

ТУРБОИНДУКЦИОННЫЙ ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

В.И. Лузгин, канд. техн. наук, А.Ю. Петров, канд. техн. наук, Ф.Н. Сарапулов, доктор техн. наук, В.Э. Фризен, канд. техн. наук
("РЭЛТЕК", УрФУ, г. Екатеринбург)

I. Введение

В последние десятилетия в науке и производстве черных и цветных металлов наблюдается технологический прогресс, который связан с развитием нанотехнологий.

Существенное место в технологических процессах, характерных для машиностроительных предприятий оборонно-промышленного, авиастроительного, судостроительного, ракетно-космического и атомного комплексов занимает изготовление заготовок и готовых деталей методами точного литья. Повышение эффективности и модернизации этих предприятий является приоритетной задачей, что требует внедрения на них современного литейного оборудования, позволяющего изготавливать точные детали и заготовки сложной формы из различных материалов с минимальными припусками под механическую обработку. Такое оборудование существенно сокращает время и себестоимость серийного производства продукции, в том числе оборонного значения, следствием чего становится значительная экономия средств государственного бюджета, направляемых на финансирование государственного оборонного заказа. При этом особое внимание уделяется алюмоматричным композитам, в которых уникальные свойства обеспечиваются как за счет диспергирования структуры матричного сплава, так и за счет армирования керамическими (тугоплавкими) частицами [1].

II. Турбоиндукционный плавильно-литейный комплекс

Перспективным направлением создания плавильно-литейных комплексов для производства композиционных сплавов является использование турбоиндукционных печей в качестве плавильных агрегатов и кристаллизаторов с МГД перемешиванием металла в зоне фронта кристаллизации в качестве агрегата полунепрерывного литья слитков требуемых размеров. Конструктивно-технологическая схема турбоиндукционного плавильно-литейного комплекса (ТИПЛК) приведена на рис. 1. В данной вертикальной технологической схеме полунепрерывного литья слитков сверху на рабочей площадке размещена турбоиндукционная тигельная печь (ТИТП) [2]. Подача шихты осуществляется через горловину печи при открывании поворотной крышки. Плавка металла осуществляется в среде защитного газа, подаваемого через канал стопорного механизма, по которому также подаются легирующие и модифицирующие материалы. В конце плавки производится интенсивное перемешивание металла под действием электродинамических сил.

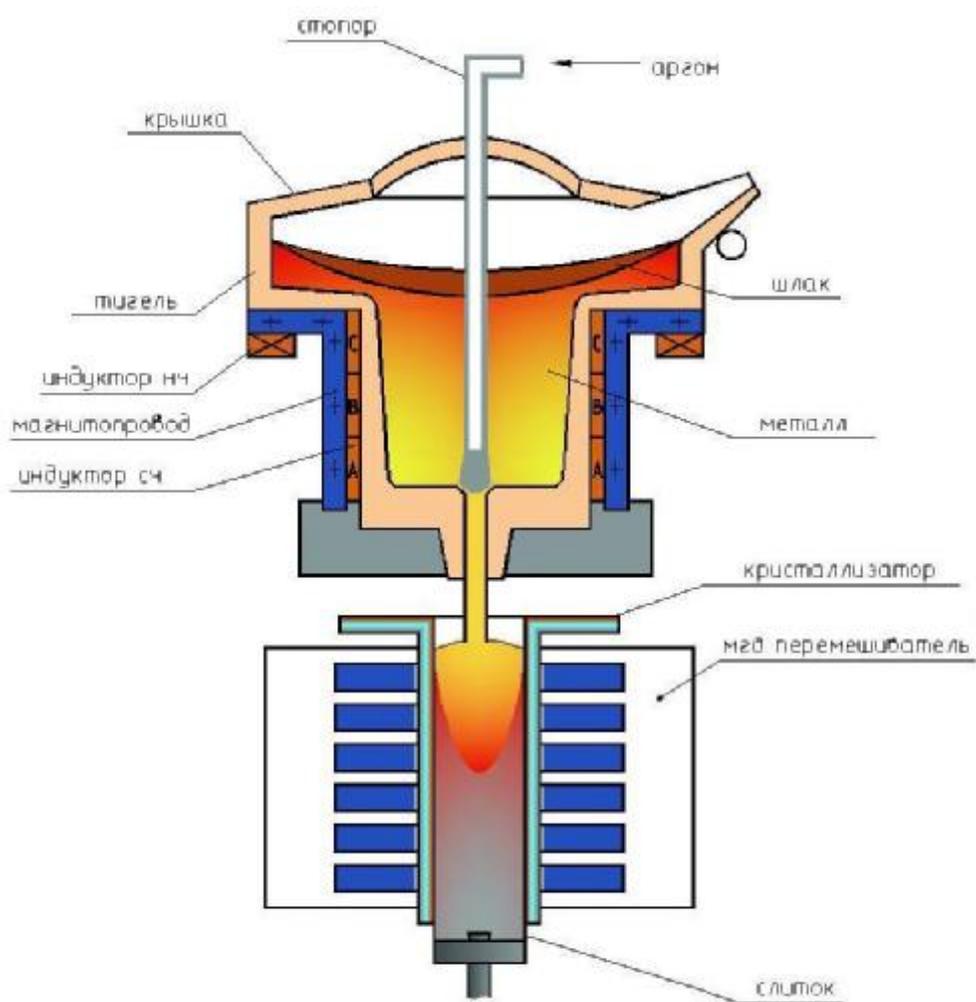


Рис. 1. Конструктивная схема ТИПЛК

После завершения технологических операций обработки сплава метал-лосuspензия подается через донный канал в кристаллизатор, размещенный в нижней части ТИПЛК, в котором осуществляется скоростное охлаждение металла при интенсивном МГД перемешивании. Образовавшийся слиток, имеющий глобулярную структуру, подается на дальнейшие технологические переделы.

III. Турбоиндукционная тигельная печь

ТИПТ является основным агрегатом ТИПЛК, решающим задачи как по плавлению металла-матрицы, так и по вмешиванию в расплав упрочняющих микрочастиц и распределению их по всему объему ванны с достаточной однородностью (рис. 2).

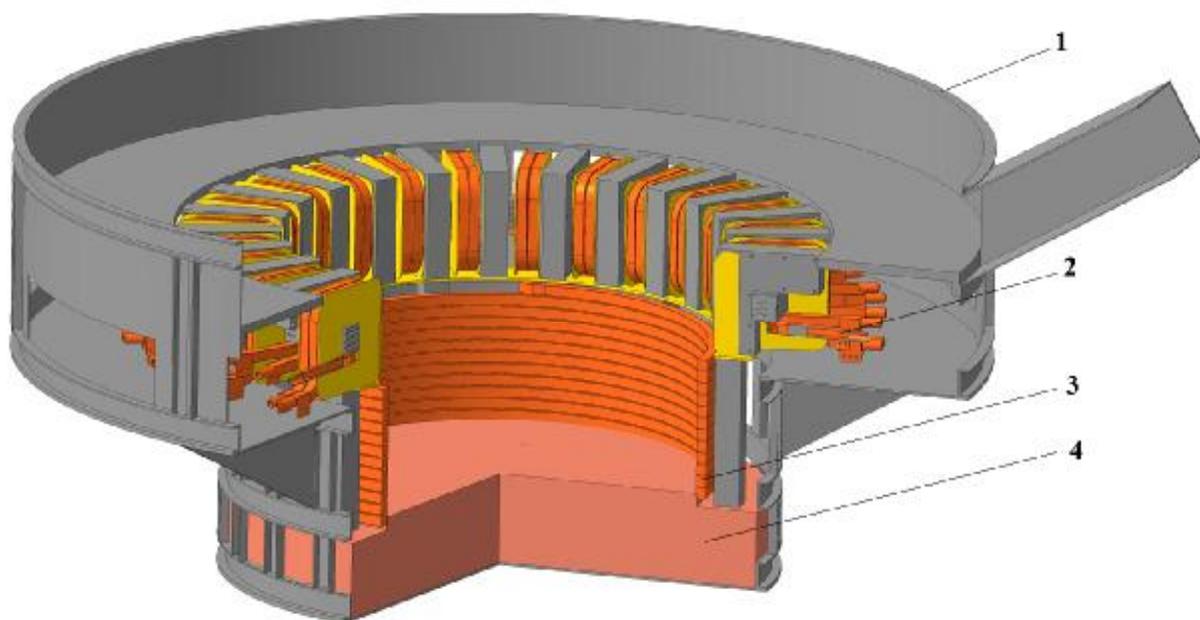


Рис. 2. Турбоиндукционная печь

1 – каркас печи, 2 – вращающийся индуктор, 3 – греющий индуктор, 4 – подовая плита

Предлагаемая конструкция ТИТП обеспечивает одноконтурное торoidalное движение металла за счет многофазного электропитания токами средней частоты основного греющего индуктора [5] и вращательное движение металла (в горизонтальной плоскости) вокруг оси под действием бегущего поля низкой частоты, создаваемого круговым линейным двигателем (рис. 3), установленного в верхней части тигля печи. При вращении на поверхности расплава образуется вогнутый мениск (воронка), что облегчает ввод материалов и обеспечивает высокую скорость диффузии за счет турбулентного скольжения металла в подшлаковом слое. ТИТП двухплоскостным перемешиванием расплава позволяет устранить химическую неоднородность и обеспечить равномерность распределения в нем вводимых дисперсных частиц. Кроме этого, в ТИТП обеспечивается изотермическая выдержка металла в интервале кристаллизации, что дает ей неоспоримые преимущества по сравнению с такими методами, как литье под низким давлением (ЛНД), где расплавленный металл под давлением воздуха или инертного газа подается по металлопроводу непосредственно в полость литейной формы. Однако существующие установки ЛНД не обеспечивают изотермическую выдержку металла, ввод и равномерное распределение материалов в расплаве и подачу металлической суспензии в полость формы.

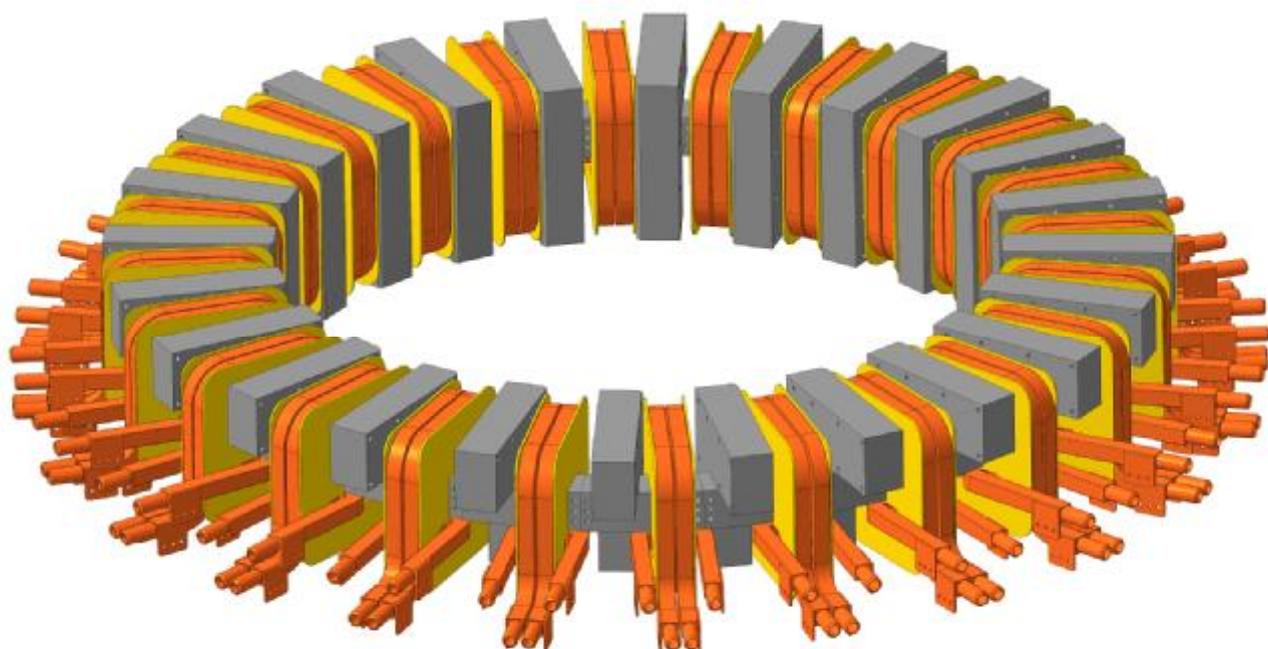


Рис. 3. Вращающийся индуктор печи

На рис. 4 в виде линий равных скоростей показано: распределение скоростей вращения в продольном сечении верхней части тигля под действием вращающегося магнитного поля, созданного торцевой верхней активной частью обмотки вращающегося индуктора (а), а на рис. б - распределение скоростей в продольном сечении нижней узкой части тигля под действием вращающегося магнитного поля, созданного внутренней боковой частью обмотки этого индуктора.

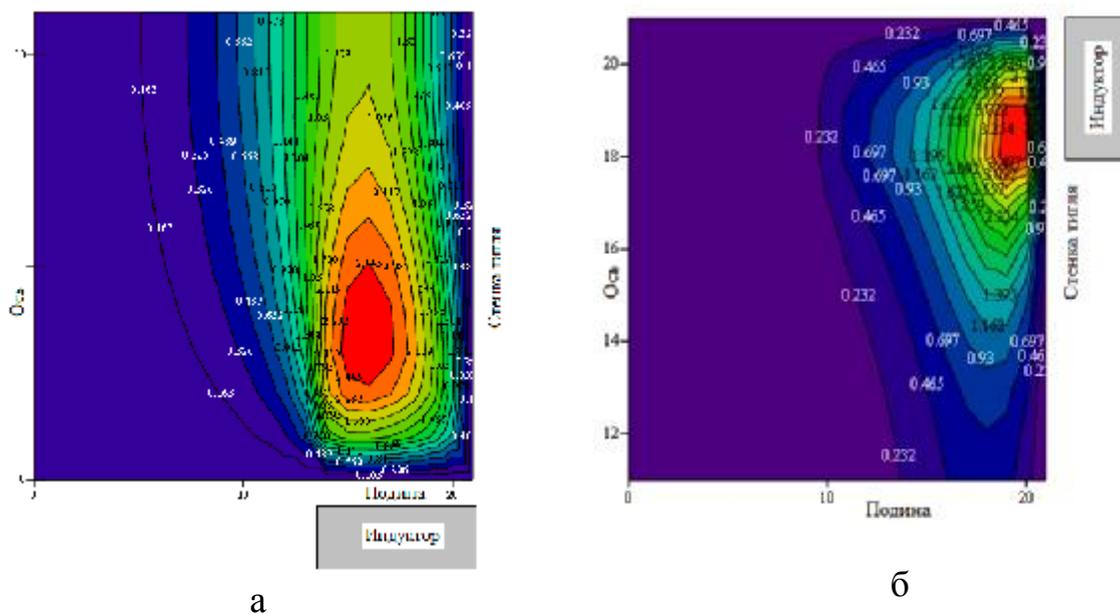


Рис. 4. Линии равных скоростей в продольном сечении верхней части тигля (а) и нижней части тигля (б)

На рис. 5 показано векторное поле скоростей в продольном сечении нижней части тигля при воздействии на расплав бегущего по оси магнитного поля, созданного многофазной обмоткой греющего индуктора при его питании токами средней частоты. Как видно, этот индуктор создает тороидальную циркуляцию расплава в тигле.

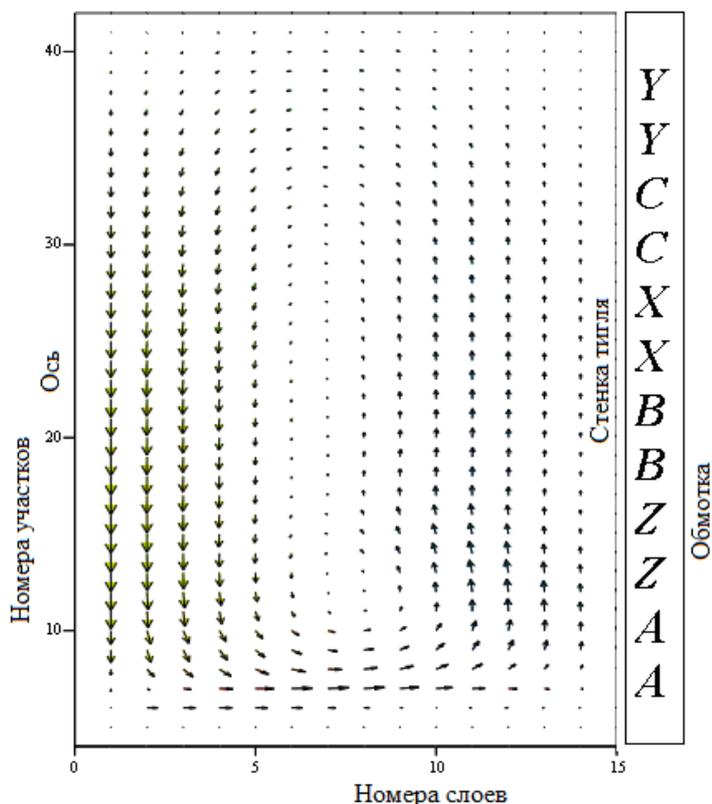


Рис. 5. Векторное поле скоростей в продольном сечении нижней части тигля при трехфазном питании обмотки греющего индуктора

В целом, изменяя параметры и схемы питания индукторов печи, можно сформировать различные виды циркуляции металла в соответствии с требованиями технологического процесса.

IV. Источник питания ТИП

Электропитание ТИП и управление гидродинамическими процессами осуществляется посредством оригинального мультиэнергоканального преобразователя частоты, осуществляющего электропитание индукторов печи по многоконтурной многофазной схеме на средней и низкой частоте. Схема источника приведена на рис. 6.

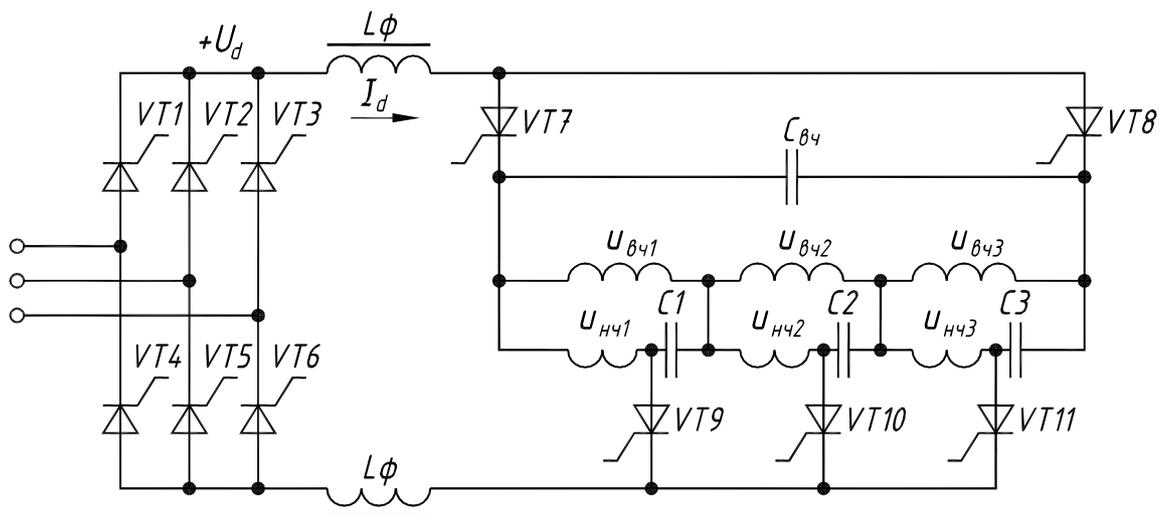


Рис.6. Принципиальная схема преобразователя частоты

Преобразователь частоты собран по двухзвенной структурной схеме преобразования энергии трехфазной питающей сети в энергию постоянного тока выпрямителя (VT1-VT6) и в энергию токов высокой и низкой частоты каскадным однофазно-трехфазным инвертором тока (VT7-VT11) [3]. Энерго-выход высокочастотного каскада (VT7-VT8) подключен к параллельному нагрузочному контуру, образованному высокочастотным индуктором $I_{вч}$ и компенсирующим конденсатором $C_{вч}$. Энерговыходы низкочастотного каскада подключены к параллельным контурам, образованным индукторами вращателя ($I_{нч1} - I_{нч3}$) и секциями греющего индуктора ($I_{вч1} - I_{вч3}$). На рис. 7 приведены диаграммы работы инвертора, на которых показаны высокочастотный ток $i_{вч}$ прямоугольной формы и напряжение на высокочастотном контуре $u_{вч}$, сдвинутое на фазовый угол $\varphi_{вч}$.

Низкочастотный каскад инвертора формирует трехфазный ток низкой частоты $i_1 - i_3$. Основные гармоники фазных токов $i_{(1)1}, i_{(1)2}, i_{(1)3}$ возбуждают на резонансной частоте в низкочастотных контурах токи и напряжения $u_{с1}, u_{с2}, u_{с3}$, сдвинутые по фазе на углы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Токи низкочастотных индукторов формируют бегущее круговое поле электромагнитного вращателя и создают тяговые усилия в секциях высокочастотного индуктора. Управление токами высокой и низкой частоты осуществляется соотношением рабочей и резонансной частоты высокочастотного и низкочастотных нагрузочных контуров. При этом изменяются фазовые углы $\varphi_{вч}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, а, следовательно, изменяется соотношение средних значений напряжений высокочастотного каскада $U_{дубч}$ и низкочастотного каскада $U_{дунч}$, причем, сумма этих напряжений должна быть равна выпрямленному напряжению $U_d = U_{дубч} + U_{дунч}$. Таким образом осуществляется глубокое регулирование токов низкой и высокой частоты на разных стадиях плавки и технологической обработки композиционных сплавов.

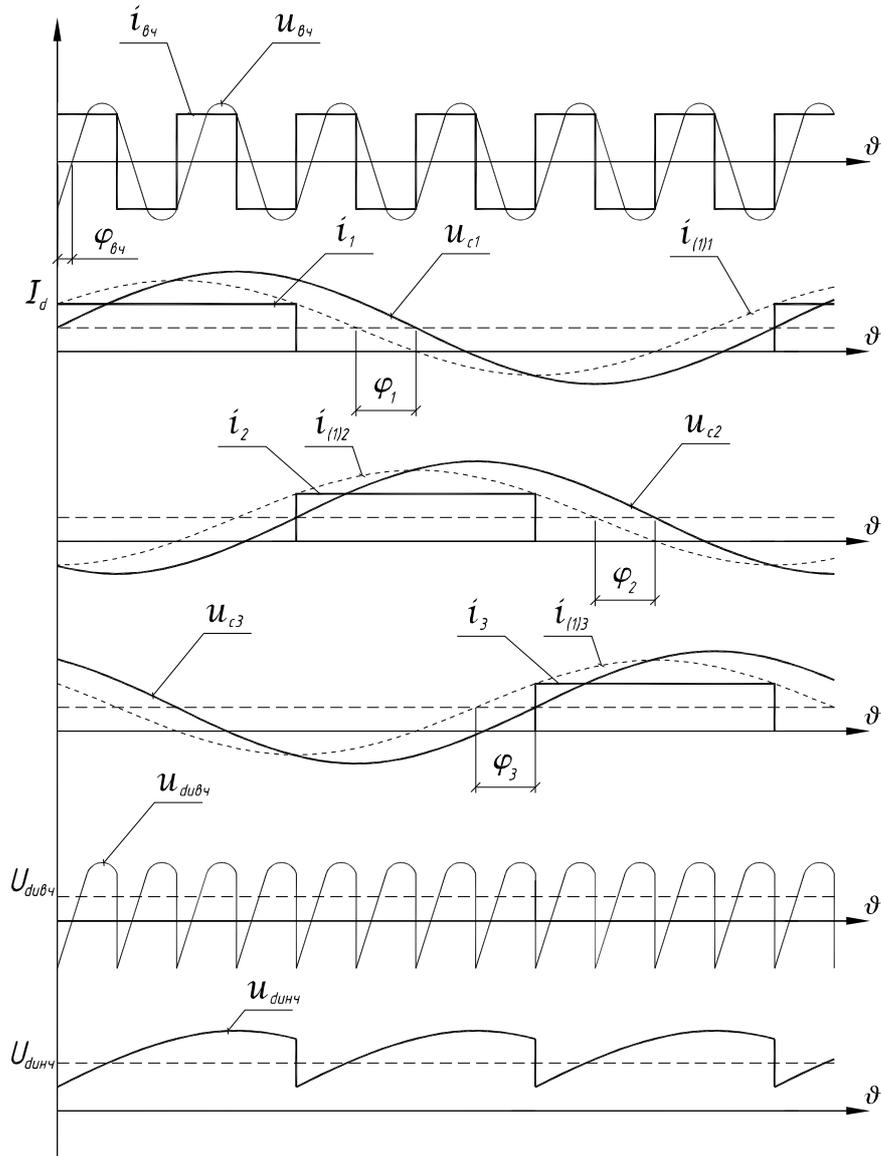


Рис.7. Диаграмма работы однофазно-трехфазного инвертора тока

V. Получение требуемой структуры слитка в ТИПЛК

Как известно, качество металлических изделий, полученных обработкой давлением, в значительной степени определяется структурой и уровнем свойств литых заготовок, их физической и химической неоднородностью. Проблема эта очень широкая, и одним из главных вопросов в ней является знание литой структуры металла и возможность управлять последней с тем, чтобы обеспечить конечную структуру, отвечающую необходимому комплексу свойств изделия после различных обработок литой заготовки.

Так как для большинства изделий полученные отливки являются только заготовками и требуют дальнейшей обработки, то одно из основных требований, предъявляемых к литому материалу, является пластичность. С точки зрения формирующейся при литье структуры повышение пластичности может быть достигнуто, во-первых, устранением столбчатой зоны слитка как

области грубой анизотропной структуры, во-вторых, измельчением и повышением однородности зерен слитка и, в-третьих, изменением фазового состояния сплава. Формирование однородной мелкозернистой структуры обеспечивает высокую технологичность металла как на стадии горячей деформации, так и последующих переделах.

С учетом того, что нежелательные особенности макро- и микроструктуры и дефекты литого металла возникают, главным образом из-за неравномерности распределения температурных полей по объему слитка, а также вследствие постепенного изменения химического состава жидкой ванны в процессе кристаллизации и недостаточной подпитки кристаллизующихся участков расплавом, применение различных физических воздействий, создающих движение расплава, должно оптимизировать структуру и снизить количество дефектов.

Перспективным является способ воздействия на кристаллизующуюся структуру слитка при помощи бегущего вдоль оси слитка электромагнитного поля, создаваемого электромагнитным перемешивателем (ЭМП). При ЭМП можно выделить следующие основные виды воздействий электромагнитного поля на кристаллизующийся расплав:

- непосредственно перемешивание расплава, управляющее теплоотводом при кристаллизации;
- формирование поверхности слитков (формообразование слитков);
- уменьшение или увеличение силы тяжести за счет электромагнитных сил, так называемые левитационные эффекты;
- регулирование движения расплава в достаточно широком диапазоне скоростей.

При электромагнитном перемешивании в жидком расплаве возникают силы, приводящие к циркуляции жидкости в замкнутом объеме. Направление движения расплава, а также скорость можно регулировать в широких пределах, создавая как совпадающие направления движения с тепловой конвекцией, так и не совпадающие. Турбулентное течение, возникающее при ЭМП у фронта кристаллизации, увеличивает эффективный коэффициент тепловой проводимости на три порядка, а коэффициент диффузии на шесть порядков, что приводит к выравниванию температур и химического состава во всем объеме жидкой фазы, увеличению ее общего переохлаждения.

Работы по исследованию воздействия на структуру кристаллизующегося слитка сплава АК4-1ч, проведенные на ОАО КУМЗ в 2001 г., показали целесообразность применения ЭМП для воздействия на кристаллизующийся слиток. Макро- и микроструктуры полученного образца приведены на рис. 8. Полученный слиток обладает желаемой тиксотропной (глобулярной) микроструктурой: по всему сечению слитка отмечаются частицы округлой формы различной величины, значительное измельчение структуры наблюдается в периферийных слоях слитка.

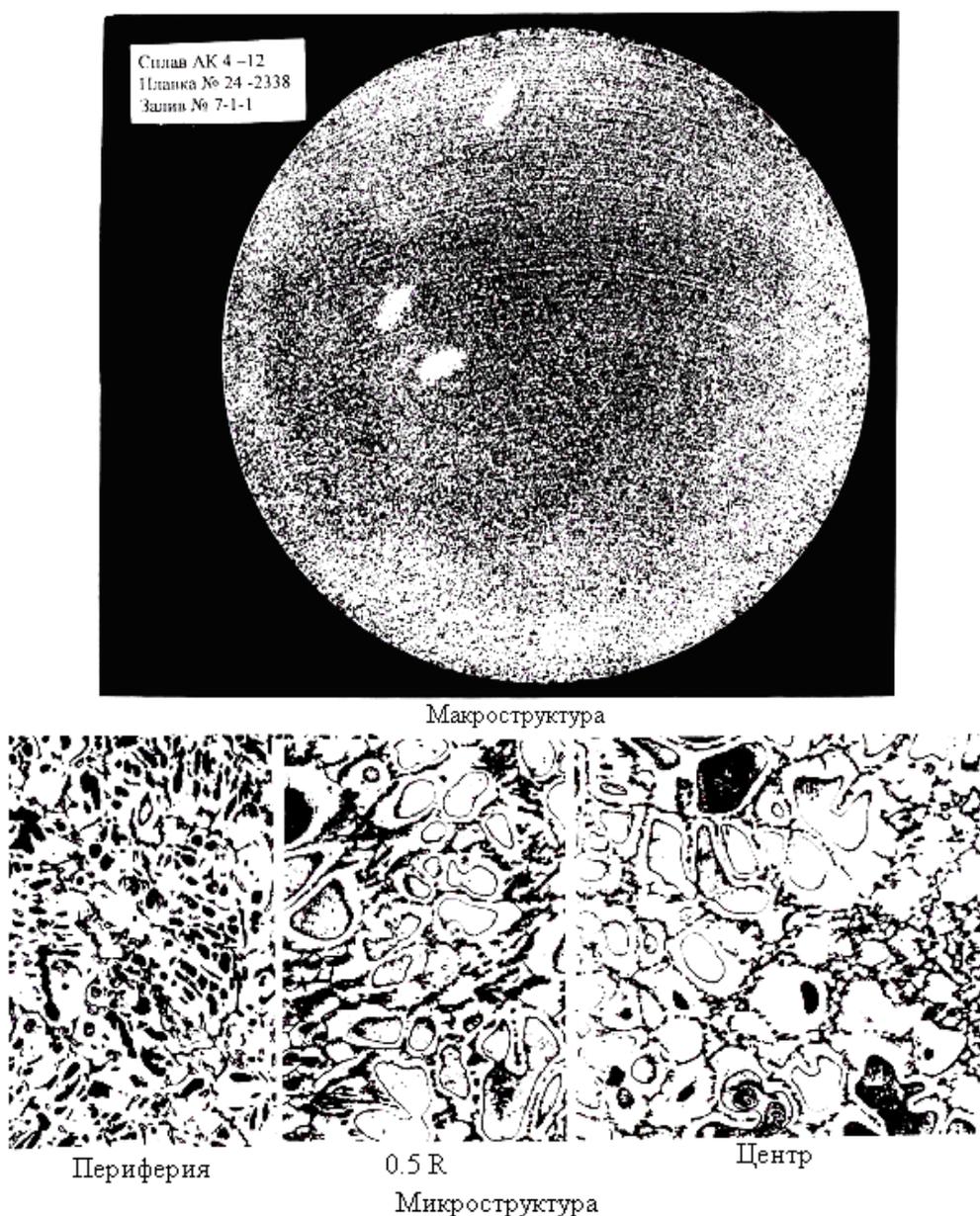


Рис. 8. Структуры слитка сплава АК4-1ч диаметром 145 мм

VI. Перемешиватель жидкой фазы слитков в процессе кристаллизации

Для получения достаточно однородной структуры промежуточного слитка перед прессованием, разливочный узел комплекса должен включать в себя машину полунепрерывного литья с кристаллизатором скольжения, оборудованном устройством электромагнитного перемешивания жидкой фазы слитка для управления процессом формирования его структуры [6]. Общий вид индуктора перемешивателя показан на рис. 9.

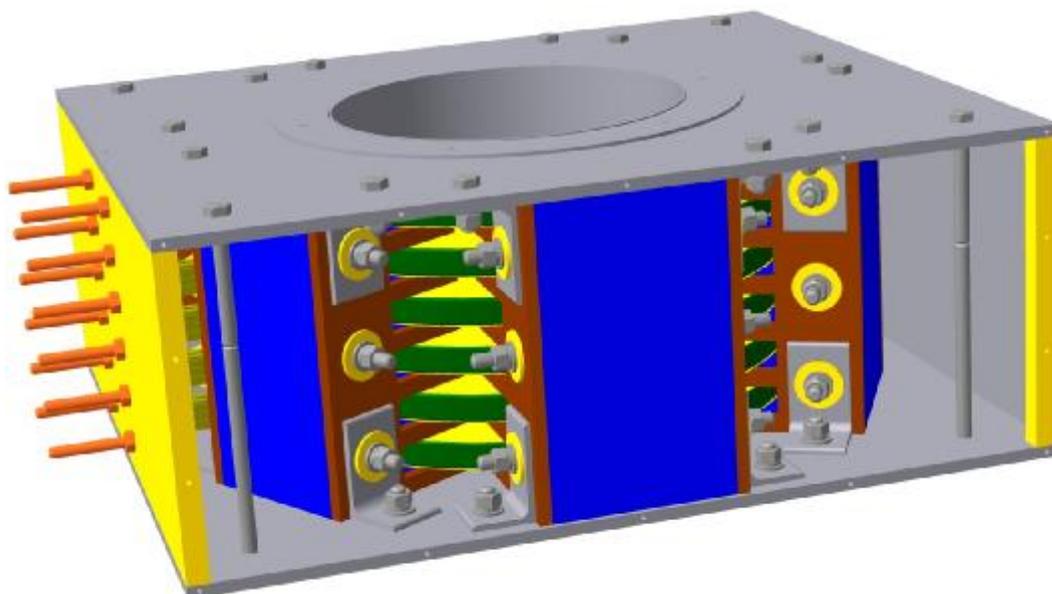


Рис. 9. Индуктор перемешивателя жидкой фазы слитка при кристаллизации

Кристаллизатор (рис. 10) устанавливается в проем индуктора электромагнитного перемешивателя.

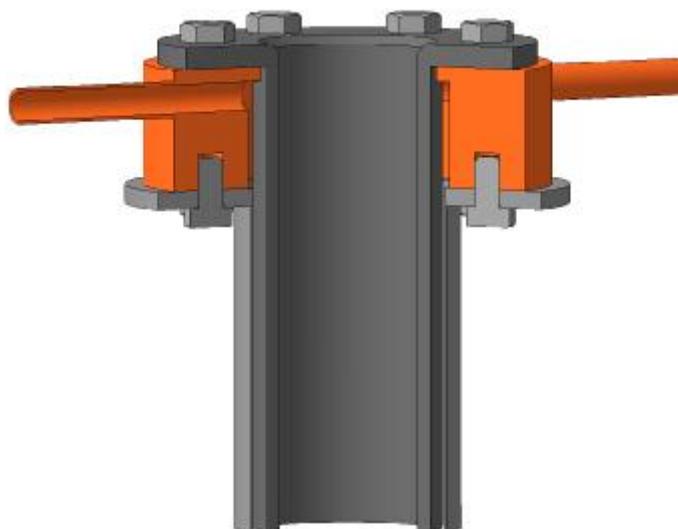


Рис. 10. Кристаллизатор

При питании трехфазной системой токов индуктор создает в металле бегущее вдоль оси магнитное поле, что порождает осевую циркуляцию расплава в лунке кристаллизующегося металла.

На рис. 11 изображено поле скоростей расплава в продольном сечении слитка для данного варианта. Как видно, в данном случае в течении расплава образуется два вихря – один в поверхностной, а второй в средних областях лунки, т.е. простое изменение схемы обмотки ведет к качественному изменению характера движения расплава. На том же рисунке (б) показано поле скоростей, полученное с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Как видно, расчеты с помощью авторской программы на основе МКР [4] и с помощью

указанного пакета дают хорошее совпадение. Различие объясняется лишь меньшей подробностью конечно-разностной сетки в авторской программе.

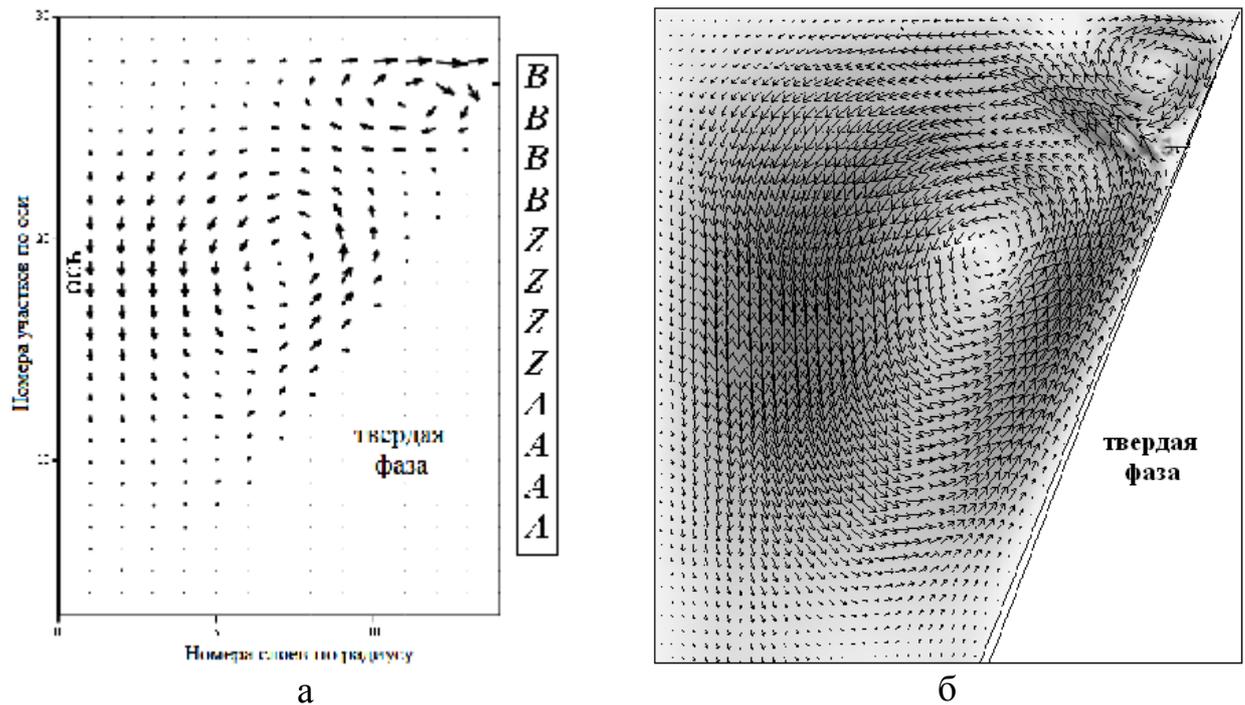


Рис. 11. Векторное поле скорости в продольном сечении для варианта с однополюсной обмоткой индуктора (а - МКР, б – МКЭ COMSOL)

VII. Заключение

В заключении можно сказать, что предлагаемая конструкция ТИПЛК обеспечивает требуемые технологические параметры получаемых слитков как по однородности химического состава, так и по их структуре. Благодаря особенностям конструкции и возможности гибко управлять процессами плавки и перемешивания, ТИПП позволяет проводить приготовление широкой номенклатуры алюминоматричных композиционных материалов. Это обеспечивает повышение эффективности металлургического производства и улучшение качества продукции, производимой из композиционных сплавов методами точного литья тиксофармовки, прокатки.

Литература

1. Г.А. Косников, В.Г. Борисов. Перспективные направления создания металломатричных литейных и деформируемых композиционных материалов нового поколения // Труды 8 – й Всероссийской научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра», 23-25 июня 2010 года. Санкт-Петербург, Изд. СПбГПУ, 2010. С. 71-81

2. Патент РФ № 2390700. Турбоиндукционная тигельная печь / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сарапулов Ф.Н. и др. Опубликовано: 27.05.2010 г. Бюл. № 15.
3. Патент РФ № 2403688. Двухчастотное двухкаскадное однофазно-трехфазное преобразовательное устройство для индукционного нагрева и плавки металлов / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В. и др. Опубликовано 10.11.2010 г. Бюл. № 31.
4. Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 331 с.
5. Формирование МГД-процессов и индукционной тигельной печи при однофазном питании индуктора/ В.Э.Фризен, Ф.Н.Сарапулов,- Электротехника, 2010, №3. С. 56-61.
6. Характеристики цилиндрического электромагнитного перемешивателя расплава при литье медных и алюминиевых слитков / Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Сокунов Б.А., Бычков С.А. Актуальные вопросы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011. Сборник научных трудов. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. С. 125-130.