



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.2.07

УДК 621.791

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕССЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ

Р.П. Давлятшин¹, А.В. Перминов¹, Ю.В. Баяндин^{1,2},
Ф.Р. Сауседо-Зендехо³, Д.Н. Трушников¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

³Автономный университет Коауила, Сальтильо, Мексика

О СТАТЬЕ

Получена: 15 июня 2022 г.
Одобрена: 23 июня 2022 г.
Принята к публикации:
08 июля 2022 г.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, проволоочная наплавка, математическая модель, метод гидродинамики сглаженных частиц, вибрационные воздействия, сила поверхностного натяжения.

АННОТАЦИЯ

Применение вибрационных воздействий для целенаправленного влияния на такие процессы, как формирование капли, формирование ванны расплава и кристаллизация наплавляемого валика, позволяет управлять тепломассопереносом в жидкости, процессом кристаллизации и формой валика в технологических процессах наплавки. Рассматривается влияние вибрационных воздействий на характер движения жидкости в капле, которое отражается в изменении значения коэффициента поверхностного натяжения. Предложена математическая модель течения жидкости с учетом силы поверхностного натяжения в формализме метода гидродинамики сглаженных частиц. Этот метод позволяет напрямую учитывать влияние вибрационных воздействий через введение дополнительных граничных условий. Верификация разработанной математической модели проведена в сравнении с натурными экспериментами, в которых определялась зависимость величины коэффициента поверхностного натяжения от амплитуды скорости вибрационных воздействий. Для определения коэффициента поверхностного натяжения реализовано два метода: метод висючей капли и стагагмометрический метод. Реализованная модель удовлетворительно описывает эффект снижения коэффициента поверхностного натяжения для воды. Проведена серия численных экспериментов по определению влияния вибрационных воздействий на значение коэффициента поверхностного натяжения

© Давлятшин Роман Позолович – асп., м.н.с., e-mail: romadavly@gmail.com, [ID](#): 0000-0002-7388-7699.

Перминов Анатолий Викторович – д.ф.-м.н., доц., зав. каф., e-mail: perminov1973@mail.ru, [ID](#): 0000-0003-1927-2949.

Баяндин Юрий Витальевич – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: buv@icmm.ru, [ID](#): 0000-0002-1824-1940.

Феликс Раймундо Сауседо Зендехо – д.т.н., e-mail: fesaucedo@uadec.edu.mx, [ID](#): 0000-0001-7105-7934.

Трушников Дмитрий Николаевич – д.т.н., доц., проф., e-mail: trdimitr@yandex.ru, [ID](#): 0000-0001-7105-7934.

Roman P. Davlyatshin – PhD student, Junior Researcher, e-mail: romadavly@gmail.com, [ID](#): 0000-0002-7388-7699.

Anatolii V. Perminov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, e-mail: perminov1973@mail.ru, [ID](#): 0000-0003-1927-2949.

Yuriy V. Bayandin – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: buv@icmm.ru, [ID](#): 0000-0002-1824-1940.

Felix R. Saucedo-Zendejo – Doctor of Technical Sciences, e-mail: fesaucedo@uadec.edu.mx, [ID](#): 0000-0001-7105-7934.

Dmitriy N. Trushnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: trdimitr@yandex.ru, [ID](#): 0000-0001-7105-7934.



для стали марки 12X18H10T. Выявлено, что при вибрациях с амплитудой скорости, равной 2,0 м/с, наблюдается снижение значения коэффициента поверхностного натяжения на 30 %. Снижение коэффициента поверхностного натяжения должно облегчить реализацию непрерывного стекания металла с проволоки, что может положительно сказаться на формировании металла при проволочной наплавке. Таким образом предложенная математическая модель позволяет явно моделировать эффект влияния вибрационных воздействий на значение коэффициента поверхностного натяжения и позволит в дальнейшем исследовать влияние вибрационных воздействий при аддитивном производстве.

© ПНИПУ

MODELLING THE EFFECT OF VIBRATIONS ON THE SURFACE TENSION OF A LIQUID DROPLET USING MESHLESS METHODS

R.P. Davlyatshin¹, A.V. Perminov¹, Y.V. Bayandin^{1,2},
F.R. Saucedo-Zendejo³, D.N. Trushnikov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

³Autonomous University of Coahuila, Saltillo, Mexico

ARTICLE INFO

Received: 15 June 2022
Approved: 23 June 2022
Accepted for publication: 08 July 2022

Keywords:

additive technologies, wire cladding, mathematical model, smoothed particle hydrodynamics method, vibration effects, surface tension force.

ABSTRACT

Application of vibration impacts for purposeful influence on such processes as drop formation, melt bath formation and crystallization of welding bead allows to control heat and mass transfer in liquid, crystallization process and shape of bead in technological processes of welding. Impact of vibration influences on nature of motion of liquid in the drop, which is reflected in the change of value of surface tension coefficient, is considered in the article. The mathematical model of the liquid flow considering surface tension force in formalism of smoothed particles hydrodynamics method is offered. This method allows direct consideration of the vibration effect by introducing additional boundary conditions. Verification of developed mathematical model is conducted in comparison with in-situ experiments, in which dependence of surface tension coefficient value on amplitude of speed of vibration influences was determined. To determine surface tension coefficient two methods were implemented: pending drop method and stalagmometric method. The implemented model satisfactorily describes the effect of decreasing surface tension coefficient for water. A series of numerical experiments for determining the effect of vibration influences on the value of surface tension coefficient for 12X18H10T steel grade was carried out. It was found that at vibration with speed amplitude equal to 2.0 m/s the decrease of surface tension coefficient value by 30 % is observed. Decrease in surface tension coefficient should facilitate the realization of continuous flowing of metal from the wire, which may positively influence the formation of metal during wire surfacing. Thus, the proposed mathematical model can clearly simulate the effect of vibration effects on the value of the surface tension coefficient and will allow the effect of vibration effects in additive manufacturing to be investigated in the future.

© PNRPU

Введение

В настоящее время процесс аддитивного формирования изделий методом послойной проволочной наплавки успешно реализован различными научными группами, однако остается нерешенным целый ряд фундаментальных проблем, связанных со структурным состоянием сплавов, формируемых в данном процессе: грубое дендритное строение и текстура изделий из титановых сплавов [1], значительная пористость изделий из сплавов на основе алюминия [2], а также грубое дендритное строение и ликвация в изделиях из сплавов на основе железа [3]. Эти структурные особенности материалов, получаемых методом многослойной проволочной наплавки, значительно снижают уровень и однородность по направлению механических свойств (в частности, предела текучести, предела прочности, ударной вязкости, ресурса по малоцикловой и

многоцикловой усталости). Ряд исследователей предлагают решать эту проблему путем применения в процессе аддитивного формирования заготовок послойной наплавкой вибрационных воздействий на расплавленный металл с целью управления формированием структуры [4; 5].

На сегодняшний день известны различные способы введения вибраций в зону сварки, такие как, например, электродуговые вибрации [6; 7], тепловые эффекты когерентного лазерного луча [8], прямое введение вибраций в материал через волновод [9]. Данные методы позволяют улучшить свариваемость без необходимости термообработки, что приводит к сокращению технологического цикла, снижению себестоимости и времени на производство изделий. В работах [4; 5; 10–12] однозначно установлено, что использование механических колебаний в процессах дуговой сварки приводит к улучшению структуры и свойств сварных соединений,

в то время как при сварке без механических колебаний сварные швы обладают более грубой структурой. Погружение волновода в расплавленный алюминий позволяет осуществлять целенаправленную кавитацию, что способствует получению «пеноматериалов» и приводит к перемешиванию при химическом легировании расплава [13]. Авторы работы [9] добились снижения размера зерна и повышения твердости в сварном шве и в зоне термического влияния на алюминиевых сплавах и стали, хотя применяемые подходы к управлению амплитудой колебаний и энергией неясны и сомнительны. В работе [14] источником колебаний выступал модулированный ток, переменное электромагнитное поле или импульсный режим генерации лазерного излучения. Ультразвуковое воздействие успешно применялось при наплавке образцов из никелевого сплава Inconel 625 с чередующейся столбчатой/равноосной структурой по высоте путем последовательного включения и выключения ультразвукового воздействия [15]. Также в работе [16] показано положительное влияние введения ультразвуковых воздействий на формирование микро- и макроструктуры наплавленного материала из жаропрочного сплава на никелевой основе.

Можно заключить, что вышеупомянутые работы имеют в основном экспериментальный характер и в большей степени направлены на исследование структурных изменений. Вместе с тем вибрационные воздействия влияют на гидродинамические процессы [17; 18], в том числе на процессы формирования капли, формирование ванны расплава и кристаллизацию наплавленного валика, что позволяет управлять тепломассопереносом в жидкости, процессом кристаллизации и формой валика [19]. Вибрации влияют на характер движения в жидкой капле, что изменяет ее форму, подобного эффекта можно добиться изменением поверхностных сил, таких как сила натяжения и сила Марангони.

Численное моделирование может быть использовано как мощный инструмент исследования мезоуровневых процессов, происходящих в сварочной ванне, в частности, вибрационного воздействия на течение металла, формирование микро- и макроструктуры [19–21]. Так, в работе [19] использовался метод объема жидкости (VOF) для исследования влияния ультразвука на поле давления, температурное поле и поток жидкости в ванне расплава. Было показано, что акустический поток способствовал увеличению скорости потока и высокотемпературной диффузии, что привело к уменьшению градиента температуры. Кроме того, на поверхности расплавленного металла появилось множество капиллярных волн, указывающих на то, что состояние поверхности ванны расплава также явно изменилось под воздействием ультразвуковой вибрации. С улучшением смачиваемости и растекания расплава под воздействием ультразвука ширина слоя осаждения увеличилась, а высота и глубина уменьшились, но площадь поперечного сечения слоя осаждения осталась прежней.

Ранее авторами работы были проведены численные исследования процесса проволоочной наплавки с применением метода конечных объемов с учетом силы поверхностного натяжения, силы Марангони, давления паров, и др. [22]. Были сформулированы условия, при которых наблюдается непрерывный перенос металла. Однако численное моделирование указанного процесса сеточными методами занимает слишком много времени.

Использование метода гидродинамики сглаженных частиц при численном моделировании процессов тепломассопереноса позволяет в ряде случаев значительно увеличить производительность численной реализации [23–26]. Так, метод SPH (метод сглаженных частиц) обладает большим потенциалом по производительности [27]. Авторами статьи ранее была проведена работа по моделированию процесса наплавки проволоки с применением метода SPH [28–30]. Модель позволяет рассчитывать нестационарные объемные распределения температур, скоростей течения расплава, давлений, форму и размеры расплавленной ванны, форму свободной поверхности расплавленного металла, форму и размеры наплавленного валика.

В процессе проволоочной наплавки осуществляется оплавление проволоочного материала тепловым источником, и дальнейшее стекание капли на подложку. Таким образом, простейшей системой, подлежащей моделированию при исследовании влияния вибраций на формирование капли при наплавке, является объем жидкой фазы, удерживаемый силами поверхностного натяжения на некотором цилиндрическом объекте. В дальнейшем будет исследован процесс с наклонной проволокой с добавлением уравнений, описывающих тепломассоперенос, влияние вибраций на каплю, лежащую на подложке, после чего станет возможным сделать полное описание наплавки непрерывно подаваемой проволоки при вибрационных воздействиях.

В предлагаемой работе рассмотрено влияние вибрационных воздействий на характер движения жидкости в капле, которое отражается в изменении значения коэффициента поверхностного натяжения. Предложена математическая модель течения жидкости с учетом силы поверхностного натяжения в формализме метода гидродинамики сглаженных частиц. Показано, что метод позволяет напрямую учитывать влияние вибрационных воздействий через введение дополнительных граничных условий. Проведена верификация разработанной математической модели сравнением с известными результатами натурных экспериментов для капли воды. Проведена серия численных экспериментов по определению влияния вибрационных воздействий на значение коэффициента поверхностного натяжения для стали марки 12X18H10T.

1. Математическая модель

1.1. Постановка задачи

В процессе отрыва капли от цилиндрического подвеса (рис. 1), на который действует источник вибрационных воздействий, время отрыва капли зависит от диаметра цилиндрического подвеса (d), массы капли

(m), амплитуды и частоты колебаний (A, ω) и геометрии капли, которая, в свою очередь, зависит от теплофизических характеристик материала, поверхностного натяжения и вязкости, определяющих характер течения жидкости в капле.

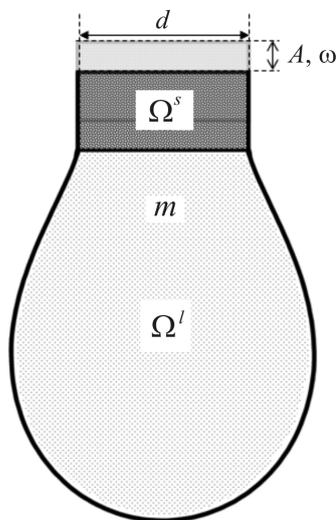


Рис. 1. Принципиальная схема процесса отрыва капли от цилиндрического подвеса

Fig. 1. Schematic diagram of the droplet detachment process from a cylindrical suspension

Длина звуковых волн, соответствующая исследуемым колебаниям $\lambda = c/v$ (c – скорость звука, v – частота колебаний), составляет $\lambda \sim 0,1$ м и более, что много больше размеров области жидкого металла ($l_0 \sim 0,01$ м). Соотношение $\lambda \gg l_0$ выполняется до частот порядка 20 кГц и для всех размеров характерных областей жидкого металла при его наплавке (капля, свисающая с проволоки; ванна расплавленного металла на подложке). В связи с выполнением условия $\lambda \gg l_0$ можно пренебречь акустическими эффектами при описании влияния вибрационных воздействий на аддитивное формирование металла наплавкой проволоки [17].

При описании движения жидкости положим, что расплав металла является несжимаемой ньютоновской жидкостью, при этом не учитывается влияние температуры. Акустические эффекты при вибрационных воздействиях также не учитываются.

Варьируемыми параметрами являются: диаметр цилиндрического подвеса, масса капли, частота вибрационных воздействий, амплитуда вибрационных воздействий.

Введение вибрационных воздействий в жидкую фазу приводит к генерации или перестроению существующих течений. Высокочастотные вибрационные эффекты могут описываться осредненными уравнениями движения, в которых появляется дополнительная вибрационная сила. Влияние вибраций конечной частоты вводится в уравнения движения посредством модуляции силы тяжести либо через граничные условия, т.е. задается периодический закон для скорости движения какой-либо границы расчетной области. Посредством

вибрационного воздействия можно эффективно управлять состоянием системы: распределением полей скоростей и температур, что приводит к локальным изменениям физических параметров системы, таких как поверхностное натяжение или вязкость. Влияние вибраций на физические параметры системы возможно, если имеет место зависимость этих параметров от скорости движения или температуры [17; 18; 31–33].

В работе рассматривается взаимодействие твердого и жидкого металла. Для этого выделяются две фазы: Ω^l – жидкая и Ω^s – твердая, «цилиндрический подвес», объединение которых представляет собой всю исследуемую область – Ω (см. рис. 1). Движение металлического расплава можно описать как движение вязкой несжимаемой жидкости. В общем случае система уравнений будет состоять из дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию плотности ρ , скоростей \mathbf{u} в форме балансовых законов (уравнения баланса массы и импульса):

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}, & R \in \Omega^l, \\ \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_s) + \mathbf{g}, & R \in \Omega^l, \\ \frac{d\rho}{dt} = 0, \frac{d\mathbf{u}}{dt} = A\omega^2 \cos(\omega t), & R \in \Omega^s, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{u} – скорость, ρ – плотность, \mathbf{f}_v – вязкие силы, \mathbf{f}_s – сила поверхностного натяжения, \mathbf{g} – ускорение свободного падения. Поскольку в центре внимания данной работы находится гидродинамика жидкой капли, делается предположение о жесткой и неподвижной твердой фазе.

Плотность ρ и давление P связаны с помощью уравнения состояния [34]

$$P(\rho) = \frac{c_0^2 \rho_0}{7} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right], \quad (2)$$

где c_0 и ρ_0 – скорость звука и плотность при нулевом приложенном напряжении.

Для несжимаемых жидкостей вязкие силы примут следующий вид:

$$\mathbf{f}_v = \eta \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость.

Следуя континуальному подходу Брэкбилла и Коте [35], основанному на континуальной поверхностной силе (CSF), эффекты поверхностного натяжения рассматриваются как объемные силы в уравнении (1), распределенные по межфазному объему конечной ширины (по поверхностным частицам). Сила поверхностного натяжения складывается из нормальной и тангенциальной составляющих:

$$\mathbf{f}_s = -\alpha \mathbf{k}n + (\mathbf{I} - \mathbf{nn})\alpha', \quad (4)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения, $\mathbf{k} = \nabla \cdot \mathbf{n}$ – кривизна поверхности, $\nabla \alpha = d\alpha(T)/dT$.

Систему дифференциальных уравнений в частных производных (1) необходимо дополнить начальными условиями:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0, & \Omega, & \quad t = 0, \\ T &= T_0, & & \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}'_0, & \Omega', & \quad t = 0, \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}^s_0, & \Omega^s, & \quad t = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

1.2. Метод гидродинамики сглаженных частиц

Численное решение предложенной математической модели было реализовано с применением метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Суть метода гидродинамики сглаженных частиц заключается в аппроксимации полевых переменных $\{\rho, \mathbf{u}, T\}$ в системе (1). Переход от континуального представления среды к дискретному предполагает, что вместо непрерывной функции $f(\mathbf{r})$, характеризующей какую-либо полевую переменную, вводится ее дискретный аналог f_i . Кусочно-постоянная величина f_i определяется для каждой частицы i как сумма N величин f_j из частиц окружения j в пределах заданной дистанции h :

$$f_i = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W(\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|, h) = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}^h, \quad (6)$$

где m_j – масса частицы, ρ_j – плотность частицы, W – сглаживающая функция (ядро). Здесь и далее используются эквивалентные обозначения $W(\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|, h) \equiv W(r_{ij}, h) \equiv W_{ij}^h$, где $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_{ij}$ и $r_{ij} = \|\mathbf{r}_{ij}\|$. Формально суммирование в выражении (1) производится только по частицам внутри некоторой области, для которой $\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\| < h$, где h – параметр дискретизации метода SPH (радиус сглаживания).

Преимуществом метода SPH в таком представлении является то, что производные по координатам не отражаются на массах частиц m_j и значениях полевых величин f_j , а дифференцирование происходит только по весовым функциям W_{ij} . Функция ядра зависит от расстояния между частицами и радиусом сглаживания h . При этом градиент некоторой величины можно представить в следующем виде:

$$\nabla f_i = \nabla \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}^h = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} \nabla_j W_{ij}^h. \quad (7)$$

Функция-ядро W представляет собой аппроксимацию δ -функции Дирака. Далее рассмотрим свойства функции W . На ядро накладывается ограничение компактности (нормировки):

$$\int W(\mathbf{r}, h) d\mathbf{r} = 1. \quad (8)$$

Стоит отметить, что при $h \rightarrow 0$ ядро превращается в δ -функцию:

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{r}, h) = \delta(\mathbf{r}). \quad (9)$$

Свойство радиальной симметрии функции W позволяет перейти от градиента к ее производной в следующем виде:

$$\nabla_j W_{ij}^h = \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|} = \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}. \quad (10)$$

Из свойства (10) вытекает антисимметричность градиента $\nabla_j W_{ij} = -\nabla_j W_{ji}$. Легко также заметить, что выражение для плотности частиц получается усреднением масс по весовым функциям

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij}^h. \quad (11)$$

Следует отметить, что выражение (11) подразумевает некоторую среднюю массу в области радиуса $\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\| < h$. Для остальных полевых величин осреднение будет взвешенным.

Применяя дискретизацию метода сглаженных частиц к системе (1), получим выражения для i -й частицы:

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_j W_{ij}^h, \\ \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \frac{1}{m_i} [\mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} + \mathbf{F}_{s,i}] + \mathbf{g}_i \end{cases} \quad (12)$$

где $F_{p,i}$ – сила давления, $F_{v,i}$ – вязкая сила, $F_{s,i}$ – сила поверхностного натяжения. Действие на частицу i является результатом суммирования всех вкладов межчастичного взаимодействия с соседними частицами j . Вязкие силы и силы давления в уравнении импульса (12) дискретизируются в соответствии с формулировкой, предложенной Адами и др. [36; 37]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} &= \\ &= \sum_j (V_i^2 + V_j^2) \left[-\frac{\rho_j p_i + \rho_i p_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} + \frac{2\eta_i \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \frac{\mathbf{u}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для дискретизации поверхностных сил сначала необходимо определить поверхность. В формализме SPH для этого вводят функцию уровня c , которая тождественно равна единице для каждой частицы жидкой фазы. Тогда, вычисляя градиент этой функции, можем определить нормаль к поверхности:

$$\nabla c_i = \frac{1}{V_i} \sum_j (V_i^2 + V_j^2) \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_j} c_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, \quad \mathbf{n}_i = \frac{\nabla c_i}{|\nabla c_i|}. \quad (14)$$

Силу поверхностного натяжения можно разделить на два слагаемых: $F_{s,i} = F_{sk,i} + F_{sm,i}$. Первое слагаемое представляет собой пропорциональные кривизне нормальные силы поверхностного натяжения, а второе представляет собой тангенциальные силы Марангони, обусловленные градиентом поверхностного натяжения. Первое слагаемое имеет вид:

$$\mathbf{F}_{sk,i} = -V_i \alpha \kappa_i \mathbf{n}_i = -V_i \alpha \left(-\frac{\nabla \mathbf{n}_i}{\mathbf{n}_i} \right) \mathbf{n}_i = V_i \alpha \nabla^2 c_i \frac{\mathbf{n}_i}{\mathbf{n}_i}. \quad (15)$$

Второе слагаемое примет следующий вид:

$$\mathbf{F}_{sm,i} = \alpha' V_i (\mathbf{I} - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i) \sum_j V_j (T_j - T_i) \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, \quad (16)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор, α' – производная коэффициента поверхностного натяжения по температуре. Однако в работе не учитываются температурные эффекты, поэтому выражение (16) принимается равным 0.

При интегрировании полученных дифференциальных уравнений для вязких течений временной шаг ограничен вязкой составляющей, в отличие от известного условия Куранта, как, например, в сеточных методах. Для стабильного численного моделирования шаг по времени должен удовлетворять следующим условиям [38]:

1) условие Куранта:

$$\Delta t \leq 0,25h / |u|_{\max};$$

2) условие, возникающие при учете диффузии:

$$\Delta t \leq 0,25h / \frac{\mu}{\rho_{\max}};$$

3) условие, возникающее при учете поверхностного натяжения:

$$\Delta t \leq 0,25 \min \left(\frac{\rho_{\min} h^3}{2\pi\alpha} \right)^{1/2};$$

4) условие, возникающее при учете термокапиллярной диффузии:

$$\Delta t \leq 0,125 \frac{\rho |u_{\text{sound}}| h^2}{\lambda}.$$

Для численного решения системы уравнений (1) использование классических явных схем интегрирования (например, схемы Верле) в методе SPH представляется невозможным, поскольку силы вычисляются по скоростям, определенным в полшаге по времени. Эта ситуация может быть улучшена путем вычисления экстраполированных на полный шаг скоростей частиц:

$$\tilde{\mathbf{u}}_i(t + \Delta t) = \mathbf{v}_i(t) + \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i}{dt}. \quad (17)$$

Добавляя интегрирование уравнений для локальной плотности и внутренней энергии, запишем полную схему Верле с учетом экстраполяции следующим образом:

$$1. \ a. \ \mathbf{u}_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = \mathbf{u}_i(t) + \frac{\Delta t}{2} \frac{d\mathbf{u}_i(t)}{dt};$$

$$b. \ \tilde{\mathbf{u}}_i(t + \Delta t) = \mathbf{v}_i(t) + \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i(t)}{dt};$$

$$c. \ \rho_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = \rho_i(t) + \frac{\Delta t}{2} \frac{d\rho_i(t)}{dt};$$

$$d. \ T_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = T_i(t) + \frac{\Delta t}{2} \frac{dT_i(t)}{dt};$$

$$e. \ \mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \Delta t \mathbf{u}_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right);$$

2. Определение правых частей $d\mathbf{u}_i(t + \Delta t)/dt$, $d\rho_i(t + \Delta t)/dt$, $dT_i(t + \Delta t)/dt$ в конце шага по времени:

$$3. \ a. \ \rho_i(t + \Delta t) = \rho_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) + \frac{\Delta t}{2} \frac{d\rho_i}{dt} \left(t + \Delta t \right);$$

$$b. \ T_i(t + \Delta t) = T_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) + \frac{\Delta t}{2} \frac{dT_i}{dt} \left(t + \Delta t \right);$$

$$c. \ \mathbf{u}_i(t + \Delta t) = \mathbf{u}_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) + \frac{\Delta t}{2} \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} \left(t + \Delta t \right).$$

Разделение эволюции во времени для плотности и энергии на два отдельных шага аналогично интегрированию скорости \mathbf{u} , дает существенные преимущества по отношению к простой схеме Эйлера для ρ и T , которая, в свою очередь, как известно, приводит к нарушению балансовых уравнений.

2. Численные эксперименты и результаты

В первой серии численных экспериментов была рассмотрена задача моделирования процесса отрыва капли воды от вертикального цилиндра (проволоки) без учета теплопроводности. Вибрации в систему вносились через проволоку. В работе [33] рассмотрено экспериментальное исследование поведения капли воды в условиях высокочастотных механических вибраций и влияние таких воздействий на параметры, характеризующие эффекты поверхностного натяжения. Результаты данной статьи были использованы для верификации разработанной модели (рис 2).

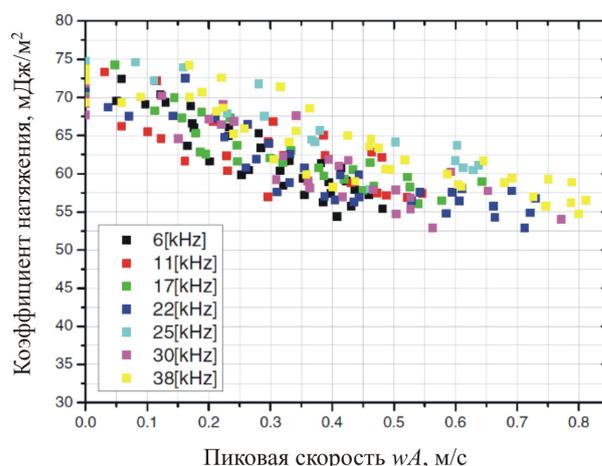


Рис. 2. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от амплитуды скорости при различных частотах [33]

Fig. 2. Surface tension coefficient dependence on the peak velocity at different frequencies [33]

Для определения модельного параметра коэффициента поверхностного натяжения α использовались сталагмо-

метрический (метод отрыва капли) и метод висячей капли. Сталагмометрический метод основан на предположении, что в момент отрыва капли сила тяжести, действующая на нее, равна силе поверхностного натяжения, приложенного к наиболее узкой части капли (рис. 3):

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d}, \quad (18)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, m – масса капли, g – проекция ускорения свободного падения, d – диаметр наиболее узкой части капли.

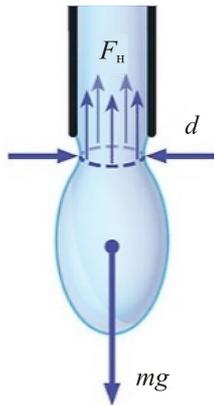


Рис. 3. Схематичная иллюстрация сталагмометрического метода

Fig. 3. Schematic illustration of the stalagmometric method

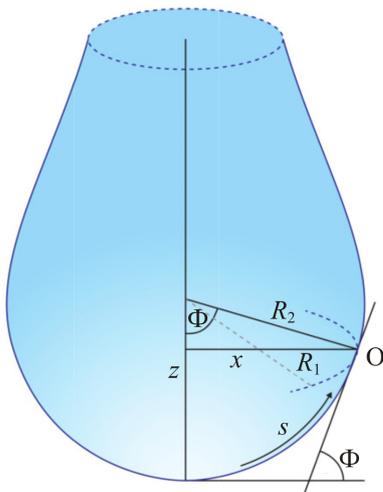


Рис. 4. Схематичная иллюстрация метода висячей капли: O – точка на профиле капли; Φ – угол между касательной в точке O и горизонтальной осью; s – соответствующая длина дуги от вершины капли до точки O; x – расстояние точки O от вертикальной оси; z – высота точки O от горизонтальной оси; R_1 – радиус кривизны в вершине капли; R_2 – радиус кривизны в точке O

Figure 4. Schematic illustration of the pendant drop method: O, point on the profile of the drop; Φ , the angle between the tangent at point O and the horizontal axis; s , the respective arc length from the apex of the drop to the point O; x , the distance of the point O from the vertical axis; z , the height of the point O from the horizontal axis; R_1 , the radius of curvature at the drop apex; R_2 , the radius of curvature at the point O

Для сталагмометрического метода была предложена численная процедура по определению параметра α . По заданной геометрии (см. рис. 3) был определен диаметр проволоки d и масса всей капли m . По известному коэффициенту поверхностного натяжения σ вычислялось, при каком ускорении свободного падения капля должна оторваться от проволоки: $g = \sigma \pi d / m$. После этого последовательно запускался расчет при разных α , и с использованием метода деления отрезка пополам был определен параметр α , соответствующий физическому коэффициенту поверхностного натяжения σ .

Очевидный недостаток данного метода заключается в том, что с его помощью невозможно определить коэффициент поверхностного натяжения по заданному параметру α , а лишь узнать, больше он или меньше необходимого значения.

Метод висячей капли (pendant drop method) позволяет определить коэффициент поверхностного натяжения по форме капли. Силы, определяющие форму висячей капли, – поверхностное натяжение и гравитация. С одной стороны, поверхностное натяжение стремится минимизировать площадь поверхности и придать капле сферическую форму. С другой стороны, гравитация вытягивает каплю из этой сферической формы, и в результате получается типичная грушевидная форма (рис. 4).

В общем случае для свободной поверхности и при наличии приложенного «избыточного давления» ΔP на границе раздела в равновесии существует баланс между гидростатическим давлением $\Delta P = \Delta P_0 + (\Delta \rho)gz$ и эффектами поверхностного натяжения $\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$.

Уравнение Юнга – Лапласа принимает следующий вид:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\sigma}{R_0} + (\Delta \rho)gz. \quad (19)$$

Исходя из геометрических построений, изображенных на рис. 4, получаем: $1/R_1 = d\Phi/ds$, $1/R_2 = \sin(\Phi)/x$, $dx/ds = \cos(\Phi)$, $dz/ds = \sin(\Phi)$. При использовании параметра формы капли $\beta = (\Delta \rho g R_0^2) / \sigma$ выражение (19) примет следующий вид:

$$\frac{d\Phi}{ds} = \frac{2}{R_0} - \beta \left(\frac{z}{R_0^2} \right) - \frac{\sin(\Phi)}{x}. \quad (20)$$

При известном параметре β , можно определить коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\beta}, \quad (21)$$

где R_0 – радиус вписанной в каплю окружности. Для определения параметра β необходимо найти максимальный диаметр капли D_E и диаметр D_S капли на высоте D_E . После чего параметр β вычисляется по следующему соотношению [39]:

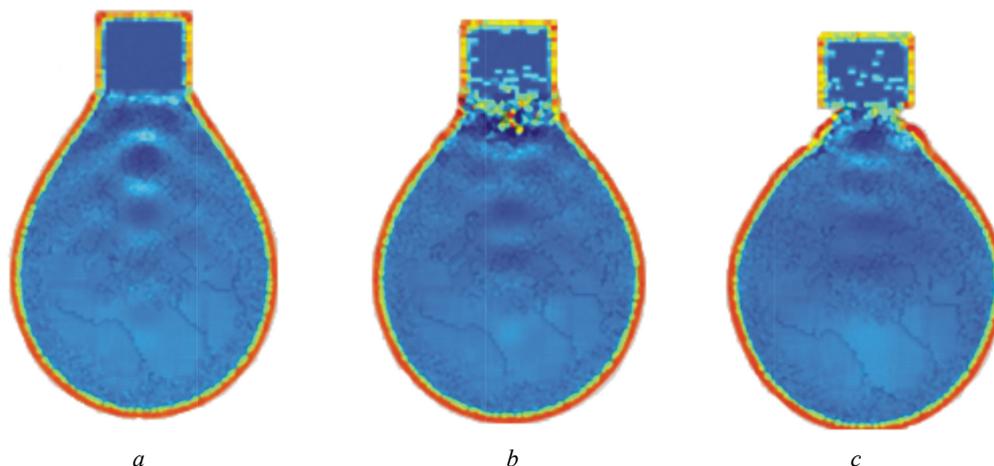


Рис. 5. Визуализация отрыва капли при численном описании стагмометрического метода в условиях вибрационных воздействий: $a - \omega A = 0,05$; $b - \omega A = 0,15$; $c - \omega A = 0,25$

Fig. 5. Visualization of drop detachment at numerical description of stalagmometric method under vibration influences: $a - \omega A = 0.05$; $b - \omega A = 0.15$; $c - \omega A = 0.25$

$$\beta = 0,12836 - 0,7577 \frac{D_S}{D_E} + 1,7713 \left(\frac{D_S}{D_E}\right)^2 - 0,5426 \left(\frac{D_S}{D_E}\right)^3. \quad (22)$$

Метод висячей капли позволяет определить текущее значение коэффициента поверхностного натяжения, таким образом, идентификация параметра α происходит за одну итерацию.

Верификация модели проводилась в расчетах для капли воды. Варьируемыми параметрами являлись масса капли и амплитуда колебаний, частота колебаний равнялась 6 кГц. Определяющим параметром оказалось значение амплитуды скорости ωA . Величина коэффициента поверхностного натяжения монотонно снижается с ростом амплитуды скорости.

На рис. 4 представлена визуализация капли воды на подвесе вибрирующем в вертикальном направлении в одинаковые моменты времени. Повышение амплитуды скорости колебаний приводит к изменению характера движения жидкости в капле и к отрыву капли от подвеса, что равносильно снижению коэффициента поверхностного натяжения. При $\omega A = 0,05$ (рис. 5, a) капля устойчиво удерживалась силами поверхностного натяжения, в то время как при $\omega A = 0,15$ (рис. 5, b) начинался отрыв, а при $\omega A = 0,25$ (рис. 5, c) капля уже оторвалась.

Результаты расчета (рис. 6) показали хорошее качественное и количественное (расхождение не превышает 10 %) совпадение с экспериментом (см. рис. 2).

Верифицированная модель использовалась для исследования поведения поверхностного натяжения расплава металла при вибрационных воздействиях (рис. 7). В этой серии численных экспериментов также не учитывалась теплопроводность и связанная с ней сила Марангони. В качестве исследуемого материала была выбрана сталь марки 12X18H10T с характеристиками, представленными в табл. 1.

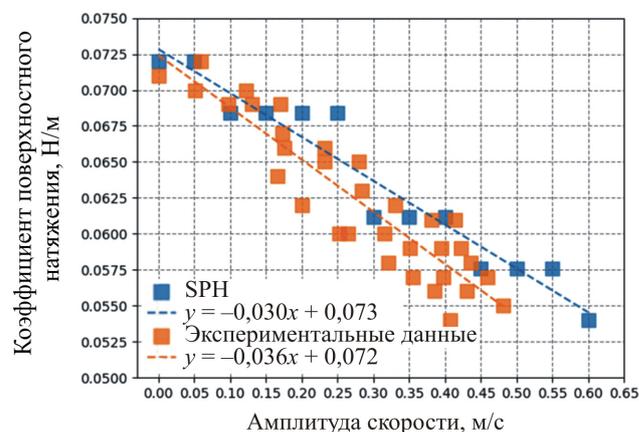


Рис. 6. Результаты расчета зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от амплитуды скорости в сравнении с экспериментальными данными при частоте колебаний 6 кГц

Fig. 6. Calculation results of the water tension coefficient dependence on the peak velocity in comparison with the experimental data ($\omega = 6$ kHz)

Варьируемыми параметрами являлись масса капли и циклическая частота колебаний, амплитуда колебаний. Амплитуда скорости варьировалась от 0,0 м/с до 2,0 м/с с шагом 0,2 м/с. В табл. 2 приведены параметры расчета.

Результаты проведенных численных экспериментов приведены на рис. 8.

Эффект снижения коэффициента поверхностного натяжения вследствие увеличения скорости колебаний подводимых вибраций хорошо согласуется с известными экспериментальными данными. При пиковой скорости колебаний величиной 2,0 м/с наблюдается снижение коэффициента поверхностного натяжения на 30 %. Снижение коэффициента поверхностного натяжения должно облегчить реализацию непрерывного стекания металла с проволоки [22], что может положительно сказаться на формировании металла при проволоочной наплавке, а также позволит дополнительно управлять формой наплавляемых валиков.

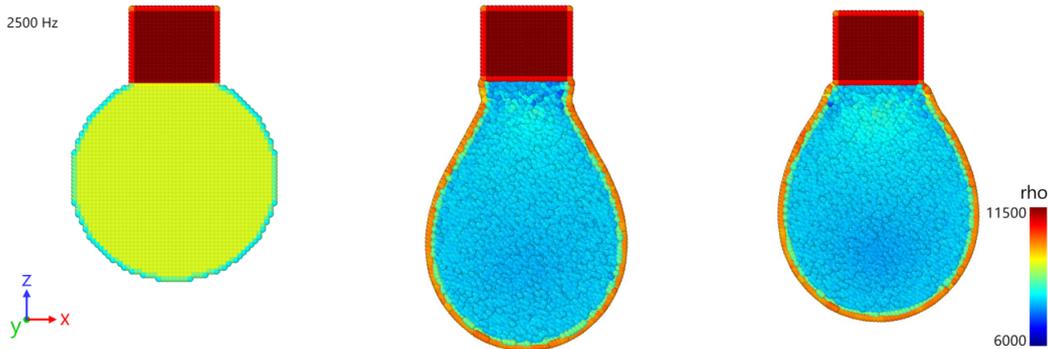


Рис. 7. Визуализация численного моделирования метода отрыва капли для стали марки 12X18H10T при $\omega A = 0,5$
 Fig. 7. Visualization of numerical simulation of the drop detachment method for 12X18H10T steel grade with $\omega A = 0.05$

Таблица 1/Table 1

Принятые при расчете теплофизические характеристики наплавляемого материала (сталь 12X18H10T)
 Thermal and physical characteristics of the weld material used in the simulation (steel 12X18H10T)

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	T_L	°C	1515
Температура солидус	T_S	°C	1459
Удельная теплоемкость	C	Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	710
Плотность	ρ	кг·м ⁻³	7680
Теплопроводность	λ	Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	26
Скрытая теплота плавления	H_f	Дж/кг	276 000
Динамическая вязкость	μ	Па·с	0,007
Коэффициент поверхностного натяжения	σ	Н·м ⁻¹	1,615
Температурный коэффициент поверхностного натяжения	$\gamma = \frac{\partial \sigma}{\partial T}$	Н·м ⁻¹ ·К ⁻¹	-0,00043

Таблица 2/Table 2

Параметры численного моделирования
 Numerical simulation parameters

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Параметр дискретизации	h	мм	0,1
Количество частиц	n	шт.	57709...81815
Шаг по времени	dt	с	2,5e-06
Количество шагов	N	шт.	100 000
Физическое время	t	с	0,25

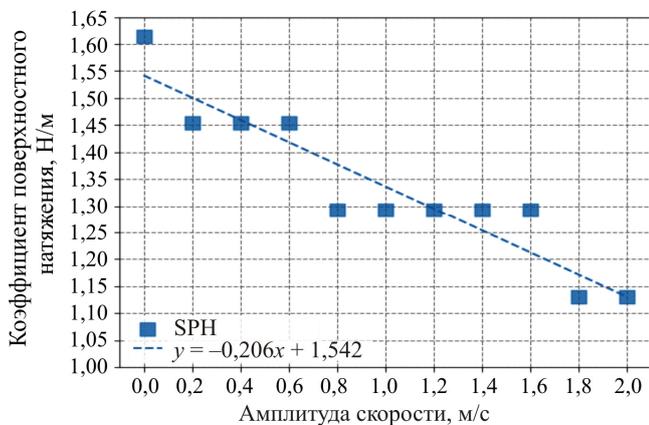


Рис. 8. График зависимости коэффициента поверхностного натяжения стали 12X18H10T от пиковой скорости вибрационных воздействий

Fig. 8. The graph of dependence of surface tension coefficient of steel 12X18H10T on the peak velocity of vibration influences

Заключение

В ходе работы была реализована математическая модель образования капли металлического расплава из проволоки в условиях вибрационного воздействия в формализме метода гидродинамики сглаженных частиц. Для верификации разработанной модели была проведена серия численных экспериментов по моделированию процесса отрыва капли воды от цилиндрического подвеса, который подвергался вибрационным воздействиям с разными значениями амплитуды скорости. Результаты численных экспериментов качественно и количественно совпали с результатами известных натуральных экспериментов.

Верифицированная математическая модель позволяет исследовать влияние вибрационных воздействий на коэффициент поверхностного натяжения для большинства жидкостей, в том числе и для жидких металлов. Более того, математическое моделирование становится единственным доступным способом исследования такого явления для жидких материалов с большой температурой. С использованием разработанной математической модели была проведена серия численных экспериментов по моделированию процесса отрыва капли расплавленного металла (сталь марки 12X18H10T) от цилиндрического подвеса из того же материала. Выявлено, что при повышении амплитуды скорости вибрационных воздействий коэффициент поверхностного натяжения стали марки

12X18H10T тоже снижается. При амплитуде скорости колебаний величиной 2,0 м/с наблюдается снижение коэффициента поверхностного натяжения на 30 %.

Таким образом предложенная математическая модель позволяет явно моделировать эффект влия-

ния вибрационных воздействий на поверхностное натяжение различных жидкостей и может в дальнейшем быть использована при описании процесса проволочной наплавки с применением вибрационных воздействий.

Библиографический список

1. Additive manufacturing of titanium-based alloys – A review of methods, properties, challenges, and prospects / T.S. Tshephe [et al.] // *Heliyon*. Elsevier. – 2022. – Vol. 8, № 3. – P. e09041. DOI: 10.1016/J.HELIYON.2022.E09041.
2. Structural integrity of additively manufactured aluminum alloys: Effects of build orientation on microstructure, porosity, and fatigue behavior / P.D. Nezhadfar [et al.] // *Additive Manufacturing*. Elsevier. – 2021. – Vol. 47. – P. 102292. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2021.102292.
3. Physical simulations of heat-affected zone microstructures to compare weldability characteristics of additively manufactured and wrought 17–4 stainless steel / F. Kellogg [et al.] // *Materials Characterization*. Elsevier. – 2022. – Vol. 185. – P. 111714. DOI: 10.1016/J.MATCHAR.2021.111714.
4. Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18Ni9Ti stainless steel / L. Qingmei [et al.] // *Materials & Design*. – 2007. – Vol. 28, no. 6. – P. 1949–1952. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.04.025.
5. Cui Y., Xu C.L., Han Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 55, no. 11. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.08.035.
6. Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process / L. He [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89, no. 13. DOI: 10.1063/1.2357857.
7. Lei Y.C., Wang Z.W., Chen X.Z. Effect of arc-ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiCp/Al MMCs // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. – 2011. – Vol. 21, no. 2. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60709-7.
8. Farrow M. *Laser/Ultrasonic Welding Technique*: pat. US4330699A USA. United States, 1982.
9. Dai W.L. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6 // *Materials Letters*. North-Holland. – 2003. – Vol. 57, no. 16–17. – P. 2447–2454. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01262-4.
10. Balasubramanian K., Kesavan D., Balusamy V. Studies on the effect of vibratory treatment on reduction of solidification cracking in AA2014 aluminum alloys // *Revue de Métallurgie*. – 2011. – Vol. 108, no. 2. – P. 89–94. DOI: 10.1051/metal/2011024.
11. Reduction of the defects of heat-resistant nickels alloys in surfacing technologies / E. Krivonosova [et al.] // *PNIPU bulletin*. The mechanical engineering, materials science. – 2018. – Vol. 20, no. 2. – P. 12–17. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.02.
12. Wu W. Influence of vibration frequency on solidification of weldments // *Scripta Materialia*. – 2000. – Vol. 42, no. 7. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00416-9.
13. Перспективы применения лазерно-акустического метода аддитивного производства для алюминиевых сплавов / А.И. Горунов [et al.] // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV Международной конференции / ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»*. – 2018. – С. 192–202.
14. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review / S. Kumar [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 26. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.
15. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound / C.J. Todaro [et al.] // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11, no. 1. DOI: 10.1038/s41467-019-13874-z.
16. Structure formation of high-temperature alloy by plasma, laser and TIG surfacing / E.A. Krivonosova [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1089. – P. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012019.
17. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. *Thermal vibrational convection*. – 1998.
18. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. *Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.
19. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing / F. Ji [et al.] // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Pergamon. – 2022. – Vol. 130. – P. 105789. DOI: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2021.105789.
20. In situ high speed imaging study and modelling of the fatigue fragmentation of dendritic structures in ultrasonic fields / S. Wang [et al.] // *Acta Materialia*. Pergamon. – 2019. – Vol. 165. – P. 388–397. DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2018.11.053.
21. Grain refining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration / D. Yuan [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – Vol. 73. – P. 105472. DOI: 10.1016/J.ULTSONCH.2021.105472.
22. Thermal fluid dynamics of liquid bridge transfer in laser wire deposition 3D printing / R. Hu [et al.] // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, no. 5. – P. 401–411. DOI: 10.1080/13621718.2019.1591039.
23. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Gaponova D.A. Using of smoothed particle hydrodynamics method for constructing a mathematical model of electron-beam surfacing process // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284 SSP. – P. 523–529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.523.
24. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V. Numerical Modeling of Heat Transfer and Material Flow During Wire-Based Electron-Beam Additive Manufacturing // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2020. – No. Icie 2019. – P. 1115–1125. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_119.
25. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V. Control of Weld Bead Position in Additive Manufacturing Process with Using Backscattered Electron Collector Signal. – 2020. – P. 1127–1135. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_120.
26. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition / V.K. Dragunov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 681, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012008.
27. Numerical investigation on the water entry of a 3D circular cylinder based on a GPU-accelerated SPH method / H. Zhang [et al.] // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. Elsevier Masson. – 2022. – Vol. 94. – P. 1–16. DOI: 10.1016/J.EUROMECHFLU.2022.01.007.
28. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method / D.N. Trushnikov [et al.] // *Mechanics of Advanced*

Materials and Modern Processes. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 4. DOI: 10.1186/s40759-019-0044-1

29. Mathematical modeling the process of wire surfacing by the smoothed particle hydrodynamics method / R.P. Davlyatshin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1730, no. 1. – P. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1730/1/012003

30. Improving the Electron-Beam Additive Manufacturing Growth of Components / D.N. Trushnikov [et al.] // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, no. 9. – P. 874–876. DOI: 10.3103/S1068798X21090276

31. Цивильский И.В., Хамидуллин Б.А., Мельников А.С. Математическое моделирование воздействия ультразвукового поля на расплав металла // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2018. – С. 520–526.

32. Temperton R.H., Smith M.I., Sharp J.S. Mechanical vibrations of pendant liquid droplets // The European Physical Journal E. – 2015. – Vol. 38, no. 7. – P. 79. DOI: 10.1140/epje/i2015-15079-2

33. Galleguillos-Silva R., Vargas-Hernández Y., Gaete-Garretón L. Wettability of a surface subjected to high frequency mechanical vibrations // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 35. – P. 134–141. DOI: 10.1016/J.ULTSONCH.2016.09.011

References

1. Tshephe T.S., Akinwamide S.O., Olevsky E., Olubambi P.A., Additive manufacturing of titanium-based alloys- A review of methods, properties, challenges, and prospects, *Helvion*, 2022, vol. 8, no. 3, p. e09041, doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E09041.

2. Nezhadfar P.D., Thompson S., Saharan A., [et al.], Structural integrity of additively manufactured aluminum alloys: Effects of build orientation on microstructure, porosity, and fatigue behavior, *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 47, p. 102292, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102292.

3. Kellogg F., Vasilev E., Kudzal A., [et al.], Physical simulations of heat-affected zone microstructures to compare weldability characteristics of additively manufactured and wrought 17-4 stainless steel, *Materials Characterization*, 2022, vol. 185, p. 111714, doi: 10.1016/J.MATCHAR.2021.111714.

4. Qingmei L., Yong Z., Yaoling S., [et al.], Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18Ni9Ti stainless steel, *Materials & Design*, 2007, vol. 28, no. 6, pp. 1949–1952, doi: 10.1016/j.matdes.2006.04.025.

5. Cui Y., Xu C.L., Han Q., Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation, *Scripta Materialia*, 2006, vol. 55, no. 11, doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.08.035.

6. He L., Wu M., Li L., Hao H., Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process, *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 89, no. 13, doi: 10.1063/1.2357857.

7. Lei Y.C., Wang Z.W., Chen X.Z., Effect of arc-ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiCp/Al MMCs, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2011, vol. 21, no. 2, doi: 10.1016/S1003-6326(11)60709-7.

8. Farrow M., Laser/Ultrasonic Welding Technique, US4330699A, 1982

9. Dai W.L., Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6, *Materials Letters*, 2003, vol. 57, no. 16–17, pp. 2447–2454, doi: 10.1016/S0167-577X(02)01262-4.

10. Balasubramanian K., Kesavan D., Balusamy V., Studies on the effect of vibratory treatment on reduction of solidification

34. Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 68, no. 8. – P. 1703–1759. DOI: 10.1088/0034-4885/68/8/R01

35. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // Journal of Computational Physics. – 1992. – Vol. 100, no. 2. – P. 335–354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y

36. Adami S., Hu X.Y., Adams N.A. A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics // Journal of Computational Physics. – 2012. – Vol. 231, no. 21. DOI: 10.1016/j.jcp.2012.05.005

37. Adami S., Hu X.Y., Adams N.A. A transport-velocity formulation for smoothed particle hydrodynamics // Journal of Computational Physics. – 2013. – Vol. 241. DOI: 10.1016/j.jcp.2013.01.043

38. Tong M., Browne D.J. An incompressible multi-phase smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for modelling thermocapillary flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 73. – P. 284–292. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.064

39. Hansen F.K., Rødsrud G. Surface tension by pendant drop: I. A fast standard instrument using computer image analysis // Journal of Colloid and Interface Science. – 1991. – Vol. 141, no. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1016/0021-9797(91)90296-K

cracking in AA2014 aluminum alloys, *Revue de Métallurgie*, 2011, vol. 108, no. 2, pp. 89–94, doi: 10.1051/metal/2011024.

11. Krivososova E., Shchitsyn I., Akulova S., [et al.], Reduction of the defects of heat-resistant nickel alloys in surfacing technologies, *PNIPU Bulletin. The mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 12–17, doi: 10.15593/2224-9877/2018.2.02.

12. Wu W., Influence of vibration frequency on solidification of weldments, *Scripta Materialia*, 2000, vol. 42, no. 7, doi: 10.1016/S1359-6462(99)00416-9.

13. A.I. Gorunov, A.R. Gaisina, A.N. Mukhametov, A.H. Gilmudinov, Prospects of application of laser-acoustic method of additive manufacturing for aluminium alloys, ADDITIVE TECHNOLOGIES: POWERFUL AND FUTURE Materials of IV International Conference. FSUE "All-Russian Research Institute of Aviation Materials", 2018, pp. 192–202.

14. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W., Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26. 2017. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.

15. Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., [et al.], Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound, *Nature Communications*, 2020, vol. 11, no. 1, doi: 10.1038/s41467-019-13874-z.

16. Krivososova E.A., Schitsin Y.D., Trushnikov D.N. [et al.], Structure formation of high-temperature alloy by plasma, laser and TIG surfacing, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1089, p. 012019, doi: 10.1088/1742-6596/1089/1/012019.

17. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V., *Thermal vibrational convection*. 1998.

18. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Cherepanov A.A., Dynamics of interfaces in vibrating fields. Moscow: FIZMATLIT, 2003.

19. Ji F., Qin X., Hu Z., [et al.], Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 130, p. 105789, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2021.105789.

20. Wang S., Kang J., Guo Z., [et al.], In situ high speed imaging study and modelling of the fatigue fragmentation of dendritic structures in ultrasonic fields, *Acta Materialia*, 2019, vol. 165, pp. 388–397, doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2018.11.053.
21. Yuan D., Shao S., Guo C., [et al.], Grain refining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, p. 105472, doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2021.105472.
22. Hu R., Luo M., Liu T., [et al.], Thermal fluid dynamics of liquid bridge transfer in laser wire deposition 3D printing, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 401–411, doi: 10.1080/13621718.2019.1591039.
23. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Gaponova D.A., Using of smoothed particle hydrodynamics method for constructing a mathematical model of electron-beam surfacing process, *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284 SSP, pp. 523–529, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.523.
24. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V., Numerical Modeling of Heat Transfer and Material Flow During Wire-Based Electron-Beam Additive Manufacturing, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, no. Icie 2019, pp. 1115–1125, doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_119.
25. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V., Control of Weld Bead Position in Additive Manufacturing Process with Using Backscattered Electron Collector Signal, 2020, pp. 1127–1135. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_120.
26. Dragunov V.K., Goryachkina M.V., Gudenko A.V., [et al.], Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 681, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/681/1/012008.
27. Zhang H., Zhang Z., He F., Liu M., Numerical investigation on the water entry of a 3D circular cylinder based on a GPU-accelerated SPH method, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2022, vol. 94, pp. 1–16, doi: 10.1016/J.EUROMECHFLU.2022.01.007.
28. Trushnikov D.N., Koleva E.G., Davlyatshin R.P., [et al.], Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method, *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2019, vol. 5, no. 1, p. 4, doi: 10.1186/s40759-019-0044-1.
29. Davlyatshin R.P., Gerasimov R.M., Bayandin Y. v., [et al.], Mathematical modeling the process of wire surfacing by the smoothed particle hydrodynamics method, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1730, no. 1, p. 012003, doi: 10.1088/1742-6596/1730/1/012003.
30. Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Varushkin S.V., [et al.], Improving the Electron-Beam Additive Manufacturing Growth of Components, *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 9, pp. 874–876, doi: 10.3103/S1068798X21090276.
31. I.V. Tsvilsky, B.A. Khamidullin, A.S. Melnikov, Mathematical modelling of ultrasonic field impact on metal melt, NEW TECHNOLOGIES, MATERIALS AND EQUIPMENT OF RUSSIAN AVIACOMIC INDUSTRY All-Russian Scientific-Practical Conference with international participation, 2018, pp. 520-526.
32. Temperton R.H., Smith M.I., Sharp J.S., Mechanical vibrations of pendant liquid droplets, *The European Physical Journal E*, 2015, vol. 38, no. 7, p. 79, doi: 10.1140/epje/i2015-15079-2.
33. Galleguillos-Silva R., Vargas-Hernández Y., Gaete-Garretón L., Wettability of a surface subjected to high frequency mechanical vibrations, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 35, pp. 134–141, doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2016.09.011.
34. Monaghan J.J., Smoothed particle hydrodynamics, *Reports on Progress in Physics*, 2005, vol. 68, no. 8, pp. 1703–1759, doi: 10.1088/0034-4885/68/8/R01.
35. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C., A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335–354, doi: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
36. Adami S., Hu X.Y., Adams N.A., A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics, *Journal of Computational Physics*, 2012, vol. 231, no. 21, doi: 10.1016/j.jcp.2012.05.005.
37. Adami S., Hu X.Y., Adams N.A., A transport-velocity formulation for smoothed particle hydrodynamics, *Journal of Computational Physics*, 2013, vol. 241, doi: 10.1016/j.jcp.2013.01.043.
38. Tong M., Browne D.J., An incompressible multi-phase smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for modelling thermocapillary flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 73, pp. 284–292, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.064.
39. Hansen F.K., Rødsrud G., Surface tension by pendant drop: I. A fast standard instrument using computer image analysis, *Journal of Colloid and Interface Science*, 1991, vol. 141, no. 1, pp. 1–9, doi: 10.1016/0021-9797(91)90296-K.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20–48–596006) (построение математической модели с учетом вибрационных воздействий) и при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках проекта международной исследовательской группы «Моделирование послойного синтеза наплавкой проволочных материалов в реальном времени. Разработка прототипа ПО» Соглашение № С-26/512 (реализация математической модели).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR Project No. 20-48-596006 r_NOTs_Permskii Krai) (mathematical model development with vibration influences) and the Ministry of Education and Science of Perm Krai (contract S-26/512) (mathematical model implementation).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.