



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК

А. Н. Панов

Наиболее целесообразный вариант компоновки гарнисажной печи емкостью 7 т был определен по результатам проведенных исследований. Рассмотрены возможные варианты большегрузных печей и целесообразность их конструктивного исполнения с точки зрения характера плавления расходоуемых электродов различного диаметра и тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в жидкой ванне тиглей различной емкости.

From results of investigations the most rational variant of design of a skull 7 t capacity furnace was defined. Possible variants of large-tonnage furnaces and rationality of their design from the point of view of nature of melting the different-diameter consumable electrodes and thermal and hydrodynamic processes proceeding in molten pool of crucibles of different capacity were considered.

**Ключевые слова:** вакуумно-дуговой и плавно-заливочный агрегат; расходоуемый электрод; тигель; расплав; гарнисаж; жидкая ванна; печь

На протяжении более 40 лет в ЦНИИ конструктивных материалов «Прометей» создаются конструкции вакуумных дуговых плавно-заливочных агрегатов для изготовления фасонных отливок из сплавов на основе титана для изделий судового машиностроения и энергетики, эксплуатирующихся в условиях длительного воздействия агрессивных сред.

Практика производства уникального крупного литья из титановых сплавов показала, что емкости вводимых в эксплуатацию плавно-заливочных установок постоянно отставали от потребностей промышленности в единичной массе выплавляемого металла. В последние годы в ЦНИИ КМ «Прометей» проводятся работы по разработке плавно-заливочных агрегатов нового поколения с расширенными технологическими возможностями, более совершенных по характеристикам протекающих тепловых процессов, а также работы по определению путей создания печей большой емкости на базе имеющегося производственного опыта, накопленного при эксплуатации действующих печей.

Представляемая работа является составной частью этих перспективных исследований. Она была выполнена с целью анализа возможных вариантов большегрузной печи, определения оптимальной емкости и наиболее целесообразного конструктивного исполнения.

**Варианты компоновки печей.** В настоящее время для производства фасонных отливок из титана и других тугоплавких металлов в отечественной пла-

вильной практике применяются два типа плавно-заливочных установок, в которых в качестве шихтовых материалов используются расходоуемые электроды. По принципу слива металла они разделяются на печи со сливом после прекращения горения дугового разряда и печи с разливкой при горячей на расплав дуге. Такие технические и технологические преимущества печей со сливом «без разрыва дуги», как возможность активного воздействия на перегрев сливаемого расплава, относительно небольшая высота, низкая металлоемкость, надежность и безопасность в работе и простота в обслуживании, дают основания считать, что при создании новых конструкций гарнисажных плавно-заливочных агрегатов базовым будет способ слива расплава при горячей дуге.

Наиболее широкое распространение в промышленности получила традиционная однотигельная схема, на основе которой создано многообразие плавно-заливочных установок, различающихся как по емкости, так и по способу слива металла. Двухтигельная схема была реализована в конструкции крупнейшей на сегодняшний день печи «Нева-5». Возможностям создания печей по многотигельной (более двух) схеме до настоящего времени не уделялось достаточно внимания, хотя получение заданной массы расплава может быть обеспечено при применении как одного, так и нескольких тигельных узлов, производящих в сумме требуемое для заливки формы количество металла.

Поэтому в качестве возможной компоновки большегрузной печи нами приняты к рассмотрению 1-, 2-, 3- и 4-тигельные варианты. Возможности увеличения количества тиглей свыше четырех не рассмат-

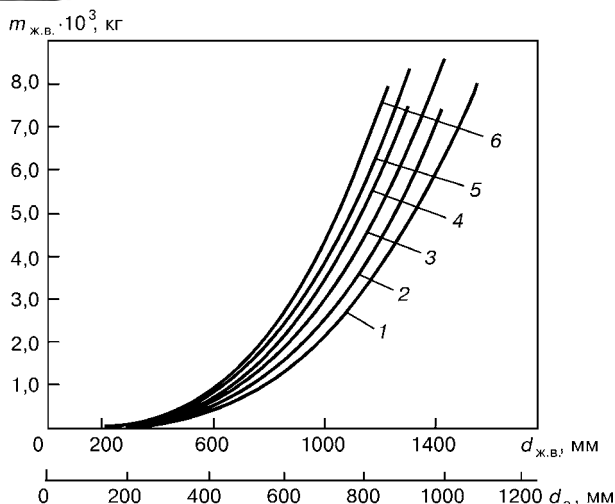


Рис. 1. Зависимость массы жидкой ванны от ее диаметра при соотношении  $d_э/d_{ж.в.} = 0,7$  и глубине жидкой ванны  $h = 0,5d_{ж.в.}$  (1),  $0,6d_{ж.в.}$  (2),  $0,7d_{ж.в.}$  (3),  $0,8d_{ж.в.}$  (4),  $0,9d_{ж.в.}$  (5),  $1,0d_{ж.в.}$  (6)

ривались ввиду конструктивной сложности установок агрегатов механизма поворота тигля.

Для определения емкости печи был выполнен расчет массы расплава при различной глубине жидкой ванны с учетом существующих мощностей заготовительного литья: расходуемых электродов диаметром 100... 600 мм и слитков первого перепада диаметром 600... 1200 мм, которые также могут быть использованы в качестве электродов (рис. 1).

Практика эксплуатации печи «Нева-4» показала, что реальная глубина жидкой ванны может значительно превышать рекомендуемую ( $h_{ж.в.} = 0,5d_{ж.в.}$ ) [1] и достигать 0,8 ее диаметра, поэтому, исходя из полученных результатов, можно сказать, что при  $h_{ж.в.} = 0,8d_{ж.в.}$  масса жидкой ванны составит 7476 кг при применении одного расходуемого электрода диаметром 1000 мм, 7652 кг при применении двух электродов диаметром 800 мм, 7368 кг при использовании трех электродов диаметром 690 мм и 8216 кг при сплавлении четырех электродов диаметром 650 мм. Таким образом, представляется теоретически возможным создание гарнисажной печи, обеспечивающей получение жидкой ванны суммарной емкостью около 7 т.

Для выбора оптимального варианта конструкции необходимо рассмотреть технические, теплотехнические и экономические факторы каждого из перечисленных выше вариантов.

**Исследование характера плавления расходуемых электродов различного диаметра.** Изучение характера тепловых процессов было проведено для электродов диаметром 600... 1200 мм, которые раньше редко использовали или вообще не использовали в практике изготовления литья. Исследования проводили с помощью аналитических методов анализа тепловых процессов, позволяющих прогнозировать их развитие в электродах и ваннах с увеличением масштабного фактора на основании результатов, полученных при выполнении плавок в печах меньшей емкости. Соотношение диаметра электрода и ванны принималось обычным для гарнисажной плавки — 0,7.

Расчеты выполняли для заключительного этапа плавления, когда процессы теплопередачи переходят

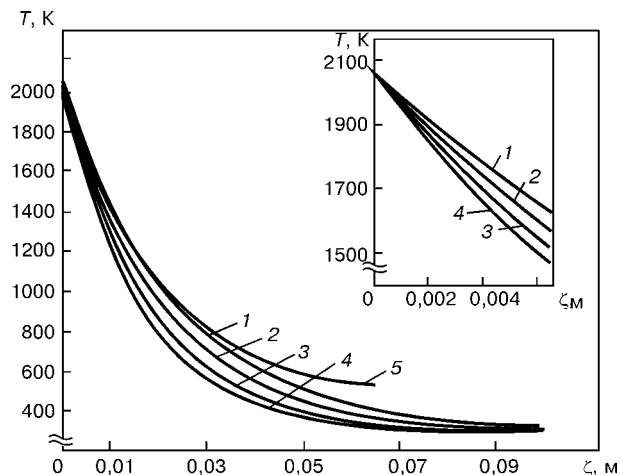


Рис. 2. Температурное поле электрода при различных линейных скоростях плавления: 1,2 (1), 1,4 (2), 1,6 (3), 1,8 (4) м/ч; 5 — данные [1]

дят в квазистационарное состояние, что позволяет использовать формулы, применяемые для стационарного состояния. Определение аксиального температурного поля расходуемого электрода в установившемся режиме проводили по формуле академика Рыкалина [1, 2]:

$$T - T_0 = (T_{гор} - T_0) e^{-\frac{v\zeta}{a_m}}$$

где  $T_0$  — начальная температура;  $T_{гор}$  — температура поверхности плавящегося торца;  $v$  — линейная скорость плавления;  $\zeta$  — координата сечения, отсчитываемая от плавящегося торца;  $a_m$  — коэффициент температуропроводности.

Были рассчитаны тепловые поля расходуемых электродов больших диаметров при линейных скоростях плавления 1,2... 1,8 м/ч, используемых при гарнисажной плавке. Установлено, что характер картин температурных полей электродов разных геометрических размеров идентичен и не зависит от времени (рис. 2). На торце плавящегося электрода имеется тонкий слой расплавленного металла толщиной 1,0... 1,5 мм, из которого образуются капли, перегреваемые несколько выше ликвидуса в процессе формирования. Когда масса капли превышает силы поверхностного натяжения, она отрывается и, пролетая зону дугового разряда, падает на зеркало жидкой ванны. Основной температурный перепад наблюдается на участке протяженностью 60 мм, на глубине около 100 мм он достигает примерно 400 К. Причем, с увеличением линейной скорости плавления происходит более резкое снижение температуры по длине рассматриваемого участка электрода и уменьшение толщины слоя расплава на разогретом торце. Таким образом, была определена приблизительная толщина слоя расплава на оплавленном торце, а также установлена длина огарка, необходимая для предупреждения нагрева державки, и, следовательно, полезная длина расходуемого электрода для проведения плавки.

**Исследование тепловых и гидродинамических процессов в жидкой ванне гарнисажных тиглей различной емкости.** Исследования гидродинамических процессов проводятся на различных моделях из-за



невозможности визуального наблюдения за их протеканием, а также использования термопар для замера температур.

Длительное время считалось, что передача тепла в объеме ванны вследствие разности температур происходит путем конвективного переноса от поверхности зеркала вдоль бокового гарнисажа вниз к донному. При этом повышения интенсивности гидродинамических процессов и теплопередачи можно было добиться за счет наведения на ванну магнитного поля соленоида, в результате чего происходит раскручивание ванны под действием центробежных сил и интенсивный подвод горячего расплава из центральной (подэлектродной) зоны зеркала к боковому гарнисажу. На основании этого считалось также, что наиболее высокую температуру имеет металл на зеркале, а наиболее низкую, близкую к температуре плавления, — на дне жидкой ванны [3].

Позднее в литературе появились сообщения о наличии в объеме ванны теплового ядра, окруженного тепловым пограничным слоем [1]. В них движение металла в ванне гарнисажного тигля характеризуется как турбулентное, сопровождающееся интенсивным перемешиванием расплава в горизонтальной и вертикальной плоскостях, однако не указываются факторы, определяющие развитие процессов по этой схеме.

Для создания объективной картины гидродинамики жидкой ванны и протекания в ней процессов теплопередачи были проанализированы результаты изучения влияния протекания тока через ванну расплава и возмущающего фактора магнитных масс на характер движения жидкости, выполненного в Институте электросварки им. Е. О. Патона на моделях, где в качестве рабочей жидкости использовалась ртуть [4]. В ЦНИИ КМ «Прометей» методом гидромоделирования были проведены исследования характера развития гидродинамических процессов в объеме жидкой ванны при падении на ее поверхность струи расплавленного металла, а также прямые наблюдения за процессами на поверхности ванны при плавке и изучены косвенные данные по результатам плавки и состоянию гарнисажа.

Проведенный анализ дает основания предложить для рассмотрения следующую схему развития гидродинамических процессов, обуславливающих тепловые процессы в ванне расплава и процессы теплопередачи к гарнисажу (рис. 3).

Определяющим фактором гидродинамики ванны является поток расплава, падающий в виде капельного дождя с торца расходуемого электрода на зеркало. Это образует в объеме ванны столб наиболее горячего металла (тепловое ядро), равный по диаметру расходуемому электроду и окруженный тепловым пограничным слоем расплава, в котором движение расплава происходит со значительно меньшей интенсивностью. Глубина прошивки ванны определяется силой давления струи расплава на зеркале и зависит от линейной скорости плавления электрода. При плавлении с повышенной скоростью на начальном этапе плавки головная часть теплового ядра может достигать дна ванны и вызывать под-

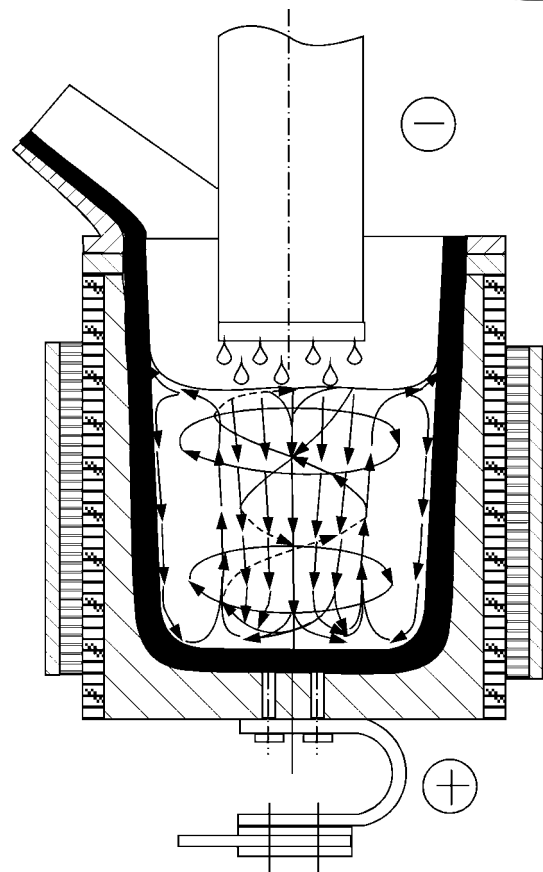


Рис. 3. Предлагаемая схема развития гидродинамических процессов в гарнисажном тигле с соленоидом

плавление гарнисажа. К этому также может привести увеличение линейной скорости плавления выше оптимальных значений в ходе плавки. При нормальных режимах головная часть теплового ядра не соприкасается с донным гарнисажом, а отделяется от него переходным слоем.

Вторым фактором, усиливающим давление на расплав и способствующим образованию теплового ядра, является протекание тока через ванну от зеркала ко дну. В районе головной части теплового ядра расплав противотоком поднимается вдоль поверхности ядра к зеркалу, далее конвекцией отводится к боковому гарнисажу и, постепенно охлаждаясь, опускается ко дну тигля, где захватывается потоком металла, поднимающимся противотоком по поверхности ядра. Таким образом, тепловое ядро в течение плавки сохраняет свою форму, изменяя только свое положение по высоте, и слабо перемешивается с остальной частью расплава, сосредоточенной в переходной зоне, что способствует сохранению перегрева. Определяющим фактором теплоотвода к гарнисажу является тепловой пограничный слой, расположенный между восходящим потоком и гарнисажом.

Наложение на ванну магнитного поля соленоида приводит к вращению расплава под действием центробежных сил. Поверхность зеркала жидкой ванны приобретает вогнутость из-за повышения уровня расплава в зоне бокового гарнисажа и его понижения в осевой зоне тигля, и образуется область пониженного давления. Это способствует еще более глубокому проникновению перегретого металла

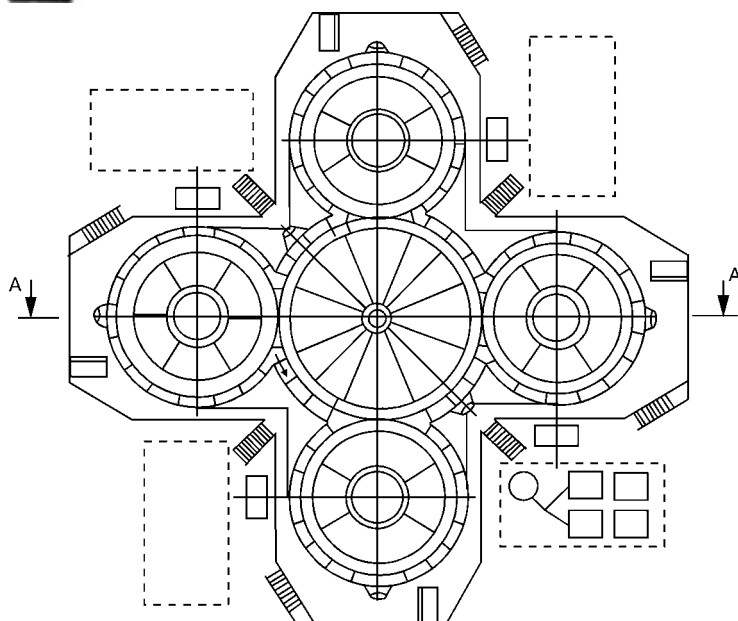


Рис. 4. Принципиальная схема 4-тигельной большегрузной печи

в слой жидкой ванны, и верхняя часть теплового ядра принимает форму усеченного конуса. В ходе исследований было выдвинуто предположение, что под влиянием магнитного поля соленоида направления движения расплава в тепловом ядре, в противотоке, а также циркуляция в круговом контуре образуют винтовые линии.

Таким образом, магнитное поле соленоида усиливает интенсивность гидродинамических процессов, но его вклад в их развитие не является решающим из-за кратковременности вращения расплава в одном направлении. Первоочередными факторами, обуславливающими развитие гидродинамических и тепловых процессов, являются давление потока расплава, падающего с торца расходуемого электрода на зеркало, и протекание через ванну постоянного тока.

Наличие теплового ядра по всей высоте ванны, в котором сосредоточен основной перегрев, и теплового пограничного слоя с более низкой температурой объясняет, почему теплоотвод от ванны к гарнисажу является равномерным по высоте и будет определяться теплоотводом от пограничного слоя. Это позволяет сделать предположение, что при плавке на одинаковых линейных скоростях удельные тепловые нагрузки на гарнисаж в крупногабаритных ваннах почти не будут отличаться от нагрузок при плавке в малых печах.

Предложенная схема развития гидродинамических и тепловых процессов показывает принципиальное сходство процессов, происходящих в жидких ваннах больших и малых гарнисажных тиглей, доказывает возможность получения жидких ванн, сопоставимых по глубине с диаметром, и объясняет различия в конструкции промышленных плавильных тиглей.

**Определение наиболее целесообразного варианта компоновки печи.** Анализ рассматриваемых вариантов компоновки показывает, что, во-первых, соз-

дание печи по 1- и 2-тигельной схеме потребует использования дефицитных сверхмощных источников тока, обеспечивающих плавление расходуемых электродов диаметром около 1000 и 800 мм и поддержание жидкой ванны соответствующих размеров.

Во-вторых, накопление необходимой массы жидкого титана должно производиться в водоохлаждаемых тиглях емкостью 7 или 3,5 т (2-тигельный вариант), ранее не используемых в практике гарнисажной плавки, поэтому для реализации этих вариантов требуется создание и освоение технологии производства тиглей большой емкости, которые промышленностью не выпускаются, а также проведение научно-исследовательских работ по разработке оптимальных энергетических режимов.

В-третьих, для 3-тигельной схемы печи также потребуются разработки конструкции тигля большой емкости, что менее предпочтительно с точки зрения симметрии расположения тигельных узлов.

Итак, из рассматриваемых вариантов наиболее целесообразным представляется выполнение печи по 4-тигельной схеме с расположением тиглей под углом  $90^\circ$  относительно друг друга по периметру заливочной камеры, установленной в центре (рис. 4). Это позволит использовать в конструкции основной состав комплектующего оборудования, проверенного за время эксплуатации гарнисажной печи «Нева-5» и выпускаемого промышленностью: графитовые тигли, источники тока дуги, узлы вакуумной системы и расходуемые электроды диаметром 600...650 мм.

Использование отработанных узлов, а также уникального опыта многомонтажных и сверхпроектных плавков на печи «Нева-5» сократит время изготовления, монтажа и освоения печи. Расширению технологических возможностей получения литья будет способствовать одновременное накопление расплава в четырех тиглях. Таким образом, значительно снизятся материальные и финансовые затраты при сооружении печи и сократится период доводки при выводе технологически гибкой гарнисажной печи на проектную мощность.

1. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Волохонский Л. А., Полин И. В., Новицкий Г. С. Тепловые процессы и энергетический баланс расходуемого электрода при вакуумной дуговой плавке в гарнисаже // Вакуумная дуговая плавка металлов и сплавов. — М.: ВИЛС, 1965. — Вып. 3.
3. Бибиков Е. Л., Глазунов С. Г. и др. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1983.
4. Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШП / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1982. — Вып. 17. — С. 3–8.

ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

Поступила 03.06.2004