

Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений в жидком металле и форму ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L

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

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация

Представлена двумерная однофазная математическая модель лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L с учетом конвективных и радиационных тепловых потерь с периодическими возмущениями среды, а также ее численная реализация в программном комплексе ANSYS Fluent. Исследована структура течений в жидком металле вне ультразвукового влияния и при введении ультразвуковых колебаний различных частот модуляции (20, 40 и 60 кГц) в ванну расплава. Показано влияние разных частот модуляции ультразвука на скорости расплава и температуру ванны. Проведено сравнение с классическим методом лазерной сварки. Проанализированы усредненные показатели скалярного поля магнитуд скоростей и их дисперсия для каждого рассчитанного случая. Для качественного анализа дана карта соответствий между расчетом без воздействия ультразвука с расчетами при введении ультразвуковых колебаний. Верификация проведенных расчетов выполнена посредством соответствия с микроструктурой после лазерной обработки по косвенным характерным признакам.

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

Введение. Развитие современного мирового и отечественного машиностроения напрямую связано с модернизацией техники и технологией производства изделий. Одним из универсальных и эффективных инструментов для создания и обработки деталей машин являются лазерные установки. С использованием лазерного оборудования выполняются такие базовые технологические операции, как резка, гравировка, сварка и наплавка. По сравнению с другими процедурами и способами преимущество применения лазерной техники заключается в том, что с ее помощью можно получать сложные контуры во время раскроя листового металла. Готовое изделие обладает высокими показателями качества и не нуждается в дополнительной обработке.

В отличие от стандартных средств создания и обработки деталей (литьем, штамповкой, фрезерованием, дуговой сваркой и т. д.), достаточно полно изученных в технологических циклах, влияние лазерного излучения на вещество все еще остается наукоемким. Это связано с высокими скоростями нагрева и охлаждения металла и малыми размерами ванны расплава, показатели которых трудно фиксировать при проведении экспериментов [1, 2]. Для фундаментального

понимания процессов, которые могут критически влиять на микроструктуру и геометрию конечного изделия при лазерной обработке, а также оптимизации необходимо создание цифровых моделей.

В настоящее время представлено довольно большое количество работ, посвященных лазерной сварке и наплавке металлов. Проведены экспериментальные исследования при варьировании источников излучения и материалов для обработки. Сформулированы основные математические модели, описывающие тепловые явления в процессе лазерного нагрева и гидродинамику течений в ванне расплава. При этом наблюдается экспоненциальный рост публикаций по данной тематике (рис. 1), что напрямую связано с развитием лазерного оборудования и его большей доступностью по всему миру.

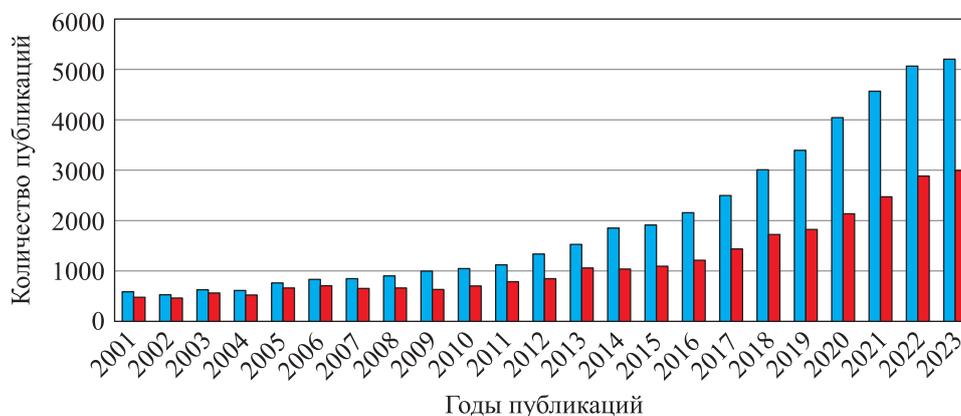


Рис. 1. Количество публикаций, посвященных лазерной обработке, на основе данных сайта Science Direct:
■ — тер Laser welding; ■ — тер Laser cladding

При увеличении количества исследований, связанных с лазерной обработкой сталей, с 2010 г. повышается интерес к изучению влияния ультразвуковых колебаний в процессе лазерной обработки на конечную структуру и геометрию изделия. Большинство работ на эту тему посвящены экспериментальным исследованиям, и в них указывают на изменение микроструктуры материала при ультразвуковом воздействии на ванну расплава [3–6]. Показательной является работа [7], в которой исследованы механические свойства и микроструктурные характеристики нержавеющей стали ER321 при наплавке в ультразвуковом (УЗ) поле. Установлено, что зернистая структура нержавеющей стали ER321 сводится к равноосным дендритам (в УЗ) из грубых столбчатых дендритов (без УЗ). Ультразвук эффективно измельчает размеры зерен, уменьшая их примерно на 150 %, и гомогенизирует зернистую структуру слоев осаждения.

На сегодня описано большое количество способов формирования УЗ-колебаний в процессе лазерной обработки. Для каждой отдельной конфигурации генерации УЗ требуется своя математическая модель и численный подход к решению такой задачи. Тем не менее остается открытым вопрос о контроле зон влияния ультразвука. Один из способов предсказания итоговой формы ванны расплава и зоны определенной структуры — описание течения жидкой фракции в процессе обработки, так как именно скорости потоков и их структура влияют на конфигурацию теплового поля.

Цель данной работы — математически описать процесс точечной лазерной сварки в УЗ-поле, генерируемом сонотродом; исследовать структуру течений в ванне расплава при воздействии УЗ разных частот и без него; верифицировать модель на основе экспериментальных данных.

Методы решения и описание подхода моделирования. При генерации ультразвуковых колебаний, которые находятся в диапазоне от 20 кГц до 1000 МГц, требуется крайне высокая дискретизация по времени (порядка 1 нс). В связи с этим для повышения вычислительной производительности предполагаются следующие упрощения и допущения:

– как и в большинстве работ, посвященных моделированию лазерной сварки, полагается, что число Рейнольдса намного меньше $5 \cdot 10^4$, поэтому была выбрана ламинарная модель течения жидкого металла;

– обрабатываемый материал считается изотропным и однородным;

– плотность мощности лазерного излучения не превышает 10^{10} Вт/м², в связи с чем можно пренебречь потерями массы и теплоты, вызванными испарением, и возникающим в результате давлением отдачи пара.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле 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 тепломассопереноса формируемой ванны расплава описывается тремя управляющими уравнениями:

уравнение сохранения массы с исключенным источником

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

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

уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla p), \quad (2)$$

где H — энтальпия; k — коэффициент теплопроводности; p — скалярное поле давления;

уравнение сохранения момента

$$\frac{\partial}{\partial t}(\vec{u}) + \nabla \cdot (\vec{u} \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{f}_{bf} + \vec{f}_p, \quad (3)$$

где \vec{g} — ускорение свободного падения; \vec{f}_{bf} — сила противодействующего момента для устранения паразитных течений; \vec{f}_p — силы давления (вызванные переменным воздействием ультразвукового источника).

Распределение давления P вследствие высокочастотного воздействия на подложку можно описать так

$$P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \sin(2\pi vt), \quad (4)$$

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

Для учета ультразвукового воздействия необходимо добавить в уравнение (3) силу воздействия переменного давления, которое определяется с учетом (4) по уравнению

$$\vec{f}_p = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x, y, z, t). \quad (5)$$

Изображение распределения скалярного поля переменного давления исходя из уравнений (4) во всем вычислительном домене представлено на рис. 2. Визуализация осуществлялась в постпроцессоре ANSYS CFD-Post.

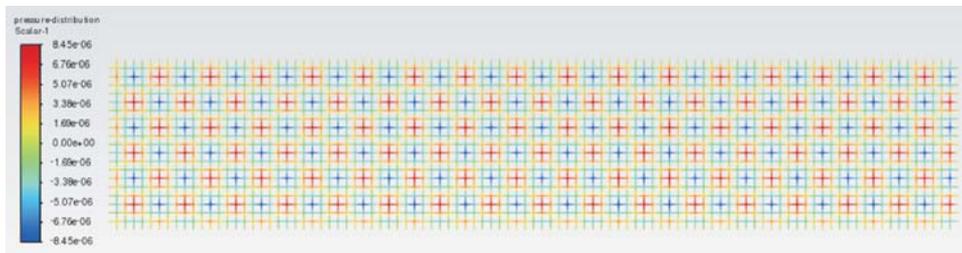


Рис. 2. Распределение поля переменного давления во всем вычислительном домене

Поскольку сталь была представлена как жидкость 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

$$\vec{f}_{bf} = \alpha \cdot velocity_multiplier \cdot \vec{u}, \quad (6)$$

где α — температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода; $velocity_multiplier$ — 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

$$velocity_multiplier = \frac{-\rho \cdot 10^{12}}{1 + e^{\frac{T - T_m}{3}}}, \quad (7)$$

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

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

$$q_{conv} = -h_c (T - T_0); \quad (8)$$

$$q_{rad} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (9)$$

где h_c — коэффициент конвекции; T — скалярное поле температур; T_0 — температура окружающей среды; ε — коэффициент излучения поверхности; σ — постоянная Больцмана.

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

$$\vec{f}_M = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}}, \quad (10)$$

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

Следует заметить, 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 циркулировать против хода часовой стрелки, а правая — по ходу часовой стрелке.

Физические свойства. В качестве материала для проведения расчетов была выбрана нержавеющая сталь AISI 316L, изменения ее теплофизических свойств представлены на рис. 3. Материал задавался как жидкость, но его теплофизические свойства изменялись в процессе фазового перехода первого рода.

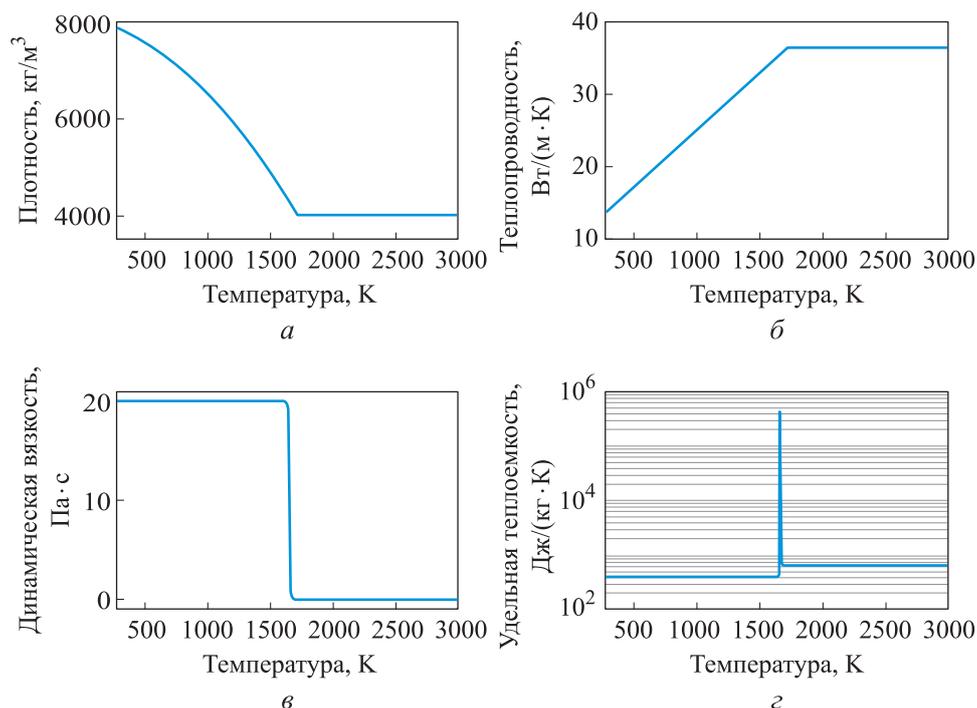


Рис. 3. Зависимость от температуры свойств стали AISI 316L: плотности (а), теплопроводности (б), динамической вязкости (в), удельной теплоемкости (з)

Для всех величин при фазовом переходе использовалась сигмоида как аппроксимирующая функция для стабилизации решателя. Другие физические и теплофизические постоянные для материала AISI 316L, используемые в данной работе, приведены ниже:

Температура, К:		
ликвидуса T_L		1673
солидуса T_S		1649
плавления T_m		1660
внешней среды T_0		300
Скрытая теплота плавления H_m , Дж/кг		$4 \cdot 10^5$
Коэффициент конвекции h_c , (Вт/м²·К)		5
Коэффициент излучения поверхности ε		0,8

Динамическая вязкость металла, Па · с:	
жидкого μ_L	0,006
твердого μ_S	20
Удельная теплоемкость металла, Дж/(кг · К) :	
жидкого C_{pL}	458,98
твердого C_{pS}	692,98
Градиент поверхностного натяжения $\partial\gamma/\partial T$, Н/(м · К)	0,00019
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 представляла собой прямоугольник, размеры которого приведены на рис. 4. Объемный источник лазерного нагрева был расположен наверху и в середине расчетной области.

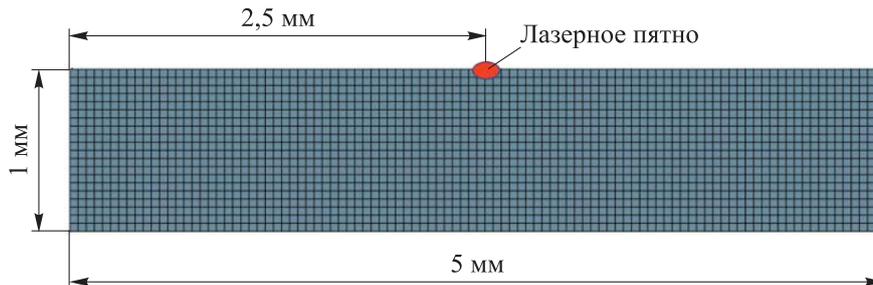


Рис. 4. Схема расчетного домена с указанными размерами

Расчетный домен представлял собой равномерную декартову сетку с линейным размером ребра 0,05 мм, общее количество элементов — 2000. На левой, правой и нижней частях расчетной области использовалось граничное условие нулевого потока, соответствующее условию теплоизоляции.

Были выполнены четыре расчета: без введения ультразвуковых колебаний, а также с введением ультразвуковых колебаний частотой 20 кГц, 40 кГц и 60 кГц. Неизменяемые параметры численной задачи нагрева лазерным излучением (процесса нагрева, воздействия ультразвука и настройки решателя) приведены ниже:

Мощность, Вт	1500
Радиус пятна нагрева, мм	1
Шаг расчета, с	10^{-6}
Длина ультразвуковой волны в жидком металле, мм	0,3

Значение амплитуды колебания соответствовало использованному в работе [5].

Применялась блок-схема алгоритма PISO, используемая для задач с расчетной сеткой, так как она стабильнее для колебаний давления в процессе решения. 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 10^{-6} с, так как он способен обеспечить оптимальную дискретизацию синусоидального изменения давления по времени. На рис. 5 представлены графики изменения давления по времени в произвольной зафиксированной точке пространства для разных частот воздействия. Непрерывная линия показывает аналитическое значение давления, точка — значение давления, которое будет передаваться на каждом вычислительном шаге.

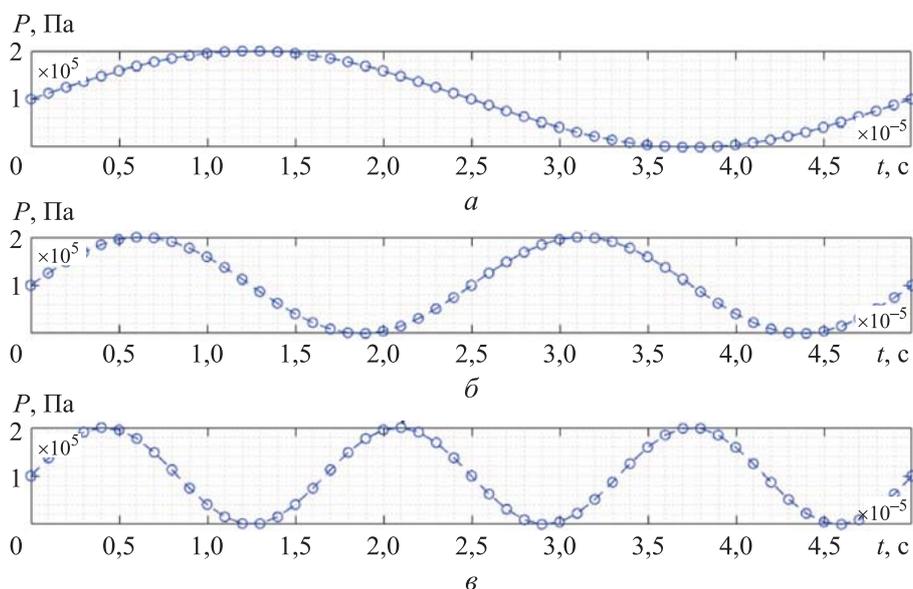


Рис. 5. График синусоидальной зависимости давления от времени в фиксированном месте пространства с метками дискретизации для частот 20 кГц (а), 40 кГц (б), 60 кГц (в)

Результаты моделирования и сравнение с экспериментом. Результаты численных решений динамики температурного и скоростного полей для референсного случая без воздействия ультразвуковых колебаний представлены на рис. 6.

Черный контур показывает межфазную границу между твердым материалом и жидким металлом. На 0,003-й секунде начинается формирование ванны расплава, а с 0,013-й секунды наблюдается формирование течений на свободной поверхности ванны расплава под действием

термокапиллярных сил. Межфазная граница ровная. Установившееся поле течений фиксируется к 0,03-й секунде моделирования. Формируется вихрь с крупными застойными зонами в четырех областях ванны расплава. Геометрия ванны расплава в сечении имеет ярко выраженный перегиб, связанный со сформированными течениями и переносом теплоты. Данная картина подтверждается экспериментом в работе [8]. Температурное поле вытянуто вдоль оси симметрии ванны расплава, что может вести к неравномерной итоговой микроструктуре.

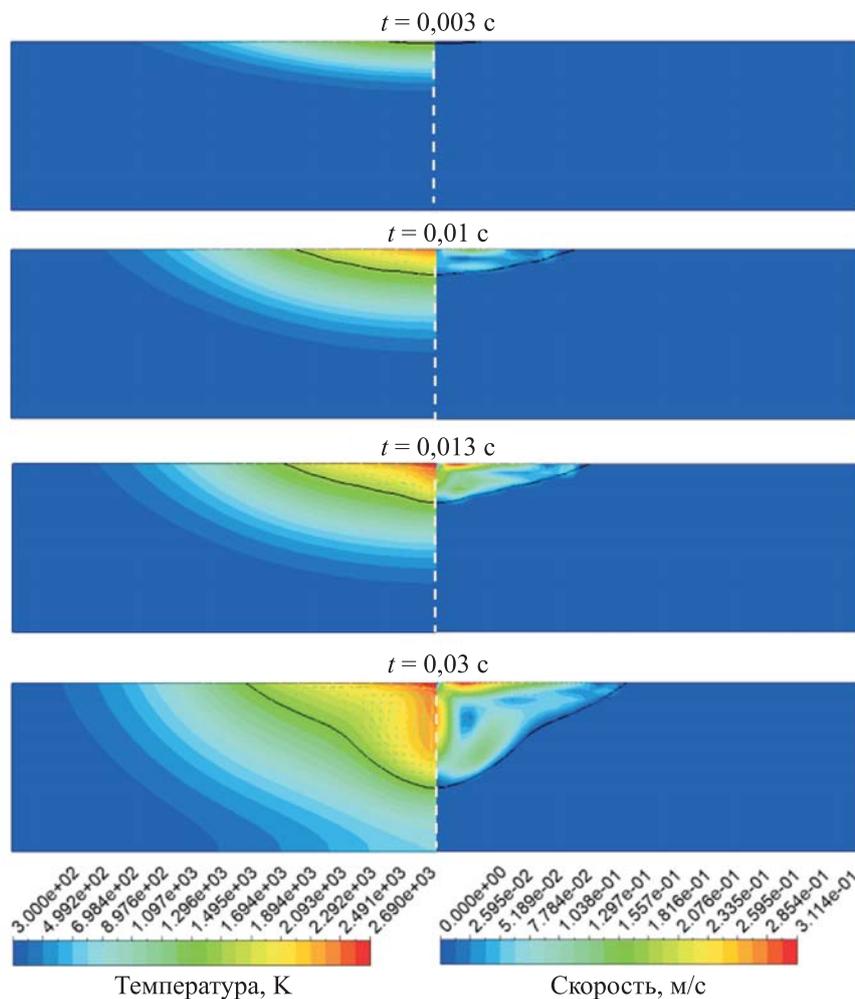


Рис. 6. Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева без ультразвука

Динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в ультразвуковом поле частотой 20 кГц, представлена на рис. 7.

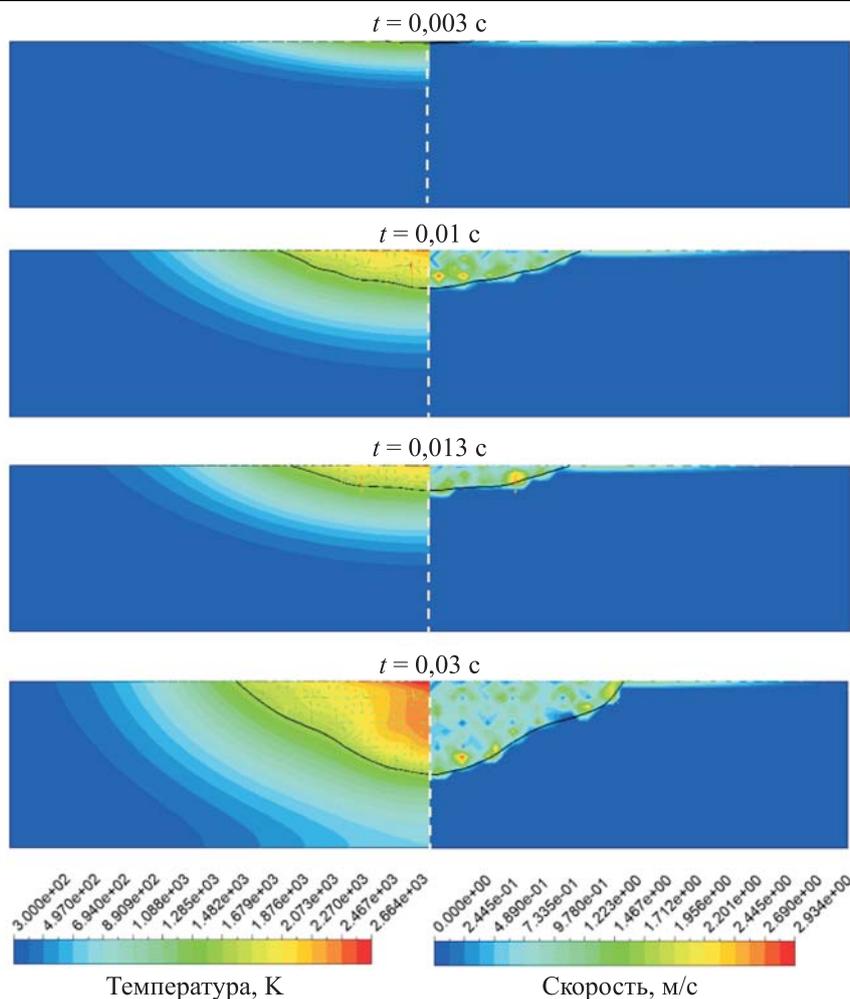


Рис. 7. Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 20 кГц

Время начала формирования ванны расплава аналогично референсному решению. На 0,013-й секунде наблюдаются равномерная ванна расплава и отсутствие поверхностных направленных течений, так как колебания нивелируют любые сторонние течения. Ванна расплава, сформированная на 0,03-й секунде, имеет менее выраженный перегиб относительно референсного решения, течения хаотичны и магнитуды скорости равномерно распределены. Температурное поле равномернее относительно референсного решения.

Динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в ультразвуковом поле частотой 40 кГц показано на рис. 8. Время начала формирования ванны расплава аналогично времени в предыдущем решении. На 0,013-й секунде наблюдаются равномерное распределение

температуры относительно референсного решения и криволинейная межфазная граница вследствие периодической структуры поля скоростей. Итоговая форма межфазной границы имеет несимметричный вид. Именно на этой частоте возникает периодическая структура колебания центрального течения (аналогично вихревым дорожкам Кармана). При увеличении времени моделирования это приведет к расширению площади ванны расплава.

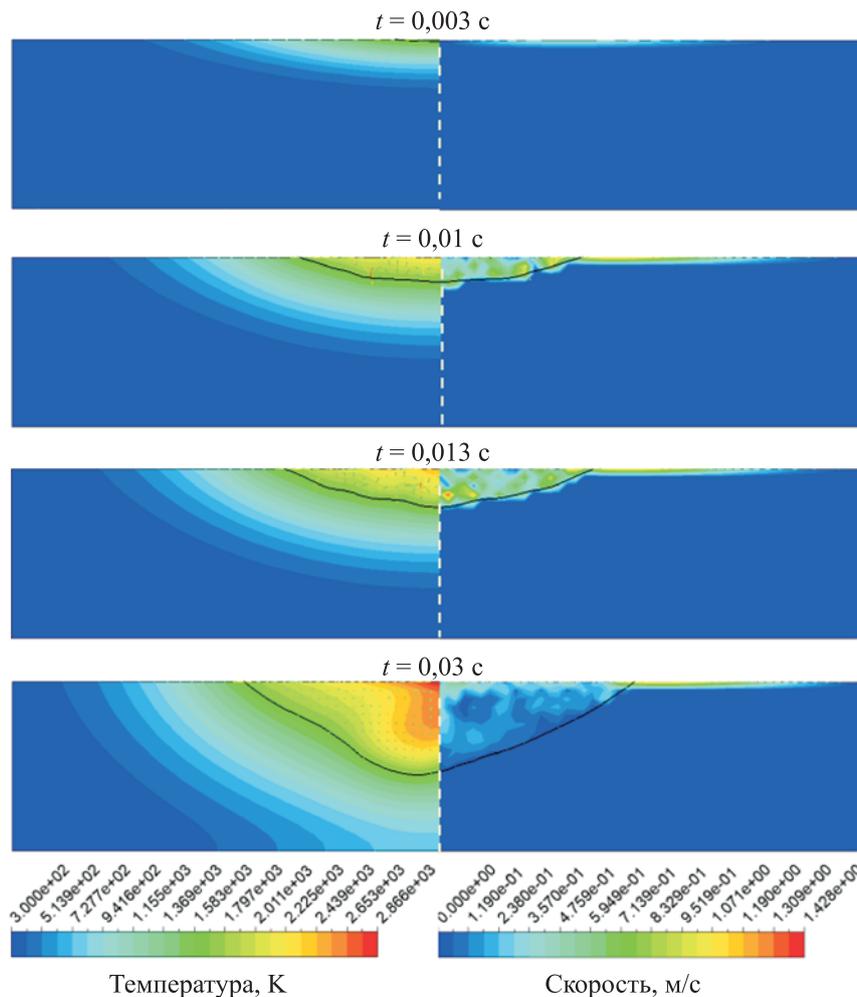


Рис. 8. Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 40 кГц

Динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в ультразвуковом поле частотой 60 кГц, представлена на рис. 9. При воздействии УЗ частотой 60 кГц формируется наиболее равномерное распределение поля скоростей, что хорошо видно на рис. 8. Это связано

с увеличением моды колебаний и образованием большего количества разнонаправленных течений со скоростью большей, чем у термокапиллярных и конвекционных сил.

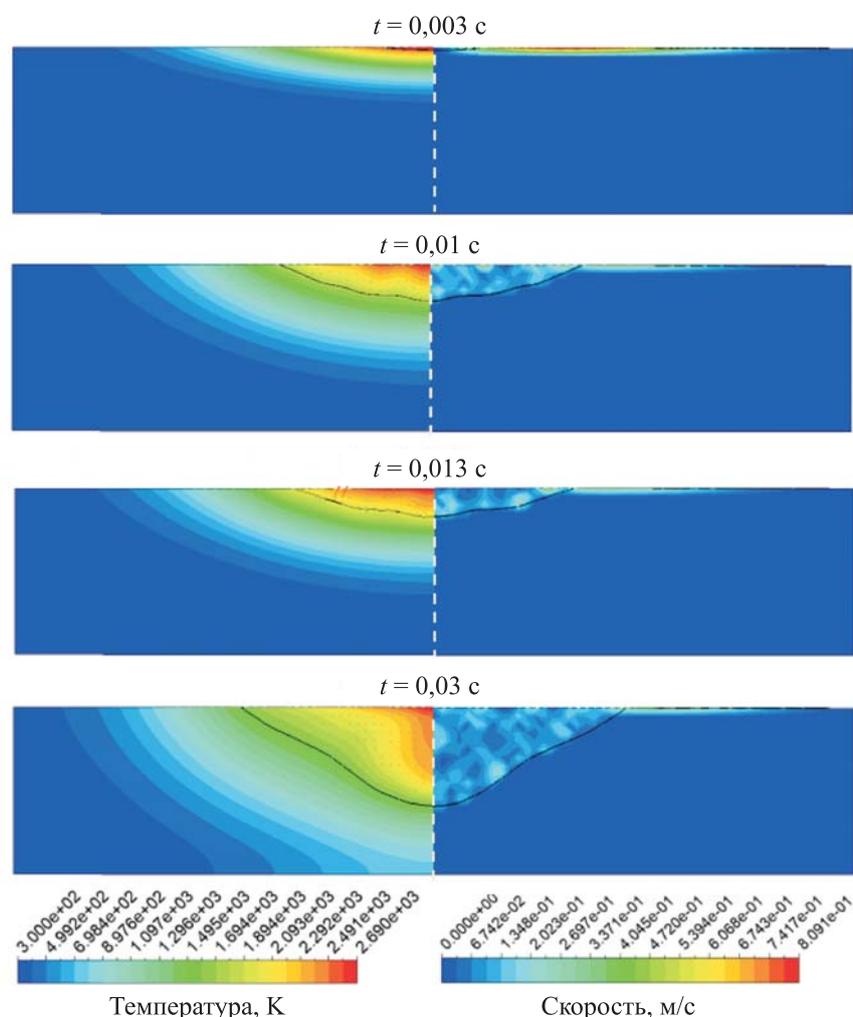


Рис. 9. Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 60 кГц

Для анализа скоростных характеристик при периодическом влиянии необходимо брать средние значения. На рис. 10 представлены графики плотности распределения значений скоростей в ванне расплава в течение 0,025...0,03 с. Для его проведения была написана программа на языке MATLAB, которая считывала поля скоростей в каждой вершине сетки и по заданным отрезкам скоростей подсчитывала их количество. Увеличение частоты ультразвукового поля ведет к образованию течений с меньшей дисперсией скоростей.

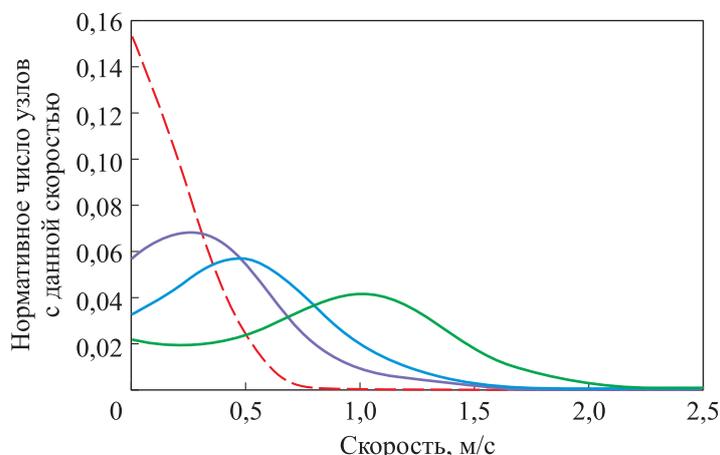


Рис. 10. Плотность распределения скоростей в ванне расплава при разных частотах УЗ-поля, кГц: 0 (—); 20 (—); 40 (—); 60 (—)

Приведенный выше тезис подтверждается рассчитанными значениями математического ожидания функции плотности, среднеквадратичным отклонением для каждой из приведенных частот УЗ-поля и их отношениями (таблица). Показано, что отношение между дисперсией и среднеквадратичным отклонением равно единице в пределах погрешности, когда ультразвук применяется, в отличие от задачи без использования УЗ. Для случая с введенным УЗ при частоте, равной 60 кГц, разброс скоростей и средняя скорость течений оказываются меньше, что приводит к равномерности конечной структуры после кристаллизации по всей ванне расплава.

Значения характеристик кривых распределений

Частота, кГц	Математическое ожидание скорости, м/с	Среднеквадратичное отклонение, м/с	Отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию
0	0,19	0,21	1,11
20	0,91	0,98	1,08
40	0,54	0,57	1,06
60	0,41	0,43	1,05

С помощью написанной на языке MATLAB программы проанализировано также поле скоростей путем построения карты соответствий между референсным решением и разными частотами воздействия УЗ. На рис. 11 показано, что УЗ с частотой 60 кГц формирует наиболее равномерную структуру скалярного поля магнитуд скоростей.

В работе [9] отмечено, что воздействие ультразвуковых колебаний увеличивает температуру в ванне расплава аналогично полученной численным расчетом в данной статье.

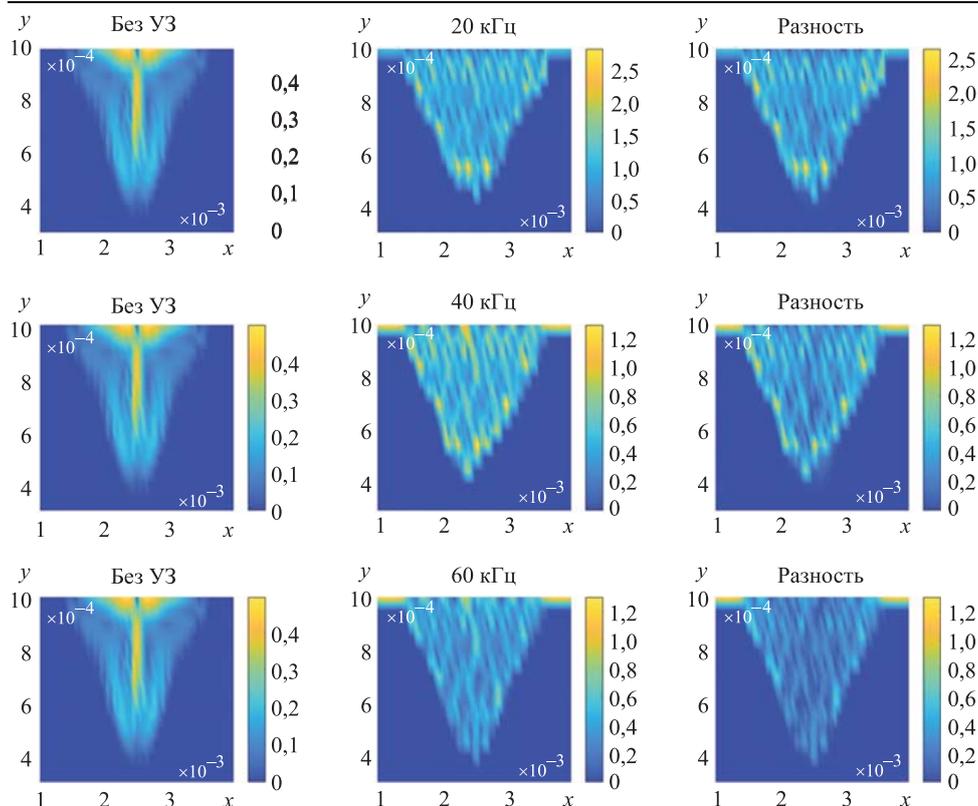


Рис. 11. Карта соответствий скалярных полей магнитуд скоростей между референсным решением и решениями с разными частотами ультразвука

В работе [10] приведена зональная разнородная структура зерен в случае, когда плавление материала производится без ультразвукового воздействия. В случае использования УЗ-воздействия частотой свыше 40 кГц, почти полностью отсутствуют зоны вытянутых кристаллов. Это свидетельствует об отсутствии зон застоев, что согласуется с численными экспериментами. Кроме того, в работах [11–13] показано, что на малых частотах ультразвука (15...22 кГц) значительно повышается микротвердость в отдельных зонах термического воздействия. На данных частотах увеличены средние показатели скоростей и величина дисперсности достигает целых значений (см. рис. 9).

Заключение. Представлена двумерная однофазная численная модель воздействия лазерного излучения на нержавеющую сталь AISI 316L в ультразвуковом поле с фазовым переходом первого рода. Для численной модели воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава написан программный код на языке С. Проанализированы численные и реальные эксперименты, позволяющие сформулировать следующие выводы:

- ввод ультразвукового поля в процесс лазерной обработки сталей дает возможность устранить застойные зоны, появляющиеся вследствие образования вихрей в ванне расплава;
- частота ультразвуковых колебаний влияет на среднюю скорость потока в ванне расплава и дисперсию распределения скоростей. При повышении частоты средняя скорость и дисперсия снижаются;
- численные эксперименты подтверждены по косвенным признакам, согласно экспериментальным работам других авторов;
- наилучшим образом на итоговую структуру течений, формирующую однородную структуру без зон кристаллического роста в данных экспериментах, обеспечило поле частотой 60 кГц;
- применение ультразвукового воздействия повышает температуру в ванне расплава за счет торможения естественных конвекционных течений;
- ввод ультразвука также позволяет убрать вогнутый изгиб зоны термического воздействия благодаря устранению термокапиллярных течений.

Работа по моделированию процессов лазерного воздействия на нержавеющую сталь без использования ультразвуковых воздействий выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ–2030»). Работа по исследованию влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений в процессе лазерной обработки сталей выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fotovvati B., Waynemu S.F., Lewis G., Asadi E.A. Review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- [2] Rominiyi A.L., Mashinini P.M. A critical review of microstructure and mechanical properties of laser welded similar and dissimilar titanium alloy joints. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2024, vol. 9, p. 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100191>
- [3] Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., Brandt M., StJohn D.H., Qian M. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, p. 101632. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101632>
- [4] Ning F., Hu Y., Liu Z., Cong W., Li Y., Wang X. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: A feasibility study. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.074>
- [5] Richter B., Hocker S.J.A., Frankforter E.L., Tayon W.A., Glaessgen E.H. Influence of ultrasonic excitation on the melt pool and microstructure characteristics of Ti-6Al-4V at powder bed fusion additive manufacturing solidification velocities. *Additive Manufacturing*, 2024, vol. 89, p. 104228. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104228>

- [6] Gureev D.M. Prospects for laser-ultrasonic treatment for surface modification, welding, and pattern cutting. *J Russ Laser Res*, 1999, vol. 20, pp. 27–66. <https://doi.org/10.1007/BF02508792>
- [7] Diao M., Guo C., Sun Q., Jiang F., Li L., Li J., Xu D., Liu C., Song H. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 857, p. 144044. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144044>
- [8] 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>
- [9] Ning F., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) manufacturing processes: State of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 51, pp. 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.028>
- [10] Gilmudinov A.Kh., Gorunov A.I., Nyukhlaev O.A., Schmidt M. Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, issues 7–8, pp. 3033–3043. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04825-5>
- [11] Cong W., Ning F. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 121, pp. 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.008>
- [12] Wang T., Mazánová V., Liu X. Ultrasonic effects on gas tungsten arc based wire additive manufacturing of aluminum matrix nanocomposite. *Materials and Design*, 2022, vol. 214, p. 110393. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110393>
- [13] Song H., Jiang F., Guo C., Sun Q., Li H., Yang Z., Li L., Diao M., Zhang Z. Effect of ultrasonic vibration on the microstructure and microhardness of laser cladding Fe-based crystalline/amorphous composite coatings. *Materials Letters*, 2023, vol. 335, p. 133780. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133780>

Статья поступила в редакцию 22.07.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Никифоров С.А., Шварц И.В., Горунов А.И., Гильмутдинов А.Х. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений в жидком металле и форму ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 11. EDN FGOSGW

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

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

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

Study of the of ultrasound vibrations influence on the liquid metal flow structure and shape of the AISI 316L stainless steel melt pool

© S.A. Nikiforov, I.V. Shvarts, 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 two-dimensional single-phase mathematical model of the AISI 316L stainless steel laser heating, taking into account convective and radiation heat losses under the medium periodic disturbances, as well as its numerical implementation in the ANSYS Fluent software package. It studies the liquid metal flow structure without ultrasonic influence and with introduction of the ultrasonic vibrations of different modulation frequencies (20, 40 and 60 kHz) in the melt pool. The paper shows the effect of different ultrasound modulation frequencies on the melt flow rate and temperature in the pool, compares them with the classical laser welding method. Averaged indicators of the scalar field of velocity magnitudes and their dispersion are analyzed for each computation case. For qualitative analysis, a map of correspondences between computation without ultrasound exposure and computation with the ultrasonic vibrations introduction is provided. The computation results are verified by analyzing the microstructure compliance after laser treatment according to the indirect characteristic features.

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

Processes of the laser action on stainless steel without using the ultrasound were stimulated with funds of the Strategic Academic Leadership Program of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev ("PRIORITET-2030). Work on studying the ultrasonic vibrations influence on the flow structure in steel laser treatment was carried out using a Grant from the Russian Science Foundation (Project No. 23-29-00219).

REFERENCES

- [1] Fotovvati B., Waynemu S.F., Lewis G., Asadi E.A. Review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, pp. 1–18. Hindawi Limited.
<https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- [2] Rominiyi A.L., Mashinini P.M. A critical review of microstructure and mechanical properties of laser welded similar and dissimilar titanium alloy joints. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2024, vol. 9, p. 100191. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100191>
- [3] Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., Brandt M., StJohn D. H., Qian M. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, p. 101632. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101632>
- [4] Ning F., Hu Y., Liu Z., Cong W., Li Y., Wang X. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: a feasibility study. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 771–778. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.074>

- [5] Richter B., Hocker S.J.A., Frankforter E.L., Tayon W.A., Glaessgen E.H. Influence of ultrasonic excitation on the melt pool and microstructure characteristics of Ti-6Al-4V at powder bed fusion additive manufacturing solidification velocities. *Additive Manufacturing*, 2024 vol. 89, p. 104228. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104228>
- [6] Gureev D.M. Prospects for laser-ultrasonic treatment for surface modification, welding, and pattern cutting. *J Russ Laser Res*, 1999, vol. 20, pp. 27–66. <https://doi.org/10.1007/BF02508792>
- [7] Diao M., Guo C., Sun Q., Jiang F., Li L., Li J., Xu D., Liu C., Song H. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 857, p. 144044. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144044>
- [8] Nikiforov S.A., Shvarts I.V., Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. Chislennoye modelirovaniye i verifikatsiya tochechnogo lazernogo nagreva nerzhaveyushchey 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, iss. 8. BMSTU. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-8-2295>
- [9] Ning F., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) manufacturing processes: state of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 51, pp. 174–190. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.028>
- [10] Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I., Nyukhlaev O.A., Schmidt M. Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, issues 7–8, pp. 3033–3043. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04825-5>
- [11] Cong W., Ning F. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 121, pp. 61–69. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.008>
- [12] Wang T., Mazánová V., Liu X. Ultrasonic effects on gas tungsten arc based wire additive manufacturing of aluminum matrix nanocomposite. *Materials and Design*, 2022, vol. 214, p. 110393. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110393>
- [13] Song H., Jiang F., Guo C., Sun Q., Li H., Yang Z., Li L., Diao M., Zhang Z. Effect of ultrasonic vibration on the microstructure and microhardness of laser cladding Fe-based crystalline/amorphous composite coatings. *Materials Letters*, 2023, vol. 335, p. 133780. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133780>

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

Gorunov A.I., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the 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