

# ПЛАВИЛЬНО-ЗАЛИВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ С ТИКСОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ

Лузгин В.И.<sup>1</sup>, Петров А.Ю.<sup>2</sup>, Сарапулов Ф.Н.<sup>1</sup>, Фризен В.Э.<sup>1</sup>, Фаткуллин С.М.<sup>2</sup>,  
Тарасов Ф.Е.<sup>1</sup>, Коптяков А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, vfrizen@yandex.ru

<sup>2</sup>ООО РЭЛТЕК, г. Екатеринбург, Россия, export@reltec.biz

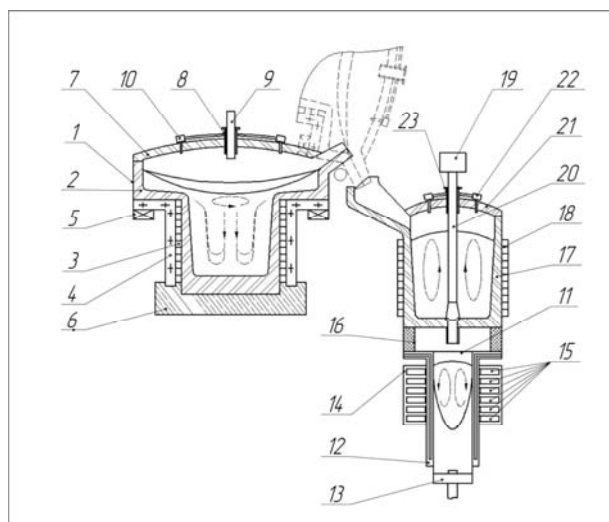
*Аннотация* - В статье описан плавильно-литейный комплекс на базе турбоиндукционной тигельной печи, предназначенный для получения слитков под тиксоформовку из алюмоматричных композиционных материалов, обладающих требуемыми качествами по однородности химического состава и литой структуре. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов, происходящих в агрегатах комплекса, а также результаты исследований воздействия бегущего магнитного поля на жидкую фазу кристаллизующегося слитка.

*Ключевые слова* - алюмоматричные композиционные материалы, тиксотропное литье, турбоиндукционная тигельная печь, электромагнитный перемешиватель жидкой фазы кристаллизующегося слитка

Существенное место в технологических процессах, характерных для машиностроительных предприятий оборонно-промышленного, авиационного, 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].

11, состоящий из тепловой насадки 12, механизма 13 вытяжки слитка и магнитогидродинамического (МГД) перемешивателя 14 с индуктором 15. Над

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 [2].



ТИПЛК состоит из турбоиндукционной тигельной печи 1, тигля 2, снаружи которого установлен греющий индуктор 3, магнитопроводы 4 и вращающийся индуктор 5. Печь 1 выполнена с огнеупорным днищем 6.

Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема плавильно-заливочной установки для получения слитков из композиционных материалов

В крышке 7 тигельной печи 1 выполнены: устройство 8 для подачи и ввода в расплав легирующих материалов, через которое осуществляют подачу и ввод в расплав легирующих и модифицирующих материалов 9; форсунки 10 для создания защитной атмосферы. Плавильно-

заливочная установка также содержит кристаллизатор кристаллизатором 11 через тепловую наставку 16 устанавливается металлоприемник 17 с индуктором 18, устройством 19 управляемого донного слива со

стопором 20 и крышкой 21, в которой установлены форсунки 22 для подачи инертного газа и технологическое отверстие 23 для установки устройства 19 управляемого донного слива. Печь 1 загружается шихтой при открытой крышке 7, далее подается защитный газ для предотвращения окисления металла. После наплавления металла в тигле 2 печи 1 подается ток низкой частоты во вращающий индуктор 5. Расплав вращается вокруг оси тигля 2 и циркулирует в зоне нижней части индуктора 3 вдоль оси и стенок тигля 2. На поверхности металла под действием центробежных сил формируется лунка, в которой образуется шлак. На этапе технологической обработки через устройство 8 подаются легирующие и модифицирующие материалы 9, которые за счет диффузии в турбулентном слое скольжения под шлаком взаимодействуют с металлом и проникают в ванну расплава. После приготовления порции композиционного сплава тигель 2 турбоиндукционной печи 1 поворачивается примерно на 100 град., обеспечивая при этом перелив металла в металлоприемник 17. Затем подается ток промышленной частоты в подогревающий индуктор 18 и индуктор 15 МГД перемешивателя 14, затем после достижения требуемых параметров поднимается стопор 20 устройства 19 управляемого донного слива. Металл попадает в кристаллизатор 11 и начинается процесс вытяжки слитка механизма 13. Над фронтом затвердевания циркулирует аксиальный поток металла под действием бегущего электромагнитного поля МГД перемешивателя 14. Во время вытяжки слитка осуществляется подогрев и перемешивание расплава в металлоприемнике 17 электромагнитным полем индуктора 18. Одновременно с началом вытяжки слитка тигель 2 турбоиндукционной печи 1 возвращается в исходное состояние, загружается шихтой и начинает следующий цикл плавки.

Турбоиндукционная (ТИП) является основным агрегатом ТИПЛК, решающим задачи как по плавлению металла-матрицы, так и допирования расплава упрочняющими микрочастицами и распределению их по всему объему ванны с достаточной однородностью.

На рис. 2 приведен эскиз конструкции ТИП. Предлагаемая конструкция ТИП обеспечивает одноконтурное тороидальное движение металла за счет электропитания токами средней частоты основного греющего индуктора и вращательное движение металла (в горизонтальной плоскости) вокруг оси под действием бегущего поля низкой частоты, создаваемого круговым линейным двигателем (рис. 2), установленного в верхней части тигля печи [3].

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. ТИП двухплоскостным перемешиванием расплава позволяет устранить химическую неоднородность и обеспечить равномерность распределения в нем вводимых дисперсных частиц.

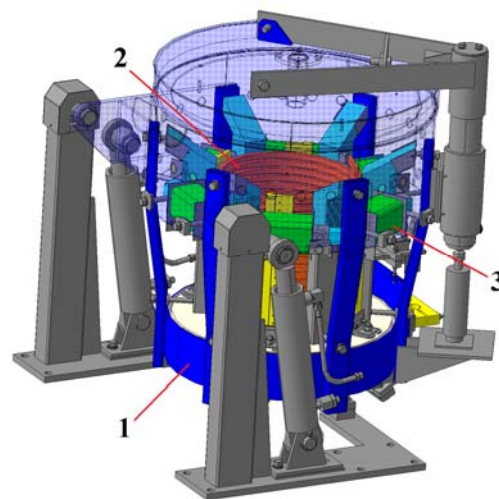


Рис. 2. Турбоиндукционная печь  
1 – каркас печи, 2 – вращающий индуктор, 3 – греющий индуктор

Расчет электромагнитных процессов вращателя ТИП выполнен с помощью компьютерной модели в программе Elcut для боковой и торцевой частей индуктора вращателя.

На основании полученных данных определены электрические параметры индуктора вращателя, а также рассчитаны его энергетические параметры.

Расчет гидродинамических характеристик электромагнитного вращателя ТИП проводился с помощью метода электрических и магнитных схем замещения, а также, метода конечных разностей при определении поля скоростей вращения металлического расплава [4, 5].

Результаты расчета распределения индукции и вращающих усилий, действующих на расплав металла в торцевой части индуктора вращателя, приведены на рис. 3.

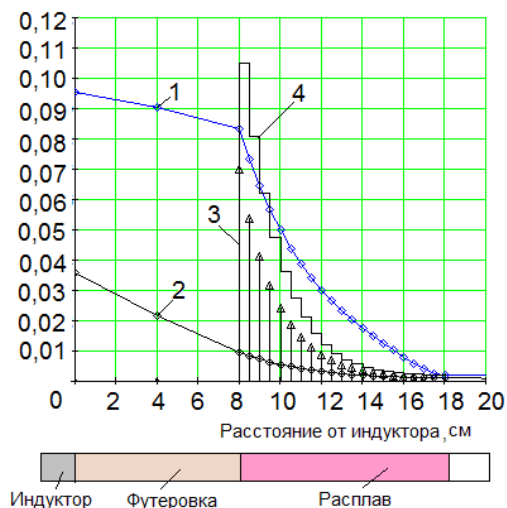


Рис. 3. Распределение по вертикали нормальной  $B_n$  (1) и тангенциальной  $B_t$  (2) индукций, а также удельных вращающих  $F_v \cdot 10^{-5}$  (3) и левитационных  $F_t \cdot 10^{-6}$  (4) усилий в расплаве Тяговые усилия, возникающие в ванне расплава металла, вызывают его вращение вокруг оси тигля,

причем поле скоростей в слоях металла характеризуется значительной неоднородностью.

Уравнение гидродинамики в расплаве для расчета скорости вращения записывается в виде

$$F_{ud} = - \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( g \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \cdot g \cdot \frac{\partial V}{\partial r} - g \cdot \frac{V}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( g \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) \quad (1)$$

После перехода в (1) к конечным разностям для каждого узла конечно-разностной сетки получаем

$$a_{x,y} V_{x-1,y} + b_{x,y} V_{x+1,y} + c_{x,y} V_{x,y+1} + d_{x,y} V_{x,y-1} + e_{x,y} V_{x,y} = Fe_{x,y} \quad (2)$$

Система конечно-разностных уравнений Пуассона (1) решается в пакете MathCAD с использованием функции

$$s = relax(a, b, c, d, e, Fe, V, rjac), \quad (3)$$

где  $s$  – массив рассчитанных скоростей в узлах конечно-разностной сетки, наложенной на продольное сечение металла в тигле (в нашем случае линейных скоростей четырехсот колец-роторов),

$V$  – массив начальных значений скоростей, в том числе граничные условия задачи,

$$Fe_{x,y} = \frac{F_{x,y} \cdot d}{\beta \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{x,y} \cdot \left[ g_b \left( 1 + \frac{V_{x,y}}{V_{kp}} \right) \right]}, \quad (4)$$

где  $F_{x,y}$  – усилие, вращающее кольцо, определяется в электромагнитном расчете, в квадратных скобках – турбулентная вязкость  $g_{x,y}$ ,

$$a_{x,y} = \left( 1 + \frac{d}{2r_{x,y}} \right) + \frac{(g_{x+1,y} - g_{x-1,y})}{4g_{x,y}},$$

$$b_{x,y} = \left( 1 - \frac{d}{2r_{x,y}} \right) - \frac{(g_{x+1,y} - g_{x-1,y})}{4g_{x,y}},$$

$$c_{x,y} = \frac{1}{\beta^2} + \frac{(g_{x,y+1} - g_{x,y-1})}{4\beta^2 \cdot g_{x,y}},$$

$$d_{x,y} = \frac{1}{\beta^2} - \frac{(g_{x,y+1} - g_{x,y-1})}{4\beta^2 \cdot g_{x,y}},$$

$$e_{x,y} = - \left[ \frac{2}{\beta^2} + 2 + \frac{d^2}{r_{x,y}^2} \right], rjac - \text{коэффициент.}$$

Решение системы уравнений (2) отыскивается методом последовательных приближений, пока не будут минимизированы до заданных значений различия скоростей (и их производных на поверхности металла) на предыдущей и последующей итерациях.

На рис. 4 приведены полученные зависимости скоростей движения в слоях металла от радиуса в верхней зоне тигля ТИТП.

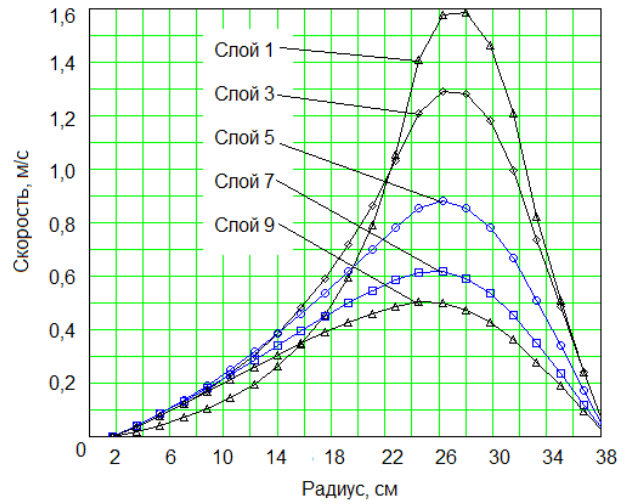


Рис. 4. Зависимости линейных скоростей в слоях тигля от радиуса

На основании рассчитанного поля скоростей вращения определяются давления от центробежных сил, действующие на каждый кольцевой столб расплава. Давление от центробежных сил поднимает столб на такую высоту, чтобы давление силы тяжести поднятой над уровнем жидкости части столба уравновешивало давление от центробежных сил. Рассчитываем высоту подъема столба из 20-ти колец в точке  $x$  радиуса от давления в этих кольцах.

Средний квадрат скорости лежащих друг над другом колец в точке  $s$  по радиусу (от оси)

$$V_{cp,y} = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{x=1}^{20} V_{x,y}^2}. \quad (5)$$

Высота лунки в точке  $s$  по радиусу

$$h_y = \frac{1}{9,81} \sum_{n=1}^y \left( V_{cp,y} \cdot \frac{d}{r_n} \right). \quad (6)$$

Здесь  $d$  – шаг разбиения,  $r_n$  – радиус на шаге  $n$ .

Результаты расчета формы свободной поверхности приведены на рис. 5.

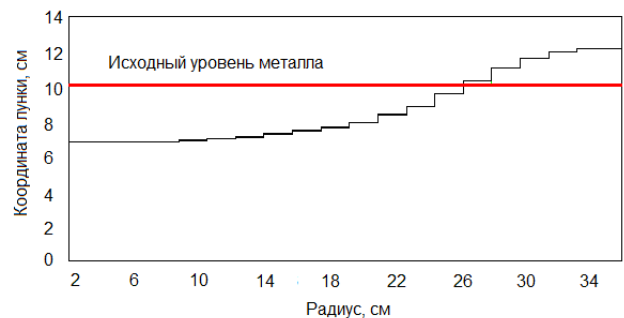


Рис. 5. Очертания свободной поверхности расплава

Гидродинамические характеристики электромагнитного вращателя ТИТП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Значение
Максимальная линейная скорость в верхних слоях ванны металла, м/с	1,6
Количество оборотов в верхних слоях металла в единицу времени, обор./мин	60
Глубина лунки на поверхности жидкого металла, мм	50

Кристаллизатор с электромагнитным перемешивателем (КЭМП) является необходимым агрегатом в составе ТИПЛК для получения слитка с требуемой структурой.

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 микроstructures 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.

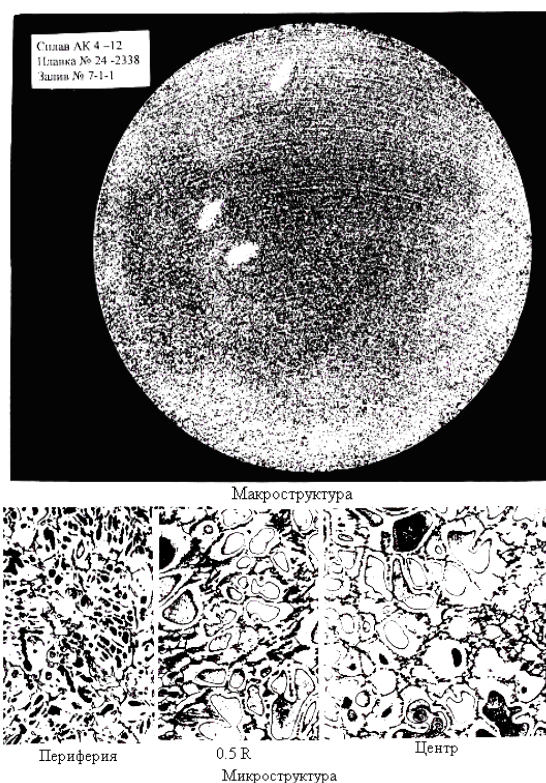


Рис. 6. Структуры слитка сплава АК4-1с диаметром 145 мм

Работы по исследованию воздействия на структуру кристаллизующегося слитка сплава АК4-1с, проведенные на ОАО КУМЗ в 2001 г., показали целесообразность применения ЭМП для воздействия на кристаллизующийся слиток. Макро- и микроstructures полученного образца приведены на рис. 6.

Полученный слиток обладает желаемой тиксотропной (глобулярной) микроstructure: по всему сечению слитка отмечаются частицы округлой формы различной величины, значительное измельчение структуры наблюдается в периферийных слоях слитка.

КЭМП должен включать в себя включать в себя машину полунепрерывного литья с кристаллизатором скольжения, оборудованным устройством электромагнитного перемешивания жидкой фазы слитка для управления процессом формирования его структуры

[6]. Общий вид индуктора перемешивателя показан на рис. 7.

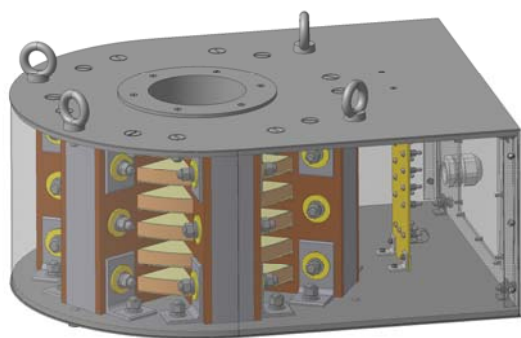


Рис. 7. Индуктор перемешивателя жидкой фазы слитка при кристаллизации

Кристаллизатор (рис. 8) устанавливается в проем индуктора электромагнитного перемешивателя.

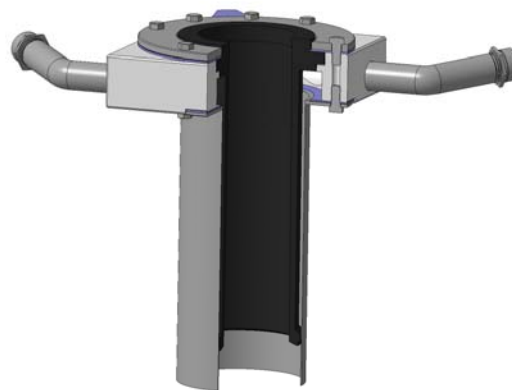


Рис. 8. Кристаллизатор

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. 9 изображено поле скоростей расплава в продольном сечении слитка для данного варианта.

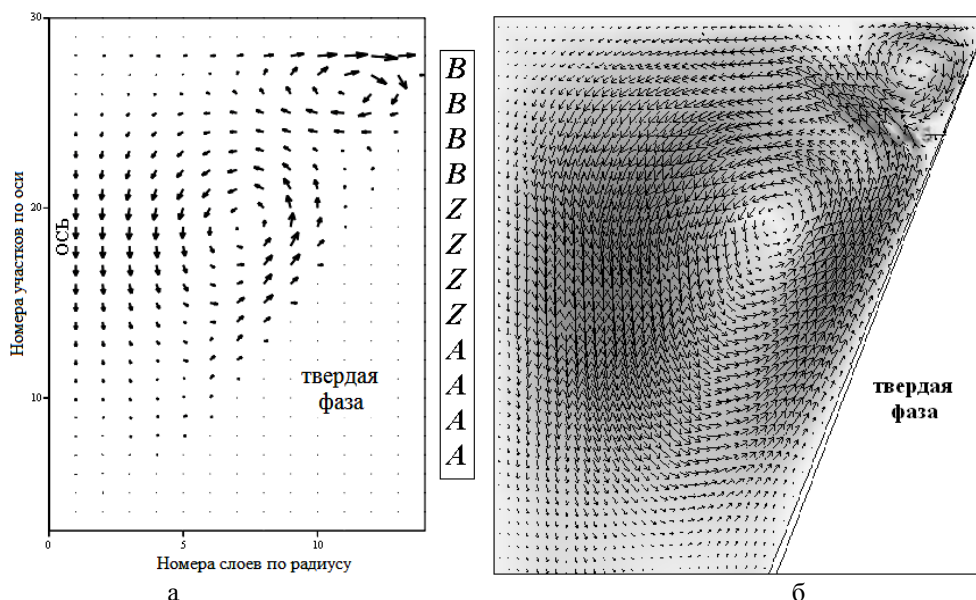


Рис. 9. Векторное поле скорости в продольном сечении для варианта с однополюсной обмоткой индуктора (а - МКР, б – МКЭ COMSOL)

Как видно, в данном случае в течении расплава образуется два вихря – один в поверхностной, а второй в средней 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.

#### Технические характеристики кристаллизатора

Параметры	Значения
Диаметр пресс-слитков, мм	100÷120
Длина пресс-слитка, не более, мм	2600
Масса пресс-слитков, не более, кг	50
Скорость вытяжки слитка, не менее, мм/мин	100
Мощность питающего трансформатора, кВА	5
Частота тока питающей сети, Гц	50
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup>	40

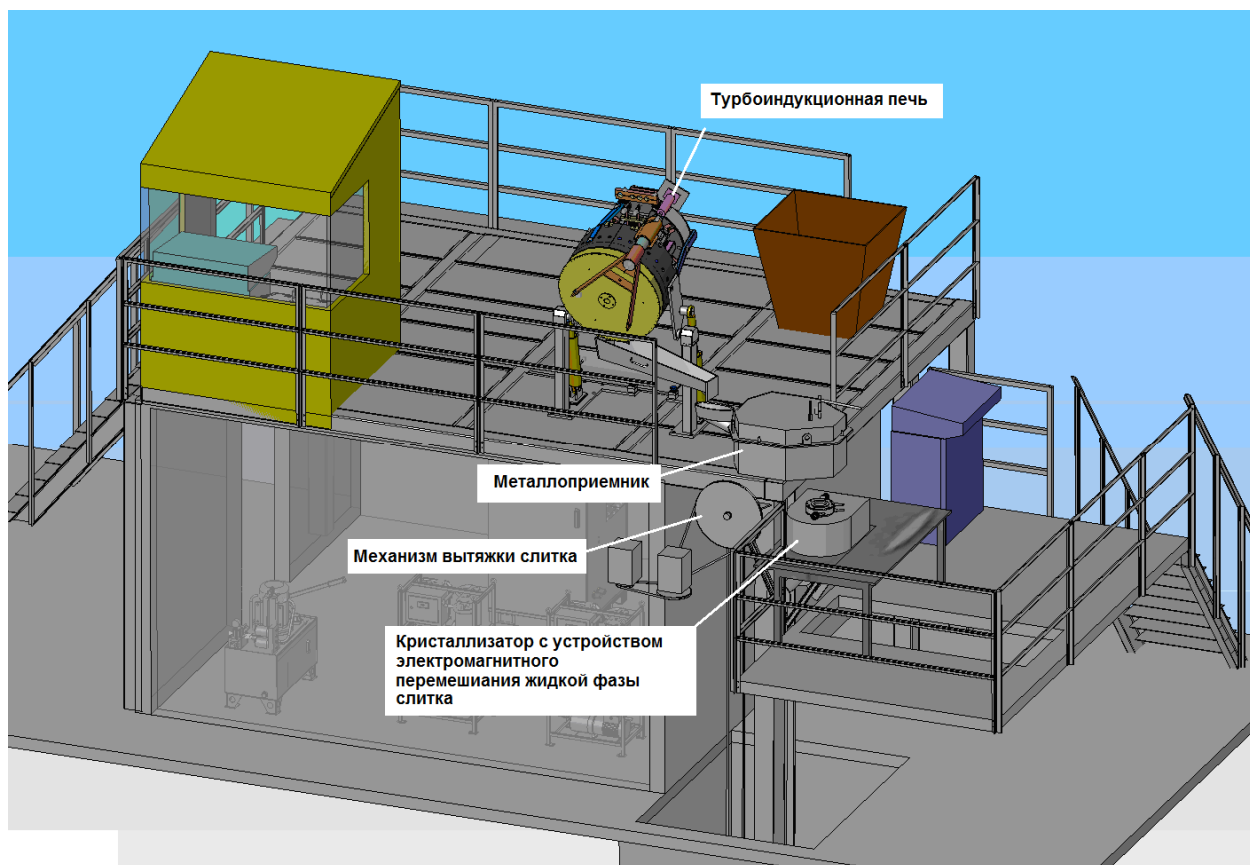


Рис. 10. Общий вид плавильно-заливочного комплекса

На рис. 10 приведена конструктивная схема плавильно-литейного комплекса. Данный вариант компоновки оборудования ТИПЛК обеспечивает высокую надежность, безопасность для оператора и обслуживающего персонала и наиболее полно выполняются требования по качеству слитка.

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, ТИПЛ позволяет проводить приготовление широкой номенклатуры аллюмоматричных композиционных материалов. Это обеспечивает повышение эффективности металлургического производства и улучшение качества продукции, производимой из композиционных сплавов методами точного литья тиксоформовки и прокатки.

#### Библиографический список

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 № 128530. Плавильно-заливочная установка для получения слитков из композиционных материалов / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э. и др. Опубликовано: 27.05.2013 г. Бюл. № 15.
3. Патент РФ № 2390700. Турбоиндукционная тигельная печь / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Опубликовано: 27.05.2010 г. Бюл. № 15.
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.