

Современные проблемы автоматизации управления левитационной плавкой металлов

А.В. БОЙКОВ ✉, В.А. ПАЙОР

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ boykov_av@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Boikov, A.; Payor, V. The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting. *Symmetry* 2022, 14, 1968. <https://doi.org/10.3390/sym14101968>

Аннотация: Данная статья представляет собой обзор актуальных научных проблем в области автоматизации управления процессом электромагнитно-левитационной плавки цветных металлов и возможных путей их решения с использованием современных цифровых технологий. В статье описан технологический процесс электромагнитной левитационной плавки как метод получения сверхчистых металлов и основные проблемы автоматизации этого процесса с учетом отечественного и зарубежного опыта. Рассмотрены перспективные подходы к контролю положения расплава в индукторе в реальном времени на основе систем технического зрения. Выделены основные проблемы и факторы, препятствующие массовому внедрению в промышленность левитационной плавки в электромагнитном поле. Также рассмотрена проблема прохождения точки Кюри нагретой заготовкой и влияние потери заготовкой намагниченности на колебательном контуре установки и температура индуктора. В статье также отражены основные направления развития исследований в области левитационной плавки, в том числе: оптимизация энергозатрат, стабилизация положения расплава в индукторе, предиктивное управление процессом, масштабирование установок левитационной плавки. Представлена концепция цифрового двойника на основе численной модели как компонента системы автоматического управления технологическим процессом для реализации управления индуктором и прогнозирования технологических параметров расплава. Рассмотрена возможность использования технического зрения для визуального контроля положения расплава в индукторе на основе видеоизображений с целью его дальнейшей стабилизации в индукторе и повышения точности результатов численного моделирования за счет уточнения реальной геометрии расплава параллельно с расчетом самой модели.

Ключевые слова: автоматизация; цифровое моделирование; индукционная печь; левитационная плавка; система технического зрения; цифровой двойник.

The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting

Aleksei V. BOIKOV ✉ and Vladimir A. PAYOR

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ boykov_av@pers.spmi.ru

Abstract: This article is a review of current scientific problems in the field of automation of the electromagnetic levitation melting process control of non-ferrous metals and potential solutions using modern digital technologies. The article describes the technological process of electromagnetic levitation melting as a method of obtaining ultrapure metals and the main problems of the automation of this process taking into account domestic and international experience. Promising approaches to control the position of the melt in the inductor in real time on the basis of vision systems are considered. The main problems and factors preventing the mass introduction of levitation melting in the electromagnetic field to the industry are highlighted. The problem of passing the Curie point by the heated billet and the effect of the billet's loss of magnetism on the vibrational circuit of the installation and the temperature of the inductor are also considered. The article also reflects key areas of research development in the field of levitation melting, including: optimization of energy costs, stabilization of the position of the melt in the inductor, predictive process control, and scaling of levitation melting units. The concept of a digital twin based on a numerical model as a component of an automatic process control system for the implementation of inductor control and prediction of process parameters of the melt is presented. The possibility of using vision for visual control of the melt position in the inductor based on video images for its further stabilization in the inductor and increasing the accuracy of numerical simulation results by specifying the real geometry of the melt in parallel with the calculation of the model itself is considered.

Keywords: automation; numerical simulation; induction furnace; levitation melting; vision system; digital twin.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2023.

1. Введение

Металлургическая промышленность является одним из основополагающих секторов мировой экономики. Спрос на металлопродукцию стабильно растет на протяжении нескольких десятилетий. Крупнейшими потребителями являются следующие отрасли: строительство, машиностроение, электронная промышленность. Наряду с ростом спроса на цветные и черные металлы существенным фактором становится глобальная тенденция к снижению выбросов парниковых газов и уменьшению углеродного следа. Принимаемые в настоящее время меры по регулированию углеродной политики также вносят коррективы в долгосрочную стратегию развития металлургического сектора.

Перечисленные факторы побуждают ведущие металлургические компании внедрять новые технологии производства и переработки металла с учетом новых энергозатрат и воздействия на окружающую среду, обеспечивая при этом стабильные, бесперебойные поставки продукции в условиях растущего спроса. Растущая потребность в новых материалах ставит перед металлургическими предприятиями задачу производства металлов и сплавов с улучшенными техническими свойствами.

Одной из задач металлургии является получение металлов с высокой степенью чистоты. Хорошо известно, что результирующие свойства выплавленного металла обычно определяются концентрацией содержащихся в нем примесей, которые негативно влияют на свойства конечного продукта. Поэтому важным становится предотвращение образования примесей в расплаве в результате химических реакций с атмосферой и стенками печи, а также растворения компонентов материала тигля. Кроме того, для получения однородного материала необходимо обеспечить равномерное распределение легирующих компонентов в объеме расплава в течение определенного времени (времени плавления). Среди различных технологий нагрева и плавления металлов широкое распространение получили индукционные печи, обеспечивающие бесконтактный контроль перемешивания расплава по электромагнитному полю, температуре и форме поверхности. Вместо обычного керамического тигля для электромагнитной обработки высокочистых материалов используется индукционная печь с холодным тиглем. Область их применения – от производства титановых деталей для аэрокосмической, автомобильной или медицинской промышленности до очистки фотоэлектрических элементов и кристаллизации кремния в полупроводниковом производстве. Благодаря наличию воздушных зазоров секционный металлический тигель остается прозрачным для электромагнитного поля. Здесь давление электромагнитного поля сильно сжимает расплав, что приводит к полувлечению. Расплав ударяется о дно охлаждаемого водой тигля. Таким образом, уменьшается загрязнение расплава материалом тигля.

Однако огромные потери тепла через охлаждаемый водой тигель и зоны контакта с расплавом, по-видимому, являются ограничивающим фактором для достижения более высокого нагрева расплава и отражаются на низкой энергоэффективности этого процесса. Высокие энергетические затраты на флотацию уравниваются высокой степенью очистки металла, но в любом случае они составляют значительную долю в себестоимости металла, получаемого по этой технологии.

Альтернативным методом бесконтактной плавки металла является электромагнитная левитационная плавка. Его отличительной особенностью является то, что расплав находится во взвешенном состоянии в течение всего процесса плавки и не соприкасается ни с поверхностью тигля, ни с поверхностью нагревательных элементов. Металл удерживается во взвешенном состоянии в индукторе электромагнитным полем, создаваемым переменным током и индуцированным током внутри заготовки, которая отталкивается от индуктора по закону Ампера. Обычно для электромагнитной плавки металла с помощью левитации используются специальные конусообразные индукторы с противотоком у основания конуса. Такая конструкция индуктора создает в электромагнитном поле так называемую «потенциальную яму», которая удерживает расплав от поперечных колебаний. Токи Фуко, создаваемые индуктором в металле, вызывают интенсивный нагрев и последующее плавление.

Индукционная плавка металлов с полной левитацией имеет два основных преимущества перед керамическими или индукционными печами. Во-первых, электромагнитная левитация в инертной атмосфере или вакууме полностью исключает загрязнение расплава материалом тигля и приводит к значительному повышению чистоты расплава. Во-вторых, тепловые потери жидкого металла снижаются и ограничиваются излучением и испарением, что позволяет проводить обработку электромагнитным полем при очень высоких температурах.

В настоящее время индукционно-левитационная плавка металла используется со значительными ограничениями по массе расплава. Это связано с тем, что с увеличением массы расплава значительно возрастает количество энергии, необходимой для поддержания металла во взвешенном состоянии. В основном бесконтактная плавка металлов применяется в высокотехнологичных отраслях, где требуется сверхчистый металл, в производстве полупроводников (в частности, монокристаллического кремния) и для плавки, литья, легирования и рафинирования активных металлов и их сплавов, таких как скандий, иттрий, титан, молибден, уран и другие.

Для ферромагнитных металлов процесс электромагнитной левитационной плавки также имеет некоторые ограничения, связанные с изменением свойств магнитных материалов при нагреве. При нагреве магнитного материала до точки Кюри он теряет свои магнитные свойства, что приводит к перегреву индуктора и провоцирует нежелательные колебания образца в тигле.

Процесс индукционного нагрева и плавления металлов в нормальных условиях хорошо автоматизирован. Существующие алгоритмы управления позволяют контролировать скорость нагрева заготовки, поддерживать заданную температуру, управлять циклом нагрева и охлаждения, стабилизировать потребляемую индуктором мощность. Однако в случае нагрева и плавления в суспензии задача управления усложняется необходимостью контролировать положение расплава в пространстве. Кроме того, при работе с ферромагнитными металлами также необходимо отслеживать точку Кюри и соответствующим образом изменять нагрузку на индуктор для стабилизации левитирующего расплава. Это связано с сильным влиянием ферромагнитной заготовки на колебательный контур индуктора, смещающим его резонансную частоту. Значения температуры в точке Кюри для различных металлов и в точке Курнакова для сплавов экспериментально установлены и известны. Однако в случае электромагнитного нагрева из-за скин-эффекта, возникающего на поверхности заготовки, металл нагревается неоднородно, что искажает результаты прямых измерений температуры.

Таким образом, прямого измерения температуры может быть недостаточно для построения контура управления, что, в свою очередь, создает необходимость построения численной динамической модели нагрева заготовки. В данной статье представлен обзор современного состояния исследований по проблемам управления процессом электромагнитной левитации плавки, построения численных моделей и применения цифровых двойников в промышленных и экспериментальных системах управления, включая оптимизацию энергозатрат.

2. Технология левитационной плавки металлов

Прорывные изменения в металлургической промышленности, произошедшие в технологически развитых странах во второй половине прошлого века, связаны с бурным развитием электротехники. Выплавка металлов в электрических печах (дуговых и индукционных) составляла незначительную долю от общего числа пирометаллургических процессов. Особую роль технологии индукционного нагрева приобрели в непрерывных металлургических процессах прокатного производства, таких как разливка металла, непрерывная термообработка, получение слябов и труб, ковка сплавов в твердом состоянии. Все перечисленные технологические процессы в настоящее время достаточно широко распространены, отлажены и стандартизированы как на отечественных, так и на зарубежных металлургических предприятиях.

Новым витком развития индукционной плавки металлов является бесконтактная плавка металла с левитацией, применяемая для получения сверхчистых сплавов. Отто Мук в 1923 году предложил электромагнитную левитацию расплава металла, называемую также бесконтактной плавкой в электромагнитном тигле. Он дал первое и самое простое теоретическое объяснение этому явлению – суспендированию или левитации металла электромагнитным полем. Однако только через 30 лет появились первые работы по теории и использованию этого вида плавки. В дальнейшем появились исследования по расширенному применению и научным функциям левитационной плавки металлов и сплавов, как в лабораторных, так и в полупромышленных масштабах. Последующие теоретические исследования в области электромагнитной левитации сопровождались постоянным совершенствованием самой технологии. Таким образом, были установлены следующие важные характеристики левитационной плавки:

- оптимальное время пребывания капли расплавленного металла в жидком состоянии [1];
- состав газовой среды и его влияние на шлакообразование в левитирующем расплаве [2];

- методы управления температурой заготовки от температуры плавления до температуры кипения [3];
- возможность использования для нагрева заготовки помимо самого индуктора дополнительных источников тепла, в том числе лазерного излучения и плазмы [4];
- возможность введения в левитирующий расплав легирующих компонентов [5];
- оптимальное соотношение между площадью поверхности капли расплава и ее объемом, достаточное для протекания гетерогенных реакций на ее поверхности [6];
- условия достижения сверхвысоких скоростей кристаллизации расплава [7].

Основные проблемы автоматизации левитационной плавки металлов в металлургической промышленности связаны с развитием теории и ее приложений к задаче поддержания жидкого металла в состоянии левитации. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные теоретическим основам электромагнитной левитации, ее огромные преимущества перед другими методами плавки металла не привели к быстрому распространению этого метода [8]. Это связано с тем, что большинство исследований проводилось без достаточного теоретического обоснования. Совсем недавно были разработаны некоторые более или менее обоснованные методы, которые могут быть использованы для оптимизации параметров левитационной установки [8]. На рис. 1 показан вид в поперечном сечении индуктора пятиконтурной левитационной системы, предложенной Поллом и Маклином [9].

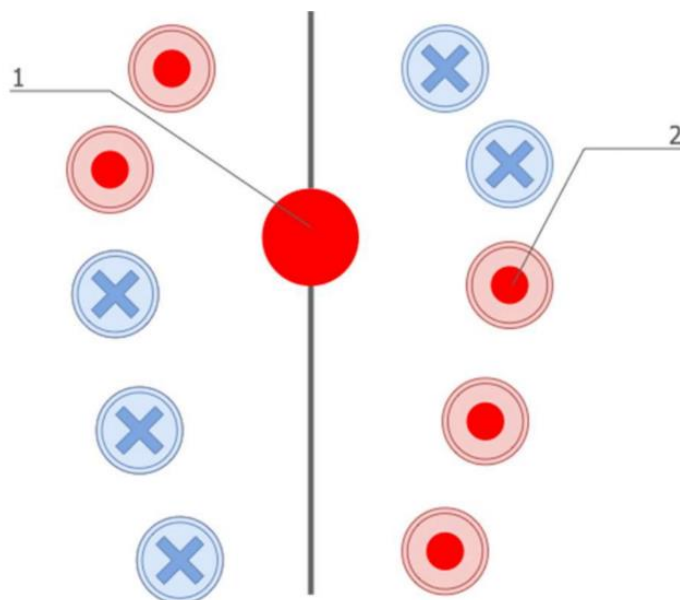


Рис. 1. Индуктор левитационной системы. Вид в поперечном сечении. (1) Капля. (2) Катушка индуктивности

В настоящее время наиболее значительный вклад в развитие технологии электромагнитно-левитационного плавления металлов внесла группа исследователей из Латвийского университета под руководством доктора С. Спитанса. В их работах [10] и [11] представлены результаты численного моделирования электромагнитно-левитационного плавления металлов с использованием пакетов OpenFoam и Ansys Fluent. Это позволило воспроизвести сложные мультифизические процессы, протекающие в заготовке. Исследователям также удалось провести численное моделирование динамики изменения формы капли расплава под действием электромагнитного поля индуктора и силы тяжести [12].

В дальнейших исследованиях была предложена конструкция нагревательной установки, состоящей из нескольких индукторов. Для предложенной конструкции также были определены оптимальные условия работы индукторов с учетом их взаимного расположения с использованием методов численного моделирования. Исследования, проведенные группой под руководством С. Спитанса, не ограничились виртуальным экспериментом. Исследователи также создали экспериментальную установку для проверки и подтверждения работоспособности предложенной конструкции. Результаты были опубликованы в 2017 году. По словам исследователей, метаморфозы

расплава в магнитном поле (изменение формы капли и ее положения в пространстве в процессе нагрева и плавления) практически полностью совпадали с эквивалентными характеристиками, полученными в численной модели процесса. В результате исследователи совместно с компанией «АЛД Вакуумные Технологии» представили технологию левитирующего плавления и литья больших (до 500 г) объемов титанового сплава – «ФастКаст» [13]. В отличие от традиционных подходов к осесимметричной электромагнитной левитационной плавке, новое решение основано на применении двух электромагнитных полей с разными частотами. При этом линии полей горизонтальны и взаимно перпендикулярны. Поэтому можно реализовать силу Лоренца в расплавленной шихте и на оси, увеличив тем самым максимально допустимую массу левитирующего образца [14].

Ученые Санкт-Петербургского государственного горного университета также уделили внимание исследованию индукционного нагрева металлов и построению численных моделей плавления заготовок в магнитном поле. В работах «Комбинированный метод моделирования электрической цепи и полевых задач в теории индукционного нагрева» [15] и «Моделирование индукционного нагрева ферромагнитной пластины с охватывающим индуктором» [16] представлены результаты численных экспериментов, выполненных в программном комплексе Ansys Maxwell для процесса индукционного нагрева металлов. Современное состояние научных исследований в области технологий электромагнитного нагрева металлов приведено в обзоре «Последние научные исследования по электротермическим металлургическим процессам», опубликованном в «Записках Горного института» в 2019 году [17].

Еще одним направлением, активно изучаемым в настоящее время, является производство мелко- и сверхмелкозернистых гранулированных металлических порошков. Развитие 3D-печати металлов и других аддитивных технологий обусловило спрос на сферические металлические порошки с реологическими свойствами при высокой текучести. Распыление заключается в подаче вертикального стержня растворимого анода в конический индуктор, где конец стержня расплавляется под действием вихревых токов электромагнитного поля. При этом образуется струя или капли жидкого металла, которые распыляются мощным потоком инертного газа. По сути, этот процесс является одним из классических вариантов электромагнитной левитации – плавление металла без его удержания в магнитном поле. Конструкция установки разбрызгивания состоит из питателя с растворимым анодом, плавильной камеры с индуктором, камеры разбрызгивания с соплами инертного газа, бункера для хранения порошка и генератора. Предлагаемый метод является бесконтактным и идеально подходит для получения высокоочищенных, активных и тугоплавких металлических порошков. Все параметры процесса известны и легко регулируются, что позволяет полностью контролировать размер порошков. Процесс прост, управляем и гибок. Преимуществом процесса является его простота и надежность. Он представлен в производстве высококачественных чистых сферических порошков тугоплавких и редких металлов, таких как титан, цирконий, ниобий, а также драгоценных металлов. Эти металлы широко востребованы в аддитивном производстве, аэрокосмической, медицинской и других отраслях.

Электромагнитная левитация, безусловно, является высокоэффективным методом бесконтактного манипулирования электропроводящими образцами. Этот метод позволяет точно измерять поверхностное натяжение и вязкость расплавов металлов. Однако под действием земного притяжения расплав, находящийся в естественной геометрии или поднятый электромагнитным полем, будет значительно деформирован. Одновременный контроль температуры и левитации в условиях нормальной гравитации $1g$ ограничен, поскольку электромагнитное поле, необходимое для подъема образцов, может нагревать их до высоких температур, даже выше температуры плавления. Течения в нагретой деформированной капле расплава плохо контролируются в земных условиях. Для него характерен переход от ламинарного к турбулентному режиму, что требует проведения экспериментов в условиях невесомости (микрогравитации) [18]. Среди возможностей достижения условий микрогравитации на короткое время можно назвать параболические полеты, например, на суборбитальном самолете Airbus A310 или на Международной космической станции. Результаты экспериментов были получены во время полетов на Международную космическую станцию в 2016 и 2017 годах с использованием установки TEMPUS EML и опубликованы в работе «EML – Электромагнитный левитатор для Международной космической станции» [19]. Полученные

результаты задают еще одно направление развития технологии левитационной плавки металлов в невесомости как перспективной технологии освоения космоса.

Помимо металлургии, электромагнитная левитационная плавка нашла свое применение в выращивании монокристаллов для полупроводниковой промышленности.

3. Задача масштабирования левитационной плавки металла

К основным недостаткам существующего метода левитационной плавки относится малая масса расплавленного металла. Она не превышает нескольких десятков граммов, что в значительной степени сужает широкое промышленное применение метода.

Увеличение массы расплавляемого образца достижимо за счет использования в установке комбинации нескольких индукторов, как это представлено в работе группы под руководством д-ра С. Спитанса. Однако большее количество индукторов приводит к увеличению расхода электроэнергии на нагрев, плавление и удержание расплава во взвешенном состоянии [20]. Кроме того, объединение нескольких индукторов в одной установке приводит к усложнению контроля состояния заготовки и генераторов. В данной работе также не учитывается взаимное влияние индукторов друг на друга, приводящее к чрезмерному нагреву катушек под действием внешних магнитных полей, создаваемых дополнительными индукторами.

Таким образом, задача масштабирования установок левитационной плавки металла связана с оценкой оптимального расположения каскада индукторов, а также с созданием автоматизированной системы управления, позволяющей минимизировать негативный эффект взаимной индукции. С точки зрения автоматизации эта задача на момент написания обзора не рассматривалась, и всесторонних исследований по указанной проблеме не обнаружено.

4. Левитационное плавление ферромагнитных металлов

Практически все перечисленные выше разработки в области левитационной плавки относятся в основном к неферромагнитным (цветным) металлам. Технология левитационной плавки железа имеет значительные перспективы как метод очистки от фосфора и других примесей. Суспензионная плавка в среде инертного газа, сопровождающаяся конвекцией расплава под действием магнитного поля, активно рассматривается как потенциальный метод рафинирования металлов. Технические трудности, возникающие при плавлении ферромагнитных материалов, обусловлены их ярко выраженными магнитными свойствами и скачкообразным изменением при нагреве.

Известно, что ферромагнитные материалы намагничиваются в отсутствие внешнего магнитного поля при температурах ниже критического значения, называемого точкой Кюри. При внешнем воздействии и нагреве ферромагнитные металлы постепенно теряют свои магнитные свойства. При достижении точки Кюри они теряют их практически полностью. Это свойство магнитных материалов вызывает определенные трудности при левитационном плавлении в магнитном поле.

При введении ферромагнитной заготовки в цепь индуктора с размерами, сопоставимыми с размерами заготовки, индуктивность начинает резко возрастать. Это, в свою очередь, приводит к ступенчатому изменению собственной частоты колебательного контура и ее отставанию от частоты генератора. Выход контура из резонанса с генератором приводит к резкому увеличению сопротивления, сопровождающемуся пропорциональным уменьшением энергии, отводимой от индуктора к заготовке. Возрастающее сопротивление индуктора приводит к его перегреву и требует дополнительного охлаждения, что отрицательно влияет на энергоэффективность всего процесса.

При нагреве заготовки до точки Кюри ее магнитные свойства исчезают, и собственная частота колебательного контура возвращается к частоте задающего генератора. Ступенчатое изменение намагниченности ферромагнетика, проходящего через точку Кюри, приводит к резкому падению сопротивления индуктора, что влечет за собой увеличение тока, потребляемого индуктором. Если оператор установки своевременно не отреагирует на повышение напряжения питания, это может привести к перегреву и выходу оборудования из строя. Кроме того, если печь оснащена системой автоматического управления, то она должна отслеживать переход температуры заготовки через точку Кюри и пропорционально снижать частоту задающего генератора, тем самым поддерживая его в резонансе с колебательным контуром [21].

Для немагнитных материалов прохождение через точку Кюри не оказывает существенного влияния на контур индуктора. Как следствие, для немагнитных металлов нет необходимости в автоматизации процесса левитационной плавки в электромагнитном поле. То же самое справедливо и для тех случаев, когда размеры заготовки намного меньше размеров нагревательного индуктора.

Для черной же металлургии это весьма актуально, поскольку такие металлы, как железо (Fe), никель (Ni), ванадий (Vn), кобальт (Co), некоторые редкоземельные металлы тербий (Tb), гадолиний (Gd) и гольмий (Ho), а также некоторые сплавы обладают сильными ферромагнитными свойствами, что затрудняет применение левитационной технологии.

5. Задача стабилизации положения расплава

Помимо рассмотренных выше особенностей взаимодействия высокочастотного электромагнитного поля с жидким металлом при левитации, существует группа явлений, связанных с устойчивостью металла. Движение капли, висящей в магнитном поле, не является специфическим свойством жидкого состояния, а обусловлено электромагнитным взаимодействием металла с полем. Изменение положения металла относительно индуктора с постоянной ЭДС влияет на величину тока, протекающего через индуктор, что приводит к изменению силы, действующей на металл. В экспериментах с алюминиевыми шариками, левитирующими в воздухе, воде и масле, были обнаружены следующие особенности:

- устойчивое равновесие вокруг оси симметрии в более вязкой среде, чем воздух;
- устойчивые колебания с малой амплитудой постоянной величины;
- нарастающие колебания с амплитудой, превышающей размеры индуктора.

Характер колебаний расплава в магнитном поле не зависит ни от величины тока в индукторе, ни от степени сжатия капли расплава магнитным полем. Устойчивое положение капли достигается, если центр кривизны поверхности расплава в его устойчивом состоянии находится вне объема расплава. Еще одной особенностью левитирующего расплава является перемешивание внутри самой капли. Эксперименты, проведенные с жидким натрием, помещенным в стеклянную колбу в электромагнитном поле, показали наличие турбулентного движения металла внутри колбы. Скорости движения расплава натрия в этом эксперименте измерялись с помощью трубок Пито, а также фотографическим методом. Таким образом, было установлено, что значительная часть расплава в колбе движется вверх, а вдоль стенок колбы металл движется вниз с гораздо большей скоростью. Для определения зависимости скорости движения металла от напряженности магнитного поля колба фиксировалась и измерялась вертикальная составляющая скорости при различных значениях тока. Отдельные эксперименты без колбы позволили сделать вывод о том, что перемешивание расплава при левитации в вакууме или инертном газе происходит более интенсивно, чем описано выше, поскольку скорость металла на поверхности капли не нулевая.

6. Перспективные направления развития автоматизации левитационной плавки

Стабилизация состояния колебательного контура индуктора и определение способа отвода избыточного тепла от катушки является одной из ключевых задач управления при электромагнитной плавке металлов. С точки зрения автоматизации левитационная плавка представляет собой сложный многоконтурный процесс. Нахождению оптимальных условий нагрева заготовки предшествует задача оптимизации по нескольким параметрам: температуре расплава, его положению в пространстве (по двум или трем координатам), температуре индуктора, силе тока в индукторе. Измерение температуры левитирующей заготовки осложняется также конструкцией нагревательного устройства. Высокий уровень электромагнитных помех и наводок от индуктора, а также нестабильное положение заготовки в пространстве и ее вибрации не позволяют разместить во внутреннем пространстве индуктора какие-либо чувствительные элементы. Использование термопар практически невозможно, так как невозможно отфильтровать помехи, наводимые высокочастотным электромагнитным полем индуктора, а объем металла обычно слишком мал для контактных измерений. Поэтому единственным возможным подходом к измерению температуры заготовки или расплава являются бесконтактные методы, такие как пирометры и тепловизоры.

Температура левитирующего жидкого металла может быть измерена с помощью пирометров различного типа: цветных, радиационных или оптических. Последние два типа пирометров можно

использовать только в условиях хорошей видимости исследуемого объекта. Поверхность металла при измерении температуры также не должна содержать примесей и окислов, искажающих результаты измерения температуры. С другой стороны, цветные пирометры практически нечувствительны к образованию пленок на стекле, поэтому они особенно подходят для подобных применений, хотя и очень сложны в эксплуатации и обслуживании. В случае яркостного пирометра сначала необходимо измерить излучательную способность металлов на специальном приборе, поскольку принцип их работы основан на определении излучательной способности горячего металла в зависимости от температуры. Для нахождения зависимости излучательной способности образца от температуры для металлов с высокой температурой плавления применима модель абсолютного черного тела. Форма образцов должна быть выбрана таким образом, чтобы они обладали наибольшей стабильностью в индукторе.

Калибровку пирометра по реперным точкам из чистого металла обычно проводят на расплавленном левитаторе или тигле из инертных материалов. Для этого металл медленно расплавляют, а затем кристаллизуют, изменяя скорость потока инертного газа, подаваемого на каплю направленным потоком сверху, или в охлаждаемом медном кристаллизаторе.

Учитывая все ограничения, связанные с пирометрами, и сложность их калибровки для адаптации к этой задаче, целесообразно рассмотреть тепловизоры в качестве бесконтактного средства контроля температуры. Основное отличие тепловизоров от пирометров заключается в том, что они содержат целый каскад (матрицу) чувствительных элементов, формирующих изображение измеряемой поверхности. В отличие от одномерного сигнала, видеоизображение, получаемое с помощью тепловизора, более информативно и представляет больший интерес для изучения поверхностных процессов, происходящих в расплаве. В сочетании с методами технического зрения его можно использовать не только для определения распределения температуры на поверхности заготовки, но и для отслеживания положения капли расплава в пространстве.

Системы технического зрения с тепловизорами стали появляться в промышленных системах мониторинга совсем недавно и уже доказали свою эффективность для решения задач бесконтактного контроля температуры поверхности промышленных объектов, изделий и заготовок [22]. В частности, они используются в сталепрокатном производстве для контроля температуры слэбов, а также в системах автоматического подсчета шлака в расплаве [23].

Использование тепловизоров в аналогичных задачах доказывает состоятельность этого метода. Однако для тепловизионной съемки при левитационной плавке они пока не применялись [24].

Технические проблемы тепловизионной инфракрасной съемки возникают на этапе алгоритмической обработки и фильтрации шумов изображения. Сложные технические условия съемки накладывают ряд ограничений на применение классических алгоритмов обработки изображений [25]. В частности, задача корректного определения положения капли расплава в пространстве осложняется изменением геометрии заготовки в процессе ее плавления в индукционной печи и неоднородной светимостью, обусловленной конвективными течениями внутри расплава [26].

Использование систем технического зрения на основе нейронных сетей является современным подходом для распознавания и отслеживания объектов с изменяющимися характеристиками. К достоинствам этого подхода можно отнести высокую скорость и точность распознавания объектов, что позволяет использовать их и в составе систем реального времени. Существуют различные топологии нейронных сетей, предназначенные для решения конкретных специализированных задач. Их можно разделить на следующие группы [27]:

- классификация – определение наличия на изображении объекта определенного класса;
- распознавание образов – определение области на изображении, в которой, предположительно, находится объект из известного класса;
- сегментация изображения – отделение пикселей изображения, принадлежащих объектам интересующих классов, от фона;
- семантическая сегментация – сопоставление отдельных пикселей изображения с конкретным объектом распознанного класса.

Для каждой из перечисленных задач существуют определенные виды топологий нейронных сетей, которые будут корректно выполнять ту или иную задачу. Поэтому основная задача иссле-

дования связана с применением нейронных сетей в составе системы технического зрения для контроля положения расплава. Она заключается в адаптации существующей топологии для работы с мультиспектральным изображением и подготовке репрезентативной обучающей выборки [28].

Основным недостатком нейронных сетей является необходимость их обучения на больших объемах данных [29]. Например, наиболее известный классификатор GoogleNet был обучен почти на 16 млн. изображений. Очевидно, что сбор достаточного количества обучающих данных становится одним из основных факторов, препятствующих широкомасштабному внедрению искусственных нейронных сетей в промышленность. Подготовка обучающей выборки не ограничивается исключительно сбором, но требует значительных трудозатрат на маркировку данных [30]. Под маркировкой данных в машинном обучении понимается выделение на изображении областей, соответствующих типу искомого объекта. Эта процедура является достаточно трудоемким процессом, а в случае промышленных данных она еще и осложняется более высокими требованиями к квалификации инженера [31].

Ускорить сбор обучающих данных и, как следствие, внедрение систем технического зрения в производство можно за счет генерации синтетических данных. Синтетические данные – это информация, сгенерированная программным образом на компьютере с помощью специализированных алгоритмов, которые имитируют поведение исследуемого объекта и воспроизводят его различные состояния [32]. Например, в случае систем технического зрения изображения объектов могут быть сгенерированы с помощью современных средств компьютерной графики. Изображение объекта реконструируется по данным имитационного и численного моделирования, а положение и яркость расплава можно изменять программным образом, визуализируя каждый вариант отдельно [33]. Полученные таким образом изображения могут быть использованы для повышения точности обучения нейронной сети [34]. В дополнение к различным состояниям объекта на изображении, такой подход позволяет ввести в изображение реалистичный шум, характерный для данного процесса. Это повышает устойчивость обучаемой модели.

Следующим существенным недостатком данного подхода является потребность в больших вычислительных ресурсах для обучения, чтобы получить корректные и стабильные результаты в реальных условиях эксплуатации. Обучение нейронных сетей лучше всего проводить на графических и тензорных процессорах, оптимизированных для работы с большими матрицами, представляющими веса обучаемой нейронной сети [35].

Обучающую выборку для обучения нейронных сетей предполагается совмещать с фотографиями, полученными в ходе натурального эксперимента, и программным образом сгенерированными изображениями [36]. Кроме того, для повышения надежности распознавания и устойчивости алгоритма к шумам следует добавлять зашумленные копии изображений [37].

Поскольку реальные условия эксплуатации модели предполагают обработку видео в реальном времени, а размещение модели предполагается на объекте (на встроенном компьютере), предпочтением будет отдано облегченным топологиям, таким как MobileNet [38].

7. Предиктивное управление на основе численной модели

С точки зрения автоматизации электромагнитная плавка представляет собой сложный многостадийный процесс. Условно его можно разделить на три стадии: нагрев металла, прохождение точки Кюри (стабилизация) и охлаждение расплава (кристаллизация). В зависимости от конечной цели охлаждение может быть заменено литьем расплава или экструзией. В любом случае именно изменения состояния металла, т.е. переходные процессы, вызывают наибольшие трудности при управлении процессом. Необходимость использования имитационной модели в составе системы управления процессом обусловлена сложностью переходных процессов. В этот момент система управления процессом плавки должна своевременно снизить ток в катушке индуктивности, сохранив расплавленный образец в подвешенном состоянии. Неустойчивое положение капли металла в магнитном поле предлагается предопределять в имитационной модели на основе текущих параметров процесса, поступающих с измерительных приборов [39]. Преимущество такого подхода по сравнению с численными моделями без обратной связи с процессом заключается в том, что модель, подкрепленная реальными измерениями, является более релевантной и надежной. Кроме того, такая модель, в отличие от традиционной системы управления технологическим процессом,

может быть использована для предиктивного управления процессом [40]. Таким образом, новые параметры процесса могут быть предварительно настроены на цифровом двойнике, что снижает количество сбоев, возникающих по вине оператора [41].

С точки зрения теории автоматического управления цифровой двойник не является принципиально новой концепцией. Со второй половины XX века регуляторы с модельным блоком уже применяются в автоматике и успешно используются в промышленности [42]. Модельный блок в данном случае представляет собой упрощенную математическую модель объекта управления и используется для повышения быстродействия систем управления с большим запаздыванием [43]. Если заменить модельный блок с математической моделью на имитационную модель и приложить входную силу, эквивалентную той, что приложена к объекту управления, то гипотетическая кривая отклика имитационной модели должна быть эквивалентна кривой отклика реального объекта управления при прочих равных условиях [44].

Цифровой двойник, работающий параллельно с реальным процессом и являющийся частью АСУТП, может стать принципиально новым подходом к построению систем управления на основе цифрового двойника. Комбинируя информацию от датчиков о текущем состоянии объекта и возмущающих воздействиях с цифровой моделью процесса, можно с достаточно высокой точностью предсказать последующие состояния системы управления (объекта) при заданном управляющем воздействии известной величины [45]. Системы такого типа применимы для реализации прогнозирующего управления процессами и в качестве инструмента для проведения виртуальных экспериментов. С помощью такой системы можно в любой момент времени создать копию модели и воспроизвести альтернативный сценарий управления процессом, не затрагивая уже работающее реальное оборудование. Такой подход позволит снизить риск ошибок при изменении алгоритмов управления в АСУТП, их отладке и оценке эффективности, в том числе с помощью методики КВИЭ (коэффициентов возврата инвестиций в энергетику) [46].

Экономический эффект от внедрения АСУТП на основе цифрового двойника будет проявляться в снижении затрат на внеплановое технологическое обслуживание и ремонт оборудования. Снизятся также затраты на электроэнергию за счет повышения производительности оборудования благодаря более точной и своевременной настройке технологических параметров. Кроме того, цифровой двойник позволяет отлаживать АСУ самостоятельно, без риска возникновения аварийной ситуации в диспетчерской [47].

Еще одним существенным преимуществом использования имитационных моделей в составе АСУТП является возможность средне- и долгосрочного прогнозирования энергозатрат и энергоэффективности процесса для последующего планирования стратегии энергосбережения [48]. Системы такого типа могут применяться как для реализации предиктивного управления процессом, так и в качестве инструмента для проведения виртуальных экспериментов [49]. С помощью этого инструмента можно в любой момент времени сделать копию объектной модели и воспроизвести в ней альтернативный сценарий управления процессом, не затрагивая уже работающее реальное оборудование.

8. Обсуждение

В представленном обзоре дано современное состояние вопроса о левитационной плавке металлов в электромагнитном поле. Приведены результаты литературного и патентного поиска по теме научного исследования. Описаны существующие и пока нерешенные научные задачи, связанные с управлением и комплексной автоматизацией процесса левитационной плавки и его адаптацией к массовому внедрению в промышленность. Проведен анализ наиболее актуальных проблем, выявленных в ходе научного обзора, в частности, с точки зрения энергосбережения. Настоящее издание представляет собой наиболее актуальный и полный обзор современных научных исследований в области левитационной плавки металлов. Обзор будет полезен исследователям, работающим в смежных областях.

Определены наиболее актуальные научные проблемы левитационной плавки цветных и черных металлов. К ним относятся: задача бесконтактного определения и контроля температуры и формы левитирующего расплава, стабилизация положения расплава в контуре индуктора, оптимизация температурного режима магнитной левитационной установки при прохождении

заготовками черных металлов точки Кюри, разработка методов удержания и кристаллизации расплава во взвешенном состоянии. В качестве предлагаемых решений этих научных вопросов были определены следующие задачи:

- разработка системы технического зрения для контроля положения расплавленного образца в индукторе и мониторинга температуры его поверхности на основе глубокой сверхточной нейронной сети, обученной на синтетических данных;
- разработка имитационной модели нагрева и плавления в электромагнитном поле заготовки из ферромагнитного металла и системы контроля прохождения точки Кюри на основе имитационной модели, рассчитываемой в реальном времени (цифровой двойник);
- разработка системы электромагнитного захвата для удержания расплава во взвешенном состоянии для охлаждения и кристаллизации при отключении силового (нагревательного) индуктора.

Дальнейшие исследования в области левитационной плавки металлов предполагают масштабирование плавильных печей и увеличение массы расплавляемого металла, а также оптимизацию потребления печью электроэнергии. Кроме того, перспективным направлением исследований является решение проблемы стабилизации положения образца в индукторе. В качестве дальнейшей работы в рамках данного исследования предполагается разработка системы контроля положения расплавленного образца в индукторе на основе компьютерного зрения.

Вклад авторов: Концептуализация, А.Б. и В.П.; методология, А.Б.; написание-рецензирование-редактирование, В.П.; руководство, А.Б.; управление проектом, А.Б.; Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: Не применимо.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorlanov, E.S.; Bazhin, V.Y.; Fedorov, S.N. Low-Temperature Phase Formation in A Ti-B-C-O System. *Tsvetnye Met.* 2017. <http://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.12>
2. Lohöfer, G. Theory of an Electromagnetically Levitated Metal Sphere I: Absorbed Power. *SIAM J. Appl. Math.* 1989, 49. <http://doi.org/10.1137/0149032>
3. Lewis, J.C.; Neumayer, H.R.J.; Ward, R.G. The Stabilization of Liquid Metal during Levitation Melting. *J. Sci. Instrum.* 1962, 39. <http://doi.org/10.1088/0950-7671/39/11/311>
4. Takahashi, K.; Mogi, I.; Onogi, T.; Awaji, S.; Motokawa, M.; Watanabe, K. Materials Processing in Magnetic Levitation Furnaces. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2006, 7, 346–349. <http://doi.org/10.1016/j.stam.2006.02.004>
5. Yu, J.; Fu, C.; Liu, Y.; Xia, K.; Aydemir, U.; Chasapis, T.C.; Snyder, G.J.; Zhao, X.; Zhu, T. Unique Role of Refractory Ta Alloying in Enhancing the Figure of Merit of NbFeSb Thermoelectric Materials. *Adv. Energy Mater.* 2018, 8, 1701313. <http://doi.org/10.1002/aenm.201701313>
6. Zhu, X.R.; Harding, R.A.; Campbell, J. Calculation of the Free Surface Shape in the Electromagnetic Processing of Liquid Metals. *Appl. Math. Model.* 1997, 21, 207–214. [http://doi.org/10.1016/S0307-904X\(97\)00008-5](http://doi.org/10.1016/S0307-904X(97)00008-5)
7. Palacz, M.; Melka, B.; Wecki, B.; Siwiec, G.; Przulucki, R.; Bulinski, P.; Gola, S.; Blacha, L.; Smolka, J. Experimental Analysis of the Aluminium Melting Process in Industrial Cold Crucible Furnaces. *Met. Mater. Int.* 2020, 26, 695–707. <http://doi.org/10.1007/s12540-019-00368-2>
8. Nycz, B.; Malinski, L.; Przulucki, R. Influence of Selected Model Parameters on the Electromagnetic Levitation Melting Efficiency. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3827. <http://doi.org/10.3390/app11093827>
9. Wu, P.; Yang, Y.; Barati, M.; McLean, A. Electromagnetic Levitation of Silicon and Silicon-Iron Alloy Droplets. *High Temp. Mater. Process.* 2014, 33. <http://doi.org/10.1515/htmp-2013-0102>
10. Spitans, S.; Franz, H.; Baake, E. Numerical Modeling and Optimization of Electrode Induction Melting for Inert Gas Atomization (EIGA). *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 2020, 51, 1918–1927. <http://doi.org/10.1007/s11663-020-01934-5>
11. Spitans, S.; Franz, H.; Baake, E.; Jakovičs, A. Large-Scale Levitation Melting and Casting of Titanium Alloys. *Magnetohydrodynamics* 2017, 53, 633–641. <http://doi.org/10.22364/mhd.53.4.5>
12. Lee, J.; Xiao, X.; Matson, D.M.; Hyers, R.W. Numerical Prediction of the Accessible Convection Range for an Electromagnetically Levitated Fe₅₀Co₅₀ Droplet in Space. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 2015, 46, 199–207. <http://doi.org/10.1007/s11663-014-0178-9>
13. Spitans, S.; Bauer, C.; Baake, E. Investment Castings with Unique Levitation Melting Technology. In Proceedings of the 68th Technical Conference & Expo, Grand Rapids, MI, USA, 7 November 2021.
14. Zhang, X.; Trakarnchaiyo, C.; Zhang, H.; Khamesee, M.B. MagTable: A Tabletop System for 6-DOF Large Range and Completely Contactless Operation Using Magnetic Levitation. *Mechatronics* 2021, 77, 102600. <http://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102600>
15. Demidovich, V.B.; Rastvorova, I.I. A Combined Method of Simulation of an Electric Circuit and Field Problems in the Theory of Induction Heating. *Russ. Electr. Eng.* 2014, 85, 536–540. <http://doi.org/10.3103/S1068371214080057>

16. Khorshev, A.; Bondar, A.; Streltsova, O.; Chmileno, F.; Rastvorova, I. Simulation of Induction Heating of a Ferromagnetic Plate with a Covering Inductor. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 2032, 012025. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012025>
17. Baake, E.; Shpenst, V.A. Recent Scientific Research on Electrothermal Metallurgical Processes. *J. Min. Inst.* 2019, 240, 660–668. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.660>
18. Xiao, X.; Brillo, J.; Lee, J.; Hyers, R.W.; Matson, D.M. Impact of Convection on the Damping of an Oscillating Droplet during Viscosity Measurement Using the ISS-EML Facility. *NPJ Microgravity* 2021, 7, 36. <http://doi.org/10.1038/s41526-021-00166-4>
19. Seidel, A.; Soellner, W.; Stenzel, C. EML—An Electromagnetic Levitator for the International Space Station. *J. Phys. Conf. Ser.* 2011, 327, 012057. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/327/1/012057>
20. Darhovskiy, Y.; Mellincovsky, M.; Baimel, D.; Kuperman, A. A Novel Contactless, Feedbackless and Sensorless Power Delivery Link to Electromagnetic Levitation Melting System Residing in Sealed Compartment. *Energy* 2021, 231, 120789. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120789>
21. Easter, S.; Bojarevics, V.; Pericleous, K. Numerical Modelling of Liquid Droplet Dynamics in Microgravity. *J. Phys. Conf. Ser.* 2011, 327, 012027. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/327/1/012027>
22. Gagliano, S.; Stella, G.; Bucolo, M. Real-Time Detection of Slug Velocity in Microchannels. *Micromachines* 2020, 11, 241. <http://doi.org/10.3390/mi11030241> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32111020>
23. Parchevsky, V.M. Mathematical Support for the Control System for Nitrogen Oxide Emissions in Boilers with Furnaces with Liquid Slag Removal. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1683, 042060. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042060>
24. Kulchitskiy, A. Optical Inspection Systems for Axisymmetric Parts with Spatial 2D Resolution. *Symmetry* 2021, 13, 1218. <http://doi.org/10.3390/sym13071218>
25. Bazhin, V.Y.; Issa, B. Influence of Heat Treatment on the Microstructure of Steel Coils of a Heating Tube Furnace. *J. Min. Inst.* 2021, 249, 393. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.8>
26. Ma, Y.; Li, Q.; Chu, L.; Zhou, Y.; Xu, C. Real-Time Detection and Spatial Localization of Insulators for Uav Inspection Based on Binocular Stereo Vision. *Remote Sens.* 2021, 13, 230. <http://doi.org/10.3390/rs13020230>
27. Shabalov, M.Y.; Zhukovskiy, Y.L.; Buldysko, A.D.; Gil, B.; Starshaia, V.V. The Influence of Technological Changes in Energy Efficiency on the Infrastructure Deterioration in the Energy Sector. *Energy Rep.* 2021, 7, 2664–2680. <http://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.001>
28. Vasilyeva, N.; Fedorova, E.; Kolesnikov, A. Big Data as a Tool for Building a Predictive Model of Mill Roll Wear. *Symmetry* 2021, 13, 859. <http://doi.org/10.3390/sym13050859>
29. Ushakov, E.; Aleksandrova, T.; Romashev, A. Neural Network Modeling Methods in the Analysis of the Processing Plant's Indicators. *Adv. Intell. Syst. Comput.* 2021, 1259, 36–45.
30. Voronina, M.V.; Moroz, O.N. A Substantiation of Foresight Research of Development Strategy of Descriptive Geometry, Engineering Geometry and Computer Graphics Departments on the Basis of Industrial 4.0 Ideology. *Man India* 2017, 97, 375–389.
31. Álvarez-Tuñón, O.; Jardón, A.; Balaguer, C. Generation and Processing of Simulated Underwater Images for Infrastructure Visual Inspection with UAVs. *Sensors* 2019, 19, 5497. <http://doi.org/10.3390/s19245497>
32. Konushin, A.S.; Faizov, B.V.; Shakhuro, V.I. Road Images Augmentation with Synthetic Traffic Signs Using Neural Networks. *Comput. Opt.* 2021, 45, 736–748. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-859>
33. Islamov, S.; Grigoriev, A.; Beloglazov, I.; Savchenkov, S.; Gudmestad, O.T. Research Risk Factors in Monitoring Well Drilling—A Case Study Using Machine Learning Methods. *Symmetry* 2021, 13, 1293. <http://doi.org/10.3390/sym13071293>
34. Lee, S.Y.; Tama, B.A.; Choi, C.; Hwang, J.Y.; Bang, J.; Lee, S. Spatial and Sequential Deep Learning Approach for Predicting Temperature Distribution in a Steel-Making Continuous Casting Process. *IEEE Access* 2020, 8, 21953–21965. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969498>
35. Abakumov, I.I.; Kul'chitskii, A.A. Compensation of the Errors of a Passive Opto-Electronic System for Dimensional Control of Articles. *Meas. Tech.* 2016, 59. <http://doi.org/10.1007/s11018-016-1052-8>
36. Szegedy, C.; Liu, W.; Jia, Y.; Sermanet, P.; Reed, S.; Anguelov, D.; Erhan, D.; Vanhoucke, V.; Rabinovich, A. Going Deeper with Convolutions. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, MA, USA, 12 June 2015.
37. Simakov, A.S.; Trifonova, M.E.; Gorlenkov, D.V. Virtual Analyzer of the Voltage and Current Spectrum of the Electric Arc in Electric Arc Furnaces. *Russ. Metall.* 2021, 2021, 713–719. <http://doi.org/10.1134/S0036029521060252>
38. Silva, B.E.; Barbosa, R.S. Experiments with Neural Networks in the Identification and Control of a Magnetic Levitation System Using a Low-Cost Platform. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2535. <http://doi.org/10.3390/app11062535>
39. Vishnuram, P.; Ramachandiran, G.; Babu, T.S.; Nastasi, B. Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting Applications: A Systematic Review on Modelling, Converter Topologies and Control Schemes. *Energies* 2021, 14, 6634. <http://doi.org/10.3390/en14206634>
40. Fedorova, E.R.; Vasileva, N.V.; Pupyshva, E.A. Algorithm to Distribute Feed Pulp between Paralleled Thickeners during Red-Sludge Thickening and Washing in Alumina Production. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1333, 042007. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/4/042007>
41. Pirog, S.; Shklyarskiy, Y.E.; Skamyin, A.N. Non-Linear Electrical Load Location Identification. *J. Min. Inst.* 2019, 237, 317–321. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.317>
42. Beloglazov, I.I.; Petrov, P.A.; Bazhin, V.Y. The Concept of Digital Twins for Tech Operator Training Simulator Design for Mining and Processing Industry. *Eurasian Min.* 2020, 2020, 50–54. <http://doi.org/10.17580/em.2020.02.12>
43. Koteleva, N.I.; Korolev, N.A.; Zhukovskiy, Y.L. Identification of the Technical Condition of Induction Motor Groups by the Total Energy Flow. *Energies* 2021, 14, 6677. <http://doi.org/10.3390/en14206677>
44. Fizaïne, F.; Court, V. Renewable Electricity Producing Technologies and Metal Depletion: A Sensitivity Analysis Using the EROI. *Ecol. Econ.* 2015, 110, 106–118. <http://doi.org/10.3390/en14206677>
45. Knapp, G.L.; Mukherjee, T.; Zuback, J.S.; Wei, H.L.; Palmer, T.A.; De, A.; DebRoy, T. Building Blocks for a Digital Twin of Additive Manufacturing. *Acta Mater.* 2017, 135, 390–399. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.039>

-
46. Savard, C.; Iakovleva, E.; Ivanchenko, D.; Rassölkin, A. Accessible Battery Model with Aging Dependency. *Energies* 2021, 14, 3494. <http://doi.org/10.3390/en14123493>
47. Vöth, S.; Vasilyeva, M. Potential of Modelica for the Creation of Digital Twins. In *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*; CRC Press: London, UK, 2021.
48. Kolesnikov, A.S.; Serikbaev, B.E.; Zolkin, A.L.; Kenzhibaeva, G.S.; Isaev, G.I.; Botabaev, N.E.; Shapalov, S.K.; Kolesnikova, O.G.; Iztleuov, G.M.; Suigenbayeva, A.Z.; et al. Processing of Non-Ferrous Metallurgy Waste Slag for Its Complex Recovery as a Secondary Mineral Raw Material. *Refract. Ind. Ceram.* 2021, 62, 375–380. <http://doi.org/10.1007/s11148-021-00611-7>
49. Ilyushin, Y.; Afanaseva, O. Spatial Distributed Control System Of Temperature Field: Synthesis And Modeling. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2021, 16, 1491–1506.