

На правах рукописи

ТАВОЛЖАНСКИЙ СТАНИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ  
МЕДНОФОСФОРНЫХ ПРИПОЕВ ПРИВЕДЕННЫМ ДИАМЕТРОМ  
3 – 6 ММ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И СНИЖЕНИЯ  
ТРУДОЕМКОСТИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Специальность 05.16.04. – «Литейное производство»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2007

Работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов  
Московского Государственного Института Стали и Сплавов  
(технологического университета)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Пашков Игорь Николаевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук Напалков Виктор Иванович

кандидат технических наук, доцент Бобрышев Борис Иванович

Ведущая организация ОАО (АК) «РУБИН»

Защита состоится 22 марта 2007 г. на заседании диссертационного совета  
Д.212.132.02 при Московском Государственном Институте Стали и Сплавов  
(технологическом университете) по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский  
проспект, д.6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
Государственного Института Стали и Сплавов (технологического  
университета).

Автореферат разослан «    » февраля 2007 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

Семин А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность работы*

Для автоматизированных и механизированных процессов высокотемпературной пайки используются прутки припоя диаметром до 6 мм из медно-фосфорных сплавов. Для производства прутков малого сортамента необходимо использование рентабельных высокопроизводительных способов. Припои на основе системы медь-фосфор не уступают по своим технологическим свойствам дорогостоящим серебросодержащим припоям, но из-за низких механических свойств их производство в виде мелкосортных прутков методами обработки давлением чрезвычайно затруднительно.

Существующие специальные методы получения мелкосортных заготовок диаметром 3 – 6 мм из труднодеформируемых медно-фосфорных сплавов методами обработки давлением, отличаются низким выходом годного, который составляет для сплавов данной группы 40-50% вследствие значительного возврата металла на стадии подготовки слитка к деформации и во время многостадийного процесса деформации. Кроме того, после деформирования необходимо удалять с поверхностного слоя оксиды, образовавшиеся при нагреве заготовок во время горячей обработки давлением. Учитывая то, что сечение прутков необязательно должно быть круглым, одним из перспективных направлений производства таких заготовок является непрерывное литье.

Известные специальные методы непрерывного вертикального литья заготовок малых диаметров до 6 мм обладают низкой производительностью, составляющей не более 1-2 кг/час, что делает данные методы нерентабельными. Традиционные методы непрерывного горизонтального и вертикального литья, а также такие специальные методы, как непрерывное литье по методу Проперци, Хазелетта и др. позволяют изготавливать заготовки сечением не менее 200 мм<sup>2</sup>. Для получения заготовок более мелкого сечения возникает необходимость в дальнейшей обработке давлением. Основной проблемой производства непрерывнолитых заготовок малого сечения является организация точной дозировки расплава при достаточно высокой производительности.

Проблему точной дозировки расплава при непрерывном литье мелкосортных заготовок можно решить, совместив литье по методу Проперци с методами высокоскоростного затвердевания расплава. Высокая производительность такого метода достигается за счет того, что затвердевающая заготовка перемещается вместе с поверхностью кристаллизатора, и скорость литья зависит только от интенсивности отвода тепла.

Для применения данного метода в процессах получения непрерывной мелкосортной заготовки потребовалось решить ряд теоретических и технологических задач, таких как стабильность процесса во времени,

управление процессами точной дозировки и транспортировки расплава в зону разлива, управление процессами формообразования и затвердевания заготовки, с целью получения прямолинейных заготовок равномерного сечения, без дефектов, с заданным уровнем механических свойств на выходе из кристаллизатора. В связи с малым сечением литых заготовок потребовалось изучение и комплексная оценка процессов капиллярного движения струи расплава в канале разливочного узла, что необходимо для организации точной дозировки расплава и обеспечения необходимой производительности процесса.

Для обеспечения непрерывности схода заготовки с кристаллизатора и создания условий, позволяющих управлять механическими свойствами заготовки на выходе из кристаллизатора, был произведен расчет температурных режимов кристаллизатора в зависимости от скорости литья, состава сплава и сечения заготовки.

Решение перечисленных задач позволило создать управляемый процесс непрерывного литья мелкосортных заготовок с заданной формой и свойствами. За счет достижения высоких скоростей охлаждения данный метод позволяет получать мелкокристаллическую микроструктуру заготовок, обеспечивая тем самым высокие свойства получаемого материала.

### *Цель работы.*

Целью данной работы является разработка процесса непрерывного литья мелкосортных заготовок из медно-фосфорных сплавов приведенным диаметром 3 – 6 мм методом непрерывного литья в желоб вращающегося вертикального кристаллизатора барабанного типа.

На основании поставленной цели в рамках данной работы необходимо решить следующие задачи:

- Изучение технологических и физических свойств исследуемых сплавов;
- исследование процессов дозировки и транспортировки расплава в зону кристаллизации, а также изучение процессов капиллярного движения расплава в канале разливочного узла;
- изучение процессов формирования, затвердевания и охлаждения заготовки в желобе кристаллизатора;
- разработка оборудования и технологии для промышленного выпуска мелкосортных заготовок из труднодеформируемых медно-фосфорных припоев, а также определение оптимальных технологических параметров и режимов литья для получения заготовок с заданными свойствами.

### *Научная новизна*

1. Впервые литьем по методу Проперци, совмещенным с методами высокоскоростного затвердевания расплава, получена проволока приведенным диаметром 3 – 6 мм из труднодеформируемых медно-фосфорных сплавов с узким и широким интервалами кристаллизации.

2. При непрерывном литье заготовок из медно-фосфорных сплавов впервые показана возможность управления процессом дозирования расплава со скоростью литья 10 – 25 м/мин и расходом расплава 130 -360 кг/час, за счет создания гидравлического сопротивления потока расплава в капиллярном канале разливочного узла.

3. Предложены механизмы управления процессами формирования и затвердевания непрерывно-литых заготовок из медно-фосфорных сплавов, основанные на организации свободного непрерывного течения расплава на поверхности вращающегося кристаллизатора.

### *Практическая ценность*

1. Разработан технологический процесс непрерывного литья заготовок с приведенным диаметром 3 – 6 мм из труднодеформируемых медно-фосфорных сплавов, основанный на управлении вязким слоем расплава в канале разливочного узла и двух-стадийном процессе разливки. На первой стадии происходит формирование и первичная кристаллизация скоростного потока расплава на свободной поверхности. На второй – имеет место процесс вторичного охлаждения расплава в замкнутом объеме, образованного поверхностью обкатной ленты. Разработанный метод обладает высокой мобильностью, что позволяет осуществлять быстрый технологический переход в зависимости от состава сплава и сечения получаемой заготовки.

2. На основании расчетных и экспериментальных данных, полученных при исследовании формообразования заготовок, предложены различные схемы подачи расплава в канал вращающегося кристаллизатора для широкоинтервальных и узкоинтервальных сплавов, позволяющие получать заготовки заданной формы.

3. Разработанная технология непрерывного литья медно-фосфорных заготовок, использующихся в виде мерных прутков для высокотемпературной пайки меди и сплавов на ее основе, позволила обеспечить замену серебросодержащих припоев в ряде отраслей народного хозяйства. Промышленное производство припоя освоено на ЗАО «АЛАРМ». Полученные непрерывным литьем припой внедрены на предприятиях: ОАО «Шадринский автоагрегатный завод», ИН «Минский завод теплообменного оборудования» (Белоруссия), ОАО «Камаз».

4. Для реализации разработанной технологии, по рекомендациям автора, создано промышленное оборудование, на котором производится около 40 тонн медно-фосфорных припоев в год.

### *Апробация работы*

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, МАТИ, 2004 г.;
- III Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС 2005.;
- 4-я Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, МАТИ, 2005 г.

### *Структура и объем диссертации*

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 53 формулы и 55 рисунков. Библиографический список включает 73 наименования.

### *Основное содержание работы*

В первой главе, на основе анализа литературных данных показана целесообразность применения припоев на медной основе, которые могут с успехом использоваться вместо дорогостоящих серебряных припоев. Дан анализ медно-фосфорных припоев, выпускаемых в России и за рубежом. Припои этой группы отличаются хорошими технологическими свойствами, но наличие в составе эвтектики хрупкого фосфида меди, содержание которого может достигать до 40% объемных, определяет низкие механические свойства таких сплавов.

За рубежом наиболее распространенным медно-фосфорным припоем является сплав Cu-7%P, использующийся как для ручной, так и для автоматической пайки соединений из меди и ее сплавов. Припой изготавливается в виде прутков и проволоки методами горячей деформации, так как при комнатной температуре сплав, содержащий более 5% фосфора, обладает значительной хрупкостью в литом и прессованном состоянии. Основными производителями припоя являются Япония, Германия, США.

Легирование системы медь-фосфор оловом (припой П14) снижает температуру плавления сплава и делает его более технологичным при пайке. Однако традиционными методами горячей обработки давлением эти припои получить в виде заготовок диаметром 3 - 6 мм чрезвычайно трудно, поэтому для повышения пластичности в их состав вводят серебро. Существующие методы изотермического прессования обладают выходом годного, не превышающим 40-50%, значительными энергозатратами и большим количеством переделов, что обеспечивает рентабельность такого производства

только при выпуске 30 – 40 тыс. т. в год годной продукции. Для получения такой продукции в меньшем объеме необходимо использование новых высокопроизводительных способов непрерывного литья мелкосортных заготовок.

В связи с этим был произведен анализ получения длинномерных заготовок из цветных сплавов методами непрерывного литья, в частности: бесслитковая прокатка по схеме Бессемера, литье по методу Головкина, разливка по методу Степанова, литье в роторный кристаллизатор по методу Проперци, литье на установке с ленточным кристаллизатором по способу Хазелетта, методы быстрой заковки расплава (спиннингование, экстракция из расплава и др.), а также метод непрерывного вертикального литья, разработанный в Институте технологии металлов НАН Беларуси для заготовок диаметром 3 – 6 мм. Рассмотрены принципиальные схемы этих процессов. Однако вышеперечисленные методы позволяют получать заготовки достаточно крупных сечений (диаметром от 20 мм и более), что определяет дополнительную обработку давлением для получения мелкосортной прутково-проволочной продукции диаметром 3 – 6 мм. Существующие методы непрерывного вертикального литья мелкосортных заготовок из меди и медных сплавов сечением от 3 мм обладают производительностью, не превышающей 1 кг в час, что является не рентабельным для существующих условий производства.

Наиболее перспективным и производительным методом получения непрерывнолитых заготовок является метод, где заготовка перемещается вместе с кристаллизатором. Учитывая вышеизложенное, а также то, что сечение получаемых заготовок может быть неправильной формы, за основу для разработки технологии непрерывного литья мелкосортных заготовок приведенным диаметром 3 - 6 мм из труднодеформируемых медно-фосфорных сплавов был выбран способ литья по методу Проперци (рис. 1).

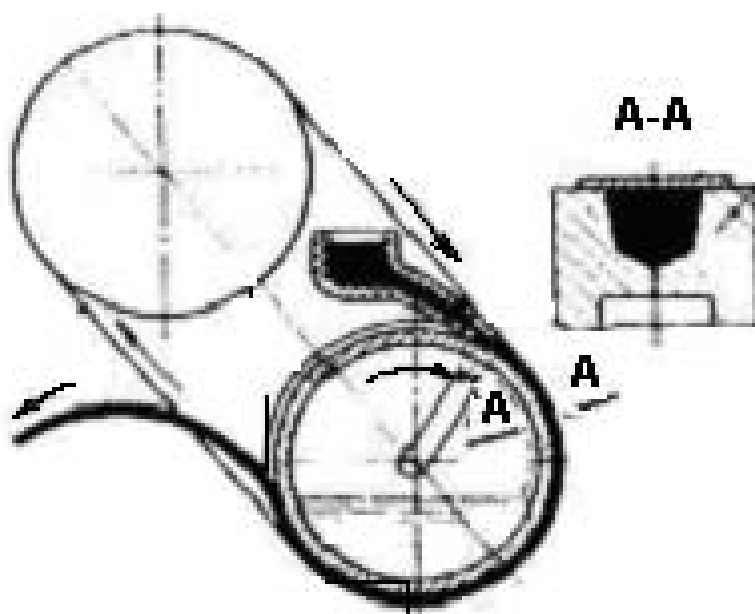
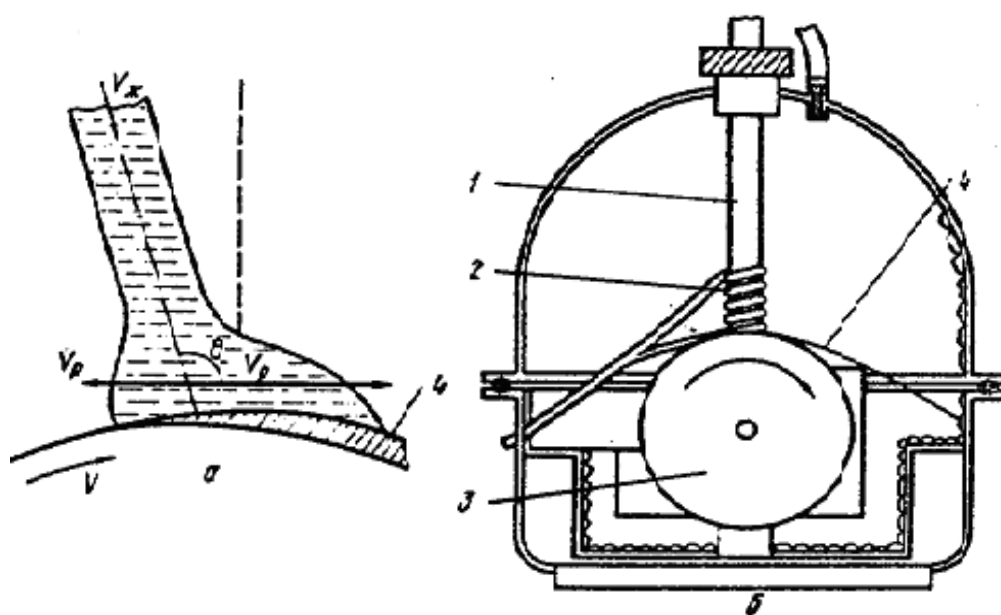


Рисунок 1 – Схема литья по методу Проперци

Учитывая то, что данный метод литья позволяет изготавливать заготовки сечением не менее  $200 \text{ мм}^2$ , а подача расплава осуществляется в ограниченный объем между обкатной лентой и рабочей поверхностью канала в кристаллизаторе, для литья заготовок с гораздо меньшим сечением необходимо организовать систему с точной дозировкой расплава и совместить его с методом спиннингования, где осуществляется верхняя подача расплава на вращающуюся поверхность кристаллизатора (рис. 2). С этой целью необходимо изменить систему подачи расплава в желоб кристаллизатора, и исследовать процесс формообразования заготовок на свободной поверхности кристаллизатора.



а) Схема формирования ленты; б) Установка для спиннингования расплава.

1-тигель с расплавом; 2-нагреватель; 3-диск-кристаллизатор;  
4-получаемая лента.

Рисунок 2 – Получение ленты методом спиннингования расплава

При верхней подаче расплава точный расход металла, в условиях высокой скорости литья и малого сечения заготовок, можно организовать за счет капиллярного сопротивления потока расплава в узком канале разливочного узла. Управляя процессами свободного течения расплава в желобе вращающегося кристаллизатора, можно получать заготовки равномерного сечения без дефектов.

Во второй главе работы описана схема экспериментально-промышленной установки ЭМИР-2 (экстракция металлов из расплава), которая разработана в рамках работы для производства мелкосортowych заготовок из медно-фосфорных сплавов, рисунок 3.

Экспериментально-промышленная установка ЭМИР-2 представляет собой кристаллизатор в виде барабана из стали X18H9T с водяным охлаждением. Диаметр барабана 1 метр. На поверхности кристаллизатора проточены трапецевидные каналы различных сечений с приведенными диаметрами 3, 4 и 6 мм. Половину длины поверхности кристаллизатора



обкатывается стальная лента, которая фиксируется при помощи четырех роликов с ребордами. Лента вращается от трения с поверхностью кристаллизатора, вследствие натяжения, величину которого задает ролик-натяжитель.

Из плавильной печи перегретый расплав переливают в переливной узел со стопорным механизмом, откуда он подается в разливочный узел. Через литник с диаметром канала 2 – 4 мм, который установлен в донной части разливочного узла расплав попадает в желоб необходимого сечения вращающегося кристаллизатора. Уровень жидкого металла в разливном узле поддерживается автоматически на уровне, обеспечивающем равенство потоков расплава, подающегося в разливочный узел, и в желоб вращающегося кристаллизатора. Затвердевание заготовки, формирующейся в желобе кристаллизатора, начинается на свободном участке от литника до обкатной ленты. Обкатная лента обеспечивает плотный контакт между заготовкой и кристаллизатором, и определяет продолжительность контакта заготовки с кристаллизатором. Непрерывно сходящая заготовка рубится на прутки заданной длины.

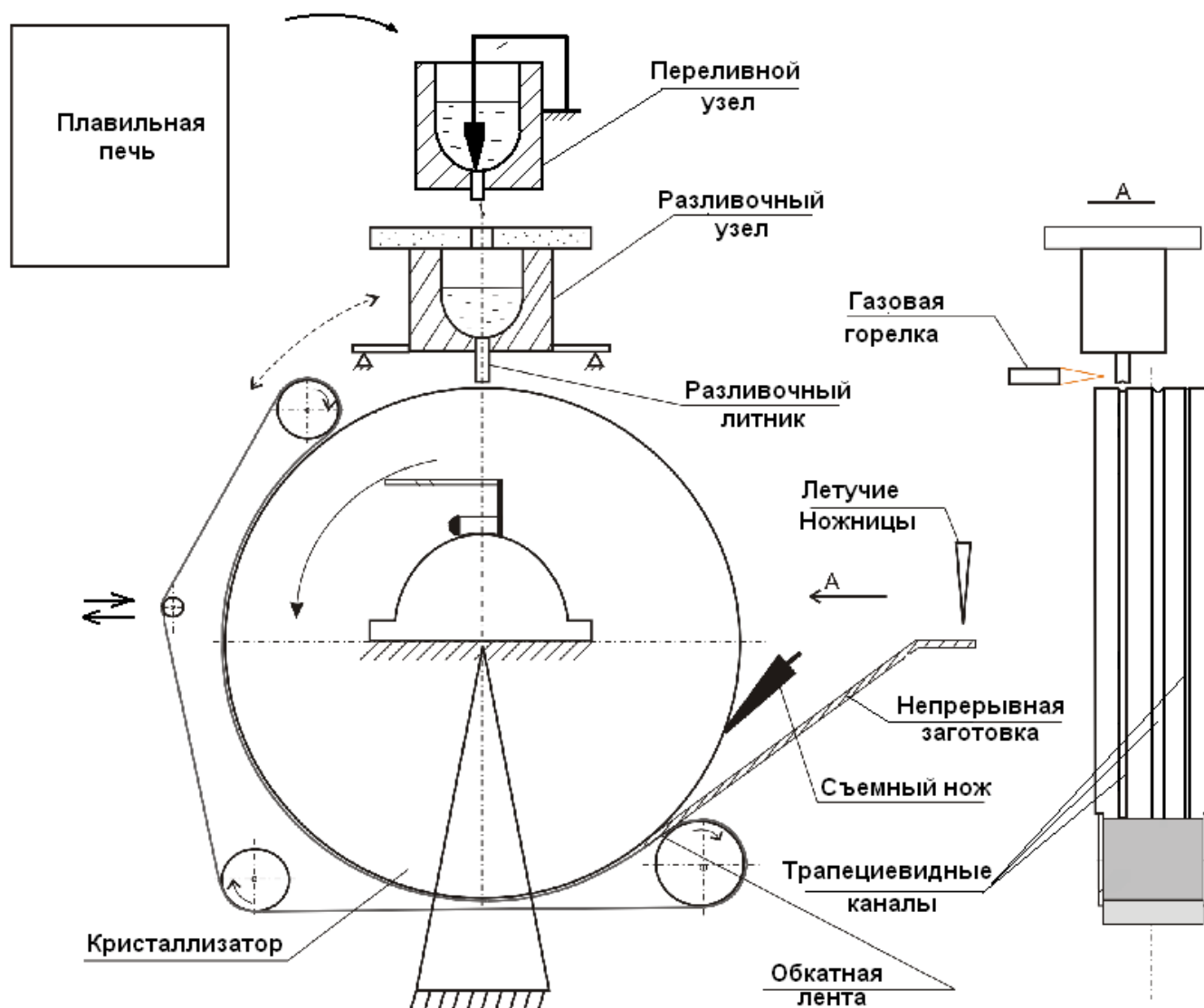


Рисунок 3 – Схема установки ЭМИР-2

Объектами исследования были три медно-фосфорных труднодеформируемых сплава ПМФ7, ПМФ9 и П14, составы которых согласно действующим ТУ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы исследуемых сплавов, масс%

Сплав	Cu, %	P, %	Sn, %
ПМФ9	основа	8 - 9,5	-
ПМФ7	основа	6,8 – 7,3	-
П14	основа	5,6 – 6,1	3,6 – 4,1

На участке диаграммы медь-фосфор, изменение содержания фосфора с 7 до 8 масс.% обуславливает падение температуры ликвидус более чем на 100 °С, что приводит к резкому снижению интервала кристаллизации исследуемых сплавов, который обуславливает характер затвердевания припоев. Поэтому при незначительном изменении содержание фосфора в исследуемых сплавах может произойти заметное изменение их литейных и физических свойств, которые значительно влияют на характер дозировки и формообразования непрерывнолитых заготовок.

Для исследования характера кристаллизации сплавов использовали дифференциально-термический анализ, регистрация сигналов прямой и дифференциальной термопар осуществлялась на двухкоординатном потенциометре ПДП-002.

Отбор и подготовку проб к химическому анализу проводили в соответствии с ГОСТ 2423-80.

Химический состав исследуемых сплавов определялся по ГОСТ 6674.1-74 гравиметрическим методом.

Вследствие отсутствия справочных данных о физических и технологических свойствах исследуемых расплавов, необходимых для комплексного изучения процесса непрерывного литья, проводилась серия исследований для определения этих свойств.

Жидкотекучесть исследуемых сплавов определялась по спиральной технологической пробе. Модель этой пробы соответствует ГОСТ 16438-70. Заливка производилась в песчано-глинистую форму. Для обеспечения одинаковых условий заливки, исследуемые расплавы заливались в форму с одинаковым перегревом над температурой ликвидус, который составил 100 °С.

Для определения величины динамической вязкости исследуемых сплавов был выбран стационарный метод падающего шара. В связи с тем, что возникает сложность, вследствие непрозрачности жидких металлов, определения момента опускания шара на дно, было предложено использовать шар с меньшей плотностью, чем у исследуемых расплавов, и фиксировать момент всплытия шара. Если шар не взаимодействует с жидкостью, то при стационарном движении его в неограниченно вязкой среде вязкость жидкости можно рассчитать по формуле (1), выведенной из зависимости Стокса:

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9\nu} \cdot \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж})}{(1 + 2,3r/R) \cdot (1 + 3,1r/L)}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус шарика;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\nu$  – скорость всплытия шарика;  $\rho_{ш}$  – плотность материала шарика;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкого расплава;  $R$  – радиус сосуда, в котором производятся измерения;  $L$  – длина сосуда, в котором производятся измерения.

В качестве материала шара была выбрана сталь ШХ15, плотность которой меньше плотности исследуемых расплавов на 5 %, при температуре, соответствующей температуре перегрева исследуемых расплавов, что повышает точность исследования.

Шар опускали на дно при помощи специального захвата из коррозионностойкой стали. После отпускания шара фиксировалось время его всплытия.

Изменение плотности шара в зависимости от температуры жидкого металла определялось экспериментально. Шар устанавливался на подставку из теплоизоляционного материала и разогревался до необходимой температуры при помощи газовой горелки. Температура шара фиксировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, установленной в его центре, а диаметр шара при помощи штангенциркуля.

Для учета изменения плотности жидких расплавов от температуры перегрева была использована зависимость:

$$D = D_0 + (t - t_0) \cdot (dD/dt), \quad (2)$$

где  $D_0$  – плотность жидкого металла при температуре плавления  $t_0$ .

Измерения динамической вязкости проводились для сплавов П14 и ПМФ9 при перегреве над линией ликвидус 30, 60 и 90 °С.

Вследствие того, что разливочный литник представляет собой графитовую втулку с диаметром отверстия 2 – 4 мм (в зависимости от сечения получаемых заготовок), колебания уровня расплава в разливочном узле можно скомпенсировать за счет подбора оптимальной длины канала литника. величиной, определяющей потери напора расплава в канале разливочного узла, может служить коэффициент расхода.

Для определения коэффициента расхода проводился эксперимент, в котором использовались десятимарковые тигли, установленные в муфельной печи сопротивления. При проведении эксперимента использовались литники диаметром 2,3 мм с разной длиной канала, изменяющейся от 10 до 60 мм, а также с одинаковой длиной канала, но разными отверстиями на входе. В первом случае длина литника, а также канала внутри него составляла 60 мм, а диаметр отверстия 2,3 мм. Во втором случае длина канала литника составляла также 60 мм, при диаметре 2,3 мм, но сам литник был длиннее 70 мм, а в его верхней части было выполнено конусообразное уширение диаметром 10 мм, необходимое для обеспечения плавного входа расплава в отверстие литника. Все тигли и разливочные литники прогревались до одинаковой температуры.

Канал разливочной втулки перекрывался запорным устройством, и в тигель заливался расплава. Во всех случаях уровень расплава в тигле был одинаковым. После удаления запорного устройства, фиксировалось время полного вытекания расплава из тигля.

По формуле, выведенной из уравнения Бернулли, время полного вытекания расплава из тигля через отверстие с площадью сечения  $f_0$  определяется как:

$$\tau = (2F\sqrt{H_0}) / (\mu f_0 \sqrt{2g}). \quad (3)$$

Отсюда коэффициент расхода жидкого расплава определяется как:

$$\mu = \frac{2F\sqrt{H_0}}{\tau \cdot f_0 \sqrt{2g}},$$

где  $F$  – площадь поверхности расплава в тигле;  $H_0$  – уровень расплава в тигле;  $\tau$  – время полного вытекания расплава;  $f_0$  – площадь сечения канала, через который происходит вытекание.

На основании исследований, проведенных во второй главе, были получены данные о физических и технологических свойствах исследуемых сплавов, представленные в таблице 2 и 3.

Таблица 2 – Влияние температурного интервала исследуемых сплавов на их жидкотекучесть

Сплав	Температура ликвидус, °С	Эвтектическая температура, °С	Интервал кристаллизации, °С	Жидкотекучесть, мм
ПМФ7	865	710	155	230
П14	810	680	130	350
ПМФ9	740	710	30	450

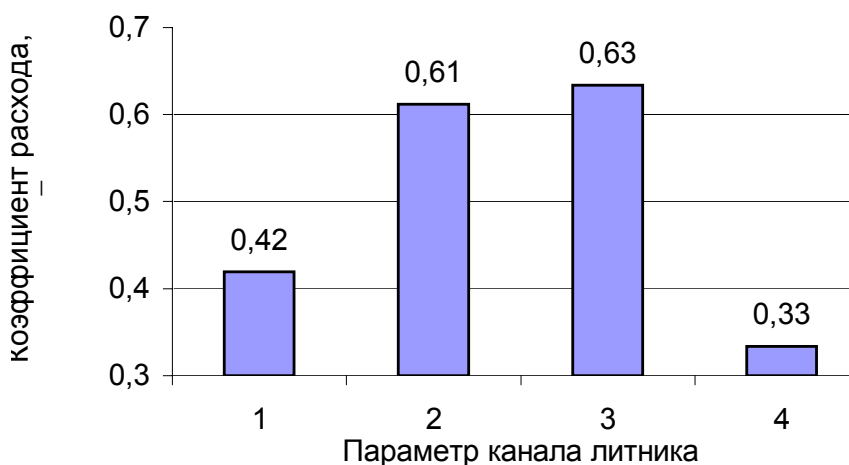
Таблица 3 – Изменение динамической вязкости исследуемых расплавов в зависимости от температуры перегрева

Свойства сплава	Температура перегрева сплава П14, °С			Температура перегрева сплава ПМФ9, °С		
	840	870	900	770	810	840
Вязкость, мПа·с	1,52	1,24	0,97	1,43	1,33	1,14

Полученные данные о физических свойствах сплава необходимы для расчетов, гидродинамических процессов, протекающих в канале литника разливочного узла.

При определении коэффициента расхода, при течении расплава (П14) в канале литника диаметром 2,3 мм было установлено, что на величину

напора в разливочном узле оказывает влияние плавный переход в основании литника. При длине канала литника 60 мм наличие плавного перехода обуславливает увеличение коэффициента расхода на 25% по сравнению с литником, где такой переход отсутствует.



1 – длина канала 60 мм; 2 – длина канала 25 мм; 3 – длина канала 10 мм;  
4 – длина канала 60 мм, угол поворота расплава при входе в канал 90°.

Рисунок 4 – Влияние длины канала и плавного входа в него расплава на коэффициент расхода

Резкое снижение коэффициента расхода при увеличении длины канала литника до 60 мм можно объяснить заметным влиянием пограничного слоя в пристеночной области канала, вследствие малого его диаметра. Для оценки величины пограничного слоя необходимо определить характер движения потока расплава внутри канала литника, для чего необходимо рассчитать число Рейнольдса. Число Рейнольдса определяется как:

$$Re = 2vr\rho/\eta, \quad (4)$$

где  $v$  – средняя скорость течения жидкости;  $r$  – радиус канала;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  $\eta$  – вязкость жидкости.

В таблице 4 представлены числа Ренольдса для различных диаметров канала литника и гидростатических давлений расплава П14 в разливочном узле.

Таблица 4 – Числа Рейнольдса для потока расплава П14

Диаметр канала, мм	Число Рейнольдса для различных уровней расплава в десятимарковом тигле		
	1\3 тигля	1\2 тигля	2\3 тигля
2	4659	5724	6620
4	9318	11448	13240

Как видно, даже при минимальном уровне расплава в разливочном узле, число Рейнольдса гораздо больше 2000, что дает основание считать характер движения расплава в разливочном литнике турбулентным.

У вязкой реальной жидкости скорость потока на твердых стенках должна обращаться в нуль. При больших числах Рейнольдса падение скорости до нуля будет происходить почти полностью в тонком пристеночном слое жидкости, который носит название пограничного и характеризуется наличием в нем значительных градиентов скорости.

Толщина турбулентного пограничного слоя растет вниз по течению вдоль обтекаемой поверхности, начиная от входа в канал. Уже на некотором конечном расстоянии от входа пограничный слой как бы заполняет собой все сечение канала. Поэтому если рассматривать канал как достаточно длинный и не интересоваться его начальным участком, то течение во всем его объеме будет того же типа, как и в турбулентном пограничном слое. Падение средней скорости в пограничном слое обуславливается в конечном итоге вязкостью жидкости. Поэтому, для создания условий равномерного течения расплава через канал с малой площадью сечения необходимо произвести расчет минимальной длины канала.

С позиций теоретической гидродинамики величина турбулентного пограничного слоя в канале с гладкими стенками определяется зависимостью (5), выведенной из учебного пособия по теоретической физике:

$$\delta = 0,3 \cdot x \left( \frac{\sqrt{0,32\nu}}{U \cdot x} \right)^{\frac{e}{2+e}}, \quad (5)$$

где  $\delta$  - толщина турбулентного пограничного слоя;  $x$  – длина канала;  $\nu$  - динамическая вязкость жидкости;  $U$  – средняя скорость потока в канале;  $e$  – постоянная, равная 2,72.

В данной ситуации гидравлически гладкими считаются стенки канала литника, полученного разворачиванием с чистотой поверхности  $R_a$  не превышающей 1,25 мкм.

Рост пограничного слоя в канале литника разливочного узла диаметром 2,3 мм, рассчитанный для реальных физических параметров расплава П14, при разливке заготовок с приведенным диаметром 3 мм представлен на рисунке 5.

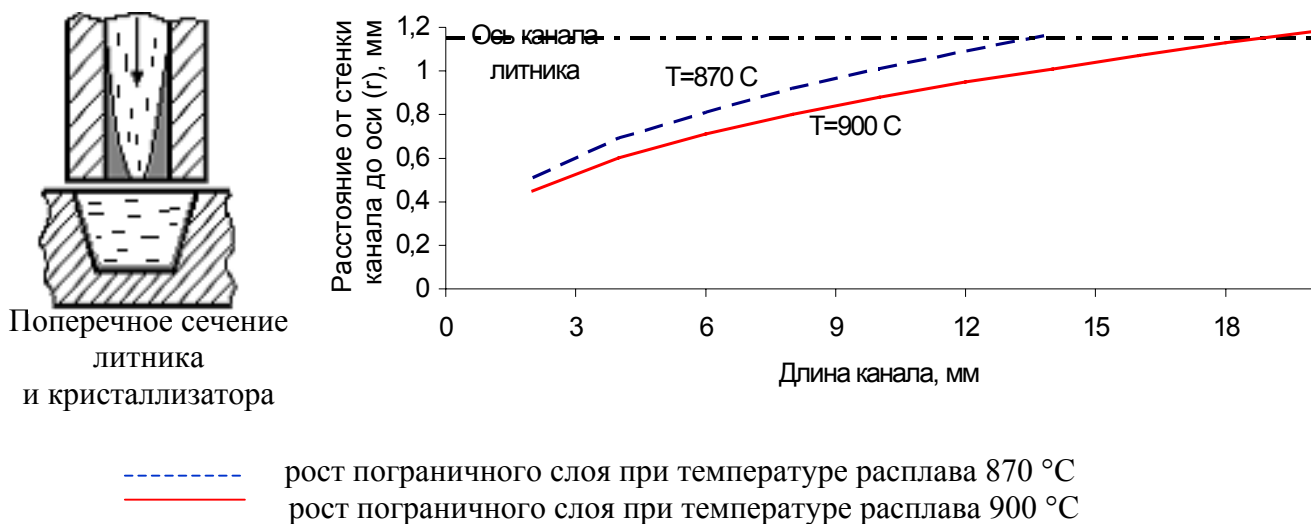


Рисунок 5 – Рост турбулентного пограничного слоя расплава в канале литника

Как видно из расчетных данных пограничный слой заполняет собой все сечение канала на достаточно коротких расстояниях, и в значительной степени зависит от вязкости расплава, которая в свою очередь является функцией температуры. Именно наличие турбулентного пограничного слоя в пристеночном слое канала объясняет резкое падение коэффициента расхода при увеличении длины канала. Другими словами происходит резкое снижение скорости потока в канале разливочного узла, вплоть до полной остановки процесса литья.

Для создания условий равномерного вытекания расплава через литник разливочного узла с узким сечением канала, необходимо не только поддерживать температуру литника на заданном уровне, но и выбирать оптимальную длину канала, не превышающую критическое значение. Одним из вариантов такого решения является увеличение диаметра канала литника на фиксированном расстоянии, где влияние пограничного слоя будет менее заметным, а в нижней части канала оставить участок с необходимым малым сечением длиной, меньшей рассчитанной критической. Выбор такой литниковой системы позволяет вести разливку расплава с одинаковым расходом материала, что позволит получать заготовки равномерного сечения.

Третья глава работы посвящена управлению процессами затвердевания и охлаждения заготовки в подвижном желобе кристаллизатора. На этом этапе работы объясняются различные варианты затвердевания и движения расплава в желобе вращающегося кристаллизатора, в зависимости от литейных свойств сплава. Рассматриваются различные схемы разливки широкоинтервальных и узкоинтервальных сплавов, применительно к медно-фосфорным припоям.

Отличительной чертой процесса непрерывного литья является то, что разливочный литник является не просто частью дозирующей системы, а играет основную роль в формировании заготовки. Литник притирается к поверхности кристаллизатора и выставляется с зазором к поверхности не более  $0,4\text{ мм}$ . Литник неподвижен относительно кристаллизатора, и между формообразующей донной частью литника и движущимся желобом создается ограниченный объем, в котором первичная кристаллизация заготовки

происходит с давлением в результате гидростатического напора жидкого расплава. Возникновение давления в зоне разливки способствует формированию непрерывного обратного стока расплава, противоположного направлению вращения кристаллизатора, рисунок 6. В обратном стоке происходит непрерывная циркуляция потоков расплава, что обуславливает его существование в жидком состоянии на поверхности металлического водоохлаждаемого кристаллизатора. Обратный сток играет роль своеобразного демпфера, который регулирует неточности дозировки путем изменения своей длины.

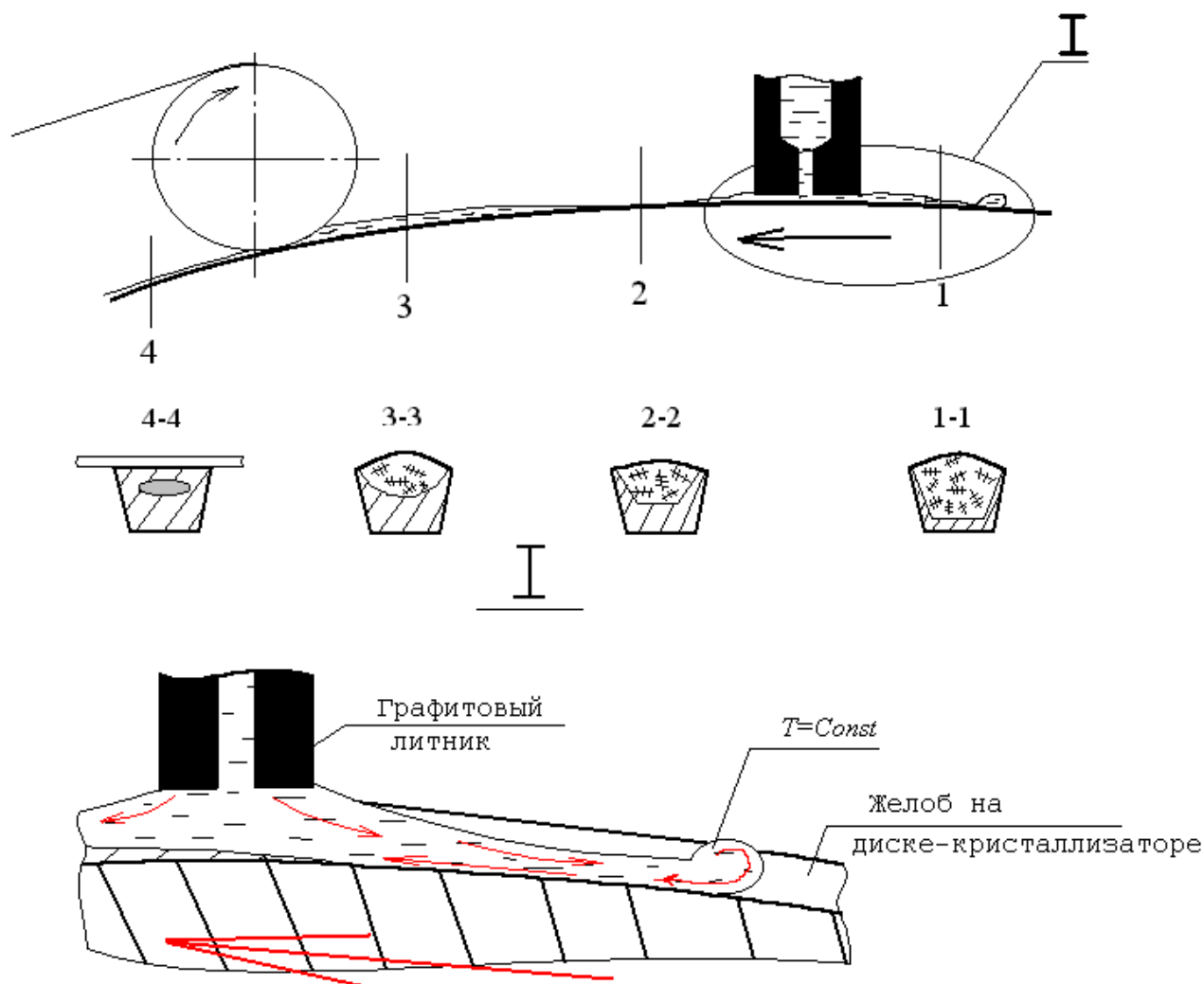


Рисунок 6 – Формирование непрерывного обратного стока в условиях разливки сплавов с широкой двухфазной областью

Длина обратного стока зависит от интенсивности теплоотвода, давления в зоне разливки, и сечения заготовки. На рисунке 7 представлена экспериментальная зависимость длины обратного стока от скорости вращения кристаллизатора для различных сечений заготовок из сплава П14.

Формирование обратного стока расплава создает условие для равномерного формообразования и затвердевания широкоинтервальных сплавов (П14, ПМФ7). Измерение температуры расплава П14 в крайней точке обратного стока, который имеет сферическую форму, производилось при



помощи хромель-алюмелевой термопары. Независимо от сечения заготовки и длины обратного стока температура в его крайней точке равна  $800 \pm 10$  °С, что соответствует температуре ликвидус сплава. На основании полученных данных можно предположить, что длина обратного стока непосредственно связана с составом сплава, и в обратном стоке происходит снятие температуры перегрева сплава.

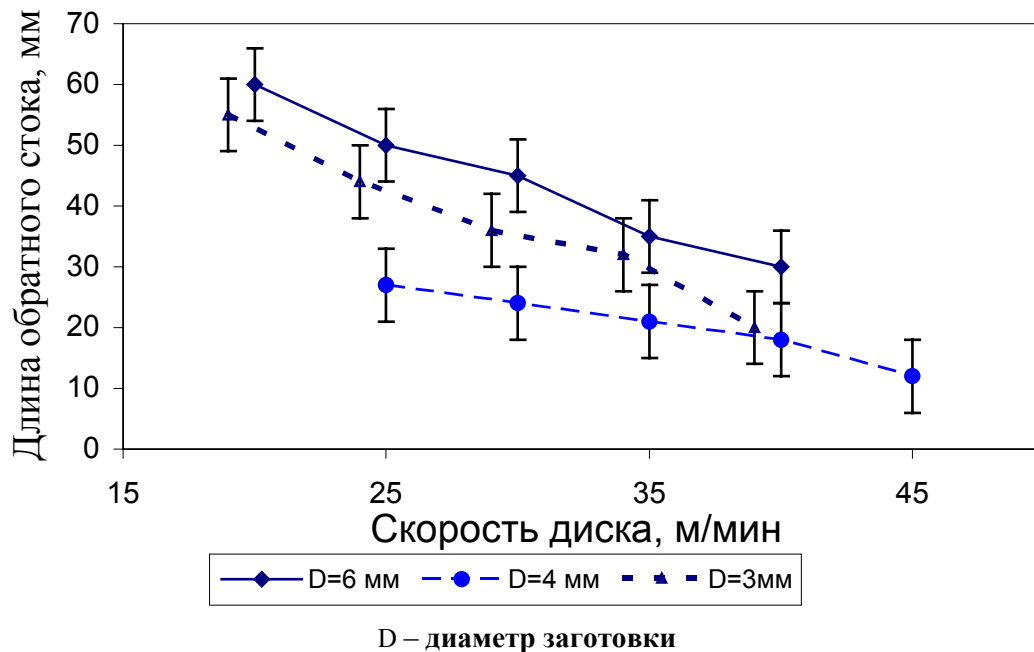


Рисунок 7 – Зависимость длины обратного стока от скорости вращения кристаллизатора для различных сечений заготовок

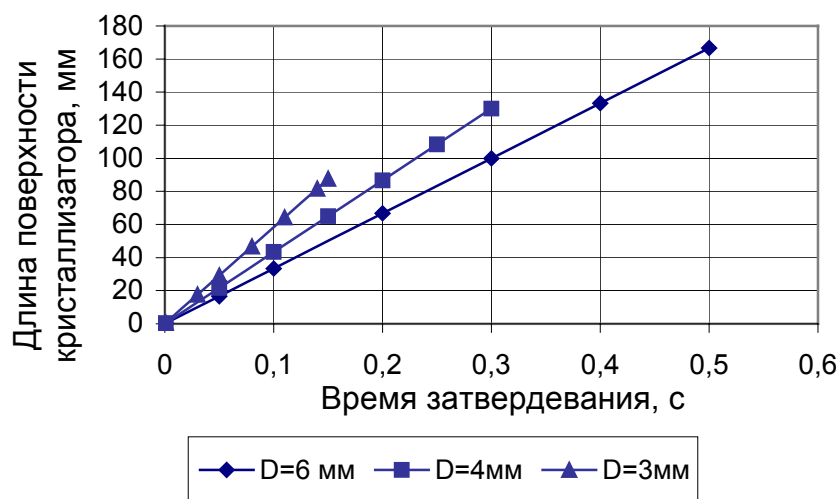
На участке от литника до зоны 2 (рис. 6) еще достаточно жидкий расплав движется в направлении вращения кристаллизатора внутри желоба. Затем от зоны 2 до обкатной ленты происходит как бы подъем заготовки над поверхностью кристаллизатора. Такое увеличение сечения заготовки можно объяснить резким ростом вязкости сплава, в котором формирование дендритного каркаса способствует падению текучести сплава внутри желоба. Другими словами на этом участке, вследствие образования прочного дендритного каркаса, заготовка ведет себя как твердое тело.

Для исследования характера и особенностей затвердевания заготовок в подвижном желобе кристаллизатора кроме теоретических расчетов затвердевания заготовок, был произведен анализ микроструктур. Изучение микроструктур непрерывно-литых заготовок показывает некоторое измельчение размера дендритной ячейки в центре заготовки из сплава П14, характерное для сечения диаметром 4 и 6 мм, несмотря на то, что интенсивность отвода тепла в центральной части заготовки должна уменьшаться. Такое измельчение можно объяснить поджимом затвердевающей заготовки обкатной лентой, вследствие чего возрастает интенсивность теплоотвода. Теоретические расчеты времени затвердевания, а также экспериментальные данные показывают, что заготовка диаметром 3 мм затвердевает практически полностью, еще до поджима обкатной лентой,

вследствие чего средний размер дендритной ячейки такой заготовки увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с заготовками диаметром 4 и 6 мм, затвердевание которых заканчивается после поджима обкатной лентой. Описанный механизм формирования и затвердевания заготовок из широкоинтервальных сплавов способствует их равномерному формообразованию, вследствие объемного затвердевания сплавов, несмотря на то, что затвердевание происходит на наклонной поверхности кристаллизатора.

Описанная схема разлива не подходит для сплавов, обладающих узким интервалом кристаллизации (ПМФ9). Вследствие послойного характера затвердевания таких сплавов происходит стекание расплава на свободной верхней поверхности кристаллизующейся заготовки на участке литник-лента, что приводит к формированию заготовок с переменным сечением. Особенно заметно это сказывается на заготовках большего сечения, где последняя жидкость при затвердевании находится в верхней части, вследствие перемещения фронта затвердевания от поверхности контактирующей с желобом кристаллизатора к верхнему основанию заготовки. В результате этого на поверхности заготовок появляются наплывы в виде капель расплава, подкатанных обкатной лентой. Наплывы располагаются на поверхности заготовок на одинаковом расстоянии друг от друга. Участок заготовки между наплывами имеет криволинейную поверхность, незаполненную расплавом. В силу технологических особенностей процесса минимальное расстояние между литником и точкой контакта обкатной ленты с кристаллизатором составляет не менее 200 – 250 мм.

Тепловой расчет затвердевания непрерывнолитых заготовок из сплава ПМФ9 с приведенным диаметром 3 – 6 мм показывает, что основная масса металла затвердевает, когда поверхность кристаллизатора перемещается на расстояние 100 – 170 мм, в зависимости от диаметра заготовки, рисунок 8.



D – диаметр заготовки

Рисунок 8 - Зависимость расстояния, на которое перемещается поверхность кристаллизатора, от времени полного затвердевания заготовки

На основании полученных данных, в условиях разливки узкоинтервальных сплавов, было предложено сместить подачу расплава в сторону, обратную вращению кристаллизатора, с целью увеличения длины свободной поверхности кристаллизатора, на которой происходит затвердевание заготовок. Непрерывное литье заготовок из сплава ПМФ9 с приведенным диаметром 6 мм проводилась при размещении литника на расстоянии 40, 80, 120 и 160 мм от верхней точки кристаллизатора, рисунок 9.

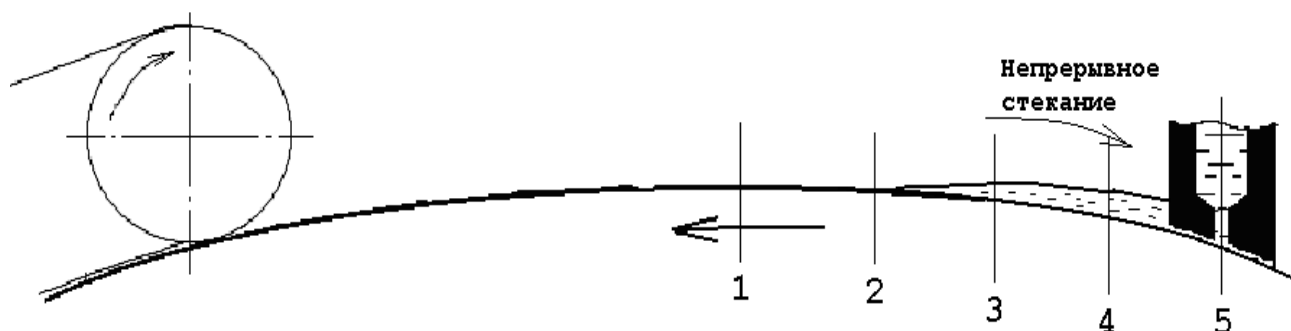


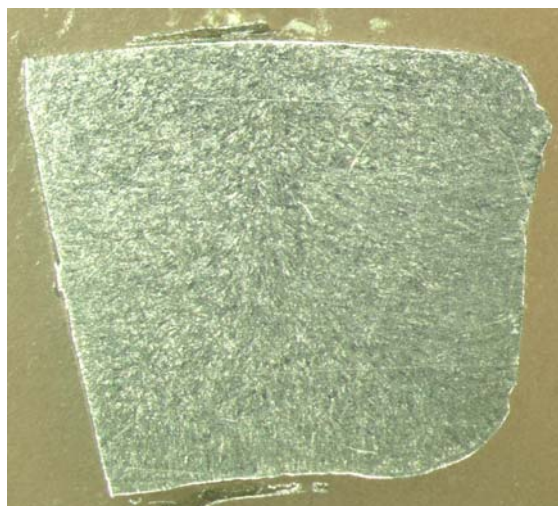
Рисунок 9 – Схема проведения эксперимента по смещению разливочного литника

Формирование обратного стока в данном случае невозможно, так как разливка ведется на наклонную поверхность. С обратной стороны литника желоб плотно перекрывался при помощи графитового шибера. Расстояние между подкатанными наплывами на заготовке, являлось критерием, по которому определялось качество формообразования. Проведенный эксперимент по смещению зоны разливки для сплавов с приведенным диаметром 6 мм показал, что заготовка принимает равномерное сечение, когда расстояние перемещения литника в сторону обратную вращения кристаллизатора достигает 150 мм. В результате равномерному формированию заготовок способствует непрерывное обратное стекание незатвердевших слоев расплава на свободной поверхности кристаллизующейся заготовки перед литником (рис. 9), которое выравнивает поток расплава и представляет собой своеобразную «динамическую прибыль» с непрерывным обменом расплава. Стабильное существование такой области во времени говорит о непрерывной циркуляции в ней потоков расплава.

Изучая макроструктуру поперечного сечения заготовки диаметром 6 мм из сплава ПМФ9, полученной по схеме разливки для широкоинтервальных сплавов, рис. 10б, можно увидеть направленный рост кристаллов от поверхности, контактирующей с кристаллизатором в центральную часть заготовки. Кроме того, отчетливо видна область незаполненная расплавом, где при затвердевании оставалась последняя жидкость, стекающая по поверхности заготовки. Неравномерность отвода тепла привела к максимальной скорости роста кристаллов в центральной части заготовки, в вертикальном направлении.

На рисунке 10а представлена макроструктура поперечного сечения заготовки, полученной в результате эксперимента по смещению зоны разливки.

Равномерность макроструктуры и отсутствие крупных кристаллов, направленных от поверхности кристаллизатора, можно объяснить влиянием потоков расплава, движущегося перпендикулярно росту кристаллов в «динамической прибыли», формирующееся перед литником. Как видно сечение заготовки приобретает более компактную форму, а измельчение макроструктуры способствует повышению механических свойств прутков припоя.



а



б

Рисунок 10 – Макроструктура непрерывнолитых заготовок из сплава ПМФ9

В четвертой главе работы рассмотрены технологические аспекты процесса непрерывного литья мелкосортных заготовок. Произведено обоснование выбора материала кристаллизатора его размеров и толщины, для промышленного производства медно-фосфорных заготовок малого сортамента. Выбраны конструкции разливочных литников, а также параметры каналов литников для промышленного применения. Определены оптимальные скорости вращения кристаллизатора для заготовок различного диаметра с производительностью литья 130 – 360 кг/час. Определены тепловые режимы работы кристаллизатора (температура поверхности кристаллизатора, расход охлаждающей жидкости), основанные на интенсивности отвода тепла от затвердевающей заготовки. Вследствие неравномерного затвердевания заготовок (в основном 3-х сторонний отвод тепла), происходит их искривление, вызванное усадочными напряжениями. Для снижения этих напряжений определены оптимальные температуры заготовок на выходе из кристаллизатора с целью их последующего выпрямления, обработкой давлением и согласования с автоматическим устройством рубки на мерные части.

Предложена технологическая схема промышленного производства медно-фосфорных припоев в виде прямолинейных прутков необходимого размера либо бухт.

Определены условия возникновения облоя при литье заготовок. Несмотря

на то, что литник притирается к кристаллизатору, между его донной частью и поверхностью диска всегда будет образовываться зазор, вследствие термического расширения кристаллизатора и литника, а также в результате радиальных биений диска. Так как заполнение желоба расплавом происходит под давлением, то при определенной величине зазора между литником и диском произойдет затекание расплава в этот зазор, что приведет к формированию облоя с острой кромкой на заготовке. Наличие некоторого минимального зазора между литником и поверхностью диска необходимо. В противном случае литник будет контактировать с поверхностью кристаллизатора, в результате чего может произойти охлаждение его нижней части, которое приведет к затвердеванию расплава внутри канала литника.

Величину зазора, при которой произойдет формирование облоя с острой кромкой можно оценить по формуле Лапласа для плоской щели. В таблице 5 представлены рассчитанные минимальные величины зазоров между литником и поверхностью кристаллизатора, при которых формирование облоя с острой кромкой теоретически не произойдет.

Таблица 5 – Минимальные зазоры между литником и кристаллизатором, при которых возникновение облоя с острой кромкой теоретически невозможно

Высота расплава в разливочном узле, мм	Минимальный зазор для сплавов на основе системы Cu-P, мм		
	ПМФ9	ПМФ7	П14
1/3 тигля, 63	0,34	0,36	0,23
1/2 тигля, 90	0,24	0,26	0,16
2/3 тигля, 117	0,19	0,2	0,13

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты проделанной работы позволили впервые получить прутки из медно-фосфорных сплавов приведенным диаметром 3, 4 и 6 мм методом непрерывного литья с производительностью 130 – 360 кг/час и точностью размеров, позволяющей использовать их в качестве припоев.

2. Разработана промышленная технология и оборудование для выпуска прутков припоя приведенным диаметром 3, 4 и 6 мм для автоматической и ручной пайки изделий из меди и сплавов на ее основе.

3. Получение заготовок приведенным диаметром 3,4 и 6 мм методом непрерывного литья стало возможным в результате организации точной дозировки расплава, основанной на капиллярном сопротивлении расплава в канале разливочного узла, а также за счет управления затвердеванием расплава на свободной поверхности кристаллизатора, в отличие от традиционного способа Проперци, где кристаллизация сплава происходит в замкнутом объеме подвижного кристаллизатора.

4. Установлено, что характер движения расплава в канале разливочного узла является турбулентным ( $Re = 4500 - 13000$ ). Определены основные закономерности управления напором жидкого металла, зависящего от вязкости расплава, и геометрических размеров канала разливочного узла. Определена закономерность роста пограничного слоя в канале разливочного узла, приводящего к уменьшению объемного расхода металла и повышающего точность дозирования расплава. Величина пограничного слоя, зависит от вязкости расплава в степени  $3/5$ , и от длины канала в степени  $2/5$ .

5. В работе выявлены факторы, позволяющие организовывать свободное обратное стекание расплава для создания условий равномерного затвердевания мелкосортных заготовок из медно-фосфорных сплавов.

В условиях разливки широкоинтервальных сплавов, формирование обратного стока расплава в желобе кристаллизатора перед зоной разливки приводит к снятию температуры перегрева расплава и способствует объемному затвердеванию заготовки на наклонной поверхности в результате резкого роста вязкости металла, позволяющему получать заготовки с равномерным сечением.

В условиях разливки узкоинтервальных сплавов для получения заготовок постоянного сечения зону разливки необходимо сдвинуть в сторону обратную вращению кристаллизатора от его верхней точки на расстояние 80 – 150 мм, в зависимости от сечения заготовки. В таком случае, за зоной разливки организуется непрерывное обратное стекание, способствующее подпитке кристаллизующейся заготовки, приводящее к ее равномерному затвердеванию.

6. Установлена возможность использования метода падающего шара, преобразованного для случая всплытия стального шара, для изучения вязкости исследуемых медно-фосфорных расплавов.

7. Изучение макроструктуры поперечного сечения заготовок дает основание предположить, что при их затвердевании преобладает трехсторонний отвод тепла, приводящий к анизотропии свойств отливаемых прутков. При движении основного фронта затвердевания от нижней части заготовки, контактирующей с кристаллизатором к ее центральной части средний размер дендритной ячейки для сплава П14 возрастает в 3 раза.

8. Установлено, что на формирование облоя с острой кромкой на поверхности заготовок оказывают влияние радиальные биения кристаллизатора, приводящие к формированию зазора между донной частью литника и поверхностью кристаллизатора. Величина зазора для исследуемых медно-фосфорных расплавов не должна превышать 0,4 мм.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Таволжанский С.А., Пашков И.Н. Исследование формирования заготовок и их структуры в виде непрерывно-литых прутков медно-фосфорных сплавов.// Сб. Докладов 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, МАТИ, 2004. С. 63-68.

2. Таволжанский С.А., Пашков И.Н. Исследование формирования непрерывно-литых заготовок из медно-фосфорных сплавов.// Сб. трудов III Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС 2005. С. 247-253.

3. Таволжанский С.А., Пашков И.Н. Исследование процессов, происходящих при формировании непрерывно-литых заготовок из медно-фосфорных сплавов.// Сб. Докладов 4-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, МАТИ, 2005. С. 64-71.

4. Таволжанский С.А., Пашков И.Н. Исследование формирования непрерывно-литых заготовок из медно-фосфорных сплавов.//Литейщик России. № 12, 2005. С. 51-54.

5. Таволжанский С.А., Пашков И.Н. Особенности непрерывного литья проволоки из медно-фосфорных сплавов.//Литейщик России. № 12, 2006.