

Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L

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

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева (КНИТУ–КАИ), Казань, 420111, Россия

Рассмотрены процесс точечного лазерного нагрева образца из нержавеющей стали AISI 316L и его трехмерная математическая модель. Предложен вариант численного моделирования данного процесса посредством введения источника лазерного излучения, заданного в виде супергауссова распределения с уточненными и экспериментально подобранными безразмерными коэффициентами. Учтены граничные условия конвекционной и радиационной теплоотдач, а также конвекции Марангони на свободной поверхности ванны расплава. Реализован фазовый переход металла из твердого в жидкое агрегатное состояние в интервале температур солидуса и ликвидуса за счет эффективных функций теплоемкости и вязкости. Выполнено сравнение геометрических характеристик ванн расплава, полученных при проведении ряда практических экспериментов, с данными, определенными путем численного решения. Показано, что результаты в обоих вариантах количественно и качественно совпадают с незначительной погрешностью. Сделаны выводы о погрешности численного решения.

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

Введение. Лазерная обработка материалов все чаще вследствие своей точности и скорости применяется в тяжелой и легкой промышленности. Ее внедрение позволяет обрабатывать широкий диапазон марок сталей и сплавов. Для совершенствования технологии лазерной сварки, в том числе точечной, необходим верифицированный математический аппарат, который позволит анализировать мезомасштабные процессы в ванне расплава, в том числе конвекционные течения и их влияние на форму этой ванны, а также динамику фазового перехода при лазерном воздействии. Помимо математического описания этих процессов необходимо учитывать методы и подходы численного решения, которые не всегда дают адекватный результат, поэтому зачастую для каждого конкретного вида технологии лазерной обработки необходимо использовать соответствующий численный метод.

Во многих работах разных авторов в качестве граничного условия влияния лазерного излучения выбрана супергауссова функция с целочисленными коэффициентами, которая дает результат точнее, чем нормальное распределение, но все же имеет погрешность, так как для конкретных материалов следует подбирать множитель при функции в вещественном множестве чисел [1–3].

Представленная в данной статье трехмерная теплофизическая модель точечной лазерной сварки нержавеющей стали AISI 316L дополняет математическую модель, описанную в предыдущей работе авторов [4]. Кроме того, уточнены коэффициенты при функции супергаусса, полученные с помощью серии вычислительных экспериментов и сравнения их с экспериментальными данными.

Цель работы — подбор коэффициентов при функции, описывающей граничное условие воздействия лазерного излучения таким образом, чтобы добиться его наилучшей сходимости с экспериментальными данными, и применение на практике новой функции, описывающей изменение удельной теплоемкости от температуры с учетом скрытой теплоты плавления.

Методы решения и описание подхода моделирования. Исследовался процесс лазерного воздействия на нержавеющую сталь AISI 316L с последующим плавлением. При плавлении рассматривался фазовый переход первого рода из твердого состояния в жидкий. Граничное условие парообразования и абляция вещества не учитывались, так как моделировался процесс воздействия малой мощности, в связи с чем материал не достигал температуры кипения. Не рассматривалась деформация свободной поверхности ванны расплава AISI 316L. Моделирование осуществлялось в программном пакете ANSYS 2022R1 в модуле CFX методом конечных объемов.

Математическое описание задачи. Основной математический аппарат в виде управляющих уравнений и условий однозначности, заложенный в данной статье, и обоснования использования воздействия лазера через граничное условие, а не как объемный источник теплоты, представлены в работе [4].

Управляющие уравнения. Ниже приведены следующие управляющие уравнения:

– для учета тепломассопереноса — уравнение полной энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S, \quad (1)$$

где ρ — плотность; H — энтальпия; k — коэффициент теплопроводности; ∇T — градиент температуры; \vec{v} — вектор скорости потока; S — объемный источник теплоты;

– для учета динамики жидкости используется классическое уравнение Навье — Стокса

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

где \vec{u} — вектор скорости потока; t — время; p — давление; μ — динамическая вязкость; \vec{f} — вектор массовых сил;

– для замыкания системы уравнений — уравнение неразрывности реальной жидкости

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

Граничные условия. В отличие от предыдущей работы авторов [4], здесь для описания граничного условия воздействия лазерного излучения было использовано супергауссово распределение

$$q_{las} = a \frac{P}{\pi r^2} (1 - R) e^{-b \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}}, \quad (4)$$

где a, b — коэффициенты, характеризующие увеличение значение пика функции и скорость возрастания и убывания соответственно; P — мощность лазерного излучения; r — радиус лазерного пятна; x_0, y_0 — координаты центра лазерного пятна, заданного в декартовой системе координат.

При моделировании процессов лазерной обработки материалов принято брать значения a и b равными 3, которые и характеризуют супергауссово распределение [5, 6]. Это связано с тем, что при использовании коэффициентов со значениями, равными 1, рассеяние энергии происходит у основания функции, как это показано на рис 1.

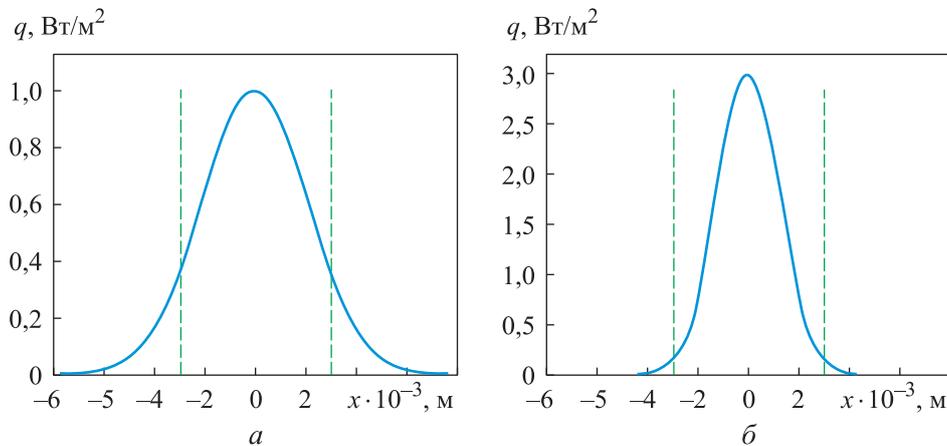


Рис. 1. Графики функций для классического распределения Гаусса при $a = 1, b = 1$ (а) и супергауссового распределения при $a = 3, b = 3$ (б)

Проинтегрировав функцию (4) со значениями коэффициентов a и b , равными 1 в интервале от $-\infty$ до $+\infty$, и сравнив значение той же функции с интегралом в пределах от -3 до $+3$, получим, что 15,74 % общего значения плотности мощности находятся вне радиуса действия лазерного пучка.

Аналогично, проведя все вычисления до функции (4) со значениями коэффициентов a и b , равными 3, получим, что потери плотности энергии составляют 1,44 %.

Граничные условия конвекционной и радиационной теплоотдачи записаны аналогично приведенным в [7].

Физические свойства. В качестве основного материала расчетной области была выбрана нержавеющая сталь AISI 316L, теплофизические свойства которой [8] представлены на рис. 2.

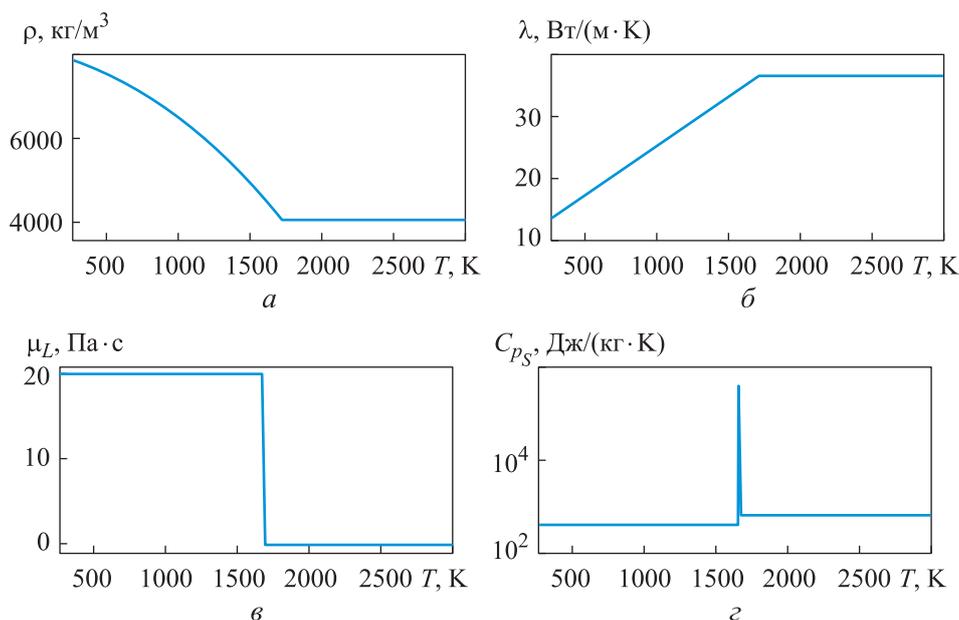


Рис. 2. Изменение теплофизических свойств нержавеющей стали AISI 316L в зависимости от температуры T в интервале от солидуса до ликвидуса:

a — плотности ρ ; $б$ — теплопроводности λ ; $в$ — динамической вязкости μ_L ;
 $г$ — удельная теплоемкость C_{pS}

Для того чтобы был учтен фазовый переход от твердого к жидкому металлу в интервале температур солидуса и ликвидуса, уравнения удельной теплоемкости и динамической вязкости изменяются согласно нижеприведенным формулам (5) и (6) соответственно:

$$\mu(T) = \mu_L + \frac{(\mu_S - \mu_L)}{1 + e^{-a \frac{T - T_m}{a}}}; \quad (5)$$

$$C_p(T) = C_{pL} + \frac{(C_{pS} - C_{pL})}{1 + e^{-a \frac{T - T_m}{a}}} + \frac{H_m}{T_m - T_0} \cdot e^{-\frac{(T - T_m)^2}{a^2}}. \quad (6)$$

Здесь 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; T_0 — референсная температура материала; a — температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода.

Следует заметить, что в формуле (6) скрытая теплота плавления делится на температуру плавления вещества минус референсная температура, что отсутствовало в предыдущей работе авторов [4] и коррелирует с работой [9]. Другие теплофизические постоянные для материала AISI 316L, а также их источники приведены в ранее опубликованной работе авторов [4].

Описание модели и схема эксперимента. Было проведено два эксперимента на нержавеющей стали AISI 316L с фиксированным временем воздействия и диаметром лазерного пучка, которые задавались программно, и с разной мощностью. Для этого был использован лазерный иттербиевый волоконный лазер ЛС-6-К фирмы IPG Photonics, представленный на рис. 3, а, б [10].

Для проявления зоны термического воздействия использовался процесс электролитического травления. Визуальное исследование и последующие замеры глубины и ширины ванны расплава проводились с помощью инвертированного микроскопа AXIO Observer.A1m, представленного на рис. 3, в.

После замеров глубины и ширины ванны расплава была подготовлена модель на основе программного комплекса ANSYS 2022R2 и модуля CFX. Расчетная область представляет собой параллелепипед, размеры которого приведены на рис. 4. Источник нагрева расположен на верхней части расчетного домена. Поскольку CFX не позволяет решать двумерные задачи, использовался трехмерный подход при условии симметрии в разрезе диаметра лазерного пучка.

Для стабилизации решения при фазовом переходе материала и ускорения расчета задачи была применена неравномерная сетка со сгущением в зоне воздействия лазерного пучка. Размер элементов подбирался экспериментально. Общее количество элементов сетки — 291 400. Минимальный размер ячейки в области зарождения жидкой ванны расплава составлял 0,05 мм.

Параметры процесса нагрева и настройки решателя для физических и численных экспериментов при разных мощностях лазерного воздействия и фиксированных диаметре и времени воздействия приведены в табл. 1.

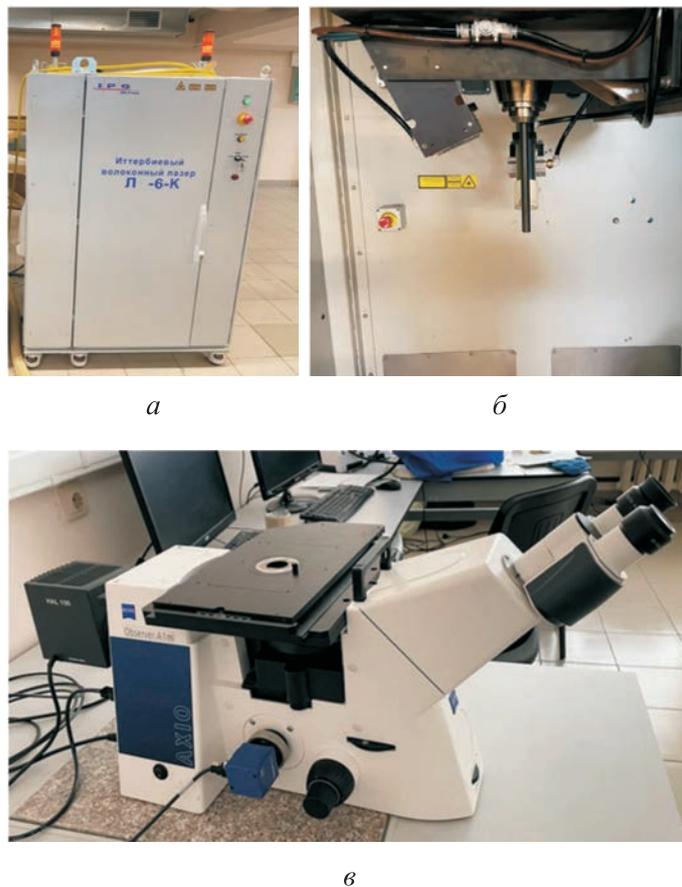


Рис. 3. Оборудование для проведения эксперимента и исследования образцов:
а — оптоволоконный лазерный источник ЛС-6-К; б — лазерная головка;
в — инвертированный микроскоп AXIO Observer.A1m

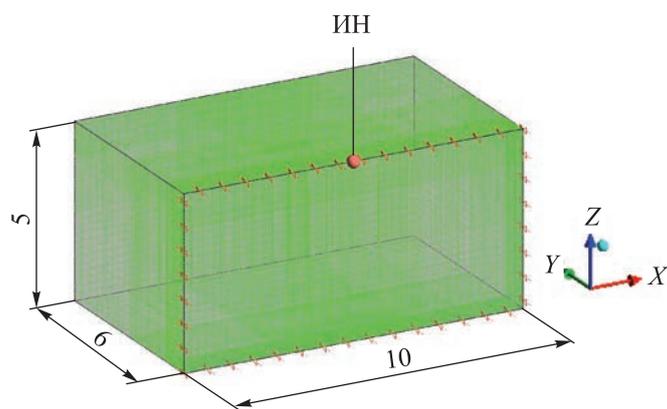


Рис. 4. Схема расчетного домена с размерами (мм) и указанием на источник нагрева (ИН)

**Параметры лазерного излучения при натурном
и численном моделировании двух экспериментов**

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Мощность, Вт	1500	2000
Диаметр пятна нагрева, мм	3	3
Шаг времени расчета, с	0,0001	0,0001
Время расчета, с	1	1

Результаты моделирования и их сравнение. После проведения физического эксперимента была выполнена серия численных экспериментов с варьированием коэффициентов a и b и фиксацией физических свойств материала и параметров лазерного излучения. Результаты физических и численных экспериментов с оптимальными параметрами коэффициентов a и b , равными 2,8 и 1,6 соответственно, представлены на рис. 5.

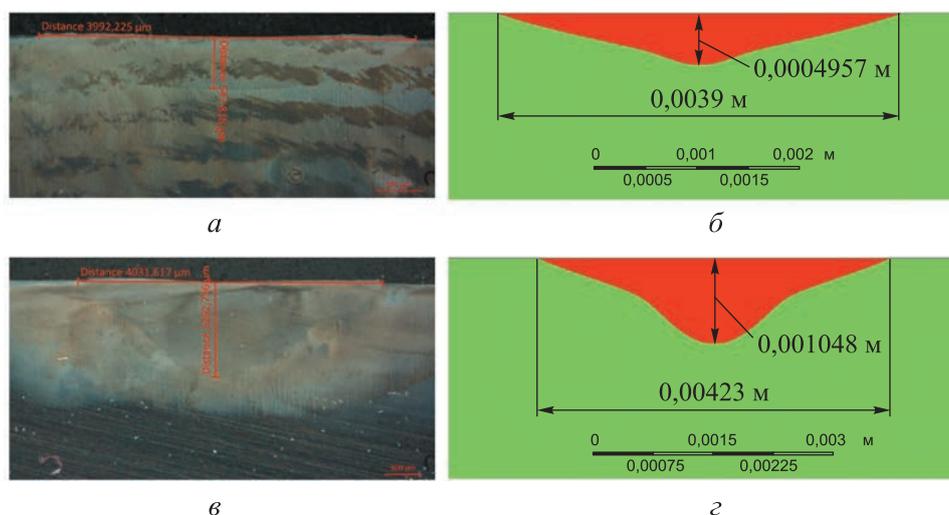


Рис. 5. Результаты физических и численных экспериментов с замами глубины и ширины ванны расплава:

a — физический эксперимент с мощностью лазера 1500 Вт; $б$ — численный эксперимент с мощностью лазера 1500 Вт; $в$ — физический эксперимент с мощностью лазера 2000 Вт; $г$ — численный эксперимент с мощностью лазера 2000 Вт

Для сравнения характеристики ванны расплава, представленные в виде размеров и относительной погрешности, показаны в табл. 2. Очевидно, что при увеличении мощности лазера возрастает и относительная погрешность при измерении глубины и ширины ванны расплава. Это связано с тем, что при высокой мощности воздействия лазерного излучения должны учитываться граничные условия паро-

образования, давления насыщенных паров и оптический пробой как механическое воздействие на свободную поверхность ванны расплава. Тем не менее даже без учета дополнительных граничных условий относительная погрешность при высоких мощностях не достигает 20 %.

Таблица 2

Результаты физических и численных экспериментов

Данные	Эксперимент 1 (мощность лазера 1500 Вт)		Относительная погрешность измерения, %	Эксперимент 2 (мощность лазера 2000 Вт)		Относительная погрешность измерения, %
	физический	численный		физический	численный	
Ширина, м	0,003992	0,003981	0,276	0,004032	0,004230	4,911
Глубина, м	0,000548	0,000496	9,489	0,001268	0,001048	17,350

Заключение. Представлена нелинейная двухфазная трехмерная математическая модель точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L с учетом плавления материала, конвективных течений в ванне расплава и на ее поверхности, а также конвективных и радиационных теплоотдач и ее верификация. Проведение вычислительных экспериментов и сопоставление их результатов с реальными данными позволяет сделать следующие выводы:

- в качестве источника лазерного излучения предложено использовать супергауссово распределение с подобранными безразмерными коэффициентами a и b при функции (4), которые следует подбирать в соответствии с параметрами лазерной установки, в частности для ЛС-6-К оптимальными значениями являются $a = 2,8$, $b = 1,6$.

- уточнена функция (6), аппроксимирующая сигмоидальный переход значений удельной теплоемкости с учетом скрытой теплоты плавления;

- проанализированы полученные в результате физического эксперимента данные и сопоставлены с численными результатами;

- показано, что с возрастанием мощности лазера увеличивается ошибка при измерении глубины и ширины ванны расплава, так как при повышении мощности необходимо внедрять в модель новые граничные условия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Шапеев В.П., Исаев В.И., Черепанов А.Н. Численное моделирование лазерной сварки стальных пластин. *Физическая мезомеханика*, 2011, № 2, с. 107–114.

[2] Rong Y., Wang L., Wu R., Xu J. Visualization and simulation of 1700MS sheet laser welding based on three-dimensional geometries of weld pool and keyhole.

- Int. Journal of Thermal Sciences*, 2022, vol. 171, p. 107257. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107257
- [3] Ke W., Bu X., Oliveira J.P., Xu W., Wang Z., Zeng Z. Modeling and numerical study of keyhole-induced porosity formation in laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 133, p. 106540. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106540
- [4] 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-2-2248
- [5] Zhao J., Jiang P., Geng S., Guo L., Wang Y., Xu B. Experimental and numerical study on the effect of increasing frequency on the morphology and microstructure of aluminum alloy in laser wobbling welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 267–282. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.008
- [6] Mohan A., Ceglarek D., Auinger M. Effect of beam oscillation on the fluid flow during laser welding. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59, pp. 1846–1851. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.435
- [7] Zhao J., Jiang P., Geng S., Guo L., Wang Y., Xu B. Experimental and numerical study on the effect of increasing frequency on the morphology and microstructure of aluminum alloy in laser wobbling welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 267–282. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.008
- [8] 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, p. 105325. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325
- [9] Fathi A., Toyserkani E., Khajepour A., Durali M. Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, iss. 12, pp. 2613–2623. DOI: 10.1088/0022-3727/39/12/022
- [10] Gorunov A.I., Gilmudinov A.Kh. Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition. *Optics & Laser Technology*, 2017, vol. 88, pp. 157–165. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.09.012

Статья поступила в редакцию 25.05.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Никифоров С.А., Шварц И.В., Гильмутдинов А.Х., Горунов А.И. Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-8-2295>

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

Шварц Иван Валерьевич — аспирант кафедры «Лазерных и аддитивных технологий», ассистент кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.

Гильмутдинов Альберт Харисович — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.

Горунов Андрей Игоревич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.

Numerical simulation and verification of the AISI 316L stainless steel laser spot heating

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

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

The paper considers the laser spot heating process in the AISI 316L stainless steel sample and its three-dimensional mathematical model. It proposes an option in this process numerical simulation by introducing a laser radiation source specified as the super Gaussian distribution with refined and experimentally selected dimensionless coefficients. Boundary conditions of convection and radiative heat transfer, as well as the Marangoni convection on the melting pool free surface, were taken into account. Metal phase transition from solid to the liquid aggregation state was realized within the solidus and liquidus temperature ranges due to effective functions of heat capacity and viscosity. Geometrical characteristics of the melt pools obtained during a number of practical experiments were compared with the data determined by numerical solution. It is shown that the results in both the options quantitatively and qualitatively coincide with the insignificant error. Conclusions are made on the error in the numerical solution.

Keywords: laser heating, Marangoni convection, melting pool, computational fluid dynamics, finite volume method, verification

REFERENCES

- [1] Shapeev V.P., Isaev V.I., Cherepanov A.N. Chislennoe modelirovanie lazernoy svarki stalnykh plastin [Numerical modeling of laser welding of steel plates]. *Fizicheskaya mezhmekhanika — Physical Mesomechanics*, 2011, no. 2, pp. 107–114.
- [2] Rong Y., Wang L., Wu R., Xu J. Visualization and simulation of 1700MS sheet laser welding based on three-dimensional geometries of weld pool and keyhole. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, vol. 171, p. 107257. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107257>
- [3] Ke W., Bu X., Oliveira J. P., Xu W., Wang Z., Zeng Z. Modeling and numerical study of keyhole-induced porosity formation in laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 133, p. 106540. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106540>
- [4] Nikiforov S.A., Shvarts I.V., Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. Issledovanie formy vannы rasplava pri lazernom vozdeystvii na stal AISI 316L s uchetom konveksii Marangoni [Study of the melt pool shape under laser treatment of AISI 316L steel taking into account Marangoni convection effect]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2248>
- [5] Zhao J., Jiang P., Geng S., Guo L., Wang Y., Xu B. Experimental and numerical study on the effect of increasing frequency on the morphology and microstructure of aluminum alloy in laser wobbling welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.008>
- [6] Mohan A., Ceglarek D., Auinger M. Effect of beam oscillation on the fluid flow during laser welding. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59, pp. 1846–1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.435>

- [7] Zhao J., Jiang P., Geng S., Guo L., Wang Y., Xu B. Experimental and numerical study on the effect of increasing frequency on the morphology and microstructure of aluminum alloy in laser wobbling welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.008>
- [8] 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, p. 105325. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325>
- [9] Fathi A., Toyserkani E., Khajepour A., Durali M. Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, iss. 12, pp. 2613–2623. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/12/022>
- [10] Gorunov A. I., Gilmutdinov A. Kh. Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition. *Optics & Laser Technology*, 2017, vol. 88, pp. 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.09.012>

Nikiforov S.A., Postgraduate, Senior Lecturer, Department of Laser and Additive Technologies, KNITU—KAI named after A.N. Tupolev. e-mail: sanikiforov@kai.ru

Shvarts I.V., Postgraduate, Assistant, Department of Laser and Additive Technologies, KNITU—KAI named after A.N. Tupolev.

Gilmutdinov A.Kh., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Laser and Additive Technologies, KNITU—KAI named after A.N. Tupolev.

Gorunov A.I., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Laser and Additive Technologies, KNITU—KAI named after A.N. Tupolev.