

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ТОЛСТЫХ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ

А.А. ГОЛЫШЕВ, аспирант, м.н.с.

*А.М. ОРИШИЧ, доктор физ.-мат. наук,
профессор, зав. лаб.*

*В.Б. ШУЛЯТЬЕВ, доктор техн. наук, с.н.с.
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 5 мая 2016

Рецензирование 5 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

Шулятьев В.Б – 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
e-mail: shulyat@rambler.ru

Сформулирован критерий и определена граничная толщина листа, при превышении которой целесообразно использовать кислородную резку с поддержкой лазерным лучом (кислородно-лазерная резка) вместо лазерной резки с продувкой канала реза кислородом (лазерно-кислородная резка). Предельная для качественной лазерно-кислородной резки толщина находится из условия равенства оптимальной скорости резки, при которой шероховатость поверхности реза минимальна, и критической скорости, ниже которой процесс резки становится неуправляемым. Экспериментально определена критическая скорость 0,4...0,5 м/мин и соответствующая ей предельная толщина качественной лазерно-кислородной резки 40...50 мм. Проведено сравнение качественных показателей двух видов резки в переходной области. Показано, что при переходе на кислородно-лазерную резку при толщине листа 30...40 мм не происходит ухудшения качества поверхности реза по сравнению с лазерно-кислородной резкой, если параметры процесса выбраны оптимальным образом.

Ключевые слова: лазерная резка, CO₂-лазер, кислородная резка, шероховатость поверхности, толщина листа.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22

Введение

Лазерная резка широко применяется в промышленности как разделительная – в заготовительном производстве и для разрезания крупных изделий при их утилизации и как качественная – при производстве готовых деталей. Основным критерием качества в большинстве применений лазерной резки является шероховатость поверхности реза, которая должна быть по возможности минимальной.

Самым распространенным материалом для лазерной резки является углеродистая или низколегированная сталь, при разрезании которой в качестве вспомогательного газа чаще всего ис-

пользуется кислород [1]. Лазерная резка стали с кислородом в качестве вспомогательного газа возможна в двух вариантах – лазерно-кислородная резка и кислородно-лазерная резка [2]. Лазерно-кислородная резка представляет собой вынужденное горение железа в кислороде [3, 4]. В этом случае лазерное излучение и экзотермическая реакция окисления дают приблизительно равный вклад в баланс энергии [2, 5]. Кислородно-лазерная резка принципиально не отличается от традиционной кислородной резки, лазерный луч здесь только инициирует реакцию горения, которая обеспечивает практически весь вклад энергии. При лазерно-кислородной резке ширина реза привязана к диаметру лазерного луча и

составляет десятые доли миллиметра [1, 2], при кислородно-лазерной резке ширина реза определяется диаметром струи кислорода.

Лазерно-кислородная резка наиболее эффективна при резке тонких листов, но она применяется также и при толщине листов более 10 мм. Кислородно-лазерная резка больше подходит для резки толстых листов. К настоящему времени не разработаны научно-обоснованные критерии выбора способа резки для данной толщины листа при условии качественного реза с малой шероховатостью. Это связано прежде всего с тем, что механизмы формирования рельефа поверхности реза к настоящему времени полностью не изучены. Известные теоретические модели лазерной резки не позволяют по исходным параметрам резки (мощность лазера, скорость резки, расход технологического газа, условия фокусировки лазерного излучения) определить шероховатость поверхности реза при разной толщине листа и выбрать оптимальный способ резки [6–8]. В настоящей работе задача решается экспериментальным методом.

Целью работы является исследование «переходной области» между двумя способами резки и поиск критерия, позволяющего при условии качественного реза определить предельную для лазерно-кислородной резки толщину листа, при превышении которой целесообразно применять кислородно-лазерную резку.

Методика эксперимента

При лазерно-кислородной резке одной только энергии реакции окисления железа недостаточно для плавления материала и распространения фронта реза. Поэтому ширина канала реза не может существенно превышать поперечный размер сфокусированного лазерного пучка, который и определяет ширину реза. Стабильный режим вынужденного горения может существовать в ограниченном диапазоне скоростей резки. Нижняя граница этого диапазона V_c определяется переходом к неуправляемому самопроизвольному горению. При понижении скорости резки возрастает температура материала в окрестности фронта реза и становится возможным горение железа и распространение фронта плавления уже без поддержки лазерного излучения только за счёт энергии реакции окисления. При

скорости ниже V_c , когда резка происходит в «автогенном» режиме, ширина канала реза уже не определяется лазерным лучом, и канал реза может уширяться в боковом направлении в пределах струи кислорода до размеров газового сопла, которое в случае толстых листов может иметь диаметр 2...3 мм. Струя кислорода при лазерно-кислородной резке не оптимизирована для формирования канала реза, распространение фронта разрушения материала происходит нерегулярным образом, процесс становится неуправляемым. Как следствие, поверхность реза имеет высокую шероховатость.

Определив скорости V_q качественной резки и критическую скорости V_c перехода в неуправляемый режим и их зависимость от толщины разрезаемого листа, из условия $V_q = V_c$ можно определить предельную толщину t_m , при превышении которой становится невозможным получение качественного реза.

Эксперименты по резке проводились на созданном в ИТПМ СО РАН лазерном технологическом комплексе на основе непрерывного CO_2 -лазера [9] мощностью до 8 кВт с параметром качества пучка BPP (Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне), равном 4,7 мм·мрад. Резка производилась излучением с круговой поляризацией по традиционной схеме. Излучение фокусировалось одиночной ZnSe линзой. Соосно с лазерным пучком в зону реза подавалась струя технологического газа (кислород) чистотой 99,999 %. Разрезались листы низкоуглеродистой стали обыкновенного качества СтЗпс толщиной от 5 до 25 мм. Экспериментальные исследования зависимости шероховатости от параметров резки представлены в статье [10], настоящая работа является продолжением этих научных рассуждений.

Высокое качество поверхности реза с малой шероховатостью при резке низкоуглеродистой стали большой толщины может быть достигнуто при кислородно-лазерной резке [11, 12], когда канал реза формируется не лазерным лучом, а специально сформированной струей кислорода. В этом случае лазерный луч только нагревает материал до температуры горения, а вся необходимая для образования реза энергия выделяется в результате экзотермической реакции окисления

железа. О перспективности такого способа резки впервые сообщалось в работе [11]. В статье [12] сказано, что для обеспечения в узком канале (~ 1 мм) безотрывного, безвихревого струйного течения режущего газа нужно использовать сверхзвуковое сопло. Также найдены параметры сопел, которые создают остронаправленные газовые струи и совместимы с оптической системой лазерного резака.

Схема кислородно-лазерной резки показана на рис. 1. В экспериментах по кислородно-лазерной резке также использовался CO_2 -лазер [9]. Сопло с выходным диаметром 3 мм формирует сверхзвуковую струю кислорода. Лазерное излучение фокусируется линзой таким образом, что размер пятна на поверхности листа равен $4 \dots 4,5$ мм. Металл в окрестности струи нагревается до температуры горения, при перемещении резака образуется рез, ширина которого равна диаметру струи. Резка проводилась при мощности излучения 1,5 кВт, так как при меньшей мощности происходит ухудшение качества реза, при большей мощности качество стабилизируется.

Результаты и их обсуждение

Неуправляемый режим лазерно-кислородной резки [2, 13] возникает с понижением скорости резки, когда линейная скорость горения начинает превышать скорость движения лазерного луча

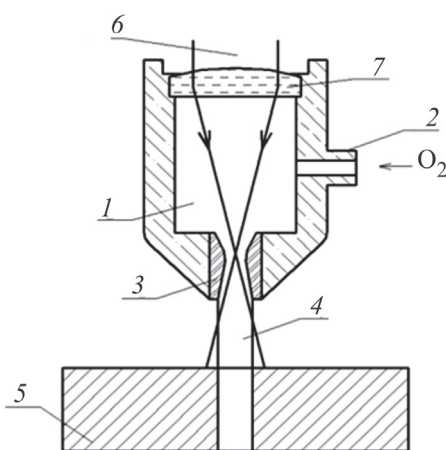
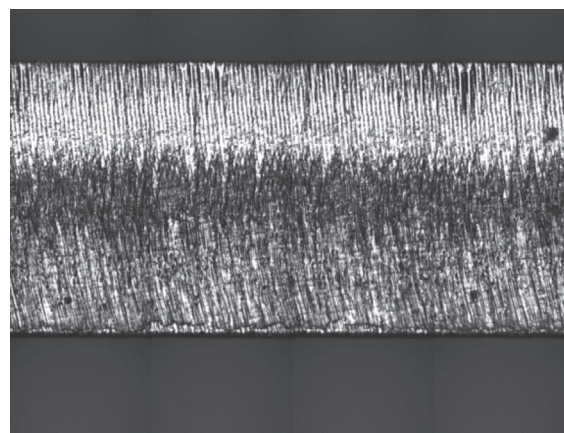


Рис. 1. Схема кислородно-лазерной резки:

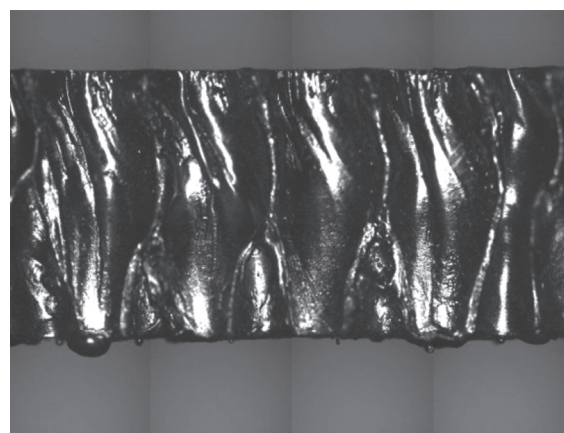
1 – форкамера резака; 2 – патрубок для подачи кислорода; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – струя кислорода; 5 – разрезаемый лист; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза

[2]. Задаваемыми параметрами при лазерной резке являются мощность W лазерного излучения, скорость V резки, давление P технологического газа в камере лазерного резака, положение фокуса луча относительно поверхности листа. На рис. 2, а и б показаны фотографии поверхности реза соответственно в управляемом и неуправляемом режиме при толщине листа 5 мм. В работе [2] сообщается о скорости горения железа в кислороде в условиях лазерной резки $10 \dots 15$ мм/с, но нет описания методики определения, и эти данные следует рассматривать как оценочные.

В экспериментах определялась зависимость критической скорости V_c перехода в неуправляемый режим от давления кислорода. Разрезались листы толщиной 5, 10, 16, 20 мм. Делались прямолинейные резы длиной 70 мм с шагом по скорости 0,83 мм/с. Критическая скорость определялась как скорость, при которой неуправляемый режим возникает не менее чем на половине



а



б

Рис. 2. Фото поверхности реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали, $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт, $P = 0,05$ МПа:

а – $V = 25$ мм/с; б – $V = 6,7$ мм/с

длины реза. Положение фокуса выбиралось из условия минимума шероховатости поверхности реза. Результаты показаны на рис. 3.

Критическая скорость слабо зависит от толщины листа и мощности излучения в области качественных резов и растет с ростом давления кислорода. Зависимость шероховатости поверхности от давления является немонотонной – минимум шероховатости достигается при давлении 0,05 МПа при толщине листа 5 и 10 мм и 0,04 МПа при толщине листа 16 и 20 мм. Оптимальный диапазон давлений ΔP_{opt} отмечен на рис. 3, ему соответствует величина $V_c = 6,7 \dots 8,3$ мм/с.

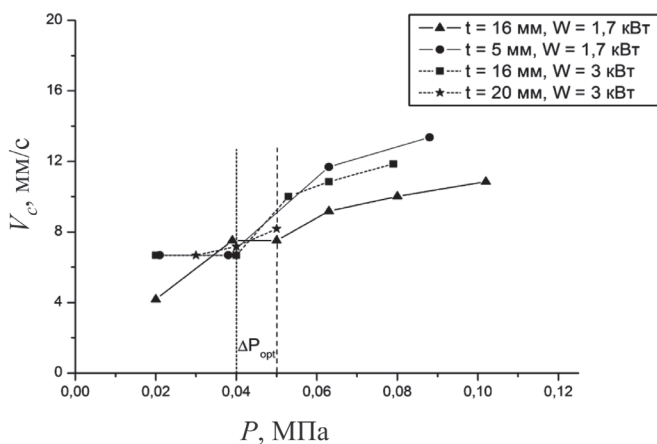


Рис. 3. Критическая скорость V_c перехода в неуправляемый режим в зависимости от давления кислорода в камере лазерного резака

Результаты исследований по экспериментальной оптимизации лазерно-кислородной резки толстых стальных листов изложены в работе [10]. Измерялись зависимости шероховатости поверхности реза от параметров резки – мощности лазерного излучения, скорости резки, положения фокуса относительно поверхности листа (ширины реза). При обработке большого объема экспериментальных данных использованы обобщенные безразмерные переменные – число Пекле $Pe = \frac{Vb}{a}$ и безразмерная мощность $Q = \frac{W}{\lambda e T_m}$,

где b – ширина реза; $a = \frac{\lambda}{C\rho}$ – температуропроводность материала; λ , C , ρ – соответственно теплопроводность, удельная теплоёмкость и плотность материала; W – мощность лазерного излучения; T_m – температура плавления материала. Оптимальные значения входящих в Pe и Q

размерных переменных V_q , b_q , W_q , при которых шероховатость поверхности минимальна, определялись экспериментально. В результате найдены условия получения реза с минимальной шероховатостью: $V_q b_q = 11$ мм²/с, $W_q/t = 200$ Вт/мм. Также в статье [10] определена зависимость оптимальной ширины реза b_q от толщины, листа: $b_q[\text{мм}] = 0,35 + 0,02t$. Отсюда скорость качественного реза связана с толщиной листа следующим образом:

$$V_q = \frac{11}{0,35 + 0,022t}.$$

Условие $V_q = V_c$ в графическом виде показано на рис. 4. При $V_c = 6,7 \dots 8,3$ мм/с и слабой зависимости $V_q(t)$ в области $V_c \approx V_q$ имеется достаточно широкая зона неопределённости в определении максимальной толщины, $t_m = 48 \dots 65$ мм. Поскольку решается задача определения максимальной толщины качественного реза, когда шероховатость поверхности должна быть минимальной, величину t_m следует определять по нижней границе диапазона. Тогда с учетом погрешности $\pm 10\%$ в определении величины V_q имеем $t_m = 44 \dots 53$ мм. Округляя, можно принять $t_m = 40 \dots 50$ мм. Эта величина и даёт оценку максимальной толщины листа, при которой возможна стабильная лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали с малой шероховатостью поверхности.

Найденная величина t_m обусловлена физическими факторами. При практическом использовании лазерной резки в производственных условиях, когда действуют ещё и технические факторы, достигнутые результаты могут отличаться от результатов, полученных при лабораторных исследованиях. С учетом этого полученный результат хорошо согласуется с практикой лазерной резки – максимальная толщина качественной лазерно-кислородной резки стальных листов излучением CO_2 -лазера не превышает 25...30 мм [14].

Это ограничение не связано с недостатком энергии – резка листов этих толщин производится при мощности 5...6 кВт. Близкие значения мощности даются и найденным экспериментально в [10] соотношением $W_q/t = 200$ Вт/мм, соответствующая зависимость показана на рис. 4. В то же время современные промышленные технологические лазеры имеют мощность до 8 кВт.

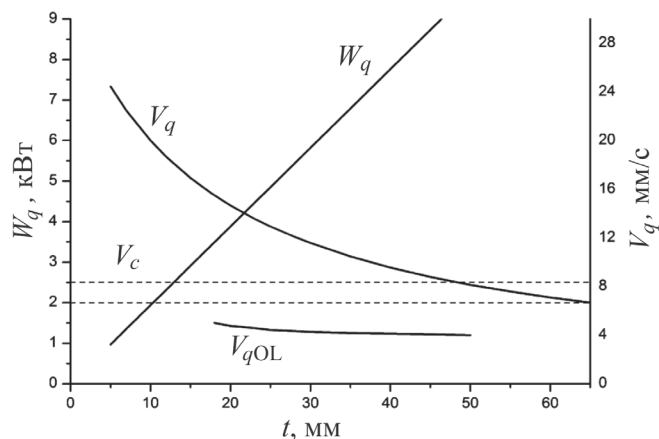


Рис. 4. Оптимальная скорость V_q и оптимальная мощность лазерно-кислородной резки, критическая скорость V_c перехода в неуправляемый режим и оптимальная скорость V_{qOL} кислородно-лазерной резки в зависимости от толщины разрезаемого листа

При помощи кислородно-лазерной резки разрезались листы стали обыкновенного качества Ст3пс толщиной 18, 40 и 50 мм. Кроме того, разрезался лист толщиной 32 мм из высококачественной стали 10ХСНД, которая применяется для изготовления мостовых конструкций и является возможным разрезаемым материалом при практическом использовании кислородно-лазерной резки. Стали Ст3пс и 10ХСНД близки по оптимальным режимам резки и характеристикам реза. С учетом того, что в работе ставится цель не детального исследования зависимости шероховатости от свойств разрезаемого материала, а только оценки характерной величины шероховатости, составление такого ряда толщин и марок сталей можно считать оправданным.

Качественный рез достигается при давлении кислорода в форкамере 0,6...0,8 МПа и зазоре между соплом и листом 4...5 мм. При этом диаметр пятна излучения на поверхности листа равен 4...4,5 мм, ширина реза — 3,4 мм. Фотографии поверхности реза при толщине листа 40 мм и различном давлении кислорода показаны на рис. 5. Видно ухудшение качества поверхности и появление выраженной бороздчатой структуры при давлении 0,4 и 0,95 МПа ниже и выше оптимального. Оптимальная скорость резки, соответствующая минимуму шероховатости, слабо зависит от толщины в диапазоне 18...50 мм и равна 3,8...5 мм/с. Возможна резка и при большей скорости, листы толщиной 18 мм разрезались на скорости до 11,7 мм/с, но при этом существенно

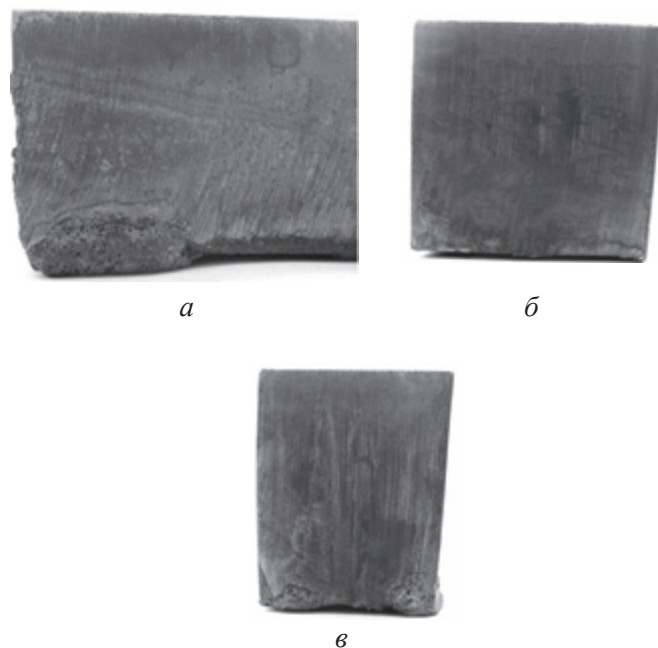


Рис. 5. Поверхность реза при кислородно-лазерной резке стальных пластин толщиной 40 мм; давление кислорода:

а — 0,4 МПа; б — 0,65 МПа; в — 0,95 МПа

возрастала шероховатость и появлялся металлический грат на нижней кромке листа. Шероховатость R_z при резке в оптимальном режиме, измеренная на половине толщины, равна 15 мкм при толщине листа 32 и 23 мм при толщине 40 мм. Шероховатость поверхности при лазерной резке металлов растет с толщиной листа [1, 2]. В работах [10, 15] получена эмпирическая зависимость шероховатости поверхности от толщины листа при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO_2 -лазером в оптимальном режиме — $R_z[\text{мкм}] = 1,15t[\text{мм}] + 6,5$. Таким образом, кислородно-лазерная резка обеспечивает при близкой к предельной для лазерно-кислородной резки толщине 30...40 мм достаточно высокое качество реза — шероховатость поверхности соответствует шероховатости при вдвое меньшей толщине в случае лазерно-кислородной резки.

Выводы

Предложен критерий определения предельной толщины листа при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучением CO_2 -лазера. Предельная толщина определяется из условия равенства оптимальной скорости резки, при которой шероховатость

поверхности минимальна, и критической скорости, ниже которой процесс резки становится неуправляемым. Экспериментально определена критическая скорость и определена максимальная толщина листа, при которой возможна качественная резка – 40...50 мм.

При больших толщинах для резки углеродистых и низколегированных сталей может использоваться кислородно-лазерная резка. Измерена оптимальная (соответствующая минимуму шероховатости) скорость кислородно-лазерной резки в диапазоне толщин листов 18...50 мм. При оптимальном режиме кислородно-лазерной резки и толщине листов 32 и 40 мм шероховатость поверхности реза не превышает шероховатости при лазерно-кислородной резке. Таким образом, переход на кислородно-лазерную резку в области предельных для лазерно-кислородной резки толщин может быть осуществлен без ухудшения качества реза.

Список литературы

1. LIA handbook of laser materials processing / eds.: J.F. Ready, D.F. Farson, T. Feeley. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. – 715 p. – ISBN 978-3-540-41770-5.
2. Steen W.M., Mazumder J. Laser material processing. – 4th ed. – London: Springer-Verlag, 2010. – 558 p. – ISBN 978-1-84996-061-8. – doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
3. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михайлеску. – М.: Наука, 1988. – 538 с.
4. Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction / J. Powell, D. Petring, R.V. Kumar, S.O. Al-Mashikhi, A.F.H. Kaplan, K.T. Voisey // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – P. 015504. – doi: 10.1088/0022-3727/42/1/015504.
5. The theory of laser material processing / ed.: J. Dowden. – Dordrecht: Springer, 2009. – 381 p. – ISBN-13 978-1-4020-9339-5. – doi: 10.1007/978-1-4020-9340-1.
6. Rajpurohit S.R., Patel D.M. Striation mechanism in laser cutting – the review // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Vol. 2, iss. 2. – P. 457–461.
7. Diagnostics, modeling and simulation: three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers / D. Petring, T. Molitor, F. Schneider, N. Wolf // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 186–196. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.029.
8. Fundamental study of CO₂- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique / G.V. Ermolaev, P.V. Yudin, F. Briand, A.V. Zaitsev, O.B. Kovalev // Journal of Laser Applications. – 2014. – Vol. 26. – P. 042004. – doi: 10.2351/1.4895563.
9. High-quality beam generation in a 8 kW cw CO₂ laser / Yu.V. Afonin, A.P. Golyshev, A.I. Ivanchenko, A.N. Malov, A.M. Orishich, V.A. Pechurin, V.F. Filev, V.B. Shulyat'ev // Quantum Electronics. – 2004. – Vol. 34, N 4. – P. 307–309. – doi: 10.1070/QE2004v-034n04ABEH002671.
10. Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness / A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, V.B. Shulyatyev // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44, N 10. – P. 970–974. – doi: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015412.
11. O'Neill W., Gabzdyl J.T. New developments in laser-assisted oxygen cutting // Optics and Lasers in Engineering. – 2000. – Vol. 34, iss. 4–6. – P. 355–367. – doi: 10.1016/S0143-8166(00)00070-1.
12. Газодинамика лазерной резки толстых стальных пластин непрерывным CO₂-лазером / А.В. Зайцев, О.Б. Ковалев, А.М. Оришич, В.М. Фомин, В.Б. Шулятьев // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, спец. вып., ч. 1. – С. 74–83.
13. Gladush G.G., Smurov I. Physics of laser material processing. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 534 p. – ISBN 978-3-642-19242-5. – doi: 10.1007/978-3-642-19831-1.
14. Powell J. LIA guide to laser cutting. – 2nd ed. – Orlando: LIA Publ., 2008. – 104 p. – ISBN 978-0-912035-16-1.
15. Гольшев А.А. Стандартизации лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 16–21. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 15–22

Optimal choice of the technology of thick steel sheets laser cutting

Golyshev A.A., Ph.D., student, Junior researcher, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Orishich A.M., D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory, e-mail: orishich@itam.nsc.ru

Shulyatyev V.B., D.Sc. (Engineering), Senior researcher, e-mail: shulyat@rambler.ru

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

Laser cutting of steel when oxygen is used as a process gas can be done by two methods. The first one is the laser-oxygen cutting, which presents the forced combustion of iron in oxygen. In this case, the laser radiation and exothermic reaction of oxidation make roughly equal contribution in the energy balance. The second method is the oxy-laser cutting when the laser beam just initiates the combustion reaction, which provides almost all energy needed for the cutting. This method is used for thick sheets.

As of today, there are no scientifically proven criteria of the choice of the cutting method for a certain sheet thickness providing the qualitative cut with the low roughness. Above all it results from the insufficient information about the mechanisms of the cut surface shape formation. Available theoretical models of the laser cutting cannot be a reliable tool to choose the optimal cutting method regarding the sheet thickness. In this paper, the problem is solved experimentally.

Generalization of a large body of experimental data enables to have the empirical dependence of the optimal cutting speed V_q , at which the roughness is minimal, on the cut sheet thickness: $V_q = \frac{11}{0,35 + 0,02t}$. The criterion is

proposed, the maximal sheet thickness t_m is found; above it, the high-quality laser-oxygen cutting is impossible. The value t_m is found from the condition $V_q = V_c$, where the critical speed V_c , at which the uncontrolled side burning begins, the cutting roughness increases, and the high-quality cutting is impossible. The measured value V_c is equal to 0,4...0,5 m/min, which correlates to $t_m = 40...50$ mm.

The oxygen-assisted laser cutting of low-carbon and low-alloyed steels is advisable starting from the thickness of 30...40 mm. The tests of the laser-oxygen cutting of sheets of 18...50 mm showed that at the thickness of 30 and 40 mm, the oxygen-assisted laser cutting provides the cut quality not worse than the laser-oxygen cutting if the process parameters are optimal.

Keywords

laser cutting, CO₂-laser, oxygen cutting, surface roughness, sheet thickness.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22

References

1. Ready J.F., Farson D.F., Feeley T., eds. *LIA handbook of laser materials processing*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001. 715 p. ISBN 978-3-540-41770-5
2. Steen W.M., Mazumder J. *Laser material processing*. 4th ed. London, Springer-Verlag, 2010. 558 p. ISBN 978-1-84996-061-8. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5
3. Prokhorov A.M., Konov V.I., Ursu I., Mikhailets I.H. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s metallami* [Lasers-metal interactions]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 538 p.
4. Powell J., Petring D., Kumar R.V., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H., Voisey K.T. Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009. vol. 42, p. 015504. doi: 10.1088/0022-3727/42/1/015504
5. Dowden J., ed. *The theory of laser material processing*. 1st ed. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 2009. 390 p. ISBN 978-1-4020-9339-5. doi: 10.1007/978-1-4020-9340-1

6. Rajpurohit S.R., Patel D.M. Striation mechanism in laser cutting – the review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 457–461.
7. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 186–196. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.029
8. Ermolaev G.V., Yudin P.V., Briand F., Zaitsev A.V., Kovalev O.B. Fundamental study of CO₂- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique. *Journal of Laser Applications*, 2014, vol. 26, p. 042004. doi: 10.2351/1.4895563
9. Afonin Yu.V., Golyshev A.P., Ivanchenko A.I., Malov A.N., Orishich A.M., Pechurin V.A., Filev V.F., Shulyat'ev V.B. High-quality beam generation in a 8 kW cw CO₂ laser. *Quantum electronics*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 307–309. doi: 10.1070/QE2004v034n04ABEH002671
10. Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 10, pp. 970–974. doi: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015412
11. O'Neill W., Gabzdyl J.T. New developments in laser-assisted oxygen cutting. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, vol. 34, iss. 4–6, pp. 355–367. doi: 10.1016/S0143-8166(00)00070-1
12. Zaitsev A.V., Kovalev O.B., Orishich A.M., Fomin V.M., Shulyat'ev V.B. Gazodinamika lazernoi rezki tol'stykh stal'nykh plastin nepreryvnym CO₂ lazerom [Gas dynamics of laser cutting of thick metal sheets using the CO₂-laser]. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*, 2006, vol. 11, special issue, pt. 1, pp. 74–83. (In Russian)
13. Gladush G.G., Smurov I. *Physics of laser material processing*. Berlin, Springer-Verlag, 2011. 534 p. ISBN 978-3-642-19242-5. doi: 10.1007/978-3-642-19831-1
14. Powell J. *LIA guide to laser cutting*. 2nd ed. Orlando, LIA Publ., 2008. 104 p. ISBN 978-0-912035-16-1
15. Golyshev A.A. Standartizatsii lazerno-kislородnoi rezki po kriteriyu sherokhovatosti poverkhnosti [Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 16–21. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

Article history

Received 5 May 2016

Revised 5 July 2016

Accepted 15 August 2016