

Резка металлов излучением CO₂-лазера с самофильтрующим резонатором

А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

Экспериментально исследована возможность качественной резки стали излучением CO₂-лазера с неустойчивым самофильтрующим резонатором (СФР). СФР обеспечивает производство угла расходимости на радиус пучка, близкое к аналогичной величине для низших мод устойчивого резонатора (УР), но при большей мощности излучения, что позволяет повысить скорость резки. В дальней зоне пучок СФР имеет дифракционную структуру с побочными максимумами, что обычно рассматривается как отрицательный фактор для лазерной резки. Разрезались стальные пластины толщиной до 25 мм. Сравнение полученных результатов с известными данными для лазеров с УР показало, что основные характеристики реза (ширина, шероховатость кромки, удельные затраты энергии) для этих лазеров близки. Сделан вывод о том, что особенности пространственной структуры пучка СФР при выбранных параметрах резонатора не оказывают существенного влияния на характеристики реза.

Ключевые слова: технологический лазер, лазерный резонатор, качество пучка, лазерная резка, качество реза.

1. Введение

Лазерная резка металлов является в настоящее время хорошо развитым технологическим процессом и успешно применяется на практике. Для нее характерно сочетание большой скорости и высокого качества реза. Скорость резки и максимальная толщина разрезаемых листов растут с повышением мощности лазера. Мощность применяемых для резки лазеров, большинство из которых составляют проточные CO₂-лазеры с устойчивым оптическим резонатором (УР), росла в течение последних двух десятилетий примерно на 1 кВт за пять лет и составляет в настоящее время 6 кВт [1]. Лазерная резка производится сфокусированным пучком при диаметре фокального пятна ~0.1 мм, причем необходимая интенсивность излучения должна сохраняться на длине, сравнимой с толщиной разрезаемого листа. Отсюда следует требование достаточно высокого качества лазерного пучка: величина BPP (Beam Parameter Product – произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне) не должна превышать 6 мм·мрад [1]. В случае CO₂-лазера такое качество пучка может быть достигнуто при генерации только на низших поперечных модах (TEM₀₀ или TEM_{01*}), что является главной причиной, ограничивающей мощность используемых для резки CO₂-лазеров. Повышение мощности требует увеличения числа Френеля резонатора, а это приводит к возбуждению высших поперечных мод и к возрастанию параметра BPP.

В настоящее время активно исследуется возможность использования для резки одной из разновидностей твердотельных лазеров с диодной накачкой – волоконных лазеров (ВЛ) [2–4]. Благодаря меньшей по сравнению с

CO₂-лазерами длине волны излучения ВЛ имеют необходимую для резки величину BPP даже в многомодовом режиме; в настоящее время достигнута мощность 10 кВт с приемлемой для резки величиной BPP. Эксперименты по резке стали показали, что ВЛ позволяют повысить скорость резки по сравнению с CO₂-лазерами при одинаковой мощности излучения [2–4]. Однако шероховатость поверхности реза, которая часто принимается за основной показатель качества реза, оказывается при резке толстых листов в случае ВЛ примерно вдвое выше [4]. Причинами этого могут быть особенности поглощения излучения с длиной волны 1.08 мкм в канале реза [2] или более узкий, чем при использовании CO₂-лазера, рез [3]. Таким образом, известные к настоящему времени результаты не позволяют сделать однозначных выводов о преимуществе ВЛ в случае необходимости достижения максимально высокого качества реза.

В то же время резка металлов с использованием CO₂-лазеров характеризуется высокими качественными показателями [5, 6], а мощность излучения при сохранении требуемой при этом величины BPP может быть повышена путем использования других схем накачки и других типов оптических резонаторов вместо УР. В лазерах с диффузионным [7] и конвективным [8] охлаждением активной среды успешно используются гибридные резонаторы – неустойчивые по одной поперечной координате и устойчивые или волноводные по другой. В гибридном резонаторе осуществляется, как правило, боковой вывод излучения в плоскости, в которой резонатор является неустойчивым. Из-за дифракции на остром крае выходного зеркала в дальней зоне пучок имеет характерную структуру в виде центрального пятна и побочных максимумов.

Сформулированные в настоящее время требования к качеству пучка основываются на его интегральной характеристике – величине BPP – и не учитывают форму распределения интенсивности в фокальном пятне. Наиболее общие требования к пучку сводятся к тому, что пучок должен быть «компактным», т. е. на периферийные области с малой интенсивностью должна приходиться малая

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: shulyat@rambler.ru, laser@itam.nsc.ru, smalik@ngs.ru

Поступила в редакцию 23 апреля 2008 г., после доработки – 15 сентября 2008 г.

доля полной энергии пучка [5]. Устойчивый резонатор достаточно хорошо удовлетворяет этому требованию. Наличие сложной дифракционной структуры обычно рассматривается как отрицательный фактор. В случае CO_2 -лазера с гибридным резонатором для коррекции пространственной структуры перед использованием пучка производится его внрезонаторная пространственная фильтрация. Однако количественные критерии учета роли пространственной структуры в настоящее время отсутствуют, в существующих монографиях и обзорах по лазерной резке, например [5, 6, 9, 10], этот вопрос не рассматривается. Поэтому определение пригодности для резки конкретного пучка, генерируемого лазером с тем или иным резонатором и модовым составом, требует специальных исследований.

В [11, 12] сообщалось об использовании в мощных CO_2 -лазерах самофильтрующего резонатора (СФР) [13], относящегося к классу резонаторов с преобразованием Фурье, или FT-резонаторов [7]. Благодаря действию внутррезонаторного пространственного фильтра СФР позволяет генерировать пучок излучения, близкий по качеству к TEM_{00} -моду. При этом за счет большего объема низшей моды мощность излучения может быть в 2–3 раза больше мощности лазера с устойчивым одномодовым (TEM_{00}) резонатором такой же длины. В [11] параметр качества лазерного пучка BPP равен 4.7, максимальная мощность излучения составляет 8 кВт; проект создания лазера мощностью 14 кВт разработан в [14].

Выходные пучки СФР и устойчивого резонатора имеют различную пространственную структуру. Излучение выводится из СФР при отражении от кольцевого полностью отражающего зеркала, тогда как вывод излучения из УР осуществляется через сплошное полупрозрачное зеркало. Вследствие дифракции на отверстии связи в выводном зеркале сфокусированный пучок СФР имеет в перетяжке характерную дифракционную структуру с побочными максимумами, причем распределение интенсивности в поперечном сечении изменяется по мере распространения пучка в пространстве. В сфокусированном пучке распределение интенсивности имеет разную форму в перетяжке и в ее окрестностях. Детали пространственной структуры в фокальной области зависят от параметров резонатора. Вопрос о качестве резки пучком лазера с СФР вплоть до настоящего времени оставался открытым.

В данной работе исследуются характеристики реза, полученного при использовании излучения CO_2 -лазера с СФР без пространственной фильтрации. Проведено сравнение полученных результатов с известными данными для CO_2 -лазера с устойчивым резонатором и для волоконного лазера.

Представлены результаты численных расчетов характеристик выходного пучка СФР. Проведены эксперименты по резке низкоуглеродистой стали, коррозионно-стойкой стали и титана излучением CO_2 -лазера с СФР, определены основные характеристики – скорость резки, ширина реза, шероховатость поверхности реза.

2. Характеристики выходного пучка самофильтрующего резонатора

СФР (рис.1) представляет собой конфокальный резонатор, состоящий из двух софокусных сферических зеркал разной кривизны, в общей фокальной плоскости

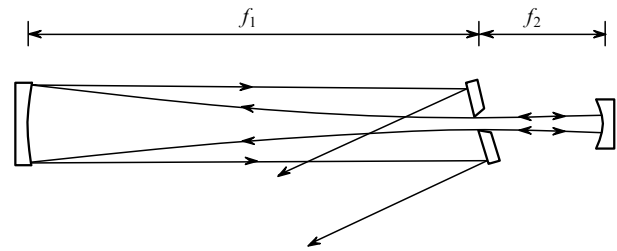


Рис.1. Оптическая схема СФР.

которых расположено кольцевое выводное зеркало с отверстием связи радиусом $a = (0.61\lambda f_2)^{1/2}$. Активная среда находится между выводным зеркалом и зеркалом с фокусным расстоянием f_1 . Из-за большой дискриминации высших мод по потерям в резонаторе надежно выделяется низшая мода.

На основе дифракционного интеграла Френеля – Кирхгофа итерационным методом Фокса – Ли было рассчитано распределение интенсивности излучения в поперечном сечении выходного пучка СФР. На рис.2 и 3 представлены распределения интенсивности I по радиусу r пучка на выводном зеркале и на расстоянии 3 м от него, на рис.4 – угловое распределение интенсивности в дальней зоне. В ближней зоне выходной пучок имеет кольцевое сечение с внутренним радиусом a и внешним радиусом примерно $1.5Ma$ ($M = f_1/f_2$ – коэффициент увеличения резонатора). Для сравнения точечной линией показано распределение интенсивности в гауссовом пучке. Вследствие дифракции на выводном зеркале форма распределения интенсивности в пучке СФР изменяется с расстоя-

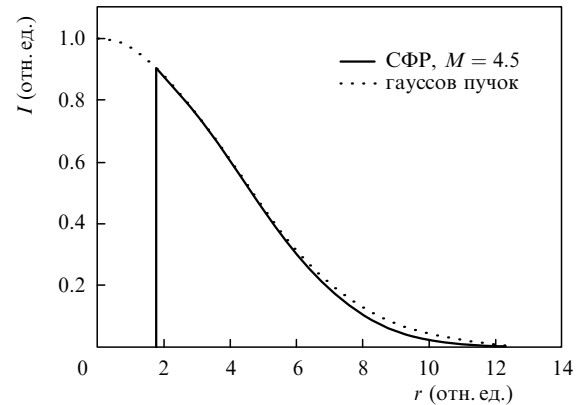


Рис.2. Распределение интенсивности в выходном пучке СФР в ближней зоне.

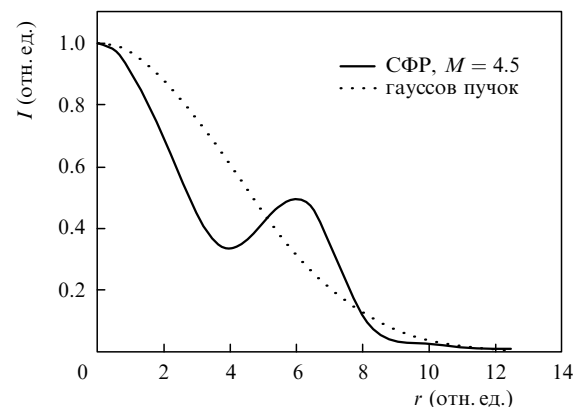


Рис.3. Распределение интенсивности в выходном пучке СФР на расстоянии 3 м от выводного зеркала.

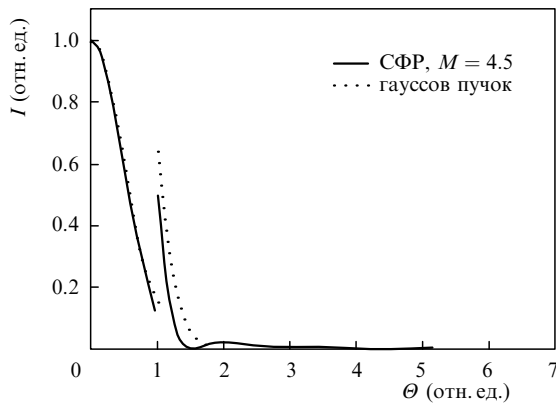


Рис.4. Распределение интенсивности в выходном пучке СФР по углу Θ в дальней зоне (периферийная часть распределения увеличена).

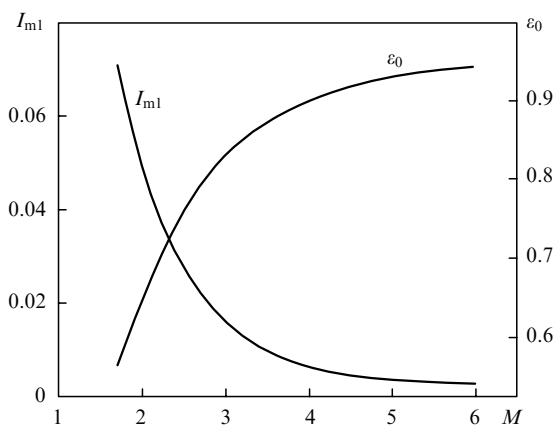


Рис.5. Зависимости интенсивности I_{m1} первого побочного максимума, отнесенной к интенсивности на оси, и доли ϵ_0 энергии в центральном пятне относительно полной энергии пучка от геометрического увеличения M резонатора.

нием от выводного зеркала, приобретая в дальней зоне характерную структуру с центральным пятном и побочными максимумами. Качество выходного пучка возрастает с уменьшением относительного размера отверстия в выводном зеркале, т. е. с повышением M . На рис.5 показаны результаты расчета доли ϵ_0 полной энергии пучка, приходящейся на центральное пятно, и интенсивности I_{m1} первого побочного максимума, отнесенной к осевой интенсивности, в зависимости от коэффициента увеличения M резонатора.

При $M > 4$ в центральном пятне содержится более 90 % всей энергии пучка, а интенсивность первого побочного максимума не превышает 0.5 % осевой интенсивности. Для сравнения отметим, что источнику с круглой апертурой и однородным распределением амплитуды и фазы соответствуют ϵ_0 и I_{m1} , равные 84 % и 1.75 % [15].

Видно, что различия в форме распределений интенсивности гауссова пучка и пучка СФР в дальней зоне существенны лишь в периферийных областях, где интенсивность излучения мала. С ростом M выходной пучок СФР приближается к гауссову. Однако при этом уменьшается коэффициент R' обратной связи резонатора ($R' \approx 2/M^2$), что приводит к уменьшению эффективности преобразования энергии в резонаторе и накладывает ограничение на величину M . Как показали оценки и эксперименты, при соответствующей $M = 4 - 4.5$ величине обратной связи и многопроходной схеме резонатора в CO₂-

лазере низкого давления может быть обеспечена высокая эффективность преобразования энергии.

3. Результаты экспериментов по лазерной резке стальных и титановых пластин излучением CO₂-лазера с СФР

Эксперименты проводились с использованием непрерывного CO₂-лазера [11] с самофильтрующим резонатором. Коэффициент увеличения резонатора был равен 4.5, диаметр пучка на выходе из резонатора – 50 мм. Внешним телескопом диаметр пучка уменьшался до 30 мм. Излучение лазера имело линейную поляризацию, которая с помощью внешнего фазосдвигающего зеркала превращалась в круговую. Оборудование для резки включало также двухкоординатный стол с программным управлением и режущую головку, стабилизированную относительно поверхности листа при помощи емкостного датчика. Резка производилась по традиционной схеме: излучение фокусировалось на разрезаемый образец одиночной линзой из ZnSe, соосно с пучком подавалась струя вспомогательного газа.

При помощи устройства, в которое входили движущийся отражающий цилиндр и фотоприемник [5, 16], измерялся диаметр фокального пятна при фокусном расстоянии линзы 190.5 мм. (Сканирование отражающим цилиндром эквивалентно сканированию щелью.) Результат представлен на рис. 6. Диаметр фокального пятна по основанию равен 330 мкм, по половине интенсивности – 125 мкм.

Осевая интенсивность растет с увеличением мощности почти линейно (рис.7), форма распределения интенсивности остается практически неизменной в диапазоне мощности 1 – 5.5 кВт.

Разрезались листы низкоуглеродистой стали, коррозионно-стойкой стали и титана. Большая часть экспериментальных данных получена для низкоуглеродистой стали – самого распространенного материала для лазерной резки. Для низкоуглеродистой стали опубликовано достаточно большое количество экспериментальных данных, что позволяет провести сравнение более полно.

В экспериментах определялись шероховатость поверхности реза и его ширина, т. е. те параметры, которые часто считаются основными характеристиками качества реза.

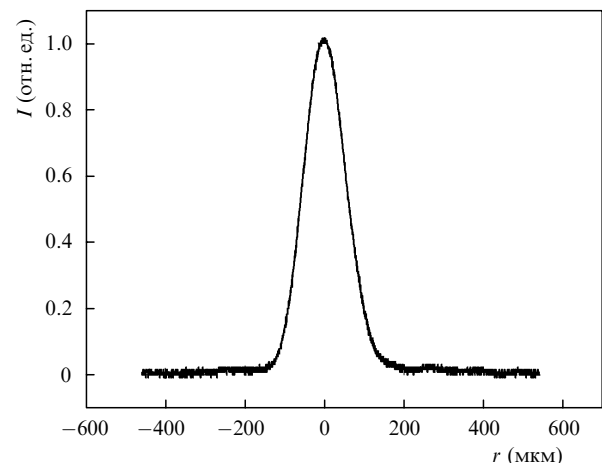


Рис.6. Распределение интенсивности в перетяжке сфокусированного пучка при фокусном расстоянии линзы 190.5 мм.

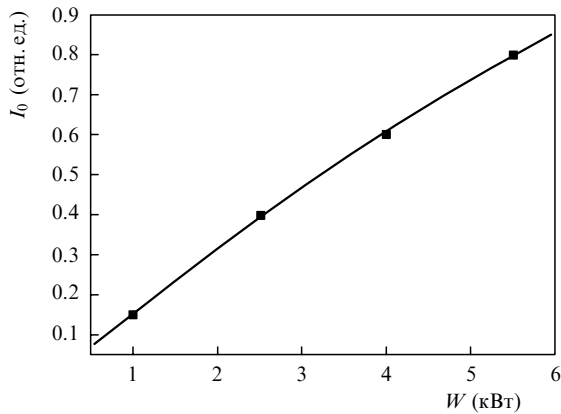


Рис.7. Зависимость интенсивности I_0 в центре фокального пятна от мощности W излучения.

Табл.1. Условия резки листов низкоуглеродистой стали толщиной t .

t (мм)	W (кВт)	f (мм)	P (кг/см ²)
1.5	0.5–1	127	1
3	0.5–1	127, 190	1
5	0.5–3	127, 190	0.5
10	1.2–3	190	0.5
16	1.7–3	190	0.5
20	3–4.5	190, 254	0.4
25	4–4.5	254	0.35

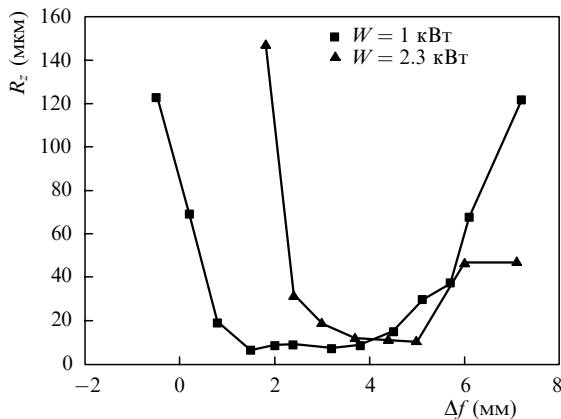


Рис.8. Зависимости шероховатости поверхности реза от положения Δf перетяжки пучка относительно верхней поверхности листа при $t = 5$ мм, $f = 190.5$ мм и разных значениях W .

Низкоуглеродистая сталь. Разрезались листы толщиной от 1.5 до 25 мм. В качестве вспомогательного газа использовался кислород. В табл.1 приведены толщины t листов, мощности W излучения, фокусные расстояния f линзы и давления P кислорода в режущей головке.

Параметры реза выбирались такими, чтобы шероховатость R_z поверхности реза была минимальной. Шероховатость измерялась при помощи профилометра Rank Taylor Hobson серии Form Talysurf в двух сечениях – на расстояниях от верхней поверхности листа, составляющих 1/3 и 2/3 его толщины, и для характеристики образца выбиралось большее ее значение. В большинстве случаев большая шероховатость наблюдалась в нижней части реза, которая и определяла качество образца.

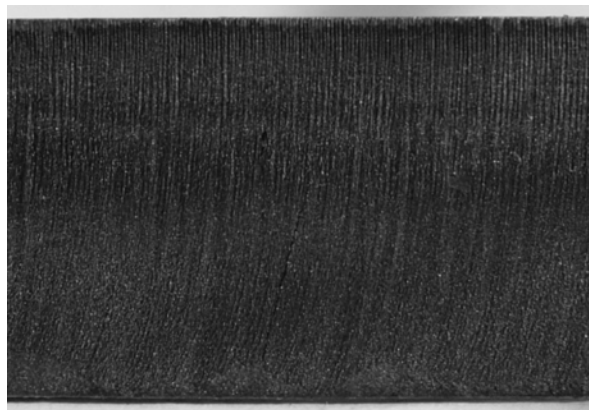
Эксперименты проводились следующим образом. Для выбранной толщины разрезаемого листа t фиксировались значения W, f и P . Затем определялось положение Δf фокуса пучка относительно поверхности листа и скорость v резки, при которых величина R_z минимальна. Определялась ширина реза b , соответствующая минимуму R_z . Ширина реза измерялась, как и в [6], при помощи щупа. При всех толщинах разрезаемых листов из табл.1 получен рез без грата, с близкими к прямым кромками.

В качестве примера на рис.8 представлена зависимость шероховатости поверхности реза от положения Δf фокуса пучка по отношению к поверхности листа; положительные значения Δf соответствуют расположению фокуса над поверхностью. Оптимальная величина Δf возрастает с увеличением мощности излучения, при этом растет и ширина реза.

На рис.9 показаны фотографии поверхности реза и поперечного сечения его канала при толщине листа 16 мм. В табл.2 представлены результаты измерения минимальной шероховатости поверхности реза и соответствующей

Табл.2. Минимальные шероховатости поверхностей реза и соответствующие им ширины реза при резке листов низкоуглеродистой стали толщиной t .

t (мм)	b (мм) (W (кВт); v (м/мин))		R_z (мкм) (W (кВт))	
	СФР	УР [6]	СФР	УР [6]
5	0.23 (1; 1.5)	0.2–0.3	8 (1)	6
10	0.48 (1.8; 1.1)	0.35–0.4	17 (1.8)	28
16	0.63 (2.5; 0.9)	–	27 (2.5)	28
20	0.68 (4; 0.7)	0.5	40 (4)	28



а



б

Рис.9. Поверхность реза (а) и сечение канала реза (б) в низкоуглеродистой стали; $t = 16$ мм, $W = 2.5$ кВт, $v = 0.9$ м/мин.

Табл.3. Ширины реза и шероховатости его поверхностей при резке листов коррозионно-стойкой стали толщиной t .

t (мм)	b (мм) (W (кВт); v (м/мин))		R_z (мкм) (W (кВт))			Δf (мм)
	СФР	УР [6]	СФР	УР [6]	ВЛ [4]	СФР
10	0.19 (4.5; 1.3)	0.3	–	43	60 (4)	–13
16	0.26 (4.5; 0.32)	0.3	42 (4.5)	–	80 (4)	–20
20	0.54 (5; 0.25)	0.5	–	–	–	–20

ей ширины реза для разных толщин листов. Здесь же приведены взятые из [6] характерные результаты для CO₂-лазера с устойчивым резонатором. В табл.2 в скобках указаны мощность излучения и скорость резки для СФР. Видно, что при резке низкоуглеродистой стали ширины реза и шероховатости поверхностей реза в случае CO₂-лазеров с СФР и с устойчивым резонатором близки.

Энергетическую эффективность лазерной резки можно характеризовать величиной W/vt , называемой иногда энергией разделения, – затратами энергии излучения на единицу площади боковой поверхности реза [5, 17]. В наших экспериментах соответствующая минимальная шероховатости величина W/vt растет с увеличением t . Среднее для разных мощностей излучения значение W/vt изменяется от 8.2 Дж/мм² при $t = 3$ мм до 15.7 Дж/мм² при $t = 20$ мм.

Данные из разных литературных источников по энергии разделения при резке низкоуглеродистой стали с использованием кислорода и толщине листов до 20 мм собраны в [17]. В качестве среднего значения авторы называют 9.5 Дж/мм², а все данные попадают в диапазон 6–13 Дж/мм². Отсюда следует, что и энергетические характеристики резки с использованием лазеров с СФР и УР близки.

Коррозионно-стойкая сталь. При резке коррозионно-стойкой стали в качестве вспомогательного газа использовался азот при давлении в камере резака 12 кг/см².

Ширина реза и шероховатость его поверхности для образцов коррозионно-стойкой стали приведены в табл.3. На рис.10 показана поверхность реза при $t = 12$ мм. Из табл.3 следует, что для образцов, вырезанных CO₂-лазером с УР и с СФР, ширины резов и шероховатости их поверхностей близки, а шероховатость в случае ВЛ примерно в 1.5–2 раза больше. Тот факт, что при резке коррозионно-стойкой стали ВЛ дает большую шероховатость, чем CO₂-лазер, отмечался в [2–4]. Как следует из [2], такое же различие имеет место и для низкоуглеродистой стали.

Титан. Поперечное сечение канала реза в титановой пластине толщиной 20 мм показано на рис.11, резка производилась в струе аргона при мощности излучения 4 кВт, фокусное расстояние линзы равно 254 мм. Поверхность реза титановой пластины толщиной 30 мм при мощности излучения 6 кВт и скорости резки 0.1 м/мин показана на рис.12.

Результаты экспериментов по резке низкоуглеродистой и коррозионно-стойкой стали позволяют сделать вывод, что при оптимальных для CO₂-лазера низкого давления параметрах СФР характерная дифракционная структура пучка не оказывает существенного влияния на качество реза. Шероховатость поверхности реза, его ширина, а также удельные затраты лазерной энергии при резке близки к значениям, характерным для CO₂-лазеров с устойчивым резонатором. В то же время лазер с СФР может генерировать большую мощность при высоком качестве пучка. Это позволяет, в частности, достигать

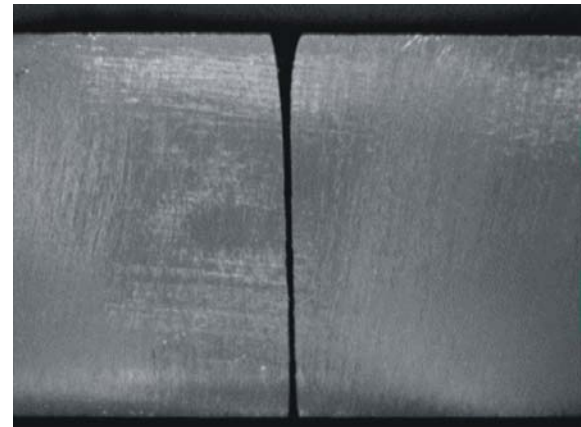
Рис.10. Поверхность реза коррозионно-стойкой стали; $t = 12$ мм.

Рис.11. Поперечное сечение канала реза в титановой пластине толщиной 20 мм; положение фокуса – на нижней поверхности листа.

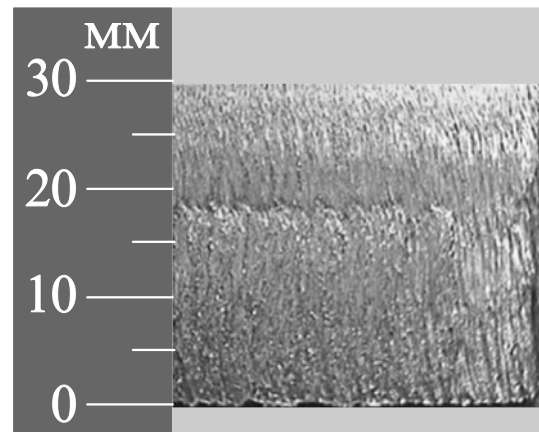


Рис.12. Поверхность реза титановой пластины толщиной 30 мм.

бóльших скоростей резки. Максимальный выигрыш в скорости резки может быть достигнут для тонких листов, когда излучение фокусируется в пятно минимальных размеров. При резке толстых листов высокое качество пучка дает возможность использовать длиннофокусные линзы и создавать узкую протяженную фокальную область с сохранением требуемой плотности мощности. Это позволяет получать узкие резы с близкими к прямым стенками. Данное преимущество особенно проявляется при резке металлов в струе инертного газа, когда фокус пучка находится вблизи нижней поверхности листа. Например, при резке титановых пластин толщиной 20 мм ширина реза на половине толщины не превышает 0.3 мм (рис. 11).

4. Заключение

В работе представлены результаты экспериментов по лазерной резке низкоуглеродистой и коррозионно-стойкой сталей излучением CO₂-лазера с самофильтрующим резонатором. Продемонстрирована возможность получения высокого качества реза без пространственной фильтрации пучка. Сравнение с известными результатами для устойчивого резонатора показывает, что ширины реза, шероховатости его поверхности и удельные затраты энергии для лазеров с СФР и УР примерно одинаковы. Таким образом, при выбранных параметрах резонатора особенности пространственной структуры пучка СФР не оказывают существенного влияния на характеристики реза сталей. Вместе с тем CO₂-лазер с СФР за счет большего модового объема позволяет генерировать примерно в 2–3 раза большую мощность, чем CO₂-лазер с УР при генерации на низших модах. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования

лазера с СФР в системах высокопроизводительной лазерной резки, требующей высокой яркости лазерного пучка.

1. Schlueter H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 8 (2004).
2. Poprawe R., Loosen P., Hoffman H.-D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 634602-1 (2006).
3. Beyer E., Brenner B., Morgenthal L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 63460U-1 (2006).
4. Himmer T., Morgenthal L., Beyer E. *Proc. 26th Int. Congr. Applicat. Lasers&Electro-Optics. Proc. ICALEO 2007* (Orlando, USA, 2007, p. 87).
5. Steen W. *Laser Material Processing* (London: Sprihger-Verlag, 2003).
6. Poprawe R., Weber H., Herziger G. *Laser Physics and Applications. Subvolume C: Laser Applications* (Berlin: Springer-Verlag, 2004).
7. Hodgson N., Weber H. *Laser Resonators and Beam Propagation* (New York: Springer-Verlag, 2005, p. 595).
8. Galushkin M.G., Golubev V.S., Korotchenko A.V., Zabelin A.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 134 (1996).
9. Redy J.F. (ed.). *LIA Handbook of Laser Material Processing* (Orlando: Laser Institute of America, 2001).
10. Голубев В.С. *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сборник трудов ИПЛИТ РАН* (М.: Интерконтакт Наука, 2005, с. 209).
11. 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*, **31**, 307 (2004).
12. Orishich A.M., Shulyat'ev V.B., Grachev G.N., Trashkeev S.I., Stat-senko P.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6735**, 67350W (2007).
13. Gobbi P.G., Reali G.C. *Opt. Commun.*, **52**, 195 (1984).
14. Afonin Yu.V., Filev V.F., Fomin V.M., Golyshchev A.P., Kovalev O.B., Malikov A.G., Orishich A.M., Prikhod'ko Yu.M., Fomichev V.P., Shulyat'ev V.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 63461B-1 (2006).
15. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970, с. 433).
16. Malov A.N., Shulyat'ev V.B. *Proc. XII Int. Conf. Method of Aero-physical Research* (Novosibirsk, Russia, 2004, Pt III, p. 119).
17. Black I. J. *Adv. Manuf. Technol.*, **15**, 832 (1999).