

Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони

© С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

На основе известных представлений о моделировании термокапиллярной конвекции рассмотрены двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали AISI 316L и численная реализация модели методом конечных объемов в программном комплексе ANSYS CFX. Предложены аппроксимирующие функции для учета эффективных удельной теплоемкости и динамической вязкости в переходном процессе от твердого к жидкому состоянию для минимизации численной ошибки вблизи точек температур ликвидуса и солидуса. Приведено описание процесса формирования ванны расплава при воздействии лазерным излучением с гауссовым профилем интенсивности с учетом граничных условий конвекции Марангони, конвективной теплоотдачи и радиационной теплоотдачи. Показано влияние термокапиллярной конвекции на форму смоченной поверхности ванны расплава. Предложен подход к контролю течений на свободной поверхности ванны расплава с помощью изменения профиля интенсивности лазера.

Ключевые слова: лазерный нагрев, конвекция Марангони, ванна расплава, вычислительная гидродинамика, метод конечных объемов

Введение. При изучении таких технологических процессов, как сварка и наплавка, возникают сложности экспериментального исследования процессов, протекающих в жидкой ванне расплава. На основе существующей теоретической базы можно полностью описать, как изменяются физико-механические характеристики расплава при воздействии на него лазерным излучением.

Применение математического моделирования позволяет в полной мере описать теплофизические процессы, протекающие в исследуемой детали, и, следовательно, предсказать необходимую с практической точки зрения форму ванны расплава, существенно зависящую от конвективных течений на свободной поверхности. В работе [1] представлено моделирование процесса плавления без привязки к конкретному материалу и без учета эффективных теплофизических свойств, показана важность введения термокапиллярной конвекции. В работе [2] рассмотрено влияние градиента коэффициента поверхностного натяжения на глубину и ширину ванны расплава в процессе селективного лазерного плавления в порошковом слое. При этом термофизические характеристики заданы таблично, что приводит к некоторым погрешностям при моделировании в интервале температур солидуса — ликвидуса.

Цель данной работы заключается в том, чтобы математически описать процесс воздействия лазерного излучения на нержавеющую сталь с учетом конвекции Марангони и в последующем численно смоделировать эту задачу; показать, что без учета указанного явления невозможно в полной мере описать процессы лазерной сварки и лазерной наплавки, так как поверхностные течения напрямую влияют на глубину и ширину ванны расплава; по итогам проведенных численных исследований предложить способы контроля течений в ванне расплава.

Методы решения и описание подхода моделирования. Был исследован процесс нагрева и образования ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L, а также рассмотрен фазовый переход первого рода из твердого состояния в жидкое. При этом не учитывалась теплоотдача при кипении материала, так как предполагалось, что температура парообразования не будет достигнута. Деформация свободной поверхности не рассматривалась. Моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле ANSYS CFX.

Математическое описание задачи. В общем виде уравнение для переноса теплоты можно представить следующим образом:

$$\rho(T)C_p(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T\right) = \nabla k(T)\nabla T + Q, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, зависящая от температуры; T — скалярное поле температуры; C_p — удельная теплоемкость вещества в зависимости от температуры; \vec{u} — векторное поле скорости; ∇ — оператор Набла; k — коэффициент теплопроводности; Q — объемный источник теплоты.

В уравнении (1) слагаемые слева направо представляют собой изменение температуры по времени, поток теплоты, диффузионный поток теплоты и объемный источник теплоты.

Для задачи лазерного нагрева единственный возможный объемный источник теплоты — лазерное излучение. Глубину поглощения лазерного излучения $q(z)$ можно аналитически оценить по закону Бугера — Ламберта — Бера [3]:

$$q(z) = q_0(1 - R)e^{-z/\delta}, \quad (2)$$

где q_0 — мощность лазерного излучения на поверхности материала; R — коэффициент отражения поверхности; δ — глубина проникновения света.

Для сталей глубина проникновения лазерного излучения равна примерно 10^{-8} м (скин-слой), что при решении задачи позволяет рассматривать не объемный источник теплоты, а граничное условие.

Течение на свободной поверхности ванны расплава происходит за счет ненулевого градиента поверхностного натяжения и изменения плотности в ванне расплава. Следовательно, для учета поля течения в систему уравнений совместно с (1) должны быть включены уравнения сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}, \quad (4)$$

где p — давление; μ — динамическая вязкость; \vec{f} — массовые силы.

Граничные условия. На верхней части материала задается граничное условие теплового потока, являющегося суммой тепловых потоков лазерного излучения, заданного гауссовым распределением, конвективной и радиационной теплоотдачи:

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \vec{q}_{las} + \vec{q}_{conv} + \vec{q}_{rad}, \quad (5)$$

$$q_{las} = \frac{P}{\pi r^2} (1-R) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}}, \quad (6)$$

$$q_{conv} = -h_c (T - T_0), \quad (7)$$

$$q_{rad} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (8)$$

где \vec{n} — вектор нормали к поверхности; \vec{q}_{las} — тепловой поток лазерного излучения; \vec{q}_{conv} — конвективная теплоотдача; \vec{q}_{rad} — радиационная теплоотдача; P — мощность лазерного излучения; x_0, y_0 — координаты центра лазерного пятна, заданного в декартовой системе координат; r — радиус лазерного пятна; h_c — коэффициент конвекции; T_0 — температура внешней среды; ε — коэффициент излучения поверхности; σ — постоянная Больцмана.

На остальных гранях материала задано граничное условие нулевого теплового потока

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0. \quad (9)$$

При формировании ванны расплава на свободной поверхности образуются конвективные течения (эффект Марангони), которые направлены к оси OZ или от нее [4]. Направление течения зависит от

направления градиента температуры и значения градиента поверхностного натяжения:

$$\vec{\tau} = -\mu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}}, \quad (10)$$

где μ — динамическая вязкость; γ — коэффициент поверхностного натяжения; \vec{n} — вектор нормали поверхности; \vec{s} — тангенциальный вектор поверхности.

Благодаря применению ANSYS CFX можно задавать проекции сдвиговых напряжений τ_x, τ_y, τ_z для граничного условия. Поскольку решалась задача с плоской ванной расплава, можно спроецировать вектор тангенциальной составляющей на плоскость XY :

$$\tau_x = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (11)$$

$$\tau_y = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}. \quad (12)$$

Физические свойства. В качестве основного материала расчетной области была выбрана нержавеющая сталь AISI 316L. Теплофизические свойства данного материала представлены на рис. 1 [5].

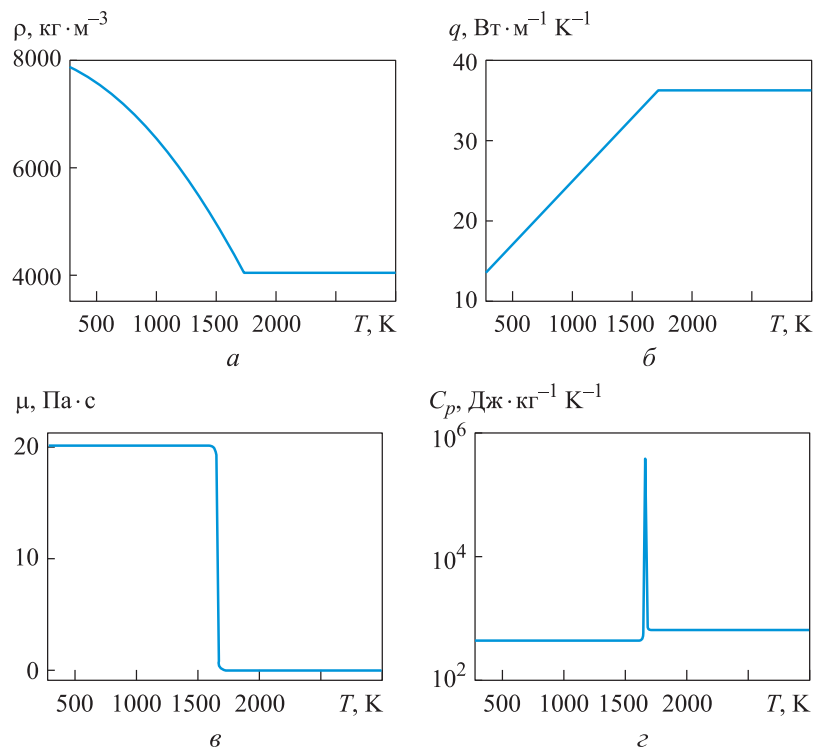


Рис. 1. Теплофизические свойства стали AISI 316L:
 а — плотность; б — теплопроводность; в — динамическая вязкость;
 г — удельная теплоемкость

Для учета фазового перехода от твердого к жидкому металлу в интервале температур солидуса и ликвидуса уравнения удельной теплоемкости и динамической вязкости изменяются согласно формулам

$$\mu(T) = \mu_L + (\mu_S - \mu_L) / \left(1 + e^{-\frac{T-T_m}{a}}\right), \quad (13)$$

$$C_p(T) = C_{pL} + (C_{pS} - C_{pL}) / \left(1 + e^{-\frac{T-T_m}{a}}\right) + H_m e^{-\left(\frac{T-T_m}{a}\right)^2}, \quad (14)$$

где μ_L — динамическая вязкость жидкого металла; μ_S — динамическая вязкость твердого металла; C_{pL} — удельная теплоемкость жидкого металла; C_{pS} — удельная теплоемкость твердого металла; H_m — скрытая теплота плавления; T_m — температура плавления, равная среднему значению между температурой солидуса и ликвидуса; a — температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода.

Значение температурного коэффициента плавности сигмоидального перехода было определено исходя из численных экспериментов при фиксированной дискретизации по времени. Уменьшение коэффициента ведет, при выбранном шаге по времени, к увеличению значения производной теплофизического свойства по температуре, и как следствие, к возрастанию численной ошибки. Используемые в данной работе значения других физических и теплофизических постоянных для AISI 316L и источники информации приведены ниже:

Температура, К:

ликвидуса T_L 1673 [6]

солидуса T_S 1649 [6]

плавления T_m 1660

внешней среды T_0 300

Скрытая теплота плавления H_m , Дж/кг $4 \cdot 10^5$ [7]

Коэффициент конвекции h_c , Вт / (м²·К) 5 [8]

Коэффициент излучения поверхности ϵ 0,8 [9]

Динамическая вязкость металла, Па·с :

жидкого μ_L 0,006 [10]

твердого μ_S 20

Удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К) :

жидкого C_{pL} 458,98 [5]

твердого C_{pS} 692,98 [5]

Градиент поверхностного натяжения $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$, Н/(м·К)	0,00019 [11]
Температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода a , К	3
Коэффициент отражения поверхности R	0,5
Постоянная Больцмана σ , Дж/К	$5,67 \cdot 10^{-8}$

Описание модели. Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами, указанными на рис. 2. Источник нагрева расположен на верхней части расчетного домена.

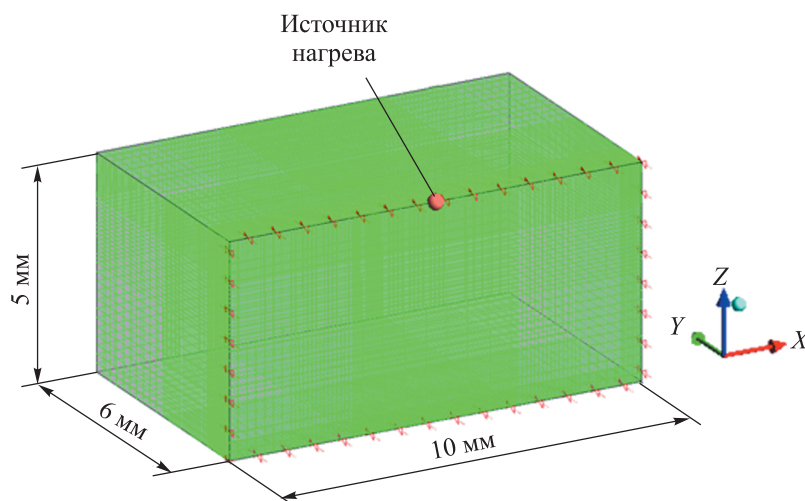


Рис. 2. Схема расчетного домена с размерами и указанием на источник нагрева

Для детального расчета роста жидкой ванны расплава, а также для оценки скорости возникающих течений и распределения температур применяется неравномерная сетка. Следует отметить, что размер элементов вблизи сварочной ванны должен быть достаточно мал, для того чтобы учитывать фазовый переход от твердого к жидкому металлу. Это касается резких и скачкообразных переходов значений параметров динамической вязкости и удельной теплоемкости в интервале температур солидуса и ликвидуса.

Размер элементов подбирался экспериментально. Общее количество элементов сетки — 291 400, минимальный размер ячейки в области зарождения жидкой ванны расплава — 0,05 мм.

Параметры процесса нагрева и настройки решателя приведены ниже:

Мощность, Вт	2000
Радиус пятна нагрева, мм	3
Шаг расчета, с	0,0001
Начальное время, с	2
Время расчета, с	2,5

Результаты моделирования и сравнение. Динамика формирования ванны расплава при лазерном воздействии с учетом конвекции Марангони представлена на рис. 3, *а* и без ее учета — на рис. 3, *б*. Область, где температура ниже температуры ликвидуса, отмечена зеленым цветом, область с температурой выше температуры ликвидуса — красным.

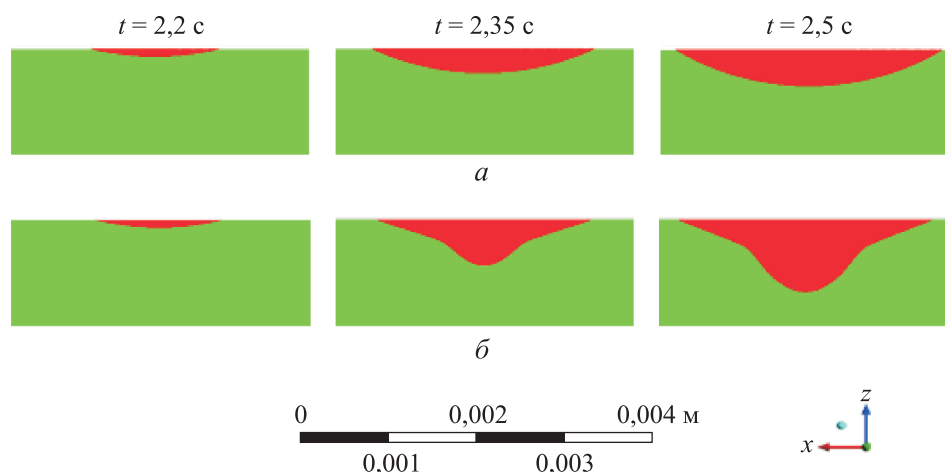


Рис. 3. Эволюция ванны расплава с течением времени без учета (*а*) и с учетом конвекции Марангони (*б*)

Поскольку нагрев лазером происходит по закону Гаусса и градиент поверхностного натяжения для исследуемого материала имеет положительный знак, течение направлено к центру лазерного пятна и вниз вблизи оси OZ . Таким образом, теплота переносится вдоль оси OZ , увеличивая глубину проплава материала, на которую влияет скорость течения. В данном случае эта скорость, зависящая от градиента поверхностного натяжения, равна примерно 0,5 м/с (рис. 4, *а*).

При этом наблюдаются практически нулевые скорости течения при отсутствии конвекции Марангони (рис. 4, *б*), за исключением помех, вызванных численными погрешностями программного комплекса ANSYS CFX.

Предполагается, что можно интенсифицировать или исключить течения, изменяя профиль интенсивности лазерного пучка. Увеличение скорости течений позволит гомогенизировать структуру материала после кристаллизации. Отсутствие скоростей ведет к кристаллизации с образованием направленных вдоль градиента температур структур.

Возможно варьировать скоростные потоки путем изменения профиля лазерного излучения либо введением дополнительных тепловых воздействий на свободную поверхность ванны расплава.

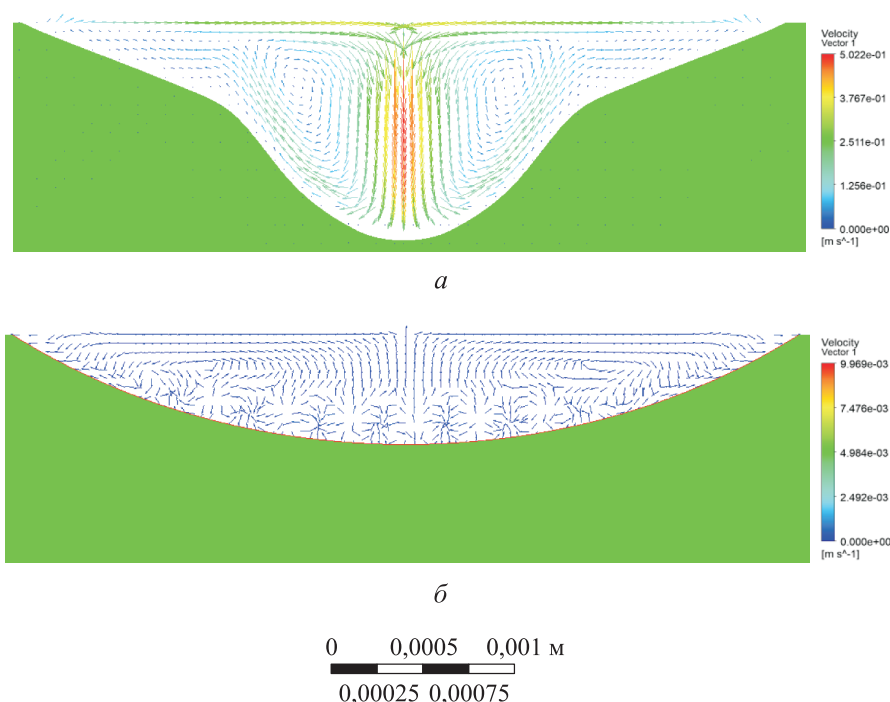


Рис. 4. Векторы скорости течения в ванне расплава с учетом (а) и без учета (б) эффекта Марангони

Закключение. Представлена нелинейная двухфазная математическая модель, описывающая процесс расплава и течений в ванне расплава для нержавеющей стали AISI 316L.

В результате применения математической модели и по итогам вычислительных экспериментов выполнено следующее:

– реализована численная модель процесса воздействия лазерного излучения на нержавеющую сталь с учетом и без конвекции Марангони в программном комплексе ANSYS CFX;

– показано, что невозможно в полной мере качественно и количественно описать процессы лазерной сварки и наплавки без учета граничного условия конвекции Марангони;

– показано, что учет термокапиллярной конвекции на свободной поверхности ванны расплава приводит к изменению ее формы, в частности к увеличению глубины проплавления при положительном значении градиента поверхностного натяжения;

– предложен способ контроля скорости течений в ванне расплава посредством варьирования профиля интенсивности лазера и модулирования мощности излучения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гурин А.М., Ковалев А.Б. Моделирование многовихревой конвекции мелкодисперсных легирующих компонентов в ванне расплава под действием лазерного излучения. *Теплофизика и аэромеханика*, 2013, № 2, с. 229–238.
- [2] Siao Y.-H., Wen C.-D. Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 125, paper no. 105325. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325>
- [3] Вейко В.П., Петров А.А., Самохвалов А.А. *Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии»*. В.П. Вейко, ред. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2018, 161 с.
- [4] Le T.-N., Lo Y.-L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. *Materials & Design*, 2019, vol. 179, paper no. 107866. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107866>
- [5] Kumar K.S. Numerical modeling and simulation of a butt joint welding of AISI 316L stainless steels using a pulsed laser beam. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 2256–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.246>
- [6] Sahu A.K., Bag S. Probe pulse conditions and solidification parameters for the dissimilar welding of Inconel 718 and AISI 316L stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, vol. 51, iss. 5, pp. 2192–2208. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05705-4>
- [7] Yilbas B.S., Akhtar S. Laser welding of AISI 316 steel: microstructural and stress analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, vol. 135, iss. 3. <https://doi.org/10.1115/1.4024155>
- [8] Depradeux L., Jullien J.-F. 2D and 3D numerical simulations of TIG welding of a 316L steel sheet. *Revue Européenne des Éléments*, 2004, pp. 269–288.
- [9] Xia X., Wu J., Liu Z., Ma J., Ji H., Lin X. Numerical simulation of 50 mm 316L steel joint of EBW and its experimental validation. *Metals*, 2020, vol. 12, iss. 5, paper no. 725. <https://doi.org/10.3390/met12050725>
- [10] IAEA. *Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data*. Vienna, 2008.
- [11] Pichler P., Leitner T., Kaschnitz E., Rattenberger J., Pottlacher G. Surface tension and thermal conductivity of NIST SRM 1155a (AISI 316L stainless steel). *International Journal of Thermophysics*, 2022, vol. 43, iss. 5. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-02991-5>

Статья поступила в редакцию 28.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Никифоров С.А., Шварц И.В., Гильмутдинов А.Х., Горунов А.И. Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2248>

Никифоров Сергей Александрович — аспирант кафедры «Лазерных и аддитивных технологий», старший преподаватель кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: SANikiforov@kai.ru

Шварц Иван Валерьевич — аспирант кафедры «Лазерных и аддитивных технологий», ассистент кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ—КАИ.
e-mail: IVShvarts@kai.ru

Гильмутдинов Альберт Харисович — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: albert.gilmutdinov@kai.ru

Горунов Андрей Игоревич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ.
e-mail: aigorunov@kai.ru

Study of the melt pool shape under laser treatment of AISI 316L steel taking into account Marangoni convection effect

© S.A. Nikiforov, I.V. Shvarts, A.Kh. Gilmutdinov, A.I. Gorunov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Kazan, 420111, Russia

The paper considers the two-phase physical and mathematical model of the AISI 316L stainless steel melting and its numerical implementation by the finite volume method in the ANSYS CFX software based on the well-known concepts of simulating the thermocapillary convection. Approximation functions are proposed to take into account the effective specific heat and dynamic viscosity in the transition process from a solid to the liquid state to minimize the numerical error in the vicinity of the liquidus and solidus temperature points. The molten pool formation process was considered under the action of laser radiation with the Gaussian intensity profile taking into account boundary conditions of the Marangoni convection, convective heat transfer and radiative heat transfer. Influence of the thermocapillary convection on the shape of the molten pool wetted surface is shown. An approach is proposed to control flows on the free surface of the molten pool by changing the laser intensity profile.

Keywords: laser heating, Marangoni convection, molten pool, computational hydrodynamics, finite volume method

*The work was carried out within the framework
of State Assignment No. 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).*

REFERENCES

- [1] Gurin A.M. Modelirovanie mnogovikhrevoy konveksii melkodispersnykh legiruyuschikh komponentov v vanne rasplava pod deystviem lazernogo izlucheniya [Simulation of multivortex convection of finely dispersed alloying components in the molten pool under the action of laser radiation]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, no. 2, pp. 229–238.
- [2] Siao Y.-H., Wen C.-D. Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 125, paper no. 105325. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325>
- [3] Veiko V.P., Petrov A.A., Samokhvalov A.A. *Vvedenie v lazernye tekhnologii. Oporny konspekt lektsiy po kursu “Lazernye tekhnologii”* [Introduction to laser technologies. Basic lecture notes on the course “Laser technologies”]. V.P. Veiko, ed. Saint Petersburg, ITMO University Publ., 2018, 161 p.
- [4] Le T.-N., Lo Y.-L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. *Materials & Design*, 2019, vol. 179, paper no. 107866. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107866>
- [5] Kumar K.S. Numerical modeling and simulation of a butt joint welding of AISI 316L stainless steels using a pulsed laser beam. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 2256–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.246>

- [6] Sahu A.K., Bag S. Probe pulse conditions and solidification parameters for the dissimilar welding of Inconel 718 and AISI 316L stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, vol. 51, iss. 5, pp. 2192–2208. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05705-4>
- [7] Yilbas B.S., Akhtar S. Laser welding of AISI 316 steel: microstructural and stress analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, vol. 135, iss. 3. <https://doi.org/10.1115/1.4024155>
- [8] Depradeux L., Jullien J.-F. 2D and 3D numerical simulations of TIG welding of a 316L steel sheet. *Revue Européenne des Éléments*, 2004, pp. 269–288.
- [9] Xia X., Wu J., Liu Z., Ma J., Ji H., Lin X. Numerical simulation of 50 mm 316L steel joint of EBW and its experimental validation. *Metals*, 2020, vol. 12, iss. 5, paper no. 725. <https://doi.org/10.3390/met12050725>
- [10] IAEA. *Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data*. Vienna, 2008.
- [11] Pichler P., Leitner T., Kaschnitz E., Rattenberger J., Pottlacher G. Surface tension and thermal conductivity of NIST SRM 1155a (AISI 316L stainless steel). *International Journal of Thermophysics*, 2022, vol. 43, iss. 5. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-02991-5>

Nikiforov S.A., PG, Senior Lecturer, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. e-mail: SANikiforov@kai.ru

Shvarts I.V., PG, Assistant Professor, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. e-mail: IVShvarts@kai.ru

Gilmutdinov A.Kh., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. e-mail: albert.gilmutdinov@kai.ru

Gorunov A.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. e-mail: aigorunov@kai.ru