



УДК 621.791.44.001.4

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПОТОКОВ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ЖИДКОЙ ВАННЕ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

А. С. Письменный, В. М. Баглай,
А. А. Письменный, С. В. Рымар

Определены условия интенсификации макропотоков расплавленного металла, направленных на обрабатываемую поверхность с целью организации жидкометаллического рабочего инструмента для обработки металлических тел, в результате особого размещения индуктора относительно ванны расплавленного металла, оптимизации соотношений в размерах индуктора, корпуса нагревателя и футеровки рабочего пространства индукционного нагревателя огнеупорным материалом.

Conditions of intensification of microflows of molten metal directed to surface being treated are defined to organize the fluid metallic working tool for treatment of metallic bodies due to a specific arrangement of inductor as regards to molten metal pool, optimizing of ratios in inductor dimensions, heater casing and lining of operating space of induction heater by a refractory material.

Ключевые слова: индукционный нагрев; индукторы; интенсификация макропотоков расплавленного металла; плавление металлов

При наплавке частей изношенных деталей, а также наплавке на поверхность заготовок выступающих элементов, локальном переплаве поверхностного слоя металлических изделий с целью устранения дефектов или местного легирования поверхностного слоя, помимо известных электрометаллургических технологий наплавки, применяют технологии, основанные на индукционном нагреве [1–8], открывающем новые возможности при производстве деталей и их ремонте.

Широкое использование индукционного нагрева для этих целей сдерживалось из-за повышенных затрат электрической энергии. Поэтому актуальной является разработка такого способа с уменьшенными энергозатратами. Работы в этом направлении важны еще и потому, что индукционный нагрев является экологически чистым способом.

Одним из путей уменьшения энергозатрат при индукционном нагреве является интенсификация потоков расплавленного металла в жидкой ванне, поскольку при этом происходит увеличение теплообмена между уже расплавленным металлом и металлом, подлежащим плавлению, что способствует

сокращению времени плавления и вкладываемой мощности. Разработка способа интенсификации потоков расплавленного металла в жидкой ванне и является целью настоящей работы.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработан способ, позволяющий создавать условия для усиления интенсификации макропотоков расплавленного металла в центральной части жидкой ванны, направленных на обрабатываемую поверхность металлического изделия при индукционном нагреве. Это достигается путем оптимизации соотношения размеров индуктора и корпуса нагревателя, футеровки индукционного нагревателя огнеупорным материалом, выбора формы тигля, накрывания поверхности металла огнеупорной крышкой и, главное, — особого расположения индуктора относительно нагреваемого изделия.

Для реализации данной цели разработали специальный метод расчета системы индуктор–нагреваемое изделие, позволяющий моделировать электромагнитные процессы в ней. Метод базируется на осуществлении стационарного движения жидкости по замкнутым траекториям, лежащим внутри геометрически односвязной области, под влиянием вихревого поля объемных сил [9].



Плотность электромагнитных сил, действующих на электропроводящую жидкость, имеет вихревую и потенциальную составляющие, соотношение между которыми различно в разных точках объема жидкости. При этом только вихревая составляющая электромагнитных сил возбуждает движение жидкости.

По аналогии с некоторыми типами индукционных плавильных печей («холодные тигли»), в разработанном методе используют принцип передачи энергии переменного электромагнитного поля через металлическую стенку, состоящую из электрически изолированных между собой частей (секций) [6].

В классических индукционных печах индуктор располагают таким образом, чтобы он полностью или частично охватывал ванну расплавляемого металла, а его торцевые части не выступали за пределы ванны (рис. 1).

На рис. 1 показана часть ванны расплавленного металла и часть индуктора, расположенная относительно вертикальной оси симметрии. При этом в рассматриваемой части ванны по высоте индуктора возникают две зоны вихревых электромагнитных сил, образующих замкнутые макропотоки расплавленного металла (верхний и нижний), движущихся в сторону этих сил и имеющих противоположные направления [5–7].

Интенсивность движения макропотоков расплавленного металла зависит от гидравлических сопротивлений и формы тигля. При отсутствии механических препятствий область металла, охваченная движением, может выходить далеко за пределы зоны вихревых сил, вызвавших движение потоков. При таком расположении индуктора по вертикальной оси симметрии в нижней части ванны макропотоки направлены вниз, а в верхней части ванны — вверх с образованием на поверхности расплавленного металла выпуклости.

В случае неодинаковой интенсивности двух вихревых зон силового поля граница вихревой скорости смещается в сторону зоны с меньшей циркуляцией расплавленного металла. При асимметрии гидравлических граничных условий поле скоростей также деформируется, причем линия, разделяющая вихри, смещается в сторону вихря с более стесненными условиями движения. Объем макропотока расплавленного металла, вовлекаемого в циркуляцию в зоне с меньшим значением циркуляции расплава или находящегося в стесненных условиях, уменьшается, а объем макропотока во второй зоне увеличивается (по сравнению с симметричным случаем).

Причиной асимметрии силового поля могут быть также неравномерность зазора между индуктором и ванной жидкого металла, характер распределения плотности макропотока в индукторе, смещение тигля относительно индуктора и форма тигля. Например, при коническом тигле (в цилиндрическом индукторе) максимальное значение магнитной индукции перемещается в область меньшего зазора (широкая часть тигля), что увеличивает относительное значение циркуляции расплава и протяжен-

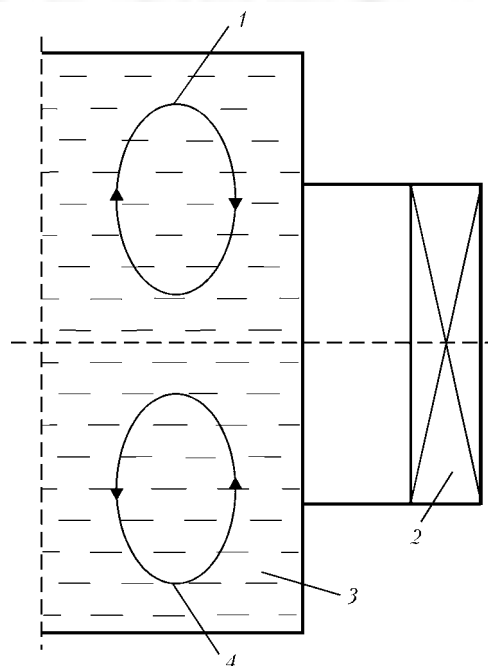


Рис. 1. Схема движения макропотоков в жидком металле при индукционном нагреве: 1 — верхний вихрь; 2 — индуктор; 3 — расплав; 4 — нижний вихрь

ность вихревой зоны силового поля, действующей в узкой части системы. Гидравлические условия, наоборот, более благоприятны в широкой части тигля. Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [3], из которых следует, что результирующее влияние конусности тигля на движение расплава невелико.

Потоки расплавленного металла можно использовать как жидкометаллический рабочий инструмент для обработки металлических изделий. В этом случае тигель с отверстием в нижней части устанавливается на обрабатываемое изделие. Макропотоки расплавленного металла в тигле обрабатывают изделие, наплавляя на него металл, расплавляя его или приваривая к нему металл, находящийся в тигле.

С целью более эффективного использования образующихся в тигле макропотоков жидкого металла для обработки металлических изделий целесообразно интенсифицировать макропотоки расплавленного металла жидкой ванны тигля в направлении вертикальной оси симметрии тигля в сторону обрабатываемого изделия.

Наиболее интенсифицированное движение макропотоков расплавленного металла будет в случае, когда в объеме расплава одной части тигля от его вертикальной оси симметрии существует лишь одна вихревая зона силового поля, а соответственно, и один макропоток. При этом вся энергия магнитного поля индуктора образует один мощный макропоток, а не два, как в классических печах.

Достичь такого движения макропотоков можно при плавке на донном гарниссаже или в жидкой ванне в процессе кристаллизации слитка в индукционных печах с холодным тиглем или в электромагнитном кристаллизаторе.

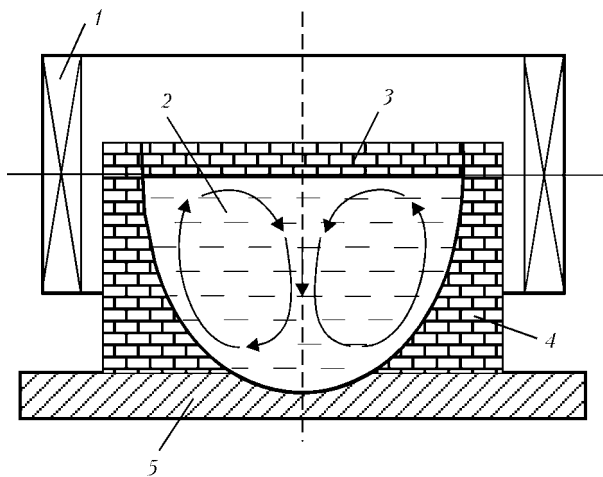


Рис. 2. Схема движения макропотоков жидкого металла при обработке изделий: 1 — индуктор; 2 — расплав; 3 — крышка; 4 — тигель; 5 — изделие

Наиболее технологичным и эффективным является расположение индуктора так, чтобы асимметрия электромагнитной системы индуктор–тигель и гидродинамических граничных условий обеспечивала подавление одного вихревого контура другим.

Данный способ разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Он заключается во взаимном смещении индуктора, когда возможно подавление как нижнего, так и верхнего контура. Для усиления подавления верхнего контура в предложенном способе можно округлять дно тигля.

Для подавления верхних макропотоков расплавленного металла индуктор необходимо сместить вверх на такое расстояние, чтобы горизонтальная ось симметрии индуктора совпадала с верхней кромкой расплавляемого металла ванны (рис. 2). При этом макропотоки расплавленного металла в центральной части ванны в тигле будут направлены вниз, ко дну тигля. На поверхности расплавленного металла образуется не выпуклость в виде мениска, а вогнутость. Выпуклости расположены вблизи стенок тигля.

Указанный эффект обнаружен впервые в ходе экспериментов при перемещении индуктора относительно тигля по высоте. Для его исследования развили теорию и создали метод расчета, позволяющие моделировать распределение электромагнитного поля индуктора на поверхности расплава с использованием импедансных граничных условий [9].

Определено, что для обработки изделия потоками жидкого металла, направленными вниз по вертикальной оси симметрии тигля, наиболее эффективен тигель, имеющий форму конуса или параболоида вращения, опирающегося открытой узкой нижней частью на обрабатываемое изделие (рис. 2).

На основании исследования модели вихревого движения жидкого металла в работе [6] получен важный результат, свидетельствующий о том, что тангенциальные электродинамические силы имеют второстепенное значение для циркуляции металла в обычных классических печах (менее 3 % вклада в циркуляцию расплава). Основной вклад вносят

нормальные силы, обусловленные электромагнитным давлением поля индуктора на металл.

Напряженность радиальной компоненты магнитного поля индуктора при классическом размещении равна нулю в плоскости симметрии индуктора вдоль его оси и остается таковой на оси индуктора независимо от расстояния точки наблюдения до центра индуктора [7].

В любой другой плоскости, параллельной плоскости симметрии индуктора, напряженность радиальной компоненты магнитного поля возрастает от нуля до максимума вблизи витков индуктора и затем убывает при возрастании радиуса тигля. Поэтому электромагнитное давление, обусловленное напряженностью радиальной компоненты магнитного поля, возрастает от нуля на оси тигля с расплавом до максимума на его крае, возбуждая движение расплава вдоль стенок тигля вниз, а вдоль оси тигля — вверх.

Такое направление движения расплава, используемое в качестве рабочего инструмента для обработки изделия, находящегося в нижней поверхности тигля, является вредным. Для максимального его подавления требуется совместить поверхность расплава с плоскостью симметрии индуктора по его высоте.

Вблизи этой плоскости электромагнитное давление на расплав оказывают также силы, направленные от боковой поверхности к оси тигля и связанные с осевой компонентой напряженности магнитного поля. Поскольку осевая компонента напряженности магнитного поля и напряженность электрического поля имеют наибольшие значения, то и электромагнитные силы будут такими же. Именно они способствуют формированию осевых потоков металла в тигле, направленных в верхней части тигля вверх с образованием мениска, а в нижней части — вниз с созданием необходимой для обработки изделия струи металла.

Очевидно, для подавления верхнего вихря в тигле, помимо предложенного приема, следует расположить тигель в индукторе таким образом, чтобы верхняя поверхность расплава была на уровне плоскости симметрии индуктора по его высоте. Целесообразно механически ограничить возможность движения расплава по верхнему контуру, например разместить в плоскости симметрии индуктора на поверхности расплава ограничивающую стенку в виде крышки, препятствующую подъему металла, неизбежно возникающему из-за обжатия расплава силами, обусловленными воздействием осевой компоненты напряженности магнитного поля.

Кроме того, для снижения относительного значения радиальной компоненты магнитного поля в зоне тигля целесообразно применять индуктор с осевой длиной не менее его диаметра.

Для испытания образцов индукционных нагревателей использовали устройство, в состав которого входили два преобразователя частоты ПВВ мощностью по 100 кВт, частотой 8 кГц, трансформатор

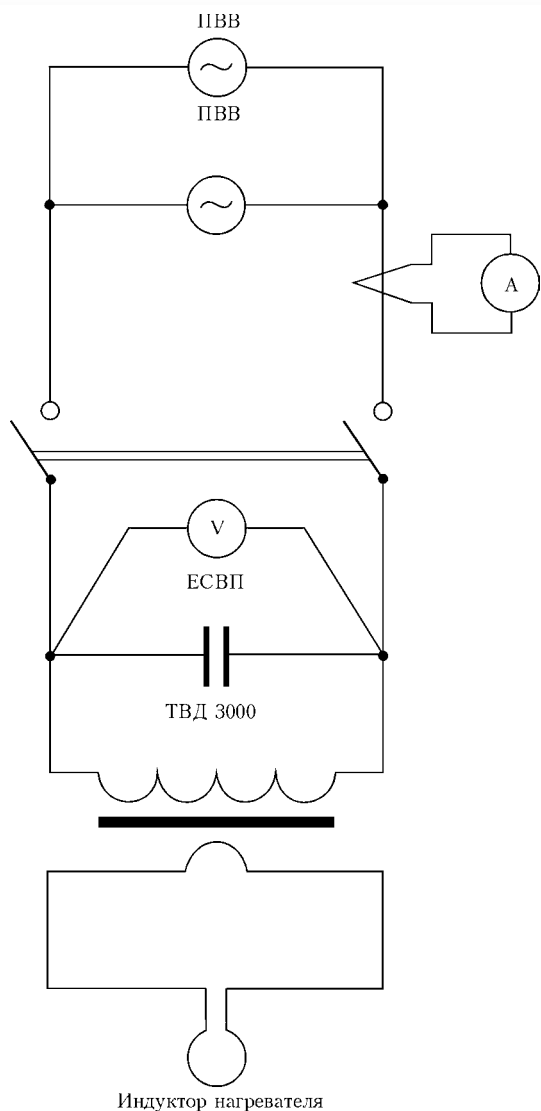


Рис. 3. Схема питания устройства

ТВД 3000, используемый для закалки изделий и конденсаторы ЕСВП 800/1000.

Конденсаторы подключали параллельно первичной обмотке трансформатора (рис. 3), их суммарная емкость составляла 26,6... 29,2 мкФ. Коэффициент трансформации равнялся 5, а максимальное напряжение на индукторе — 160 В. Для перемещения нагревателя с расплавленным металлом относительно индуктора применяли аппарат А550.

На основе разработанного метода расчета индуктора спроектировали и изготовили двухобмоточный индуктор высотой (80±5) мм, диаметром 190 мм.

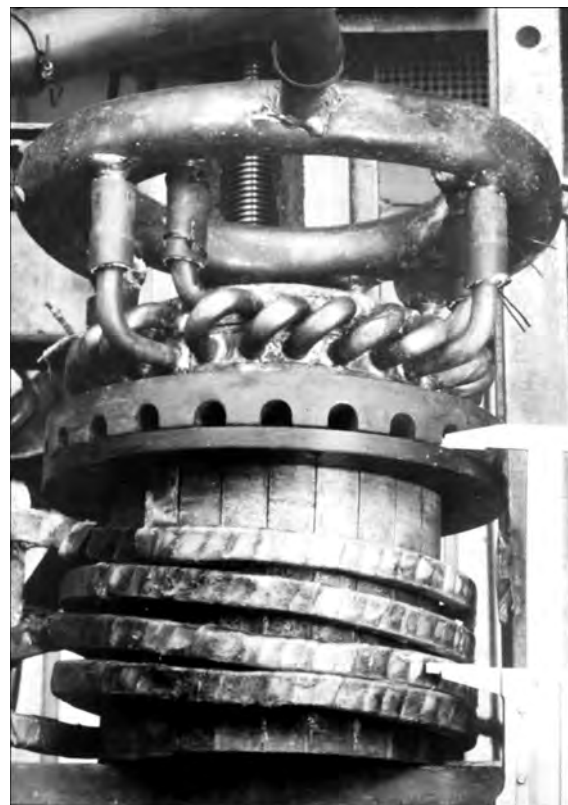


Рис. 4. Охлаждающая часть индукционного нагревателя с индуктором

Проводники выполнили из медных трубок сечением 10×15 мм (рис. 4). Обмотки индуктора включали параллельно и согласно. Такая конструкция индуктора позволила в широком диапазоне изменять массу заготовки для плавления и положение индуктора относительно расплавленного металла. Данный индуктор применяли во всех испытанных нагревателях.

В усовершенствованном футерованном индукционном нагревателе для обработки горизонтальных поверхностей металлических изделий формировали вертикальные макропотоки жидкого металла, направленные вниз на обрабатываемое изделие по вертикальной оси симметрии индуктора. Макропотоки возникали после расплавления заготовки.

О возможностях плавления стального изделия макропотоками жидкого металла и его силе можно судить по данным проплавления листов стали СтЗсп, мас. %: 0,14...0,22 С; 0,15...0,30 Si; 0,40...0,65 Mn; < 0,3 Ni; < 0,05 S; < 0,04 P; < 0,3 Cr; < 0,008 N; < 0,3 Cu; < 0,08 As разной толщины (таблица), полученным в опытах с расплавлением

Основные параметры процесса проплавления стальных листов					
Толщина листа, мм	Диаметр отверстия, мм		Параметры расплавленного металла		Производительность плавления, кг/мин
	Верхний	Нижний	Объем, см ³	Масса, кг	
20	65...56	38...28	45...50	0,35...0,39	1,00...1,95
40	73...65	25...20	80...100	0,625...0,780	0,39...0,42
60	110...93	30...22	240	1,88	0,48...0,38
80	130...125	15	600	4,68	0,335



Рис. 5. Лист стали толщиной 20 мм с отверстиями, проплавленными струей расплавленной стали, с заготовкой для плавления заготовок массой 5,0...5,5 кг (температура 1420...1520 °С) при практически одинаковой мощности индуктора в пределах (170...180 кВт).

Длительность проплавления стального листа в зависимости от толщины следующая:

толщина листа, мм	20, 40, 60, 80
время проплавления листа, мин.....	0,2...0,3, 1,5...2,0, 4,0...5,0.

Динамическое давление струи расплавленного металла, в зависимости от задаваемого диаметра проплавления углубления или отверстия, составляло 100...1500 Н/м².

Для изоляции расплавляемого металла от охлаждаемых стенок нагревателя и задания размеров зоны воздействия жидкого металла на поверхность обрабатываемой детали применяли футеровку из смеси магнезита с каолином и песком (по 5...10 % каждого), которые замешивали на жидком стекле с водой. Смесь наносили на плавильную заготовку и сушили при помощи индукционного нагревателя. Размеры футеровки были меньше размеров нагревателя, поэтому после введения заготовки с футеровкой в нагреватель можно было засыпать в зазор между стенкой нагревателя и обмазкой сухой песок, получая надежную тонкостенную футеровку. Такая футеровка не разрушалась при длительной выдержке в ней расплавленной стали. Трещины, образовавшиеся в футеровке, не влияли на технологический процесс, а сухой песок исключал риск вытекания расплавленного металла, позволял легко снимать нагреватель с футеровки после окончания нагрева.

В листах под нагревателем образовывались отверстия, имеющие вид воронок (рис. 5) с размерами, приведенными в таблице. Эти размеры можно рекомендовать для проплавления стальных деталей на глубину 20, 40, 60 и 80 мм при использовании макропотока, образовавшегося при частоте тока ин-

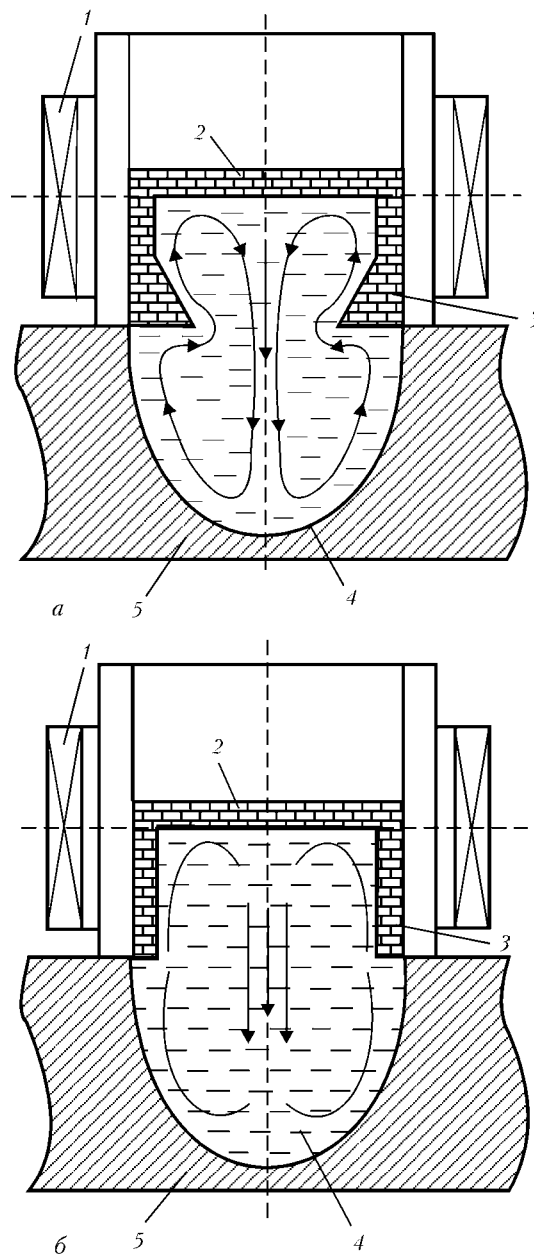


Рис. 6. Схема движения макропотоков жидкого металла в огнеупоре при недостаточном (а) и нормальном (б) отверстиях: 1 – индуктор; 2 – крышка; 3 – тигель; 4 – расплав; 5 – изделие

дуктора 8 кГц. Но отметим, что считать эти данные оптимальными не следует, так как при их получении имели место остановки процесса, связанные с переключением емкостей, а в опытах с листом толщиной 80 мм не была обеспечена максимальная мощность.

Определено, что глубина проплавления детали зависит от формы и размеров заготовки, т. е. от формы и размеров полости в футеровке.

На рис. 5 показана застывшая ванна расплавленного металла, которая может служить примером наплавления на лист выступающих элементов.

При недостаточном размере отверстия в футеровке (огнеупоре) макропоток расплавленного металла может тормозиться под нагревателем (рис. 6, а), при нормальном – восходящие макропотоки жидкого металла свободно выходят из воронки в обра-



батываемой детали (рис. 6, б), что способствует увеличению глубины воронки при прочих равных условиях.

Значительное усиление макропотоков жидкого металла благодаря использованию футеровки позволило впервые проплавить стальные листы толщиной 60 и 80 мм. При проплавлении листа толщиной 60 мм достигли удельной затраты электроэнергии 4 кВт·ч на килограмм расплавленной стали. Однако нет возможности сравнить это значение с удельной затратой энергии при применении нагревателей без футеровки, поскольку многочисленные попытки проплавить лист толщиной 60 мм с использованием нагревателя без футеровки успеха не имели.

Установлено, что интенсивность струи стали зависит от положения индуктора относительно поверхности обрабатываемой детали и заготовки. Так, на листе толщиной 80 мм вокруг образующейся воронки под нагревателем обнаружены гребешки, свидетельствующие о подъеме относительно холодной стали по периметру воронки.

Описанные эксперименты проводили при одной частоте тока в индукторе (8 кГц). Поэтому экспериментально не оценивали влияние частоты на образование макропотоков жидкого металла. Можно утверждать, что понижение частоты тока приводит к усилению давления макропотоков и повышению эффективности ее воздействия на обрабатываемый металл. Это связано с ростом напряженности магнитного поля индуктора и, соответственно, давления на жидкий металл при равной мощности индуктора.

Эксперименты по изучению проплавления стальных листов показали, насколько сильно интенсифицированы макропотоки жидкого металла при указанном способе индукционного нагрева, когда они свободно проплавляют достаточно толстые стальные листы. Однако этот способ не предназначен для изготовления отверстий в листах. Использование предложенного способа расположения индуктора относительно ванны расплавленного металла позволяет существенно экономить электроэнергию при индукционном нагреве изделий (в 1,2... 1,4 раза по сравнению с известными способами).

Перспективно создание на основе предложенного способа индукционного нагрева технологий наплавки частей изношенных деталей, выступающих элементов, локального переплава поверхностного слоя металлических изделий с целью устранения дефектов или местного легирования поверхностного слоя.

Выводы

1. Анализ электродинамических процессов в жидком металле, удерживаемом на горизонтальной поверхности металлического изделия в поле индукто-

ра, позволил выявить следующие условия формирования в жидком металле интенсифицированных макропотоков расплавленного металла, направленных на изделие: верхняя поверхность расплава должна располагаться на уровне плоскости симметрии индуктора; следует использовать индуктор с осевой длиной, близкой к его диаметру; не допускать образования верхнего выпуклого мениска металла за счет применения ограничивающей крышки.

2. Экспериментально подтверждена возможность формирования макропотоков расплавленного металла, направленных сверху вниз по вертикальной оси симметрии индуктора на обрабатываемое изделие при индукционном нагреве.

3. Усовершенствованный футерованный нагреватель позволяет макропотокам расплавленного металла свободно проплачивать горизонтальный участок обрабатываемого изделия на глубину до 80 мм.

4. На основе предложенного экологически чистого индукционного нагрева перспективно создание технологий наплавки частей изношенных деталей, наплавки на поверхности заготовок выступающих элементов, локального переплава поверхностного слоя металлических изделий с целью устранения дефектов или местного легирования поверхностного слоя, поскольку предложенный способ существенно менее энергозатратен, по сравнению с известными способами индукционного нагрева.

1. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1968. — 482 с.
2. Тур Л. Л. Обжатие расплава электромагнитным полем в плавильных электропечах // Магнитная гидродинамика. — 1971. — № 1. — С. 138–144.
3. Свило А. В., Тур Л. Л. Влияние геометрических параметров магнитной системы на движение расплава в индукционной печи // Магнитная гидродинамика. — 1973. — № 3. — С. 144–146.
4. Фомин Н. И. Определение параметров системы индуктор–тигель–садка в индукционных печах с холодным тиглем // Исследования в области промышленного нагрева: Тр. ВНИИЭТО. — М.: Энергия, 1975. — Вып. 7. — С. 65–71.
5. Тур Л. Л. Управление распределением скоростей движения расплава в тигле индукционной печи // Там же. — М.: Энергия, 1975. — Вып. 7. — С. 72–77.
6. Тур Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 120 с.
7. Furui M., Kojima Yo, Matsuo M. Fabrication of Small Aluminum Ingot by Electromagnetic Casting // ISIJ Intern. — 1993. — 33, № 3. — P. 400–404.
8. Гориславец Ю. М. Индукционные установки для электромагнитной обработки металлов и сплавов: Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1998. — 360 с.
9. Письменный А. С. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 2005. — 140 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 06.10.2009