

На правах рукописи



Колетвинов Константин Федорович

Исследование и разработка промышленного непрерывно-пошагового процесса  
литья вверх заготовок медных припоев диаметром 4-10 мм с целью повышения  
выхода годного

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук

Москва 2017

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Литейные технологии и художественная обработка материалов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС»

**Пашков Игорь Николаевич**

**Консультант:**

кандидат технических наук, доцент  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС»

**Таволжанский Станислав Анатольевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор,  
профессор ФГБОУ ВО «Владимирский  
государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича Столетовых»

**Беляев Игорь Васильевич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

**Бобрышев Борис Леонидович**

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский  
политехнический университет»**

Защита состоится 26 октября 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 на базе Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» – <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый совет. Копии отзывов можно присылать по e-mail: [misistlp@mail.ru](mailto:misistlp@mail.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д 212.132.02,  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Колтыгин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Прутки и проволока из высокотемпературных припоев на основе меди диаметром до 10 мм широко применяются для пайки теплообменной аппаратуры, роторов погружных нефтяных насосов, крупногабаритных электротехнических изделий, твердосплавного инструмента и т.д. Подобную продукцию изготавливают заводы по обработке цветных металлов по традиционным технологическим схемам, включающим литье слитков, многостадийную обработку давлением и многочисленные вспомогательные операции. Рентабельность указанной продукции возможна лишь при значительных объемах производства (от 20...30 тыс. т/год и более), сквозной выход годного редко превышает 70...75%. Используемое при этом капиталоемкое и высокопроизводительное литейное, прессовое, прокатное и волочильное оборудование характеризуется узкой специализацией.

Многие припойные сплавы являются трудно деформируемыми, например, медно-фосфорные припои из-за присутствия в структуре значительного количества фосфида меди. Это затрудняет процесс получения прутково-проволочной продукции и приводит к усложнению и удорожанию производства.

Современное состояние цветметобработки в России характеризуется ростом числа заказов малых объемов продукции. В этих условиях необходимо использование иных технологических схем, основанных на принципах энерго- и ресурсосбережения, а также универсальности, обеспечивающей экономически оправданный выпуск разнородной продукции. В ряде случаев одним из альтернативных решений этой проблемы является получение длинномерных заготовок методом непрерывного литья непосредственно из расплава, имеющих сечение, близкое к конечному изделию.

В связи с этим изучение закономерностей процессов, протекающих при непрерывно-пошаговом литье вверх заготовок высокотемпературных припоев на основе меди диаметром от 4 до 10 мм, и исследование технологических факторов, влияющих на стабильность процесса и качество заготовок, является в настоящее время важной актуальной задачей научно-технического прогресса.

### **Цель работы**

Разработка процесса непрерывно-пошагового литья вверх бездефектных заготовок припоев на основе медных сплавов диаметром 4-10 мм с повышенными технологическими свойствами, а также создание на его основе промышленной технологии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование процесса затвердевания и охлаждения заготовки диаметром от 4 до 10 мм при непрерывно-пошаговом литье вверх;
2. Изучение кинетики затвердевания внутри графитовой втулки с помощью математического моделирования данного процесса в программном пакете «ProCast» с учётом шага и остановки;
3. Изучение механизма возникновения дефектов при литье заготовок диаметром 4-10 мм;
4. Изучение влияния технологических факторов: уровня расплава в металлоприемнике, температуры перегрева расплава и средней скорости литья на образование дефектов в заготовках;
5. Разработка промышленного оборудования и оснастки для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх.

### **Научная новизна работы**

Все пункты научной новизны относятся к заготовкам диаметром от 4 до 10 мм.

1. Разработана компьютерная модель процесса затвердевания заготовок при непрерывно-пошаговом литье вверх с помощью программного пакета «ProCast», отличающаяся определением граничных условий с помощью прямого измерения температуры кристаллизатора в 12-ти точках.
2. Установлено, что для сохранения устойчивости процесса литья средняя скорость не должна превышать 0,77 м/мин, при соотношении длины шага к диаметру заготовки в интервале от 2 до 3.
3. Получено уравнение регрессии, описывающее зависимость дефектности заготовок от параметров процесса (глубина погружения кристаллизатора в расплав ( $x_1$ ), температура перегрева расплава ( $x_2$ ), средняя скорость вытяжки заготовок ( $x_3$ ))  $y_1 = 3.6 - 1.4x_1 + 0.5x_2$ , при этом наибольшее влияние на образование дефектов оказывает глубина погружения кристаллизатора в расплав.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана технология литья вверх заготовок припоев из медно-цинковых и медно-фосфорных сплавов диаметром от 4 до 10 мм.
2. Разработана технология непрерывно-пошагового литья медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов, позволяющая получать заготовки, имеющие гладкую, слабо окисленную поверхность без инородных включений, малую глубину поверхностных неслитин (не более 0,01 мм), малый допуск по диаметру ( $\pm 0,05$  мм).

3. На основании расчетных и экспериментальных данных, полученных при изучении процесса затвердевания и охлаждения заготовки, внедрены режимы непрерывно-пошагового литья, при которых высокая стабильность достигнута для сплавов с узким интервалом кристаллизации и для широкоинтервальных сплавов.

4. Разработана конструкция кристаллизатора и оснастки, а также отработаны режимы литья заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-цинковых сплавов: П211(Cu – 57...59%, Sn – 3...4%, Ni – 1...1,5%, В – 0,05...0,25%, Al – 0,01...0,2%, Zn – ост.) ТУ 1733-013-17228138-2006, ЛОК59-1-0,3 (Cu – 58...60%, Sn – 0,7...1,1%, Si – 0,2...0,4%, Zn – ост.) ГОСТ 16130-90, ЛК62-0,5 (Cu – 60,5...63,5%, Si – 0,3...0,7%, Zn – ост.) ГОСТ 16130-90, ЛНМц49-9-0,2 (Cu – 48...51%, Ni – 8...10%, Mn – 0,1-0,3%, Zn – ост.) ТУ 1733-024-17228138-2005 и медно-фосфорных сплавов: ПМФ7 (Р – 6,5...7,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, ПМФ9(Р – 7,5...9%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, П14 (Р – 5,3...6,3%, Sn – 3,5...4,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-008-17228138-2005, ПМФСy92-6-2 (Р – 5,7...8,5%, Sb – 1,8...2,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, ПМФС6-0,15 (Р – 6...8%, Si – 0,05...0,15%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004. Средняя производительность процесса на одном ручье составляет от 2,5 до 20 кг/ч при изменении диаметра слитка от 4 до 10 мм, выход годного не ниже 98%.

5. Заготовки медно-цинковых припоев, полученные методом непрерывного литья, могут являться конечным продуктом в виде мерных прутков или бухт, а также могут предназначаться для последующего передела волочением (преимущественно для медно-цинковых припоев). Макроструктура заготовок из медно-цинкового сплава ЛОК59-1-0,3 диаметром от 4 до 10 мм состоит из равноосных зерен, со средним размером не более 200 мкм.

6. На основании полученных результатов, на предприятии ЗАО «АЛАРМ» (г. Москва) спроектирована и внедрена в производство двухручьева установка непрерывного литья вверх высокотемпературных припоев диаметром от 4 до 10 мм.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- VII Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС 2013;

- Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти профессора В.Л. Кирпичева и 45-летию Полоцкого государственного университета, ПГУ, Новополоцк, 2013;

- VIII Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС 2015;

- Всероссийская научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития литейных технологий и оборудования в цифровую эпоху», Москва, МАМИ, 2016.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, 7 из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов обеспечена использованием современных аттестованных методов исследования, а также статистической обработкой данных. Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

### **Личный вклад автора**

Диссертация является законченной научной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Автору работы принадлежит основная роль в получении и обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы, 17 формул и 65 рисунков. Библиографический список включает 75 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации. Изложены цель и задачи диссертационной работы.

**В первой главе,** проведен анализ способов изготовления высокотемпературных припоев на основе медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов, выпускаемых в России и за рубежом. Припои этих групп отличаются хорошими технологическими свойствами, но наличие в структуре хрупких фаз, в виде фосфидов или интерметаллидов, определяет низкие механические свойства таких сплавов, что затрудняет их обработку давлением. В качестве альтернативной технологии может быть предложен способ непрерывного литья слитков малого сечения.

На протяжении длительного времени проводились исследования по усовершенствованию способов непрерывного литья заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов. В главе представлены и проанализированы различные методы получения непрерывно литой заготовки. Так как в литературе практически не встречаются описания процессов получения заготовок различных сплавов диаметром от 4 до 10 мм методом непрерывного литья, в данной работе было рассмотрено и проанализировано оборудование для непрерывного литья заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов. Одной из основных проблем при литье заготовок малого сечения в процессах непрерывного литья является формирование протяженной тонкой корки в зоне затвердевания кристаллизатора. Обрыв, или так называемое зависание корки внутри кристаллизатора, довольно частое явление, которое значительно влияет на стабильность литья и качество заготовок.

**Во второй главе** работы описаны физические и технологические свойства сплавов, а также схема экспериментально-промышленной установки УЛВ-2 (установка непрерывного литья вверх), которая разработана в рамках работы для производства мелкосортных заготовок из медных сплавов (рис. 1).

Для проведения исследований технологических процессов литья вверх была использована двухручьева установка непрерывного действия (УЛВ-2). Установка состоит из металлоприемника муфельного (4) типа, в которую опускаются пара водоохлаждаемых кристаллизаторов (6) трубчатого типа. Кристаллизаторы закреплены на суппорте (10). Вытяжка прутков осуществляется тянущей клетью, состоящей из приводного вала (8) и прижимных роликов (11). Резка продукции на мерные заготовки осуществляется при помощи

гидравлических ножниц (12) и гидростанции (13). Изменение уровня расплава в печи металлоприемника осуществляется при помощи хромель-алюмелевой термопары (20). Поддержание уровня расплава в металлоприемнике производится из подливочной печи с помощью стопорно-дозирующего устройства (16).

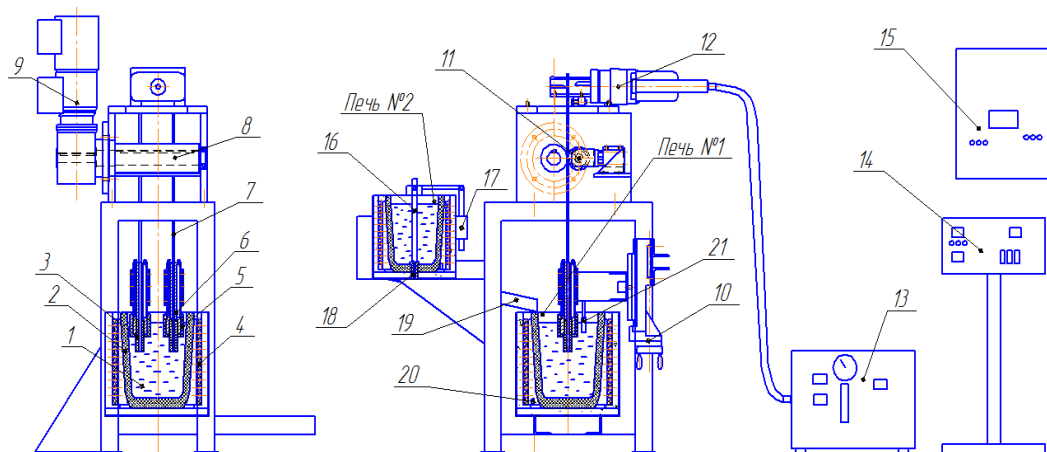


Рисунок 1 – Схема установки литья верх УЛВ-2: 1- расплав; 2 – тигель; 3 – графитовая втулка; 4 – муфель; 5 – асбестовый утеплитель; 6 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 7 - пруток; 8 – прижимной вал; 9 – редуктор; 10 – регулятор высоты кристаллизатора; 11 – прижимной ролик; 12 – ножницы гидравлические; 13 – гидростанция; 14 – щит управления печи №1/№2; 15 – щит управления машиной; 16 – стопорное устройство; 17 – пневматический цилиндр; 18 – графитовая рубашка; 19 – переливной желоб; 20, 21 – хромель-алюмелевая термопара.

Была разработана конструкция кристаллизатора, отличающаяся простотой, дешевизной и компактностью. Кристаллизатор представляет собой водоохлаждаемую медную трубу, в нижнюю часть которой вмонтирована графитовая рубашка (рис. 2). Кристаллизатор состоит из двух зон: затвердевания и вторичного охлаждения заготовки. Заготовка на выходе из кристаллизатора имеет низкую температуру и, соответственно, слабоокисленную поверхность, что особенно важно для присадочных материалов. Для защиты кристаллизатора от взаимодействия с расплавом (1) нижняя его часть защищена керамическим огнеупорным чехлом (5). Перед началом литья кристаллизатор вместе с установленной в его рабочую полость затравкой (7) частично опускается в расплав (1), и зона интенсивного теплоотвода находится несколько ниже уровня расплава. Затравка зажимается тянущим устройством (не показано на рис. 2), расположенным выше металлоприемника, и осуществляется непрерывная вытяжка вверх по циклическому режиму шаг-остановка. Уровень расплава в металлоприемнике по ходу литья поддерживается на заданном уровне. Мерные заготовки отливались диаметром от 4 до 10 мм в виде прутков или бухт. Переход



с одного типа размера на другой осуществлялся заменой графитовой рубашки нужного диаметра. Графитовая рубашка изготовлена из графита, имеющего плотность не менее 1,8 г/см<sup>3</sup> - марки С-4 (ТУ 1915-001-48534975-2014).

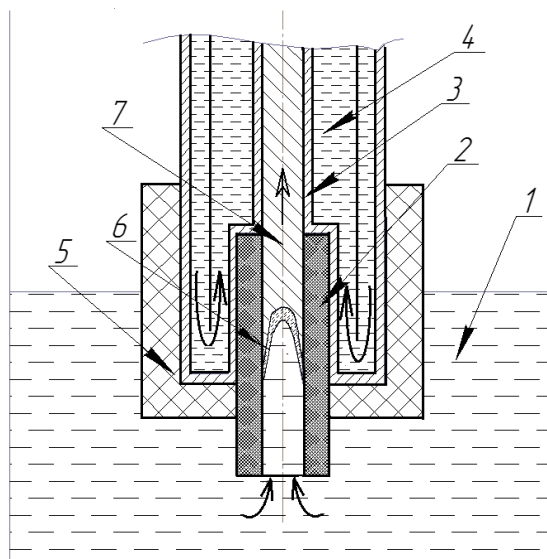


Рисунок 2 –Принципиальная схема нижней части кристаллизатора, погруженной в расплав: 1 – расплав; 2 – графитовая рубашка; 3 – медный корпус; 4 – охлаждающая вода; 5 – огнеупорный чехол; 6 – лунка слитка; 7 – сформировавшаяся заготовка.

Объектами исследования были три высокотемпературных припойных сплава П211, ЛОК59-1-0,3, ПМФ7 и П14, составы которых, согласно действующим ТУ, представлены в таблице1. Припойные сплавы изготавливались из чистых металлов.

Таблица 1 – Составы исследуемых сплавов, масс. %

Марка припоя	Содержание основных компонентов, (масс. %)					
	Cu	Zn	Sn	Ni	Si	P
П211	Осн.	35-39	3,0-4,0	1,0-1,5	0,2-0,4	-
ЛОК59-1-0,3	Осн.	39-41	0,7-1,1	-	0,2-0,4	-
ПМФ7	Осн.	-	-	-	-	6,8-7,3
П14	Осн.	-	3,6-4,1	-	-	5,6-6,1

Отбор и подготовку проб для химического анализа проводили в соответствии с ГОСТ 24231-80.

Химический состав медно-фосфорных сплавов определялся по ГОСТ 6674.1-96 фотометрический методом.

Для проведения химического анализа медно-цинковых сплавов применяли два метода: рентгеноспектральный и фотометрический. Испытания химического состава проводились в аналитическом сертификационном испытательном центре (АСИЦ).

**Третья глава** работы посвящена управлению процессами затвердевания и охлаждения заготовки. На этом этапе работы исследованы различные варианты затвердевания и движения расплава в кристаллизаторе в зависимости от литейных свойств сплава.

Для исследования процесса затвердевания и охлаждения заготовок был проведен эксперимент с замером температурных полей в кристаллизаторе и заготовке с дальнейшим моделированием в программном пакете ProCast.

Двенадцать хромель-алюмелевых термопар с диаметром спая 0,5 мм были встроены в водоохлаждаемую медную стенку кристаллизатора и графитовую рубашку, вмонтированную в дно кристаллизатора (рис. 3), в разных точках для определения температурных полей. Термопары устанавливались в подготовленные отверстия, глубина которых была точно измерена. Термопарные провода вводились в отверстия на всю глубину, чтобы обеспечить надежный тепловой контакт между термопарой и стенкой кристаллизатора. Большинство термопар были установлены в нижней части кристаллизатора, чтобы зафиксировать начальный момент затвердевания и зону образования усадочного зазора между слитком и графитовой рубашкой. Определение данных параметров является необходимым для адекватного изучения профиля фронта кристаллизации. Точность их расположения в стенке формы  $\pm 0,5$  мм. Показания термопар записывалось с помощью термоизмерителя Lutron BTM-4208SD, Израиль.

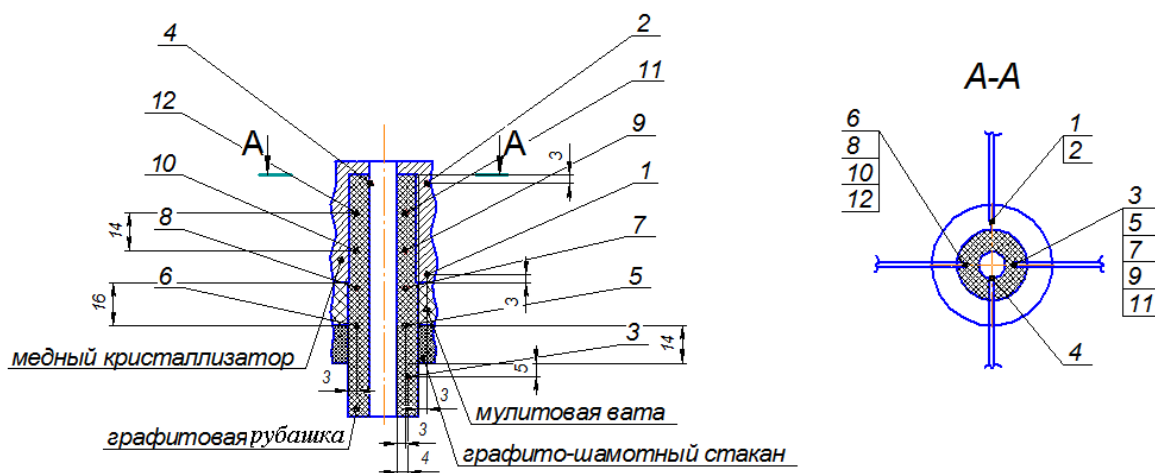
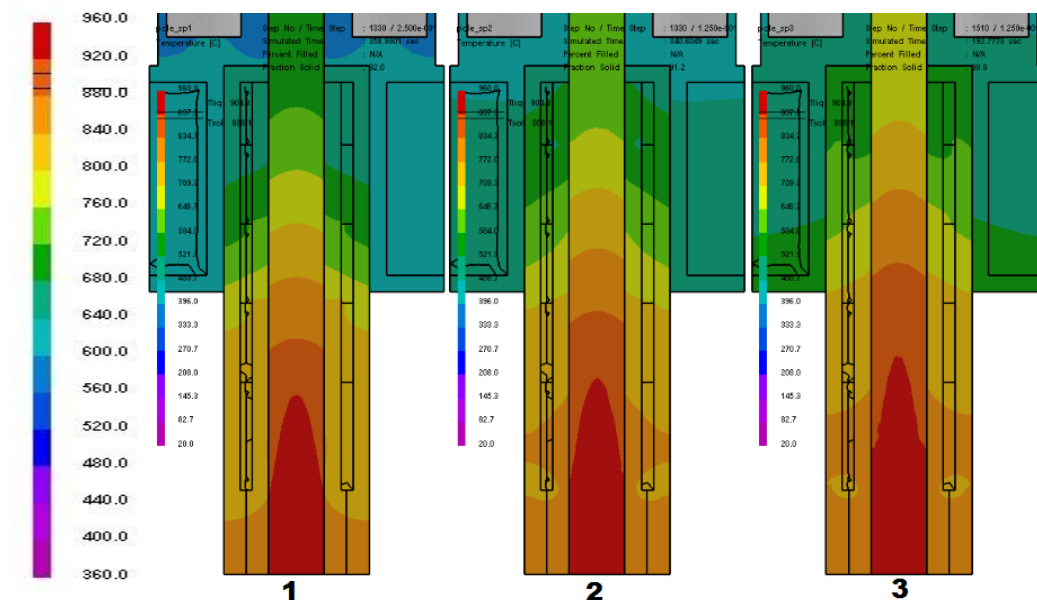


Рисунок 3 – Схема расположения термопар в кристаллизаторе.

Эксперимент проводился при трех разных режимах вытяжки заготовок из сплава ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм. Температура расплава в металлоприемнике 960-965°C. Эксперимент по снятию температурных полей проводился для трех усредненных скоростей: 1 – 0,45 м/мин; 2 – 0,62 м/мин; 3 – 0,77 м/мин. Усредненной скоростью литья - является расстояние, которое прошел пруток во время вытяжки за единицу времени.

Моделирование процесса литья и затвердевания слитка производили в программе ProCast. Свойства сплавов рассчитывали с помощью термодинамической базы программы ProCast. Расчётный состав латуни был: Cu – осн. Zn - 40% Si - 0,25% Sn - 1%, для моделирования процесса литья слитка помимо свойств материалов необходимо знать коэффициенты теплопередачи между объектами модели. В рассматриваемой задаче много контактных поверхностей между материалами (сплав-графит, графит-медь, слиток-медь), что значительно усложняет задачу. Чтобы не определять величину этих коэффициентов, использовали в качестве граничных условий температуры, измеренные в кристаллизаторе (T1-T3), (T5-T12). В ходе моделирования из-за разности температур между точками с заданной температурой и остальными, возникают тепловые потоки, которые приводят систему в стационарное состояние. Это позволяет получить температурное поле в кристаллизаторе, основанное на экспериментальных данных, рис. 4.



1 – 0,45 м/мин; 2 – 0,62 м/мин; 3 – 0,77 м/мин

Рисунок 4 – Температурное поле кристаллизатора и слитка для разных скоростей вытяжки при стабилизации процесса для сплава ЛОК59-1-0,3

Скорость вытягивания задавали двумя разными способами при трех разных скоростях вытяжки. В первом случае устанавливали постоянную скорость вытягивания. При данном режиме литья установлено, что фронт затвердевания вытянутый и стационарный, также выявлено максимальное значение объема двухфазной зоны распределенной по фронту затвердевания.

Во втором случае, процесс литья идет в режиме шаг-остановка. Для этого задавали график скорости вытягивания в зависимости от времени. Часть такого графика для первого режима вытягивания представлена на рисунке 5.

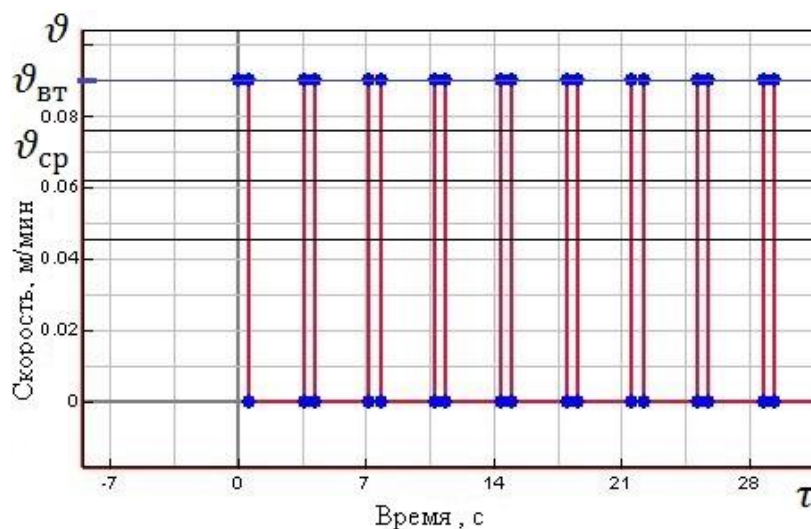


Рисунок 5 – График изменения скорости

При такой постановке задачи получаемый фронт не является стационарным и его следует рассматривать для двух временных моментов: в момент после вытяжки и в момент окончания остановки.

Моделирование затвердевания заготовок не позволяет изучить механизм обрыва тонкой затвердевающей корки. Однако, моделирование затвердевания в режиме шаг-остановка, позволяет понять природу механизма нарастания твердой корки на различных стадиях цикла вытяжки. Форма фронта затвердевания в режиме шаг-остановка представлена на рисунке 6. Цифрами на рисунке указана высота фронта затвердевания. Можно видеть, что с уменьшением скорости вытягивания заготовки высота фронта затвердевания увеличивается в 1,5-2 раза. Фронт затвердевания в момент начала шага (окончания остановки) значительно отличается от фронта в момент его окончания. Во время движения лунка перемещается вверх, после чего при остановке на боковой поверхности активно начинает расти твёрдая фаза. Полученные результаты позволили оптимизировать режимы вытяжки заготовок, и соответственно повысить качество заготовок и производительность литья.

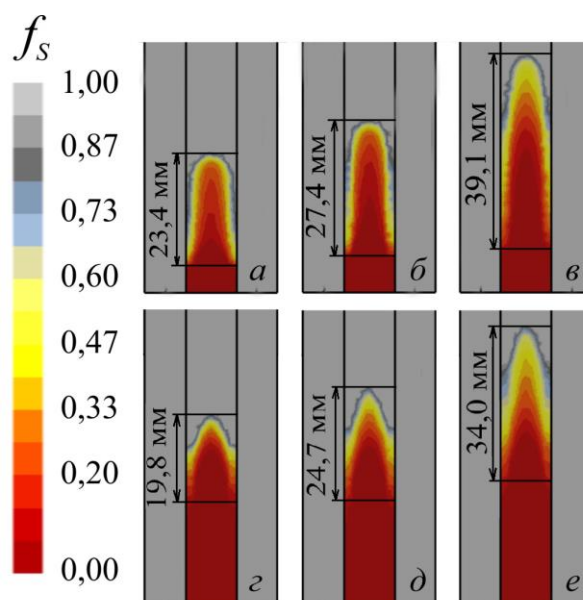


Рисунок 6 – Распределение доли твёрдой фазы ( $f_s$ ) на фронте затвердевания при режиме вытягивания с остановкой: 3 с (а, г), 2 с (б, д), 1,5 с (в, е) в момент начала шага (а, б, в) и в момент окончания шага (г, д, е). Средняя скорость литья на рисунке а, г - 0,45 м/мин; б, д - 0,62 м/мин; в, е – 0,77 м/мин.

Макроструктура литых заготовок отличается равноосным зерном. Средний размер макрозерна увеличивается от 165 до 185 мкм при соответствующем увеличении скорости литья от 0,45 до 0,77 м/мин, рис 7 а, б. Как известно, указанная структура для данного сплава является благоприятной для последующей деформации.

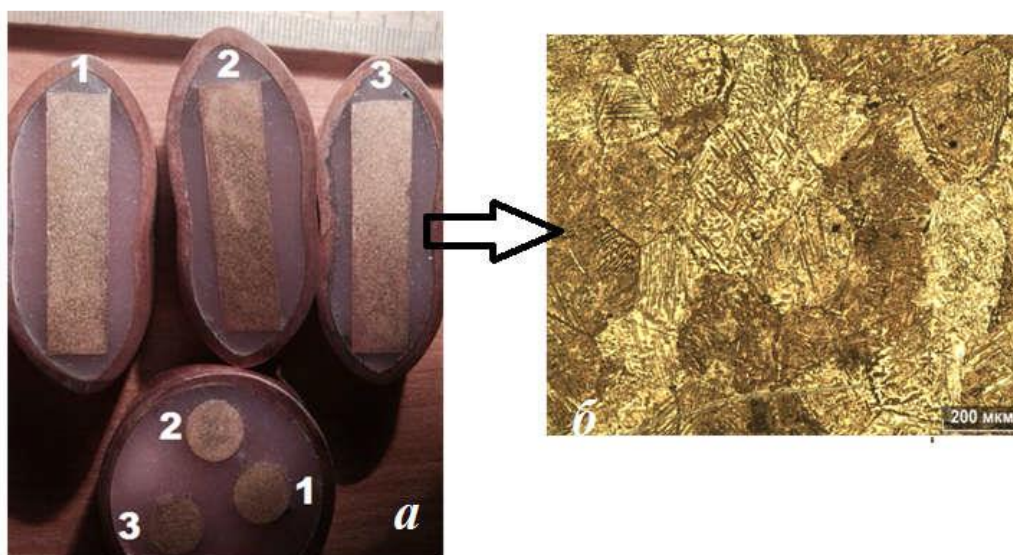


Рисунок 7 – Поперечные и продольные фотографии макроструктуры литых заготовок диаметром 10 мм из сплава ЛОК59-1-0,3 (а), микроструктура этого сплава при скорости литья 0,45 мм/мин (б) (1, 2 и 3 – усредненные скорости литья: 0,45; 0,62 и 0,77 м/мин соответственно)

**В четвертой главе** показано влияние технологических факторов на стабильность процесса литья и качество заготовок. В данной главе описано формирование дефектов при непрерывно-пошаговом литье заготовок диаметром от 4 до 10 мм. Проведен полнофакторный эксперимент для выявления влияния основных факторов на стабильность и дефектность заготовок.

Исходя из особенностей непрерывно-пошагового литья вверх, уточнен механизм формирования заготовки и образования горячих трещин при литье сплавов припоев на основе меди. Выявленные нарушения поверхности заготовки в процессе непрерывно-пошагового процесса литья, были классифицированы как литейные дефекты 1, 2 и 3-его рода. На заготовке наблюдались неслитины, наплывы, выступавшие на поверхности прутка (0,5-2 мм в зависимости от диаметра) и трещины (глубиной 0,5-2 мм). Механизм образования дефектов различного рода и их величина определяются литейными и теплофизическими свойствами отливаемого сплава, скоростью вытягивания заготовки, а также качеством подготовки рабочей поверхности кристаллизатора. Дефекты первого рода связаны с уменьшением уровня расплава в тигле и уменьшением гидростатического давления в области затвердевания, это приводит к затруднению заполнения расплавом пустот в местах разрыва корки. Дефекты второго рода связаны с низкой жидкотекучестью расплава, который не успевает или не может заполнить полностью зону разрыва твердой корки, появляющейся при ускоренной вытяжке заготовки. Дефекты третьего рода связаны со значительно увеличившимся коэффициентом трения между твердой коркой заготовки и внутренней стенкой графитовой рубашки, вследствие износа внутренней поверхности графитовой рубашки или образования глубоких надиров на поверхности графитовой рубашки.

Установлен механизм образования обрывов заготовки внутри кристаллизатора при непрерывно-пошаговом литье заготовок сечением менее 10 мм (рис. 8). Обрыв происходит, когда напряжения, вызванные трением корки (1) о рабочую поверхность кристаллизатора, превышают ее прочность. Оборвавшийся участок корки (1) начинает перемерзать (2) и мешает поступлению горячего расплава (3) в зону затвердевания, после чего происходит обрыв заготовки. Это вызвано целым рядом факторов: высокая скорость вытяжки, ухудшение чистоты внутренней поверхности графитовой рубашки, низкий уровень расплава в тигле и т.д.



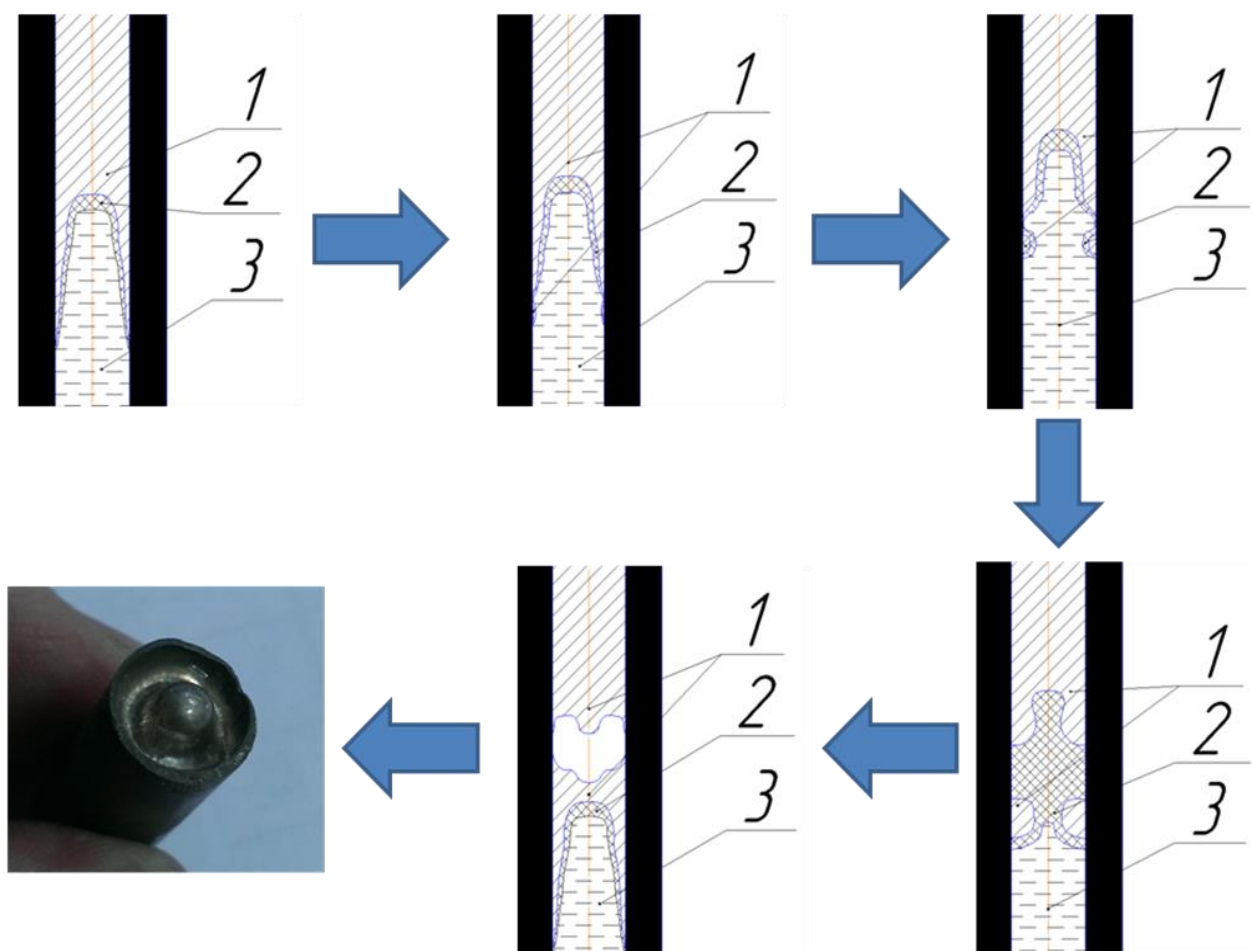


Рисунок 8 – Схема образования обрыва заготовки: 1 – сформировавшаяся заготовка; 2 – двухфазная область; 3 – расплав.

Для исследования стабильности литья заготовок высокотемпературных припоев малых сечений, был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ).

Реализован план эксперимента  $2^3$ . В качестве факторов использовались: уровень расплава в тигле ( $x_1$ ), температура расплава в металлоприемнике ( $x_2$ ), средняя скорость литья ( $x_3$ ). В качестве исследуемых параметров были выбраны количество дефектов на единицу длины ( $y_1$ ), количество обрывов в течение часа ( $y_2$ ), длительность процесса непрерывного литья ( $y_3$ ). Диапазон варьирования факторов представлен в таблице №2.

Таблица №2 - Интервалы варьирования факторов

	глубина погружения кристаллизатора в расплав ( $x_1$ ), мм	температура перегрева расплава ( $x_2$ ), °С	средняя скорость вытяжки заготовок из расплава ( $x_3$ ), м/мин
интервал варьирования факторов	70-110	50-150	0,45-0,77

Уравнение регрессии  $\hat{y}_1$  в зависимости от исследуемых факторов:

$$\hat{y}_1 = 3,6 - 1,4x_1 + 0,5x_2 \quad (1)$$

Регрессионный анализ показал, что выбранные факторы не влияют на количество обрывов и длительность процесса непрерывного литья в заданных диапазонах исследования (рис. 9).

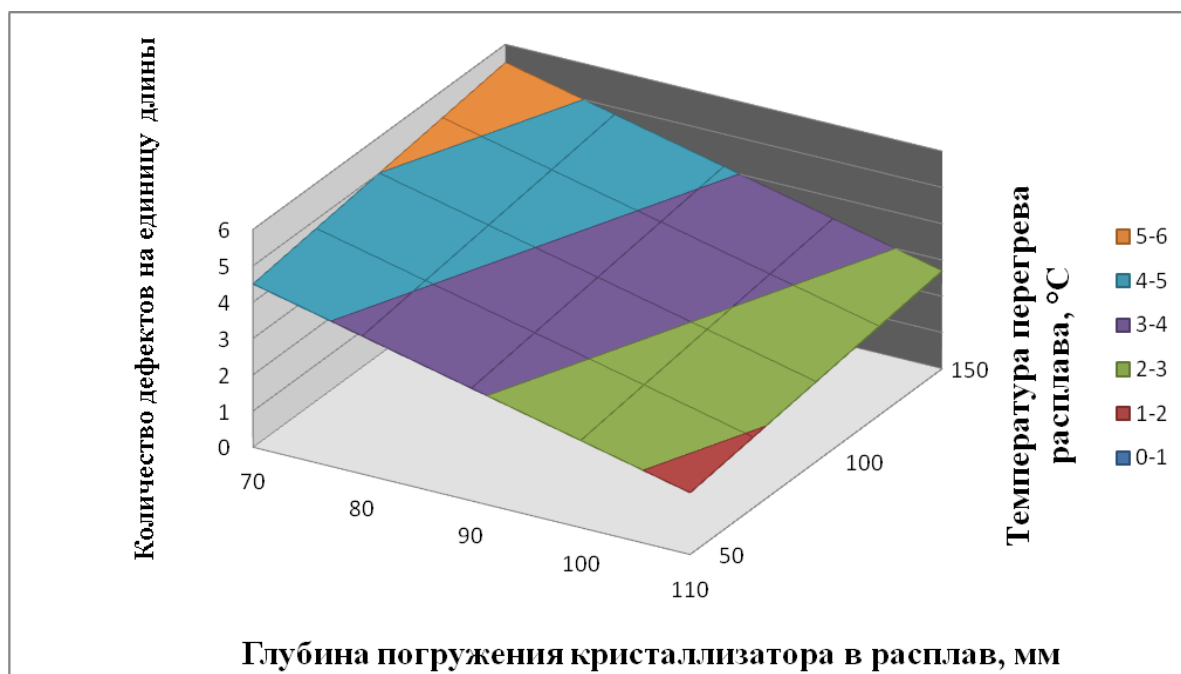


Рисунок 9- Влияние анализируемых факторов на количество дефектов.

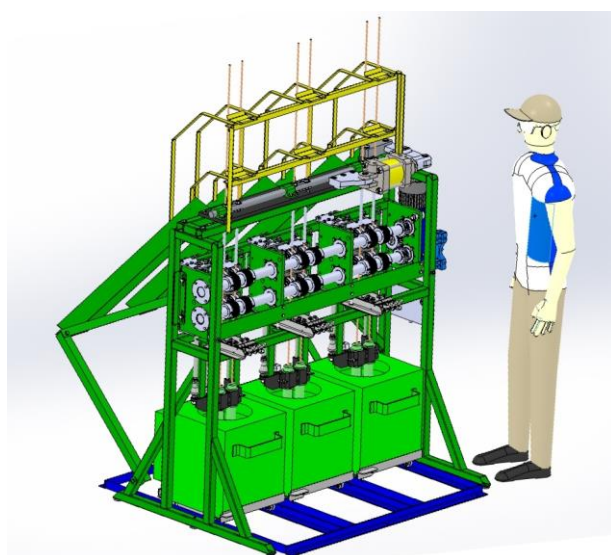
Анализ модели подтвердил комплексное влияние факторов на количество дефектов на поверхности высокотемпературных припойных сплавов малых сечений.

Уравнение (1) показывает, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов наиболее отрицательное влияние на качество поверхности оказывает понижение уровня расплава в тигле, а положительное влияние оказывает понижение температуры расплава в металлоприемнике. Понижение уровня расплава в 3 раза сильнее влияет на качество поверхности прутка, чем повышение температуры в металлоприемнике. Средняя скорость литья не влияет на количество дефектов.

**В пятой главе** на основании проведенных исследований была разработана и внедрена в производство шестиручьева установка литья вверх для получения прутков и проволоки диаметром от 4 до 10 мм из высокотемпературных припоев на основе меди, выбрана конструкция кристаллизаторов и оптимизирован процесс подготовки кристаллизатора к работе. Были определены режимы вытягивания, позволяющие отливать заготовки диаметром от 4 до 10 мм из припойных сплавов на основе систем Cu-Zn и системы Cu-P.



Установка УЛВ-3, представленная на рис. 10, предназначена для изготовления прутков припоя диаметром 4 - 10 мм методом непрерывного вытягивания вверх литых заготовок из расплава и рубки их на мерные отрезки.



А



Б

Рисунок 10 – 6-ручьева установки непрерывного литья вверх заготовок высокотемпературных припоев: А – 3D модель установки разработанная для предприятия ЗАО «Аларм»; Б – вид промышленной установки, изготовленной по проекту.

Оборудование обслуживает один оператор, в обязанности которого входят: подготовительные операции, приготовление расплава, осуществление запуска и остановки процесса литья, периодическое наполнение расплавом металлоприемников, упаковка прутков припоя. Процесс вытяжки прутков осуществляется в пошаговом режиме. Средняя производительность процесса на одном ручье составляет от 2,5 до 20 кг/ч при изменении диаметра слитка от 4 до 10 мм, выход годного не ниже 98%. Готовую продукцию получают в виде мерных прутков или бухт.

### **Общие выводы**

1. В работе установлено, что для получения заготовок из сплавов систем медь-фосфор и медь-цинк диаметром от 4 до 10 мм метод вертикального вытягивания заготовок вверх является более эффективным, чем вертикальное литье вниз и горизонтальное литьё, т.к. при литье вверх достигается минимальная протяженность фронта затвердевания и образуется наименьшее гидростатическое давление на затвердевающую корку.

2. Прямое измерение температурного поля кристаллизатора позволяет разработать математическую модель процесса затвердевания и охлаждения заготовок в программном пакете "ProCast" без определения коэффициентов теплопередачи на контактных поверхностях медь-вода, медь-графит, графит-расплав и т.д.

3. На основании математической модели определено, что в непрерывном режиме вытяжки, при увеличении скорости литья, протяженность фронта кристаллизации и объем двухфазной области увеличивается в 1,4 раза, а в режиме шаг-остановка фронт кристаллизации увеличивается в 2 раза, но за время остановки фронт кристаллизации опускается, и оборвавшийся участок успевает надежно соединиться с основным фронтом затвердевания.

4. Установлено, что наиболее стабильный режим литья и минимальная степень дефектности заготовки достигаются при отношении длины шага к диаметру заготовки в интервале от 2 до 3.

5. На основании результатов моделирования определено, что критическая скорость литья, приводящая к нестабильности процесса и разрушению затвердевающей заготовки внутри кристаллизатора, составляет 0,77 м/мин, для разработанной конструкции кристаллизатора.

6. Механизм образования дефектов связан с возникновением напряжения, вызванного трением корки о рабочую поверхность кристаллизатора. Выявлено три рода дефектов:

- дефекты первого рода связаны с уменьшением уровня расплава в тигле и уменьшением гидростатического давления в области затвердевания, это приводит к затруднению заполнения расплавом пустот в местах разрыва корки;
- дефекты второго рода связаны с низкой жидкотекучестью расплава, который не успевает или не может заполнить полностью зону разрыва твердой корки, появляющейся при ускоренной вытяжке заготовки;
- дефекты третьего рода связаны с значительно увеличившимся коэффициентом трения между твердой коркой заготовки и внутренней стенкой графитового кристаллизатора, вследствие износа внутренней поверхности графитового кристаллизатора или образования глубоких надиров на поверхности графитового кристаллизатора.

Все они могут присутствовать при непрерывном литье вверх.

7. Проведенный регрессионный анализ позволил установить, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов (уровня расплава в металлоприемнике, температуры перегрева расплава и средней скорости литья) на

образование дефектов в заготовках наиболее отрицательное влияние оказывает понижение уровня расплава в тигле металлоприемника, а положительное влияние оказывает понижение температуры расплава в металлоприемнике. Также, было установлено, что скорость литья заготовок, в варьируемом диапазоне, не влияет на качество поверхности получаемых заготовок. Понижение уровня расплава в 3 раза сильнее уменьшает качество поверхности прутка, чем повышение температуры в металлоприемнике.

8. Установлено, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов уровень погружения кристаллизатора в расплав, перегрев расплава и изменение скорости литья, в исследуемом диапазоне, не оказывают влияния на продолжительность процесса литья и обрывы заготовки.

9. Спроектирована и изготовлена установка непрерывного литья вверх, позволяющая получать припои на основе систем Cu-P и Cu-Zn (П14, ПМФ7, ПМФ9, П211, ЛОК 59-1-0,3 и т.д.) в виде готового продукта (мерных заготовок и бухт) диаметром 4-10 мм и производительностью 2,5-20 кг/ч с одного ручья, выхода годного, который может достигать до 98%.

10. Разработана конструкция кристаллизатора, позволяющая повысить производительность литья на 30% в промышленных условиях и реализовать процесс непрерывно-пошагового литья заготовок диаметром от 4 до 10 мм.

#### **Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях: Журналы из перечня ВАК**

1. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, И.Н. Пашков // Исследование процесса непрерывного вертикального литья прутков малого сечения из медно-фосфорных сплавов припоев // Литейщик России. №4, 2013. С. 14-17.

2. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, И.Н. Пашков // Разработка и применение альтернативных способов непрерывного литья для изготовления высокотемпературных припоев малого сортамента // Metallurg. №10, 2013. С. 84-87.

3. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский // Разработка и применение способа непрерывного литья вверх заготовок высокотемпературных припоев малого сортамента // Цветные металлы. №11, 2015. С. 85-88.

4. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, П.В. Золин // Изготовление прутков Cu-P припоев методом непрерывного вытягивания расплава вверх через кристаллизатор скольжения // Metallurgiya mashinostroeniya. №3, 2015. С. 40-44.

5. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский // Получение заготовок высокотемпературных припоев на медной основе методом непрерывного литья вверх // Литейщик России. №11, 2015. С. 29-31.

6. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский // Разработка и применение технологий изготовления высокотемпературных припоев на медной основе на базе процессов непрерывного литья // Литейщик России. №11, 2015. С. 21-24.

7. K.F. Koletvinov, S.A. Tavolzhanskii, I.N. Pashkov // Developing and using alternative methods of continuous casting to make a narrow range of high-temperature solders // Metallurgist, Vol. 57, issue 9, 2014, P. 944-948.

8. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, Е.И. Марукович, В.А. Харьков // Технология непрерывного вертикального литья заготовок малых сечений из медно-фосфорных сплавов // ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ материалы международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В. Л. Кирпичёва и 45-летию Полоцкого государственного университета. 2013. С. 102-104.

9. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, В.Е. Баженов // Исследование и разработка процесса непрерывно-дискретного вытягивания из расплава вверх заготовок медных сплавов // Труды всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития литейных технологий и оборудования в цифровую эпоху», Университет машиностроения. Г. Москва, 2016. с. 275-284.

10. К.Ф. Колетвинов, С.А. Таволжанский, И.Н. Пашков // Получение заготовок высокотемпературных припоев на медной основе методом непрерывного литья вверх // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», НИТУ «МИСиС», 2015, с. 90-93