,2$ м/мин. Аналогичные результаты, полученные при резке низкоуглеродистой стали с кислородом в качестве технологического газа, приведены на рис. 2. Проведено детальное исследование шероховатости поверхностей реза, показанных на рис. 1, 2, при толщинах t листа, равных 3 и 5 мм. Для этого вдоль линии длиной 3 мм, ориентированной параллельно поверхности листа, измерялись шероховатости R_a и R_z в 26 сечениях S_i ($i = 1, \dots, 26$). Таким образом, при толщине листа $t = 3$ мм измерения проводились с шагом, равным 120 мкм.

Сравнение данных, приведенных на рис. 1, 2, показывает, что структура поверхности обусловлена типом газа и слабо зависит от длины волны лазера. В верхней части поверхности реза, полученного с использованием кислорода, наблюдаются регулярно рас-

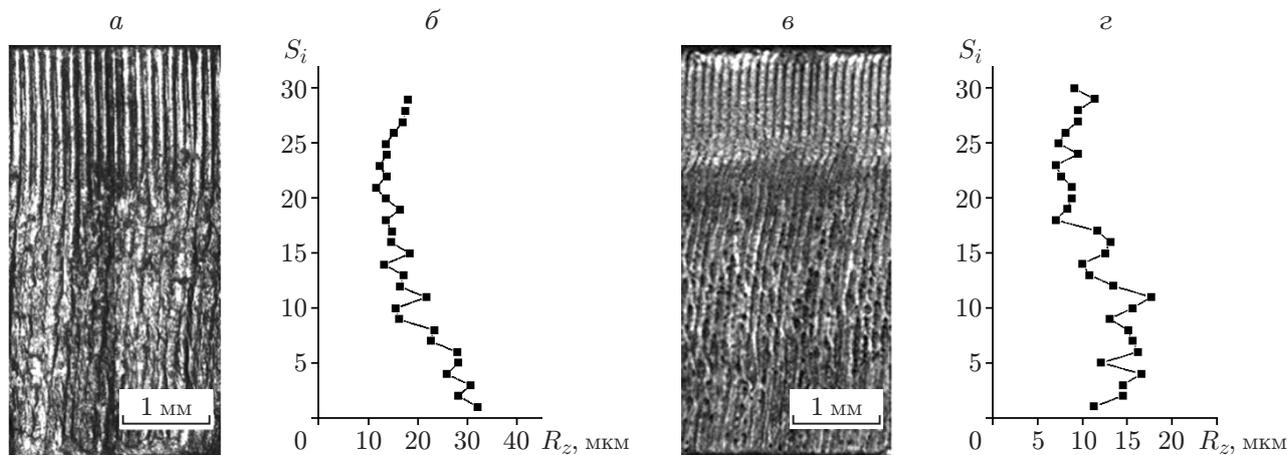


Рис. 2. Поверхности реза (*a*, *в*) и распределение шероховатости по толщине листа низкоуглеродистой стали (*б*, *з*) при $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт:
a, *б* — резка CO₂-лазером ($V_C = 1,5$ м/мин), *в*, *з* — резка волоконным лазером ($V_C = 0,8$ м/мин)

положенные штрихи, в нижней части их расположение является более хаотичным. Соотношения глубин этих зон, шаги между штрихами и углы их наклона для обоих типов лазеров близки. Шероховатость изменяется монотонно по высоте реза, возрастая по мере приближения к нижней кромке. Поэтому при резке с использованием кислорода для оценки качества реза использовались результаты измерения шероховатости в двух сечениях на расстояниях от верхней поверхности листа, равных $1/3$ и $2/3$ его толщины.

При резке нержавеющей стали с азотом расположение штрихов в зависимости от расстояния до поверхности листа имело хаотический характер. Как для волоконного, так и для CO₂-лазера наблюдается существенная неоднородность распределения величины R_z по глубине. Минимальное и максимальное значения R_z различались почти в два раза. Заметим, что для CO₂-лазера в нижней части реза наблюдается больший разброс значений R_z и более существенное увеличение шероховатости. Представленные результаты показывают, что в этом случае проведение сравнения шероховатости образцов реза в отдельных точках по толщине листа может привести к ошибочным выводам, поэтому необходимо использовать средние по всей толщине пластины значения R_a .

Данные о средней шероховатости, полученные при оптимальной ширине реза для нескольких значений скорости резки V_C с азотом, приведены на рис. 3. Видно, что при малых скоростях средняя шероховатость выше, чем при больших скоростях, и с увеличением скорости уменьшается до некоторого значения, а затем остается постоянной вплоть до момента достижения максимального значения скорости, при превышении которого наблюдается непрорез. Следует отметить, что для обоих типов лазеров значения средней шероховатости при оптимальном положении фокуса и одной и той же скорости близки. Таким образом, при резке с использованием азота близкие значения средней шероховатости достигаются при заданной мощности в широком диапазоне скоростей. Например, для листа нержавеющей стали толщиной 3 мм скорость резки изменяется в диапазоне $1,5 \div 7,5$ м/мин. С увеличением мощности CO₂-лазера диапазон скоростей увеличивается, но шероховатость поверхности практически не меняется. В этом случае оптимальной можно считать максимальную скорость $V_C^{\text{кр}}$. Значения оптимальных величин скорости и ширины реза при использовании азота для CO₂-лазера и волоконного лазера приведены на рис. 4, *a*, 5, *a*. Заметим, что при одной и той же мощности предельная скорость резки

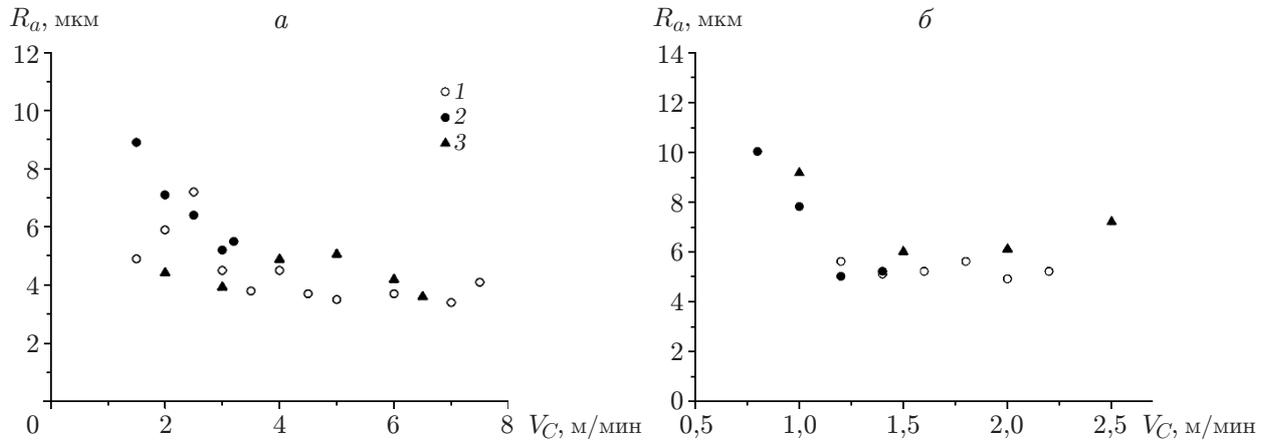


Рис. 3. Зависимость шероховатости от скорости резки волоконным лазером (1) и CO_2 -лазером (2, 3) листа нержавеющей стали при использовании азота в качестве технологического газа и оптимальной ширине реза:
 а — $t = 3$ мм, б — $t = 5$ мм; 1, 2 — $W = 2$ кВт, 3 — $W = 4$ кВт

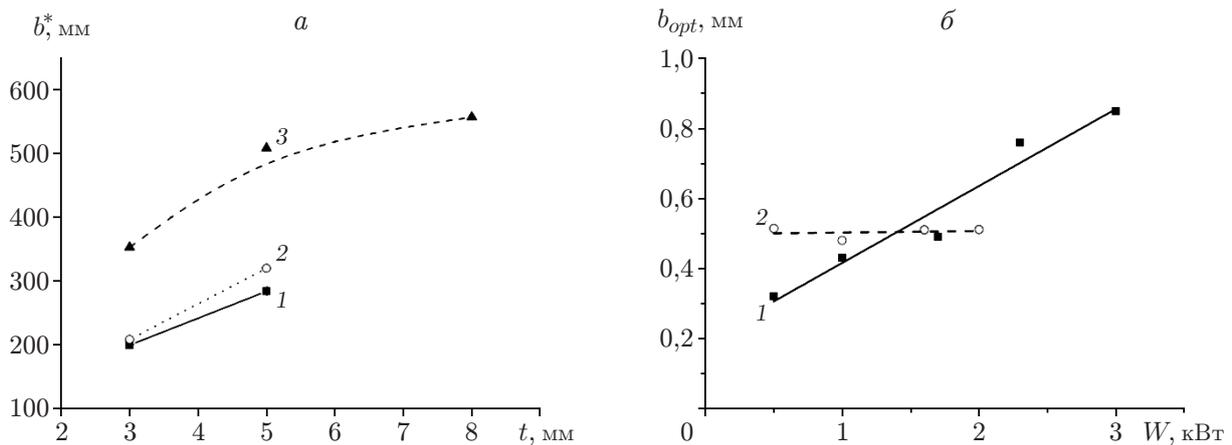


Рис. 4. Оптимальная ширина реза b^* при резке волоконным и CO_2 -лазерами:
 а — зависимость $b^*(t)$ при резке листа нержавеющей стали с использованием азота (1 — резка CO_2 -лазером ($W = 2$ кВт), 2 — резка волоконным лазером ($W = 2$ кВт), 3 — резка CO_2 -лазером ($W = 4$ кВт)); б — зависимость $b_{opt}(W)$ при лазерно-кислородной резке листа низкоуглеродистой стали ($t = 5$ мм) (1 — резка CO_2 -лазером, 2 — резка волоконным лазером)

волоконного лазера в $1,5 \div 2,0$ раза превышает предельную скорость резки CO_2 -лазера. В работе [14] показано, что при резке с использованием инертного технологического газа процессы отражения излучения от верхней поверхности листа нержавеющей стали при длине волны $\lambda = 10,6$ мкм являются более существенными, чем при $\lambda = 1,07$ мкм. Повидимому, это и ограничивает максимальную скорость резки CO_2 -лазера.

При резке с использованием кислорода характер зависимости шероховатости от параметров резки существенно меняется. Для каждого значения мощности лазера существуют оптимальные значения скорости резки и ширины реза, при которых шероховатость является минимальной (рис. 6, 7).

На первом этапе оптимизации для лазеров каждого типа при различных мощностях и толщинах листов низкоуглеродистой стали определялись соответствующие минимуму

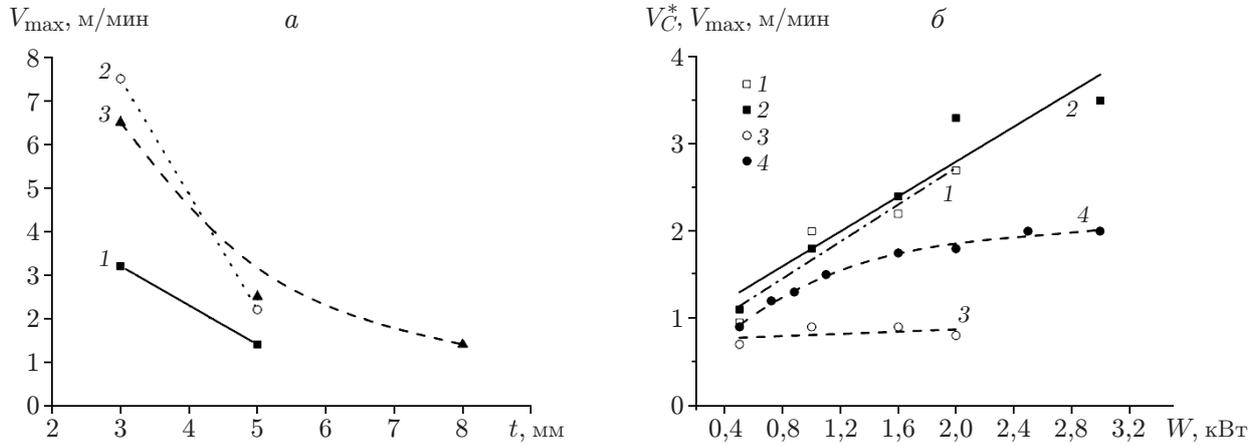


Рис. 5. Максимальная и оптимальная скорости резки волоконным и CO_2 -лазерами: *a* — зависимость максимальной скорости резки от толщины листа металла (1 — резка CO_2 -лазером ($W = 2$ кВт), 2 — резка волоконным лазером ($W = 2$ кВт), 3 — резка CO_2 -лазером ($W = 4$ кВт); *б* — зависимости максимальной скорости резки V_{\max} (1, 2) и скорости V_C^* , соответствующей минимуму шероховатости (3, 4), от мощности излучения при $t = 5$ мм (1, 3 — резка волоконным лазером, 2, 4 — резка CO_2 -лазером)

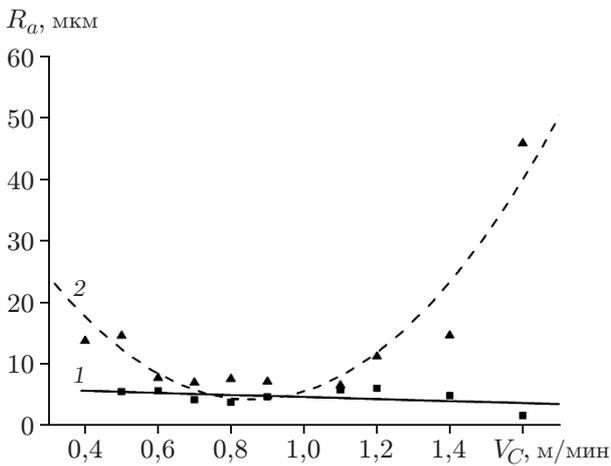


Рис. 6

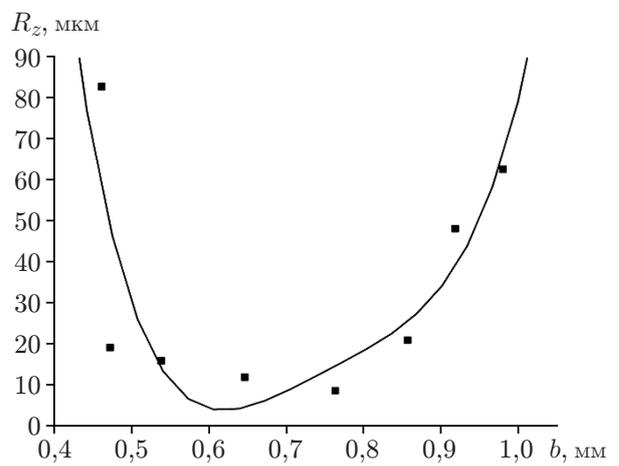


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость шероховатости от скорости резки в случае лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали волоконным лазером при $W = 1$ кВт: 1 — шероховатость вблизи верхней поверхности листа, 2 — шероховатость вблизи нижней поверхности листа

Рис. 7. Зависимость шероховатости от ширины реза в случае лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали CO_2 -лазером при $W = 2,3$ кВт

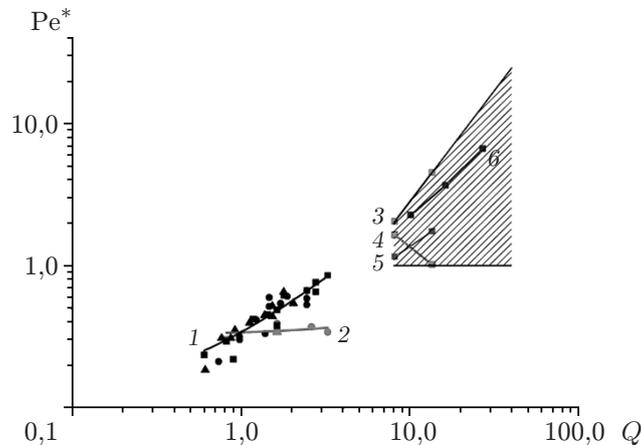


Рис. 8. Зависимость оптимального числа Пекле от безразмерной мощности:

1 — резка листа низкоуглеродистой стали CO_2 -лазером ($t = 5, 10, 16$ мм, V_C^*), 2 — резка листа низкоуглеродистой стали волоконным лазером ($t = 3, 5, 10$ мм, V_C^*), 3 — резка листа нержавеющей стали волоконным лазером ($t = 3, 5$ мм, $W = 2$ кВт, V_{\max}^*), 4 — резка листа нержавеющей стали волоконным лазером ($t = 3, 5$ мм, $W = 2$ кВт, V_C^*), 5 — резка листа нержавеющей стали CO_2 -лазером ($t = 3, 5$ мм, $W = 2$ кВт, V_C^*), 6 — резка листа нержавеющей стали CO_2 -лазером ($t = 3, 5$ мм, $W = 4$ кВт, V_C^*); заштрихованная область — область лазерной резки с использованием инертного газа

шероховатости оптимальные ширины и скорости резки (см. рис. 4, б, 5, б). На рис. 5, б приведены также значения максимальной скорости резки, при превышении которых наблюдался непрорез. Заметим, что при резке с использованием кислорода в качестве технологического газа максимальная скорость всегда больше оптимальной и в пределах разброса экспериментальных данных не зависит от типа лазера.

Зависимости оптимальных значений ширины реза (см. рис. 4, б) и скорости (см. рис. 5, б) от мощности для волоконного и CO_2 -лазеров существенно различаются. С увеличением мощности значения V_C^* и b^* для CO_2 -лазера линейно растут, тогда как для волоконного лазера они остаются практически постоянными (в интервале мощности $W = 0,5 \div 2,0$ кВт $V_C^* = 0,7 \div 0,9$ м/мин, $b^* = 480 \div 514$ мкм).

Обобщенные данные, полученные при резке листов стали разной толщины с использованием кислорода и азота при оптимизации по двум параметрам — скорости и ширине реза, представлены на рис. 8 в виде зависимости числа Пекле $Pe^* = V_C^* b^* \rho_m C_m / \lambda_m = V_C^* b^* / \gamma$, вычисленного по оптимальной скорости и оптимальной ширине реза, от безразмерной мощности $Q = W / (\lambda_m t T_m)$ (λ_m — удельная теплопроводность; C_m — удельная теплоемкость; ρ_m — плотность; T_m — температура жидкого металла в зоне реза).

На рис. 8 видно, что в безразмерных координатах данные, полученные при кислородной резке листов стали различной толщины ($t = 3 \div 16$ мм), описываются одной зависимостью, вид которой определяется типом лазера. В случае волоконного лазера и низкоуглеродистой стали (см. рис. 8) зависимость оптимизированного по двум параметрам числа Пекле от мощности при $t = 3 \div 10$ мм является “вырожденной”: независимо от толщины разрезаемого листа разным значениям лазерной мощности соответствует одно и то же (в пределах погрешности эксперимента) оптимальное значение числа Пекле $Pe^* = 0,35$. В случае использования CO_2 -лазера с увеличением безразмерной мощности оптимальное число Пекле возрастает и независимо от толщины листа стали описывается единой зависимостью $Pe^*(Q)$, близкой к линейной.

Как отмечено выше (см. рис. 3), при резке с использованием инертного газа (см. рис. 8) минимальная шероховатость наблюдается в широком диапазоне значений скорости и мощ-

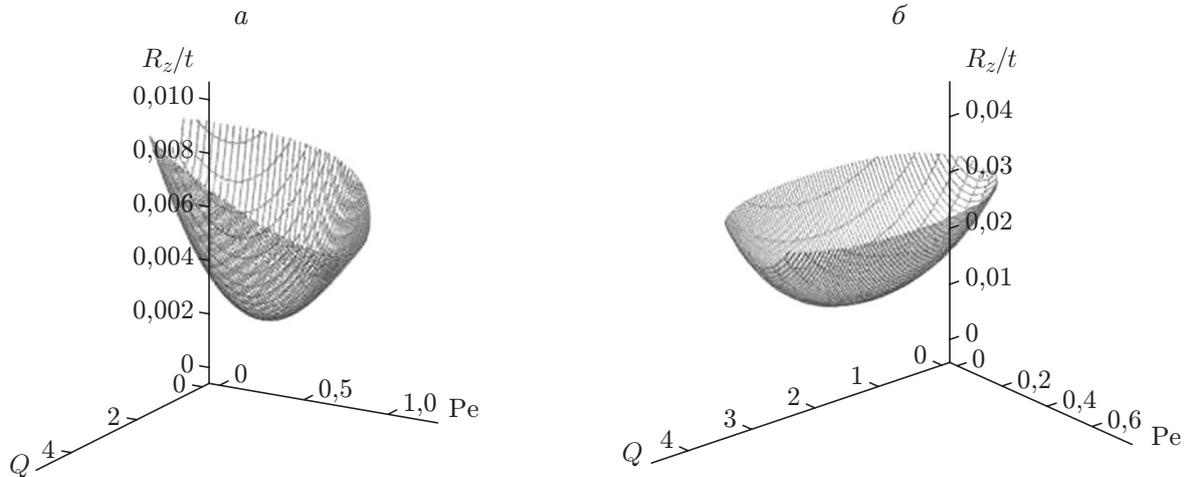


Рис. 9. Экспериментальные зависимости шероховатости поверхности R_z/t от числа Пекле Pe и безразмерной мощности Q при резке CO_2 -лазером (а) и волоконным лазером (б) листов стали толщиной $t = 5$ мм

Таблица 1

Оптимальные параметры резки при минимальной шероховатости

| Тип лазера | Pe_{opt} | $V_c b$, мм ² /с | Q | W/t , Вт/мм | U , Дж/мм ³ |
|------------------|------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------------------|
| CO_2 -лазер | 0,50 | 11,0 | 1,6 | 200 | 18 |
| Волоконный лазер | 0,35 | 7,5 | 1,6 ÷ 2,4 | 200 ÷ 300 | 26 ÷ 40 |

ности лазеров. Зоне качественной резки с использованием азота на рис. 8 соответствует заштрихованная область. На рис. 8 приведены также некоторые экспериментальные зависимости для предельных по скорости режимов.

На втором этапе проводилась оптимизация по трем параметрам, т. е. при лазерно-кислородной резке помимо скорости и ширины реза учитывалась зависимость шероховатости от мощности лазеров.

На рис. 9 приведены зависимости шероховатости R_z/t от безразмерных числа Пекле Pe и мощности Q при резке листов низкоуглеродистой стали различной толщины. Фактически на рис. 9 представлен экспериментально определенный функционал $R_z/t = \Phi(W/(\lambda_m t T_m), V_c^* b^*/\gamma)$ для лазеров обоих типов. Видно, что данная функция имеет чашеобразную форму с минимумом R_z/t , который соответствует оптимальным условиям резки $Pe_{opt} = \text{const}$, $Q_{opt} = \text{const}$. Оптимальные значения безразмерных параметров приведены в табл. 1 (U — плотность энергии).

Сечение “чаша” $R_z/t = \text{const}$ на рис. 9 имеет эллипсообразную форму, большая ось вытянута в направлении изменения числа Пекле Pe (см. рис. 8). В случае волоконного лазера “чаша” вытянута вдоль направления изменения мощности, что соответствует условию $Pe = \text{const}$, в случае CO_2 -лазера — под углом к направлениям изменения Pe и Q .

Проведенное комплексное исследование лазерной резки листов низкоуглеродистой и нержавеющей стали с помощью волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм и CO_2 -лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм и обобщение экспериментальных данных с использованием безразмерных параметров на основе критерия минимума шероховатости поверхности позволяют выделить некоторые физические процессы, оказывающие существенное влияние на качество реза, а также сформулировать оптимальные условия применения данных лазеров.

Из рис. 8 следует, что при резке с использованием азота единая функциональная зависимость числа Пекле от безразмерной мощности $Pe^*(Q)$ отсутствует. Качественный рез наблюдается в широком диапазоне безразмерных параметров, имеющем существенное ограничение: $Pe \geq 1$, $Q \geq 5$. Заметим, что при кислородной резке независимо от типа лазера оптимальными являются значения числа Пекле $Pe < 1$ и безразмерной мощности $Q < 5$. Уменьшение удельной мощности Q при резке с кислородом по сравнению с резкой с азотом обусловлено, по-видимому, наличием дополнительного источника энергии — экзотермической реакции окисления железа кислородом [8]. Число Пекле (отношение скорости резки к характеристической скорости распространения тепла) описывает поле температур [15]. В частности, оказалось, что для качественной резки с использованием кислорода необходимо реализовать относительно равномерное распределение температуры и прогрев металла перед зоной реза. Такое поле температур формируется при $Pe < 1$. При резке с нейтральным газом минимальная шероховатость достигается при $Pe \geq 1$, т. е. при больших градиентах температуры в направлении реза [15]. Следует отметить, что рост мощности и скорости, а следовательно, и числа Пекле для рассмотренных тепловых процессов не ограничен, однако при увеличении мощности возникает новое, не исследуемое в данной работе явление — образование плазмы на поверхности при резке с использованием высокого давления азота, причем это явление более существенно для CO_2 -лазера.

В табл. 1 приведены оптимальные значения безразмерных переменных, которые позволяют представить и сравнить условия получения поверхности реза с минимальной шероховатостью для двух типов лазеров при резке с кислородом. На практике целесообразно использовать размерные зависимости. Для достижения минимальной шероховатости мощность излучения CO_2 -лазера необходимо увеличивать пропорционально толщине разрезаемого листа, так чтобы выполнялось условие $W/t = (200 \pm 20)$ Вт/мм. При резке волоконным лазером в диапазоне $W/t = 200 \div 320$ Вт/мм существенного изменения шероховатости не происходит. При данной толщине листа увеличение мощности не приводит к увеличению оптимальной скорости (см. рис. 5). Поэтому целесообразно использовать ту же мощность, что и для CO_2 -лазера, — 200 Вт на 1 мм по толщине разрезаемого листа.

Ширина реза не относится к числу задаваемых параметров лазерной резки, а является характеристикой реза, что затрудняет использование условия $V_{opt}b_{opt} = \text{const}$ на практике. Оптимальная ширина реза как для волоконного, так и для CO_2 -лазера с увеличением толщины разрезаемого листа растет, причем зависимость ширины реза от толщины практически не зависит от типа лазера (рис. 10).

При линейной аппроксимации зависимости выражаются следующим образом: $b_{opt} = 0,35 + 0,02t$ для CO_2 -лазера и $b_{opt} = 0,32 + 0,027t$ для волоконного лазера. Это позволяет исключить ширину реза из условия $V_{opt}b_{opt} = \text{const}$ и в пределах разброса экспериментальных данных $\pm 15\%$ представить оптимальную скорость резки в виде аналитической зависимости от толщины листа. Соотношения для оптимальной скорости резки имеют следующий вид (см. рис. 10): $V_{opt} = 11/(0,35 + 0,02t)$ для CO_2 -лазера и $V_{opt} = 7/(0,32 + 0,027t)$ для волоконного лазера.

В табл. 2 приведены типичные значения шероховатости для лазеров двух типов при резке с использованием кислорода и азота в оптимальных условиях, т. е. при значениях скорости, ширины реза и мощности лазеров, соответствующих минимуму шероховатости. Из табл. 2 следует, что при резке с кислородом CO_2 -лазер обеспечивает меньшие (в 2–3 раза) по сравнению с волоконным лазером значения шероховатости. Учитывая большие (приблизительно в 1,5 раза) значения оптимальной скорости резки CO_2 -лазером при той же мощности, применение такого лазера можно считать оптимальным при резке с использованием кислорода.

Другая ситуация реализуется при резке нержавеющей стали с нейтральным газом (азотом). Меньшая шероховатость (см. табл. 1) и большие (приблизительно в два раза)

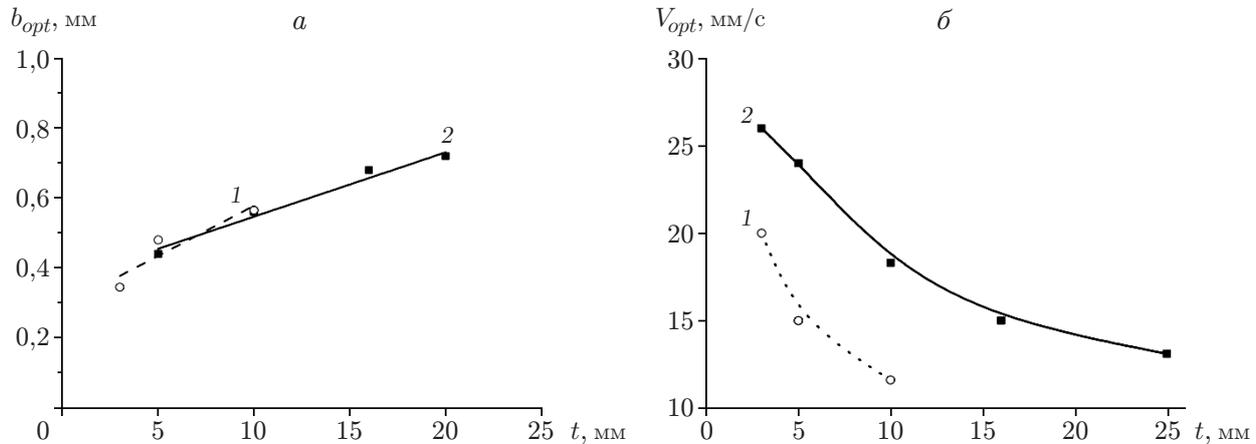


Рис. 10. Зависимости оптимальной ширины реза (а) и оптимальной скорости резки (б) от толщины листа для волоконного и CO_2 -лазеров при мощности излучения, соответствующей минимальной шероховатости:
1 — резка волоконным лазером, 2 — резка CO_2 -лазером

Таблица 2

Средняя шероховатость поверхности реза волоконным и CO_2 -лазерами с использованием кислорода или азота в качестве технологического газа

| Вид резки | t , мм | CO_2 -лазер | | Волоконный лазер | |
|---------------------------------------|----------|----------------------|-------------|------------------|-------------|
| | | R_z , мкм | R_a , мкм | R_z , мкм | R_a , мкм |
| Лазерно-кислородная резка | 3 | 6,8 | 1,6 | 11,2 | 2,7 |
| | 5 | 12,7 | 2,0 | 19,3 | 3,9 |
| | 10 | 13,1 | 2,8 | 29,4 | 6,1 |
| Резка с использованием инертного газа | 3 | 32,3 | 5,2 | 26,8 | 4,1 |
| | 5 | 35,1 | 5,2 | 34,0 | 5,2 |

значения максимальной скорости при той же мощности (см. рис. 5) свидетельствуют о том, что более предпочтительным является применение лазеров с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм (в частности, волоконных лазеров), причем резку можно осуществлять при скорости, близкой к предельной для данных толщины листа стали и мощности лазера.

Заключение. Проведено исследование лазерной резки листов низкоуглеродистой и нержавеющей стали с помощью волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм и CO_2 -лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. В результате обобщения экспериментальных данных определены условия, при которых шероховатость поверхности реза минимальна. В случае кислородной резки эти условия выражены через безразмерные переменные: число Пекле $V_C b / \gamma$ и лазерную мощность на единицу толщины листа $W / (\lambda_m t T_m)$. Для лазеров обоих типов условия оптимальности имеют один и тот же вид: $V_{opt} b_{opt} / \gamma = \text{const}$, $W_{opt} / (\lambda_m t T_m) = \text{const}$. Найдены значения безразмерных переменных, соответствующие минимальной шероховатости, образующейся при резке волоконным и CO_2 -лазерами.

Из законов подобия получены соотношения, позволяющие при заданной толщине листа определять основные исходные параметры лазерной резки: мощность лазера и скорость резки, соответствующие минимуму шероховатости.

В пространстве безразмерных параметров $V_{opt} b_{opt} / \gamma$ и $W_{opt} / (\lambda_m t T_m)$ определены области, в которых обеспечивается минимальная шероховатость при резке нейтральным газом. Показано, что эти области не зависят от типа используемого лазера.

Результаты настоящей работы позволяют сделать вывод, что использование CO₂-лазера обеспечивает лучшие технологические характеристики (шероховатость, скорость) при резке с кислородом листов низкоуглеродистой стали толщиной 3 ÷ 16 мм, а применение волоконного лазера является более перспективным при резке с азотом листов нержавеющей стали толщиной 3 ÷ 10 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Scintilla L. D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E.** Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation // Intern. J. Machine Tools Manufacture. 2013. V. 69. P. 30–37.
2. **Powell J., Kaplan A. F. H.** A technical and commercial comparison of fiber laser and CO₂ laser cutting // Proc. of the 31st Intern. congress on applications of lasers and electro-optics ICALEO-2012, Anaheim (USA), Sept. 23–27, 2012. S. 1., 2012. P. 277–281.
3. **Himmer T., Pinder T., Morgenthal L., Beyer E.** High brightness lasers in cutting applications // Proc. of the 26th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics ICALEO-2007, Orlando (USA), Oct. 29 — Nov. 1, 2007. S. 1., 2007. P. 87–91.
4. **Olsen F. O.** Laser cutting from CO₂ laser to disc or fiber laser — possibilities and challenges // Proc. of the 30th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics ICALEO-2011, Orlando (USA), Oct. 23–27, 2011. S. 1., 2011. P. 6–15.
5. **Mahrle A., Beyer E.** Theoretical aspects of fibre laser cutting // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 175507.
6. **Petring D., Schneider F., Wolf N., Nazery V.** The relevance of brightness for high power laser cutting and welding // Proc. of the 27th Intern. congress on applications of lasers and electro-optics ICALEO-2008, Temecula (USA), Oct. 20–23, 2008. S. 1., 2008. P. 95–103.
7. **Hirano K., Fabbro R.** Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10 μm beams // J. Laser Applicat. 2012. V. 24. 012006.
8. **Фомин В. М., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Энергетические условия газолазерной резки толстых стальных листов // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 3. С. 16–23.
9. **Фомин В. М., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Подobie тепловых потоков при лазерно-кислородной резке стали // Докл. АН. 2011. Т. 436, № 2. С. 184–187.
10. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов // Квантовая электрон. 2009. Т. 39, № 6. С. 547–551.
11. **Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Scaling laws for the laser-oxygen cutting of thick-sheet mild steel // Intern. J. Machine Tools Manufacture. 2009. V. 49. P. 1152–1154.
12. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO₂-лазера // Квантовая электрон. 2012. Т. 42, № 7. С. 640–644.
13. **Афонин Ю. В., Гольщев А. П., Иванченко А. И. и др.** Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
14. **Гольщев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б.** Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного иттербиевого и CO₂-лазеров // Квантовая электрон. 2014. Т. 44, № 3. С. 233–238.
15. **Prusa J., Venkitachalam G., Molian P.** Estimation of heat conduction losses in laser cutting // Intern. J. Machine Tools Manufacture. 1999. V. 39. P. 431–458.