

ным для формирования гомогенной структуры широкого спектра сплавов.

В работе [8] экспериментально и численно исследовалось распространение фронта кристаллизации в процессе лазерной наплавки в ультразвуковом поле. Показано, что ультразвуковая энергия увеличивает максимальную температуру и, как следствие, время жизни ванны расплава.

Командой ученых [9] предложена двумерная осесимметричная численная модель распространения ультразвуковых волн в ванне расплава. Механизм колебаний основан на генерации ультразвуковых волн высокой интенсивности в сформированной ванне расплава без учета фазовых переходов и гидродинамического решения. Показано, что воздействие ультразвуковых колебаний ведет к дефрагментации игольчатых структур.

В большинстве работ при моделировании процесса лазерной обработки в ультразвуковом поле используются одно- или двухфазные модели с фиксированной поверхностью ванны расплава. Данный подход не позволяет учитывать деформацию свободной поверхности при термокапиллярном течении и воздействии ультразвука. Это связано с тем, что при использовании коммерческих пакетов прикладных программ пользователь сильно ограничен во вводе граничных условий и сторонних уравнений динамики.

Цель данной работы — математически описать и программно реализовать процесс точечного лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 40 кГц с учетом тепловых потерь и термокапиллярных течений; проанализировать влияние ультразвуковых колебаний на объем и геометрию ванны расплава по сравнению с классическим подходом; при решении многофазных задач предложить методы стабилизации численного решателя; провести верификацию численной модели на основе реального эксперимента.

Методы решения и описание подхода моделирования. Для предоставления реалистичной модели лазерного нагрева при лазерном воздействии и для обеспечения сходимости и вычислительной эффективности численного моделирования в исследовании сделаны следующие упрощения и предложения.

1. Число Рейнольдса потока жидкости в процессе лазерной наплавки намного меньше $5 \cdot 10^4$, поэтому предполагается, что жидкий металл в ванне расплава представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость с ламинарным течением.

2. Материал подложки и порошковый материал считаются изотропными и однородными.

3. Моделируется процесс точечной теплопроводной сварки, при котором плотность мощности лазерного излучения не превышает

10^6 Вт/см². При таких параметрах температура не достигает точки кипения металла при лазерной обработке, поэтому потерями массы и теплоты, вызванными испарением, и возникающим в результате давлением отдачи пара пренебрегают.

4. Волны, генерируемые источником ультразвука, считаются гармоническими, а потеря энергии при прохождении через сталь учтена решением отдельной задачи механики.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов в программном пакете ANSYS Fluent с применением пользовательских функций User-Defined Function (UDF). Сталь инициализировалась как жидкость со свойствами твердого материала и высокой вязкостью до температуры плавления.

Управляющие уравнения. Динамика течения жидкой фракции в ванне расплава и газовая среда описаны тремя законами сохранения — массы, импульса и энергии:

- закон сохранения массы с исключенным источником массы:

$$\frac{\partial \alpha \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \alpha \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

где α — объемная доля вещества; ρ — скалярное поле плотности; \vec{u} — векторное поле скоростей; t — время;

- закон сохранения момента:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \vec{u}) + \nabla(\alpha \vec{u} \vec{u}) = -\frac{\alpha}{\rho} \nabla p + \alpha \vec{g} + \vec{f}_b + \vec{f}_M + \vec{f}_P + \vec{f}_{bf}, \quad (2)$$

где p — скалярное поле давления; \vec{g} — ускорение свободного падения; \vec{f}_b — тепловая плавучесть, т. е. плавучесть, возникающая вследствие разницы плотности, которая вызвана изменением температуры; \vec{f}_M — силы Марангони, вызванные градиентами поверхностного натяжения при изменениях температуры; \vec{f}_P — силы давления, вызванные переменным воздействием ультразвукового источника; \vec{f}_{bf} — сила, противодействующая паразитным течениям;

- закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho H) + \nabla(\alpha \rho \vec{u} H) = \nabla(\alpha k \nabla p) + Q_{laser} + Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (3)$$

где H — энтальпия; k — коэффициент теплопроводности; Q_{laser} — объемный источник лазерного воздействия; Q_{conv} — объемный источник конвекционной теплоотдачи; Q_{rad} — объемный источник радиационной теплоотдачи.

На всех границах расчетного домена применялось условие теплоизоляции

$$\vec{q} = \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0, \quad (4)$$

где T — скалярное поле температур; \vec{n} — вектор нормали к поверхности.

Массовые силы и объемные источники тепла. Так как решается многофазная задача и интерфейс между газообразной средой и твердым материалом находится непосредственно в домене, возникает необходимость использования объемных источников нагрева, теплоотдачи и термокапиллярной конвекции, но с приведением их к соответствующей размерности.

Объемный источник лазерного излучения задавался по формуле, аналогичной [10]:

$$Q_{laser} = q \cdot e^{\frac{z-z_0}{z_b-z_0} \ln \chi} \cdot e^{-3 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r_z^2}}; \quad (5)$$

$$q = (1-A) \frac{3\eta Q_L \ln \chi}{\pi(1-e^{-3})(z_b-z_0) \left\{ r_0^2 - r_b^2 \chi - 2 \frac{r_b-r_0}{\ln \chi} \left[r_0 - r_b \chi - \frac{r_b-r_0}{\ln \chi} (1-\chi) \right] \right\}}, \quad (6)$$

где x_0 , y_0 , z_0 — координата центра лазерного пятна; z_b — координата нижнего источника теплоты; χ — коэффициент пропорциональности пиковых плотностей мощности между верхней и нижней поверхностями источника теплоты; η — энергоэффективность лазера; r_0 — радиус лазерного пятна; r_b — радиус нижнего источника теплоты.

Рассеяние теплоты, вызванное конвективным теплообменом и тепловым излучением, определяется формулами соответственно:

$$Q_{conv} = -h_c (T - T_0) l^{-1}; \quad (7)$$

$$Q_{rad} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) l^{-1}, \quad (8)$$

где h_c — коэффициент конвекции; T_0 — температура окружающей среды; l — ширина межфазного интерфейса; ε — коэффициент излучения поверхности; σ — постоянная Больцмана.

Сила Марангони представляет собой силу сдвига горячего капилляра, касательную к свободной границе раздела, обусловленную градиентом поверхностного натяжения $\frac{\partial \sigma_{\text{н}}}{\partial T}$, и ее выражение имеет вид

$$\vec{f}_M = \frac{\partial \sigma_n}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}} l^{-1}, \quad (9)$$

где σ_n — коэффициент поверхностного натяжения; \vec{s} — тангенциальный к поверхности единичный вектор.

Следует отметить, что температурный коэффициент поверхностного натяжения оказывает существенное влияние на конвекцию в ванне расплава. Неизотермическая конвекция представляет собой симметричную обратную циркуляцию в поперечном сечении. Когда температурный коэффициент поверхностного натяжения отрицательный, левая часть будет вытекать против хода часовой стрелки, а правая — по ходу часовой стрелки.

Распределение давления вследствие высокочастотного воздействия на подложку можно описать так:

$$P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \sin(2\pi vt), \quad (10)$$

где $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; A — амплитуда колебания; λ — длина волны ультразвуковых волн; v — частота колебания.

Для учета ультразвукового воздействия в уравнение (2) необходимо добавить силу воздействия переменного давления, которое с учетом (10) определяется по уравнению

$$\vec{f}_P = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x, y, z, t). \quad (11)$$

Реализованные в MATLAB распределения полей переменного давления, жидкой фазы металла и антиградиента давления исходя из уравнений (10) и (11) схематично изображены на рис. 1.

Поскольку сталь была представлена как флюид со свойствами твердого вещества, даже большие значения динамической вязкости не могут полностью остановить течения в домене. Чтобы исключить скорости в домене, для твердой фазы был введен момент силы, противодействующий движению элементарных жидких частиц в виде уравнения

$$\vec{f}_{bf} = \alpha \cdot \text{velocity_multiplier} \cdot \vec{u},$$

где *velocity_multiplier* — множитель для регулировки работы противодействующей силы в промежутке от 0 до 1.

Значение *velocity_multiplier* зависит от температуры и характеризует включение/отключение тормозящей силы согласно формуле

$$velocity_multiplier = \frac{-\rho \cdot 10^{12}}{1 + e^{\frac{T-T_m}{3}}}, \quad (12)$$

где T_m — температура плавления, равная среднему значению от температур солидуса и ликвидуса.

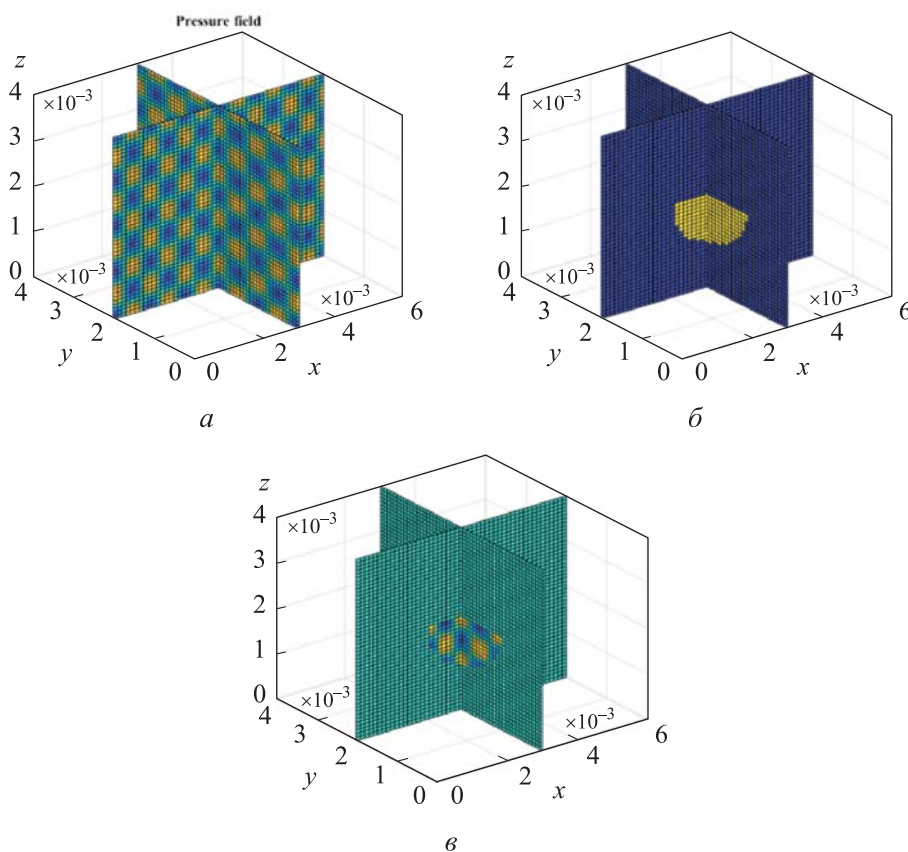


Рис. 1. Распределение поля переменного давления (а), сформированной ванны расплава (б) и антиградиента давления (в) в ванне расплава

Физические свойства. В качестве материалов для расчетов использовали аргон (как воздушную среду) и нержавеющую сталь марки AISI 316L (как твердую среду). Свойства материалов аналогичны представленным в работах [11, 12], за исключением введенного коэффициента поверхностного натяжения для учета меняющейся свободной поверхности ванны расплава и термокапиллярной конвекции (рис. 2). Оба материала задавались как Fluid, но нержавеющая сталь меняла теплофизические свойства в процессе фазового перехода первого рода.

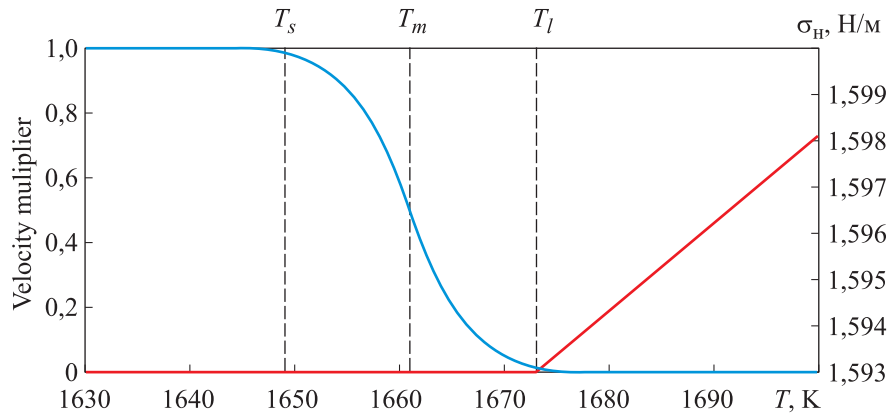


Рис. 2. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры и соответствующая ему сигмоида *velocity_multiplier*

Для всех величин при фазовом переходе использовалась сигмоида как аппроксимирующая функция для стабилизации решателя.

Описание модели. Расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами, указанными на рис. 3. Объемный источник лазерного нагрева располагался в середине расчетного домена. Расчетный домен представлял собой равномерную декартову сетку с линейным размером ребра 0,1 мм. Общее количество элементов составляет 36000.

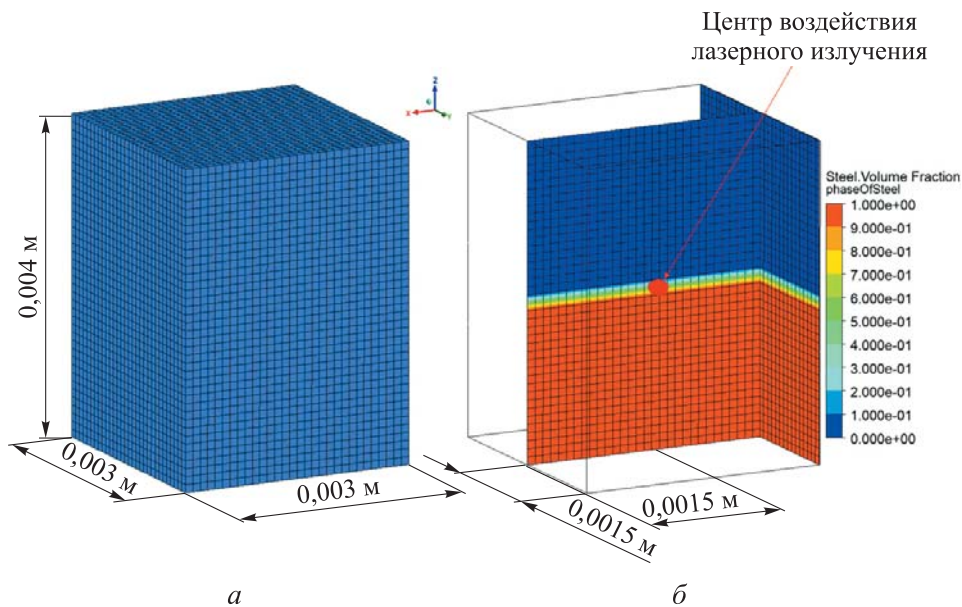


Рис. 3. Схема расчетного домена с указанием размеров (а) и распределение фазы как начального условия (б)

Проводились два расчета: без введения и с введением ультразвуковых колебаний. Параметры процесса нагрева, воздействия ультразвука и настройки решателя приведены ниже:

Мощность, Вт	3000
Радиус пятна нагрева, мм	0,5
Шаг расчета, с	0,0001
Начальное время, с	0
Время расчета, с	0,3
Частота колебания соноэлектрода, Гц	40000
Длина волны ультразвука в жидком металле, мм	0,3

Использовалась PISO схема, так как для колебаний давления в процессе решения она стабильнее. На межфазной границе вследствие высоких скоростей плавления образуются термокапиллярные течения. Для стабилизации скорости и энергии для обоих переменных использовалась First Order Upwind схема дискретизации.

Шаг по времени равен $2,25 \cdot 10^{-6}$ с, он был подобран таким образом, чтобы обеспечить подробное описание синусоидального поведения колебания давления (рис. 4).

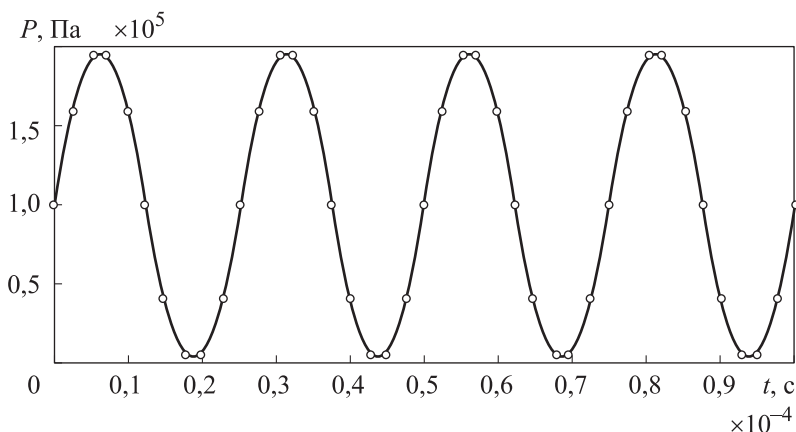


Рис. 4. Синусоидальная зависимость давления от времени в фиксированном месте пространства с метками дискретизации для частоты 40 кГц

Результаты моделирования и сравнение. Динамика формирования ванны расплава без введения ультразвукового поля представлена на рис. 5.

По мере нагрева лазерным излучением увеличивается размер ванны расплава и на поверхности образуются тангенциальные течения, направленные к центру лазерного пятна. Поверхностные потоки, встречаясь в центре, закручиваются и переносят тепло вдоль оси симметрии ванны расплава в глубину. Таким образом происходит

естественное охлаждение поверхности ванны расплава и увеличивается глубина проплавления. Максимальная температура в области смещается вдоль оси OZ вглубь. Динамика формирования ванны расплава в ультразвуковом поле представлена на рис. 6.

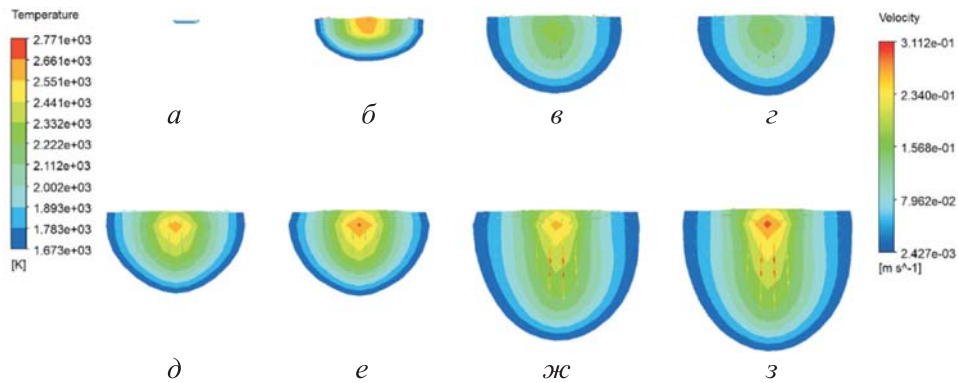


Рис. 5. Динамика формирования ванны расплава в отсутствие ультразвуковых колебаний в момент времени t , равный 0,002 с (*a*); 0,01755 с (*б*); 0,07305 с (*в*); 0,08205 с (*г*); 0,08805 с (*д*); 0,10305 с (*е*); 0,27705 с (*ж*); 0,30555 с (*з*)

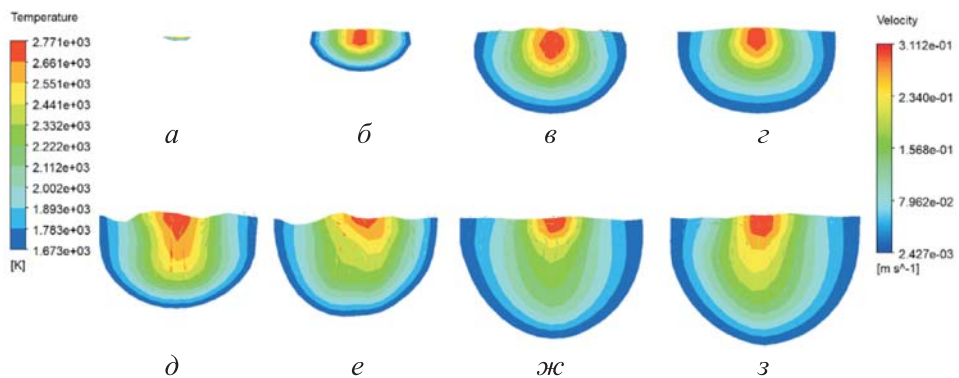


Рис. 6. Динамика формирования ванны расплава с введением ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц в момент времени t , равный 0,002 с (*a*); 0,01755 с (*б*); 0,07305 с (*в*); 0,08205 с (*г*); 0,08805 с (*д*); 0,10305 с (*е*); 0,27705 с (*ж*); 0,30555 с (*з*)

Введение ультразвукового поля позволяет снизить скорость естественной конвекции и, как следствие, увеличить ширину ванны расплава. Максимальное значение температуры в меньшей степени, относительно плавления без введения ультразвука, растягивается вдоль оси OZ . Решение двухфазной задачи позволяет отслеживать деформацию свободной поверхности в виде волнообразных колебаний, которые влияют на скорости конвективных течений и передачу импульса вглубь ванны расплава. При этом наблюдается асимметричная

картина деформации свободной поверхности, что связано с изменяющимся по времени полем давления, которое влияет на направление течения в ванне расплава. Типичная картина распределения антиградиента давления в вычислительном домене приведена на рис. 7.

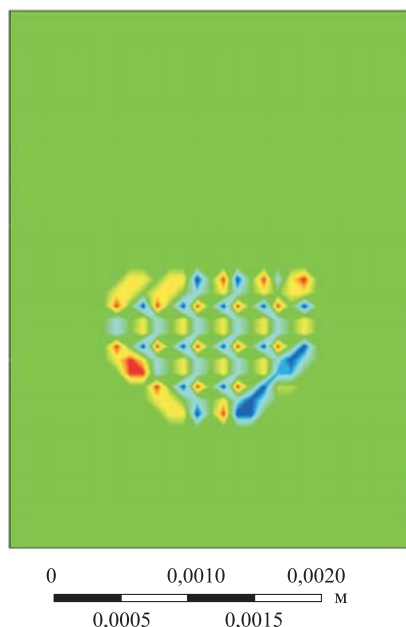


Рис. 7. Скалярное поле распределения X составляющей антиградиента давления

Дисперсность значений антиградиента связана с разреженностью вычислительной сетки.

С помощью инструментов постпроцессора ANSYS Fluent измерялись контрольные показатели для сравнения двух экспериментов: объем ванны расплава, ширина и глубина зоны термического воздействия, средняя магнитуа скорости в ванне расплава (табл. 1).

Таблица 1

Параметры ванны расплава для момента времени $t = 0,30555$ с

Показатель	Без ультразвука	С ультразвуком	Разница относительно без ультразвука, %
Объем ванны расплава, мм ³	0,64	0,85	32,8
Ширина ванны расплава, мм	1,1	1,2	9,09
Глубина ванны расплава, мм	0,9	0,9	0
Средняя скорость потока, м/с	0,107	0,073	-31,69

Анализ проведенных расчетов позволяет сделать вывод о том, что с введением ультразвуковых колебаний увеличиваются объем зоны термического воздействия и ширина ванны расплава. Данные показатели могут быть связаны с тем, что изменяется картина течений по всей области жидкого металла, а именно уменьшается скорость вдоль оси *OZ* и интенсифицируются течения вдоль жидкого контура.

Верификация численного эксперимента. Для подтверждения корректности численного решения был проведен натурный эксперимент точечного лазерного воздействия на нержавеющую сталь марки AISI 316L. Процесс лазерного точечного нагрева проводился с помощью иттербиевого волоконного лазера ЛС-6-К производства фирмы IPG Photonics. Мощность лазерного излучения 3 кВт, диаметр лазерного пучка 3 мм. Ультразвуковое воздействие осуществлялось с помощью излучателя Ланжевена мощностью 100 Вт и частотой 40 кГц. Оптические снимки зон термического воздействия для двух проведенных экспериментов показаны на рис. 8. Количественные характеристики натурального эксперимента представлены в табл. 2.

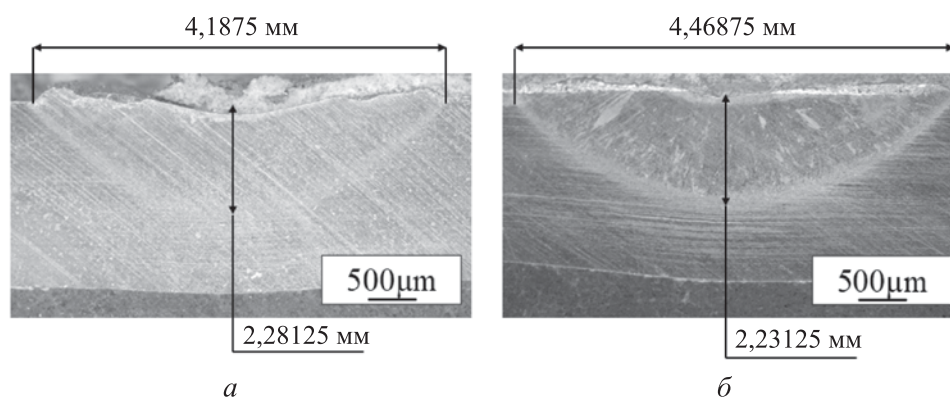


Рис. 8. Фото зон термического воздействия после лазерного воздействия без использования ультразвука (*а*) и с его использованием (*б*)

Таблица 2

Значения характеристик натурального эксперимента

Показатель ванны расплава, мм	Воздействие		Разница относительно воздействия без ультразвука, %
	без ультразвука	с ультразвуком	
Ширина	4,19	4,47	6,68
Глубина	2,28	2,31	1,32

Эксперимент показал, что введение ультразвуковых колебаний также способствует увеличению диаметра ванны расплава, что соотносится с численным расчетом.

Заключение. Представлена трехмерная многофазная модель воздействия лазерного излучения на вещество в ультразвуковом поле с фазовым переходом первого рода для нержавеющей стали AISI 316L. Рассмотрен случай для материала с положительной производной поверхностного натяжения по температуре, что является наиболее распространенным, но частным случаем.

Анализ численных и реальных экспериментов позволяет сформулировать следующие выводы:

– ввод ультразвуковых колебаний в ванну расплава уменьшает скорости естественной конвекции течений на поверхности и в жидкой фазе металла;

– при использовании ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц увеличивается объем ванны расплава на 33 %;

– ширина ванны расплава при использовании ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц увеличена на 9 % по сравнению с расчетами без введения ультразвука;

– ультразвуковые колебания уменьшают среднюю скорость течения в ванне расплава, что напрямую влияет на распределение теплоты и геометрию ванны расплава.

Представлен и программно реализован математический аппарат для стабилизации решения при моделировании многофазных течений и ультразвуковых колебаний. Численные эксперименты верифицированы с использованием лазерного комплекса и количественно подтверждают выводы, сделанные по численной модели.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ–2030») и гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bedenko D.V., Kovalev O.B., Smurov I., Zaitsev A.V. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 95, pp. 902–912. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.046>
- [2] Zhao Z., Wang J., Du W., Bai P., Wu X. Numerical simulation and experimental study of the 7075 aluminum alloy during selective laser melting. *Optics and Laser Technology*, 2023, vol. 167, p. 109814. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109814>
- [3] Li Y., Chen L., Lu L., Zhang X., Zhou W., Ren, X. Numerical and experimental study of RHEAs surface morphology and defect in selective laser melting. *In-*

- International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, vol. 118, p. 106484. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106484>
- [4] Zhang D., Prasad A., Bermingham M.J., Todaro C.J., Benoit M.J., Patel M.N., Qiu D., StJohn D.H., Qian M., Easton M.A. Grain refinement of alloys in fusion-based additive manufacturing processes. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, vol. 51, issue 9, pp. 4341–4359. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05880-4>
- [5] Cui Y., Xu C., Han Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation. *Scripta Materialia*, 2006, vol. 55, issue 11, pp. 975–978. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.035>
- [6] Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*, 2016, vol. 106, pp. 144–154. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016>
- [7] Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., Zhang D., Bermingham M.J., Lui E.W., Brandt M., StJohn D.H., Qian M. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, issue 1, Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13874-z>
- [8] Xiao M., Jiang F., Guo C., Song H., Dong T. Investigation on microstructure and mechanical properties of Fe-based amorphous coatings prepared via laser cladding assisted with ultrasonic vibration. *Optics and Laser Technology*, 2023, vol. 162, p. 109294. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109294>
- [9] Ivanov I.A., Dub V.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Kudinov I.A., Gapeev A.A., Krivilyov M.D., Simakov N.N., Gruzd S.A., Lomaev S.L., Dremov V.V., Chirkov P.V., Kichigin R.M., Karavaev A.V., Anufriev M.Yu., Kuper K.E. Effect of laser-induced ultrasound treatment on material structure in laser surface treatment for selective laser melting applications. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, issue 1. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02895-8>
- [10] Ke W., Liu Y., Teshome F.B., Zeng Z. Numerical study on multiphase evolution and molten pool dynamics of underwater wet laser welding in shallow water environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 220, p. 124976. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124976>
- [11] 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>
- [12] 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>

Статья поступила в редакцию 25.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Никифоров С.А., Шварц И.В., Рубля Р.С., Мельников А.С., Горунов А.И., Гильмутдинов А.Х. Многофазная трехмерная модель лазерного точечного нагрева и плавления стали AISI 316L в ультразвуковом поле. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 7. EDN THOQVI

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

Шварц Иван Валерьевич — аспирант кафедры «Лазерные и аддитивные технологии», ассистент кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева. e-mail: IVShvarts@kai.ru

Рубля Ратмир Сергеевич — аспирант кафедры «Лазерных и аддитивных технологий», ассистент кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева. e-mail: RSRublya@kai.ru

Мельников Антон Сергеевич — аспирант кафедры «Лазерные и аддитивные технологии», ассистент кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева. e-mail: ASMelnikov@kai.ru

Горунов Андрей Игоревич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева.
e-mail: AIGorunov@kai.ru

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

Multiphase three-dimensional model of the AISI 316L steel laser point heating and melting in the ultrasonic field

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

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

The paper presents a multiphase mathematical model of the AISI 316L stainless steel point heating and melting in the ultrasonic field and its numerical implementation by the finite volume method in the ANSYS Fluent software package. To apply volumetric heat sources and external forces acting on the melt pool, original algorithms based on the user-defined function in the C language are introduced. The paper provides description of the method for using ultrasonic vibrations in the computational domain. It analyzes the ultrasonic vibrations influence on the melt pool flow, width, depth and volume in relation to the numerical experiment with the same parameters, but without the ultrasound. The mathematical model was verified by a full-scale experiment and confirmed qualitative and quantitative characteristics of the ultrasound effect on formation of the melt pool.

Keywords: laser heating, Marangoni convection, melt pool, computational fluid dynamics, finite volume method, ultrasound, steel

The work was performed using financing from the Strategic Academic Leadership Program (“PRIORITET–2030”) by the Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev and the Grant provided by the Russian Science Foundation (Project no. 23-29-00219).

REFERENCES

- [1] Bedenko D.V., Kovalev O.B., Smurov I., Zaitsev A.V. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 95, pp. 902–912. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.046>
- [2] Zhao Z., Wang J., Du W., Bai P., Wu X. Numerical simulation and experimental study of the 7075 aluminum alloy during selective laser melting. *Optics and Laser Technology*, 2023, vol. 167, p. 109814. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109814>
- [3] Li Y., Chen L., Lu L., Zhang X., Zhou W., Ren, X. Numerical and experimental study of RHEAs surface morphology and defect in selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, vol. 118, p. 106484. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106484>
- [4] Zhang D., Prasad A., Bermingham M.J., Todaro C.J., Benoit M.J., Patel M.N., Qiu D., St. John D.H., Qian M., Easton M.A. Grain refinement of alloys in fusion-based additive manufacturing processes. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, vol. 51, issue 9, pp. 4341–4359. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05880-4>
- [5] Cui Y., Xu C., Han Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation. *Scripta Materialia*, 2006, vol. 55, issue 11, pp. 975–978. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.035>
- [6] Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*, 2016, vol. 106, pp. 144–154. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016>

- [7] Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., Zhang D., Bermingham M.J., Lui E.W., Brandt M., StJohn D.H., Qian M. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, issue 1. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13874-z>
- [8] Xiao M., Jiang F., Guo C., Song H., Dong T. Investigation on microstructure and mechanical properties of Fe-based amorphous coatings prepared via laser cladding assisted with ultrasonic vibration. *Optics and Laser Technology*, 2023, vol. 162, p. 109294. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109294>
- [9] Ivanov I.A., Dub V.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Kudinov I.A., Gapeev A.A., Krivilyov M.D., Simakov N.N., Gruzd S.A., Lomaev S.L., Dremov V.V., Chirkov P.V., Kichigin R.M., Karavaev A.V., Anufriev M.Yu., Kuper K.E. Effect of laser-induced ultrasound treatment on material structure in laser surface treatment for selective laser melting applications. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, issue 1. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02895-8>
- [10] Ke W., Liu Y., Teshome F. B., Zeng Z. Numerical study on multiphase evolution and molten pool dynamics of underwater wet laser welding in shallow water environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 220, p. 124976. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124976>
- [11] Nikiforov S. A., Shvarts I. V., Gilmudinov A. Kh., Gorunov A. I. Chislennoye modelirovanie i verifikatsiya tochechnogo lazernogo nagreva nerzhavayushchey stali AISI 316L [Numerical simulation and verification of the AISI 316L stainless steel laser spot heating]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, issue 8. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-8-2295>
- [12] Nikiforov S. A., Shvarts I. V., Gilmudinov A. Kh., Gorunov A. I. Issledovaniye formy vanny 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, issue 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2248>

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

Rublya R.S., Postgraduate, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.
e-mail: RSRublya@kai.ru

Melnikov A.S., Postgraduate, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.
e-mail: ASMelnikov@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

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