

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ ПО КРИТЕРИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

**А.А. ГОЛЫШЕВ, аспирант
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)**

Поступила 30 сентября 2015
Рецензирование 15 января 2016
Принята к печати 26 февраля 2016

Голышев А.А. – 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1,
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Проведено исследование лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали газоразрядным CO₂-лазером и иттербиевым волоконным лазером с длиной волны излучения 10,6 и 1,07 мкм соответственно. Выполнена экспериментальная оптимизация лазерной резки по критерию минимальной шероховатости поверхности реза. Показано, что бороздчатая структура боковой поверхности реза неоднородна и имеет характерные особенности в верхней и нижней части образцов. Получено, что лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали CO₂-лазером обладает лучшим качеством поверхности образца после обработки по сравнению с резкой иттербиевым волоконным лазером. Установлено, что лазерная резка низкоуглеродистой стали соответствует 4...6 классу шероховатости. Получено, что с ростом толщины разрезаемого листа величина шероховатости изменяется по закону $R_z = 1,15t + 6,5$ – для резки CO₂-лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для резки иттербиевым волоконным лазером.

Ключевые слова: лазерная резка, шероховатость поверхности, CO₂-лазер, иттербиевый волоконный лазер.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

Введение

В последнее десятилетие лазерная резка металлов заняла лидирующее место в промышленности по сравнению с другими методами раскроя листовых материалов [1,2]. Использование лазерных технологий в обработке материалов обеспечивает высокую производительность и точность, экономит энергию и материалы, позволяет реализовать принципиально новые технологические решения и использовать труднообрабатываемые материалы, а кроме того, повышает экологическую безопасность работ. На сегодняшний день наиболее применяемыми в промышленности являются газоразрядный CO₂-лазер с длиной волны 10,6 мкм и волоконные лазеры с длиной волны порядка одного микрометра [2, 3].

Процесс лазерной резки основан на локальном воздействии сфокусированного лазерного луча с материалом с последующим удалением расплава струей вспомогательного газа. Основные принципы и особенности лазерной резки описаны в работах [4–7]. Процесс лазерной резки происходит следующим образом. Лазерный луч с помощью линзы фокусируется на поверхности металла и нагревает его до температуры плавления. Соосно с лучом через газодинамическое сопло подается струя вспомогательного газа, которая служит для удаления продуктов резки. С помощью технологического стола лазерный луч передвигается относительно листа и образует узкий рез. Продукты резки в виде расплавленных частиц металла могут прилипать к нижней поверхности реза, образуя грат. Схема процесса лазерной резки представлена на рис. 1.

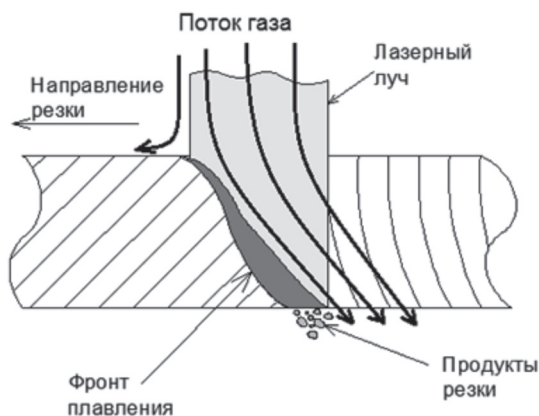


Рис. 1. Схема процесса лазерной резки

После процесса резки на боковой поверхности образца появляется углубленная бороздчатая структура (рис. 2). Бороздки расположены равномерно друг за другом. Они характеризуются тремя показателями: глубиной, частотой и формой [8, 9]. Именно бороздчатая структура имеет шероховатостью поверхности реза.

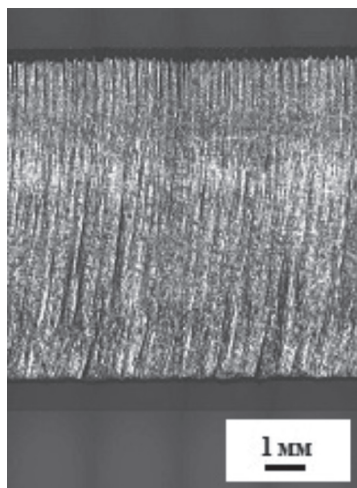


Рис. 2. Поверхность лазерного реза низкоуглеродистой стали толщиной 14 мм

Одним из наиболее важных параметров, характеризующим лазерную резку, является критерий качества обрабатываемой детали [10]. Основными показателями качества лазерной резки принято считать шероховатость поверхности и величину грата. Это связано в первую очередь с тем, что при минимальном значении этих параметров другие показатели качества реза имеют допустимые значения. Поэтому получение лазерного реза, обладающего минимальной шероховатостью и отсутствием грата в нижней части образца, представляет собой практический интерес. Следует особо отметить, что режим, облада-

ющий максимальной скоростью резки, может не являться оптимальным с точки зрения качества реза [11–14].

Главная задача, которая решается в данной работе, заключается в определении минимально возможной шероховатости поверхности заготовки после лазерной резки. Это позволит лучше понять возможности лазерной резки, так как на сегодняшний день до сих пор неизвестно, какими классами шероховатости характеризуется поверхность после лазерной обработки.

Методика эксперимента

В работе использовался иттербиевый волоконный лазер IPG/IRE-Polus мощностью 2 кВт и параметром BPP = 3,8 мм·мрад (BPP – Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне) с коллиматором IPG, модель D5-WC/AC. Диаметр пучка на фокусирующей линзе после коллиматора – 17 мм, фокусное расстояние линзы – 200 мм. Использовался также газоразрядный CO₂-лазер [15] с самофильтрующим резонатором мощностью до 8 кВт и BPP = 4,7 мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составлял 25 мм при фокусном расстоянии ZnSe линзы 190 мм.

В настоящей работе проведены исследования лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали марки Ст3 различной толщины. В этом случае в качестве вспомогательного газа использовался кислород, который не только выдувает расплав из зоны резки, но и вступает в экзотермическую реакцию с металлом, в результате которой получается дополнительный источник энергии.

Основными параметрами, задаваемыми при газолазерной резке, являются мощность излучения W , скорость резки V , давление технологического газа P , а также толщина разрезаемого материала t . При практическом использовании лазерной резки необходимо понимать, как зависят параметры резки, прежде всего мощность лазерного излучения и скорость резки, от толщины разрезаемого листа. Это необходимо как для оценки производительности лазерной обработки материала, так и для улучшения качества обрабатываемой детали.

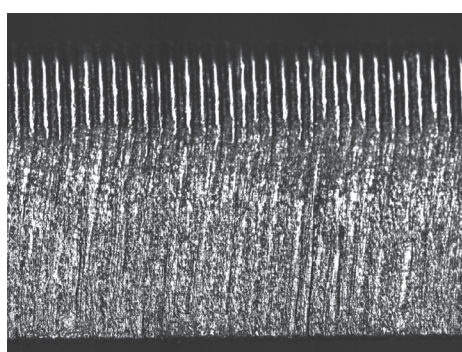
Большое внимание в работе уделяется оптимизации лазерной резки, которая проводилась

по критерию минимума шероховатости поверхности реза. Данный процесс проходил в несколько этапов. На начальном этапе для определенной мощности излучения находилось оптимальное положение фокусного пятна относительно поверхности металла. Этот параметр имеет большое влияние на ширину b и геометрию канала реза. Следующий этап заключается в определении оптимальной скорости резки V .

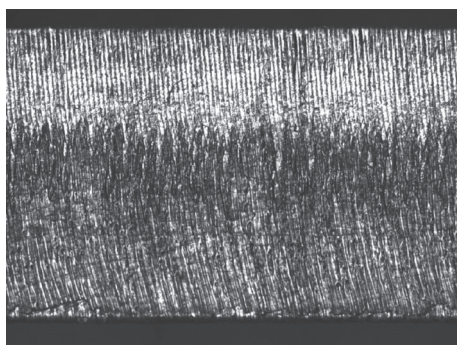
В качестве меры шероховатости (характерной высоты неоднородности) приняты величины R_z (высота неровностей профиля по десяти точкам) и R_a (среднее арифметическое отклонение профиля), которые измерялись при помощи лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT и профилометра Rank Taylor Hobson серии Form Talysurf.

Результаты и обсуждение

В начале работы была проведена оптимизация лазерной резки по критерию минимальной шероховатости поверхности реза. На рис. 3



a



б

Рис. 3. Боковая поверхность реза низкоуглеродистой стали $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт:

a – волоконный лазер ($V = 0,8$ м/мин);
б – CO_2 -лазер ($V = 1,5$ м/мин)

представлены фотографии боковой поверхности лазерного реза низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм, обладающей минимальной шероховатостью. Видно, что бороздчатая структура неоднородна и имеет характерные особенности в верхней и нижней части образцов. Кроме того, видно, что боковая поверхность реза при использовании разных типов лазеров обладает различным качеством поверхности.

Так как боковая поверхность реза неоднородна (см. рис. 3), то для наиболее точного определения качества реза величины шероховатости измерялись в 30 сечениях S_i ($i = 0 \dots 30$) вдоль всей толщины заготовки. В результате была получена интегральная картина качества реза по всей толщине листа (рис. 4). Измеренные значения шероховатости представлены в таблице. Заметим, что наибольший интерес представляют значения $R_{z\text{низ}}$ и $R_{a\text{низ}}$, которые определяют максимально возможную шероховатость реза и измеряются в нижней части листа.

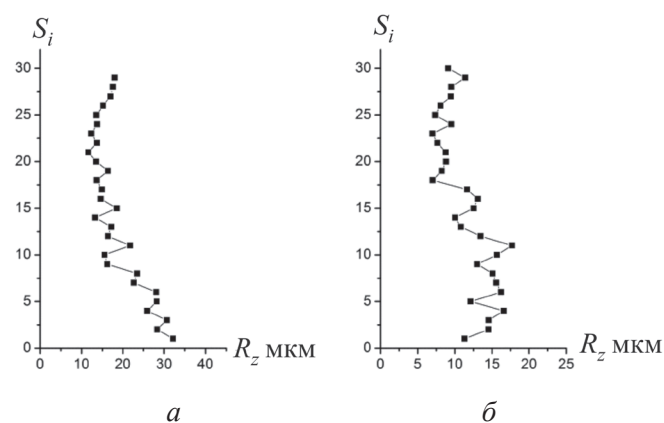


Рис. 4. Распределение шероховатости по толщине листа низкоуглеродистой стали при $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт:

a – волоконный лазер ($V = 0,8$ м/мин); *б* – CO_2 -лазер ($V = 1,5$ м/мин)

Оптимальные значения шероховатости боковой поверхности лазерного реза для толщины 5 мм

Параметр	Волоконный лазер	CO_2 -лазер
Скорость резки (м/мин)	0,8	1,5
$R_{z\text{низ}}$ (мкм)	30	15
$R_{a\text{низ}}$ (мкм)	5,2	3,2

Из таблицы видно, что при лазерно-кислородной резке CO_2 -лазером оптимизированная величина шероховатости приблизительно в два раза меньше чем при резке иттербиевым волоконным лазером. Исходя из этого видно, что лазерная резка низкоуглеродистой стали с использованием различных типов лазеров характеризуется различным классом шероховатости.

Получив значения шероховатости для лазерно-кислородной резки листов толщиной 5 мм, найдем, как изменяется класс шероховатости с ростом толщины разрезаемого листа. Для этого проведем оптимизацию лазерной резки низкоуглеродистой стали листов толщиной 3, 10 и 16 мм по аналогичному критерию. На рис. 5 представлена зависимость шероховатости поверхности реза от толщины разрезаемого листа. Видно, что с увеличением толщины разрезае-

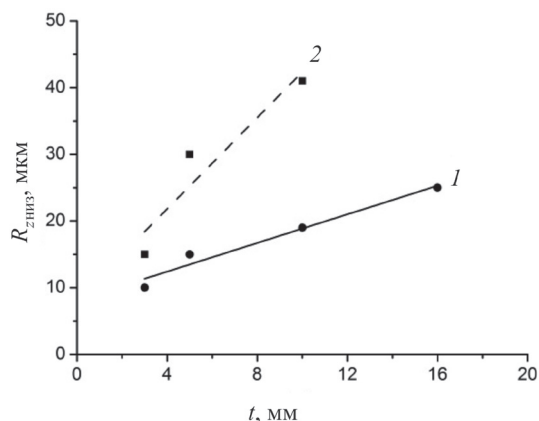


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности реза от толщины разрезаемого листа при лазерно-кислородной резке (1 – CO_2 -лазер; 2 – волоконный лазер)

мого листа, значение шероховатости линейно растет.

Используя полученные оптимальные значения шероховатости поверхности реза из проведенных экспериментов, можно записать зависимость шероховатости от толщины листа в виде $R_z = 1,15t + 6,5$ – для лазерно-кислородной резки CO_2 -лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для лазерно-кислородной резки иттербиевым волоконным лазером. Из рис. 5 видно, что для всех исследуемых толщин класс шероховатости варьируется в пределах 4...6 (см. ГОСТ 2789–73).

Выводы

Проведена оптимизация лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали марки Ст3 по критерию минимума шероховатости с использованием двух типов лазеров. При лазерно-кислородной резке CO_2 -лазером шероховатость существенно меньше, чем при резке иттербиевым волоконным лазером. Получено, что лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали обладает 4...6 классом шероховатости в зависимости от выбранной толщины разрезаемого листа. Получены зависимости $R_z = 1,15t + 6,5$ – для лазерно-кислородной резки CO_2 -лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для лазерно-кислородной резки иттербиевым волоконным лазером.

Список литературы

1. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с. – ISBN 978-5-9221-1520-9.
2. Investigation on disk and CO_2 laser beam fusion cutting differences based on power balance equation / L.D. Scintilla, L. Tricarico, A. Wetzig, E. Beyer // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – N 69. – P. 30–37. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.008.
3. Powell J., Kaplan A.F.H. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO_2 laser cutting // 31th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO: Congress Proceedings, 23–27 September 2012. – Anaheim, California, USA, 2012. – P. 277–281.
4. Steen W.M., Mazumder J. Laser material processing. – 4th ed. – London: Springer-Verlag London Publ., 2010. – 558 p. – ISBN 978-1-84996-061-8. – doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
5. LIA handbook of laser material processing / eds.: J.F. Ready, D.F. Farson, T. Feeley. – 1st ed. – Orlando: LIA Magnolia Publ., 2001. – 715 p. – ISBN 978-3-540-41770-5.
6. Dahotre N.B., Harimkar S.P. Laser fabrication and machining of materials. – 1st ed. – New York: Springer Publ., 2008. – 558 p. – doi: 10.1007/978-0-387-72344-0. – ISBN 978-0-387-72343-3.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с. – ISBN 5-7038-2701-9.
8. Mathematical modelling of striation formation in oxygen laser cutting of mild steel / G.V. Ermolaev, O.B. Kovalev, A.M. Orishich, V.M. Fomin // Journal of

Physics D: Applied Physics. – 2006. – Vol. 39, N 19. – P. 4236–4244. – doi: 10.1088/0022-3727/39/19/017.

9. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42, N 18. – P. 185506. – doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185506.

10. Оришич А.М., Фомин В.М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 176 с. – ISBN 978-5-7692-1212-3.

11. 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.

12. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting // Journal of Physics D: Applied Physics. –

2009. – Vol. 42, N 17. – P. 175507. – doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507.

13. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Experimental optimisation of the gas-assisted laser cutting of thick steel sheets // Quantum Electronics. – 2009. – Vol. 39, N 6. – P. 547–551. – doi: 10.1070/QE2009v-039n06ABEH014040.

14. Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO₂ lasers / V.M. Fomin, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, V.B. Shulyatyev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56, iss. 4. – P. 726–735. – doi: 10.1134/S0021894415040203.

15. 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. Filiev, V.B. Shulyat'ev // Quantum Electronics. – 2004. – Vol. 34, N 4. – P. 307–309. – doi: 10.1070/QE2004v-034n04ABEH002671.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 16–21

Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion

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

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

Abstract

Laser cutting technology rightly ranks highly in the range of many common types of metals mechanical cutting. High density of laser radiation power permits cutting metal and non-metal materials of different thickness. Low cut width, high speed of processing, and accuracy are the peculiarities of the laser-cutting technology. In spite of many advantages, opposite to the other technologies, the laser cutting still has no position in the processing quality standard system. The paper deals with the investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the gas-discharge CO₂ laser and ytterbium fiber laser with the radiation wave length of 10.6 μm and 1.07 μm, respectively. The sheets of 3, 5, 10, and 16 mm were cut. The laser radiation was assigned as 200 W per 1 mm of the sheet thickness for the both laser types.

Initial stage was to optimize the laser cutting by the criterion of the minimal surface roughness. It is shown that the striated structure of the side surface of the cut is not uniform and has its features in the top and bottom parts of the samples. To define the cut quality class, the roughness value measured in the bottom part was used. It is found that the gas-assisted laser cutting of low-carbon steel by the CO₂ laser shows the better quality of the cut surface as compared with the treatment by the ytterbium fiber laser. It is also obtained that the laser cutting of low-carbon steel correlates to the 4 – 6 class of roughness. We founded that, as the cut sheet thickness rises, the roughness value changes in accordance with the law $R_z = 1,15t + 6,5$ for the cutting by the CO₂-laser and $R_z = 3,7t + 3,8$ for the cutting by the ytterbium fiber laser.

Keywords:

laser cutting, surface roughness, CO₂-laser, ytterbium fiber laser.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

References

1. Kovalev O.B., Fomin V.M. *Fizicheskie osnovy lazernoi rezki tolstykh listovykh materialov* [Physical basis of laser cutting of thick sheet materials]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. ISBN 978-5-9221-1520-9
2. Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E. Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, no. 69, pp. 30–37. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.008
3. Powell J., Kaplan A.F.H. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO₂ laser cutting. *Proceedings 31th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Anaheim, California, USA, 23–27 September 2012, pp. 277–281.
4. Steen W.M., Mazumder J. *Laser material processing*. 4th ed. London, Springer-Verlag London Publ., 2010. 558 p. ISBN 978-1-84996-061-8. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5
5. Ready J.F., Farson D.F., Feeley T., eds. *LIA handbook of laser material processing*. 1st ed. Orlando, LIA Magnolia Publ., 2001. 715 p. ISBN 978-3-540-41770-5
6. Dahotre N.B., Harimkar S.P. *Laser fabrication and machining of materials*. 1st ed. New York, Springer Publ., 2008. 558 p. ISBN 978-0-387-72343-3. doi: 10.1007/978-0-387-72344-0
7. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p. ISBN 5-7038-2701-9
8. Ermolaev G.V., Kovalev O.B., Orishich A.M., Fomin V.M. Mathematical modelling of striation formation in oxygen laser cutting of mild steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 19, pp. 4236–4244. doi: 10.1088/0022-3727/39/19/017
9. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 18, p. 185506. doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185506
10. Orishich A.M., Fomin V.M. *Aktual'nye problemy fiziki lazernoi rezki metallov* [Actual problems of the physics about metal laser cutting]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. 176 p. ISBN 978-5-7692-1212-3
11. 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
12. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 17, p. 175507. doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507
13. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Experimental optimisation of the gas-assisted laser cutting of thick steel sheets. *Quantum Electronics*, 2009, vol. 39, no. 6, pp. 547–551. doi: 10.1070/QE2009v039n06ABEH014040
14. Fomin V.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO₂ lasers. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, iss. 4, pp. 726–735. doi: 10.1134/S0021894415040203
15. 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

Article history:

Received 30 September 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 26 February 2016