

УДК 621.9.048.7

*Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов,
А.Д. Ахметов, О.В. Величко*

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

*G.A. Turichin, I.A. Tsibulskiy, M.V. Kuznetsov,
A.D. Akhmetov, O.V. Velichko*

LASER-ARC WELDING IN DIFFERENT ATTITUDE POSITION

В статье рассмотрено влияние пространственного положения лазерно-дуговой сварки на геометрию зоны проплавления и термодинамический КПД процесса. Также рассматривается проблема предотвращения протекания расплава, определяются пути ее решения.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. МЕТАЛЛЫ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН. ПРОТЕКАНИЕ РАСПЛАВА. РАЗЛИЧНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ЛУЧ.

Influence of laser-arc welding attitude position on geometry of penetration zone and thermodynamic efficiency. The problem of melt fluxion prevention was considered and variants of its decision were detected.

LASER-ARC WELDING. THICKNESS METALL. MELT FLUXION. DIFFERENT ATTITUDE POSITION. HORIZONTAL BEAM.

Широкое применение лазерно-дуговой сварки (ЛДС) в мировой практике обусловлено огромным количеством экспериментальных исследований, к которым можно отнести сравнительный анализ лазерного, дугового и гибридного способов сварки [1], а также исследования гибридной сварки с использованием различных лазерных источников [2]. В ряде работ освещены исследования влияния на механические свойства и геометрию сварного соединения частоты, напряжения и времени пульсации дуги [3], расстояния между осью луча лазера и электродом [4], формы разделки [5], типа обработки разделки [6], типа соединения, состава защитной газовой смеси [7]. В других работах описаны результаты исследования амплитудно-частотных характеристик при сканировании лазерного луча [8], а также влияние технологических параметров ЛДС на геометрию сварного соединения. Проводился сравнительный анализ лазерно-дуговой и лазерной сварки с присадочным материалом, исследовалось влияние температуры предварительного подогрева на твердость металла шва [9], а также погонной

энергии на микроструктуру металла шва при одно- и двухпроходной сварке [10]. Некоторые авторы проводили сравнительный анализ ЛДС с одним и двумя электродами [11] и исследовали формирование сварного шва при орбитальной ЛДС [12].

Из приведенного краткого обзора понятно, что большинство исследований проводилось для случая сварки в нижнем пространственном положении (НПП). К сожалению, получение стабильного сквозного проплавления при ЛДС в НПП с ограниченной мощностью лазерного излучения не всегда возможно из-за протекания расплава. К примеру, при мощности лазерного излучения 15 кВт максимально возможная толщина пластин, свариваемых за один проход без протекания расплава, около 12 мм. При увеличении толщины пластин необходимо снижать скорость сварки, а это приводит к протеканию расплава.

Проблема предотвращения протекания расплава крайне актуальна для отечественной промышленности. В связи с этим были проведены специальные исследования и определены не-

которые пути ее решения. Результаты этих исследований описаны в данной публикации.

Оборудование и материалы

ЛДС в нижнем и вертикальном пространственном положении (ВПП) (рис. 1) осуществлялась на экспериментальном стенде для лазерной и лазерно-дуговой сварки — лазерно-дуговом технологическом комплексе (ЛДТК), разработанном сотрудниками института лазерных и сварочных технологий. В качестве источников энергии использовались иттербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт (НТО «ИРЭ-Полус») и выпрямитель для дуговой сварки ВДУ-1500 DC (ЗАО НПФ «ИТС»).

При экспериментах в НПП и ВПП была использована сталь обычного качества (Ст3) и высокопрочная сталь РС Е36, применяемая в отечественном судостроении, с толщиной пластин соответственно 16 и 20 мм. В качестве присадочного материала использовалась металлосварочная проволока типа POWER BRIDGE 60M.

Сварка осуществлялась прямолинейными стыковыми швами. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовалась смесь аргона с углекислым газом.

Поверхности, примыкающие к кромкам стыкуемых деталей, на ширине не менее 10 мм от стыка перед сваркой обезжиривались и зачищались до металлического блеска для удаления грязи, масла и ржавчины.

Сборка листов под сварку производилась с применением сборочных приспособлений (прижимы).

Качество швов оценивалось визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов.

Моделирование лазерно-дуговой сварки в системе инженерного анализа LaserCAD

Предварительный модельный эксперимент по лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом в НПП и ВПП был осуществлен с помощью системы инженерного анализа LaserCAD. Геометрия зоны проплавления (поперечный вид), ванны расплава (продольный вид) и сварного соединения представлены на рис. 2 и 3. По результатам моделирования были получены следующие предварительные параметры лазерно-дуговой сварки: для сварки в НПП — $P_{\text{л}} = 15$ кВт, $V_{\text{св}} = 25$ мм/сек, $I_{\text{д}} = 400\text{--}500$ А, $U_{\text{д}} = 24\text{--}25$ В; для сварки в ВПП — $P_{\text{л}} = 15$ кВт, $V_{\text{св}} = 25$ мм/сек, $I_{\text{д}} = 200\text{--}300$ А, $U_{\text{д}} = 23\text{--}24$ В.

Лазерно-дуговая сварка в нижнем пространственном положении

Лазерно-дуговая сварка в НПП была выполнена по пластине с различным (от 0 до 5 мм) расстоянием Δl между лучом лазера и электродом при опережающем положении дуги. На рис. 4 представлены макрошлифы сварных соединений, полученных в режиме $P_{\text{л}} = 15$ кВт, $V_{\text{св}} = 25$ мм/сек, $d_{\text{пр}} = 1,6$ мм, $V_{\text{пп}} = 9,12$ м/мин.

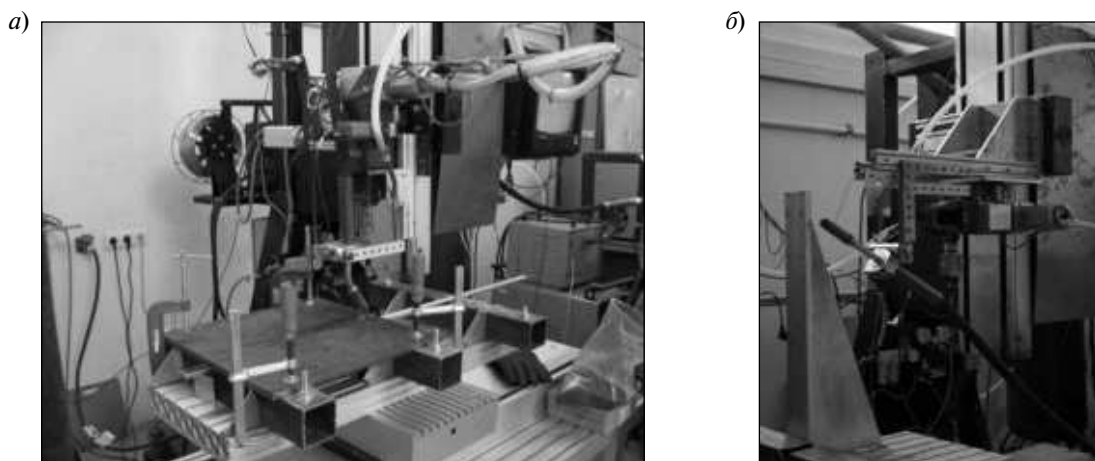


Рис. 1. Система взаимного относительного перемещения рабочего инструмента и изделия ЛДТК: лазерно-дуговая сварка в нижнем (а) и верхнем (б) пространственном положении

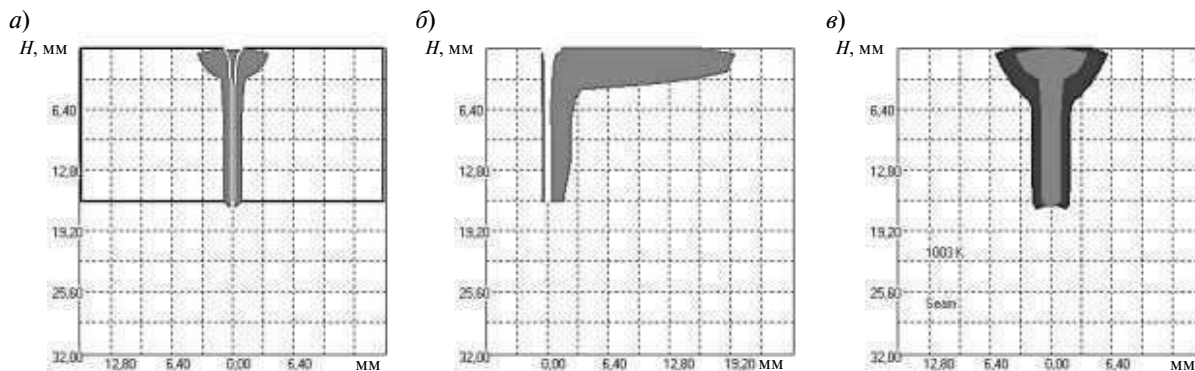


Рис. 2. Лазерно-дуговая сварка в нижнем пространственном положении: *a* — зона проплавления; *б* — сварочная ванна (продольный вид), *в* — сварное соединение

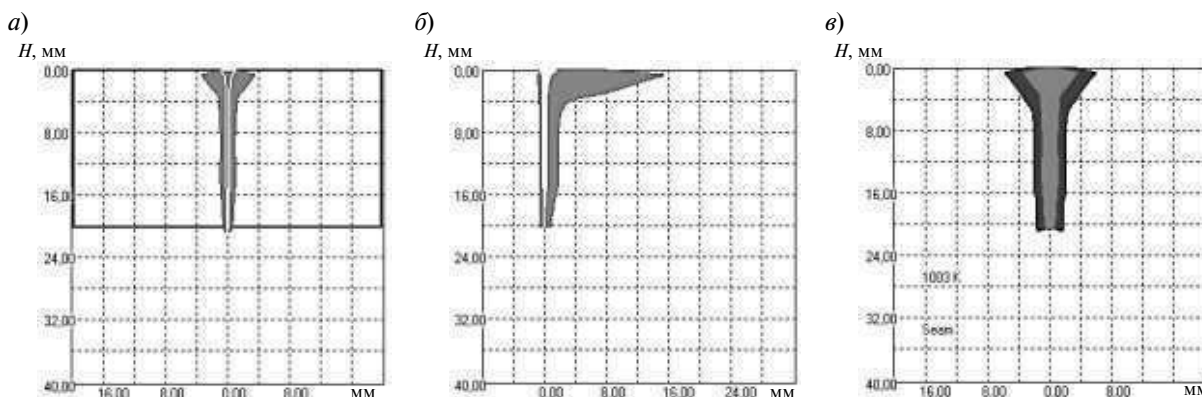


Рис. 3. Лазерно-дуговая сварка в верхнем пространственном положении: *a* — зона проплавления; *б* — сварочная ванна (продольный вид); *в* — сварное соединение

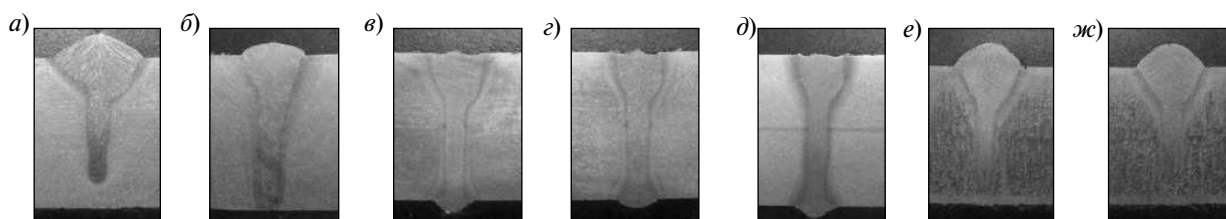


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений, образованных при различном расстоянии (указано в мм) между лучом лазера и электродом: *a* — 0; *б* — 1; *в* — 2; *г* — 3; *д* — 3,5; *е* — 4; *ж* — 5 мм

Из фотографий макрошлифов, представленных на рис. 4, видно, что наибольшая глубина проплавления (сквозное проплавление) получена при расстояниях между лучом лазера и электродом 2–3,5 мм.

Анализ процесса лазерно-дуговой сварки с использованием скоростной видеосъемки (скорость съемки — 2000 кадров/сек) позволил

объяснить данную зависимость. При $\Delta l = 0-1$ мм часть энергии лазерного излучения расходуется на плавление электрода, при этом процесс сварки нестабилен. При $\Delta l = 2-3,5$ мм лазерное излучение взаимодействует с расплавленным металлом в кратере дуговой ванны (область катодного пятна), при этом наблюдается стабильный процесс сварки. При $\Delta l = 4-5$ мм ла-



Рис. 5. Кадры скоростной видеосъемки лазерно-дуговой сварки при различном расстоянии (указано в мм) между лучом лазера и электродом: *a* — 0; *b* — 1; *в* — 2; *г* — 3; *д* — 3,5; *e* — 4; *ж* — 5 мм

зерное излучение взаимодействует с расплавленным металлом в задней части дуговой ванны с образованием нестабильного процесса сварки (рис. 5).

Результаты дальнейшего исследования геометрии сварных соединений и расчета эффективности процесса ЛДС приведены в таблице.

На рис. 6 представлены графики зависимости от расстояния между лучом лазера и электродом коэффициента формы проплавления, площади проплавления и термодинамического КПД процесса ЛДС.

Как следует из таблицы и рис. 4, максимальное значение термодинамического КПД — 31,8 % — было зафиксировано при расстоянии между лучом лазера и электродом, равным 3 мм. При этом сварное соединение не имело наплавленного валика — объем протекшего металла составлял около 33 % от объема металла сварного шва. По-видимому, при оптимизации параметров режима лазерно-дуговой сварки можно получить более высокое значение термодинами-

ческого КПД (около 40 %), что немаловажно при внедрении ЛДС в промышленность. Основной причиной протекания является сила тяжести, которая при значительных размерах ванны расплава, характерных для сварки металлов больших толщин за один проход, значительно превосходит силу поверхностного натяжения. При наличии дополнительной мощности лазерного излучения данная проблема решается за счет увеличения скорости сварки и, как следствие, кристаллизации расплава. Данную проблему можно также решить с помощью дополнительных операций, таких, как разделка кромок, использование керамических подкладок или флюсовой «подушки» для поддержания ванны расплава, либо за счет значительного увеличения расстояния между лучом лазера и электродом при опережающем положении луча лазера. Но последний вариант скорее похож на сварку за два прохода с незначительным перемешиванием легирующих элементов присадочной проволоки по сечению металла шва.

Геометрия сварных соединений и эффективность сварки.

Δl , мм	a , мм	b , мм	Ψ	$S_{\text{пр}}$, мм ²	$Q_{\text{св}}$, кВт	$Q_{\text{ст}}$, кВт	$\eta_{\text{тд}}$, %
0	7,7	12,9	0,6	33,5	24,8	6,9	27,9
1	5,7	15	0,38	34,5	25,4	7,1	28,1
2	4,2	16	0,26	38,4	25,6	7,9	31
3	3,4	16	0,21	39,7	25,8	8,2	31,8
3,5	4,3	16	0,27	35,6	25,8	7,4	28,5
4	6,6	14,3	0,46	32,3	25,8	6,7	25,9
5	6,5	12,7	0,51	30,9	25,8	6,4	24,7

Примечание: a — ширина шва на поверхности пластины, мм; b — глубина проплавления, мм; Ψ — коэффициент формы проплавления ($\Psi = a/b$); $S_{\text{пр}}$ — площадь проплавления, мм²; $Q_{\text{св}}$ — энергия на выходе из источников, кВт; $Q_{\text{ст}}$ — энергия аккумулированная в стыке, кВт; $\eta_{\text{тд}}$ — термодинамический КПД, %.

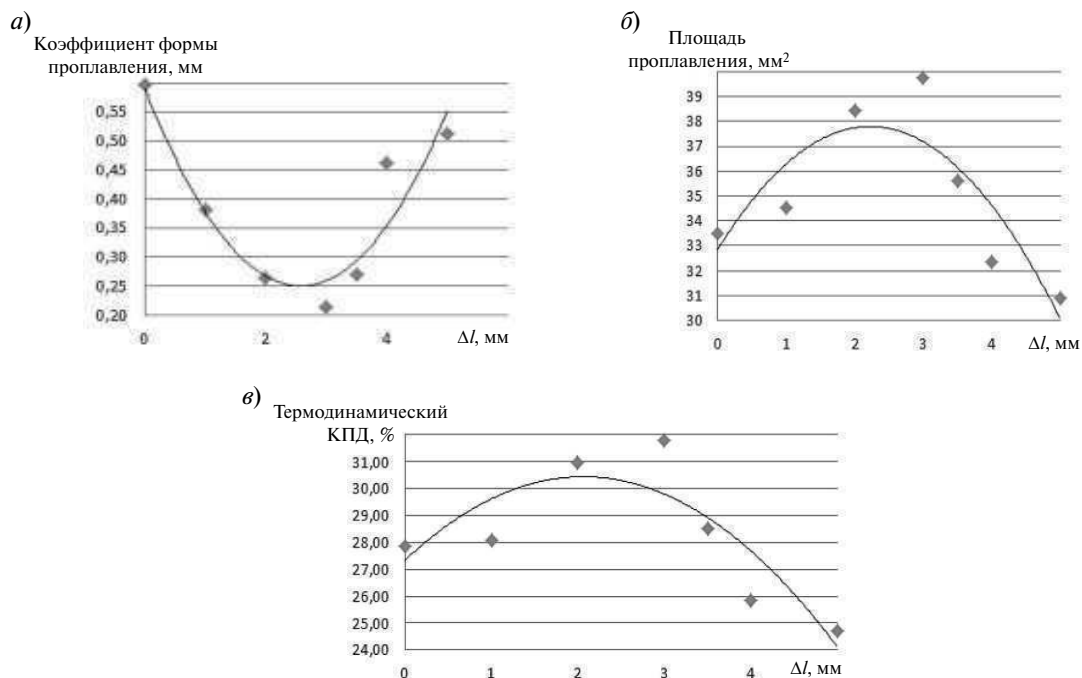


Рис. 6. Влияние расстояния Δl между лучом лазера и электродом на коэффициент формы проплавления (а), площадь проплавления (б) и термодинамический КПД процесса лазерно-дуговой сварки (в)

В статье предлагается иной вариант решения проблемы — ЛДС в вертикальном пространственном положении.

Лазерно-дуговая сварка в вертикальном пространственном положении

При ЛДС в ВПП, как и при сварке в НПП, одним из параметров, определяющих формирование сварного соединения, является относительное положение лазерного луча и электрода. Здесь также возможны два направления пере-

мещения источника нагрева: сварка на спуск и сварка на подъем. При этом возможны две схемы расположения источников (рис. 7): как при опережающем положении дуги, так и при опережающем положении лазерного луча.

Наиболее стабильное сквозное проплавление образовалось при сварке на спуск с опережающим положением дуги. При данном положении дуга не только подогревает металл перед лучом лазера, но и поддерживает ванну расплава.

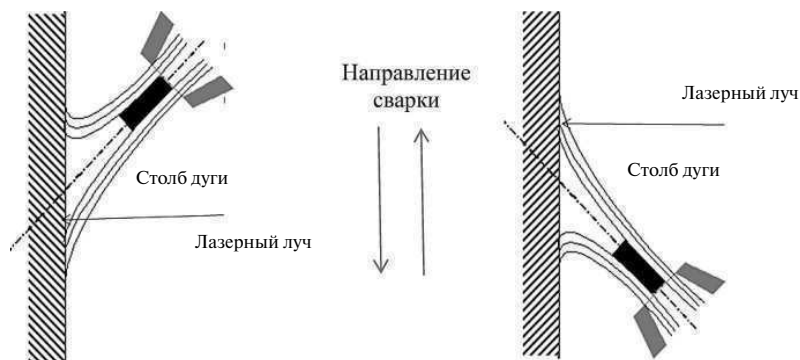


Рис. 7. Схемы процесса ЛДС плавящимся электродом вертикальных стыков

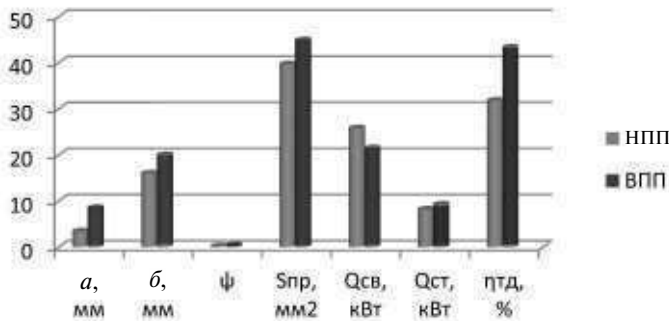


Рис. 9. Диаграмма сравнения геометрии сварных соединений и эффективности лазерно-дуговой сварки в НПП и ВПП



Рис. 8. ЛДС в вертикальном пространственном

положении:
 $P_{л} = 15 \text{ кВт}$; $V_{пп} = 12,5 \text{ м/мин}$;
 $V_{св} = 25 \text{ мм/сек}$

При низкой скорости сварки либо высокой скорости подачи присадочной проволоки расплавленный металл также вытекает из ванны. В данном случае решение проблемы было найдено при образовании зазора между свариваемыми пластинами, который заполнялся излишком расплавленного металла. При этом появилась возможность образования стабильного сквозного проплавления при ЛДС пластин толщиной 20 мм за один проход без вытекания расплава (рис. 8). Эффективность процесса ЛДС в ВПП характеризуют следующие результаты:

a , мм	8,5
b , мм	20
ψ	0,42
$S_{пр}$, мм ²	44,87
$Q_{св}$, кВт	21,44
$Q_{ст}$, кВт	9,27
$\eta_{тд}$, %	43,3

На рис. 9 приведена диаграмма, где наглядно сравниваются основные характеристики геометрии сварных соединений и термодинамический КПД процессов сварки, ведущихся в различных пространственных положениях.

Из диаграммы видно: в варианте ЛДС в ВПП при меньшей мощности источников нагрева большее количество энергии концентрируется в зоне стыка и, как следствие, образуется сварной шов с большим (приблизительно на 36 %) значением термодинамического КПД по срав-

нению с ЛДС в НПП. При этом удалось решить проблему протекания расплавленного металла.

По-видимому, немалую роль в эффективности лазерно-дуговой сварки в ВПП также играет и зазор. Данный вопрос в дальнейшем планируется исследовать более детально.

Максимальное значение термодинамического КПД лазерно-дуговой сварки достигается при взаимодействии лазерного излучения с расплавленным металлом в кратере дуговой ванны (область катодного пятна) и составляет около 40 %.

При ЛДС пластин толщиной 16 мм в НПП для образования стабильного сквозного проплавления без протекания расплава необходимы скорость сварки свыше 2,4 м/мин и, как следствие, дополнительная мощность лазерного излучения.

При ЛДС с максимальной мощностью лазерного излучения 15 кВт можно получить стабильное сквозное проплавление без протекания расплава толщиной в ВПП около 20 мм, в НПП — 12 мм.

Эксперименты показали, что величина зазора между свариваемыми пластинами оказывает влияние на эффективность ЛДС. Данный вопрос планируется исследовать в дальнейшем.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №14.527.12.0027 от 20.10.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore, P.L. Development of Nd:YAG Laser and Laser / MAG Hybrid Welding for Land Pipeline Appli-

cation [Text] / P.L. Moore, D.S. Howse, E.R. Wallach // Welding and Cutting. — 2004. №4. — P. 186–190.

2. **Томи, С.** Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа [Текст] / С. Томи, Т. Зефелд // Автоматическая сварка.— 2006. №6.— С. 36–9.

3. **Nilsson, K.** Parameter Influence in CO₂-laser/MIG Hybrid Welding [Text] / K. Nilsson, K. Heimbs, H. Engstrom, A.F.H. Kaplan // Proc. of Int. Conf IIW Doc. IV-843–03, 2003.— P. 17–23.

4. **Туричин, Г.А.** Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин [Текст] / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №4(110).— С. 181–187.

5. **Matsuda, J.** Tig or MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate [Text] / J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki, S. Nagata // Joining and Materials.— 1988. №7.— P. 31–34.

6. **Verwimp, J.** Hybrid Nd:YAG/GMAW Welding of Ultra High Strength Steel [Text] / J. Verwimp, J. Gedopt, G. Maes, W.V. Haver // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Application».— Russia, Saint-Petersburg, 2009.— P. 315–321.

7. **Шелягин, В.Д.** Лазерная и лазерно-дуговая сварка сталей в защитных газах / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, А.В. Сиора [и др.] // Автоматическая

сварка.— 2007. №1.— С. 34–38.

8. **Туричин, Г.А.** Теория и технология гибридной сварки металлов больших толщин [Текст] / Туричин Г.А., Цибульский И.А., Валдайцева Е.А., Карасев М.В. // 6-я Междунар. конф. «Лучевые технологии и применение лазеров». Россия, Санкт-Петербург, 2009.— С. 11–18.

9. **Adamiec, J.** Hybrid Welding of Sheet Pile Walls by Light Waveguide Laser [Text] / J. Adamiec, P. Adamiec, M. Wiecek // Welding International.— 2008. Vol. 22, №6.— P. 393–396.

10. **Hyatt, C.V.** Laser-Assisted Gas Metal Arc Welding of 25-mm-Thick HY-80 Plate [Text] / C.V. Hyatt, K.H. Magee, J.F. Porter [et al.] // Welding Research Supplement.— 2001. July.— P. 163–172.

11. **Dilthey, U.** Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes [Text] / U. Dilthey, A. Wieschemann // Proc. of the IIW International Conference «The Human Factor and its Environment». Lissabon, 1999.— P. 29–44.

12. **Rethmeier, M.** Perspectives of Application of Laser-GMA-Hybrid Girth Welding for Pipeline Construction [Text] / M. Rethmeier, S. Gook, A. Gumenyuk // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Application». Russia, Saint-Petersburg.— 2009.— P. 278–288.

REFERENCES

1. **Moore P.L., Howse D.S., Wallach E.R.** Development of Nd:YAG Laser and Laser /MAG Hybrid Welding for Land Pipeline Application [Text] // Welding and Cutting.— 2004. №4.— P. 186–190.

2. **Thomy S., Zefeld T.** Feature of Hybrid Laser-arc Welding with Melted Electrode in Shielding Gas [Text] // Avtomaticheskaya svarka.— 2006. №6.— P. 36–39 (rus.).

3. **Nilsson K., Heimbs K., Engstrom H., Kaplan A.F.H.** Parameter Influence in CO₂-laser/MIG Hybrid Welding [Text] // Proc. of Int. Conf IIW Doc. IV-843–03.— 2003.— P. 17–23.

4. **Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V.** Hybrid Laser-arc Welding of Thickness Metals [Текст] // Nauchno-technicheskie vedmosti SPbGPU.— 2010. №4(110).— P. 181–187. (rus.)

5. **Matsuda J., Utsumi A., Katsumura M., Hamasaki M., Nagata S.** Tig or MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate [Text] // Joining and Materials.— 1988. №7.— P. 31–34.

6. **Verwimp J., Gedopt J., Maes G., Haver W.V.** Hybrid Nd:YAG/GMAW Welding of Ultra High Strength Steel [Text] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Application».— Russia, Saint-Petersburg.— 2009.— P. 315–321.

7. **Schelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Siора A.V. [et all.].** Laser and Laser-arc Welding in Shielding Gases [Текст] // Avtomaticheskaya svarka.— 2007. №1.— P. 34–38. (rus.)

8. **Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Valdaitseva E.A., Karasev M.V.** Hybrid Welding Theory and Tehnology of Thickness Metal [Текст] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Application».— Russia, Saint-Petersburg, 2009.— P. 11–18. (rus.)

9. **Adamiec J., Adamiec P., Wiecek M.** Hybrid Welding of Sheet Pile Walls by Light Waveguide Laser [Text] // Welding International.— 2008. Vol. 22, №6.— P. 393–396.

10. **Hyatt C.V., Magee K.H., Porter J.F., Merchant V.E., Matthews J.R.** Laser-Assisted Gas Metal Arc Welding of 25-mm-Thick HY-80 Plate [Text] // Welding Re-search Supplement.— 2001. July.— P. 163–172.

11. **Dilthey U., Wieschemann A.** Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes // Proc. of the IIW International Conference «The Human Factor and its Environment»/ Lissabon, 1999.— P. 29–44.

12. **Rethmeier M., Gook S., Gumenyuk A.** Perspectives of Application of Laser-GMA-Hybrid Girth Welding for Pipeline Construction [Text] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Application», Russia, Saint-Petersburg, 2009.— P. 278–288.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук, профессор заместитель директора Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: gleb@lrc.ru

ЦИБУЛЬСКИЙ Игорь Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: igor@lrc.ru

КУЗНЕЦОВ Михаил Валерьевич — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kuznetsov_mich@lrc.ru

АХМЕТОВ Александр Дмитриевич — инженер научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

ВЕЛИЧКО Ольга Валерьевна — генеральный директор общества с ограниченной ответственностью «Центр лазерных технологий»; 194354, пр. Луначарского д. 13 к 1, Санкт-Петербург, Россия.

AUTHORS

TURICHIN Gleb A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: gleb@lrc.ru

TSIBULSKIY Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: igor@lrc.ru

KUZNETSOV Mikhail V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kuznetsov_mich@lrc.ru

AKHMETOV Alexander D. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

VELICHKO Olga V. — Limited Liability Company «Center of Laser Technologies»; Lunacharskogo Pr. 13 K. 1, St. Petersburg, Russia.