

Исследование прецизионной резки щелевых отверстий большого калибра в стальных листах излучением одномодового волоконного лазера

© В.П. Панченко¹, А.М. Сорока², А.А. Витшас², А.Г. Зеленцов²,
В.П. Менахин², А.В. Яксон²

¹ ФГУП ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», Москва, 142190, Россия

² ООО «Страж-Лазер», с. Беседы, Московская обл., 142715, Россия

Представлены результаты исследования прецизионной резки щелевых отверстий в листах низкоуглеродистой стали толщиной до 10 мм одномодовым излучением волоконного лазера мощностью 1 кВт. При использовании одномодового импульсно-периодического излучения и кислорода получено от 30 до 70 калибров щелей при их ширине до ≈ 60 мкм. Измерены скорость резки (50...100 мм/мин), шероховатость, твердость поверхности реза и определена фазовая структура стали. Вычислены эффективность прецизионной резки ($\approx 3\%$) и эффективность транспортировки излучения (25%) в «волноводном» режиме. Предложена качественная модель лазерно-кислородной резки при глубоком канализировании.

Ключевые слова: лазерная резка, волоконный лазер, прецизионная резка, низкоуглеродистая сталь, эксперимент, скорость резки, ширина щели, число калибров, поверхность реза, шероховатость, твердость, фазовая структура.

Введение. В ряде областей металлообработки (таких как автомобильная, авиационная, химическая, энергетическая, электротехническая и атомная промышленность) имеется необходимость в прецизионном и качественном (масштаб шероховатости, степень закалки поверхности, отсутствие грата и др.) вырезании щелевых отверстий шириной не более 150 мкм произвольной формы при числе калибров $K \geq 30$ в толстых (до 20 мм) металлических листах. Например, для нефтегазового комплекса требуются скважинные трубчатые (диаметром 150 мм) фильтры с числом щелей до $\approx 10\,000$ размером $40 \times 0,3$ мм на длине до 15 м.

Эффективным и высокопроизводительным способом решения указанной задачи является использование лазерных технологий [1–7]. Однако стандартные технологические CO₂-лазеры не позволяют получать щелевые отверстия и радиусы закругления менее 250 мкм. Кроме того, число калибров $K = h/b$ обычно не превышает 20 (b — ширина щели, h — ее глубина, в данном случае равная толщине листа).

Технологические лазерные установки на основе маломодовых иттербиевых дисковых и волоконных лазеров (ВЛ) с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм и мощностью излучения до 5 кВт при КПД $\approx 30\%$, принципиально отличающиеся от CO₂-лазеров, позволяют вырезать в лазерно-газовом режиме щелевые отверстия шириной 150...200 мкм

в листах металлов [4, 7–10]. При этом типичное число калибров не превышает 30, излучение в щели распространяется с малыми потерями по законам геометрической оптики, а напора технологического газа достаточно для выноса расплавленного металла из зоны реза [7–9].

При более глубоком каналировании ($K \geq 30$) процесс резки усложняется за счет сильного ослабления излучения в «волноводном» режиме его распространения в щелевом отверстии [1–3] и недостаточного из-за больших гидравлических потерь давления технологического газа для удаления жидкого металла из зоны реза.

В связи с этим необходимо решить следующую задачу: экспериментально проверить возможность достижения $K > 30$ при лазерно-газовой резке с помощью мало- или одномодового излучения ВЛ, определить условия, при которых она реализуется, и построить физико-математическую модель процесса.

Такое исследование имеет большое научно-техническое значение: оно позволяет выяснить, как протекают связанные и взаимозависимые теплофизические, газодинамические, химические и оптические процессы, имеющие различные пространственные и временные масштабы и определяющие взаимодействие потока энергии большой плотности с металлом [2, 3, 5, 8]. Практическое значение заключается в том, что благодаря полученным результатам можно определить технологические возможности ВЛ, его экономические преимущества с учетом энергетических и эксплуатационных затрат, оптимальные области и перспективы применения в металлообработке [11].

Настоящая работа направлена на решение указанных задач и экспериментальное определение закономерностей и особенностей прецизионной резки щелевых отверстий большого калибра в стальных листах излучением одномодового ВЛ мощностью 1 кВт.

Экспериментальный стенд и условия проведения исследований. Для экспериментальных исследований процесса взаимодействия излучения одномодового ВЛ с металлами и получения малоразмерных щелевых отверстий в стальных заготовках или изделиях при большом числе калибров (от 30 и более) был разработан и изготовлен стенд (рис. 1). Основу стенда составляет отечественный одномодовый иттербиевый лазер (длина волны $\lambda = 1,07$ мкм) мощностью излучения 1 кВт с параметром $M^2 < 1,2$, способный работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с регулируемой скважностью.

Генерируемое в лазере излучение подводится по волоконному кабелю к неподвижной режущей головке фирмы Precitec, расположенной на кронштейне вертикально над подвижным рабочим (координатным) столом на аэродинамических опорах с полем резки 500×500 мм. В лазерной головке расположены коллиматор с фокусным расстоянием 60 мм, создающий излучение с апертурой пучка $D_a = 8$ мм, линза с фокусным

расстоянием $F = 200$ мм и сужающееся коническое сопло с выходным диаметром 1 мм для создания потока режущего (технологического) газа соосно лазерному лучу. Излучение направляется вдоль оси конического сопла перпендикулярно поверхности обрабатываемого изделия (по оси z).

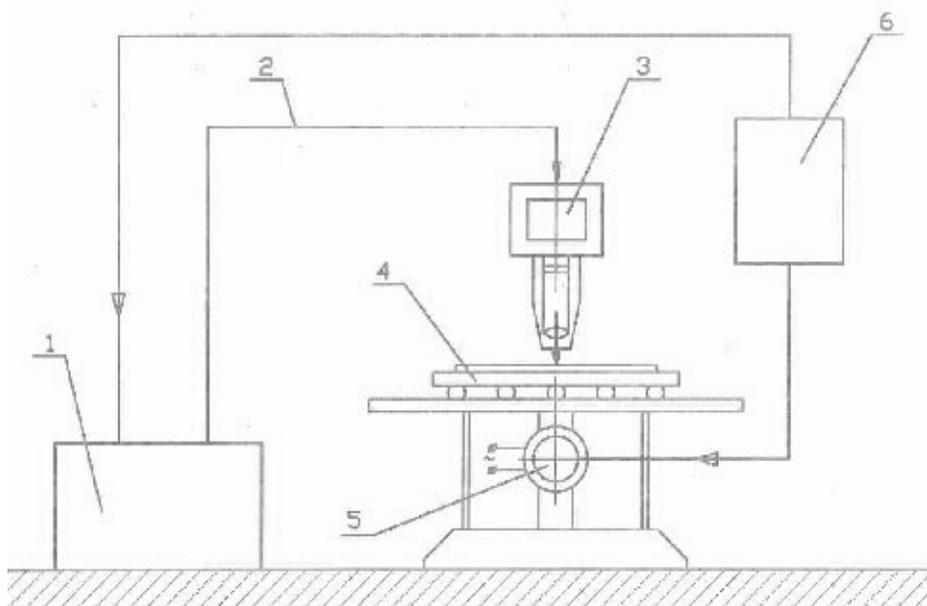


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — лазерный блок; 2 — оптоволоконный кабель; 3 — лазерная режущая головка с устройствами подачи технологического газа и перемещения по высоте; 4 — рабочий стол на аэродинамических опорах; 5 — привод перемещения стола; 6 — блок программного управления

Положение фокусного пятна, диаметр которого составляет $d_f \approx 25$ мкм, может варьироваться от +5 до -5 мм относительно поверхности образца. Установка положения и перемещение рабочего стола, управляемого ЭВМ, осуществляются с помощью электропривода с точностью до ± 5 мкм (при повторном позиционировании ± 3 мкм).

В экспериментах по изучению процесса лазерно-газовой резки в условиях глубокого каналирования при высоком качестве поверхности реза варьировались следующие параметры:

- мощность лазерного излучения в импульсе, частота и скважность импульсов;
- толщина листовых образцов стали (от 1,5 до 12 мм);
- род режущего газа (кислород, воздух, азот);
- давление режущего газа (от 0,2 до 1,5 МПа);
- положение фокусного пятна относительно поверхности образца (от 0 до -4 мм).

**Основные параметры оптимальной резки оптоволоконным лазером листов низкоуглеродистой стали (Ст3)
(режущий газ — кислород)**

Толщина листа h , мм	Мощность излучения в импульсе, Вт	Частота импульсов, Гц	Скважность импульсов	Давление газа, атм	Положение фокуса, мм	Скорость резки, мм/мин	Ширина реза на входной (b_1) / выходной (b_2) поверхности, мкм	Число калибров щели K
1,5	200	150...250	3	4...8	0	100	80/70	20
2,0	300	250	3	4...8	0	70	100/60	25
3,0	400	110	3	4...8	0	70	130/110	25
5,0	900	120	3	4	-2	60	140/120	39
6,0	900	120	3...4	3...4,5	0...-1	60	145/120	45
8,0	930	125...150	2,5...3	2,5	-1	50	150/130	57
10,0	950	120	2	5...6,5	-1...-2	20	200/170	57
Коррозионно-стойкая сталь 4,0	910	245	6	3,5	0	30	80/60	57

Расстояние от края лазерной головки до поверхности листа составляло 0,5...0,7 мм.

Экспериментальное исследование прецизионной лазерно-газовой резки. В экспериментах исследовалась резка щелевых отверстий произвольной формы в стальных (Ст3) листах толщиной от 1,5 до 12 мм, а также в листах коррозионно-стойкой стали толщиной 4 мм с целью получения минимальной ширины реза при высоком качестве его поверхности. В результате были получены воспроизводимые экспериментальные данные по оптимальной резке ВЛ малоразмерных щелевых отверстий с числом калибров до $K = 60$, которые в обобщенном виде представлены в табл. 1. В отдельных экспериментах число калибров достигало 80, а погрешность воспроизводимой вырезки отверстий сложной формы с характерным диаметром ≈ 1 мм составляла $\pm 5\%$.

Установлено, что:

- прецизионная резка малоразмерных (~ 100 мкм) щелевых отверстий произвольной формы при числе калибров $K \geq 30$ реализуется только при использовании одномодового излучения ВЛ;

- использование маломодового излучения не позволяет реализовать прецизионную резку;

- прецизионная резка реализуется только при использовании кислорода в качестве режущего газа, т. е. она имеет четко выраженный лазерно-термохимический характер;

- для каждой толщины листа существует оптимальная совокупность определяющих параметров, обеспечивающих предельно большое число калибров, минимальную ширину щели и максимальную скорость резки;

- прецизионная резка реализуется только при импульсно-периодическом режиме работы ВЛ с оптимальными скважностью 2...4 и частотой от 250 Гц ($h = 1,5$ мм) до 120 Гц ($h = 10$ мм), т. е. длительность воздействия излучения на металл составляет $\tau_{и} = 2...3$ мс, а оптимальная мощность излучения в импульсе возрастает с увеличением толщины;

- скорость резки при большом числе калибров ($K \geq 30$) оказывается небольшой по сравнению с мощными CO₂-лазерами, сильно зависит от толщины листа и изменяется от 100 мм/мин ($h = 1,5$ мм, $K = 20$) до 50 мм/мин ($h = 8$ мм, $K = 60$);

- при увеличении средней мощности излучения за счет уменьшения скважности от оптимальной и при переходе к стационарному режиму увеличивается скорость резки, но при этом сильно возрастает ширина щели, приближаясь к значению, характерному для стандартных технологических CO₂-лазеров (~ 300 мкм);

- рез имеет клиновидную форму с относительным схождением $\alpha = (b_2 - b_1)/(2h)$ по направлению луча, которое с ростом толщины листа уменьшается от -10^{-2} до -10^{-3} ;

- допустимое давление кислорода ограничено снизу значением 0,25 МПа;
- поверхность реза имеет анизотропную шероховатость в виде бороздок, вытянутых по толщине листа вдоль луча (рис. 2);
- цвет поверхности реза имеет две отличающиеся по толщине области: сверху — темно-серый на глубину 20...30 % от толщины листа, внизу — золотистый (см. рис. 2);
- в щелевом отверстии остаются шлаковые агломераты серого цвета в виде кусков неправильной формы с характерным размером $\approx b$.

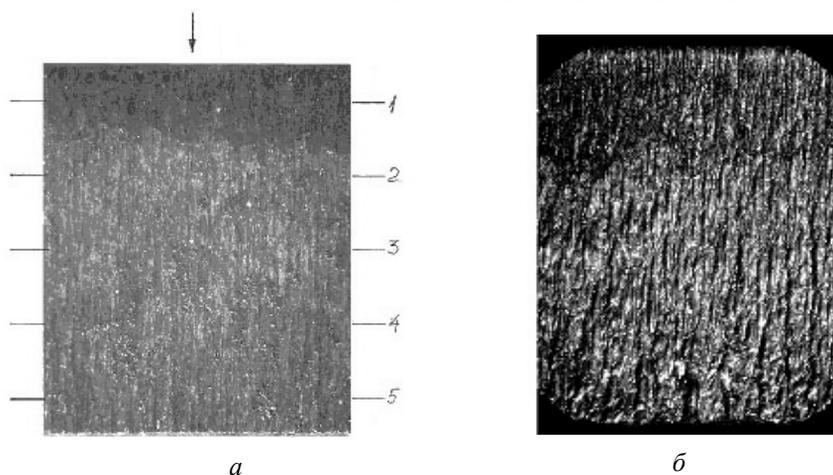


Рис. 2. Общий вид и расположение трасс 1–5 измерения параметров шероховатости поверхности грани 4 образца стали Ст3 толщиной 8 мм (а) и фрагмент поверхности реза при увеличении в 25 раз (б)

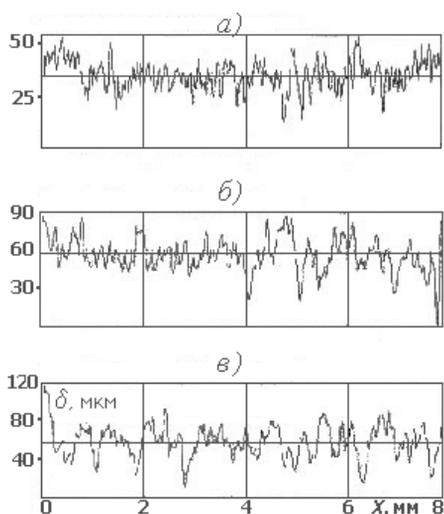


Рис. 3. Распределение выступов шероховатости поверхности лазерной резки для грани 4:
а — трасса 1; б — трасса 3; в — трасса 5

Для определения шероховатости поверхности реза и неоднородности (волнистости) профиля использовались образцы резки листа низкоуглеродистой стали (Ст3) толщиной 8 мм, в основном в виде квадрата со стороной 8 мм. Параметры анизотропной шероховатости поверхности измерялись с помощью профилометра «Профи-130» на базе длиной 8 мм по пяти трассам, показанным на рис. 2, а, т. е. вдоль направления резки и поперек распространения излучения.

На рис. 3 показаны формы профилей поверхности лазерной резки по трассам измерений 1, 3 и 5 для грани 4, которые дают пред-

ставление о размерах и распределении выступов и впадин, т. е. о масштабе шероховатости поверхности. Формы профилей для остальных трасс и граней аналогичны.

В табл. 2 приведены средние значения класса шероховатости (чистоты) поверхности, среднее арифметическое отклонение профиля, средний шаг и средняя высота неровности профиля для всех пяти исследованных трасс.

Таблица 2

Значения основных параметров шероховатости поверхности реза для грани 4

Номер трассы	Класс шероховатости поверхности по ГОСТу	Среднее арифметическое отклонение профиля, $\langle R_a \rangle$, мкм	Средняя высота неровности, $\langle R_z \rangle$, мкм	Средний шаг неровности (волнистости) профиля, $\langle S_m \rangle$, мкм
1	4	5,42	39,0	147
2	3	6,99	55,2	164
3	3	9,75	69,2	229
4	3	10,2	60,3	264
5	3	12,7	74,0	225
Среднее значение	3	9 ± 2	60 ± 10	210 ± 40

Характерно, что для верхней области реза длиной $h_1 \approx 0,2h$ по оси z , т. е. для зоны I (темно-серая область на рис. 2), отклонение профиля и высота неровности поверхности реза меньше в 1,5–2 раза, а класс шероховатости поверхности выше на единицу (трасса 1), чем в области «волноводного» распространения излучения (трассы 2–5).

В табл. 3 приведены средние (по пяти трассам) значения основных параметров шероховатости поверхности реза для каждой из четырех граней образца. Видно, что класс шероховатости составляет в среднем 3 по ГОСТ 25142–82, а характерная высота выступов шероховатости не превышает 10 мкм, что для ряда изделий может не потребовать дальнейшей обработки поверхности. При этом средний шаг неровности (волнистости) профиля составляет ≈ 200 мкм.

Таблица 3

Средние (по пяти трассам) значения основных параметров шероховатости поверхности реза для каждой из четырех граней образца

Номер грани образца	Класс шероховатости поверхности по ГОСТу	Среднее арифметическое отклонение профиля, $\langle R_a \rangle$, мкм	Средняя высота неровности, $\langle R_z \rangle$, мкм	Средний шаг неровности (волнистости) профиля, $\langle S_m \rangle$, мкм
1	3	8 ± 3	65 ± 11	200 ± 50
2	3	7 ± 1	50 ± 8	190 ± 40
3	3	10 ± 2	60 ± 10	240 ± 60
4	3	9 ± 2	60 ± 10	210 ± 40

Для сравнения качества поверхности реза была проведена резка аналогичного листа стали излучением CO₂-лазерного комплекса VySprint мощностью 3 кВт [4]. Измерения проводились по трем трассам образца, показанного на рис. 4. Поверхность реза имеет однородную светло-серую (серебристую) окраску, криволинейные бороздки в направлении сверху вниз и анизотропную шероховатость (см. рис. 4). Отклонение профиля, высота неровности и шаг неровности (волнистости) профиля поверхности реза увеличиваются вниз по толщине листа от значений $\langle R_a \rangle \approx 5$ мкм, $\langle R_z \rangle \approx 21,4$ мкм, $\langle S_m \rangle = 220$ мкм до значений $\langle R_a \rangle \approx 13,5$ мкм, $\langle R_z \rangle \approx 31,6$ мкм, $\langle S_m \rangle = 430$ мкм соответственно, т. е. в 1,5–2 раза, а класс шероховатости поверхности уменьшается от 4 до 3.

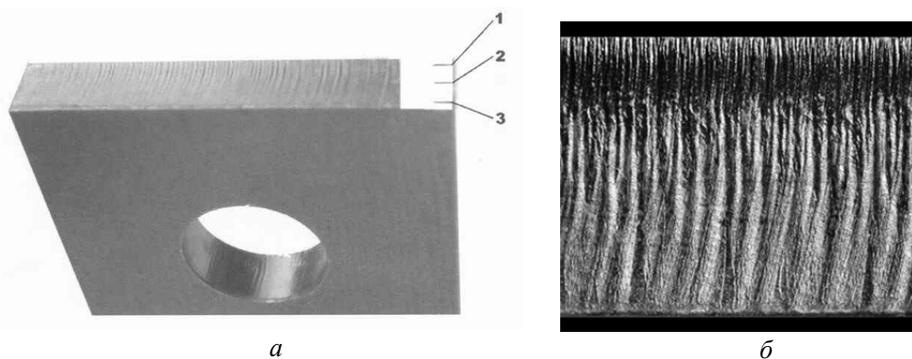


Рис. 4. Общий вид и расположение трасс 1–3 измерения параметров шероховатости поверхности реза листа низкоуглеродистой стали толщиной 8 мм излучением CO₂-лазера VySprint мощностью 3 кВт (а), фрагмент поверхности реза при увеличении в 16 раз (б)

Следовательно, прецизионная резка с помощью ВЛ обеспечивает шероховатость поверхности на один класс ниже и приблизительно в 2 раза меньший шаг неровности профиля.

Установленные отличия характера резки с помощью ВЛ позволяют предположить, что верхняя зона I поверхности реза h_1 образуется в основном под действием излучения с высокой плотностью мощности, распространяющегося по законам геометрической оптики. На это указывает и темный цвет поверхности реза (см. рис. 2).

Для того чтобы определить степень теплового воздействия (заковки поверхности и (или) самоотпуска) на материал в зоне реза, было измерено распределение твердости и определена фазовая структура стали на поверхностях листа, реза и шлифов на различной глубине от поверхности реза. Измерения проводились для образца, показанного на рис. 2, микротвердомером DuraScan 20, обеспечивающим инструментальную погрешность менее 1 %, а фотосъемка — оптическим микроскопом Olympus BX 51 в основном при увеличении в 500 раз.

На рис. 5 приведены результаты измерений твердости различных поверхностей образца, вырезанного из листа Ст3 толщиной 8 мм (см. рис. 2).

Среднее значение твердости необработанной поверхности листа составляет 190 кГ/мм^2 (линия 1 на рис. 5). Фазовая структура стали на поверхности листа является изотропной с равноосными зернами феррита с небольшим (до 20 %) количеством перлита по граням зерен (рис. 6, а). Среднее значение твердости металла, измеренное на поверхности шлифа, сделанного на глубине 1 мм параллельно поверхности листа, составляет 149 кГ/мм^2 (линия 4 на рис. 5).

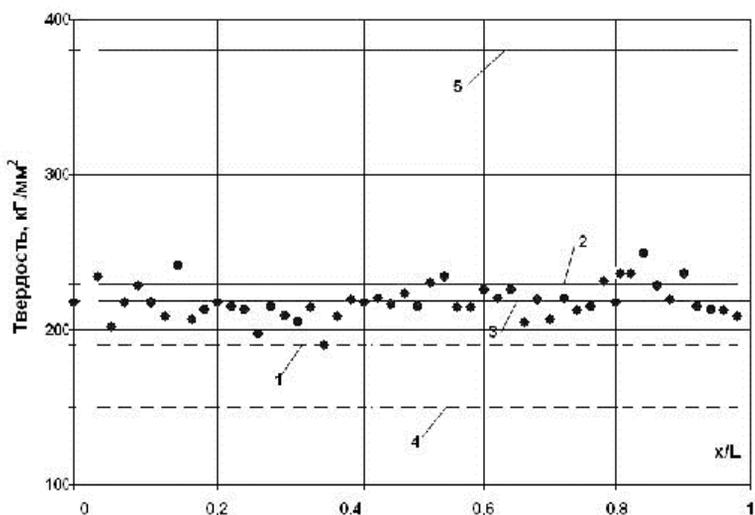
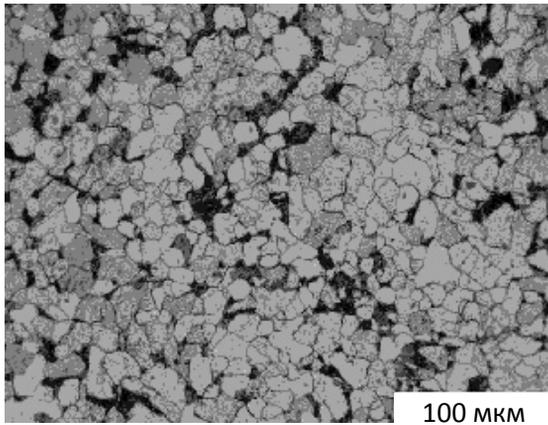


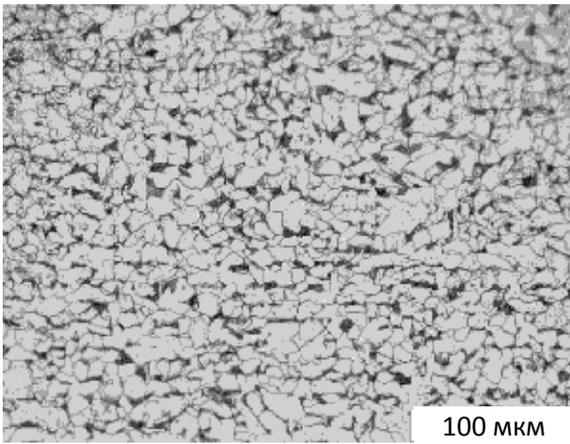
Рис. 5. Распределения твердости по направлению реза для различных поверхностей образца, приведенного на рис. 2:

1 — среднее значение твердости поверхности листа; 2 — среднее значение для поверхности реза; 3 — среднее значение твердости вдоль трассы 3 (точками отмечены локальные значения твердости); 4 — среднее значение твердости поверхности шлифа на глубине 1 мм от поверхности реза; 5 — среднее значение для нижней трассы 3 на поверхности реза при резке CO_2 -лазером ($1 \text{ кГ/мм}^2 = 1 \text{ НВ} = 9,81 \text{ МПа}$)

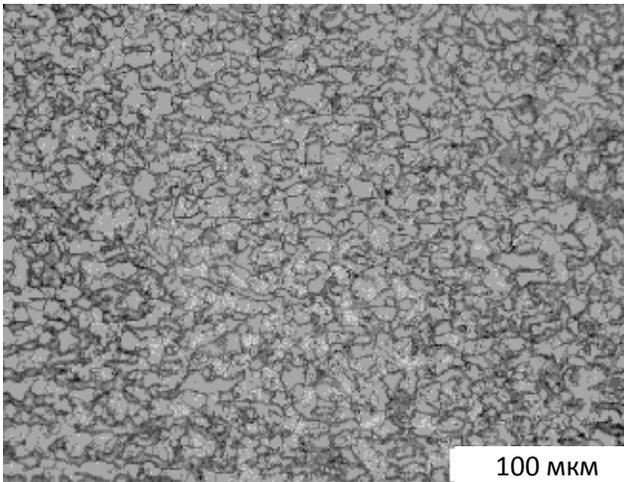
Твердость поверхности реза измерялась в 50 точках на каждой из трасс 1, 3 и 5 (см. рис. 2, а) в направлении резки. Среднее значение твердости поверхности реза составило 229 кГ/мм^2 при высокой однородности $\pm 10 \%$ (линия 2 на рис. 5). Там же (линия 3) приведены измеренные значения твердости для трассы 3 (50 точек по направлению 3 на рис. 2, а), среднее значение которой составляет $(218 \pm 26) \text{ кГ/мм}^2$. При этом фазовая структура поверхностного слоя стали изменилась незначительно — появились зерна феррита размерами от 5 до 30 мкм (рис. 6, б).



a



б



в

Рис. 6. Фазовая структура стали на поверхности листа (*a*) и на поверхностях реза при резке с помощью ВЛ (*б*) и CO₂-лазера (*в*)

Путем последовательного срезания слоев металла параллельно поверхности реза и измерения твердости поверхности шлифов по трем трассам установлено, что на глубине 1 мм твердость стабилизируется на уровне (152 ± 14) кГ/мм² (линия 4 на рис. 5), а фазовая структура близка к структуре стали на поверхности листа (см. рис. 6, а). Это состояние металла, согласующееся по твердости и структуре с металлом на глубине 1 мм, следует принять за невозмущенное ядро, твердость которого в 1,25 раза меньше, чем на поверхности листа.

Следовательно, резка ВЛ, характеризуемая числом Пекле $Pe = v_p b / \langle \chi_c \rangle \sim 0,01$ (где $\langle \chi_c \rangle$ — средняя температуропроводность стали), приводит к тепловому воздействию на глубину ≈ 1 мм, которая согласуется с оценкой длины распространения тепловой волны $\sqrt{4\chi_c b / v_p} \approx 1$ мм при экспериментальных значениях скорости резки $v_p \approx 1$ мм/с и ширины щели $b \approx 100$ мкм, а также к небольшому повышению твердости (закалке) поверхности реза в 1,2 раза относительно поверхности листа и в 1,5 раза относительно твердости стали в ядре. Это обусловлено тем, что в «волноводном» режиме транспортировки излучения поверхность реза по всей глубине щели находится под импульсно-периодическим воздействием лазерного излучения в течение длительного времени (из-за малой скорости резки).

За время $\tau_p = \Delta x / v_p \approx 200$ мс, затрачиваемое на прорезку металла на всю его толщину h и определяемого из эксперимента по скорости резки v_p , тепловая волна распространится вглубь металла на характерное расстояние $\approx 2,5$ мм, которое приблизительно в 6 раз больше, чем при высокоскоростной резке стали излучением СО₂-лазера. В результате нагрев и охлаждение поверхностных слоев стали происходят относительно медленно, что приводит к малой степени их упрочнения (закалки).

Безразмерная мощность $Be_1 = \langle P_n \rangle / (h \lambda_c T_c')$ и число Пекле $Pe = v_p b / \langle \chi_c \rangle$ имеют значения $\approx 0,5$ и $\approx 0,01$ соответственно, что намного меньше получаемых при резке СО₂-лазерами (1,6 и 0,6) [5, 6].

Аналогичное исследование образца размером $20 \times 8 \times 10$ мм, полученного при резке с помощью СО₂-лазера (см. рис. 4), показало, что твердость поверхности реза сильно увеличивается по направлению распространения излучения (сверху вниз) — от среднего значения 170 кГ/мм² для верхней трассы 1 (1 мм от поверхности листа) до 379 кГ/мм² (линия 5 на рис. 5) для нижней трассы 3 (1 мм от нижней поверхности листа). При этом структура стали преобразуется из изотропной мелкозернистой «феррит (50 %) — перлитной» (рис. 6, а) в «перлит (90 %) — ферритную» (рис. 6, в).

Измерение твердости поверхности шлифов, полученных путем последовательного удаления слоев металла, показало, что уже на рас-

стоянии 0,5 мм от поверхности реза твердость приближается к своему значению 140 кГ/мм^2 в ядре образца, которое меньше на 30 % твердости на поверхности листа. При этом структура стали в ядре является изотропной мелкозернистой «феррит (50 %) — перлитной». Следовательно, при резке CO_2 -лазером глубина теплового воздействия составляет $\approx 0,5 \text{ мм}$, что согласуется с длиной распространения тепловой волны $\sqrt{4\chi_c b/v_p} \approx 0,4 \text{ мм}$ ($v_p \approx 50 \text{ мм/с}$, $b \approx 300 \text{ мкм}$, $\text{Pe} \approx 1,5$).

Для дальнейших оценок примем экспериментальные значения для частоты следования импульсов $\nu_{и} \approx 120 \text{ Гц}$, для скважности ≈ 3 и скорости резки $v_p \approx 0,9 \text{ мм/с}$. Размер (шаг) «ступеньки» Δx в направлении реза (по оси x) близок к масштабу неоднородности профиля (волнистости) шероховатости и, по экспериментальным данным, $\Delta x \sim b$. Тогда количество циклов для прорезания металла на толщину $h_2 = h - h_1$ составит $N_{ц} = \Delta x \nu_{и} / v_p \approx 30$, а длительность одного цикла $\tau_1 \approx 1/\nu_{и} \approx 8,3 \text{ мс}$, время импульса излучения в одном цикле $\tau_{и} \approx 2,8 \text{ мс}$, время между импульсами (пауза) 5,5 мс. Толщина вырезаемого (удаляемого) со «ступеньки» металла за один цикл $\Delta z_1 \approx h_2 / N_{ц} \approx 200 \text{ мкм}$.

Полезная удельная мощность входного лазерного излучения, т. е. мощность, отнесенная к объемному расходу удаленного (вырезанного) металла, $w_{л} = \langle P_{л} \rangle / (hbv_p) \approx 7 \cdot 10^{11} \text{ Дж/м}^3$ и оказывается с точностью до 20 % близкой к постоянному значению для всех исследованных толщин листовых образцов низкоуглеродистой стали. Это позволяет применять полученное соотношение для оценки оптимальных скоростей резки листов низкоуглеродистых сталей при использовании одномодовых ВЛ повышенных мощностей.

Анализ результатов экспериментального исследования и модель прецизионной резки. При изучении поверхностей реза установлено, что существуют не только характерные области по глубине щели, но и характерные масштабы шероховатости и среднего шага неровности профиля (волнистости) поверхности реза в направлении вектора скорости резки (по оси x), который имеет порядок ширины реза: $\Delta x \approx b$. Это позволяет предположить, что расплавление слоя металла и его удаление происходят с образованием «ступеньки» (уступа, или полки), движущейся в направлении луча по оси z сверху вниз последовательными циклами, или этапами. До глубины $h_1 = d_{\phi}^2 / \lambda \approx 1 \text{ мм}$ (d_{ϕ} — диаметр фокусного пятна) излучение распространяется в щели по закону геометрической оптики, а ниже — в «волноводном» режиме с многократными отражениями от трех стенок [1–3].

Предполагая, что перед удалением пленки жидкого металла его средняя температура $\langle T_f \rangle$ достигает значения $\langle T_f \rangle = (T_c'' - T_c') / 2 = 2450 \text{ К}$ (где $T_c'' = 1850 \text{ К}$, $T_c' = 3100 \text{ К}$ — температура плавления и

кипения стали соответственно), из баланса энергии лазерного излучения получаем, что мощность, затрачиваемая собственно на резку со скоростью v_p щели размером $b \times h$ и включающая нагрев металла до T'_c , теплоту плавления Λ' и нагрев наружного слоя жидкого металла до температуры, близкой к T'' , составляет $\sim 8,1$ Вт:

$$Q_p = S_m h b v_p \approx 8,1 \text{ Вт},$$

где $h = 8$ мм, скорость резки $v_p \sim 1$ мм/с, а объемная плотность энергии, затрачиваемой на нагрев стали от начальной температуры T_0 до $\langle T_f \rangle$ и ее плавление, $S_m = \rho_c [c_c (T'_c - T_0) + \Lambda'_c] + \rho_{ж} c_{ж} (\langle T_f \rangle - T'_c) \approx 12,2 \cdot 10^9$ Дж/м³. Для оценочных расчетов принимались следующие характеристики стали: $\rho_c = 7,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{ж} = 7,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_c = 700$ Дж/(кг·К), $c_{ж} = 840$ Дж/(кг·К), $\lambda_c = 45$ Вт/(м·К), $\langle \chi_c \rangle = 0,9 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\chi_{ж} = 0,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\Lambda'_c = 0,84 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\Lambda''_c = 6,1 \cdot 10^6$ Дж/кг — теплота плавления и испарения стали соответственно.

Средняя по времени мощность подводимого к поверхности листа лазерного излучения $\langle P_{л} \rangle$ составляет 310 Вт при мощности излучения в импульсе $P_{л} = 930$ Вт. Следовательно, по экспериментальным данным при глубоком канальировании эффективность (КПД) прецизионной резки с помощью ВЛ, определяемая как $\eta_e = Q_p / \langle P_{л} \rangle$ или $\eta_e = S_m / w_{л}$, составляет 2,6 %. Эта эффективность определяется эффективностью транспортировки (доставки) одномодового излучения в «волноводном» режиме η_d , коэффициентом его поглощения поверхностью металла $\eta_{п}$, значение которого для длины волны ~ 1 мкм известно и составляет 30–40 % [12], и долей тепловых потерь ε от поглощенной энергии излучения в зоне реза. Тепловые потери обусловлены в основном теплопроводностью по четырем направлениям на характерное расстояние $\sqrt{4 \langle \chi_c \rangle \tau_{и}} \approx 350$ мкм. Оценки показывают, что в жидкой пленке металла перед ее удалением аккумулируется $4,8 \cdot 10^{-2}$ Дж, а тепловые потери составляют $11 \cdot 10^{-2}$ Дж, т. е. их доля $\varepsilon \approx 0,7$.

В этом случае эффективность доставки одномодового излучения

$$\eta_d \approx \frac{\eta_e}{\eta_{п}(1-\varepsilon)} \approx 0,25 \text{ при } \eta_{п} = 0,35.$$

После удаления жидкой пленки и выключения излучения происходит охлаждение нагретой области за время $\tau_2 = \tau_1 - \tau_{и} = 5,5$ мс до характерного размера ≈ 500 мкм. Установившаяся температура, оцененная по балансу энергии с учетом удаления жидкой пленки, составляет ≈ 400 К. Это значение является начальной температурой металла T_0 на «ступеньке» перед нагревом и входит в расчет величины S_m .

Экспериментальный факт отсутствия прецизионной резки при использовании маломодового излучения ВЛ обусловлен, по-видимому, значительно меньшей эффективностью транспортировки такого излучения к зоне реза.

Полученные результаты позволили разработать модель лазерно-газовой прецизионной резки при глубоком ($K \geq 30$) каналировании. Основные положения этой модели заключаются в следующем.

В верхней по лучу поверхности реза толщиной h_1 , протяженность которой составляет ~ 20 калибров щели, резка происходит стандартным образом, т. е. под влиянием в основном лазерного излучения большой плотности (до $\sim 10^6$ МВт/м²), распространяющегося по законам геометрической оптики. При этом динамического напора и избыточного статического давления технологического газа достаточно для сдува образовавшегося расплава металла на наклонном фронте резки [1, 2].

В основной части щели статическое давление в затопленной пристенной струе близко к атмосферному (изобарическая струя) уже при $K > 30$. Большие гидравлические потери напора, пропорциональные h/b , и расширение струи по закону, близкому к $1/z$, приводят с учетом нагрева газа к сильному (в 4-5 раз) уменьшению входной дозвуковой скорости газа (не более 50 м/с). Следовательно, динамического давления потока (не более 10^3 Па) недостаточно для сдува образовавшегося расплава металла с поверхности «ступеньки» [14, 15].

Таким образом, при глубоком каналировании резка реализуется только при импульсно-периодическом режиме излучения, а образование пленки жидкого металла толщиной z_1 на поверхности «ступеньки» размером $\Delta x b$ и ее удаление (сдув) происходят последовательно и прерывисто с определенной задержкой.

В «волноводной» зоне плотность излучения, поглощаемая верхним слоем металла «ступеньки», $I_w = P_{л\eta_d\eta_{п}}(1 - \epsilon)/(\Delta x b) \approx 1,2 \cdot 10^3$ МВт/м². Такой плотности лазерного излучения недостаточно для возникновения развитого (взрывного) испарения металла, но достаточно для его интенсивного нагрева [1, 16].

Оценка плотности теплового потока в стенку, обусловленного гетерогенными экзотермическими реакциями окисления железа (тепловой эффект реакции $\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{FeO}$ составляет 4,8 МДж/кг) и при-
месей, даже при полном использовании потока кислорода в щели составляет $\sim 10^2$ МВт/м², что более чем на порядок меньше плотности поглощаемого лазерного излучения ($3 \cdot 10^3$ МВт/м²) [13].

Характерное время нагрева и плавления стали $\tau_n = 4\langle\chi\rangle(S_M/I_w)^2$ (где $\langle\chi\rangle = 0,65 \cdot 10^{-5}$ м²/с) на «ступеньке» толщиной Δz_1 от температуры T_0 до температуры ее поверхности T^* , близкой к температуре

кипения T'' , но меньше ее, т. е. $T^* < T''$, оценивается с помощью баланса энергии $S_m \sqrt{4 \langle \chi_m \rangle} \tau_n = I_w \tau_n$ и составляет $\approx 2,6$ мс, что близко к экспериментальному значению времени импульса излучения τ_n .

После нагрева приповерхностного слоя жидкой пленки до температуры T^* начинает происходить объемное вскипание примесей (Cr, Cu, Ni, Si, S, As), у которых температура кипения ниже, чем у железа, и, возможно, выделение растворенных газов [16]. Этому процессу, вероятно, способствуют локальные неоднородности лазерного излучения на поверхности. Возникающий поток паров выбрасывает навстречу потоку кислорода жидкие частицы (капли) расплава с доминирующим содержанием железа, распределение которых по размерам является бимодальным по экспериментальным данным [16]. Средний диаметр частиц мелких фракций d_{s1} составляет 60 нм при их концентрации $N_{s1} \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$, а средний диаметр крупных частиц $d_{s2} = 10 \text{ мкм}$.

Поглощая падающее на них излучение, в том числе отраженное от жидкой пленки, малоразмерные жидкие частицы испаряются за время $\tau_{s1} \sim \rho_{ж} \Lambda_{ж}'' d_{s1} / (3\eta_{п} I_{л}) \approx 0,2 \text{ мкс}$ ($\eta_{п} \approx 0,35$); пары имеют температуру, близкую к температуре кипения 3 100 К, и концентрацию $n_{Fe} \approx 9 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

В результате над жидкой пленкой образуется слой парогазовой двухфазной смеси, состоящей из газовой смеси кислорода с концентрацией $n_{O_2} \approx 7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и паров железа, которые перемешиваются и выравнивают концентрацию и температуру за время $\tau_{см} \sim (l_s)^2 / \chi_{п} \approx 10 \text{ нс}$ ($l_s \sim 1 / (N_{s1})^{1/3} \approx 1 \text{ мкм}$), и крупных частиц железа (время их испарения составляет $\approx 50 \text{ мкс}$). Эта смесь после быстрого смешения, близкого к изохорическому, приобретает температуру $\approx 1 \text{ 900 К}$ и давление $\approx 0,4 \text{ МПа}$, так как за время пребывания кислорода над жидкой пленкой $\tau_{п} \sim 10^{-5} \text{ с}$ происходит его нагрев до температуры $\approx 1 \text{ 000 К}$ на толщину $\sqrt{4 \langle \chi_{O_2} \rangle} \tau_{п} \approx 100 \text{ мкм}$, а пары железа имеют температуру $\approx 3 \text{ 100 К}$.

В «горячей» газофазной смеси горючего и окислителя возникают экзотермические химические реакции окисления железа $\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow \text{FeO}$ и примесей. Характерное время этих реакций $\tau_{хим} \approx (5 \dots 20) \cdot 10^{-8} \text{ с}$, что меньше гидродинамического времени $\tau_{Гд} = \Delta x / c_s \approx 0,3 \text{ мкс}$ (c_s — скорость звука) [14, 15].

Состав продуктов реакции и температура были рассчитаны в приближении термодинамического равновесия при указанных концентрациях железа и кислорода и давлении 0,4 МПа по программе

работы [18]. Равновесный состав продуктов реакции, которые имеют температуру 3 480 К, включает конденсированную (массовая доля $\approx 60\%$) и газовую ($\approx 4\%$) фазы FeO, конденсированную фазу Fe₃O₄ (6%), пары примесей C, Cr, Ni, Cu, Mn, Si и (или) пары их окислов видов M_iO и M_iO₂ в мольных долях от 0,1 до 0,5%.

Так как процесс носит нестационарный характер, то в поле мощного излучения конденсированные фазы FeO и Fe₃O₄ не могут сформироваться, хотя температура их кипения $\approx 3\,700$ К. Их существование в паровой фазе приведет к увеличению давления продуктов реакции до 0,74 МПа. Однако появление молекул FeO в газовой фазе, колебательные и нижние электронные уровни которых сильно возбуждены, а линии поглощения сильно уширены, вызовет интенсивное поглощение излучения с длиной волны 1,07 мкм. При быстром тушении возбужденных уровней молекул FeO возрастут температура парогазовой смеси, по-видимому, до $\approx 4\,900$ К, которая ограничена диссоциацией молекул FeO (энергия диссоциации молекулы FeO ≈ 49 кК), и давление до 1,1 МПа [19]. Отметим, что приведенных параметров плазмы (концентрация электронов $\sim 10^{22}$ м⁻³) и плотности излучения $\sim 10^{10}$ Вт/м² недостаточно для оптического пробоя в течение времени, меньшего $\tau_{\text{гд}}$.

Скачок давления до ~ 1 МПа в «горячей» пробке размером $\Delta x b \Delta z_{\text{T}}$ ($\Delta z_{\text{T}} \sim b$) приведет к возникновению ударной волны (волны сжатия) с числом Маха ≈ 2 и спутного потока смеси за ней со скоростью ≈ 700 м/с навстречу потоку кислорода и излучению, которые были оценены с помощью соотношений для ударной трубы итерационным методом [14, 15].

Размер «горячей» пробки, давление и температура в ней изменяются и существуют в течение времени $\tau_{\text{д}}$, оно только в несколько раз больше гидродинамического времени $\tau_{\text{гд}}$. Распространение ударной волны в плоскости zx (при удалении от поверхности волну можно рассматривать как цилиндрическую) приводит к ее затуханию и уменьшению скорости спутного потока. В приближении постоянного расхода скорость газа уменьшается как $\left[\frac{\pi}{2}zb\right]^{-1}$. Высота и время

подъема газа определяются равенством динамических давлений продуктов реакции и кислорода и составляют ~ 1 мм и ~ 20 мкс соответственно.

Давление парогазовой смеси $\langle p_{\text{п}} \rangle$ в «горячей» пробке над жидкой пленкой создает импульс силы $\langle F_f \tau_{\text{д}} \rangle$, приложенной к жидкой пленке объемом $V_f = \Delta x \Delta z_f b$ и массой $m_f = \rho_f V_f$. Этот импульс силы выталкивает пленку в основном в открытую сторону щели (вдоль оси x). Движение жидкой пленки оценивается с помощью уравнения импульсов

$$m_f \frac{du_f}{dt} = F_f.$$

Ее характерная скорость $\langle u_f \rangle = \frac{\langle p_n \rangle \tau_d}{\rho_f \Delta z_f} \approx 0,3$ м/с ($\langle p_n \rangle \approx 0,5$ МПа,

$\tau_d \sim 1$ мкс). При этих значениях время удаления (сброса) пленки

$$\tau_f \sim \frac{\Delta x}{2 \langle u_f \rangle} \approx 0,3 \text{ мс, т. е. } \tau_f \ll \tau_n.$$

Экспериментально установлено, что в этот момент, т. е. после $\tau_n = 2,8$ мс (по расчету — после 2,6 мс) от начала облучения, следует выключить лазерное излучение на время $\sim 5,5$ мс, необходимое для восстановления начального состояния среды над поверхностью металла. В противном случае, по-видимому, начнется испарение крупных капель и интенсивное поглощение излучения, что приведет к прекращению прецизионной резки. Таким образом, для восстановления условий, необходимых для прецизионной резки, следует удалить оставшиеся крупные частицы из зоны реза.

Движение сферических частиц диаметром $d_{s2} = 10$ мкм со скоростью u_s оценивались с помощью уравнения импульсов

$$m_s \frac{du_s}{dt} = F_s,$$

где m_s — масса частицы; $F_s = 3\pi C_0 \eta d_{s2} \Delta u_s$ — сила трения

($C_0 = \frac{21,1}{Re_s} + \frac{6,3}{\sqrt{Re_s}} + 0,25 > 1$ — коэффициент сопротивления; $Re_s =$

$= \rho \Delta u_s d_{s2} / \eta$; η — вязкость газа; $\Delta u_s = (V - u_s)$ — относительная скорость частиц, причем знак u_s может совпадать или быть противоположным скорости V газовой фазы). Время релаксации скоростной

неравновесности $\tau_p = \frac{\rho_s d_{s2}^2}{18\eta C_0}$. При рассматриваемых скоростях жид-

кие частицы не дробятся, так как критерий Вебера $We = \rho (\Delta u_s)^2 d_{s2} / \sigma_{ж} \ll 1$ и не превышает своего критического значения $We_{кр} = 17$ при $\Delta u_s \leq 100$ м/с ($\sigma_{ж} \approx 1,7$ Дж/м² — поверхностное натяжение железа).

Решая уравнение импульсов с соответствующими начальными и граничными условиями при известной скорости восходящего потока парогазовой смеси, существующего в течение ≈ 20 мкс, получаем скорость частиц ≈ 10 м/с и высоту их подъема $\sim 0,1$ мм.

Нестационарное смешение встречных потоков кислорода и двухфазных продуктов реакций с различающимися температурами и плотностями в канале с развитой шероховатостью ($2k_s/b \sim 0,1$) на высоте

~3 мм приведет в результате развития гидродинамической неустойчивости (за время $\sim 10^{-5}$ с) к образованию крупномасштабной (~0,1 мм) вихревой структуры потока смеси, по-видимому, с малой (~1 м/с) скоростью направленного течения к поверхности «ступеньки».

После исчезновения спутного потока подъем частиц вверх происходит по инерции в течение $\approx 0,5$ мс до их остановки на высоте ≈ 3 мм. Далее вихревой поток газовой фазы, в основном кислорода, выносит частицы до поверхности «ступеньки» и в открытую сторону щели за время, которое оценивается также с помощью уравнения импульсов и составляет ≈ 4 мс.

Таким образом, только при уровне направленной скорости выноса продуктов взаимодействия излучения и кислорода с металлом ~1 м/с расчетное время (4,5 мс) согласуется с экспериментальным значением необходимой паузы излучения.

Заключение. В данном исследовании получены новые научно-технические результаты, которые заключаются в следующем.

Использование одномодового излучения ВЛ мощностью до 1 кВт и кислорода в качестве режущего газа позволило реализовать процесс глубокого ($K \geq 30$) каналирования и получить щелевые отверстия произвольной формы шириной до ≈ 60 мкм при числе калибров 30–70 в листах низкоуглеродистой стали. Прецизионная резка низкоуглеродистой стали при глубоком ($K \geq 30$) каналировании реализуется только при использовании кислорода в качестве режущего газа, т. е. имеет четко выраженный лазерно-термохимический характер. Влияние кислорода принципиально различается при прецизионной резке волоконным лазером и CO₂-лазером. Кроме того, его влияние различно в разных областях реза по толщине листа. Прецизионная резка при глубоком каналировании реализуется только при импульсно-периодическом режиме работы ВЛ с оптимальными скважностью и частотой. Класс шероховатости поверхности резки с помощью одномодового ВЛ малоразмерных щелевых отверстий при глубоком каналировании составляет в среднем 3. Прецизионная резка с помощью ВЛ приводит в описанных условиях к незначительному повышению твердости поверхности реза (не более 20 % относительно твердости необработанной поверхности и не более 50 % относительно ее значения внутри листа) и, следовательно, к малому изменению свойств стали.

Эффективность прецизионной резки одномодовым излучением при большом числе калибров щели составляет не более 3 %, а эффективность транспортировки (доставки) излучения в «волноводном» режиме не превышает 25 % при коэффициенте поглощения металлом 0,35. Полезный удельный энергозатрат при резке одномодовым излучением ВЛ составляет с точностью до 20 % $w_{\text{л}} = N_{\text{л}} / (hbv_{\text{р}}) \approx 2 \cdot 10^{12}$ Дж/м³ для любой толщины листовых образцов низкоуглеродистой стали.

Предложенная модель лазерно-газовой (кислородной) резки объясняет циклический и прерывистый характер резки при самосогласованном импульсно-периодическом режиме работы лазера с оптимальной скважностью и необходимость использования кислорода в качестве режущего газа.

Авторы благодарят В.М. Плотникова, Г.Г. Гладуша, Ю.С. Комиссарчука и Р.А. Чекрыжёва за полезные обсуждения, ценные замечания и помощь в работе, а Л.А. Королеву, Л.Ф. Соловьеву и А.В. Жукова — за проведение расчетов и обработку экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (госконтракт № 8372р/13353 от 14.09.2010 г.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gladush G.G., Smurov I. *Physics of Laser Materials Processing. Theory and Experiment*. Germany, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011, 534 p.
- [2] Панченко В.Я., ред. *Глубокое канализирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе. Сб. тр. Ин-та проблем лазерных и информационных технологий*. Москва, Интерконтакт «Наука», 2009, 266 с.
- [3] Григорьянц А.Г. *Основы лазерной обработки материалов*. Москва, Машиностроение, 1989, 304 с.
- [4] *Технологические лазерные комплексы на основе CO₂-лазеров и иттербиевых SLEB лазеров фирмы Trumpf*. URL: <http://www.ru.trumpf.com> (дата обращения 27.09.2012).
- [5] 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.
- [6] 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. 16–23.
- [7] Morgenthal L. *Cutting with Fiber Lasers. 1st Int. Fraunhofer Workshop on Fiber Lasers*. Dresden, 2005. URL: ftp://194.87.10.34/.../mor_scheiden_mit_faserlasern_02.pdf (дата обращения 3.10.2012).
- [8] Большой успех лазерной резки LIXE с волоконным лазером. *Металлообработка и станкостроение*, 2009, № 4, с. 26–27.
- [9] *Высокоэффективные волоконные лазеры и усилители компании НТО «ИРЭ-Полюс»*. URL: <http://www.ntoire-polus.ru> (дата обращения 27.09.2012).
- [10] *Технологические станки на основе волоконных лазеров китайской фирмы Wuhan Tiangi Laser Co*. URL: <http://www.tqlaser.com> (дата обращения 27.09.2012).
- [11] Витшас А.А., Панченко В.П., Плотников В.М., Самарцев И.Э., Сорока А.М., Чекрыжёв Р.А. *Устройство для лазерной резки малоразмерных отверстий произвольной формы в толстых листах высокоотражающих металлов*. Пат. № 98963 Российская Федерация, 2010. Кл. МПК-8: В 23 К 26/08.

- [12] Царькова О.Г. Оптические и теплофизические свойства металлов, керамики и алмазных пленок при высокотемпературном лазерном нагреве. *Тр. ИОФ РАН им. А.М. Прохорова*, 2004, т. 60, с. 30–82.
- [13] Леонтьев А.И., Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Шишов Е.В., Чукаев А.Г., Петражицкий Г.Б., Никитин В.М., Школа В.В., Миронов Б.В., Хвостов В.И. *Теория тепломассообмена*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 683 с.
- [14] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. Москва, Наука, 1976, 888 с.
- [15] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, ГИТТЛ, 1957, 784 с.
- [16] Гончаров В.К., Козадаев К.В., Попечиц В.И., Пузырев М.В. Исследование воздействия высокоэнергетического излучения на вещество с целью создания новых материалов и технологий. *Вестник БГУ. Сер. 1*, 2010, № 1, с. 1–10.
- [17] Смирнов В.Н. Взаимодействие атомов железа с молекулярным кислородом. *Тр. ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН*, Москва, 2009, с. 1–23. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2009-06-08-001.pdf> (дата обращения 26.07.2012).
- [18] Чернов Ю.Г., Сахаров Б.Б., Гуревич М.И., Веретенков В.Ю. *Пакет прикладных программ «Плазма»*. ИАЭ им. И.В. Курчатова. Препринт. Москва, 1981, № 3522, 50 с.
- [19] Шенявская А.Е., Гусаров А.В. *Оксид железа*. URL: <http://www.chem.msu.su/Zn/Fe/FeO.html> (дата обращения 10.12.2012).

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Панченко В.П., Сорока А.М., Витшас А.А., Зеленцов А.Г., Менахин В.П., Яксон А.В. Исследование прецизионной резки щелевых отверстий большого калибра в стальных листах излучением одномодового волоконного лазера. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1031.html>

Панченко Виктор Петрович — д-р физ.-мат. наук, профессор, начальник отдела ФГУП ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (ТРИНИТИ). e-mail: panchvictor@gmail.com

Сорока Аркадий Матвеевич — канд. физ.-мат. наук, заместитель директора ООО «Страж-Лазер». e-mail: ark.soroka@yandex.ru

Витшас Александр Анатольевич — генеральный директор ООО «Страж-Лазер». e-mail: boss@s-laser.ru

Зеленцов Александр Георгиевич — инженер ООО «Страж-Лазер». e-mail: zelentsov@s-laser.ru

Менахин Владимир Павлович — инженер ООО «Страж-Лазер». e-mail: menahin@s-laser.ru

Яксон Александр Георгиевич — инженер ООО «Страж-Лазер». e-mail: jackson@s-laser.ru