УДК 669

Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки

Э.БААКЕ¹, В.А.ШПЕНСТ²✉¹ Институт электротехнологии, Ганноверский университет им. Лейбница, Ганновер, Германия² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время широкий спектр промышленных металлургических процессов нагрева и плавления реализуется на основе использования электротермических технологий. Применение электротермических процессов является предпочтительным как с технологической, так и с экологической и экономической точек зрения. Достигнутый технологический уровень применения электронагрева и плавки является очень высоким и постоянно совершенствуется из-за растущей сложности аппаратуры и строгих требований к производительности и качеству продукции.

В статье приводятся наиболее перспективные решения по эффективному нагреву и плавлению с помощью электротермических технологий в металлургическом производстве, а также отдельные примеры использования данных технологий, такие как индукционный нагрев дляковки или прокатки заготовок, термическая обработка полос и листов, процессы пресс-упрочнения, индукционное упрочнение поверхности сложной геометрии, индукционная сварка и индукционная плавка.

Ключевые слова: электротермические процессы; электротехника; металлургия; индукционный нагрев; индукционная плавка; электромагнитная обработка

Как цитировать эту статью: Бааке Э. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки / Э.Бааке, В.А.Шпенст // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 660-668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660

Введение. Технологии термической обработки являются неотъемлемой частью многих промышленных процессов в металлургической промышленности. При этом обработка и нагрев материалов могут осуществляться как с использованием электрической энергии, так и энергии ископаемых источников, таких как газ или нефть. Однако из-за постоянно растущих требований к эффективности всей технологической цепочки, уровню гибкости и автоматизации, экологической устойчивости промышленных процессов, надежности и качеству, электротехнологии являются более предпочтительными и открывают существенные новые возможности в разнообразных промышленных процессах [5].

Электротермические процессы предлагают широкий спектр промышленных применений от классических областей, таких как черная и цветная металлургическая промышленность, до процессно-ориентированных областей, таких как выращивание кристаллов. При этом основными областями исследований и разработок сегодня являются оптимальное управление технологическими процессами, энергоэффективное проектирование и эксплуатация процессов и установок. В процессно-ориентированных технических приложениях энергетический аспект играет второстепенную роль, тогда как оптимизация производственного процесса является основной задачей [12].

Технологии электрообработки могут быть использованы для нагрева и плавления любого электропроводящего и непроводящего материала. Большое количество промышленных процессов, включая плавку, закалку, отпуск, отжиг, пайку, цинкование, сушку, выращивание кристаллов, предварительный нагрев перед прокаткой, ковку или нанесение покрытия, осуществляют с использованием технологий электротермической обработки. Технологии электрообработки становятся все более значимыми не только для нагрева и плавления, но и для электромагнитного управления, регулировки, торможения или ограничения потоков расплава во время процессов литья, разделения включений или управления процессами затвердевания. Основные преимущества использования электротехнологий:

- тепло может генерироваться внутри заготовки (прямой нагрев);
- высокая плотность энергии и, следовательно, быстрый нагрев;
- требуемое распределение температуры внутри заготовки;
- очень высокая температура;

- более низкое удельное потребление энергии, чем в других методах;
- гибкая работа и низкая тепловая инерция;
- селективный локальный нагрев;
- чистый нагрев в любых средах, включая вакуум или контролируемую атмосферу;
- высокая надежность;
- электромагнитные воздействия на жидкий электропроводящий материал для перемешивания, торможения, гомогенизации, удержания, левитации или отделения включений;
- электромагнитная обработка материалов.

Методы электрического нагрева могут использоваться гораздо более эффективно и целенаправленно, чем конкурентные источники энергии. Они характеризуются высокой эффективностью процесса и, несмотря на более высокую цену энергии, чем у ископаемого топлива, лучшей рентабельностью по сравнению с другими источниками энергии за счет более низких эксплуатационных расходов или затрат на сырье. Процессы электрического нагрева очень адаптивны в использовании и обеспечивают хорошие возможности автоматизации технологических процессов.

Применение электротермической и электромагнитной обработки позволяет получить требуемый нагрев, который легко воспроизводится, это означает, что определенные свойства материала могут быть изменены для улучшения технических характеристик полуфабриката или конечного продукта. Высокая скорость нагрева, точное управление температурой, а также предсказуемое и воспроизводимое пространственное распределение температуры обеспечивают высокую тепловую эффективность и значительную экономию сырья, например, из-за низких потерь сгорания при использовании электрического нагрева. Это становится особенно очевидным в индукционных, проводящих, диэлектрических и микроволновых процессах, где тепло вырабатывается в самой заготовке. При использовании короткого периода нагрева, который сокращается на 90 % по сравнению с установками, нагреваемыми ископаемым топливом, металлургические модификации поверхности заготовки, такие как окисление и декарбонизация, значительно уменьшаются, что приводит к более высокому качеству продукта на выходе. Кроме того, обеспечивается гибкая и мгновенная готовность к работе, так что удержание нагретого или расплавленного материала во многих случаях не требуется. Электрические нагревательные установки очень компактны и требуют относительно небольшой площади, поэтому их легко интегрировать в существующие производственные линии. Это приводит к значительному улучшению производственного процесса.

Процессы металлургического производства, результатом которых являются почти чистые формы, являются тенденцией к сокращению используемых технологических этапов, а также экономии сырья и энергопотребления, что в конечном итоге приводит к увеличению общей эффективности и производительности. Примерами, которые все еще находятся в разработке или уже используются на практике, являются процессы тиксоформования, непрерывной разливки тонких полос или прецизионные процессыковки и формования. В этих инновационных процессах необходимо точное распределение температуры в обрабатываемой детали. Это жесткое технологическое требование может быть выполнено электрическим способом, таким как индукционный нагрев, в процессе которого возможен точный автоматический контроль температуры.

Замена традиционных производственных процессов новыми инновационными процессами – это общий важный подход для улучшения и оптимизации качества продукции, производительности и общей эффективности во многих промышленных приложениях, также включает в себя замену конечных источников энергии. Вместо полной замены обычно используемой тепловой технологии сочетание различных технологий иногда приводит к общему улучшению эффективности. Типичным примером является сочетание различных методов и процессов нагрева в гибридных установках, таких как индукционный нагрев в сочетании с газовой печью, микроволновое нагревание, встроенное в конвективную нагревательную печь, индукционный нагрев в сочетании с лазером или индукционной мешалкой. Практическим примером данного положения является техническое применение оборудования для нагрева полосы, где быстрый нагрев может быть эффективно реализован с помощью индукционного нагрева, а зависящий от времени металлургический процесс, такой как отжиг для перекристаллизации материала, может быть выполнен с использованием длинной газовой печи для замачивания [8].

Примеры исследований. Гибкие полосовые нагреватели с поперечным потоком. Многие производственные линии при формировании заготовок включают нагрев тонких металлических полос в непрерывном режиме как важный этап всего процесса. Для нагревания существует широкий спектр применения – от сушки после нанесения покрытия, окрашивания, цинкования, термообработки (например, отжига) до нагрева штамповки. В настоящее время для этих задач в основном используются газовые или термоэлектрические нагревательные печи. Они работают по принципу не прямой теплопередачи. Энергия подается на материал, подлежащий нагреву, конвекцией и тепловым излучением на поверхность. В этом случае существуют ограничение достижимой плотности мощности, повышенное воздействие окалины и рост зерна из-за длительного времени пребывания в печи. Эксплуатационные характеристики, такие как требуемая большая площадь нагрева, высокие потери тепла, расширение и охлаждение в камерах большого объема, а также ограниченная гибкость этих систем, значительно снижают эффективность производственных процессов.

Инновационное решение описанных проблем может быть достигнуто за счет использования концепции индукционного нагрева с поперечным потоком [13]. Эта технология предлагает множество преимуществ, таких как высокая плотность мощности, высокая эффективность, высокая степень автоматизации и гибкость. Схематическая структура индукционного нагревателя с поперечным потоком показана на рис.1.

В последние годы была проведена обширная исследовательская работа в области нагрева поперечного потока и достигнутые хорошие результаты, основанные на двух положениях. Это разработанная концепция процесса и применение комбинации алгоритмов численного моделирования и автоматической оптимизации. При проведении оптимизации алгоритмов ищут любой специальный набор параметров, позволяющий получить оптимальную конфигурацию индукто-

Рис.1. Схематическая структура индукционного нагревателя с поперечным потоком

Рис.2. Концепция нагрева поперечного потока VABID для полос переменной ширины: а – реальная катушка для широкой полосы; б – реальная катушка для узкой полосы; в – эффективная катушка

ров. Основные усилия разработок последних лет в области технологии поперечного потока направлены на использование нагревателей для полос различной ширины. На рис.2 показана недавно разработанная и запатентованная концепция нагрева металлических полос переменной ширины (VABID). Она идеально подходит для многих технологических процессов, чрезвычайно надежна и в настоящее время доказала свою эффективность в промышленном использовании.

Индукционная поверхностная закалка и отжиг. Индуктивное поверхностное упрочнение является инновационной электротермической технологией, которая используется для улучшения качества механических компонентов с точки зрения сопротивления истиранию при сохранении пластичности. Чтобы получить эти свойства, тонкий слой материала под поверхностью заготовки нагревают индукционно и затем закаляют. Основными преимуществами этой технологии являются очень корот-

кое время протекания процесса, высокая плотность мощности, низкий уровень искажений и малые требования к пространству. Следовательно, последующая обработка часто может быть исключена и возможна интеграция процесса в производственные линии.

Конструкция устройств индукционной закалки, особенно геометрия индуктора и выбор параметров закалки, таких как ток и мощность индуктора, выполняются на основе опытов и экспериментов. Однако существуют ограничения для этого подхода, если необходимо обрабатывать геометрически сложные заготовки, или если параметры упрочнения становятся более сложными, например, когда одновременно используются две частоты. Кроме того, конструкция, основанная на экспериментах, часто требует больших финансовых затрат и много времени на реализацию.

Имитационное моделирование процессов индукционного нагрева открывает новые возможности для проектирования устройств индукционной закалки со сложной геометрией и сложными временными режимами. Была разработана новая модель, которая может успешно моделировать весь процесс стационарного нагрева. Модель позволяет рассчитывать связанные нелинейные электромагнитные и тепловые поля с учетом всех соответствующих температурных и полевых зависимостей свойств материала, которые существенно изменяются при нагреве [11]. Также был реализован метод моделирования процесса нагрева с одновременным использованием нескольких частот. Можно смоделировать относительное движение заготовки и индуктора, например, ее вращение. После нагревания процесс закалки и фазовые превращения в материале рассчитываются на основе температурно-временного профиля. Все параметры процесса могут быть легко изменены в процессе моделирования. Следовательно, инструмент моделирования способен исследовать влияние различных параметров на профиль упрочнения и оптимизировать процесс закалки.

Моделирование было использовано для проектирования и оптимизации широкого спектра подобных процессов за последние годы. Например, были исследованы червячные, спиральные и прямозубые шестерни, а также коленчатые валы. Для проверки точности и пригодности моделирования постоянно проводились проверочные эксперименты. Любая трехмерная геометрия деталей может быть исследована с помощью описанной модели и сложность будет ограничена только временем расчета.

На рис.3 показаны три поперечных сечения закаленного прямозубого зубчатого колеса: рассчитанный профиль температуры после нагревания, микросекция и рассчитанное содержание мартенсита. Одни и те же параметры процесса использовались при моделировании и эксперименте. Результаты расчетов и параметры микросекции показывают хорошее согласование.

Новым направлением исследований является разработка линейного индукционного отжига после процесса индукционной закалки [3]. Из-за низкотемпературной обработки при отжиге заготовка находится при температуре Кюри, что требует большего внимания к оптимальной частоте процесса и оптимальной конструкции индуктора. На текущем этапе исследований разрабатывается и испытывается алгоритм для численного моделирования всего процесса упрочнения и отжига.

Индукционный нагрев для горячей обработки металлов давлением. В связи с растущими требованиями к ударопрочности материалов, выбросам CO₂, а также растущим спросом на легкие конструкции, формование деталей кузова автомобилей из горячего металла превратилось в одну из наиболее важных технологий для снижения веса всего кузова. Во время формования горячего металла фасонные заготовки из стали, в основном сделанные из 22MnB5, нагревают и аустенизируют при температуре около 950 °C, а затем охлаждают для мартенситного образования. В настоящее время нагрев осуществляется в печах с роликовым нагревательным подом, которые допускают только медленный нагрев и, следовательно, ограниченный объем производства, энергоэффективность таких печей достаточно низка.

Рис.3. Поперечные сечения закаленного прямозубого зубчатого колеса: а – температурный профиль; б – микросекция; в – мартенсит

Рис.4. Процесс лазерной сварки в сочетании с индукционной термообработкой

Индукционный нагрев заготовок имеет большой потенциал для увеличения производительности, а также для повышения энергоэффективности. Только из-за того, что нагретые детали, как правило, уже имеют предварительно сформированную форму и в большинстве уже имеют отверстия и вырезы, индукционный нагрев становится очень сложной задачей. Индукционный нагрев, всегда сопровождаемый движущимися силами в материале, может привести к проблемам, если заготовки покрыты легкоплавким сплавом, таким как Al-Si. В работах [3, 6] были исследованы и оценены различные способы индукционного нагрева (продольный нагрев, поперечный магнитный нагрев, одностадийный индукционный нагрев, гибридный

нагрев индукционным и обычным нагревом) с точки зрения потенциалов и ограничений индукционного нагрева для формирования горячего металла в зависимости от условий производства. В рамках реализуемого в настоящее время исследовательского проекта было проведено подробное численное и экспериментальное исследование одностадийного индукционного нагрева [6]. Результаты показали высокий потенциал одностадийного индукционного нагрева для формирования горячего металла. На основании результатов был окончательно разработан процесс индукционного нагрева предварительно заготовленных заготовок. Индукционный нагреватель планируется использовать в демонстраторе, чтобы показать эффективное индукционное горячее формирование половины столба (опоры).

Нагрев для соединения. Адекватное сочетание различных методов нагрева в форме гибридных процессов часто приводит к существенному улучшению с технологической, энергетической и экономической точек зрения [9]. Показательный инновационный пример – комбинация лазерной сварки, поддерживаемая индукционным нагревом (рис.4).

Комбинация лазерной обработки с индукционным нагревом открывает новые возможности и новые области применения с использованием преимуществ обеих технологий. В качестве примера можно привести наплавку высоколегированных сталей, поверхностное плавление высоконапряженных компонентов и сварку листов из высоколегированных сталей. Лазерная обработка обычно связана с высокой плотностью мощности и высокими градиентами температуры, которые могут привести в процессе сварки к значительным термическим напряжениям и нежелательным металлургическим фазовым превращениям. Для предотвращения этих нежелательных эффектов можно использовать индукционный нагрев. Он полностью управляем во времени и в пространстве, прост в обращении и может применяться одновременно или как предварительный нагрев в сочетании с лазерной обработкой. Снижение скорости охлаждения, регулирование уровня температуры во время процесса сварки (снижение твердости), повышение формовости и ударной вязкости, а также повышение эффективности процессов сварки (благодаря более высокой скорости сварки) являются основными преимуществами комбинированной индукционной термообработки в лазерной сварке.

Индукционная высокочастотная сварка труб. Комплексное численное моделирование процесса индукционной высокочастотной сварки продольной трубы является предметом исследований на протяжении многих лет. В тесном сотрудничестве с предприятиями были получены многочисленные улучшения процесса сварки индукционных труб [1]. Так была исследована индукционная высокочастотная сварка труб с покрытием на основе использования двойной или одинарной частоты. Трубы с оболочкой используются для различных применений в системах транспортировки природного газа, на электростанциях и в химической промышленности. Комбинация двух разных металлов в одной трубе обеспечивает высокую коррозионную стойкость и износостойчивость. До сегодняшнего дня плакированные трубы изготавливаются с помощью прерывистой дуговой сварки, наплавки или механического соединения со сравнительно низкой производительностью.

665

производить требуемую сложную заготовку путем прессования специально изготовленной формы для достижения эффекта экономии энергии и материалов [14]. Для реализации требуемого распределения температуры необходимо исследовать нагрев электрической проводимостью, а также индукцией и прямым воздействием пламени. На основе имитационного моделирования трех различных материалов, соответствующие концепции нагрева проверяются на экспериментальных установках и сравниваются друг с другом в техническом и экономическом отношении. На основе результатов моделирования и эксперимента будут разработаны рекомендации по проектированию и применению индивидуальных температурных профилей для исследуемых геометрий и материалов деталей.

Магнитожидкостная динамика. Область исследования магнитожидкостной динамики охватывает проекты по анализу и оптимизации магнитожидкостных динамических процессов и установок [2]. Важным направлением является электромагнитная обработка материалов, в том числе обработка нелинейных электротермических и магнитожидкостных динамических систем. Наряду со многими новыми разработками в области черных и цветных металлов, наблюдается большое количество исследований, касающихся инновационных материалов для высокотехнологичных применений, таких как полупроводниковый кремний, титан-алюминиевые сплавы и оксиды с высокими температурами плавления.

Тепломассоперенос в расплаве индукционных установок. Процессно-ориентированная разработка, проектирование и оптимизация индукционных печей для плавки и разлива металлов является важной темой исследований в области электротехнологий. Ориентированное на практику моделирование и анализ сложных нестационарных турбулентных течений расплава и распределений температуры, а также тепломассопереноса в расплаве индукционных установок сегодня успешно реализуется на основе использования метода «большого вихревого моделирования» (LES), результаты которого хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными. Примерами применения метода LES в промышленных научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектах являются индукционные тигельные и индукционные каналные печи для черных и цветных металлов, холодные тигельные индукционные печи для плавки и литья сплавов TiAl, установки для плавки и цинкования с тигельными и каналными индукторами, а также электромагнитное управление в процессе непрерывной разливки и затвердевания.

Во многих процессах плавления очень важно транспортное и нестационарное распределение частиц в расплаве, при котором частицы могут иметь разные размеры и плотности. Для моделирования и визуализации транспорта частиц внутри нестационарного течения расплава были разработаны и успешно апробированы различные имитационные модели [15]. Транспорт и смешивание частиц могут быть рассчитаны в стационарной трехмерной модели с отслеживанием частиц. Все электропроводящие и непроводящие частицы могут быть смоделированы, чтобы исследовать влияние на них электромагнитных сил. Метод LES также успешно применяется для моделирования нестационарного течения расплава и распределения температуры в печи с индукционным каналом. Перенос тепла от канала к плавильной ванне можно рассчитать с помощью переходных трехмерных моделей. Это позволяет использовать подход LES для проектирования канала, чтобы оптимизировать тепломассоперенос или уменьшить его засорение [15]. На рис.7 приведен пример расчета потока расплава и распределения температуры в расплаве каналного индуктора. Показаны линии тока, представляющие усреднен-

Рис. 7. Моделирование потока и локальной температуры внутри канала индуктора

Рис.8. Экспериментальный процесс плавления (а) и числовая модель ЭМ левитационной плавки (б)

ную по времени скорость. Электрические нейтральные частицы следуют за этими линиями потока. Цвет линий потока характеризует усредненную локальную температуру.

Плавление электромагнитной левитацией. Электромагнитная плавка с левитацией имеет несколько преимуществ – бесконтактное плавление, высокая чистота расплавленного материала, высокая температура расплава или высокая эффективность. Но в обычных осесимметричных плавильных печах с электромагнитной левитацией (EML) сила Лоренца исчезает на оси симметрии. Вытекание и утечка расплава могут быть затруднены в этой самой низкой точке на оси левитирующего образца, следовательно, вес заготовки будет ограничен. Разработана новая технология плавления металлических образцов в условиях электромагнитной левитации с большими весами и осесимметрично стабилизированными позициями [16, 17]. Новый метод заключается в применении двух однородных магнитных полей разных частот, силовые линии которых в отсутствие заряда горизонтально и взаимно нормальны, что позволяет формировать электромагнитные подъемные силы также и в области оси левитированного образца. Следовательно, вес заготовки может быть увеличен, и она может быть расплавлена без капель и утечек. Данный способ можно использовать в плавильной печи, а также для индукционных клапанов без сердечника, применяемых для регулирования расхода при непрерывной разливке расплавленного металла. Применение метода было экспериментально исследовано и подтверждено испытаниями, проведенными с различными типами лабораторных установок, и в ближайшее время он будет внедрен в промышленности. Параллельно с экспериментальными исследованиями была разработана численная модель для моделирования и оптимизации конкретной технологии плавления с помощью электромагнитной (ЭМ) левитации (рис.8).

Расчет электромагнитно-индуцированного турбулентного потока и динамики свободной поверхности обеспечивается посредством автоматической связи между трехмерным электромагнитным расчетом в системе ANSYS и трехмерным двухфазным гидродинамическим расчетом в системе FLUENT. Результаты моделирования для одно- и двухчастотных случаев плавления с левитацией ЭМ показали хорошую сходимость с экспериментальными измерениями. В дальнейшем с помощью данной модели предполагается исследовать возможности увеличения веса заготовки, которые могут быть применены в промышленном масштабе. Кроме того, для защиты магнитного сердечника от нагревания, вызванного расплавленным зарядом, вместо холодного тигля была применена цилиндрическая холодная защитная стенка (CPW), состоящая из медной трубки с водяным охлаждением. Использование бездонной CPW имеет, по сравнению с обычной индукционной печью с холодным тиглем, следующие преимущества: потери тепла не происходят через затвердевший нижний настил и расплав может отливаться через CPW подобно способу литья снизу, т.е. без необходимости наклонять плавильное устройство. Эта технология предлагает совершенно новые промышленные возможности для плавки и литья металлов.

Заключение. Применение электротермических технологий в металлургических процессах дает множество технологических, экологических и экономических преимуществ. Использование электронагрева в будущем будет расширено, потому что технологии электрообработки соответствуют постоянно растущим стандартам в отношении требований к качеству продукции и стремлению к производственным процессам, которые имеют большую эффективность и оказывают минимальное воздействие на окружающую среду. В частности, производство новых материалов

и новых продуктов предполагает использование инновационных решений на основе электротермических и электромагнитных процессов. С экологической точки зрения в будущем использование электроэнергии для всех видов промышленного и бытового применения, включая все виды тепловых процессов, приведет к значительному сокращению выбросов CO₂ и, следовательно, к уменьшению углеродного следа из-за значительного увеличения доли электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников энергии. Технологии электрообработки могут быть улучшены и оптимизированы с технологической, энергетической и, что не менее важно, экономической точки зрения. Задачи исследователей, производителей и пользователей электротермических технологий заключаются в разработке и реализации специализированных решений, ориентированных на процессы, где оптимизация сосредоточена не на одной установке для нагрева или плавления, а на всей производственной линии, включая транспортировку материалов, общий энергетический баланс и производительность. В рамках этого контекста цифровизация (Industry 4.0) будет играть ключевую роль в будущих исследованиях и разработках электротермических технологий и процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Approaches for numerical simulation of high frequency tube welding process / A.Nikanorov, E.Baake, H.Brauer, Weil C. // Proceedings of the International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. Hannover (Germany), 2014. P. 445-450.
2. Baake E. Research at the Institute of Electrotechnology in the field of metallurgical melting processes / E.Baake, S.Spitan // Electricity. 2014. № 7. P. 4-10.
3. Baldan M. Hierarchical optimization approaches in designing surface induction hardening induction systems / M.Baldan, A.Nikanorov, B.Nacke // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 424. № 012067.
4. Baldan M. Optimal design of Inductor addressed to a tailored heating forging process / M.Baldan, T.Steinberg, E.Baake // International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2018. Vol. 13. № 1/2. P. 39-53.
5. Beneke F. Handbook of Thermoprocessing Technologies. Vol. 1 / F.Beneke, B.Nacke, H.Pfeifer. Vulkan-Verlag GmbH, 2012. P. 351-354.
6. Dietrich A. Numerical investigation of effects on blanks for press hardening process during longitudinal flux heating / A.Dietrich, B.Nacke // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 355. № 012014.
7. Investigation of a double frequency application for high frequency longitudinal welding of clad pipes / W.Ebel, E.Baake, M.Kroll, A.Nikanorov // Electricity. 2019. № 3. P. 60-64.
8. Nacke B. Hybrid heating methods for efficient and high quality heat treatment processes // XVIII International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing. Hannover (Germany). Vulkan-Verlag GmbH, 2017. P. 85-90.
9. Neumeyer J. Hybrid processes in electrotechnology / J.Neumeyer, H.Schülbe, B.Nacke // Heat processing. 2012. Vol. 10. Iss. 4. P. 63-66.
10. Numerical modelling of industrial scale high frequency welding of clad pipes / W.Ebel, M.Kroll, A.Nikanorov, E.Baake // International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2018. Vol. 13. № 1/2. P. 27-38.
11. Numerical calculation and comparison of temperature profiles and martensite microstructures in induction hardening processes / D.Schlesselmann, A.Nikanorov, B.Nacke, S.Galunin, M.Schön, Z.Yu // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2014. Vol. 44. Iss. 2. P. 137-145.
12. Pfeifer H. Handbook of Heat Processing. Vulkan-Verlag GmbH, 2015. P. 262-264.
13. Schulze M. Design of a one-sided transverse flux induction coil by using a numerical optimization algorithm / M.Schulze, A.Nikanorov, B.Nacke // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 424. № 012065.
14. Schulze M. Tailored heating of billets for hot forming using induction and conduction heating approaches / M.Schulze, E.Baake // Proceedings of the International Conference on Heating by Electromagnetic Sources. Padua, Italy. May 22-24. 2019. P. 197-202.
15. Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: Simulation and experiment / M.Scepanis, A.Jakovics, E.Baake, B.Nacke // International Journal of Multiphase Flow. 2014. Vol. 64. P. 19-27.
16. Spitan S. A new technology for large scale electromagnetic levitation melting and casting of metals. Part I: Simulation / S.Spitan, H.Franz, E.Baake // Proceedings of the Liquid Metal Processing and Casting Conference 2017. Philadelphia, USA, 2017. P. 265-272.
17. Spitan S. A new technology for large scale electromagnetic levitation melting and casting of metals. Part II: Experiments / S.Spitan, H.Franz, E.Baake // Proceedings of the Liquid Metal Processing and Casting Conference 2017. Philadelphia, USA, 2017. P. 273-279.

Авторы: Э.Бааке, доктор-инженер, профессор, директор института (Институт электротехнологии, Ганноверский университет им. Лейбница, Ганновер, Германия), В.А.Шпенст, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, shpenst@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 3.07.2019.

Статья принята к публикации 16.09.2019.