



# АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВОГО КАНАЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ\*

Й. ФОЛЬПП, М. ГАТЦЕН, Ф. ФОЛЛЕРТСЕН

Бременский институт прикладной лучевой техники.  
28359, Germany, Bremen, Klagenfurter Strasse 2. E-mail: Volpp@bias.de

При лазерной сварке с глубоким проплавлением, когда интенсивность лазерного излучения превышает определенный предел, зависящий от свойств свариваемого материала, может образовываться характерный парогазовый канал. Канал и окружающая ванна расплавленного металла являются высокочастотной динамической системой. Этим вызвана неустойчивость канала, что может приводить к его разрушению во время сварочного процесса, образованию нежелательных включений и пор, а также к существенному ухудшению качества сварного соединения. Для лучшего понимания этой комплексной системы используется упрощенная аналитическая модель канала, которая описывает его геометрию, а также позволяет рассчитывать влияние различных пространственных распределений интенсивности лазерного излучения на динамику канала и процесс образования пор. Данная модель используется для расчета температуры стенок канала исходя из уравнения энергии, которое учитывает тепловыделение за счет поглощения лазерного излучения, теплопроводности, а также потерь тепла и на испарение. Температура поверхности необходима для расчета радиуса канала, вычисляемого путем решения уравнения равновесия. Это уравнение содержит давление отдачи на краю кнудсеновского слоя, которое поддерживает форму канала, несмотря на действие поверхностного натяжения со стороны окружающего жидкого металла. На втором этапе используется динамическое уравнение, описывающее поведение канала. Динамический расчет основан на балансе сил в канале. Для изучения влияния пространственного распределения интенсивности лазерного излучения применяется гауссово и цилиндрическое распределения. Показано, что распределение интенсивности лазерного излучения существенно влияет на геометрию канала, а градиент давления значительно изменяется, что приводит к различному динамическому поведению. Библиогр. 17, рис. 2.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, глубокое проплавление, парогазовый канал, интенсивность излучения, пространственное излучение, аналитическая модель, геометрия канала, металл шва, образование пор

Поры являются одной из причин разрушений, которые происходят при лазерной сварке с глубоким проплавлением, и ухудшают качество шва. Они могут образовываться вследствие металлургических факторов [1], неустойчивостей мощности лазерного излучения [2], изменений растворимости газа или неустойчивости процесса сварки [3]. Динамика сварочной ванны и канала может приводить к разрушению канала. Высокая амплитуда колебаний стенок канала приводит к его закупорке. Как правило, газовые включения образуются в нижней части канала [4]. Захваченный газ, который не может проникнуть на поверхность, образует пузырь в сварочной ванне, после затвердевания сварочной ванны формируется пора [5]. Хотя исследованию свойств парогазового канала посвящено много работ, динамика данной системы до сих пор полностью не изучена. Экспериментальные наблюдения показывают, что частота процесса лежит в диапазоне от 1 [6] до

8 кГц [7]. На основе этих результатов было сделано заключение, что высокие частоты возникают вследствие колебаний стенок канала.

Для описания процессов в парогазовом канале также использовали математические подходы и численные методы. В работе [8] представлена модель, включавшая все известные физические явления, которые происходят в канале и сварочной ванне. Для наблюдения колебаний в килогерцевом диапазоне численные расчеты должны проводиться с очень малым шагом по времени, что требует значительного вычислительного времени [9]. Поэтому желательно применять аналитическое описание, что требует более короткого времени расчета, но и определенных упрощений. Например, уравнение теплопроводности невозможно решить аналитически для произвольных форм канала. Аналитические расчеты проводили для квазистатического [10] и динамического [11] случаев. При этом в большинстве предыдущих работ применяли пучок Гаусса. Однако лазерные источники питания, используемые в промышленности, обеспечивают различные распределения интенсивности лазерного излучения. Так, в работе [12] рассмотрено осевое изменение профиля напряжен-

\* Публикуется по материалам доклада, представленного на Шестой международной конференции «Математическое моделирование и инновационные технологии в сварке и родственных процессах», 29 мая–1 июня 2012, пос. Кацивели.



ности лазерного излучения [13]. Большое влияние имеют не только интенсивность излучения и колебания мощности [14, 15], но и пространственное распределение интенсивности. Поглощенная энергия, температура и давление в канале зависят от профиля распределения интенсивности лазерного излучения [16]. Поэтому в данной статье на основе существующих аналитических моделей исследуется влияние гауссового и цилиндрического распределений на геометрию парогазового канала [10] и динамику процесса [11] с целью снижения интенсивности образования пор.

**Моделирование квазистатического парогазового канала.** Известно, что квазистатическое состояние достигается тогда, когда канал сформировался вследствие высокой интенсивности лазерного излучения. Для тонколистового материала можно предположить, что канал является цилиндрическим и полностью проплавленным. Макроскопическая форма канала сохраняется, когда луч перемещается относительно материала. В результате процесса испарения возникает давление абляции, или отдачи  $p_{abl}$  в канале, что открывает канал и противодействует давлению поверхностного натяжения  $p_\gamma$  окружающей расплавленной ванны. Уравнение баланса давления математически можно выразить следующим образом:

$$\Delta p = p_\gamma - p_{abl} \quad (1)$$

Гидродинамическим и гидростатическим давлением можно пренебречь [17], так как их значения намного меньше, чем значение поверхностного натяжения, рассчитанного по формуле Лапласа

$$p_\gamma = \frac{\gamma}{r_{Kap}} \quad (2)$$

Давление поверхностного натяжения зависит от радиуса  $r_{Kap}$  и коэффициента поверхностного натяжения  $\gamma$ .

Давление абляции  $p_{abl}$ , вызванное испарением материала на стенке канала в кнудсеновском слое, можно рассчитать так:

$$p_{abl} = mn(T_s)u^2(T_s), \quad (3)$$

где  $m$  — атомная масса;  $n$  — концентрация частиц;  $u$  — скорость испаряемых частиц. Концентрация и скорость испаряемых частиц зависят от температуры поверхности канала  $T_s$ , которая определяется из уравнения сохранения энергии

$$q_{abs} = q_\lambda + q_{abr} \quad (4)$$

Тепловыделение, обусловленное поглощением лазерного излучения  $q_{abs}$ , определяется с помощью выражения

$$q_{abs} = \frac{1}{2\pi r d} \int i(R) R dR d\Phi, \quad (5)$$

где  $d$  — толщина листа;  $R, \Phi$  — радиальная и азимутальная координаты. В этом уравнении параметр распределения интенсивности лазера  $i$  может изменяться.

Потери энергии в основном определяются потерями на испарение

$$q_{abl} = mn(T_s)u(T_s)H_\nu \quad (6)$$

и потерями на теплопроводность

$$q_\lambda = \frac{T_s - T_0}{2} \rho c_p u_0 K_1(Pe) / K_0(Pe), \quad (7)$$

где  $H_\nu$  — скрытая теплота;  $T_0$  — окружающая температура;  $\rho$  — плотность жидкого материала;  $c_p$  — теплоемкость;  $u_0$  — скорость сварки;  $K_1, K_2$  — модифицированные функции Бесселя первого и нулевого порядка в зависимости от числа Пекле  $Pe = u_0 r_{Kap} / 2\kappa$ , где  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности. Выражение (7) является решением уравнения теплопроводности, которое описывает потери тепла за счет теплопроводности в предположении, что источник тепла является цилиндрическим [10].

Путем расчета температуры поверхности  $T_s$  в широком диапазоне радиусов можно решить уравнение равновесия давления  $\Delta p = 0$  и определить квазистатические радиусы цилиндрического канала.

**Моделирование динамического поведения парогазового канала.** Для этого рассмотрим дифференциальные уравнения. Предположим, что канал цилиндрической формы, рассчитанной ранее, колеблется только в радиальном направлении, а распределение интенсивности является параметром в модели. Включая все силы  $F$ , действующие в канале, динамическое уравнение радиуса можно записать следующим образом:

$$\ddot{r} = \dot{b} = \frac{F}{m_{mp}}, \quad (8)$$

где  $r$  — нормированный (к радиусу луча) радиус канала;  $b$  — скорость изменения радиуса;  $m_{mp}$  — масса расплавленной ванны. Согласно [11] динамическое уравнение для скорости изменения радиуса  $\dot{b}$  имеет вид

$$\dot{b} = 2\pi d(rp + 1) + 12\pi \frac{d^2}{r^2} r \frac{(1-r^2)}{(c-r)^2(c^2-r^2)} - fb, \quad (9)$$

где  $c$  — параметр, учитывающий ускорение, которое вызвано деформацией расплавленной ванны на верхней поверхности. Первый и второй члены в (9) описывают скорости, вызванные давлением отдачи паров поверхностным натяжением и де-



формацией расплавленной ванны на поверхности, последний член учитывает рассеяние скоростей вязкого потока, где  $f$  — коэффициент диссипации, который вызывает демпфирование системы.

Динамическое давление определяется как [11]

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{m_{mp}}{\gamma}} \times \left( 2 \frac{v_a}{d} \left( \frac{p_0}{p_{eq}} - p \right) + \frac{c_0}{\pi d p_0 r_0^2} i(r, r_{Kap}, r_0) - 2 p_0 r_{Kap}^2 \frac{b}{r^3} \right), \quad (10)$$

где  $\dot{p}$  — давление в канале, нормированное на давление квазистатического равновесия  $p_{eq}$ . Первый член в правой части уравнения (10) описывает изменение давления, вызванное выходом пара из канала, где  $v_a$  — предполагаемая скорость пара;  $p_0$  — окружающее давление. Второй член в (10) показывает изменение давления, вызванное испарением, где  $c_0$  — постоянная, определяющая мощность излучения;  $r_0$  — радиус луча. Третий член в (10) описывает изменение давления, вызванное адиабатическим расширением канала. Путем решения данной системы дифференциальных уравнений можно определить ответную реакцию на возмущения.

**Результаты моделирования.** Для численной реализации описанной модели исследованы два различных профиля интенсивности лазерного излучения. Первым рассматривали пучок Гаусса

$$i_{gs}(r) = \frac{P_{abs}}{\pi r_0^2} e^{-(r/r_0)^2}, \quad (11)$$

вторым цилиндрический профиль

$$i_{th}(r) = \frac{P_{abs}}{\pi r_0^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left( \frac{r - r_0}{\alpha} \right) \right), \quad (12)$$

где  $P_{abs}$  — мощность поглощенного излучения;  $\alpha$  — коэффициент, определяющий градиент функции.

Для расчета геометрии квазистатического канала использовали Mathworks® Matlab (Version R2009a), а для расчета динамического поведения геометрии и давления канала — Simulink (Version 7.3). При расчетах приняты следующие значения параметров:  $P_{abs} = 900$  Вт;  $r_0 = 100$  мкм;  $\alpha = 1$  мкм;  $u_0 = 1$  м/мин;  $d = 1$  мм;  $c_0 = 0,2$ ;  $f = 0,1$ ;  $c = 3$ ;  $v_a = 4$  м/с;  $r_{start} = 1,2$ ;  $p_{start} = 1$ . Радиус  $r_{start}$  и давление  $p_{start}$  нормируются на квазистатические значения радиуса и давления соответственно.

**Квазистатический парогазовый канал.** Градиент давления, рассчитанный для широкого диапазона значений нормированного радиуса канала  $r_{Kap}/r_0$ , приведен на рис. 1. Результаты представлены для гауссового и цилиндрического распределений

делений. Обе зависимости имеют два корня. При этом только второе решение является устойчивым. Небольшое отклонение от первого решения приводит к исчезновению канала. Радиус канала, полученный для пучка Гаусса, немного меньше чем радиус, полученный для цилиндрического распределения. Хотя радиусы почти одинаковые, восстанавливающие силы отличаются. Они могут подстраиваться под градиент давления при изменении радиуса. Из рис. 1 видно, что градиент давления для цилиндрического распределения выше, чем для пучка Гаусса.

**Динамическое поведение парогазового канала.** Различные восстанавливающие силы в канале при разных формах пучка приводят к разному динамическому поведению, которое рассчитывается с помощью модели. Время  $t'$  нормируется следующим образом:

$$t' = t \sqrt{\frac{m_{mp}}{\gamma}}. \quad (13)$$

Колебания радиуса парогазового канала вокруг равновесного значения для различных распределений интенсивности показаны на рис. 2, а. Частоты этих колебаний равны приблизительно 1,6 кГц для гауссового и 3,2 кГц для цилиндрического распределения. На рис. 2, б, где показан баланс давления, в обоих случаях давление повышается до различных стартовых значений и колеблется с различными частотами для различных распределений. Нижний наклон кривых вызван затуханием колебаний за счет диссипации в окружающем материале.

**Обсуждение результатов.** Как видим, различные пространственные распределения интенсивности лазерного излучения имеют разное влияние на геометрию и динамику канала. При этом влияние распределения излучения на давление и радиуса канала незначительное. Радиальная зависимость градиента давления от типа распределе-

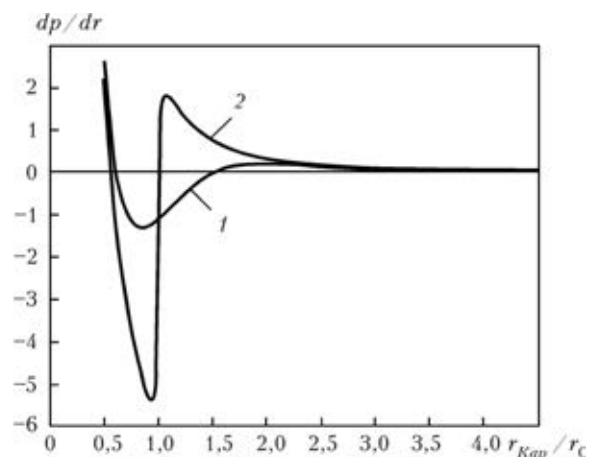


Рис. 1. Градиент давления для гауссового (1) и цилиндрического (2) распределений интенсивности лазерного излучения

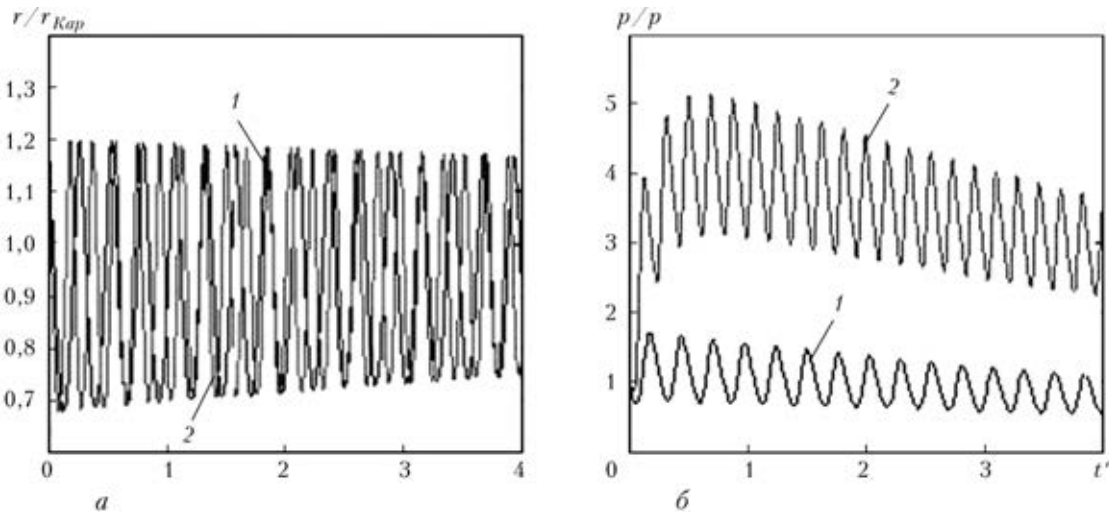


Рис. 2. Колебания радиуса парогазового канала (а) и давления (б) для гауссового (1) и цилиндрического (2) распределений интенсивности лазерного излучения

ния более заметна. В частности, степень изменения интенсивности лазерного излучения от радиуса канала для цилиндрического распределения, вероятно, вызывает значительно более высокий градиент давления в области устойчивого радиуса квазистатического канала. Так как градиент давления влияет на баланс силы, то можно предположить, что различные пространственные распределения интенсивности будут приводить к различному динамическому поведению канала. В работе [18] колебания давления, возникающие вследствие колебаний радиуса, были измерены. Профиль лазерного пучка существенно влияет на частоту колебаний давления и радиуса. Высокая частота колебаний для цилиндрического распределения может объясняться высокой амплитудой колебаний давления, что приводит к возникновению более сильных восстанавливающих сил и высоким скоростям. Это также происходит в результате более высоких градиентов радиального давления при цилиндрическом распределении. Найденные значения частоты находятся в одном диапазоне с экспериментально измеренными в работах [6, 7]. По-видимому, использование цилиндрического распределения благоприятнее для получения стабильного канала, чем использование пучка Гаусса. Давление отдачи, вероятно, демпфирует колебание наиболее быстро, что приводит к меньшему влиянию окружающей расплавленной ванны. При этом более высокий градиент давления вызывает коллапс канала.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что профиль лазерного пучка слабо влияет на геометрию канала. Градиент давления для цилиндрического распределения выше, чем для гауссового. Найдены частоты колебаний радиуса канала, вызванные различными градиентами давления, в случаях цилиндрического и гауссового распределений. На основе используемой модели

можно показать, что цилиндрическое распределение интенсивности приводит к более устойчивому парогазовому каналу.

1. *Effect of alloying elements on porosity formation in laser welding of heavy section steel plates* / S. Tsukamoto, G. Arakane, K. Kojima et al. — S.I., S.a. — Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-941-07.
2. *Szymanski Z., Hoffman J., Kurzyrna J. Plasma plume oscillations during welding of thin metal sheets with a cw CO<sub>2</sub> laser* // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2001. — **34**. — P. 189-199.
3. *Experimental and theoretical studies on keyhole dynamics in laser welding* / A. Matsunawa, J. D. Kim, S. Katayama et al. // The 15th Intern. congress on application of lasers and electro-optics (ICALEO, 14-17 Oct., 1996, Detroit, USA). — 1996. — **81**. — P. 58-67.
4. *Berger P., Hugel H., Graf T. Understanding pore formation in laser beam welding* // Phys. Procedia. — 2011. — **12**. — P. 241-247.
5. *Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B — mechanism and remedy* / L. Liu, G. Song, G. Liang et al. // Materials Sci. and Eng. A. — 2005. — **390**. — P. 76-80.
6. *Melt pool dynamics during laser welding* / V. Semak, J. Hopkins, M. McCay et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1995. — **28**. — P. 2443-2450.
7. *Klassen M. Prozessdynamik und resultierende Prozessinstabilitäten beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen*: PhD thesis, Bremen, 2000.
8. *Ki H., Mohanty P., Mazumder J. Modeling of laser keyhole welding: Pt I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution* // Metallurgical and Materials Transact. A. — 2002. — **33**, June.
9. *Pitz I., Otto A., Schmidt M. Accelerated simulation of laser beam forming by means of moving meshes* // Intern. workshop on thermal forming and welding distortion. — Bremen, 2011.
10. *Kroos J., Gratzke U., Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding* // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1993. — **26**. — P. 474-480.
11. *Pleteit H. Analyse und Modellierung der Keyhole-Dynamik beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen*: PhD thesis, Bremen, 2001.
12. *Kaplan F. Influence of the beam profile formulation when modeling fiber-guided laser welding* // J. of Laser Applications. — 2011. — **23**, № 4. — Nov.
13. *Qualifizierung von Fokussier- und Abbildungssystemen für die industrielle Laserbearbeitung mit brillanten Strahlquellen*



- im Multikilowattbereich // Laser-Anwenderforum, Bremen, 2010.
14. *A simplified energy-based model for laser welding of ferritic stainless steels in overlap configurations* / M. Khan, L. Romoli, G. Dini et al. // CIRP Annals E. — 2011. — 60, № 1. — P. 215.
  15. *Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets* / M. Schmidt, A. Otto, C. Kageler et al. // Ibid. — 2008. — 57, № 1. — P. 213.
  16. *Hugel H., Graf T. Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren.* Vieweg+Teubner. Stuttgart, 2009.
  16. *Oscillation of the keyhole in penetration laser beam welding* / T. Klein, M. Vicane, J. Kroos et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. — 27(10). — P. 2023–2030.
  17. *Study of keyhole behaviour for full penetration Nd YAG CW laser welding* / R. Fabbro, S. Slimani, F. Coste et al. // Ibid. — 2005. — 38. — P. 1881–1887.

Поступила в редакцию 16.01.2013

## СВАРОЧНЫЕ НОВОСТИ ИЗ БЕЛАРУСИ

*Немного о белорусских электродах, в частности о ПАО «ПлазмаТек» и принадлежащим ему ООО «Светлогорский завод сварочных электродов».*

*На аукционе 28 июля 2012 г. ООО «Светлогорский завод сварочных электродов» приобрел 86,7 % госпакета акций ОАО «Рогачевгазстрой» за почти 6,5 млрд бел. рублей. С прошлого года 75 % акций Светлогорского завода принадлежит украинской группе компаний «ПлазмаТек» (базируется в пос. Рудница, Винницкая обл.), 25 % — местному предприятию «Белая Русь».*

*«ПлазмаТек» является самым крупным производителем электродов в Украине — 1700 т электродов в месяц. По 24,9 % акций предприятия владеют председатель наблюдательного совета В. Поляков и генеральный директор В. Слободянюк, 20,11 % — И. Слободянюк.*

*«ПлазмаТек» вложила в развитие Светлогорского завода более 600 тыс. дол. Благодаря проведенной модернизации белорусское предприятие увеличило объем выпуска продукции почти в 10 раз до 270 т электродов в месяц.*

*Однако этим планы не ограничиваются. Планировалось установить в Светлогорске вторую линию, с запуском которой объем производства увеличился бы почти вдвое. Чтобы это осуществить, необходимы были дополнительные производственные площади. Для этих целей планировалось выкупить светлогорскую базу «Рогачевгазстрой», которая находится рядом с заводом сварочных электродов. Однако в Госкомитете по имуществу Беларуси ответили, что приобрести «Рогачевгазстрой» можно лишь полностью. Украинские бизнесмены не долго думали над этим условием. Благо акционер «ПлазмаТека» В. Поляков является также одним из совладельцев «Укргазстрой» и для него рогачевская площадка является по сути своей профильным бизнесом. Поэтому в «ПлазмаТеке» было принято решение диверсифицировать бизнес, а не останавливаться на производстве электродов.*

*Исполнительный директор «ПлазмаТек» Ю. Омельчук говорит, что в планах Светлогорского предприятия «полностью покрыть потребность Беларуси в сварочных электродах и наладить стабильные экспортные поставки». От других комментариев представитель «ПлазмаТек» решил воздержаться «пока не будет закрыта сделка».*

По материалам интернета