

УДК 621.791.725
DOI: 10.12737/24962

С.В. Курынцев¹, к.э.н.,
И.Н. Шиганов², д.т.н.,
Ф.Р. Исхаков¹, аспирант,
А.Х. Гильмутдинов¹, д.ф.-м.н.
(¹ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса 10)
(²ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105505, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1)
E-mail: kuryntsev16@mail.ru

Контроль параметров ванны расплава при лазерной сварке с использованием скоростной видеокамеры*

Проведена видеосъёмка и исследована микроструктура ванны расплава при лазерной сварке. Установлены общие закономерности, наблюдаемые при анализе видеоматериала и анализе микроструктуры ванны расплава. Полученные результаты можно использовать для подбора оптимальных режимов лазерной сварки и разработки основ контроля сварочного процесса в реальном времени.

Ключевые слова: лазерный луч; высокоскоростная видеокамера; кристаллизация; микроструктура.

S.V. Kuryntsev¹, Can. Ec.,
I.N. Shiganov², D. Eng.,
F.R. Iskhakov¹, Post graduate student,
A.Kh. Gilmutdinov¹, D. Ph-Math.

(¹FSBEI of HE Tupolev National Research Technical University – KAI, 10, Karl Marx Str., 420111, Kazan)
(²FSBEI of HE Bauman State Technical University of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., 105505, Moscow)

Control of melt bath parameters at laser welding using high-speed video camera

The paper reports the procedure of researches of welding bath parameters with the application of a high-speed video camera at laser welding. The video materials obtained allow monitoring on-line the parameters of bath crystallization and defining the dependence of this process upon welding speed. On the basis of the video material analysis there are defined dependences of bath parameter changes upon welding speed. There is shown a tie of changes in dimensions and micro-structure with the welding speed.

Keywords: laser beam; high-speed video camera; crystallization; micro-structure.

Лазерная сварка волоконными лазерами различных материалов и толщин в настоящее

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 17-48-160248. The reported study was funded by RFBR and Republic of Tatarstan according to the research project no. 17-48-160248.

время достаточно распространённый технологический процесс [1, 2]. Высокие скорости процесса и малая ширина шва требуют качественного контроля за процессом. Для этой цели используются разнообразные датчики, лазерные сканаторы, отслеживающие величину зазора между заготовками, фото и видео

фиксация парогазового канала, плазменного факела, процесса затвердевания [3 – 7].

В работе [8] с использованием двух высокоскоростных камер установлена взаимосвязь между колебаниями парогазового канала и плазменного факела и за счёт этого можно контролировать процесс лазерной сварки и предупреждать появление дефектов.

Авторами работы [9] исследовался процесс образования пор при лазерной сварке тавровых соединений с использованием двух высокоскоростных видеокамер и рентгеновской видеокамеры. Результатом является получение изображений ванны расплава, на которых можно различить направление потоков жидкого металла, изменяющиеся в зависимости от зазора между стенкой и полкой таврового соединения, от которого также зависит образование пор.

Таким образом, можно установить взаимосвязь поведения жидкого металла с порообразованием. Также с использованием высокоскоростной видеокамеры можно наблюдать за изменением формы парогазового канала и формы ванны расплавленного металла [10], полученные данные можно оцифровать и получить количественную оценку поведения парогазового канала в зависимости от режимов сварки, с целью контроля процесса.

При проведении работ по лазерной сварке в условиях массового или серийного производства швов большой длины использование систем мониторинга является необходимым, так как с их помощью можно прогнозировать появление дефектов и контролировать стабильность процесса.

Целью данной работы является разработка методики визуальной оценки изменения размеров и поведения сварочной ванны в процессе лазерной сварки излучением волоконного лазера для дальнейшего использования результатов при расчётах схем кристаллизации и оптимизации режимов.

Эксперименты проводили на комплексе для лазерной сварки, состоящего из робота KUKA KR 120 R 2700 extra HA, источника лазерного излучения в виде волоконного лазера LS-20, сварочной головки LK-690 KUGLER.

Комплекс регистрации видеоматериала содержит высокоскоростную видеокамеру Memrecam HX4 (Nac), макрообъектив AF-S VR Micro-Nikkor 105 мм, полосовой интерференционный светофильтр и систему лазерной вспышки Cavidux HV (Cavitar Ltd.) с длиной волны $\lambda = 810$ нм, используемой для подсветки.

Видеосъёмку проводили на частоте 3000 кадр/с с разрешением 1280×960 точек, максимум пропускания полосового интерференционного светофильтра, используемого для подавления излучения плазменного факела, составлял 810 ± 20 нм. Сварку проводили на пластинах из нержавеющей стали марки 12X18H10T размером 100×50×2 мм.

Схема проведения экспериментов показана на рис. 1

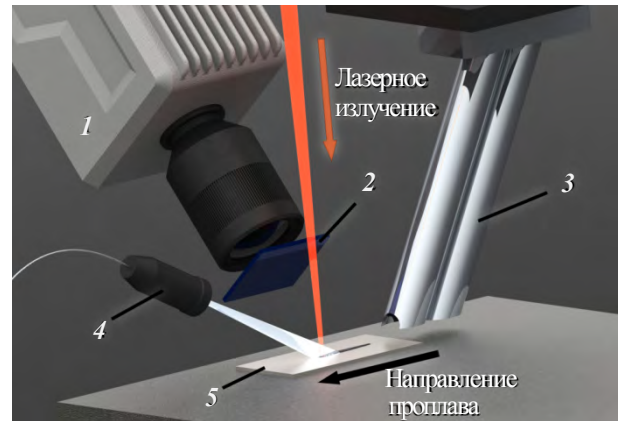


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 – скоростная камера; 2 – полосовой фильтр;
- 3 – трубки для подачи защитного газа;
- 4 – импульсная лазерная подсветка; 5 – образец

Скоростная камера закрепляется неподвижно относительно образца, перпендикулярно направлению переплава под углом 40° к вертикальной оси. Излучение лазерной вспышки, падая наклонно на поверхность, освещает область сварки в форме эллипса с осями $14 \times 7,5$ мм, вытянутого вдоль направления движения образца. Данный участок фиксировался на скоростную видеокамеру.









Сварка образцов проводилась со сквозным проплавлением. Было исследовано 8 режимов сварки, указанных в табл. 1.

1. Режимы сварки экспериментальных образцов

№ режима	1	2	3	4	5	6	7	8
v , мм/с	20	25	30	35	40	45	50	60
P , кВт	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,3

Полученные изображения сварочной ванны показаны на фотографиях в табл. 2.

2. Результаты видео обработки кадров киносъёмки

№ образца	Скорость, мм/с	Фото	Угол изотермы кристаллизации, °	Длина ванны, Δ
1	20		24,2	29,6
2	25		20,5	31,34
3	30		23,6	31,31
4	35		23,6	29,86
5	40		15,5	37,19
6	45		13,0	35,7
7	50		19,9	37,8
8	60		30,4	24,2

Как видно из табл. 2, методика позволяет зафиксировать формы сварочной ванны в любой момент движения источника нагрева. При изменении режимов или каких-то их нарушений в процессе сварки возможно зафиксировать основные размеры сварочной ванны.

В данной работе были проведены измерения по стоп кадрам наиболее информативных участков. На фотографиях очертания сварочной ванны обведены. При обработке данных изображений в программе «КОМПАС-3D V16» можно определить длину ванны, ширину и угол изотермы кристаллизации сварочной ванны расплава. На полученных кадрах хорошо видна зависимость формы ванны от параметров режима сварки.

В перспективе возможна оцифровка изображения сварочной ванны в программе MATLAB R2013a, что даст возможность определять размеры сварочной ванны на протяжении всего процесса сварки. Взаимодействие оцифрованной модели с существующими программами расчёта кристаллизации сварочной ванны [11] позволит контролировать схему первичной кристаллизации и предсказывать свойства сварных соединений.

В качестве практического примера использования данной методики для оценки первичной схемы кристаллизации в процессе сварки, была исследована зависимость изменения угла изотермы кристаллизации от скорости сварки во взаимосвязи с углом роста осей кристаллитов. Угол роста осей кристаллитов является

важной величиной при оценке скорости кристаллизации, схемы кристаллизации и, в конечном итоге, свойств сварного соединения, а так же склонности его к образованию горячих трещин [12].

Так как угол роста изотермы кристаллизации хорошо фиксируется данной методикой (см. фото табл.2), необходимо было определить его связь с углом роста осей кристаллитов. Для этой цели были проведены исследования микроструктуры сваренных образцов. Были подготовлены шлифы поверхности закристаллизовавшегося металла.

На рис. 2 показана микроструктура на одном из режимов, соответствующих скорости сварки 60 мм/с. На фотографиях отчетливо прослеживается граница переплавленного металла, а также направленность роста кристаллитов. Такие же фотографии были сделаны и для других значений режимов.

После проведения замеров и обработки фотографий микроструктур всех образцов была составлена схема, представленная на рис. 3. На данной схеме угол α является половиной угла, замеренного видеокамерой, характеризующего изотерму кристаллизации. Угол β характеризует угол роста кристаллитов, полученный при обработке микроструктур. Схематическое изображение изотерм кристаллизации и соответствующей направленности роста кристаллитов при скоростях 20, 40, 50 мм/с показано на рис. 3.

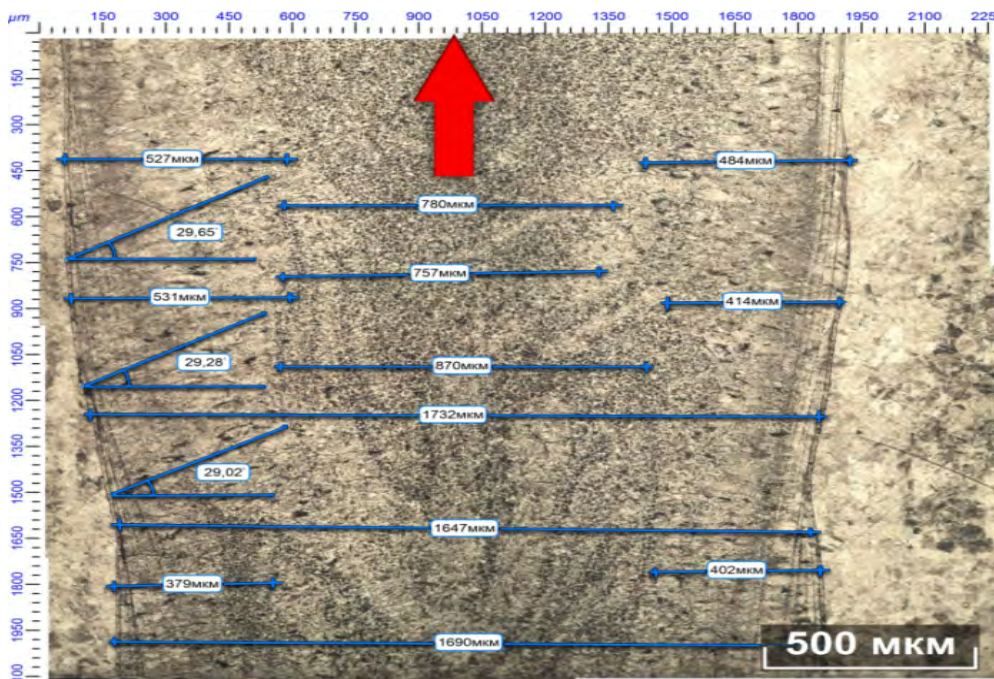


Рис. 2. Микроструктура поверхности сварного шва, полученного на скорости 60 мм/с

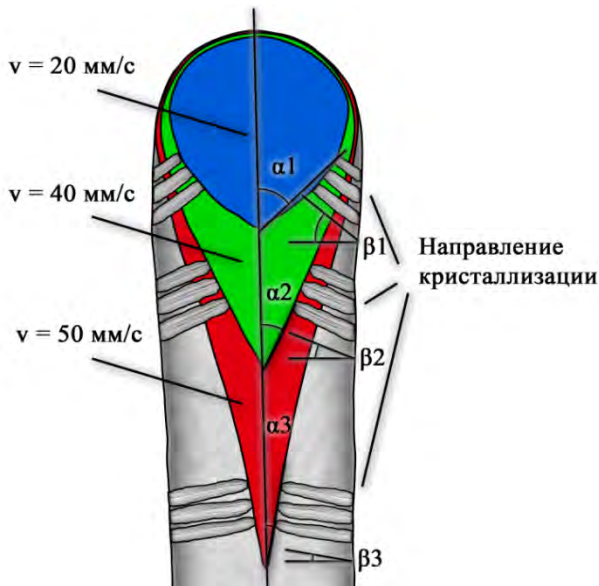


Рис. 3. Схематическое изображение изотерм кристаллизации и соответствующей направленности роста кристаллитов при скоростях 20, 40, 50 мм/с

Полученные экспериментально значения углов α и β в зависимости от скорости сварки представлены в виде графиков на рис. 4.

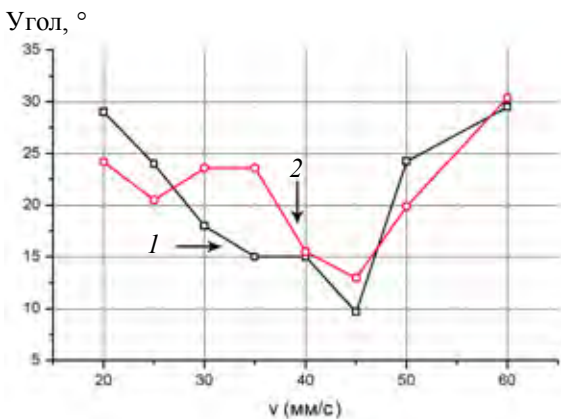


Рис. 4. Зависимости угла изотермы кристаллизации α (1) и угла роста кристаллитов β (2) от скорости сварки

Разбросы значений на графиках связаны с погрешностями измерений, как видеоматериала, так и микроструктуры, однако, наблюдаются определенные закономерности зависимости углов α и β от скорости сварки. Идентичность характера поведения графиков и удовлетворительное схождение значений указывают на то, что измеренные по разработанной методике углы α можно, в первом приближении, использовать для расчётов схем кристаллизации как углы β .

Выводы

1. Разработана методика анализа поведения сварочной ванны и определения её размеров при лазерной сварке с использованием скоростной видеокамеры.

2. Видеосъёмку необходимо проводить на частоте 3000 кадр/с с разрешением 1280×960 точек и полосой пропускания интерференционного светофильтра 810 ± 20 нм, что обеспечивает подавления излучения плазменного факела.

3. Методику можно использовать при подборе оптимальных режимов лазерной сварки с целью обеспечения стабильности процесса, оценки процессов кристаллизации и соответственно качества получаемого сварного соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана. 2008. – 652 с.
2. Shichun Li, Genyu Chen, Seiji Katayama, Yi Zhang. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding // Applied Surface Science 2014. № 303. P. 481 – 488.
3. C. Brock, R. Hohenstein, M. Schmidt Mechanisms of vapour plume formation in laser deep penetration welding // Optics and Lasers in Engineering. 2014. № 58. P. 93 – 101.
4. Курьинцев, С.В., Шиганов, И.Н. Современные тенденции лазерной сварки. Обзор часть 2 // Научно-технические ведомости в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 15 – 20.
5. Deyong You, Xiang Gao, Seiji Katayama Monitoring of high-power laser welding using high-speed photographing and image processing // Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. № 49. P. 39 – 52.
6. Бабкин, К.Д., Певзнер, Я.Б., Осипов, В.В., Кузнецов, А.В. Триангуляционный датчик наведения для слежения за свариваемым стыком при гибридной лазерно-дуговой сварке сталей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 183. – С. 333 – 337.
7. Турчин, Г.А., Земляков, Е.В., Поздеева, Е.Ю., Туоминен, Я., Вуористо, П. Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 3. – С. 35 – 40.
8. F. Tenner, C. Brock, F. Klämpfl, M. Schmidt Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry // Optics and Lasers in Engineering. 2015. № 64. P. 32 – 41.

9. Wei Menga, Zhuguo Lia, Fenggui Lua, Yixiong Wua, Jianhong Chenb, Seiji Katayama Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. № 214. P. 1658 – 1664.

10. Masiyang Luo, Yung C. Shin Vision-based weld pool boundary extraction and width measurement during keyhole fiber laser welding // *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. № 64. P. 59 – 70.

11. Макаров, Э.Л., Якушин, Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. – 487 с.

12. Фролов, В.В. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1988. – 550 с.

REFERENCES

1. Grigoriyants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Working*. – М.: Publishing House of Bauman STU of Moscow. 2008. – pp. 652.

2. Shichun Li, Genyu Chen, Seiji Katayama, Yi Zhang. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding // *Applied Surface Science* 2014. № 303. P. 481 – 488.

3. C. Brock, R. Hohenstein, M. Schmidt Mechanisms of vapour plume formation in laser deep penetration welding // *Optics and Lasers in Engineering*. 2014. № 58. P. 93 – 101.

4. Kuryntsev, S.V., Shiganov, I.N. Current trends in laser welding. Review Part 2 // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 15 – 20.

5. Deyong You, Xiang Gao, Seiji Katayama Monitoring of high-power laser welding using high-speed photographing and

image processing // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014. № 49. P. 39 – 52.

6. Babkin, K.D., Pevzner, Ya.B., Osipov, V.V., Kuznetsov, A.V. Triangulation homing sensor for tracking joint under welding at hybrid laser-arc steel welding // *Scientific-Engineering Gazette of Saint-Petersburg State Polytechnics*. – 2013. – № 183. – pp. 333 – 337.

7. Turichin, G.A., Zemlyakov, E.V., Pozdeeva, E.Yu., Tuominen, Ya., Vuoristo, P. Technological potentialities of laser surfacing using power fiber lasers // *Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2012. – № 3. – pp. 35 – 40.

8. F. Tenner, C. Brock, F. Klämpfl, M. Schmidt Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry // *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. № 64. P. 32 – 41.

9. Wei Menga, Zhuguo Lia, Fenggui Lua, Yixiong Wua, Jianhong Chenb, Seiji Katayama Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. № 214. P. 1658–1664.

10. Masiyang Luo, Yung C. Shin Vision-based weld pool boundary extraction and width measurement during keyhole fiber laser welding // *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. № 64. P. 59 – 70.

11. Makarov, E.L., Yakushin, B.F. *Theory of Steel and Alloy Weldability*. – М.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2014. – pp. 487.

12. Frolov, V.V. *Theory of Welding Processes*. – М.: Higher School, 1988. – pp. 550.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru