

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

И.Н. Пашков

МОСКВА, 2017 г

Содержание

Введение	4
1 Аналитический обзор литературы	9
1.1 Свойства и применение медно-фосфорных сплавов	9
1.2 Свойства и применение медно-цинковых сплавов	13
1.3 Анализ способов изготовления сплавов на медной основе	14
1.4 Обзор способов непрерывного литья заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов	16
1.5 Выводы и постановка задач исследования	41
2 Методики проведения экспериментов	43
2.1 Приготовление медно-цинковых сплавов	43
2.2 Приготовление медно-фосфорных сплавов	44
2.3 Методика проведения термического анализа	46
2.4 Методика проведения химического анализа	48
2.5 Методика изготовления шлифов	49
2.6 Методика получения фотографий микро- и макроструктур	50
2.7 Лабораторная установка для непрерывного литья вверх	50
2.8 Разработка конструкции кристаллизаторов для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх диаметром от 4 до 10 мм	52
3 Изучение закономерностей процесса затвердевания и охлаждения заготовки	54
3.1 Измерение температурного поля кристаллизатора при затвердевании заготовок	54
3.2 Моделирование в программном пакете «ProCast»	55

3.3 Результаты эксперимента по снятию температурных полей и моделирования в программе «ProCast»	58
3.4 Результаты исследования макроструктуры образцов	69
3.5 Результаты исследования микроструктуры образцов	72
3.6 Выводы по главе	74
4 Исследование влияние технологических факторов на стабильность процесса литья и качество заготовок	76
4.1 Формирование дефектов при непрерывно-пошаговом литье заготовок диаметром от 4 до 10 мм	76
4.2 Построение полнофакторного эксперимента для выявления влияния основных технологических факторов на стабильность литья и дефектность заготовки	94
4.3 Выводы по главе	103
5 Построение промышленного оборудования для непрерывно-пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм из сплавов припоев на основе меди	104
5.1 Создание промышленной технологии для реализации процесса непрерывно-пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм	104
5.2 Разработка технологической оснастки для процесса непрерывного литья	107
5.3 Усовершенствование конструкции кристаллизатора для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх диаметром от 4 до 10 мм	109
5.4 Промышленные режимы непрерывно пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов	111
5.5 Выводы по главе	113
Общие выводы по работе	114
Список литературных источников	116

Введение

Актуальность работы

Прутки и проволока из высокотемпературных припоев на основе меди диаметром до 10 мм широко применяются для пайки крупной теплообменной аппаратуры, роторов погружных нефтяных насосов, крупных 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 для производства заготовок весьма разнообразных размеров.

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 диаметром менее 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)) $\hat{y}_1 = 3.6 - 1.4x_1 + 0.5x_2$, 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 (P – 6,5...7,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, ПМФ9 (P – 7,5...9%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, П14 (P – 5,3...6,3%, Sn – 3,5...4,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-008-17228138-2005, ПМФСy92-6-2 (P – 5,7...8,5%, Sb – 1,8...2,5%, Cu – ост.) ТУ 1733-025-17228138-2004, ПМФС6-0,15 (P – 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 мелких равноосных кристаллов с размером зерна, не превышающим 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.

1 Аналитический обзор литературы

1.1 Свойства и применение медно-фосфорных сплавов

Соединение деталей из различных или одинаковых материалов для получения неразъемного соединения деталей бывает не возможным без применения такого технологического процесса, как пайка. Данная технологическая операция применяется для пайки пакетов ротора погружных нефтяных насосов, массивных изделий в электротехнической промышленности, теплообменников маневровых тепловозов и т.д. В виде припоя применяют мерные прутки малого сечения (менее 10 мм) из различных материалов. Потребность в данном виде продукции определяет необходимость в поиске рентабельных высокопроизводительных способов их изготовления.

По данным широкого спектра патентной, справочной и периодической литературы, за последние 30 лет ведущие страны мира (СССР и Россия, США, Япония, Англия, Великобритания, Франция) все шире применяют припои, не содержащие драгметаллов, в частности, на основе сплавов меди с фосфором, для получения соединений меди. Отмечено повышение спроса на них в автомобилестроении, производстве теплообменной аппаратуры, холодильного оборудования, энергетического машиностроения, приборостроения и т.д. Применение медно-фосфорных припоев при пайке меди и ее сплавов, взамен серебряных припоев, обуславливается сравнительно низкой (на уровне припоев с высоким содержанием серебра) температурой плавления, высокими (не уступающими серебряным припоям) технологическими свойствами при пайке и значительно меньшей их дефицитностью и стоимостью по сравнению с серебряными [1,2,3].

Припои на основе системы медь-фосфор применяются для пайки меди и её сплавов. Широкому использованию медно-фосфорных припоев способствует, также, их способность к самофлюсованию. Возможность вести процесс без применения флюса или с его ограниченным применением сокращает время пайки примерно на 15% и повышает качество соединения, так как избыток флюса может служить источником образования шлаковых включений в паяном шве. При этом также улучшается внешний вид соединения и исключается операция отмычки шлако-флюсовых остатков. Л.Л. Грижимальский [4] связывает самофлюсующие свойства фосфористых припоев с высокой активностью фосфора по отношению к кислороду, а также с образованием в процессе пайки между окислами основного металла и соединениями фосфора легкоплавких шлаков.

На рисунке 1 представлена диаграмма системы медь-фосфор.

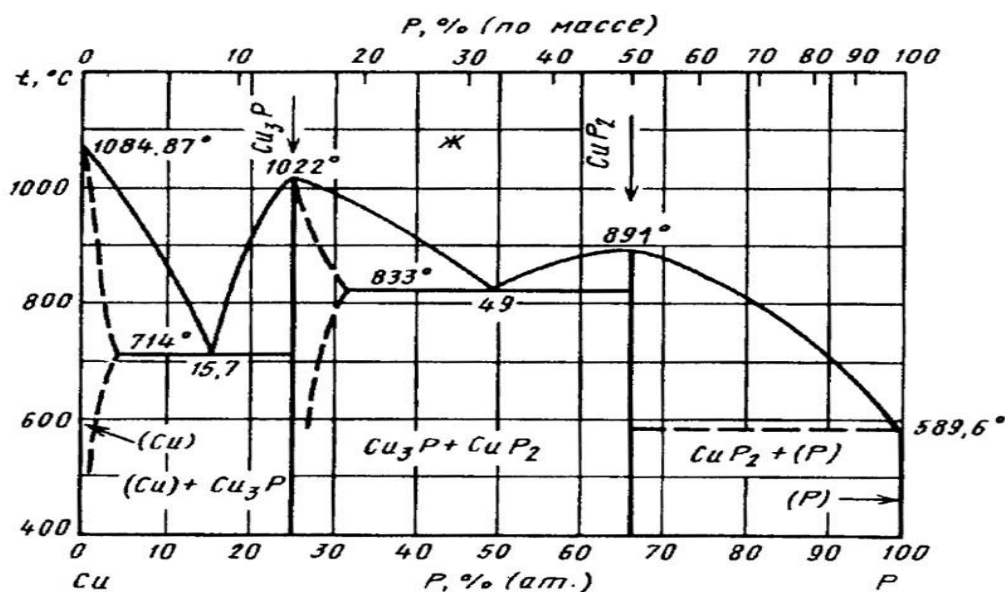


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы Cu-P

Медь и фосфор реагируют с образованием интерметаллидного соединения (Cu_3P), содержащего 14% вес. фосфора и плавящегося при температуре 1018 °С. Сплавы, содержащие менее 1,75% вес. фосфора, будут затвердевать с образованием твердого раствора α . Таким образом, система сплава характеризуется эвтектической точкой α - Cu_3P при 8,4% вес. фосфора и 714 °С. В то время, как большинство интерметаллидных соединений развивают заметную пластичность при достижении 0,7 $T_{\text{плавления}}$, у фазы Cu_3P наблюдалось увеличение пластичности при 0,35 $T_{\text{плавления}}$ [5].

Медно-фосфорные припои, из-за присутствия в структуре значительного количества фосфида меди, обладают низкой теплопроводностью и практически нулевой прочностью [6] вблизи температуры солидус. Например, теплопроводность припоя П14 (P-6%, Sn-4%? Cu- ост.) при 600° С составляет 36,7 Вт/(м·К), а теплопроводность меди технической чистоты при той же температуре - 382 Вт/(м·К).

В таблице 1 приведены марки, номера нормативной документации, некоторые физические характеристики, сортамент, наименование производителей наиболее известных и прошедших промышленную апробацию и внедрение припоев на предприятиях России и СНГ. В таблице 2 приведен химический состав медно-фосфорных припоев [7].

Таблица 1 - Припой на основе системы медь-фосфор для пайки меди и ее сплавов

№ Обр.	Марка припоя	Номер нормативной документации на хим. состав, технические требования	Удельное электросо- противлен ие 10 ⁻⁸ Ом * м	Плот- ность, кг/м ³	Температура, °С		Форма поставки, сортамент	Изготовитель
					Начала плавления	Полного расплав- ления		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПМФОЦр 6-4-0,03	ТУ 48-21-663-79 ТУ48-17228138/ОПП-005-2001	34,1	7850	640	680	Проволока прутки Ø1,4-2,8мм, лента 0,4-1,0х10-40мм	ЗАО «АЛАРМ» г. Москва
1a	П14(ПМФО 6-4) полный аналог припоя №1 по технологическим физико-механическим характеристикам)	ТУ 1733-021-17228138-2004 ТУ 48-17228138/ОПП-003-2001 (некалиброванный) ТУ 48-17228138/ОПП-008-97 (калиброванный) ТУ 48-17228138/ОПП-006-2000 (офлюсованный)					Литые прутки Ø4,6 мм. Проволока и прутки Ø0,3-3,0 мм, калиброванные, некалиброванные, (в т.ч. офлюсованные Ø1,5-3,0 мм), лента 0,2-0,8х5-45 мм, изготовленные способом высокоскоростного затвердевания из расплава.	
2	ПМФ7	ТУ 48-17228138/ОПП-010-97					Лента 0,3-1,0х10х20мм	
3	ПМФСy 92-6-2	ТУ-1733-0,25-172228138-2004	-	-	600	650	Литые прутки Ø 4,6 мм	
4	ПМФ9		-	6500	714	750		

Таблица 2 - Химический состав отечественных медно-фосфорных припоев,

Марка	Содержание основных компонентов, % ¹							
	Cu	P	Sn	Ni	Zn	Fe	Zr	Sb
ПМФОЦр6-4-0,03	Ост.	5,5-6,3	3,5-4,5	-	-	-	0,01-0,05	-
П14 (ПМФО6-4)	Ост.	5,5-6,3	3,5-4,5	-	-	-	-	-
ПрМЦФЖ 24-6-0,75	Ост.	5,0-7,0	-	-	22-26	0,5-1,0	-	-
ПМФСУ 92-6-2	Ост.	5,7-6,5	-	-	-	-	-	1,8-2,5
ПМФСy 5-13	Ост.	4,5-5,5	-	-	-	-	-	12,5-13,5
ПФОЦ 7-3-2	Ост.	5,0-7,0	2,5-3,5	-	1-3	-	-	-
ПМФН 8,5-8,5	Ост.	8,5	-	-	-	-	-	-
ПДОл5П7	Ост.	6,4-8,0	4,2-5,8	-	-	-	-	-
ПМФ7	Ост.	6,5-7,5	-	-	-	-	-	-
ПМФ9	Ост.	8,0-9,5	-	-	-	-	-	-
П81	52-54	6,0-7,0	-	6,0-7,0	Ост.	-	-	-
300К	Ост.	4,0-6,0	14,0-16,0	0,2-0,5	-	-	-	-
СТЕМЕТ 1101	Ост.	6,5-7,5	3,0-4,0	8,3-9,3	-	-	-	-

¹ Здесь и далее, если не указано иное, содержание элемента приведено в массовых долях %, слова «массовая доля» опущены

Данная группа медно-фосфорных припоев с содержанием фосфора от 5 до 9%, относится к классу трудно-деформируемых материалов. Соответственно, подход к изготовлению этих сплавов стандартными технологическими схемами является некорректным. Для производства данного вида продукции следует использовать более технологичные и современные методы литья.

1.2 Свойства и применение медно-цинковых сплавов

Латуни разделяются на двойные и многокомпонентные. Многокомпонентные латуни, кроме меди и цинка, содержат ещё один или несколько других легирующих материалов. В многокомпонентных латунях добавки олова, никеля, марганца, железа и кремния повышают прочность, твердость, коррозионную устойчивость и литейные свойства. Так, для снижения температуры плавления и повышения технологических свойств медно-цинковых сплавов вводят олово и кремний. Введение третьего компонента в двойные латуни изменяет не только свойства, но и их структуру.

О структуре многокомпонентных латуней можно судить по диаграммам состояния соответствующих тройных, четверных и более сложных систем. На практике часто, при определении ожидаемой структуры, в качестве первого приближения исходят из представления о так называемых коэффициентах замены цинка.

Экспериментально установлено, что добавки третьего компонента сдвигают границы α - и $\alpha+\beta$ - областей. Доставляемый элемент действует на структуру латуней качественно так же, как и сам цинк, но эффект от добавки этого элемента будет другой. Только один элемент – никель, расширяет α - область [8].

Исходя из вышеизложенного, большинство легирующих элементов в медно-цинковых сплавах сдвигают его в β - область, что негативно влияет на обрабатываемость давлением данных сплавов. Наиболее известные и употребляемые латунные припои, их физические свойства, химический состав и область применения даны в таблице 3.

Таблица 3 – Состав медно-цинковых припоев ГОСТ 16130-90

Марка припоя	Содержание основных компонентов, % (масс)						
	Cu	Zn	Sn	Ni	Si	Mn	Si
П211	57-59	Ост.	3,0-4,0	1,0-1,5	0,2-0,4	-	-
ЛОК59-1-0,3	58-60	Ост.	0,7-1,1	-	0,2-0,4	-	-
ЛК62-0,5	60-63	Ост.	-		0,3-0,7	-	-
ЛНКМц49-9-0,2-0,2	48-50	Ост.	-	0,8...1,0	-	0,1-0,3	0,2-0,4

Многокомпонентные латуни широко применяют для пайки тяжелонагруженных изделий, например, всех видов паяного режущего инструмента (резцы, фрезы и др.), и изделий, в процессе эксплуатации подвергающихся вибрационным, ударным и другим видам нагрузок. Многокомпонентные латуни сложно получать по стандартным технологическим схемам, применяющимся для двухкомпонентных латуней.

1.3 Анализ способов изготовления сплавов на медной основе

Производство сложнелегированных припоев в Советском Союзе было организовано на Московском экспериментальном заводе качественных сплавов (ЭЗКС). Большинство прутково-проволочных припоев изготавливалось на заводах по обработке цветных металлов (ОЦМ) как неосновной вид продукции. При этом, выпуск припоев осуществлялся по стандартным технологическим схемам на оборудовании, предназначенном для крупносерийного выпуска прутково-проволочной продукции из цветных сплавов. Также, за рубежом припойные сплавы всегда изготавливаются из чистых компонентов, а при изготовлении их из вторичного сырья снижается точность состава и чистота по примесям, которые иногда критичны для процесса пайки и затрудняют смачивание и растекание припоя. Очевидно, что подобные схемы не могли обеспечить надлежащего качества припоев, так как многие сплавы имеют сложный многокомпонентный состав и требуют тщательного подхода к шихтовке и проведению плавки [9]. Стандартные технологические схемы производства прутково-проволочной продукции из цветных сплавов включают операцию получения слитка (преимущественно непрерывным способом литья) диаметром 100–150 мм с последующим горячим прессованием, либо прокаткой слитка до заготовки диаметром 15 мм и меньше. Затем производится волочение полученной заготовки до требуемого диаметра (обычно 1,2–4 мм). Все переделы включают в себя многочисленные вспомогательные операции: травление, скальпирование, термообработку,

правку, рубку на мерные отрезки и пр. Очевидно, что подобные схемы отличаются невысоким выходом годного, использованием дорогостоящего инструмента и низкой производительностью. В связи с этим, например, на заводе ЭЗКС основная масса продукции из припоев изготавливалась в виде прутков с помощью технологии прессования слитков через матрицы с большим количеством отверстий (до 41). Допуск на диаметр прутков составлял $\sim 0,3$ мм [10]. По данной схеме изготавливались припои из медно-фосфорных сплавов, сложнелегированных латуней и бронз. Прессование и очистка прутков являлись часто последней операцией в технологической цепочке. Таким образом, отечественная промышленность в основном производила прутки методом прессования, в то время как большинство зарубежных фирм из-за высоких допусков по диаметру продукции ($\pm 0,03$ мм) изготавливала припойную проволоку с последующей рубкой на отрезки мерной длины.

На сегодня большинство заводов ОЦМ отказались от выпуска прутково-проволочной припойной продукции. В основном это объясняется необходимостью выпуска средних и малых партий припоя разнообразного сортамента, а также необходимостью применения при шихтовке чистых исходных материалов и отказа от использования вторичного сырья для сохранения точности химического состава припоя. Используемые технологические схемы и высокопроизводительное оборудование, ориентированные на производство ограниченного сортамента небольшой группы сплавов, оказались нерентабельными для выпуска припойной продукции. Такая продукция оказалась неконкурентоспособной в сравнении с зарубежными аналогами. Единственным способом обеспечения рентабельности выпуска припоев в виде прутков и проволоки является применение новых технологических схем, обеспечивающих меньшее количество металлургических переделов, с соответствующим повышением выхода годного, коэффициента использования материалов и производительности.

Уменьшения количества металлургических переделов можно достичь, максимально приблизив сечение исходной литой заготовки к конечному сечению прутково-проволочной продукции. В этом случае устраняются энерго-, ресурс- и трудоемкие переделы литья слитков крупного сечения, их прессования или прокатки. Подобные альтернативные схемы для производства сварочной проволоки нашли применение на Каменск-Уральском заводе ОЦМ [11,12]. Технология включает в себя отливку заготовок диаметром 11–15 мм методом непрерывного горизонтального литья и последующее их волочение. Также, существуют предложения изготовления прутково-проволочной продукции совмещенным способом горизонтального непрерывного литья и горячей винтовой прокатки в одном комплексе [13]. В этом случае сечение отливаемой заготовки также сравнительно небольшое 15–30 мм. После прокатки заготовки могут направляться на волочение.

Существуют и другие методы получения мерных заготовок диаметром менее 10 мм. Метод непрерывного литья в подвижный кристаллизатор скольжения позволяет получать медно-фосфорные припои приведенным диаметром 3-6 мм. Установка представляет собой кристаллизатор в виде барабана диаметром 1 метр. Вращение кристаллизатора осуществляется при помощи электродвигателя и редуктора. Половину длины поверхности кристаллизатора обкатывает стальная бесконечная лента, которая фиксируется при помощи четырех роликов с ребордами. Над кристаллизатором закреплен разливочный узел, представляющий собой муфельную печь сопротивления, внутри которой установлен тигель с литником. Разливочный литник установлен строго вертикально над поверхностью кристаллизатора, и притирается к его поверхности [14].

Главная особенность данного оборудования - это высокая производительность до 250 кг/ч, но также есть ряд недостатков. Это внешний вид (прутки получаются в поперечнике в виде трапеции) и поверхность прутка (прутки имеют зазубрены и неровности по всей поверхности прутка). Данный метод получения длинномерных заготовок и полуфабрикатов является высокоскоростным затвердеванием расплава.

На базе Московского предприятия ЗАО «Аларм» освоено производство медно-фосфорных трудно деформированных припоев в виде лент, полос и калиброванных прутков диаметром до 3-х миллиметров методами быстрой закалки из расплава. Проволока, получаемая методом экстракции расплава, в сечении имеет форму «полумесяца». Для придания такой проволоке более компактной формы, производят ее горячее волочение, в результате чего получают прутки мерной длины круглого сечения. Однако, возможность такого метода не позволяет производить прутково-проволочную продукцию диаметром более 3-х миллиметров. Кроме того, волочение проволоки применяется для медно-фосфорных сплавов, содержащих до 4% олова, которые обладают некоторыми уровнем пластичности в горячем состоянии. Применение волочения проволоки, полученной методом экстракции из расплава, для большинства медно-фосфорных сплавов становится практически невозможным, вследствие их низкой пластичности и высокой хрупкости.

1.4 Обзор способов непрерывного литья заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов

Припойные сплавы должны соответствовать определенным требованиям к их составу, внешнему виду и диаметру заготовки. Припои применяют как для автоматической, так и для ручной пайки. Производство припоев в основном производят по стандартным технологическим схемам, представленным на рисунке 2.

Стандартная технологическая схема (рис. 2) состоит из следующих этапов: приготовление сплава, отливка слитков (диаметром 100-200 мм), резка слитков на мерные заготовки, их прессование или прокатка, операции волочения и термообработки. Все технологические схемы включают в себя многочисленные вспомогательные операции:

- стравливание окалины с поверхности;
- заострение и омыливание заготовок перед волочением;
- скальпирование катанки и промежуточных отжигов.

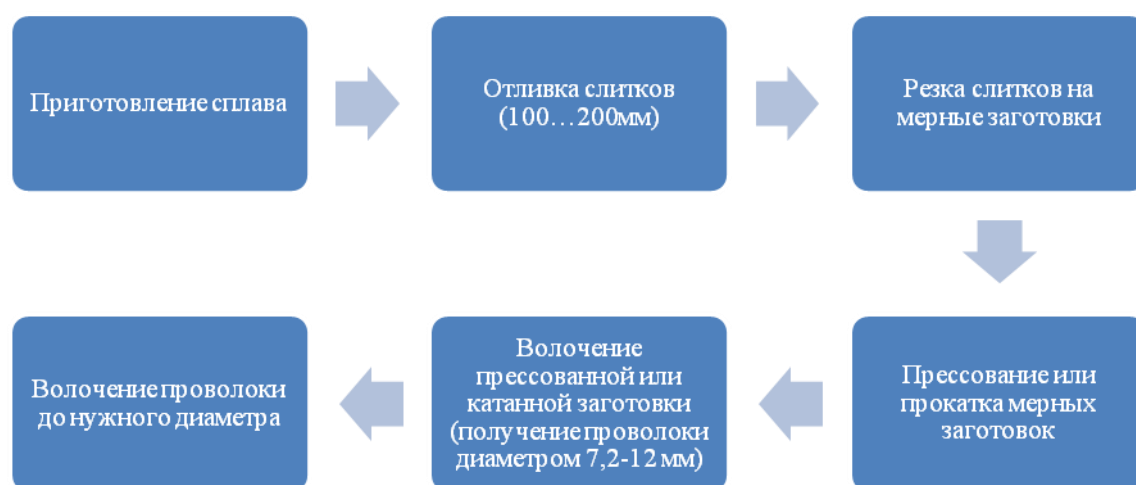


Рисунок 2 – Стандартная технологическая схема производства проволоки диаметра 4-10 мм.

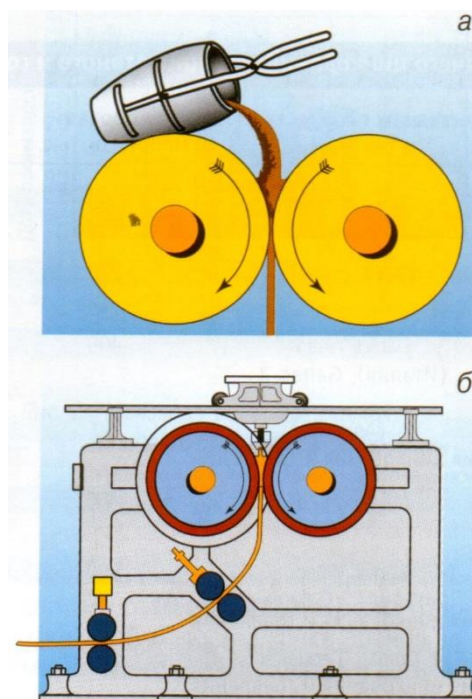
Современный спрос на проволоку и прутки из сложнелегированных припоев в России характеризуется ростом числа заказов малых объемов продукции. В этих условиях необходимо использование иных технологических схем, основанных на принципах энерго- и ресурсосбережения, а также универсальности, обеспечивающей 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.

Одной из альтернатив технологий получения мерных прутков припоя сечением от 4 до 10 мм является технология непрерывного литья заготовок.

Процессы непрерывного литья можно разделить на две большие группы: литьё в подвижный и неподвижный кристаллизатор. К литью в подвижный кристаллизатор скольжения относится метод Бессемера, Проперци, Хазелетта и т.д.

Родоначальником в производстве непрерывнолитых металлических заготовок можно считать английского изобретателя Генри Бессемера, который предложил способ бесслитковой прокатки и запатентовал его в 1865 году, рисунок 3.

На основе Бессемеровского метода получения тонких стальных полос, был разработан способ получения полуфабрикатов в виде листов, полос, прутков, применительно к цветным сплавам, названный бесслитковой прокаткой [15].



А – Эскиз, сделанный сэром Генри Бессемером;

Б – установка, запатентованная им в 1865 году.

Рисунок 3 – Непрерывное литье по методу Бессемера

Основной особенностью этого процесса является совмещение в непрерывной последовательности разливки, кристаллизации и деформации металла, осуществляемое во вращающихся валках. Большие затруднения встретились в выборе материала для валков, которые подвергаются воздействию жидкого металла и поэтому обладали малой стойкостью. Установлено, что расход валков при бесслитковой прокатке значительно больше, чем при обычной горячей прокатке.

Первоначально вопрос качества полосы, получаемой при бесслитковой прокатке по схеме Бессемера, не вызывал сомнений. Предполагалось, что заготовка бесслитковой прокатки должна быть значительно лучше по макро- и микроструктуре, чем полоса, полученная из слитка со всеми присущими ему недостатками (усадочная раковина, осевая рыхлость, сегрегация и т.п.). Планировалось, что чрезвычайно большая скорость охлаждения металла в валках стана и одновременная обработка остывшей, или ещё находящейся в твердожидком состоянии, сердцевины должна обеспечить равномерную мелкозернистую структуру получаемого материала. Это предположение казалось тем более основательным, что продуктом, получаемым со стана бесслитковой прокатки, должна была быть заготовка сравнительно тонкого сечения - 6 мм и ниже. Сильное охлаждающее действие поверхности валков увеличивает зону мелких кристаллов. Транскристаллизационная зона перемещается в область деформации в твердожидком состоянии, вследствие чего задерживается рост зерен, и также получается мелкозернистая структура. Явление сегрегации, вследствие кратковременности процесса образования заготовки, не должно иметь места. Газовые пузыри также должны отсутствовать, т.к. процесс протекает под давлением. Однако, многочисленные эксперименты, проведенные с различными марками стали показали, что получаемая заготовка имеет значительное количество дефектов, резко снижающих её качество и затрудняющих дальнейшую обработку: заусенцы, рваные края, неравномерную толщину, как по ширине, так и по длине, волнистую поверхность. Изучение этих дефектов показало, что причина их образования лежит в самом процессе работы валков стана бесслитковой прокатки с ребордами, щеками.

Полоса цветных металлов бесслитковой прокатки имеет неудовлетворительную поверхность – каплевидные включения, заливины («мозговая» поверхность), плены и трещины [16].

Более совершенный метод был запатентован в 1947 году итальянским изобретателем Иларио Проперци, который получил свой первый патент на катанку из цветных металлов методом непрерывного литья и проката (НЛП). Тогда же в Милане (Италия) он основал компанию «Континуус-проперци», которая в дальнейшем стала мировым лидером в производстве оборудования НЛП и соответствующих исследованиях, и разработках. Первые линии предназначались для изготовления проволоки из свинца и цинка. Однако, с самого начала предназначалось использовать этот метод для производства катанки из меди и алюминия – важнейших материалов для кабельной промышленности. Вскоре оборудование и технология для этих целей были разработаны, и «процесс Проперци» стал использоваться повсеместно. Первые линии НЛП алюминиевой катанки были установлены в 1949-1950 годах на заводах компании Imperial Chemical Industries (Англия), Montecatini (Италия), Pechiney

(Франция). Что касается медной катанки, то первые линии были поставлены в 1964 году в США компании Southwire и в Ташкент СССР. С тех пор в разных странах были сданы в эксплуатацию свыше 400 линий различной производительности.

Оригинальная установка Проперци, показана на рисунке 4, состоит из колеса с массивным медным ободом, в котором сделан профиль треугольного сечения (так же применяется прямоугольного и другие), закрывающийся сверху стальной лентой. Медный обод колеса играет роль кристаллизатора. С противоположной стороны прутки захватываются расправляющими и отводятся в сторону. Получающийся треугольный профиль со стороны, равной 21 мм, направляется в валки специальной калибровки, где прокатывается на круглую заготовку для проволоки. Диаметр рабочего колеса равен 900 мм, скорость вращения 1,5-2,5 об/мин, производительность 150-430 кг/час [17,18,19].

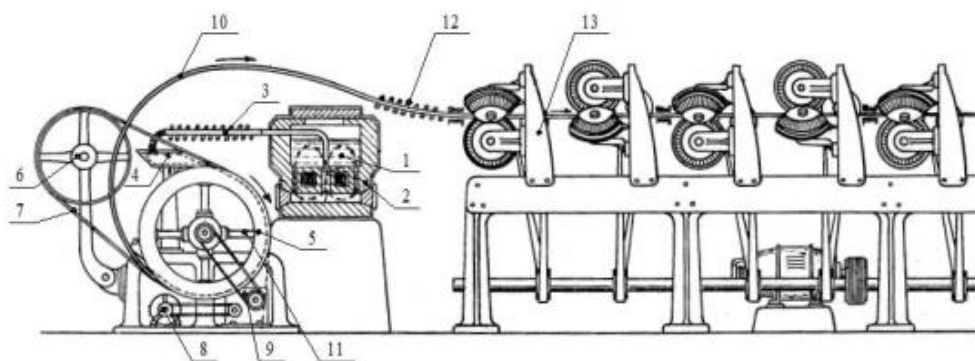


Рисунок 4 – Принципиальная схема установки Проперци: 1- расплав меди; 2- индукционная печь; 3- огнеупорная труба; 4- разливочный контейнер; 5- литейное колесо; 6- натяжное колесо; 7- лента; 8 – двигатель; 9 – система передаточных механизмов; 10 – непрерывно-литая заготовка; 11 – спицы; 12 – проводки; 13 – прокатный стан.

Важной особенностью литья по методу Проперци является то, что заготовка перемещается вместе с кристаллизатором, а значит, скорость литья определяется только от тепловых возможностей самого кристаллизатора. Установки такого типа разрабатывались для литья меди и алюминия, которые обладают высокой пластичностью, поэтому не было смысла производить проволоку мелкого сечения, а отливались заготовки достаточно крупного сечения, которые в последствии, достаточно просто обрабатывались давлением до нужного сортамента. Кроме того, возникают сложности в организации точной дозировки расплава при литье заготовок сравнительно малого сечения, диаметром менее 6 мм. Также, данные установки

рассчитаны на выпуск крупных серий продукции одного типа размера и одного состава сплава. Переход на другой размер является сложным и трудоемким процессом, а переход на другой состав сплава практически не возможен.

Другой вид кристаллизаторов применяется в машинах непрерывного литья по способу "HAZELETT". В установках с ленточным кристаллизатором, представленным на рисунке 5, расплав поступает в зазор между двумя гибкими стальными лентами, натянутыми на нескольких приводных, опорных и натяжных роликах. Величина зазора определяет толщину заготовки 20...50 мм. Ширина заготовки задается двумя рядами коротких колодок, закрепленных на нижней ленте. Ширина заготовки составляет 400...800 мм. Для отвода тепла предусмотрено мощное водяное охлаждение. Скорость литья в машине непрерывного литья составляет 300...600 м/ч. Производительность установки 50...60 т в час по меди [20].

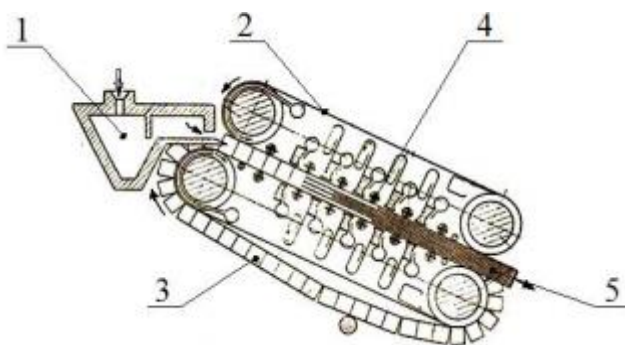


Рисунок 5 - Принципиальная схема машины непрерывного литья HAZELETT: 1 – контейнер; 2 – стальная лента; 3 – цепь; 4 – компенсирующие ролики; 5 – непрерывно-литая заготовка Сортамент продукции, выпускаемой по технологии CONTIROD – катанка диаметром от 8 до 23 мм [21]

Вторая группа процессов непрерывного литья - это литье в неподвижный кристаллизатор скольжения. Под кристаллизаторами скольжения понимают такие кристаллизаторы, стенки которых в поперечном сечении образуют замкнутый контур и не перемещаются относительно друг друга в продольном направлении. Эти кристаллизаторы открыты с обеих своих торцевых сторон и слиток в них перемещается (скользит) под действием собственного веса, или под действием давления, или приложенного извне тянущего усилия. Кристаллизаторы скольжения обеспечивают то преимущество, по сравнению с литьем в подвижные, что во время литья они всегда заполнены металлом так, что усадочная раковина не может образоваться, и металл при входе в кристаллизатор не соприкасается с вредными газами. Данные факторы так же

обеспечивают хорошую частоту поверхности заготовок, практически не отличающуюся от частоты поверхности, получаемой при волочении проволоки. Соответственно, продукция, полученная методом непрерывного литья в неподвижный кристаллизатор скольжения, больше подходит для получения прутков и проволоки малого сечения.

Известно, что при непрерывном литье заготовок малых сечений из цветных сплавов, кристаллизаторы скольжения соединяют с металлоприемником [22, 23]. При непрерывном вертикальном литье вниз кристаллизатор соединен с дном металлоприемника, рис. 6а, а при непрерывном горизонтальном литье встроен в боковую стенку металлоприемника, рис. 6б. На рисунке 6в показан способ непрерывного литья с вытяжкой заготовок вертикально вверх.

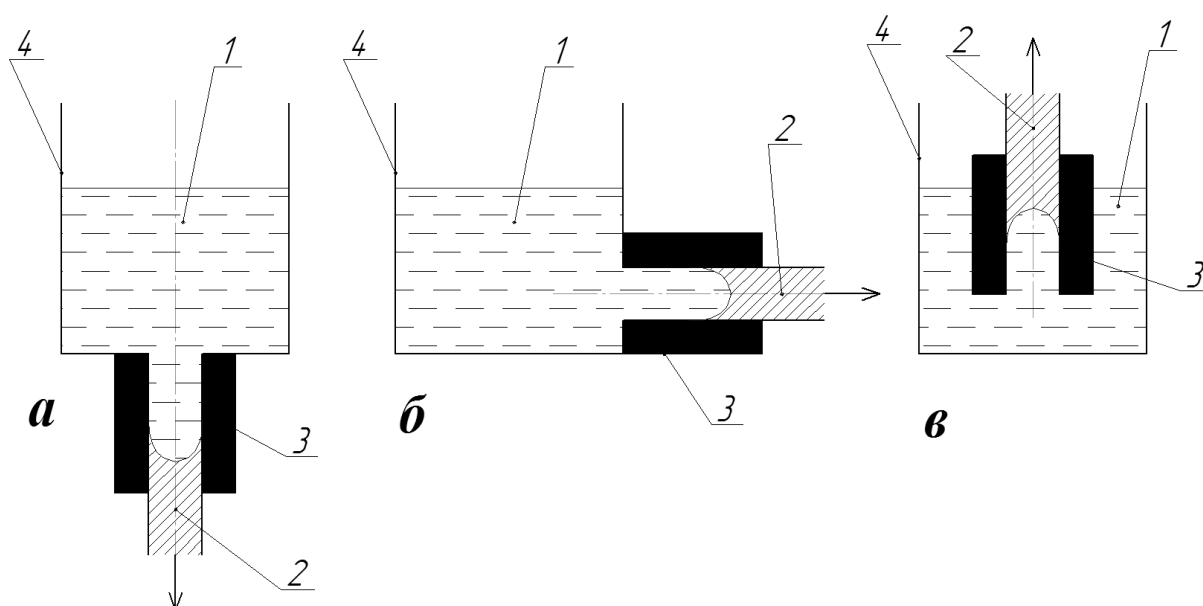


Рисунок 6 – Принципиальные схемы непрерывного литья заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов: 1 – расплав; 2 – заготовка; 3 – кристаллизатор; 4 - металлоприемник

Стабильность процесса непрерывного литья и качество слитков определяется протяженностью фронта кристаллизации и свойствами сплава, а также отношением объема жидкой фазы к твердой в зоне затвердевания. Процесс затвердевания заготовки в каждом из трех способов литья уникальный и имеет принципиальные отличия в процессе литья друг от друга, но также имеет ряд общих характеристик.

При процессе непрерывного вертикального литья в основном отливаются слитки больших сечений (80...500 мм). Слитки отливаются непрерывно или пошагово, чем больше диаметр или толщина слитка, тем меньше должна быть скорость литья.

Отвод тепла в кристаллизаторе совершается не только в горизонтальном направлении, но и в вертикальном, где отводится 20...40% всего количества тепла. Температура на поверхности

непрерывно меняется по мере перемещения слитка. После образования первых слоев твердой корки температура снижается ниже точки кристаллизации металла примерно на 100...200 °С. Затем, из-за линейной усадки в поперечном направлении, слиток отходит от стенки кристаллизатора, образуется воздушный зазор. Отвод тепла от поверхности слитка замедляется, и температура на поверхности либо перестает снижаться, либо даже начинает повышаться. Это состояние сохраняется до выхода данного сечения слитка из кристаллизатора, где начинается действовать вторичное охлаждение.

Температура расплава в жидкой лунке обычно близка к температуре ликвидуса сплава и превышает её на несколько градусов. Увеличение температуры жидкого металла, заливаемого в кристаллизатор, незначительно сказывается на температуре расплава в лунке. Вследствие интенсивной теплопередачи в металлических расплавах, поступающая тепловая энергия рассеивается по всему объёму (глубине) лунки с соответствующим возрастанием площади фронта кристаллизации, которая воспринимает и передает увеличенный поток тепла в твердую корку.

В случае литья сплавов, имеющих заметный интервал кристаллизации (свыше 30 °С), в затвердевающем слитке возникает двухфазная область, ограниченная изотермами ликвидуса и солидуса (рис. 7). Питание объемной усадки в условиях непрерывного литья осуществляется достаточно свободно, поскольку происходит направленное затвердевание. Появление усадочной рыхлоты в центре слитка наблюдается в случае сплавов с достаточно большим интервалом кристаллизации (более 50...100 °С) при завышенной скорости литья. В этих условиях двухфазная область настолько вытягивается по длине слитка, что возможно ее местное перемерзание на отдельных участках. Часть двухфазной области отсекается от жидкой лунки и не может получить дополнительного количества расплава для пополнения убыли объема при кристаллизации жидкости в промежутках между ветвями дендритов. В целом же, пока перед двухфазной областью имеется жидкая область, расплав достаточно свободно перемещается в пределах двухфазной области от изотермы ликвидуса к изотерме солидуса, и тем самым осуществляется надежное «питание» затвердевающих слоев слитка.

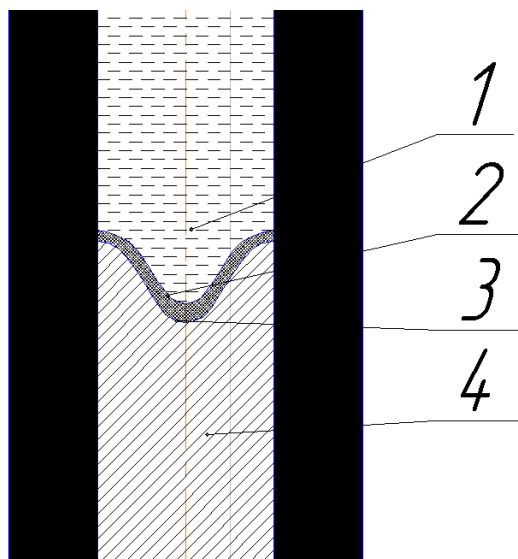


Рисунок 7 – Двухфазная область при непрерывном литье вниз слитка из сплава с интервалом кристаллизации: 1 – жидкость; 2 – температура ликвидуса сплава; 3 – температура солидуса сплава; 4 – закристаллизовавшийся слиток.

Очень важно при непрерывном литье обеспечить одинаковую интенсивность подвода и отвода тепла на всех участках объема и поверхности слитка во всех сечениях. В цилиндрических слитках это достигается равномерным распределением расплава в лунке и равномерным отводом тепла с его поверхности.

В СССР применялись установки непрерывного литья вниз конструкции института "Гипроцветметобработка", на которых отливаются круглые слитки диаметром 25 - 120 мм из оловянных, оловянно-фосфористых, оловянно-цинковых, оловянно-свинцово-цинковых и кремнистых бронз. Приготовление расплава производится в индукционных канальных или высокочастотных тигельных печах емкостью 250 и 600 кг [24]. Схема установки для литья прутков представлена на рисунке 8.

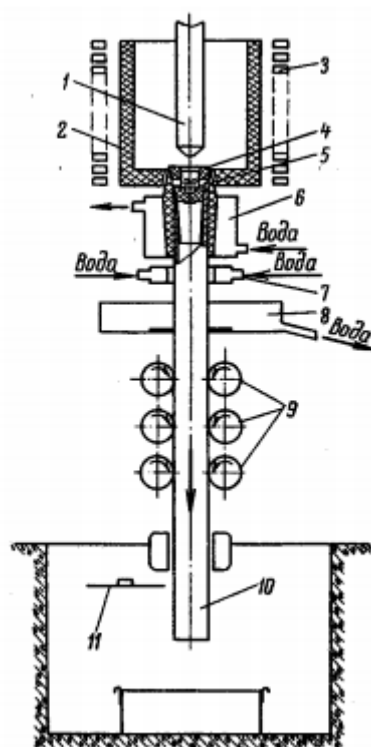


Рисунок 8 - Вертикальная установка для непрерывного литья труб, разработанная институтом "Гипроцветметобработка":

1 - стопор; 2 - тигель; 3 - индуктор; 4 - распределительное устройство; 5 - графитовый кристаллизатор; 6 - водоохлаждаемая рубашка; 7 - кольцо вторичного охлаждения; 8 - водосборник; 9 - тянущие ролики; 10 - заготовка; 11 - дисковая пила.

На данной конструкции установки отливались слитки диаметром от 25 мм, а производство слитков диаметром менее 10 мм на данном оборудовании было не рентабельно из-за очень малой производительности металла. Однако непрерывное литье заготовки находит широкое применение в ювелирной промышленности при производстве обручальных колец, серег, кулонов и других украшений. Для получения таких заготовок в Институте технологии металлов НАН Беларуси была спроектирована и изготовлена установка непрерывного вертикального литья.

Установка, показанная на рисунке 9, состоит из индукционного плавильного узла 1, в который подается инертный газ, кристаллизатора 2, механизма вытяжки 3 и пульта управления. Тигель плавильного узла и кристаллизатор находятся на одной оси. Они соединены друг с другом таким образом, что расплав через канал в днище тигля попадает непосредственно в рабочую полость кристаллизатора. Тигель, после того как металл в нем расплавлен и доведен до необходимой величины перегрева, играет роль подогреваемого металлоприемника. При этом исключаются газонасыщение, окисление и потери металла при переливах, а подача металла в

кристаллизатор со дна тигля исключает засорение заготовок неметаллическими и шлаковыми включениями. Кроме того, отсутствуют дефекты от падающей струи, характерные для вертикального литья.

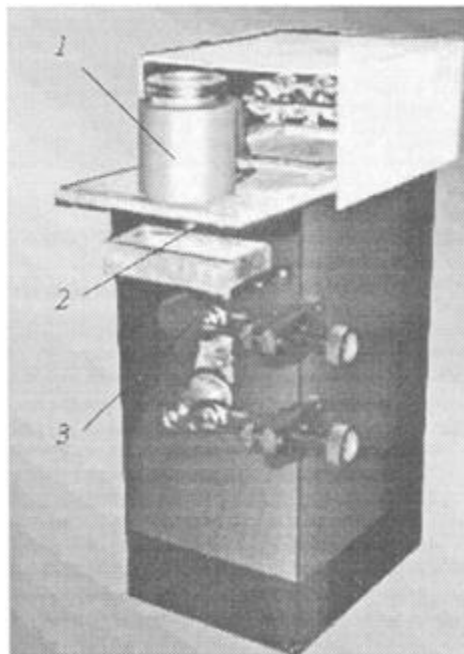


Рисунок 9 - Установка непрерывного литья, разработанная в институте технологии металлов НАН Беларуси.

При плавке и литье в плавильный узел подается инертный газ (аргон), который снижает потери драгоценных металлов, связанные с угаром, и защищает графитовый тигель от окисления, срок службы которого при этом увеличивается в 5 раз. Тигель выполнен таким образом, чтобы дно его рабочей полости находилось в центральной части индуктора, где возникают наибольшие вихревые токи, и достигается наибольший разогрев. Таким образом, наиболее горячий металл, имеющий хорошую жидкотекучесть, находится в нижней части тигля.

Кристаллизатор является основным узлом установки непрерывного литья. Его формообразующая поверхность представляет собой замкнутый контур, соответствующий профилю отливаемой заготовки. Кристаллизатор состоит из сварного металлического корпуса и графитовой рабочей вставки. Расплав из тигля поступает в рабочую полость кристаллизатора по соединительному каналу [25,26].

Установка позволяет получать проволоку диаметром 3-8 мм из сплава золота ЗлСрМ 585-80, меди, медных сплавов и диаметром 6-8 мм из серебряных припоев марок ПСр-40, ПСр-45, ПСр-70, алюминия и его сплавов, таблица 4.

Таблица 4 - Технические характеристики установки непрерывного литья

Параметр	Значение
Напряжение питания трехфазного тока, В	380
Потребляемая мощность, кВт	10
Емкость тигля, кг	
ЗлСрМ 585-80	3
ПСр-70	2
Диаметр отливаемой заготовки, мм:	
минимальный	3
максимальный	8
Максимальная температура в тигле, °С	1300

Таблица 5 - Основные технологические режимы литья

Материал	Диаметр, мм	Скорость литья, мм/мин	Длительность цикла, с	Температура металла в тигле, °С
Медь	3	110	1,5	1150-1200
	4	120	1,9	1150-1200
	5	120	1,2	1150-1200
ЗлСрМ 585-80	3	110	2,0	1040-1060
	4	130	1,9	1040-1060
	5	130	1,3	1040-1060
ПОС-60	6	40	1,2	400-430
ПСр-70	6	45	1,3	840-860
ПСр-45	6	45	1,5	840-860

Данная установка непрерывного литья позволяла получать прутки медных сплавов сечением от 4...10 мм, но производительность не превышала 1 кг/ч. Особенности кристаллизации слитка при литье вниз не позволяют повысить производительность установки.

Главное преимущество процесса горизонтального непрерывного литья – значительно меньшие стоимость и габариты установки. На подобных установках получают цилиндрические слитки сравнительно небольших сечений диаметром 12...250 мм.

Для горизонтального литья характерна различная степень прилегания слитка к стенкам кристаллизатора по нижней и верхней сторонам. На нижней стороне под действием силы тяжести слиток плотно соприкасается с рабочей поверхностью кристаллизатора, и теплопередача в этом направлении осуществляется беспрепятственно. На верхней стороне расплав вначале прилегает так же хорошо к поверхности кристаллизатора под действием металлостатического давления. Однако, как только возникает достаточно прочная корка, металлостатическое давление перестает действовать. Из-за линейной усадки и действия силы тяжести на верхней стороне возникает зазор[27,28]. Теплопередача затрудняется, и затвердевание здесь существенно запаздывает, по сравнению с нижней стороной. Из-за действия тяжести возникают значительные силы трения по нижней стороне слитка.

Процессы затвердевания заготовки, протекающие при горизонтальном непрерывном литье (рис. 10), отличаются от процессов затвердевания при вертикальном непрерывном литье [29, 30]. Эта особенность оказала решающее воздействие на образование дефектов (надрывов, трещин, ликвационных треугольников) и их устранение.

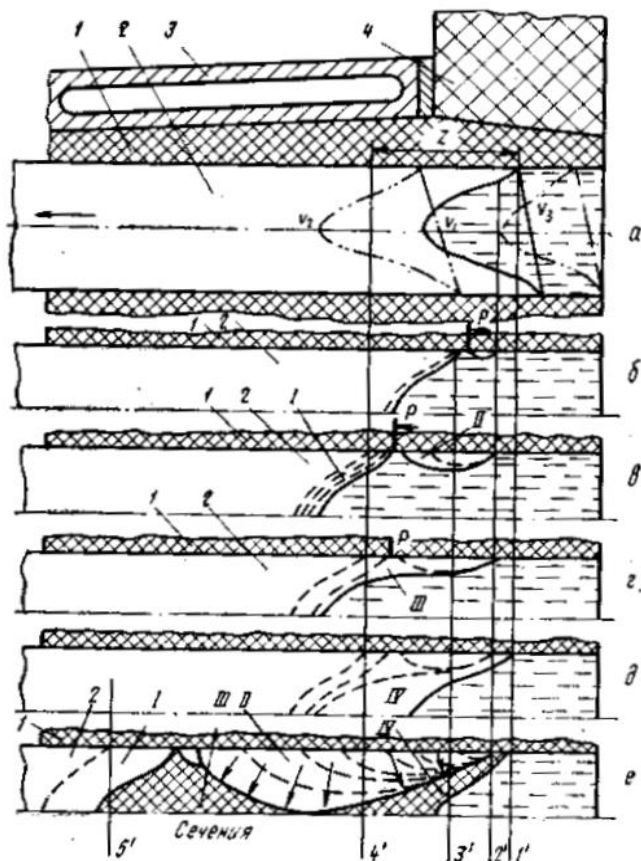


Рисунок 10 – Схема затвердевания при горизонтальном непрерывном литье с периодическим вытягиванием заготовки. Расположение фронта затвердевания заготовки в кристаллизаторе: а- при различных скоростях литья, б,в – в период вытягивания; г,д – в период остановки; е – при предельном шаге вытягивания; I-IV– зоны затвердевания; 1 – графитовый кристаллизатор; 2 – заготовка; 3 – водоохлаждаемый кожух; 4 - металлоприемник

Рассмотрим схему затвердевания заготовки, представленную на рис. 10. Для стабильного процесса литья в периодическом режиме вытягивания шаг разделяют на периоды вытягивания и остановки. Положение, представленное на рис. 10 а, соответствует концу остановки, когда граница раздела твердой и твердо-жидкой (фонт затвердевания) области заняла свое крайнее правое положение в виде лунки при средней скорости литья v_1 . Во время остановки фронт затвердевания перемещается направо по мере охлаждения графита; при этом скорость его перемещения замедляется, так как с удалением от водоохлаждаемого кожуха снижается интенсивность отвода тепла. На рис. 10, а штрихпунктирной линией показано также положение фронта затвердевания при скорости литья v_2 и v_3 , где $v_2 > v_1 > v_3$. При скорости литья v_1 фронт

затвердевания по верху достиг за время остановки сечения 1', слева от которого температура стенки кристаллизатора ниже, а справа выше температуры затвердевания металла или сплава.

В начальный момент затвердевшая заготовка стягивается с поверхности кристаллизатора, без разрыва ранее сформировавшейся корочки. Это является принципиальным вопросом, так как если предположить при рассмотрении стабильного процесса формирования заготовки, что при вытягивании происходит обрыв корочки и начинается зависший участок, то следует признать, что его возможно удалить и при последующих шагах вытягивания. Вполне естественно, что такой зависший участок может разрастаться, приводя к нарушению стабильности процесса и обрыву заготовки.

Очевидно возможен обрыв отдельных участков вновь сформировавшейся корочки на поверхности кристаллизатора в том случае, если силы сцепления их с поверхностью графита превысят прочностные свойства, но при том следует предположить, что зависшие участки растворяются за счет тепла перегрева жидкого металла или расплава, поступающего за вытягиваемой заготовкой, благодаря которому на некотором участке 1'-2' (см. рис. 10, б) температура стенки кристаллизатора становится выше температуры затвердевания металла или сплава.

Затвердевание заготовки начинается в сечении 2' (см. рис. 10, б). Растущие кристаллиты, не имея достаточной прочности, не могут быть увлечены заготовкой и образуют стационарную корочку, формирующуюся в период вытягивания. Специфика ее образования состоит в том, что в процессе вытягивания она, оставаясь на месте, непрерывно растет по мере освобождения поверхности графитового кристаллизатора, как бы догоняя вытягиваемую заготовку.

Одновременно в процессе всего периода вытягивания продолжается затвердевание металла или сплава на вытягиваемой заготовке. Схематично нарастание слоев на движущемся и стационарном фронтах затвердевания за время вытягивания показано на рис. 10, б, в. Необходимо отметить, что с момента возникновения стационарной корочки между нею и вытягиваемой частью заготовки образуется передвигающаяся зона разрыва, в которую непрерывно поступает жидкий металл, питающий растущие справа и слева кристаллиты. На рис. 10, б—г зона разрыва, названная стыком фронтов затвердевания, и направление ее перемещения показано стрелкой *P*.

Таким образом, можно выделить две зоны затвердевания, сформировавшиеся за период вытягивания одного шага (см. рис. 10, в): *I* — зона непрерывного затвердевания на вытягиваемой части заготовки; *II* — зона стационарной корочки.

Рассмотрим период остановки. Первоначально происходит затвердевание стыка фронтов и образование третьей промежуточной или центральной зоны (см. рис. 10, г). В дальнейшем формируется зона остановки *IV* (см. рис. 10, д), и фронт затвердевания к концу остановки

достигает своего прежнего положения — сечения I' (рис. 10, а), после чего цикл повторяется вновь [31].

Все эти обстоятельства приводят к необходимости применять кристаллизаторы с графитовыми рубашками ради их малого коэффициента трения и вытягивать слиток не непрерывно, а путем периодических шагов вперед и остановок. Иногда предусматривают небольшой шаг назад. За время остановки корка успевает приобрести достаточную толщину и прочность, так что при последующем шаге вперед она не разрушается.

Первые попытки практической реализации процесса горизонтального непрерывного литья были сделаны в привязке к алюминиевой проволоке. Один из таких первых способов был предложен В.Г. Головкиным и внедрен в Советском Союзе в начале 40-х годов прошлого века [32]. Схема способа показана на рисунке 11.

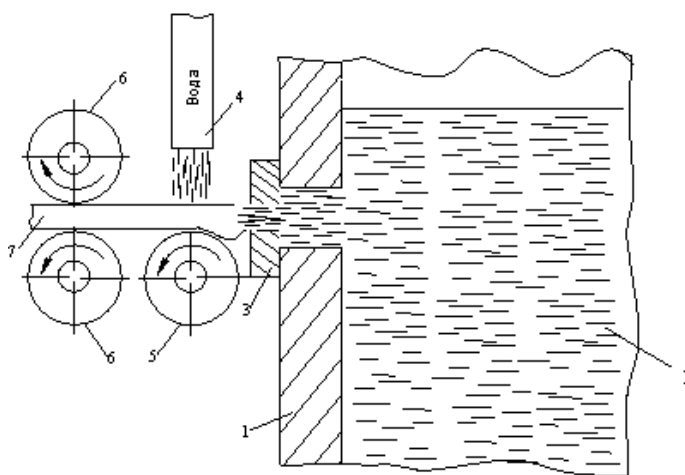


Рисунок 11 - Схема процесса непрерывного литья проволоки способом свободного истечения жидкого металла:

1 - печь; 2 - расплав алюминия; 3 - асбоцементная плита; 4 - душирующее устройство; 5 - опорный ролик; 6 - тянуще-калибрующие ролики; 7 - проволока.

Процесс начинался при помощи затравки, далее алюминий свободно вытекал из печи через круглое отверстие, размещенное в асбоцементной плите. Этот материал не смачивается жидким алюминием и не теплопроводен. Вышедший металл попадал на опорный ролик, а сверху на него интенсивно подавали воду. Скорость движения проволоки составляла 34...40 м/ч. Этот способ позволял получать проволоку диаметром 3...9 мм. Для повышения прочности и получения проволоки меньших диаметров применяли прокатку и волочение.

Для увеличения производительности в 1967 г. построена многоручьевая горизонтальная машина непрерывного литья заготовок диаметром 17 мм из оловянно фосфористой бронзы для дальнейшего волочения на проволоку.

Для обогрева металлоприемника применили индукционные печи с вертикальным каналом типа «Аякс». Общий вид машины после реконструкции показан на рисунке 12.

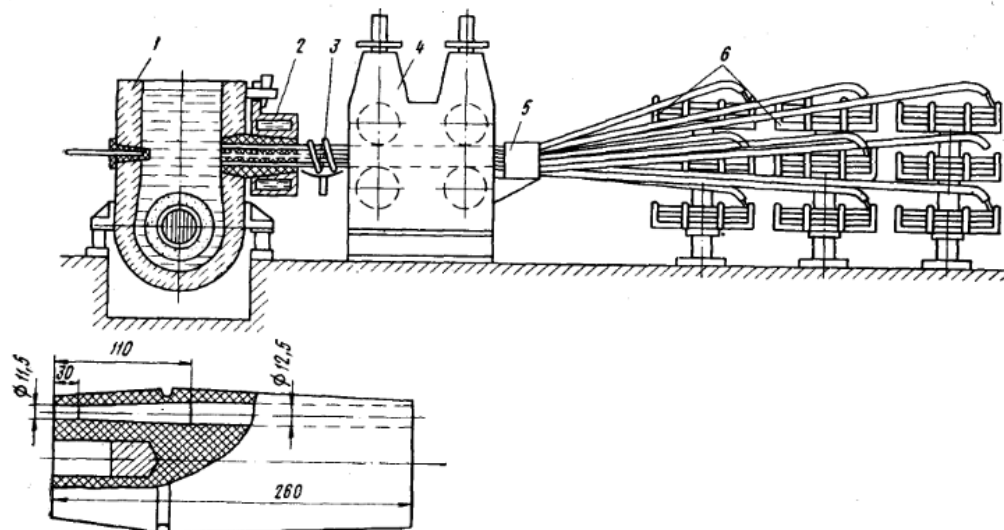


Рисунок 12 - Многоручьева промышленная машина:

1 – металлоприемник с индукционным обогревом; 2 – кристаллизатор; 3 – вторичное охлаждение; 4 – тянущая клеть; 5 – направляющие трубы; 6 - моталки

Многоручьева графитовый кристаллизатор имел несколько формообразующих литейных каналов, расположенных по окружности с одинаковым шагом. Первоначально ось каждого ручья была наклонена под небольшим углом к оси кристаллизатора, для схождения заготовок в пучок перед первой парой роликов тянущей клетки, затем ручьи стали изготавливать параллельными. На рисунке 13 представлены исследованные варианты конструкции кристаллизаторов: с тремя ручьями в центре по проему (рис.13,а), трехручьева с увеличенным расстоянием между каналами (рис.13,б), трехручьева с тепловой отсеккой (рис.13,в), трехручьева с удлиненной неохлаждаемой частью и девятью каналами для трехкратной разливки заготовок (рис.13,г), свободные каналы при этом закрывали графитовыми пробками, семиручьева (рис.13,д), семиручьева с конусным хвостовиком для третьего и четвертого вариантов обогрева (рис.13,е), семиручьева с тепловой отсеккой (рис.13,ж) [33].

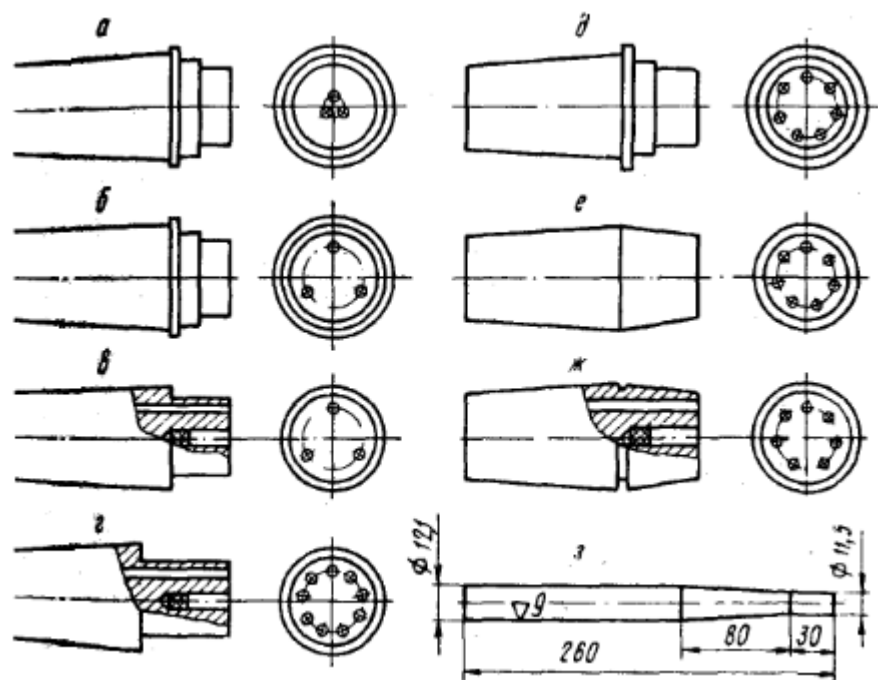


Рисунок 13 - Типы многоручьевых кристаллизаторов

Горизонтальное непрерывное литье сплавов имеет ряд преимуществ перед вертикальным полунепрерывным. Это, прежде всего, высокий технологический выход годного и низкие энергозатраты, благодаря исключению операций прессования и прокатки. Схемы установки горизонтального непрерывного литья и медно-графитового кристаллизатора приведены на рисунке 14.

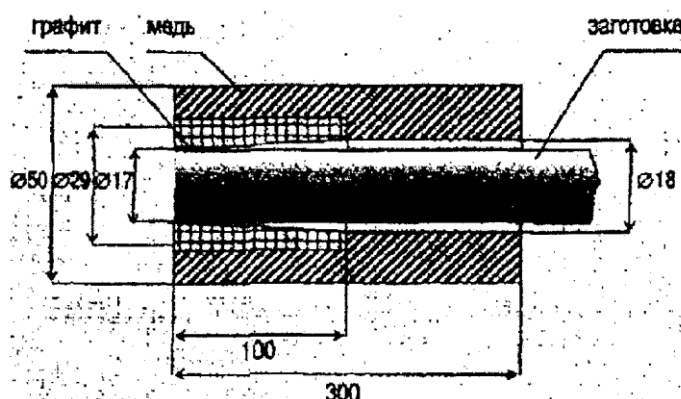
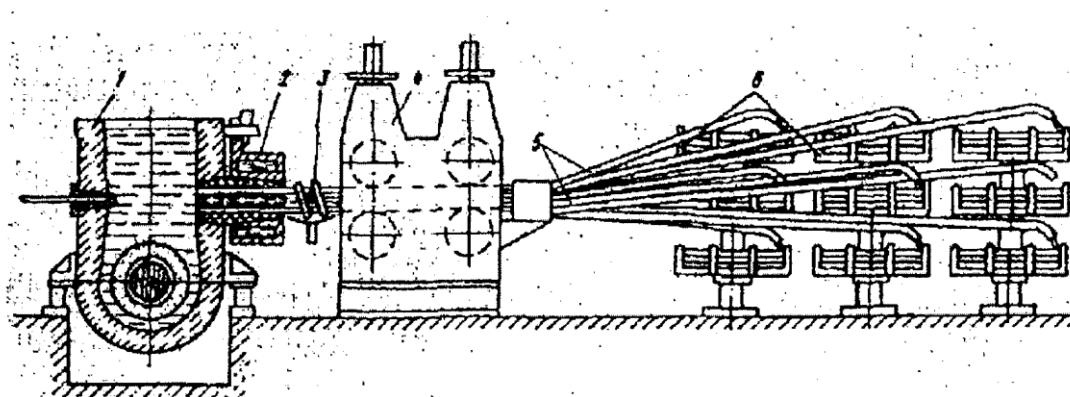


Рисунок 14 - Схемы установки непрерывного горизонтального литья и медно-графитового кристаллизатора:

1- индукционная каналная печь; 2- кристаллизатор; 3- устройство вторичного охлаждения;
4- тянущая клеть; 5- направляющие трубы; 6 - моталки.

Кристаллизатор установки горизонтального непрерывного литья состоит из двух частей: графитовой (длиной 100 мм) и медной (длиной 200 мм). Внутренняя поверхность графитовой части кристаллизатора выполнена с конусностью 1:100.

Получение слитков из медно-фосфористых и медно-цинковых сплавов с широким интервалом кристаллизации на установках горизонтального непрерывного литья трудно реализовать из-за положения фронта затвердевания. Наклон фронта затвердевания приводит к неравномерному затвердеванию расплава и к разному химическому составу слитка по его сечению, так же это приводит к протяженности фронта затвердевания и высокой вероятности обрыва слитка в кристаллизаторе.

Получивший ограниченное применение, преимущественно для меди и медных сплавов, способ непрерывного литья с вытяжкой заготовок вертикально вверх является наиболее технологичным, применительно к слиткам малого сечения [8]. В этом случае кристаллизатор, чаще всего, является независимым по отношению к металлоприемнику. Данный способ был

разработан и внедрен финской компанией «Outocumpu Oy» в 70-х годах XX века для получения бескислородной меди. Получаемая таким образом литая заготовка диаметром от 8 до 25 мм предназначалась для последующего волочения в проволоку с предварительной холодной прокаткой или без нее (в зависимости от сечения заготовки). Данная технология оказалась рентабельной при сравнительно небольшом годовом выпуске литых заготовок из бескислородной меди – от 2 тыс. т/год [34].

Как мы знаем, температура стенки кристаллизатора уменьшается в направлении вытяжки слитка. Процесс затвердевания заготовки носит нелинейный характер и начинается в зоне, где стенка кристаллизатора имеет относительно высокую температуру, что обуславливает формирование протяженной тонкой корки. Сила трения между затвердевающей коркой и неподвижной стенкой кристаллизатора определяется протяженностью корки, гидростатическим давлением и чистотой рабочей поверхности кристаллизатора. Напряжения, вызванные трением корки о рабочую поверхность кристаллизатора, довольно часто превышают ее прочность в силу малой толщины и высокой температуры. Обрыв, или так называемое зависание корки внутри кристаллизатора довольно частое явление. С увеличением сечения слитка обрыв корки не оказывает значимого влияния на стабильность литья и качество заготовки. Во многом это объясняется значительной величиной отношения объема жидкой фазы к твердой.

Теплопередача в кристаллизаторе является основой процесса непрерывного литья. Вместе с тем, теплопередача является лимитирующим фактором. Она не только ограничивает производительность литья, но и в значительной мере определяет качество отливаемых заготовок. Очевидно, что контроль процесса теплоотвода является ключевым элементом построения эффективной технологии непрерывного литья медных и латунных заготовок.

Процесс теплопередачи в кристаллизаторе достаточно сложен, и в значительной мере зависит от величины и протяженности усадочного зазора, возникающего между слитком и графитовой рубашкой кристаллизатора. Расположение и величина зазора определяются усадкой сплава и гидростатическим давлением расплава на затвердевающую корочку металла. Схематически процесс формирования заготовки в кристаллизаторе можно разбить на три зоны, как показано на рис.15:

в зоне (1) жидкий металл находится в контакте с графитовой рубашкой кристаллизатора;

в зоне (2) затвердевающая тонкая корочка плотно прижимается к рабочей стенке кристаллизатора, так как гидростатическое давление расплава некоторое время препятствует образованию усадочного зазора;

в зоне (3) возникает усадочный зазор, приводящий к значительному снижению теплопередачи [35].

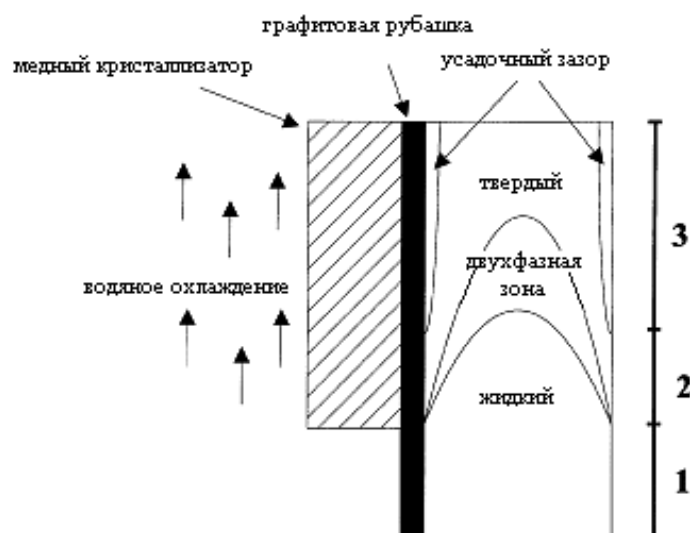


Рис. 15 – Схема процесса формообразования заготовки в кристаллизаторе

В нижней части кристаллизатора графитовая рубашка выступает ниже его медной стенки и не охлаждается, находясь непосредственно в расплаве. На уровне сопряжения графитовой рубашки с медной водоохлаждаемой стенкой кристаллизатора, на рабочей поверхности графитовой рубашки начинает нарастать твердая корка металла. В случае чистой меди, обладающей высокой теплопроводностью, протяженность лунки слитка сравнительно мала. В случае литья латуни, затвердевающей в интервале температур и обладающей более низкой теплопроводностью, протяженность лунки оказывается больше. С момента образования усадочного зазора теплопередача резко снижается, так как зазор создает естественное термическое сопротивление для отвода тепла. При литье вверх образование усадочного зазора в основном определяется усадкой сплава, так как гидростатическое давление расплава довольно низкое.

С уменьшением сечения слитка обрывы корки повышают дефектность заготовки (рис. 16), и снижают стабильность литья. Кроме того, с уменьшением сечения слитка увеличивается отношение длины графитовой рубашки к диаметру заготовки, что приводит к соответствующему снижению градиента температур по длине графитовой рубашки, и, в конечном счете, к увеличению протяженности фронта кристаллизации. Поэтому, вне зависимости от направления вытяжки заготовки, стабильность и качество литья при уменьшении сечения заготовки повышают, используя пошаговый режим вытяжки слитка. Благодаря пошаговому режиму оборвавшийся участок за время паузы успевает надежно соединиться с основным фронтом затвердевания. При литье заготовок диаметром менее 10 мм

стабильность и качество слитков повышают путем минимизации гидростатического давления расплава на фронт кристаллизации, и уменьшения протяженности фронта кристаллизации за счет повышения градиента температур по длине графитовой рубашки кристаллизатора [36].

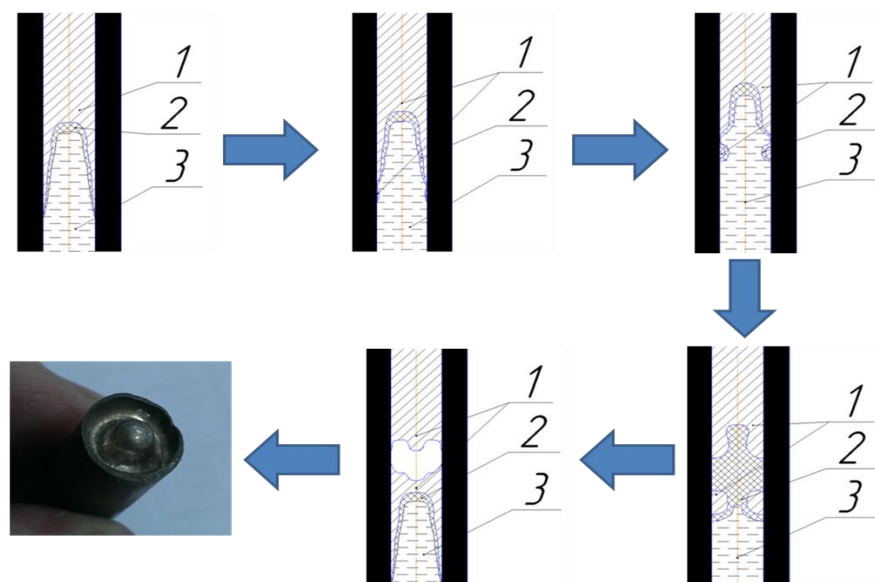


Рисунок 16 - Схема разрушения заготовки при непрерывно пошаговом литье вверх: 1 – сформировавшаяся заготовка; 2 – двухфазная область; 3 – расплав.

Оборудование для непрерывного литья вверх заготовок малого сечения из цветных металлов и сплавов широко представлены различными компаниями. К наиболее крупным компаниям по производству оборудования для непрерывного литья меди, медных сплавов являются: "Rautomead Limited", "MARS Conticast technologies" и "UPCAST".

На протяжении более 30 лет "Rautomead Limited" специализируется в разработке, изготовлении и продаже оборудования для непрерывного литья цветных металлов и сплавов. Сейчас в эксплуатации находятся более 300 машин Rautomead, работающих более чем в 47 различных странах по всему миру.

В компании есть несколько направлений в области непрерывного литья металлов. Одно из них — это вертикальное вытягивание заготовки вверх для медной проволоки. Компактные комплексные установки, для изготовления бескислородной медной катанки с высокой электропроводностью для последующего волочения проволоки, представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Компактные комплексные установки для медной катанки

Модель	Размер катанки, мм	Мощность, кВ-А	Загрузка	Годовая выработка, тонн
RFS-2200	8,0 – 30	300	Катод, вручную	3
RS 2200	8,0 – 30	300	Катод, вручную	3,000 - 5,000
RS 3000	8,0 - 30	360	Катод/автоматически	5,000 - 6,000
RDG 150	8,0 – 30	750	Катод/автоматически	10,000 - 12,000
RDG 240	8,0 – 30	1200	Катод/автоматически	15,000 - 20,000
RDG 360	8,0 - 30	1700	Катод/автоматически	25,000 - 30,000

Технология непрерывного литья прутка из бескислородной меди рисунок 17.



Рисунок 17 - Компактные комплексные установки для изготовления бескислородной медной катанки RS 3000/6.

В качестве сырья используется высококачественный медный катод класса А или эквивалент, в который можно добавлять до 10% высококачественного медного лома. Стандартные установки можно использовать для производства прутка диаметром 8-12,5 мм (рис.18), а при необходимости и до 30 мм в диаметре. Подача катода может выполняться автоматически или при помощи управляемого вручную электрического устройства.

Разогрев металла происходит в графитовом тигле. При прохождении расплавленного металла через систему медь контактирует с обширной площадью поверхности графита (чистый углерод), благодаря чему содержание кислорода в готовом продукте составляет менее 5 мг/дм

(ррт) (обычно менее 3 мг/дм (ррт), в то время как уровень содержания кислорода в исходном сырье может доходить до 80 мг/дм (ррт).

Система самостоятельно регулирует эти параметры, благодаря чему можно получить высококачественный пруток из бескислородной меди, обеспечить безаварийный производственный цикл и длительный срок эксплуатации фильеры - обычно 12-14 тонн.

С помощью этого оборудования можно получать различную продукцию:

- Эмалированный провод
- Сверхтонкий провод: менее 0,05 мм в диаметре
- Кабель передачи данных
- Телефонные провода



Рисунок 18 - Макроструктура прутка из бескислородной меди диаметром 8 мм

Поплавковый кристаллизатор, применяемый при непрерывном литье вверх, представляет собой медный водоохлаждаемый кессон трубчатого типа, в нижнюю часть которого вмонтирована графитовая рубашка. Нижняя часть графитовой рубашки исполняет роль металлопровода, а верхняя – роль холодильника. Нижняя часть кристаллизатора, для предотвращения теплового и химического взаимодействия с расплавом, защищается огнеупорным куполообразным чехлом. Кристаллизатор погружается сверху в металлоприемник, охлаждающая вода подводится в его нижнюю часть. Благодаря такой конструкции, зона затвердевания находится несколько ниже уровня расплава, что обеспечивает минимальное гидростатическое давление на затвердевающую корку (рис. 19). Значительный градиент температур по длине графитовой рубашки достигается за счет расположения зоны интенсивного охлаждения кристаллизатора ниже уровня расплава, в отличие от непрерывного горизонтального или вертикального литья вниз, где зона интенсивного охлаждения и расплав разделены стенкой металлоприемника. При этом положение фронта затвердевания оказывается строго ограниченным в пространстве, что особенно важно для стабильного процесса литья заготовок малого сечения.

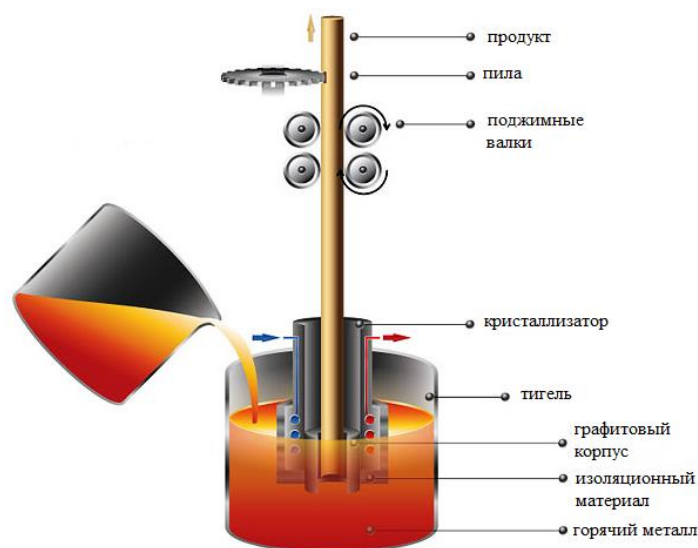


Рисунок 19 - Схема вертикального литья вверх

Поплавковые кристаллизаторы разработки компании "Rautomead" рис. 20.



Рис.20 Поплавковые кристаллизаторы

Автономные каналные печи с индукционным нагревом для производства до 12 тыс. тон в год. Если требуется достичь уровня производительности до 12 тыс. тон в год, пользователь может либо установить рядом два автономных графитовых тигля с нагревом сопротивлением, либо одну автономную каналную печь с индукционным нагревом. В любом случае достигается уровень годовой производительности 10-12 тыс.тон в зависимости от модели [37].

Метод непрерывного литья вверх более технологичен и совершенен для литья заготовок медно-цинковый и медно-фосфорных сплавов. Высокая технологичность метода обеспечивается независимым от металлоприемника креплением кристаллизаторов, что предполагает их простую замену и обслуживание и без остановки процесса литья через другие

кристаллизаторы. Универсальность технологии позволяет отливать на одном оборудовании заготовки различных сечений и из разных сплавов. Повышения производительности литья можно достичь, увеличив число одновременно работающих кристаллизаторов. При условии расположения вертикальных осей кристаллизаторов в одной плоскости оказывается возможным многоручьевая разливка с помощью одного вытягивающего механизма. Немаловажным, является, полное исключение прорыва металла из кристаллизатора, имеющее место при горизонтальном и вертикальном литье (вниз), что не только обеспечивает безопасный режим работы, но и предотвращает выход из строя оборудования (устройств резки или рубки, а также вытяжки заготовок) [38].

1.5 Выводы и постановка задач исследования

Анализ литературных данных показывает, что высокотемпературные сплавы припоев на основе систем Cu-P и Cu-Zn относятся к трудно деформированным материалам и из-за этого производство данных припоев стандартными методами обработки давлением являются не выгодными для производства малых партий припоя. Из этого был сделан вывод, что для производства данного вида продукции нужно использовать альтернативные методы производства. По представленному обзору технологий и оборудованию были сделаны следующие выводы:

- прутки малых сечений из цветных сплавов производятся стандартными схемами обработки металла давлением, включающими в себя отливку заготовки с последующей прокаткой до нужного диаметра с многостадийными вспомогательными операциями;
- данный метод производства припойных сплавов относится к массовому производству и рассчитан на определенный вид сплава и сечение, а переход на другие сплавы и сечения очень сложен или не возможен;
- альтернативной технологией производства прутков малых сечений является способ непрерывного литья;
- как правило в Советском Союзе способом непрерывного литья не получали прутки диаметром меньше 15 мм;
- непрерывное литье в подвижный кристаллизатор характеризуется хорошей производительностью более 100 кг/ч при литье заготовок от 4 мм, но основной недостаток данного метода является форма получаемой заготовки (трапецеидальная), что позволяет применять получаемую продукцию только в ручной пайке;

- горизонтальное и вертикальное (вниз) непрерывное литье позволяет получать заготовки круглого сечения с хорошей чистотой поверхности заготовки, которую можно использовать с последующей прокатки или изготавливать закладные элементы для автоматической пайки;

- из всех рассмотренных методов литья наиболее технологичный и производительный для производства прутков диаметром 4...10 мм из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов был выбран метод непрерывного литья заготовок вверх, т.к. является более технологичным и безопасным.

В процессе исследований была поставлена цель разработать процесс 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 реализации поставленных целей решались следующие задачи:

1. Исследовать процесс затвердевания и охлаждения заготовки диаметром от 4 до 10 мм при непрерывно-пошаговом литье вверх;
2. Изучить кинетику затвердевания внутри графитовой втулки с помощью математического моделирования данного процесса в программном пакете «ProCast», с учётом шага и остановки;
3. Изучить механизм возникновения дефектов при литье заготовок диаметром 4-10 мм;
4. Изучить влияние технологических факторов: уровня расплава в металлоприемнике, температуры перегрева расплава и средней скорости литья на образование дефектов в заготовках;
5. Разработать промышленное оборудование и оснастку для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх.

2. Методики проведения экспериментов

Методика приготовления расплава будет рассмотрена для двух систем: медь-цинк и медь-фосфор.

2.1 Приготовление медно-цинковых сплавов

Для приготовления медно-цинковых сплавов использовалась индукционная печь марки F-44 фирмы «CEIA» (рис. 20) с выемным тиглем емкостью 90 марок по меди, с блоком управления и обратной системой охлаждения, представленная на рисунке 21. Перед загрузкой шихты в печь, в программе Excel ведется расчет шихтовых материалов. Применяемые шихтовые и защитные материалы:

- медь отходы (сечка, отрезки труб, электрокабель и др. лом), чистота не ниже марки М1 ГОСТ 859-2014 [39];

- никель (катоды), марка не ниже Н1 (ГОСТ 849-2008) [40];

- цинк марки ЦО (чушки) ГОСТ 3640-94 [41];

- олово, слитки, чистота не ниже О1 (ГОСТ 860-75) [42];

- лигатура Zn-Ni, в виде слитков;

- отходы алюминиевого производства марки А0 (ГОСТ 11069-2001) [43];

- отходы собственного производства;

- PROBAT-FLUSS AL 224 [44].

На дно тигля закладывается медь, сверху засыпается "PROBAT-FLUSS", толщиной 2-3 см над поверхностью. После полного расплавления меди вводили никель в виде лигатуры, после полного растворения никеля вводили олово. Отходы собственного производства вводили порционно по мере расплавления. Расплав доводили до температуры 850-900 °С и вводили цинк под зеркало расплава.

Измерение температуры расплава производили при помощи хромель-алюмелевой термопары диаметром 3 мм с защитным чехлом. Значение измерительной термопары отображалось на дисплее термопреобразователя ТРМ200 фирмы «ОВЕН» и температура на дисплее должна быть в районе 900-950 °С.



Рисунок 21 – Индукционная печь

2.2 Приготовление медно-фосфорных сплавов

Приготовление сплавов велось в тигельной печи сопротивления марки ПП-300 (рис. 22) в графита-шамотном тигле с емкостью по меди 300 кг. Перед загрузкой шихты в печь, на программе Excel велся расчет шихтовых материалов.

Температурный режим плавки обеспечивался автоматической системой регулирования температуры, состоящей из:

- хромель-алюмелевой термопары, помещенной в пространство печи;
- тиристорного блока управления нагревом.

Контроль температуры осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары, установленной у наружной стенки тигля.

После нагрева печи до температуры 1050 °С производили загрузку шихты в следующем порядке:

- отходы собственного производства в виде слитков;
- слитки МФ10 (ГОСТ 4515-93) [45];
- медь (ГОСТ 859-78) в гранулах, порционно, после полного расплавления МФ10;
- снятие шлаков и введение олова, сурьмы или кремния, в зависимости от марки сплава.



Рисунок 22 – Печь сопротивления ПП-300

После расплавления всех компонентов выставляли температуру на печи 950°C и измеряли температуру расплава с помощью хромель-алюмелевой термопары диаметром 3 мм с графитовым наконечником. Температура расплава должна была быть в пределах температур $820-850^{\circ}\text{C}$. Для компенсации угара разработаны организационные мероприятия по дошихтовке расплава лигатурой МФ10. Процесс литья не начинается, до тех пор, пока не произведен термический анализ на термокомплексе.

Составы изготавливаемых сплавов, согласно действующим ТУ, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Состав медно-фосфорных сплавов, масс. %

Сплав	Cu, %	P, %	Sn, %	Sb, %	Si, %
ПМФ9	основа	8-9,5	-	-	-
ПМФ7	основа	6,8-7,3	-	-	-
П14	основа	5,6-6,1	3,6-4,1	-	-
ПМФСУ 92-6-2	основа	8,5-9,0	-	1,8-2,5	-
ПМФС 6-0,15	основа	5,5-6,5	-	-	0,1-0,2

2.3 Методика проведения термического анализа

Термический анализ проводится для определения угара фосфора. Для проведения термического анализа использовалась установка, разработанная на ЗАО «Аларм», состоящая из муфельной печи сопротивления с опускающимся дном, со стационарной хромель-алюмелевой термопарой диаметром 1 мм в защитном чехле из нержавеющей стали и блока терморегуляции. Схема подключаемых приборов для снятия кривых охлаждения состоит из персонального компьютера(3), преобразователя RS232-RS485 (2) и модуля ввода аналоговой MBA8(1) фирмы OWEN, фотография установки представлена на рисунке 23. Для проведения термического анализа, тигель с полученным расплавом устанавливался на подставку и при помощи подъемного стола поднимался в полость печи, где установлена хромель-алюмелевой термопара диаметром 0,5 мм в защитном чехле. После того как тигель полностью оказывался в рабочем пространстве печи спай термопары находится в расплаве на глубине 15-20 мм от зеркала расплава. Затем печь отключалась, и происходило естественное охлаждение тигля вместе с печью ($V_{охл}=0,1$ °C/сек). Сигнал с термопреобразователя поступал на модуль ввода аналоговый MBA8, затем преобразовывался в цифровой при помощи преобразователя RS232-RS485 и отображается на компьютере в виде зависимости температура-время. Далее, полученные температурные характеристики, с помощью баз данных сохранялись в Microsoft Office Excel.



Рисунок 23 - Экспериментальная установка проведения термического анализа

Каждый час проводился анализ, и полученные данные сверялись с экспериментальными данными диаграммы температуры ликвидуса сплава и процентного содержания фосфора. В таблице 8 представлены температуры ликвидуса и солидуса медно-фосфорных сплавов, исследуемых в работе.

Таблица 8 – Температуры ликвидуса и солидуса медно-фосфорных сплавов

Сплав	Температура, °C	
	ликвидус	солидус
ПМФ7	770±5	714
ПМФ9	790±5	714
ПМФСy-92-6-2	785±5	695
П14	750±5	690

В случае несовпадения данных, проводим мероприятия по корректировке состава.

Для примера на рисунке 24 представлен вид кривой охлаждения, полученный в ходе термического анализа для сплава ПМФ7.

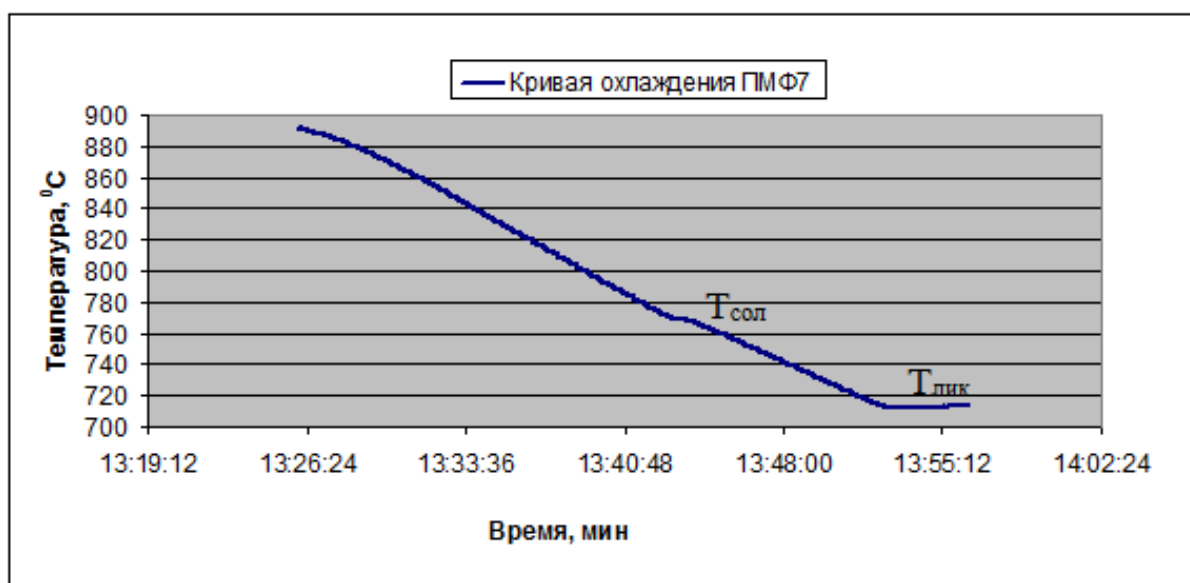


Рисунок 24 – График изменения температуры от времени при проведении термического анализа сплава ПМФ7

Из рисунка хорошо видно перегибы кривой, что соответствует температурам ликвидуса и солидуса сплава ПМФ7.

2.4 Методика проведения химического анализа

Химический анализ проводится для проверки состава медно-цинковых сплавов. В процессе плавки, для проведения химического анализа, в специальную изложницу отливали слиток медно-цинкового сплава. После охлаждения, на сверлильном станке сверлом диаметром 4 мм, на слитке делались сверления на глубину 3-4 мм в пяти местах. Полученную металлическую стружку складывали в конверт и отправляли на испытания химического анализа в Аналитический сертификационный испытательный центр (АСИЦ).

Для проведения испытания применяли два метода: рентгеноспектральный и фотометрический методы анализа. Аппаратура, применяемая при исследовании:

- рентгеноспектральный аналитический комплекс JMS-5300+Link ISIS (“Jeol”, Япония + “Oxford Instruments”, Великобритания);
- фотометр КФК-2 (“ЗОМЗ”, Россия);
- масс-спектральный с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 (“Perkin Elmer”, США);
- атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV (“Perkin-Elmer”, США).

Так же были проведены исследования по угару летучих элементов в расплаве. В таблице 9 представлены результаты химического анализа наиболее тугоплавкого инструментального припоя ЛНКМц49-9-0,2-0,2. Отбор проб велся из металлоприемника в начале процесса литья и через 5-ть часов работы установки непрерывного литья вверх прутков диаметром 5 мм. Корректировка расплава осуществляется твердым готовым сплавом.

Таблица 9 – Результаты проведенного химического анализа сплава ЛНКМц49-9-0,2-0,2

Время выдержки расплава, ч	Содержание основных компонентов, % (масс.)					Примеси, % (масс.)	
	Zn	Mn	Ni	Cu	Si	Fe	Nb
0	Ост.	0,29	8,48	49,37	0,25	0,21	0,11
5	Ост.	0,16	8,51	49,95	0,21	0,19	0,10

Из таблицы 9 видно, что наблюдается незначительное снижение марганца и кремния, однако значения находятся в пределах нормы. Из полученных данных, следует, что указанный режим работы не предусматривает корректировку состава расплава за 5 часов работы (одна смена).

2.5 Методика изготовления шлифов

Поверхность образца, по которой будет проводиться металлографическое исследование, подвергали специальной обработке. В первую очередь получали приблизительно плоскую поверхность. Прутки распиливали с помощью ножовки вдоль, так чтобы попало 3-4 шага вытяжки.

Образцы небольших размеров для облегчения обработки помещали в специальную пластмассовую оправу, куда заливали Протокрил-М – самотвердеющая пластмасса, используемая для изготовления зубных протезов.

Шлифование производили последовательно наждачной бумагой различного сорта, сначала с более крупным зерном абразива, а затем с более мелким. Направление движения образца по наждачной бумаге или положение образца относительно направления круга при смене сорта бумаги изменяли на 90° для лучшего удаления гребешков и рисок, созданных предыдущим шлифованием.

Механическим полированием удаляли оставшиеся после шлифования мелкие риски. Полирование производили на вращающемся круге с натянутым или наклеенным полировальным материалом (фетр, бархат, тонкое сукно), на который непрерывно или периодически наносили абразивное вещество с частицами очень малых размеров (оксид хрома, оксид алюминия, оксид железа и т. д.). Эти абразивные вещества предварительно замачивают в воде, а затем поливают ими круг.

Полировальный круг должен быть влажным, а нажатие образца на круг незначительным. Скорость вращения круга диаметром 250 мм должна быть 400–600 об/мин.

Полирование считается законченным, когда поверхность образца приобретает зеркальный блеск и даже под микроскопом не видны риски или царапины.

После полирования микрошлиф промывали водой, затем, если сплавы окисляются, промывали спиртом и просушивали фильтровальной бумагой.

Готовый шлиф подвергали травлению. Для травления шлифов применяют различные реактивы [46]. В нашем случае использовались:

- для латуней: [30 мл HCl; 5 г FeCl₃; 100 мл H₂O];
- для медно-фосфорных: [10 мл (NH₄)₂S₂O₈; 50 мл H₂O] [47].

Микрошлиф погружали полированной поверхностью в реактив, и через некоторое время (продолжительность травления зависит от состава изучаемого сплава и состава раствора и легко устанавливается экспериментально) вынимали; если полированная поверхность шлифа становится при этом слегка матовой, травление считают законченным, и шлиф промывают

водой; после этого высушивают шлиф спиртом, аккуратно прикладывая к нему лист фильтровальной бумаги. В случае быстрого окисления шлиф немедленно промывают спиртом.

Если же за время выдержки поверхность шлифа сохраняет блестящий вид или структура сплава не выявляется отчетливо, микрошлиф вновь погружают и выдерживают в реактиве.

2.6 Методика получения фотографий микро- и макроструктур

Исследования микроструктур проводились с помощью микроскопа: ЕС МЕТАМ РВ-21-1, оборудованного цифровой камерой Myscope 130M при увеличениях $\times 100$ и $\times 200$. Так же использовался микроскоп ZEISS Observer.D1 m. Камера была подключена к ПК, на котором установлено программное обеспечение Scope Photo и Thixomet Pro. Фотографии макроструктур были получены при помощи цифровой фотокамеры при увеличении $\times 8$. Для измерения среднего значения зерна для трех шлифов разного режима вытяжки пользовались программой Sizer.

Для оценки размеров зерен применялся метод измерения длин хорд, который основан на измерении линейных размеров отрезков - хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разнотермической структуре.

Измерения длин хорд проводят непосредственно под микроскопом при помощи окуляра с линейкой (метод подвижного шлифа) по одной или нескольким линиям в произвольном направлении на шлифе или на микрофотографии.

Измерения проводят не менее чем в пяти наиболее типичных полях зрения, при этом в каждом поле зрения проводят не менее трех прямых в произвольном направлении.

Значения длин хорд относят к определенной размерной группе. Подсчитывают количество длин хорд каждого размера по всем линиям. Определяют относительную долю зерен в процентах с определенной длиной хорды.

2.7 Лабораторная установка для непрерывного литья вверх

Эксперименты проводились на лабораторной установке литья вверх. Установка была спроектирована и разработана на предприятии ЗАО "Аларм". Она позволяет изготавливать прутки и проволоку из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов диаметром от 4 до 10 мм (рис. 25). Установка представляла собой металлический каркас, на котором закреплен водоохлаждаемый кристаллизатор скольжения с графитовой втулкой 1. Под кристаллизатором располагается печь металлоприемника 2 в которую опускается кристаллизатор. Прутки вытягивают при помощи тянущей клетки 4. Резку прутков на мерные заготовки осуществляют

гидравлические ножницы 6. Управление основными узлами установки осуществляется при помощи программируемого реле. Установка состоит из следующих основных элементов:

- одного независимого кристаллизатора трубчатого типа, закрепленного на подъемном устройстве;
- обогреваемого металлоприемника;
- тянущей клетки, состоящей из приводного вала и прижимных роликов;
- гидравлических ножниц и гидростанции;

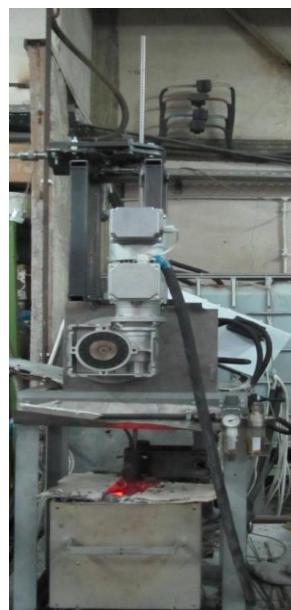
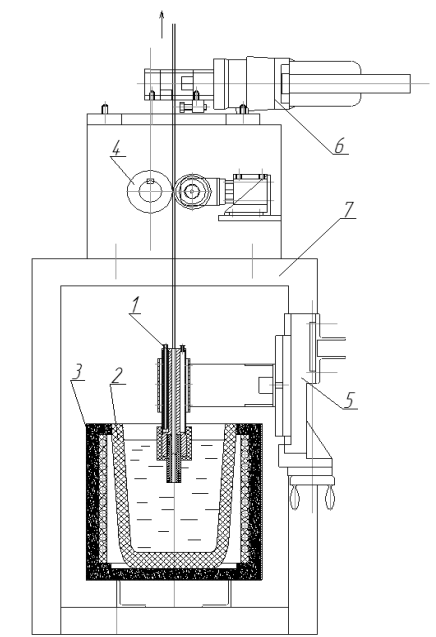


Рисунок 25 – Схема и внешний вид экспериментальной установки непрерывного литья вверх проволоки и прутков:

1- кристаллизатор; 2 – тигель с расплавом (металлоприемник); 3 – муфельная печь сопротивления; 4 – тянущая клетка; 5 – устройство подъема и опускания кристаллизатора; 6 – гидравлические ножницы; 7 – рама

Процесс подготовки установки к работе состоял из следующих этапов.

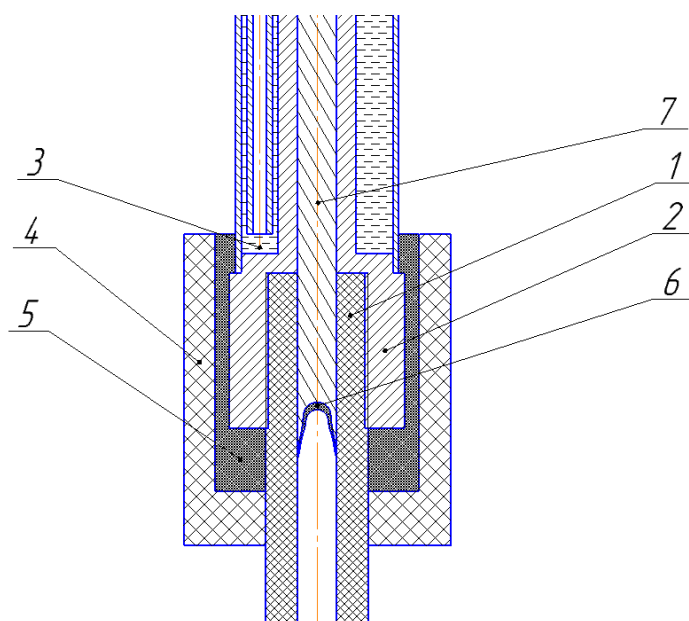
Металлоприемник разогревали до 960 °С. Из плавильной печи расплав переливали в металлоприемник. Затравочный пруток устанавливали в кристаллизатор. Включали водяное охлаждение кристаллизатора. Кристаллизатор с затравкой опускали в расплав. Фиксировали затравку в тянущей клетке. Включали вытяжку прутка. Как только затравка выходила на уровень гидравлического ножа, включали рубку.

Процесс вытяжки прутков осуществлялся в пошаговом режиме. Средняя производительность процесса на одном ручье составляет от 1,5 до 15 кг/ч при изменении диаметра слитка от 4 до 10 мм, выход годного не ниже 98%.

2.8 Разработка конструкции кристаллизаторов для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх диаметром от 4 до 10 мм

Кристаллизатор - один из важнейших узлов в установке непрерывного литья. Кристаллизатор, применяемый при непрерывном литье вверх, представляет собой медный водоохлаждаемый кессон трубчатого типа, в нижнюю часть которого вмонтирована графитовая рубашка. Нижняя часть кристаллизатора, для предотвращения контакта с расплавом, защищается огнеупорным куполообразным чехлом. Кристаллизатор погружается сверху в металлоприемник, охлаждающая вода подводится в его нижнюю часть. Благодаря такой конструкции, зона затвердевания находится несколько ниже уровня расплава, что обеспечивает минимальное гидростатическое давление на затвердевающую корку, рис. 26. Значительный градиент температур по длине графитовой рубашки достигается за счет расположения зоны интенсивного охлаждения кристаллизатора ниже уровня расплава, в отличие непрерывного горизонтального или вертикального литья вниз, где зона интенсивного охлаждения и расплав разделены стенкой металлоприемника. При этом положение фронта кристаллизации оказывается строго ограниченным в пространстве, что особенно важно для стабильного процесса литья заготовок малого сечения [48].

Кристаллизаторы трубчатого типа, применяющиеся для литья вверх, независимы от металлоприемника, что предполагает их простую замену и обслуживание. Кристаллизатор состоит из двух зон: затвердевания и вторичного охлаждения заготовки. Заготовка на выходе из кристаллизатора имеет низкую температуру и соответственно чистую от оксидов поверхность, что особенно важно для припойных сплавов. Повышения производительности литья можно достичь, увеличив число одновременно работающих кристаллизаторов. Также исключен прорыв металла в случае аварии, что создает более безопасный режим работы.



а



Рисунок 26 – Кристаллизатор для непрерывного литья вверх: *а* – принципиальная схема кристаллизатора: 1 – графитовая рубашка; 2 – медный корпус; 3 – охлаждающая вода; 4 – огнеупорный чехол; 5 – огнеупорный наполнитель; 6 – двухфазная зона в затвердевающей заготовке; 7 – сформировавшаяся заготовка; *б* – внешний вид кристаллизатора для литья высокотемпературных припоев

3 Изучение закономерностей процесса затвердевания и охлаждения заготовки

3.1 Измерение температурного поля кристаллизатора при затвердевании заготовок

Процесс затвердевания и охлаждения заготовок, протекающий при литье малых сечений в графитовом кристаллизаторе, мало изучен и практически не описан в научных статьях. Изучить данные закономерности необходимо для точного определения фронта кристаллизации, максимальной производительности по каждому сечению заготовки, предотвращения обрывов заготовки в кристаллизаторе, установки причины образования дефектов на поверхности заготовки и т.д.

Исследование процессов, протекающих в кристаллизаторе, проводились с использованием компьютерного моделирования. Для моделирования процесса литья заготовки, помимо свойств материалов, необходимо знать коэффициенты теплопередачи между объектами модели. В рассматриваемом процессе 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-T12 рис. 27). 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.

Для измерения температурного поля кристаллизатора использовались двенадцать хромель-алюмелевых термопар с диаметром спая 0,5 мм. Термопары были встроены в водоохлаждаемую медную стенку кристаллизатора в разных точках, как показано на рисунке 27, для снятия температурных полей. Термопары устанавливались в подготовленные отверстия с точно выбранной глубиной. Термопарные провода вводились в отверстия на всю глубину, чтобы обеспечить надежный тепловой контакт между термопарой и стенкой формы. 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 точного изучения профиля фронта кристаллизации. Погрешность измерения термопар 2,2 °C, а точность их расположения в стенке формы 0,5 мм. Показания термопар, при измерении температурных полей в кристаллизаторе, записались на прибор Lutron BTM-4208SD, Израиль.

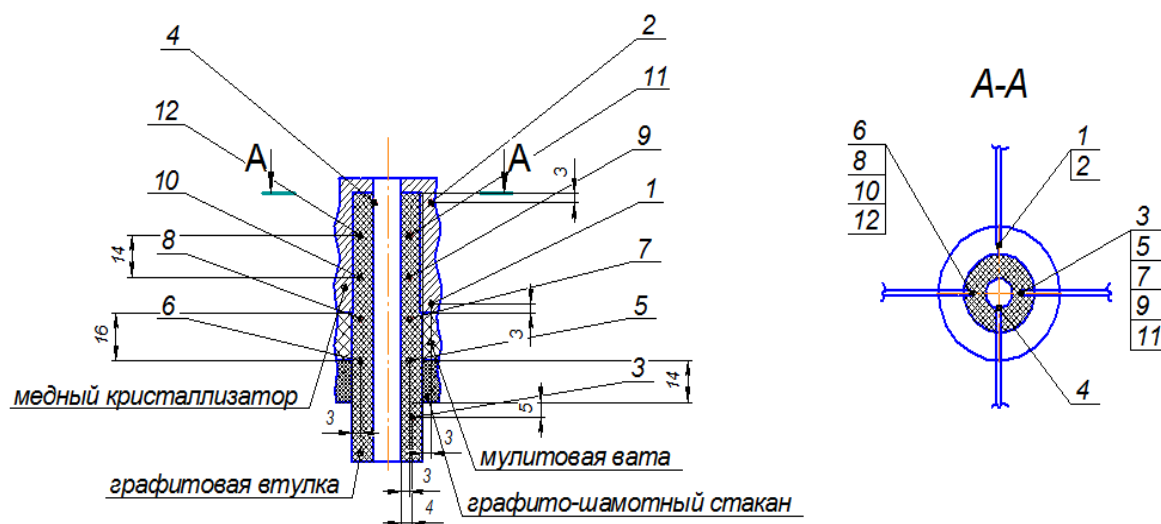


Рисунок 27 – Схема расположения термопар в кристаллизаторе

Эксперимент проводился при трех усредненных скоростях вытягивания заготовки, которые были установлены экспериментально в процессе определения режимов, позволяющих получать заготовку с заданными механическими свойствами в процессе длительного времени.

В эксперименте использовался сплав ЛОК59-1-0,3. Диаметр вытягиваемой заготовки 10 мм. Температура расплава в металлоприемнике 965-970°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.

3.2 Моделирование в программном пакете «ProCast»

По приведенным данным, полученным в ходе снятия температурных полей, производили компьютерное моделирование процесса затвердевания заготовки внутри кристаллизатора.

Моделирование процесса литья и затвердевания слитка производили в программе ProCast. Свойства сплавов рассчитывали с помощью термодинамической базы программы ProCast. Расчётный состав латуни был: Cu-40%Zn-0,25%Si-1%Sn.

Полученные записи термопар (T1-T12) обрабатывали следующим образом. В момент установления стационарного режима вытягивания (в конце процесса) для каждого режима вытягивания вычисляли среднее значение температуры для каждой термопары. Для вычисления усреднённого значения использовали двухминутный интервал.

Разрез трёхмерной модели кристаллизатора и слитка представлен на рисунке 28. Модель состояла из 16 отдельных тел. Разделения графитовой втулки и медной части производили таким образом, чтобы поверхности раздела попадали в те места, где располагались спайи термопар. Это позволяет получить узлы расчётной тетраэдральной сетки в местах

расположения термопар. Поскольку расчётная модель является осесимметричной, экспериментальные значения температуры устанавливали для массива узлов, лежащих на одинаковом расстоянии от центра модели. Расположение узлов, для которых были заданы значения температуры, представлено на рисунке 29. Голубыми точками показаны узлы, для которых заданы экспериментальные значения температуры. На основании температур подводимой и отходящей воды был вычислен коэффициент теплоотдачи от медной части кристаллизатора в воду. Таким образом, были установлены все параметры, позволяющие определить температурное поле в кристаллизаторе. Для определения температурного поля в слитке необходимо знать коэффициент теплопередачи от слитка к графитовой втулке. Температура слитка измерялась с помощью контактной термопары, находящейся на выходе графитовой втулки (Т4). Далее подбирали коэффициент теплопередачи до совпадения расчётной температуры на поверхности слитка с экспериментальной.

При такой постановке задачи получаемый фронт не является стационарным и его следует рассматривать для двух временных моментов.

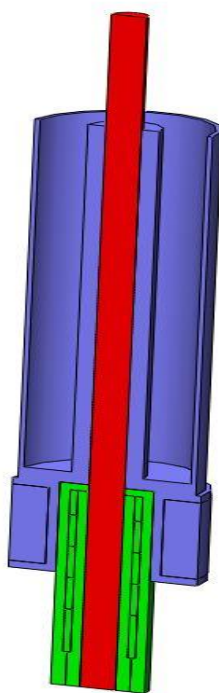


Рисунок 28 - Разрез трёхмерной модели кристаллизатора и слитка

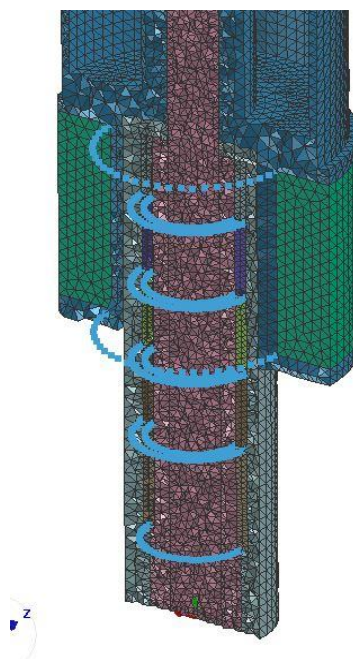


Рисунок 29 - Разрез тетраэдральной сетки модели кристаллизатора и слитка

Скорость вытягивания задавали двумя разными способами, при трех разных скоростях вытяжки. В первом случае устанавливали постоянную скорость вытягивания.

В реальном виде, для второго случая, 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 30.

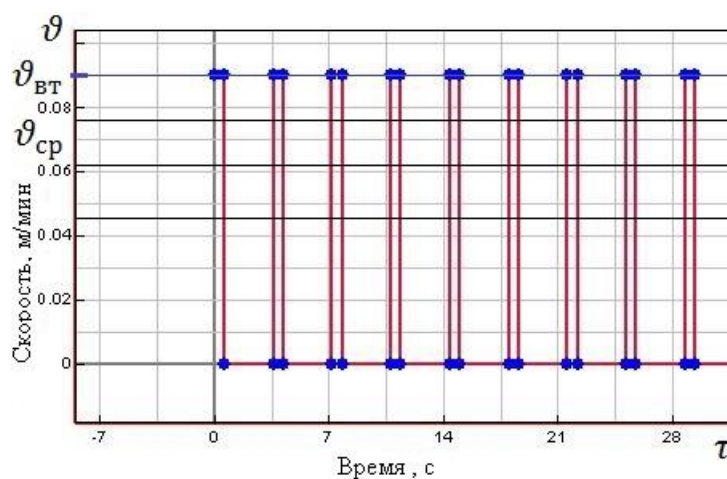


Рисунок 30 – График изменения скорости для первого режима вытягивания

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.

3.3 Результаты эксперимента по снятию температурных полей и моделирования в программе «ProCast»

Средние значения температур для трех усредненных режимов, медно-цинкового сплава ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм, обработаны и представлены в таблице 10. Температура расплава в металлоприемнике составляла 970°C. На рисунке 31 представлены температурные поля кристаллизатора, измеренные в процессе эксперимента для трех скоростей вытяжки. Схема расположения термопар в кристаллизаторе представлено для рисунка 27.

Таблица 10 – Средние значения температур для трех скоростей литья сплава ЛОК59-1-0,3

Скорость литья, м/мин	Средние показатели температур термопар, °C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	2	3	4	5	6	7
0,45	459,8	391,3	770,2	467,3	722,7	740,5
0,62	499,6	447,7	734,5	605,2	732,5	747,4
0,77	503,3	446,7	737,9	630,7	730,5	745,2
Скорость литья, м/мин	T7	T8	T9	T10	T11	T12
	8	9	10	11	12	13
0,45	701,3	658,4	562,1	520,6	433,5	451,8
0,62	723,5	709,4	640,5	586,3	489,1	555,6
0,77	715,8	703,1	649,7	600,6	494,2	563,5

Температура воды в системе охлаждения при начале процесса была 29,1 °C, в конце 29,4 °C. Температура охлаждающей воды на выходе из кристаллизатора и расход воды представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Температура охлаждающей воды на выходе из кристаллизатора

Усредненная скорость литья, м/мин	Температура воды на выходе из кристаллизатора, °C	Расход воды, л/мин
0,45	37,4	3,75
0,62	37	
0,77	38	

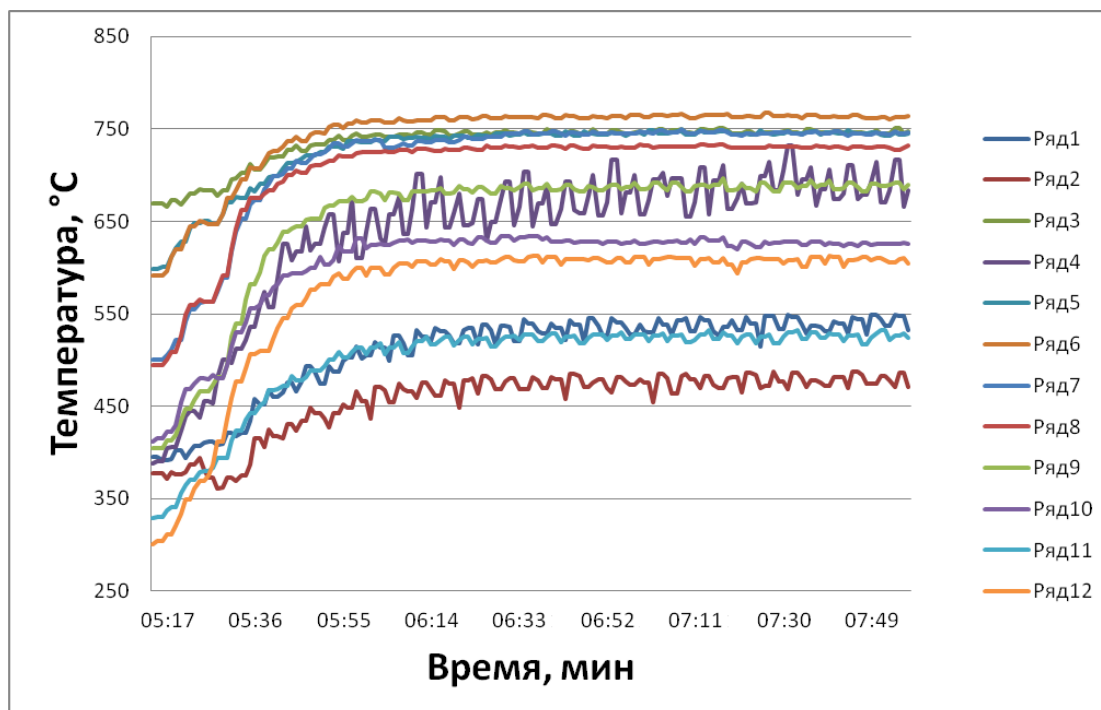


Рисунок 31 – Выход на рабочий режим температурного поля кристаллизатора

Из графика на рисунке 31 можно сделать вывод, что после начала процесса идет прогрев системы, температурное поле кристаллизатора выравнивается (квазистационарный режим) и стабилизируется по стечению некоторого времени (рис. 32). Отклонения температур связаны с тем, что температура растет/убывает в момент вытяжки/паузы. Температура воды на выходе из кристаллизатора, при повышении скорости литья, незначительно увеличивается.

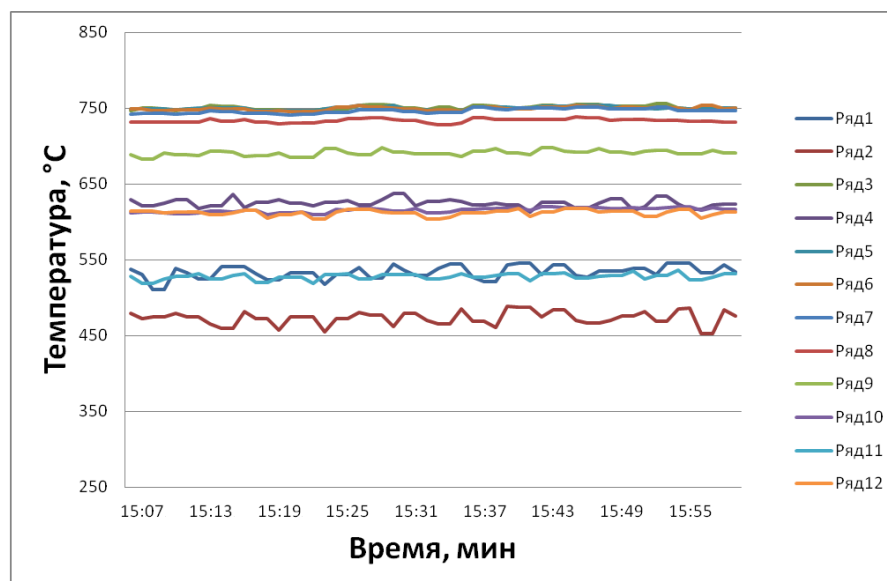
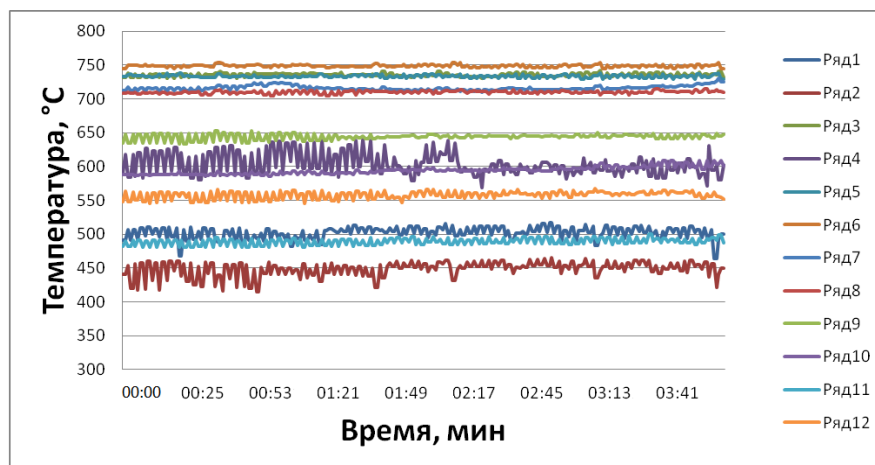
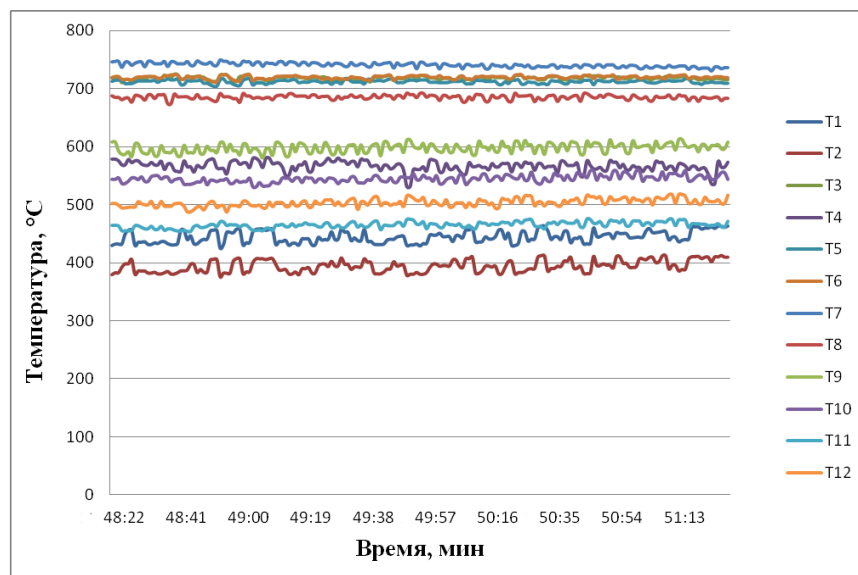


Рисунок 32 - Температурное поле кристаллизатора:

а – 0,45 м/мин; б – 0,62 м/мин; в – 0,77 м/мин

На рисунке 33 представлена доля твердой фазы в слитке, полученном в ходе моделирования, для трех усредненных скоростей при непрерывной вытяжке.

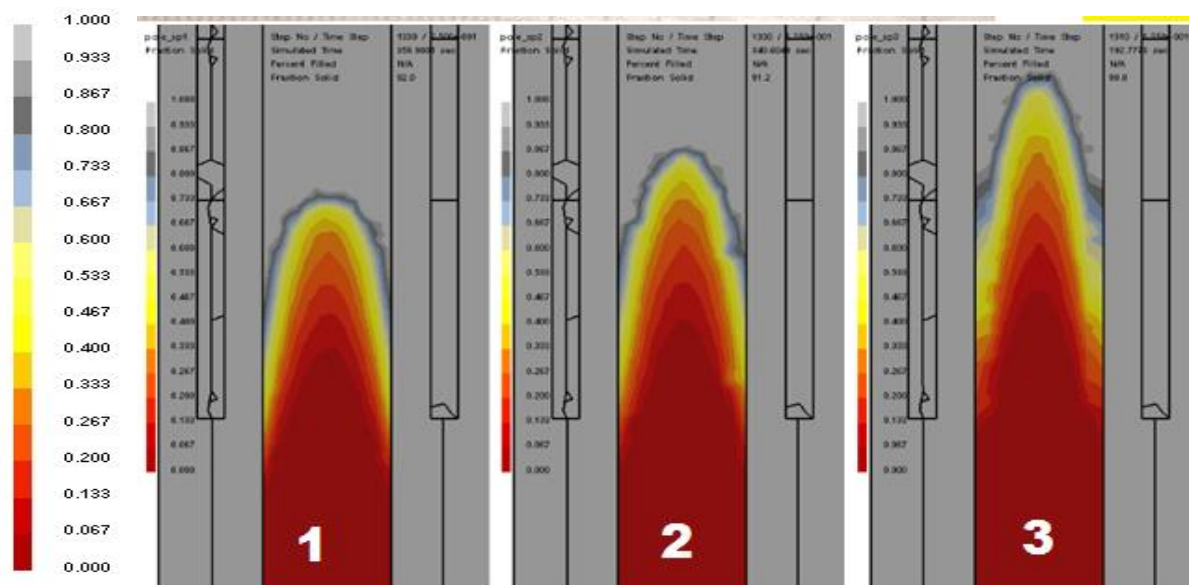


Рисунок 33 – Доля твёрдой фазы в слитке для трёх скоростей вытягивания при усредненной скорости литья сплава ЛОК59-1-0,3:

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

Ниже, в таблице 12, представлены значения высоты фронта кристаллизации и объема двухфазной зоны, полученной в ходе моделирования.

Таблица 12 – Высота фронта кристаллизации и объем кристаллизации двухфазной зоны для трех режимов при усредненной скорости литья

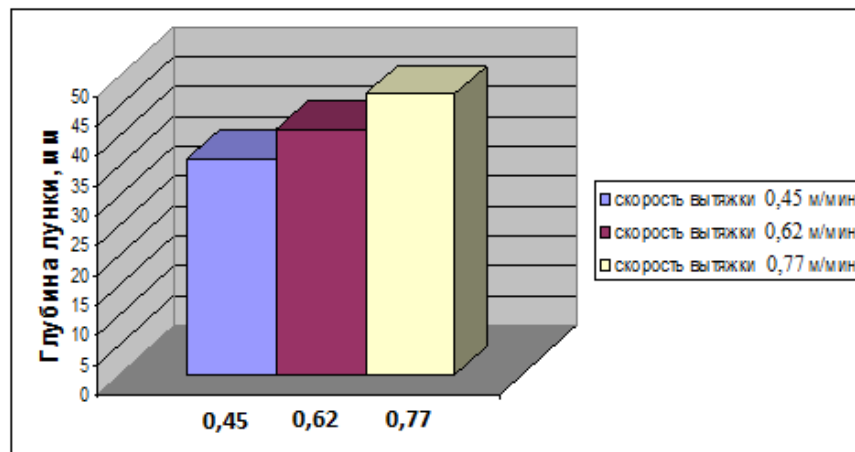
Усредненная скорость литья, м/мин	Расстояние от нижнего среза графитовой рубашки до зоны образования твердой корки, мм	Глубина лунки, мм	Объем двухфазной зоны, мм ³
0,45	12	36	1827,1
0,62	15	41	2080,0
0,77	19	47	2476,9

Как было описано ранее, двухфазная область возникает в слитках, имеющих интервал кристаллизации свыше 30 °С, и чем он больше, тем затруднительнее питание объемной усадки внутри кристаллизатора при непрерывном литье. Протяженность фронта кристаллизации в двухфазной области очень сильно влияет на образование дефектов на поверхности прутка

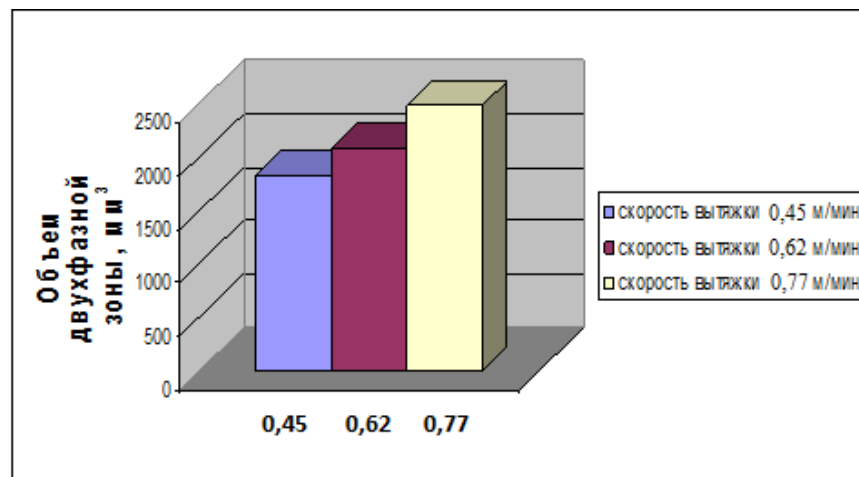
[71-73], что, в свою очередь, влечет за собой обрыв прутка в кристаллизаторе. Соответственно, протяженность двухфазной области и её объем не должны превышать определенных значений, иначе происходит обрыв прутка.

Как видно из результатов, протяженность фронта кристаллизации двухфазной области увеличивается в 1,3 раза с повышением скорости вытяжки заготовки. При увеличении скорости литья на 0,17 м/мин, от минимальной скорости литья, объем двухфазной зоны увеличивается на 250 мм³, а при увеличении скорости литья на 0,32 м/мин объем двухфазной зоны увеличивается на 650 мм³ или в 1,4 раза. Для большей наглядности результаты приведены в виде гистограммы на рисунке 34.

В ходе эксперимента установлено, что при данных условиях скорость литья 0,77 м/мин является максимальной скоростью, при которой процесс литья протекает стабильно. Последующее увеличение скорости приводит к нестабильности процесса литья и частому обрыву заготовки внутри кристаллизатора.



а



б

Рисунок 34 - Гистограмма изменения объема двухфазной зоны и глубины лунки при усредненных скоростях вытяжки:

а – изменение глубины лунки для усредненных скоростей; б – изменение объема для усредненных скоростей;

На рисунке 35 показано температурное поле кристаллизатора и слитка, полученное в ходе моделирования при трех усредненных скоростях вытяжки при стабилизировавшемся режиме.

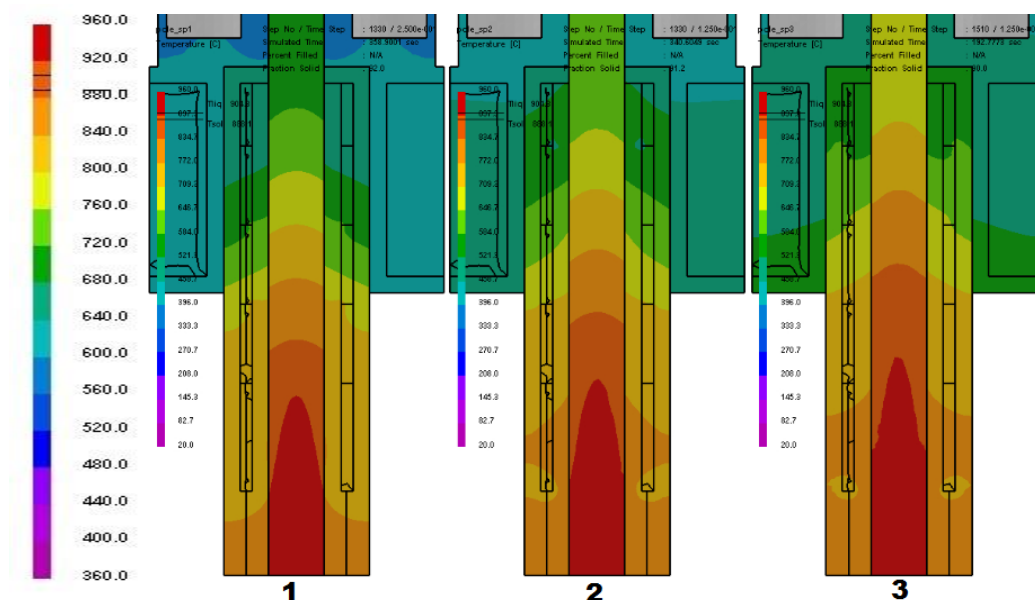
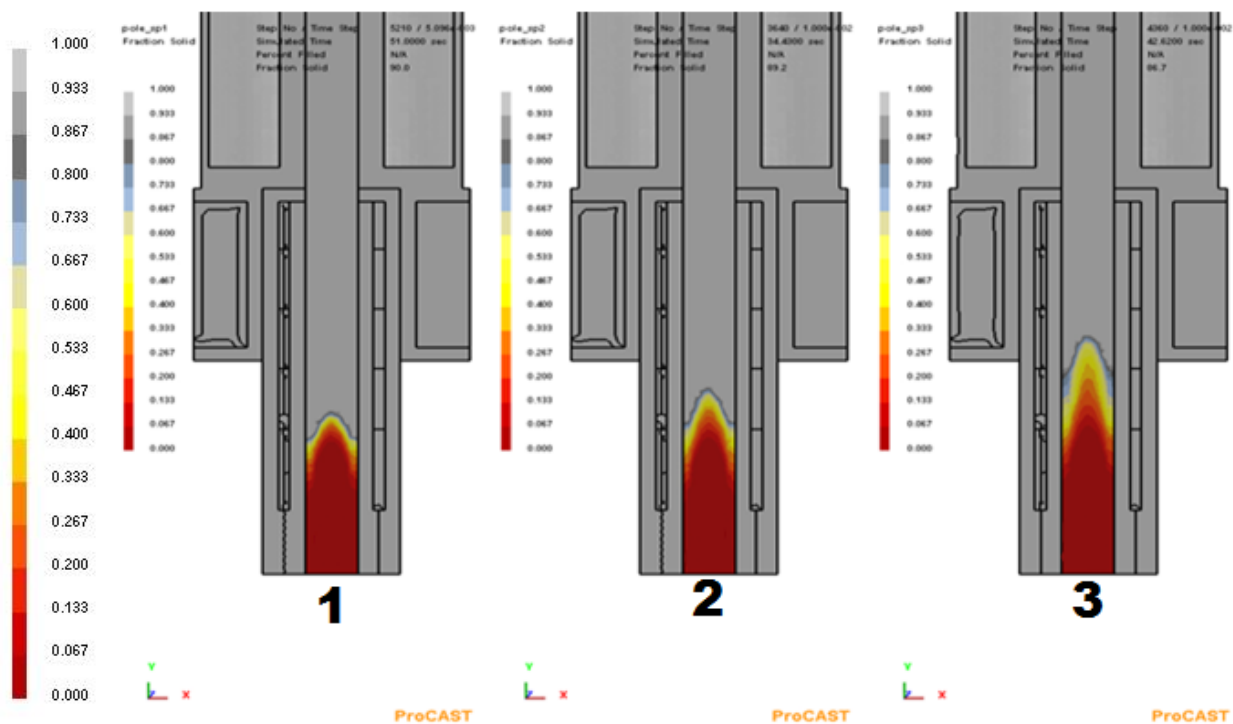


Рисунок 35 – Температурное поле кристаллизатора и слитка для разных скоростей вытяжки при стабилизации процесса сплава ЛОК59-1-0,3:

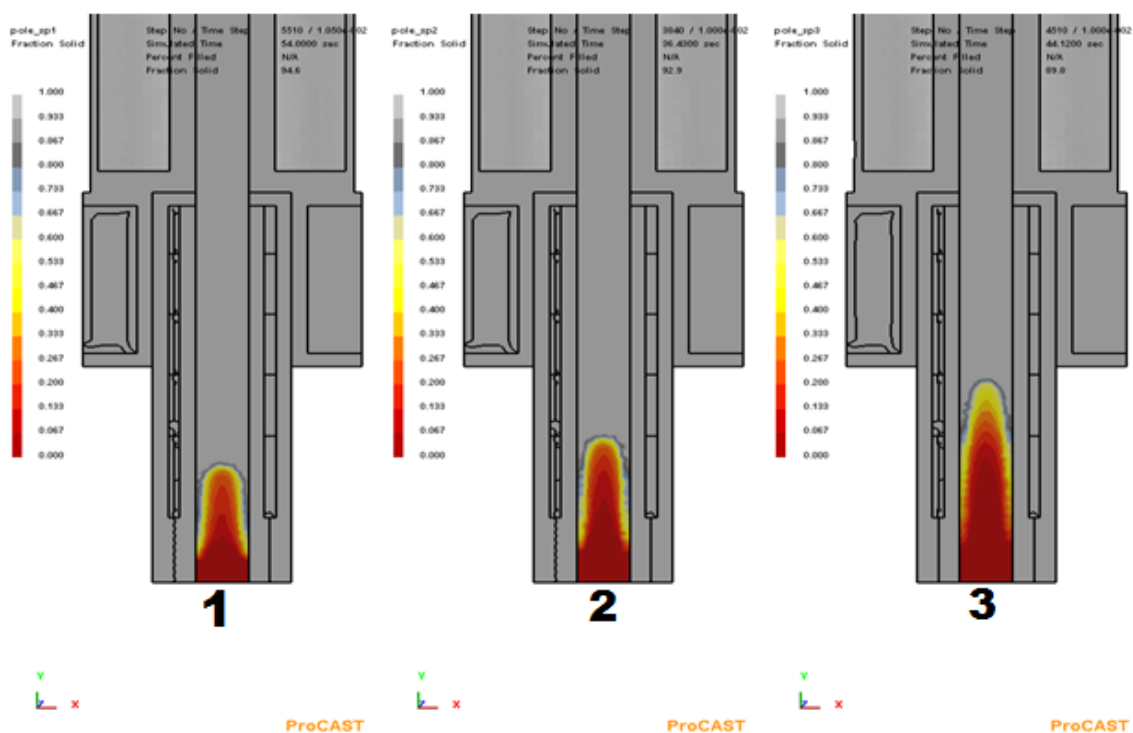
1 – 0,45 м/мин; 2 – 0,62 м/мин; 3 – 0,77 м/мин

Из представленного температурного поля кристаллизатора сплава ЛОК59-1-0,3, полученного в ходе моделирования, можно сделать вывод, что при всех скоростях литья графитовая вставка, выступающая из кристаллизатора и контактирующая с жидким расплавом, не прогревается выше температуры 770 °С. Температура стенки графитового кристаллизатора уменьшается в направлении вытяжки слитка.

На рисунке 36 (а) представлена доля твёрдой фазы в слитке из сплава ЛОК59-1-0,3, полученного в ходе моделирования в режиме шаг-остановка, в момент сразу после окончания вытяжки и 36 (б) в момент после окончания остановки.



а



б

Рисунок 36 – Доля твёрдой фазы в слитке для трёх скоростей вытягивания в режиме шаг-остановка сплава ЛОК59-1-0,3:

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

а - в момент сразу после окончания вытяжки; б - в момент после окончания остановки

Таблица 13 – Результаты изменения высоты и объема кристаллизации двухфазной зоны для трех скоростей, в момент сразу после вытяжки

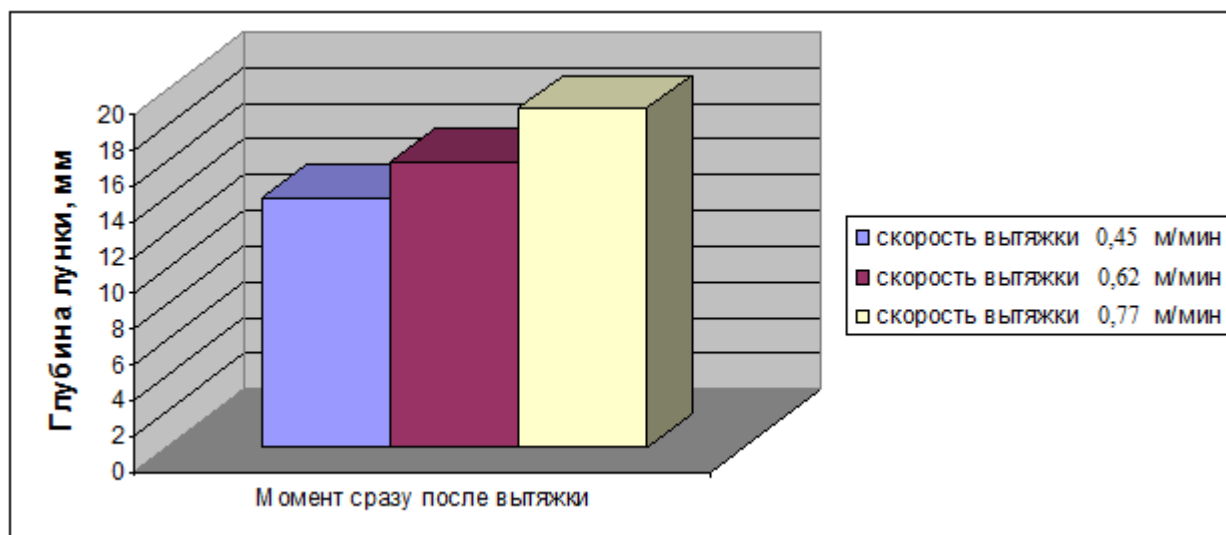
Усредненная скорость литья, м/мин	Расстояние от нижнего среза графитовой рубашки до зоны образования твердой корки, мм	Глубина лунки, мм	Объем двухфазной зоны, мм ³
0,45	14	23	1095,2
0,62	16	27	1287,1
0,77	19	36	1728,2

Таблица 14 – Результаты изменения высоты и объема кристаллизации двухфазной зоны для трех скоростей, в момент окончания остановки

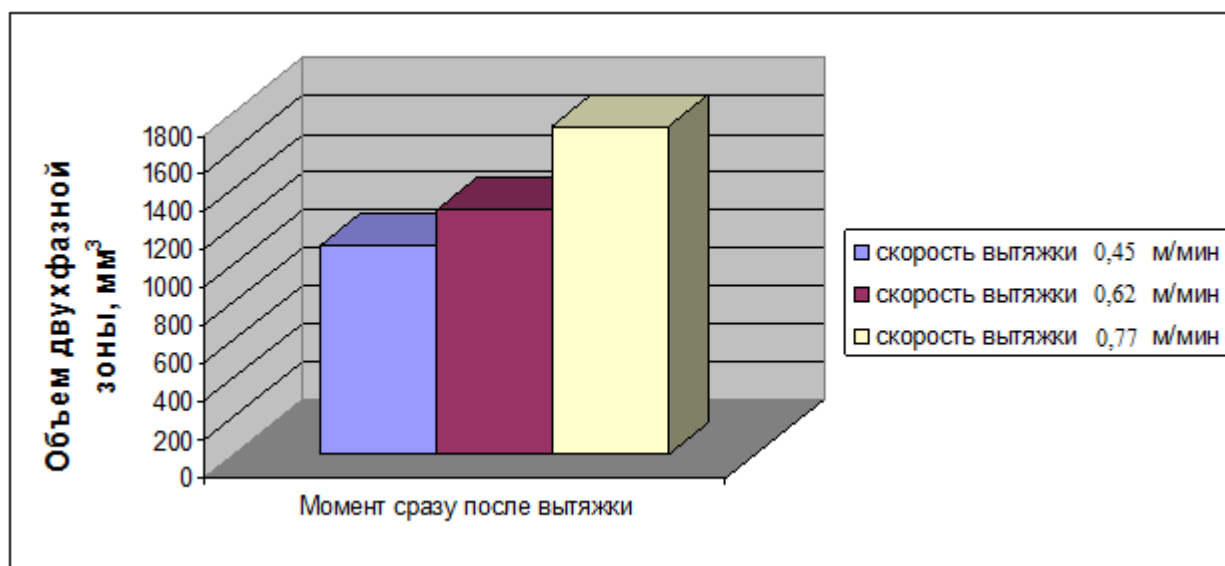
Усредненная скорость литья, м/мин	Расстояние от нижнего среза графитовой рубашки до зоны образования твердой корки, мм	Глубина лунки, мм	Объем двухфазной зоны, мм ³	Величина, на которую опускается двухфазная зона за паузу, мм
0,45	4	20	1495,2	10
0,62	6	25	1608,2	10
0,77	8	36	2312,8	11

Как видно из результатов таблицы 13 и 14, с повышением скорости литья на 0,32 м/мин от минимального значения высота лунки увеличивается почти в 2 раза, как и объем фронта кристаллизации. Величина, на которую опускается фронт кристаллизации двухфазной зоны, существенно не меняется. Исходя из полученных данных и параметров поверхности прутка, можно сделать вывод, что дальнейшее повышение усредненной скорости литья приведет к обрыву заготовки, а скорость в 0,77 м/мин является максимальной для данного материала и диаметра получаемой продукции.

На рисунках 37 и 38 представлены гистограммы изменения глубины лунки (а) и объема двухфазной зоны (б) при режиме шаг-остановка для трех скоростей вытяжки сплава ЛОК59-1-0,3.



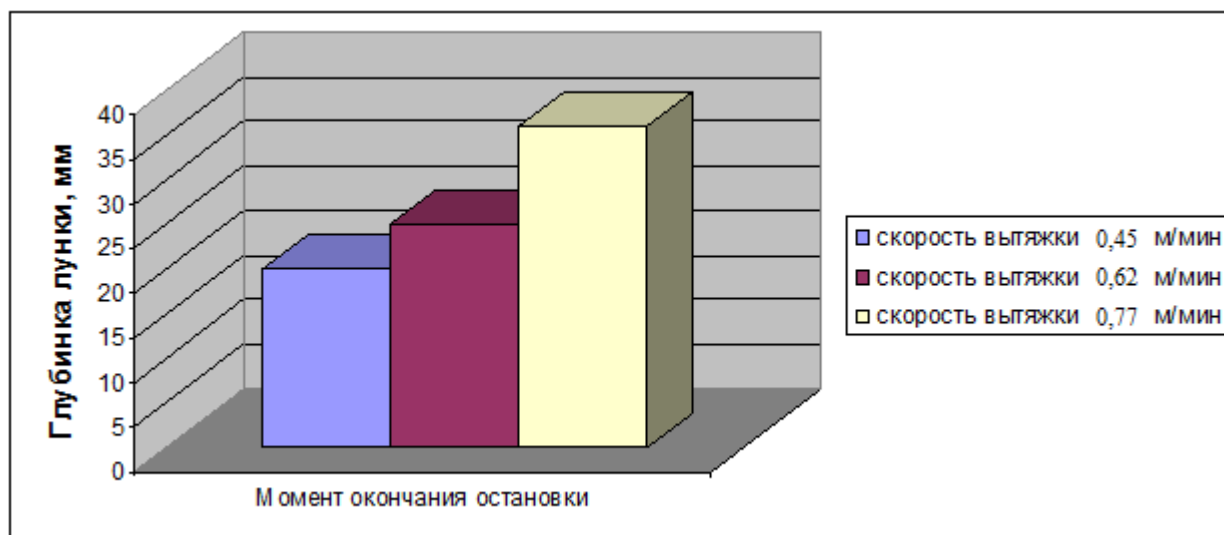
а



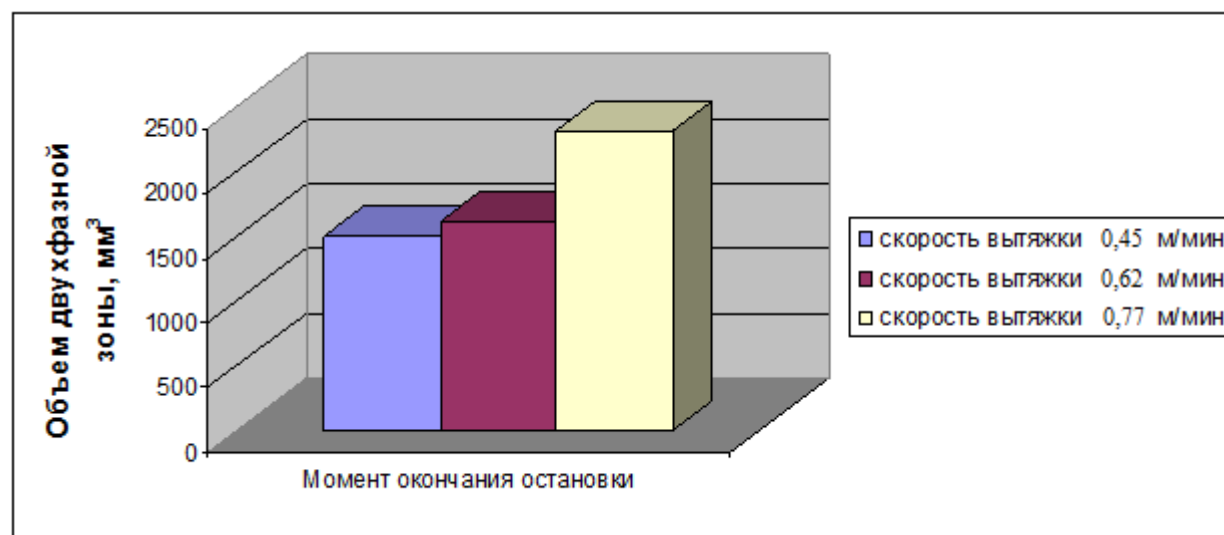
б

Рисунок 37 - Гистограмма изменения объема двухфазной зоны и глубины лунки при режиме шаг-остановка разных скоростей:

а – изменение глубины лунки при режиме шаг-остановка; б – изменение объема при режиме шаг-остановка.



а



б

Рисунок 38 - Гистограмма изменения объема двухфазной зоны и глубины лунки при режиме шаг-остановка разных скоростей:

а – изменение глубины лунки при режиме шаг-остановка; б – изменение объема при режиме шаг-остановка.

С помощью компьютерного моделирования процесса непрерывного литья нельзя точно установить все процессы, происходящие внутри кристаллизатора. Процесс затвердевания заготовки носит нелинейный характер и начинается в зоне, где стенка кристаллизатора имеет относительно высокую температуру, что обуславливает формирование протяженной тонкой корки. Сила трения между затвердевающей коркой и неподвижной стенкой кристаллизатора определяется протяженностью корки, гидростатическим давлением и чистотой рабочей поверхности кристаллизатора. Напряжения, вызванные трением корки о рабочую поверхность

кристаллизатора, довольно часто превышают ее прочность в силу малой толщины и высокой температуры. Обрыв, или так называемое зависание корки внутри кристаллизатора, довольно частое явление. С увеличением сечения слитка обрыв корки не оказывает значимого влияния на стабильность литья и качество заготовки. Во многом это объясняется значительной величиной отношения объема жидкой фазы к твердой. С уменьшением сечения слитка обрывы корки повышают дефектность заготовки и снижают стабильность литья. Кроме того, с уменьшением сечения слитка увеличивается отношение длины графитовой рубашки к диаметру заготовки, что приводит к соответствующему снижению градиента температур по длине графитовой рубашки, и, в конечном счете, к увеличению протяженности фронта кристаллизации. Поэтому, вне зависимости от направления вытяжки заготовки, стабильность и качество литья при уменьшении сечения заготовки повышают, используя пошаговый режим вытяжки слитка. Благодаря пошаговому режиму фронт кристаллизации опускается, и оборвавшийся участок за время паузы успевает надежно соединиться с основным фронтом затвердевания. При литье заготовок диаметром менее 10 мм стабильность и качество слитков повышают путем минимизации гидростатического давления расплава на фронт кристаллизации и уменьшения протяженности фронта кристаллизации за счет повышения градиента температур по длине графитовой рубашки кристаллизатора.

По результатам эксперимента по снятию температурных полей можно сделать вывод, что скорость литья заготовок оказывает большое влияние на продолжительность процесса литья и качество поверхности заготовки. Так же было показано, что скорость литья имеет фиксированное значение, после которого происходит обрыв заготовки. При увеличении скорости литья увеличивается протяженность двухфазной области, что приводит к появлению более глубоких поверхностных неслитин на заготовке и её обрыву внутри кристаллизатора.

3.4 Результаты исследования макроструктуры образцов

Исследования макроструктуры образцов проводились в процессе получения заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-цинковых сплавов, получаемых методом непрерывно-пошагового литья заготовок вверх. Образцы были получены при различных скоростях вытяжки заготовки, что нам позволило выявить величину, форму и расположение зерен в заготовке, ликвации цинка, глубину поверхностных неслитин. На рисунке 39 представлена макроструктура медно-цинкового сплава ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм, полученная при разных скоростях вытяжки: 0,45 м/мин; 0,62 м/мин; 0,77 м/мин.

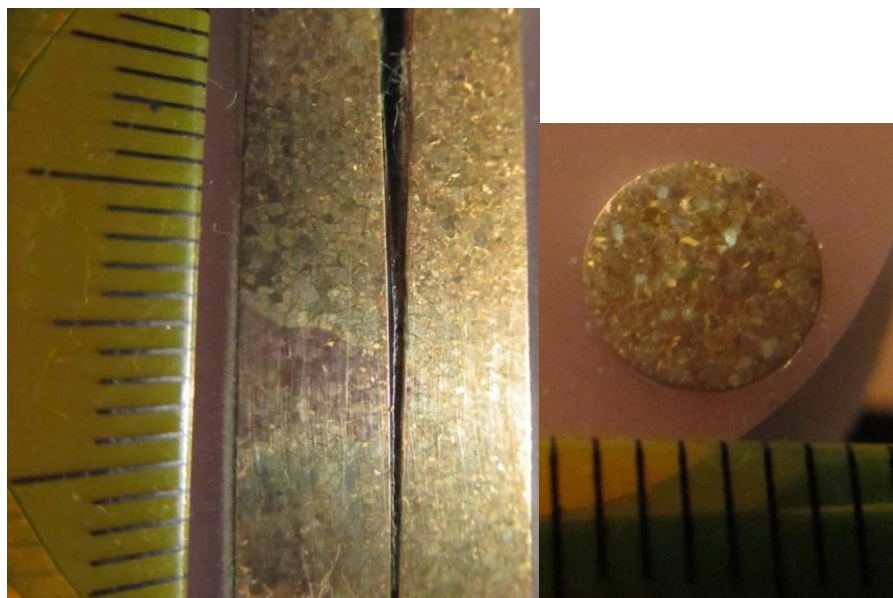


Рисунок 39 – Макроструктура ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм при трех скоростях
вытяжки:

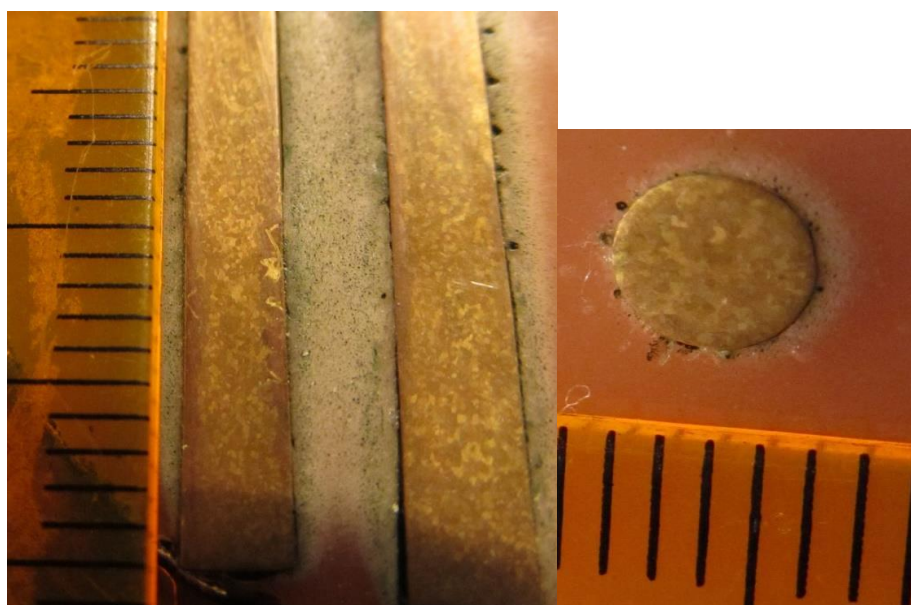
1 – 0,45 м/мин; *2* – 0,62 м/мин; *3* – 0,77 м/мин

Из рисунка видно, что структура мелкая и равноосная, со средним значения зерна 175 мкм и характерная для медно-цинковой группы сплава.

Помимо прутков диаметром 10 мм, так же рассмотрены прутки диаметром 4, 5, 6 мм из медно-цинковых сплавов. Макроструктура некоторых из них представлена на рисунке 40.



а



б

Рисунок 40 – Макроструктура литой проволоки: а – Ø6 мм из сплава ЛОК59-1-03;
б – Ø4 мм из сплава П211.

Прутки имеют гладкую, слабо окисленную поверхность без инородных включений, низкую глубину поверхностных неслитин, малый допуск по диаметру ($\pm 0,05$ мм) и кривизне. Полученные заготовки могут являться конечным продуктом в случае литья трудно деформируемых медно-цинковых припоев.

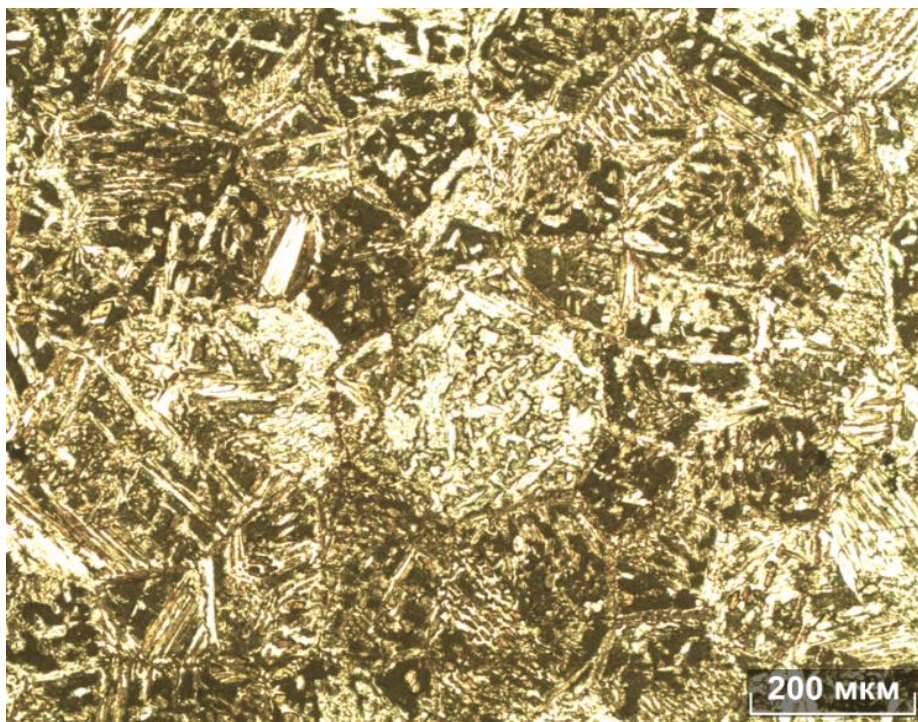
На рисунке 41 представлен внешний вид прутков ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм для трех скоростей вытяжки в режиме шаг-остановка.



Рисунок 41 – Внешний вид прутков ЛОК59-1-0,3 диаметром 10 мм для трех скоростей вытяжки:
1 – 0,45 м/мин; *2* – 0,62 м/мин; *3* – 0,77 м/мин

3.5 Результаты исследования микроструктуры образцов

Проводились исследования микроструктур сплава ЛОК 59-1-0,3 диаметром 10 мм для продольных и поперечных шлифов при различных скоростях вытяжки. Фотографии микроструктур представлены на рисунке 42. Средний размер микрозерна для трех разных скоростей вытяжки приведен в таблице 15 [49, 74,75]. На фотографиях микроструктур для простоты и удобства подсчета контур зерна очерчивался.



а



б

Рисунок 42 – Микроструктура ЛОК59-1-0,3 при увеличении $\times 100$:

а – поперечный разрез для скорости вытяжки 0,45 м/мин; б – продольный разрез для скорости вытяжки 0,77 м/мин.

Таблица 15– Средний размер микрозерна для трех разных скоростей вытяжки

Скорость литья, м/мин	Сечение прутка	Средний размер зерна, мкм
0,45	поперечное	166,3±15,2
	продольное	176,6±16,1
0,62	поперечное	170,3±16,1
	продольное	178,3±15,4
0,77	поперечное	174,7±13,8
	продольное	182,2±14,6

По результатам, приведенным в таблице 9, можно сделать вывод, что с увеличением скорости вытяжки зерно незначительно увеличивается. Такое изменение размера зерна связано с замедлением скорости затвердевания и увеличением протяженности фронта кристаллизации. Заготовки с размером зерна от 160 до 180 мкм могут предназначаться для последующего обработки материала давлением в виде скальпирования, прокатки и волочения.

3.6 Выводы по главе

1. При проведении эксперимента по снятию температурных полей установлено, что прутки сплава ЛОК59-1-0,3 имеют мелкозернистую разносную структуру, характерную для медно-цинковых сплавов, при скорости вытяжки от 0,45 до 0,77 м/мин и средний размер зерна от 165 до 185 мкм. Данный размер зерна в медно-цинковых сплавах является благоприятным для последующей деформации заготовок.

2. На основании результатов моделирования определено, что критическая скорость литья, приводящая к нестабильности процесса и обрыву заготовки внутри кристаллизатора, составляет 0,77 м/мин.

3. На основании результатов моделирования процесса затвердевания заготовки, при непрерывном литье вверх, в программном пакете «ProCast» установлено:

- при увеличении скорости литья с 0,45 м/мин до 0,77 м/мин протяженность фронта кристаллизации увеличивается в 1,4 раза, как и объем двухфазной области;
- расстояние от нижнего среза графитовой рубашки до зоны образования твердой корки при режиме шаг-остановка, при увеличении скорости литья с 0,45 м/мин до 0,77 м/мин, увеличивается в 2 раза;

- стабильности и качества литья, при уменьшении сечения заготовки, можно добиться благодаря режиму шаг-остановка, т.к. фронт кристаллизации опускается, и оборвавшийся участок за время паузы успевает надежно соединиться с основным фронтом затвердевания;

- наиболее стабильный режим непрерывного литья достигается, когда отношение длины шага к диаметру заготовки находится в интервале от 2 до 3, что заметно сказывается на качестве поверхности прутка.

4. Заготовки, полученные методом непрерывного литья вверх, при оптимальных режимах имеют гладкую, слабо окисленную поверхность без инородных включений, низкую глубину поверхностных неслитин, малый допуск по диаметру и кривизне.

4. Исследование влияния технологических факторов на стабильность процесса литья и качество заготовок

4.1 Формирование дефектов при непрерывно-пошаговом литье заготовок диаметром от 4 до 10 мм

Появление дефектов на поверхности прутка, в процессе непрерывного литья, и снижение качества слитков определяется увеличением протяженности фронта затвердевания и свойствами сплава, а также отношением объема жидкой фазы к твердой в зоне затвердевания (рис. 43). Температура стенки кристаллизатора уменьшается в направлении вытяжки слитка. Процесс затвердевания заготовки начинается в зоне, где стенка кристаллизатора имеет относительно высокую температуру, что обуславливает формирование протяженной тонкой корки *а*. Сила трения между затвердевающей коркой и неподвижной стенкой кристаллизатора определяется протяженностью корки, гидростатическим давлением и чистотой рабочей поверхности кристаллизатора. Напряжения, вызванные трением корки о рабочую поверхность кристаллизатора, довольно часто превышают ее прочность в силу малой толщины и высокой температуры *б*, *в*. Обрыв, или так называемое зависание корки внутри кристаллизатора, довольно частое явление. Оборвавшийся участок корки начинает перемерзать *г* и всё больше мешает поступлению горячего расплава в зону затвердевания, после чего происходит обрыв заготовки *д*. Это бывает вызвано целым рядом факторов: высокая скорость вытяжки, ухудшение чистоты внутренней поверхности графитовой рубашки, низкий уровень расплава в тигле и т.д. [50,62].

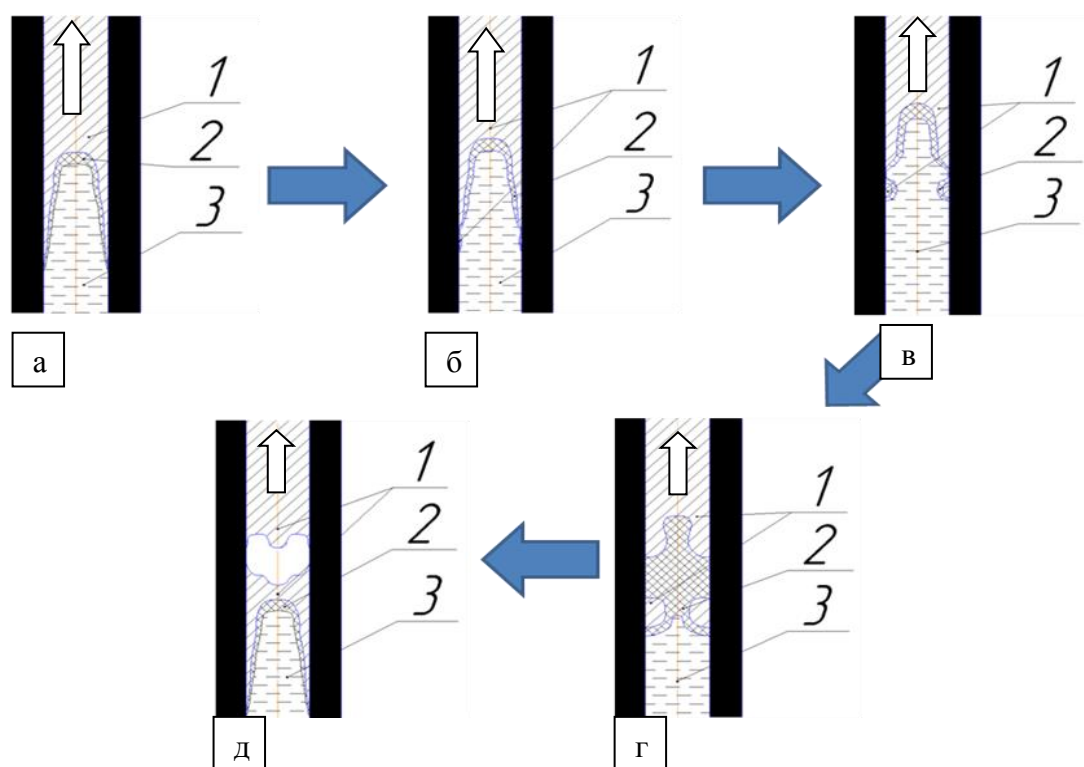
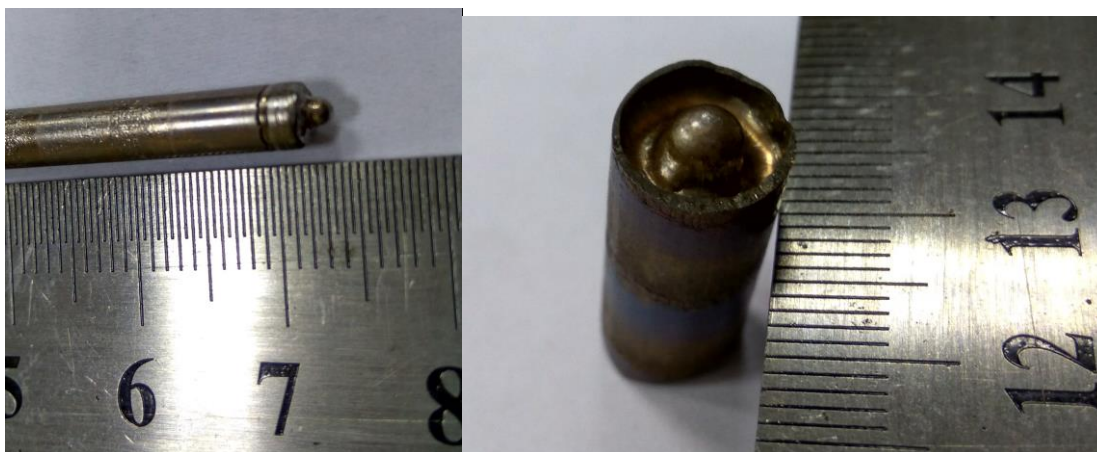


Рисунок 43 - Схема образования обрыва при непрерывно-пошаговом вытягивании заготовки вверх: 1 – сформировавшаяся заготовка; 2 – двухфазная область; 3 – расплав.

По результатам компьютерного моделирования было определено, что повышение скорости литья увеличивает объем двухфазной области и, в свою очередь, приводит к увеличению протяженности затвердевающей твердой корки. При достижении скорости вытяжки заготовки в 0,8-0,9 м/мин происходит обрыв заготовки в кристаллизаторе. Так же эти данные подтверждают эксперименты, проведенные по непрерывно-пошаговому литью вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм. На рисунке 44 представлены обрывы прутков при литье высокотемпературных припойных сплавов.



А

Б

Рисунок 44 - Обрыв прутка в кристаллизаторе во время процесса непрерывного литья: А – пруток диаметром 4 мм; Б – пруток диаметром 10 мм.

Питание объемной усадки в условиях непрерывного литья осуществляется достаточно свободно, поскольку происходит направленное затвердевание, однако при завышении скоростей литья могут наблюдаться внутренние поры (рис.45).

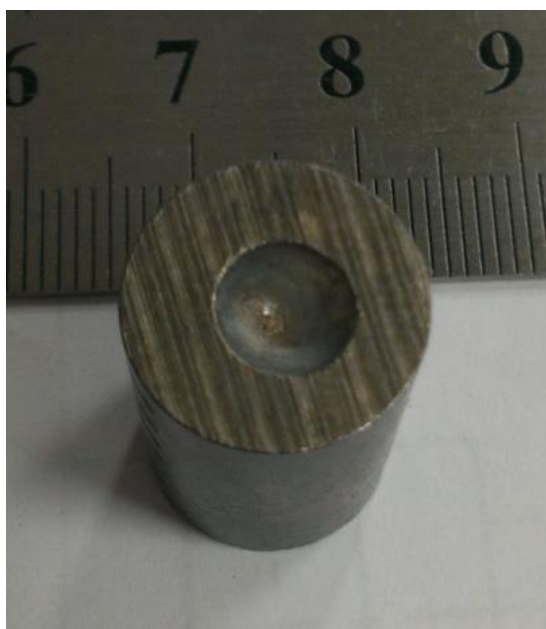


Рисунок 45 - Внутренняя пора, образовавшаяся в процессе литья заготовки диаметром 10 мм.

На появление дефектов на поверхности прутка также влияет состояние внутренней поверхности графитовой рубашки кристаллизатора. Появление хотя бы небольшого дефекта в виде царапины на поверхности графитовой рубашки может привести к появлению выступов на заготовке, рисунок 46.



Рисунок 46 - Выступы на заготовке непрерывного литья

Выделено три рода горячих трещин в зависимости от механизма их образования [63]. Механизм образования горячих трещин различного рода и их величина определяются литейными и теплофизическими свойствами отливаемого сплава, скоростью вытягивания заготовки, а также качеством подготовки рабочей поверхности кристаллизатора. Литейные дефекты первого рода (рис. 47) появляются при уменьшении уровня расплава в тигле, что влечет за собой уменьшение гидростатического давления жидкого металла внутри графитового кристаллизатора и уменьшение интенсивности теплоотвода от затвердевающей заготовки во время её вытяжки. На участке пройденной заготовкой появляется воздушный зазор вызванный, увеличением толщины разрушающейся корки, вследствие чего металл, протекающий сквозь эту корку, охлаждается и ему не хватает жидкотекучести, чтобы полностью заполнить профиль фронта затвердевания между оборвавшимся участком и основным фронтом. Однако, во время паузы этот участок соединяется с основным фронтом затвердевания и вытягивается вверх во время следующего шага заготовки. Данные дефекты чаще всего появляются незадолго до обрыва прутка и являются сигналом, обозначающим, что в процессе непрерывного литья произошел сбой. Причинами появления дефектов первого рода в основном являются падение

уровня расплава ниже минимального значения, снижение температуры расплава в металлоприемнике.



Рисунок - 47 - Дефекты первого рода при непрерывно-пошаговом литье

Литейные дефекты второго рода (рис. 48) вызваны низкой жидкотекучестью расплава, который не успевает или не может заполнить полностью зону разрыва твердой корки, появляющейся при следующем шаге вытяжки заготовки. Эти виды дефектов встречаются чаще остальных и являются допустимыми при глубине неслитин не превышающих 5% от диаметра заготовки. Данные дефекты возникают при ускоренной вытяжке заготовки, когда основной фронт и оборвавшаяся корка соединяются в зоне, где графитовая втулка гораздо холоднее.

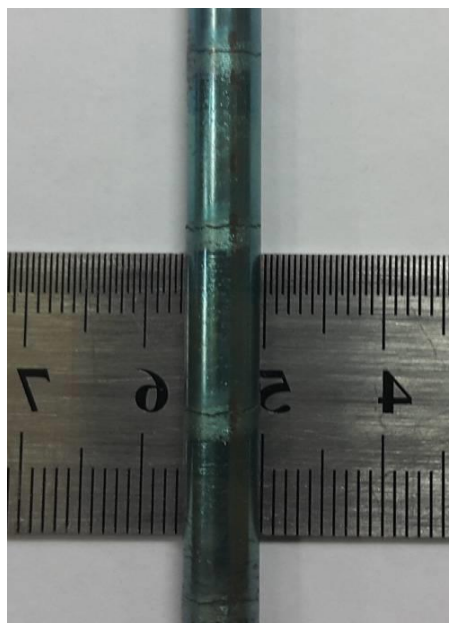


Рисунок 48 - Дефекты второго рода при непрерывно-пошаговом литье

Литейные дефекты третьего рода (рис.49) возникают из-за значительно увеличившегося коэффициента трения между твердой коркой заготовки и внутренней стенкой графитового кристаллизатора, вследствие износа внутренней поверхности графитового кристаллизатора или образования глубоких надиров на поверхности графитового кристаллизатора [51]. Дефекты представляют собой выступы на поверхности прутка. Данные дефекты возникают редко и показывают, что поверхность графитовой втулки сильно изношена и кристаллизатор нужно выводить из работы.



Рисунок 49 - Дефекты третьего рода при непрерывно-пошаговом литье

Проведены исследования микроструктур высокотемпературных припойных сплавов для более детального изучения причин возникновения дефектов на поверхности прутка.

Для исследования наружной поверхности прутков высокотемпературных припоев, были сделаны продольные и поперечные шлифы и фотографии микроструктур с помощью микроскопа. На продольных шлифах было сделано по 3 фотографии микроструктур в зонах, которые показаны на рисунках 50 и 51.

На рисунке 50 показан продольный шлиф сплава с содержанием 7,7%Р, на нем выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры.

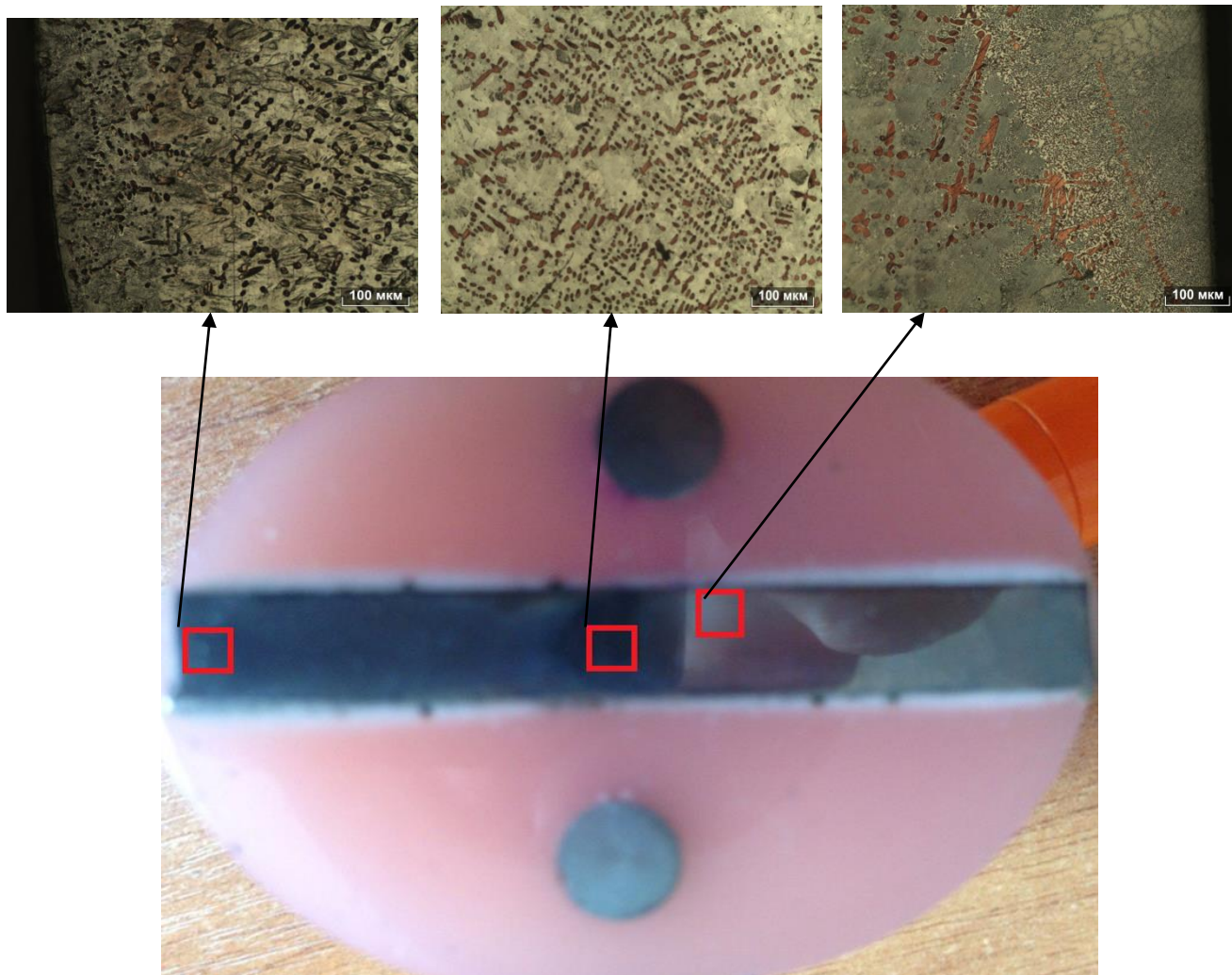


Рисунок 50 – Схема продольного образца с содержанием 7,7%Р

На рисунке 51 показан продольный шлиф сплава с содержанием 8,7%Р, на нем выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры.

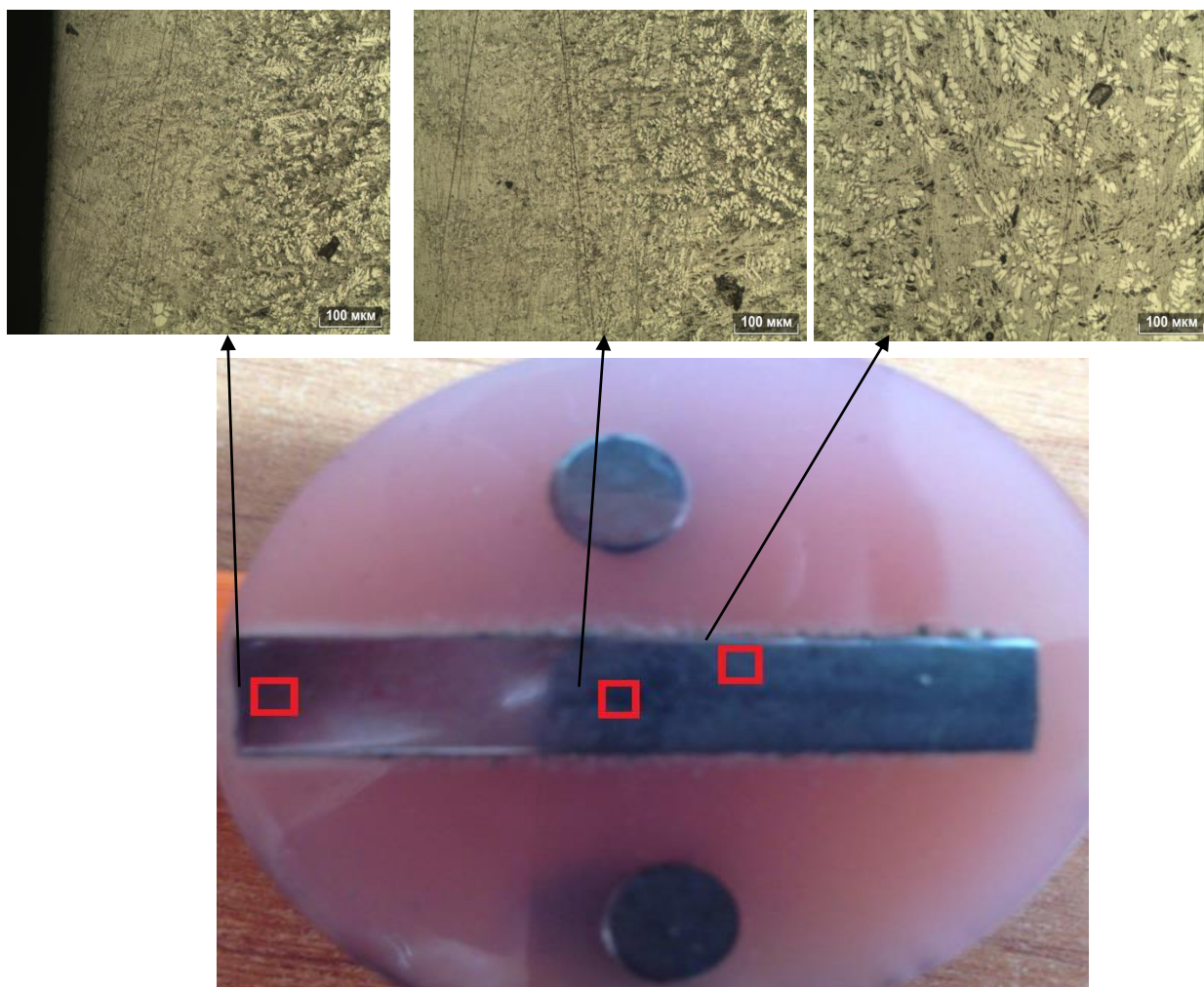


Рисунок 51 – Схема продольного образца с содержанием 8,7%Р

Для каждого сплава было сделано по 2 шлифа в зоне паузы (где затвердевая, прутки в кристаллизаторе останавливается) (1) и в зоне движения (где затвердевая, прутки в кристаллизаторе движется) (2), которые показаны на рисунке 52. На поперечных шлифах было сделано по 2 фотографии микроструктур (в центре и на периферии).

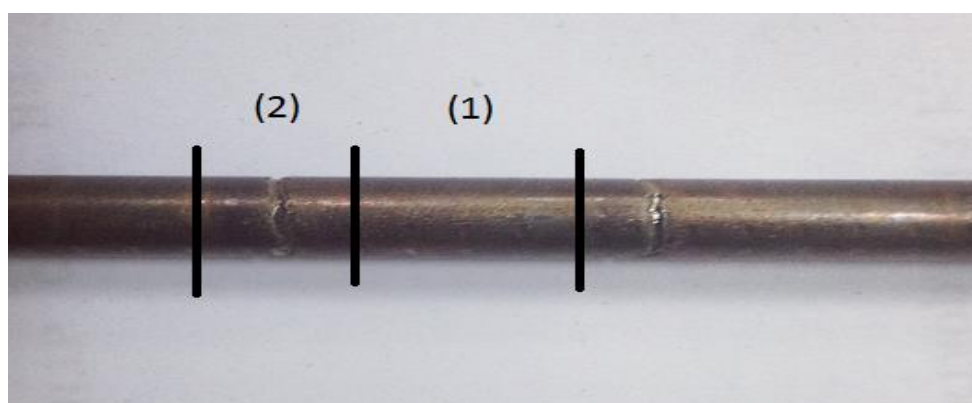


Рисунок 52 – Схема прутка с зонами

На рисунке 53 показана макроструктура сплава с содержанием 7,7%Р в зоне (1) и на ней выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры (центр и периферия).

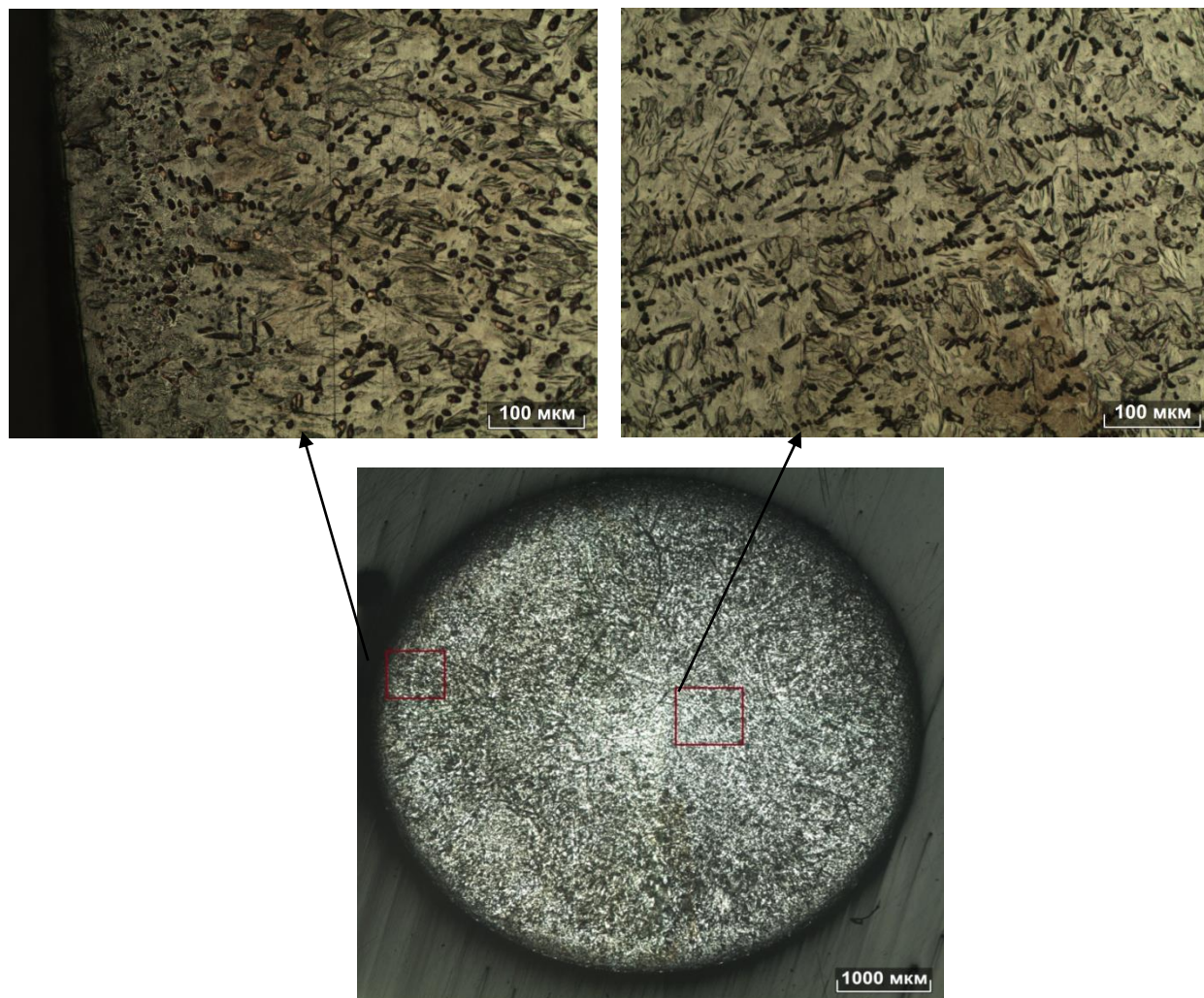


Рисунок 53 – Схема сплава с содержанием 7,7%Р в зоне (1)

Микроструктура медно-фосфорного сплава с содержанием 7,7%Р состоит из дендритов α -твердого раствора на основе меди и эвтектики $\alpha(\text{Cu}) + \text{Cu}_3\text{P}$

На рисунке 54 показана макроструктура сплава с содержанием 7,7%Р в зоне (2) и на ней выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры (центр и периферия).

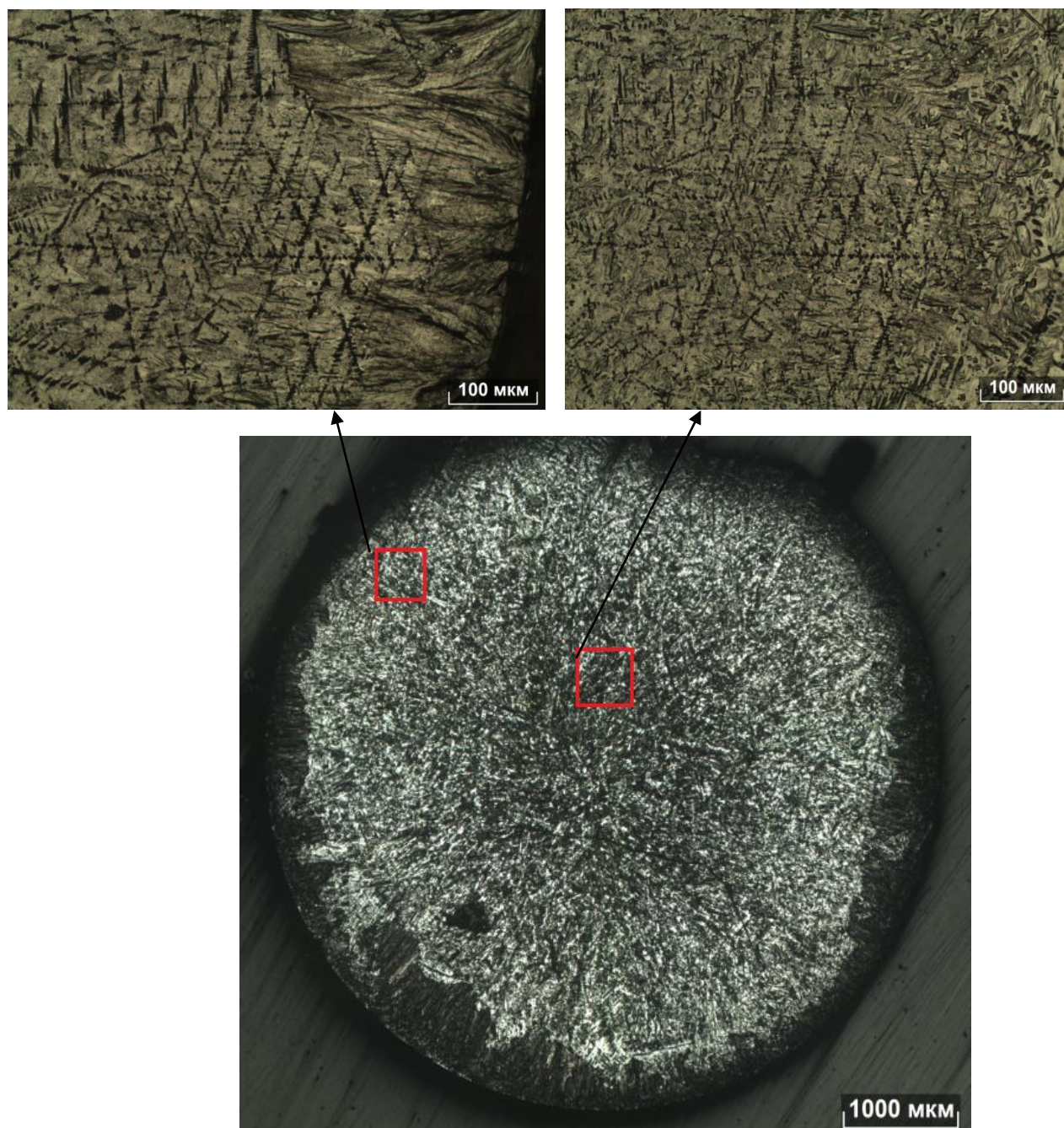


Рисунок 54 – Схема сплава с содержанием 7,7%Р в зоне (2)

На рисунке 55 показана макроструктура сплава с содержанием 8,7%Р в зоне (1), и на ней выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры (центр и периферия).

Микроструктура медно-фосфорного сплава с содержанием 8,7%Р состоит из фосфида меди Cu_3P и эвтектики $\alpha(\text{Cu}) + \text{Cu}_3\text{P}$.

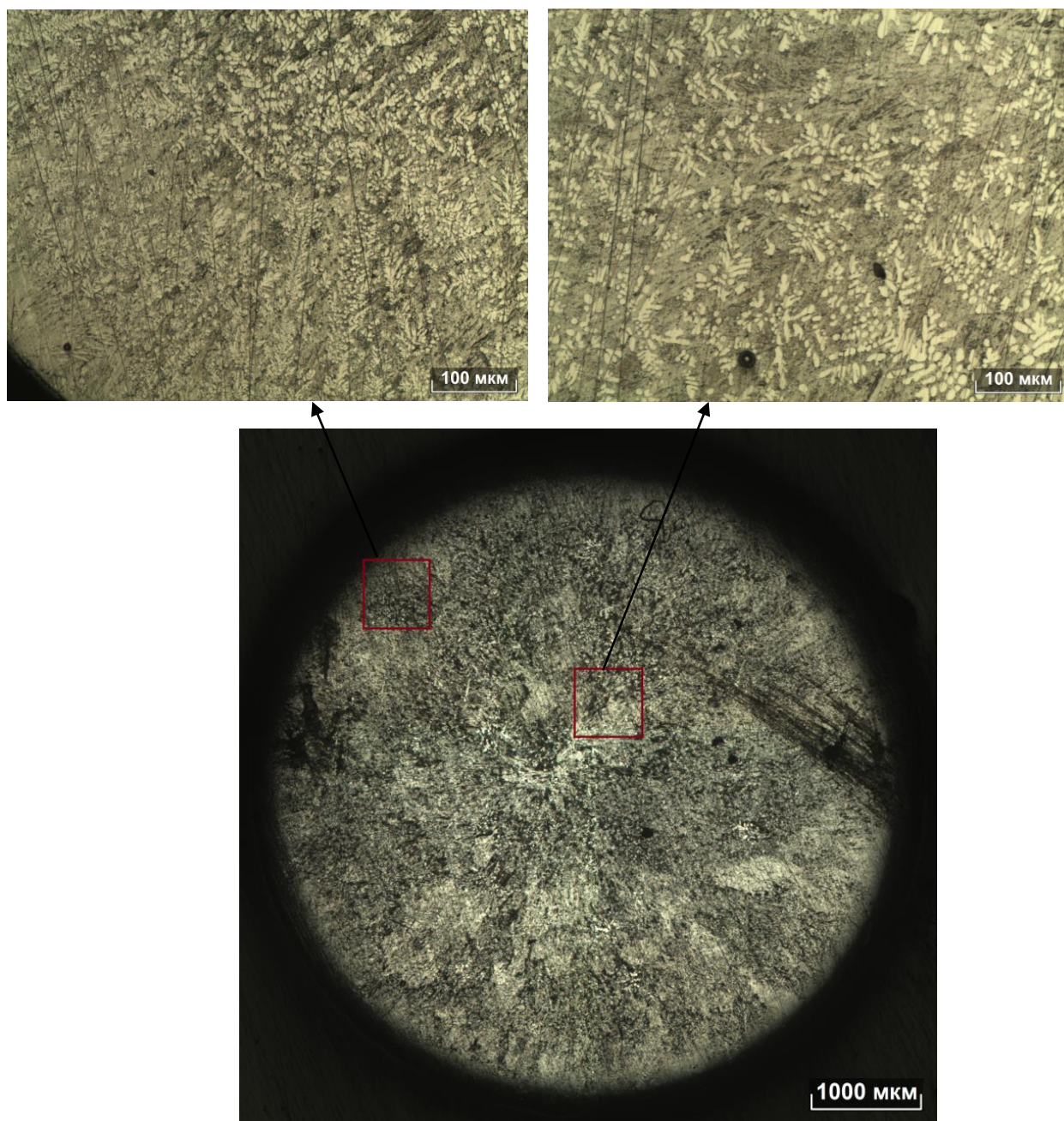


Рисунок 55 – Схема сплава с содержанием 8,7%Р в зоне (1)

На рисунке 56 показана макроструктура сплава с содержанием 8,7%Р в зоне (2), и на ней выделены участки, где были сделаны снимки микроструктуры (центр и периферия).

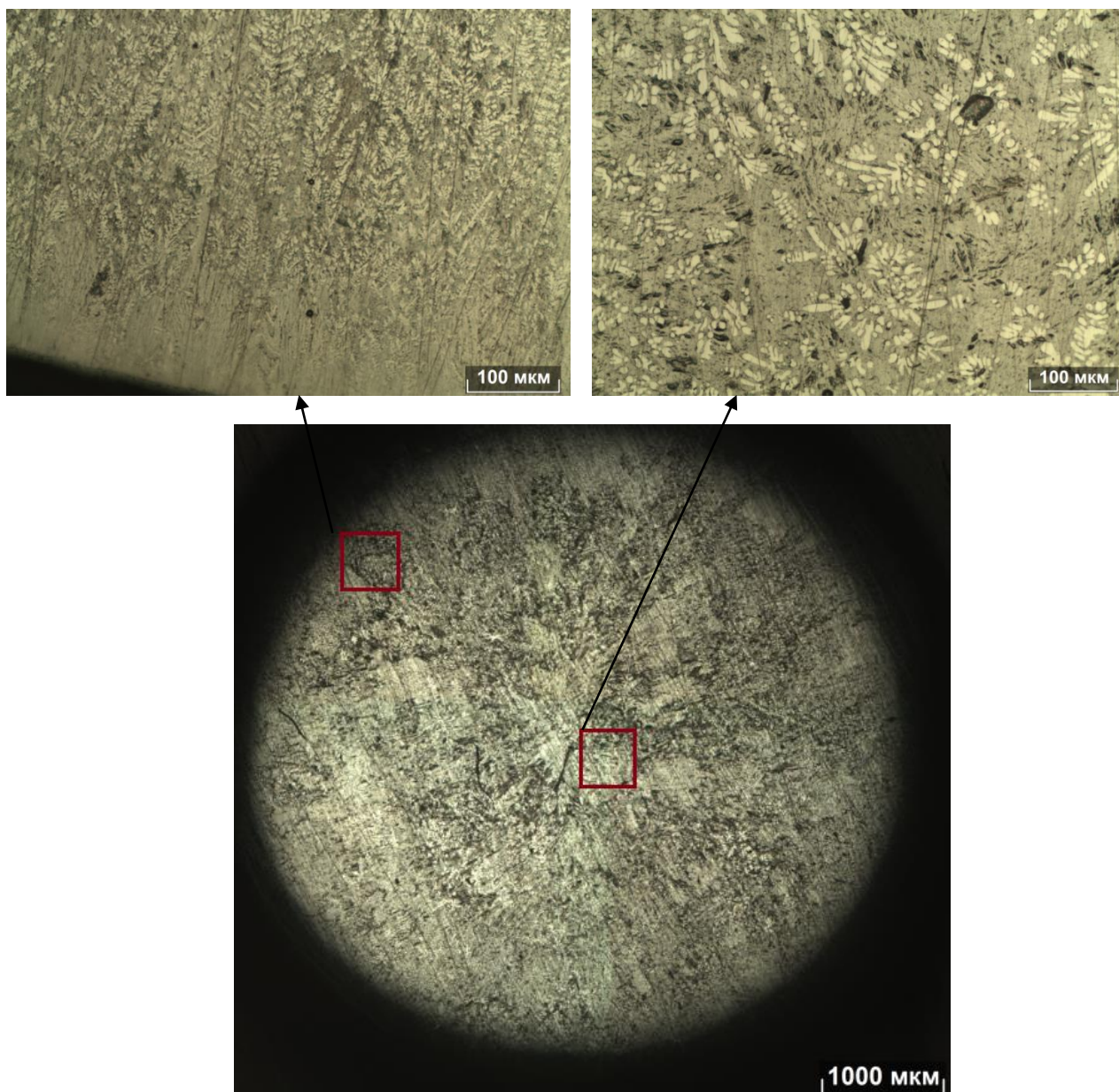


Рисунок 56 – Схема сплава с содержанием 8,7%Р в зоне (2)

Расчеты дендритной ячейки проводили для двух сплавов ПМФ7 (7,7%Р и 8,7%Р) в программе “Sizer” методом «поперечных секущих», результаты отображены в таблице 16. Измерения выполнялись на четырех микроструктурах (в центре и на периферии). Для каждой микроструктуры было проведено 10 секущих и посчитано среднее значение для каждой. Итогом этой промежуточной работы стал расчет среднего значения размера дендритной ячейки по ранее полученным результатам.

Таблица 16. Расчет дендритной ячейки

№	7,7% (1) Центр, мкм	7,7% (2) Центр, мкм	7,7% (1) Край, мкм	7,7% (2) Край, мкм	8,7% (1) Центр, мкм	8,7% (2) Центр, мкм	8,7% (1) Край, мкм	8,7% (2) Край, мкм
1	2,46	3,73	1,19	3,03	2,79	3,83	0,97	1,59
2	2,15	5,45	1,23	2,75	2,46	3,79	0,93	2,15
3	3,38	5,15	1,17	2,34	3,08	3,82	1,23	2,49
4	2,77	4,62	1,83	2,65	3,49	2,97	1,16	1,98
5	3,69	3,56	2,03	2,48	2,45	3,45	1,68	1,56
6	1,85	5,23	2,13	2,13	3,68	3,63	1,39	1,49
7	2,89	4,03	1,44	2,62	2,89	3,18	1,52	1,83
8	2,68	4,32	1,03	2,84	2,54	2,87	1,47	1,78
9	2,93	4,67	1,23	2,37	2,49	3,93	1,52	1,69
10	3,14	4,96	1,12	2,09	2,63	3,48	1,45	2,08
Ср. знач	2,79	4,53	1,44	2,53	2,85	3,51	1,31	1,86

На рисунке 57 приведена диаграмма зависимости размера дендритной ячейки в центре и на периферии в зависимости от зоны формирования заготовки (в зоне паузы и зоне движения) в двух сплавах ПМФ7 (7,7%Р и 8,7%Р)

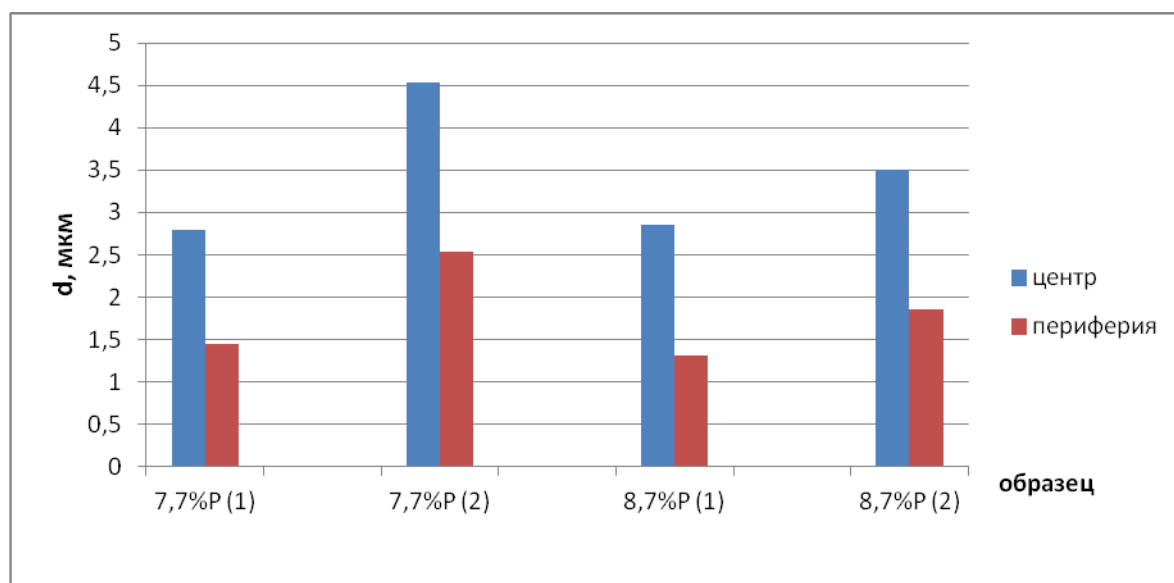


Рисунок 57 - Диаграмма зависимости размера дендритной ячейки от расстояния

Из представленных (в таблице 16) результатов, можно сделать выводы: в обоих сплавах в зоне (1) размер дендритной ячейки меньше, чем в зоне (2); на периферии дендритная ячейка меньше, чем в центре почти в два раза.

На рисунке 58 мы видим макроструктуру поперечного шлифа с дефектом 2 рода в виде трещины. Данный дефект появляется в результате формирования протяженной тонкой корки, т.к. процесс затвердевания заготовки носит нелинейный характер и начинается в зоне, где стенка кристаллизатора имеет относительно высокую температуру. Сила трения между затвердевающей коркой и неподвижной стенкой кристаллизатора определяется протяженностью корки, гидростатическим давлением и чистотой рабочей поверхности кристаллизатора. Одна из главных проблем, с которой сталкиваются при производстве прутков с небольшим сечением (4 – 6 мм) это обрыв, или так называемое зависание корки внутри кристаллизатора.

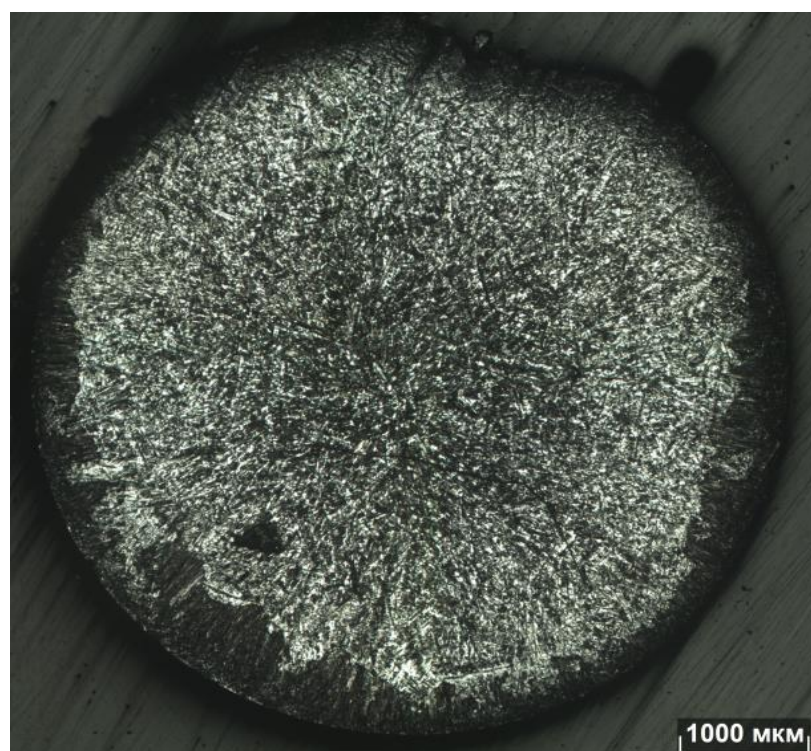


Рисунок 58 – макроструктура с дефектом в виде трещины

Процесс обрыва корки подтверждается фактом, что на образце выявлены 2 зоны с разными размерами эвтектической ячейки. На рисунке 59 представлена микроструктура, где видно эти 2 зоны: слева зона обрыва корки, которая медленно твердела, и по которой тек жидкий металл, пока не соединился с оборвавшимся участком. Зона затвердевания в естественных условиях.

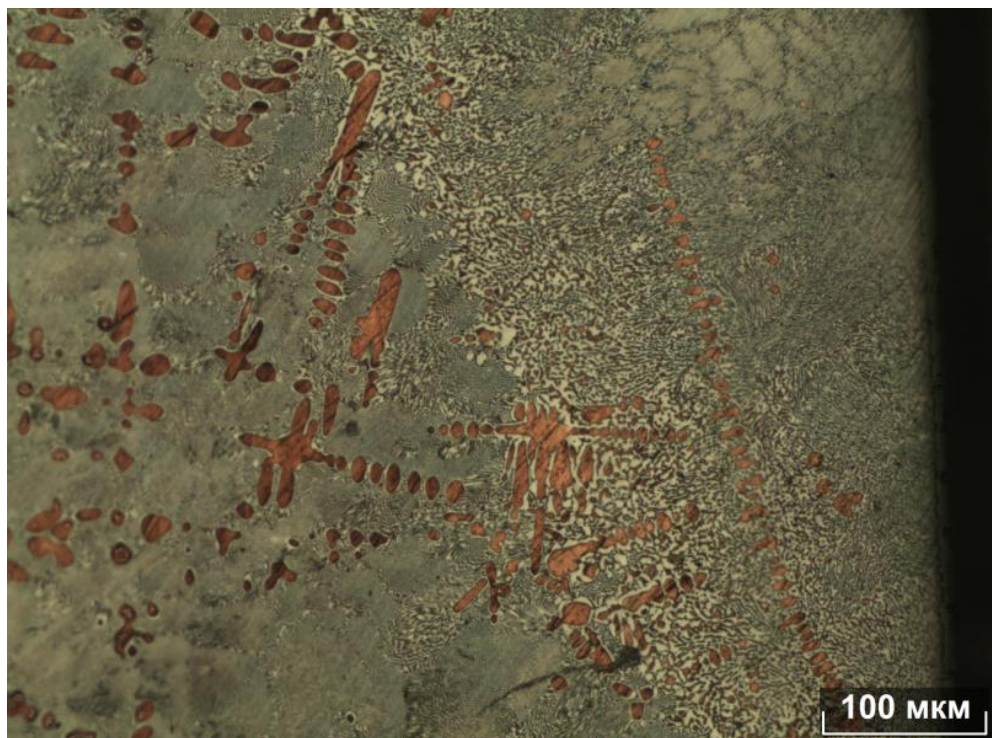


Рисунок 59 – Микроструктура образца

Были посчитаны средние значения размеров эвтектической ячейки. Среднее значение размера эвтектической ячейки в зоне справа – 3,89 мкм, в зоне слева – 1,29 мкм. Из полученных значений можно сделать вывод, что был, отрыв вытянутой корки заготовки и плохая теплопередача в зоне формирования заготовки.

4.2 Построение полнофакторного эксперимента для выявления влияния основных технологических факторов на стабильность литья и дефектность заготовки

Для исследования стабильности литья высокотемпературных припоев малых сечений, был провиден 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 1, 2 и 3 рода на единицу длины (y_1), количество обрывов в течение часа (y_2), длительность процесса непрерывного литья (y_3). Диапазон варьирования факторов представлен в таблице 17.

Таблица 17 - Интервала варьирования факторов

	глубина погружения кристаллизатора в расплав (X_1), мм	температура перегрева расплава (X_2), °C	средняя скорость вытяжки заготовок из расплава (X_3), м/мин
интервал варьирования факторов	70-110	50-150	0,45-0,77

Осуществляем ПФЭ с постановкой двух параллельных опытов. Требуется найти математическую модель объекта исследования в виде полинома. Произвести оценку значимости её коэффициентов и проверку адекватности этой модели.

Исходные данные, промежуточные и конечные результаты указаны в таблице 18 со следующими обозначениями.

X_0 – фиктивная переменная (значение которой всегда равна +1); X_1, X_2, X_3 – кодированные значения факторов;

u – номер строки матрицы ($u=1, N$); N – число опытов ($N=8$); q – номер параллельного опыта ($q=1, \Pi$); Π – число параллельных опытов ($\Pi=2$);

y_{uq} – результат опыта; i – номер фактора ($i=1, 3$).

Таблица 18 Исходные данные

№ опыты	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1X_2=X_4$	$X_1X_3=X_5$	$X_2X_3=X_6$	$X_1X_2X_3=X_7$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Вычисляем построчное среднее значение выхода:

$$\bar{y}_u = \sum_{q=1}^{\Pi} y_{uq} / \Pi \quad (1)$$

Вычисляем оценки построчных дисперсий:

$$D_u = \sum_{q=1}^{\Pi} (y_{uq} - \bar{y}_u)^2 / (\Pi - 1) \quad (2)$$

Находим максимальную, из расчетных оценок построчных дисперсий:

$$D_{max} = D_8 \quad (3)$$

Рассчитываем значение суммы оценок построчных дисперсий:

$$\sum_{u=1}^N D_u \quad (4)$$

Расчеты проводились в специальной программе, где проводилась обработка и анализ результатов ПФЭ.

Полученные результаты по количеству дефектов на единицу длины (y_1) представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Среднее значения функций отклика и построчных дисперсий

№ опыта	среднее значение функций отклика	среднее значение построчных дисперсий
1	6,67	4,33
2	4	1
3	3	1
4	0,5	0,25
5	1,5	0,25
6	0,5	0,25
7	9	1
8	4	1

Сумма дисперсий 9,08

Максимальное значение дисперсий: 4,33

Коэффициенты уравнения дисперсий b_j :

$$b_0 = 3,64$$

$$b_1 = -1,39$$

$$b_2 = 0,47$$

$$b_3 = 0,1$$

$$b_4 = -0,47$$

$$b_5 = -0,1$$

$$b_6 = 2,27$$

$$b_7 = -0,52$$

Полученные результаты по количеству обрывов в течение часа (y_2) представлены в таблице 20.

Таблица 20 - Среднее значения функций отклика и построчных дисперсий

№ опыта	среднее значение функций отклика	среднее значение построчных дисперсий
1	1	1
2	1,33	2,33
3	0,5	0,25
4	0,5	0,25
5	0,5	0,25
6	0,5	0,25
7	1	1
8	0,5	0,25

Сумма дисперсий 5,58

Максимальное значение дисперсий: 2,33

Коэффициенты уравнения дисперсий b_j :

$$b_0=0,73$$

$$b_1=-0,02$$

$$b_2=-0,1$$

$$b_3=-0,1$$

$$b_4=-0,1$$

$$b_5=-0,1$$

$$b_6=0,23$$

$$b_7=-0,02$$

Полученные результаты по количеству длительности процесса непрерывного литья (y_3) представлены в таблице 21.

Таблица 21 - Среднее значения функций отклика и построчных дисперсий

№ опыта	среднее значение функций отклика	среднее значение построчных дисперсий
1	7,83	11,08
2	7,33	14,33
3	9,5	0,25
4	9,5	0,25
5	9,5	0,25
6	9,5	0,25
7	8	7
8	9,5	0,25

Сумма дисперсий 33,66

Максимальное значение дисперсий: 14,33

Коэффициенты уравнения дисперсий b_j :

$$b_0=8,83$$

$$b_1=0,12$$

$$b_2=0,29$$

$$b_3=0,29$$

$$b_4=0,25$$

$$b_5=0,25$$

$$b_6= -0.66$$

$$b_7=0,12$$

При одинаковом во всех строчках числе параллельных опытов, однородность построчных дисперсий проверяем по критерию Кохрена. Определяем экспериментальное значение этого критерия:

$$G_3 = D_{max} / \sum_{u=1}^N D_u \quad (5)$$

Проверим построчные дисперсии на однородность, которая является свидетельством равноточности измерений выхода объекта. При этом на точность измерения оказывают влияние как метрологические характеристики применяемых измерительных средств, так и возмущения, воздействующие на объект.

Условие однородности

$$G_3 \leq G_\tau \quad (6)$$

из чего делаем вывод, что построчные дисперсии однородны. Заметим, что в противном случае регрессионный анализ результатов факторного эксперимента становится невозможным и требуются более точные средства измерения.

Находим предварительные значения коэффициентов искомой модели объекта исследования:

$$b_0 = \sum_{u=1}^N \bar{y}_u / N \quad (7)$$

$$b_0 = \sum_{u=1}^N X_{ui} \bar{y}_u / N \quad (8)$$

Вычисляем оценку общей дисперсии воспроизводимости выхода:

$$D\{y\} = \sum_{u=1}^N D_u / N \quad (9)$$

Найдем оценку дисперсии, связанной с определением коэффициентов модели:

$$D\{b_i\} = D\{y\}/(\pi N) \quad (10)$$

Эта дисперсия, в силу ортогональности плана, одинакова для всех коэффициентов модели.

Рассчитаем границы доверительного интервала определения коэффициентов модели:

$$\Delta b_i = \pm t_T \sqrt{D\{b_i\}} \quad (11)$$

Последним шагом является проверка адекватности полученной модели. Под адекватностью модели подразумевается её соответствие реальному объекту исследования в пределах принятых статических оценок. Если все $M=N$ коэффициентов модели оказались значимыми, то поверхность отклика, описываемая уравнением, проходит через все точки опытов со значениями Y_{uq} . При $M=L < N$, когда отдельные b - коэффициенты незначимы, некоторые из опытных точек лежат вне поверхности отклика, что является одной из предпосылок неадекватности модели. Однако, окончательное суждение об адекватности или неадекватности модели относительно и зависит от принятого критерия такой оценки [52].

Экспериментальное значение критерия Фишера определяем по формуле:

$$F_3 = D_{ад}/D\{y\} \quad (12)$$

В которой $D_{ад}$ – оценка дисперсии адекватности, в свою очередь определяемая как

$$D_{ад} = \pi \sum (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 / (N - L) \quad (13)$$

где L – число членов уравнения модели, оставшихся после оценки значимости, включая свободный член; \hat{y}_u – значение выхода в u -й строке матрицы, «предсказанной» моделью [53].

Расчетные коэффициенты уравнения регрессии и Критерий Фишера для количества дефектов на единицу длины (y_1), представлены ниже.

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = 3,64$$

$$b_1 = -1,33$$

$$b_2 = 0,47$$

$$b_3 = 0$$

$$b_4 = -0,47$$

$$b_5 = 0$$

$$b_6 = 2,27$$

$$b_7 = -0,52$$

Расчетный критерий Фишера: 0,23

Табличный критерий Фишера=3,63

Модель адекватна

Расчетные коэффициенты уравнения регрессии и Критерий Фишера для количества обрывов в течении часа (y_2), представлены ниже.

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0=0,73$$

$$b_1=0$$

$$b_2=0$$

$$b_3=0$$

$$b_4=0$$

$$b_5=0$$

$$b_6=0$$

$$b_7=0$$

Расчетный критерий Фишера: 0,47

Табличный критерий Фишера=2,66

Модель адекватна

Расчетные коэффициенты уравнения регрессии и Критерий Фишера для длительности процесса непрерывного литья (y_3), представлены ниже.

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0=8,83$$

$$b_1=0$$

$$b_2=0$$

$$b_3=0$$

$$b_4=0$$

$$b_5=0$$

$$b_6=0$$

$$b_7=0$$

Расчетный критерий Фишера: 0,63

Табличный критерий Фишера=2,66

Модель адекватна

Из приведенного выше исследования следует, что уравнение регрессии, в зависимости от исследуемых факторов, выглядят так:

$$\hat{y}_1 = 3.6 - 1.4x_1 + 0.5x_2 - 0.5x_1x_2 + 2.3x_2x_3 - 0.5x_1x_2x_3 \quad (14)$$

$$\hat{y}_2 = 0.7 \quad (15)$$

$$\hat{y}_3 = 8.8 \quad (16)$$

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

Значит, остается только уравнения модели, влияющие на количество дефектов на единицу длины. Отбросив незначимые коэффициенты, получим следующее уравнение модели:

$$\hat{y}_1 = 3.6 - 1.4x_1 + 0.5x_2 \quad (17)$$

Анализ модели подтвердил комплексное влияние факторов на количество дефектов на поверхности высокотемпературных припойных сплавов малых сечений. На рисунке 60 показано влияние анализируемых факторов на количество дефектов.

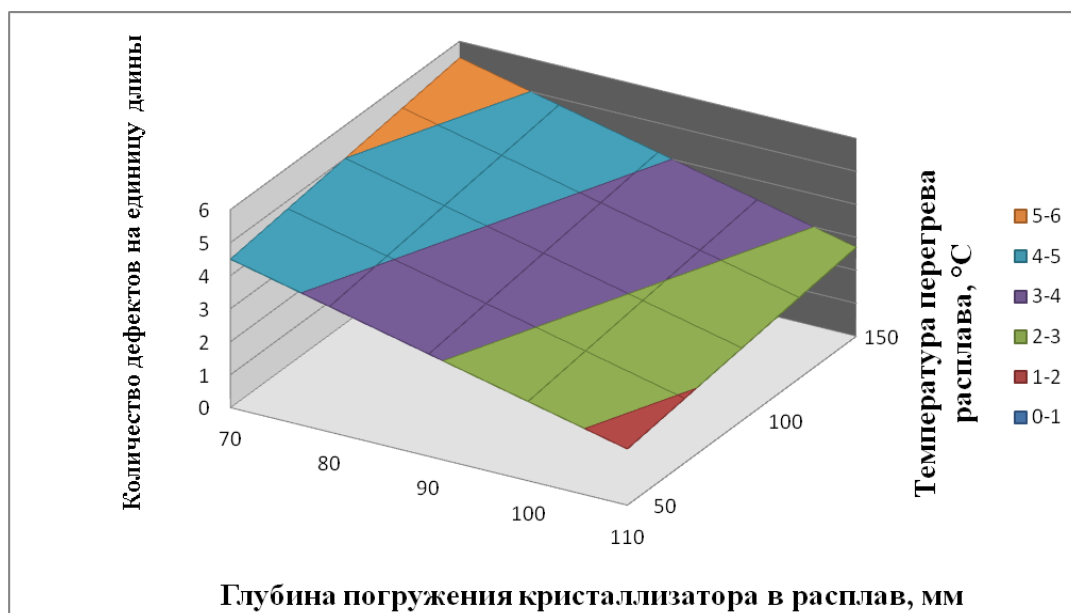


Рисунок 60 - Влияние анализируемых факторов на количество дефектов.

Данное уравнение показывает, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов наиболее отрицательное влияние на качество поверхности оказывает понижение уровня

расплава в тигле, а положительное влияние оказывает повышение 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.

4.3 Выводы по главе

1. В процессе получения непрерывно литой продукции диаметром от 4 до 10 мм из высокотемпературных припойных сплавов следует учитывать роль качества внутренней поверхности графитовой втулки кристаллизатора, которая вносит существенный вклад в стабильность процесса литья и качество получаемых заготовок.

2. Уточнен механизм образования обрывов и дефектов в процессе непрерывно-пошагового литья вверх заготовок малого сечения. Выявлено 3 рода дефектов (1, 2 и 3 рода). Образование дефектов связано с возникновением напряжения, вызванного трением корки о рабочую поверхность кристаллизатора, довольно часто превышающего ее прочность из-за малой толщины и высокой температуры расплава.

3. На основании изучения микроструктуры по обрыву корки было определено, что среднее значение размера ячейки в центральной зоне образца в 3 раза больше, чем на периферии.

4. 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 на качество поверхности 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 влияет на качество поверхности прутка, чем повышение температуры в металлоприемнике.

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

5. Построение промышленного оборудования для непрерывно-пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм из сплавов припоев на основе меди

5.1 Создание промышленной технологии для реализации процесса непрерывно-пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм

На основании проведенных исследований была выбрана наиболее рентабельная и перспективная технология производства мелкосотовых заготовок диаметром от 4 до 10 мм методом непрерывно-пошагового литья вверх. Проведен сравнительный анализ имеющихся технологий непрерывного литья вверх заготовок малого сечения, и рассмотрены зарубежные компании, выпускающие данный вид оборудования. Т.к. большинство представленного оборудования не подходит для производства малых партий припойных сплавов на основе систем медь-фосфор и медь-цинк, или обладают очень малым выходом годного, что является нерентабельным для производства малых партий припойных сплавов. Было принято решение создания оборудования, которое могло выполнять следующие задачи:

1. Производство разнообразных припойных сплавов на базе систем медь-цинк и медь-фосфор;
2. Возможность получения годной продукции диаметром от 4 до 10 мм непосредственно из расплава, минуя операции по волочению;
3. Возможность быстрого перехода с одного вида припойного сплава на другой и изменения диаметра получаемой заготовки;
4. Производительностью оборудования не менее 20000 т/год.

Для достижения поставленной задачи был проведен ряд исследований, благодаря которым были выявлены основные закономерности непрерывно-пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм. На основании этих данных, на предприятии ЗАО «Аларм» (г. Москва), была разработана и внедрена в производство шестиручьева установка для получения прутков и проволоки диаметром от 4 до 10 мм из высокотемпературных припоев на основе меди (рис. 61 и 62) [54]. Указанное оборудование отличается компактностью и универсальностью, что позволяет получать сравнительно небольшие партии изделий (от 10 кг) в виде мерных прутков или бухт из высокотемпературных сплавов припоев на основе систем Cu-P и Cu-Zn, также, осуществлять быструю переналадку при изменении сечения заготовок и состава сплава [55].

При разработке конструкции установки литья вверх (УЛВ-3) было решено сделать 3 металлоприемника для размещения 2 кристаллизаторов в одну печь металлоприемника. Это было сделано для более комфортного обслуживания кристаллизаторов. При выходе из строя одного кристаллизатора печь металлоприемника перемещается за установку. Кристаллизатор удобно снимается и заменяется исправным. Кристаллизаторы размещены на подвижной панели, которая опускается и поднимается при помощи пневматического цилиндра.

Тянущая клеть установки рассчитана на одновременное вытягивание 6 прутков диаметром от 4 до 10 мм. Скорость вытягивания прутков регулируется от 0,2 до 10 м/мин. Тянущая клеть установки состоит из 2 валов для улучшенного условия прижима прутков.

На установке УЛВ-3 производится продукция в виде мерных прутков. Резка прутков осуществляется при помощи гидравлических ножниц. Резка 6-ти прутков производится при помощи гидростанции.

Управление установкой осуществляется при помощи программированного реле в режиме "online". Причем корректирующие действия выполняются одновременно для всех процессов [56,57].

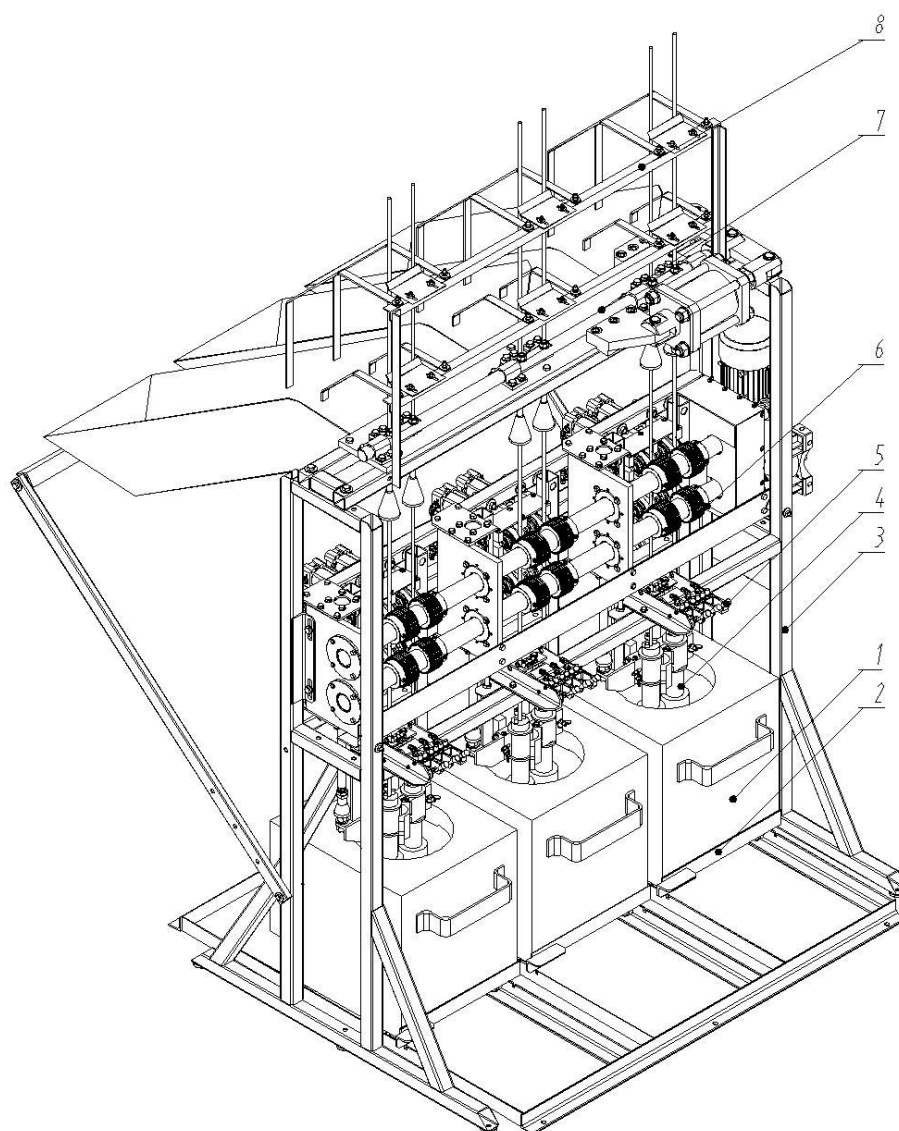


Рисунок 61 - Установка УЛВ-3 состоит из следующих основных узлов и деталей:
 1- металлоприёмники; 2- тележки металлоприёмников; 3- рама; 4 - кристаллизаторы; 5-
 пульты управления опусканием кристаллизаторов и прижимом прутков; 6- тянущая
 клеть; 7- устройство резки прутка поз; 8- направляющего устройства с приёмными
 лотками.



Рисунок 62 - Внешний вид 6-ручьевой установки непрерывного литья вверх заготовок высокотемпературных припоев

Преимущества способа непрерывного литья вверх несомненны и заключаются в исключении большого числа металлургических переделов, характерных для производства прутково-проволочной продукции из цветных сплавов. Метод оказывается эффективным, в особенности при изготовлении сплавов, обладающих плохой технологичностью к обработке давлением. Высокая рентабельность обеспечивается применительно к условиям изготовления средних и малых партий продукции различного сортамента.

5.2 Разработка технологической оснастки для процесса непрерывного литья

При создании оборудования были проработаны разнообразные виды технологической оснастки, которые помогали повысить качество производимой продукции, а также увеличить производительность оборудования. На базе данного оборудования был применен ряд решений. Опускание кристаллизаторов в печь металлоприемника осуществлялось при помощи пневматических цилиндров. Ход цилиндров можно регулировать, и это обеспечивает более быстрое и плавное погружение кристаллизаторов в расплав. Узел вытяжки выбирался с учетом

предотвращением проскальзывания прутка. Сила вытяжки прутка рассчитывалась с учетом силы вытяжки на один пруток в 1кН. Исходя из этих параметров, для уменьшения нагрузки на пруток была выбрана тянущая клеть с двумя точками опоры. Поджим заготовок в тянущей клетки осуществлялся пневматическими цилиндрами. Для управления тянущим узлом установки и быстрой сменой режимов литья использовали программируемое реле (ПР) с выносным сенсорным дисплеем (рис.63).



Рисунок 63 – Сенсорный дисплей фирмы «Овен»

Резка прутком на мерные заготовки осуществлялась при помощи гидравлического ножа и гидравлической станции (рис. 64). Для более быстрой рубки прутков и повышения производительности установки на гидравлическую станцию был установлен гидравлический аккумулятор.



Рисунок 64 – Гидравлическая станция с гидравлическим аккумулятором.

Спроектированы 3-х фазные металлоприемники с мощностью 8 кВт, для более точного и надежного поддержания температуры расплава. При изготовлении проволоки диаметром от 4 до 6 мм использовали смотку с электрическим приводом.

Таким образом, как показывают исследования, возможно осуществлять промышленный выпуск практически всех припоев на основе систем Cu-P и Cu-Zn в виде мерных прутков и бухт. Кроме того, данный процесс позволяет получать годную продукцию, минуя многостадийные процессы обработки давлением и увеличение выхода годного.

5.3 Усовершенствование конструкции кристаллизатора для непрерывно-пошагового литья заготовок вверх диаметром от 4 до 10 мм

На установке УЛВ-3, по результатам проведенных экспериментов, было решено усовершенствовать конструкцию кристаллизатора (рис. 65) для повышения производительности кристаллизатора. Во многих работах [64-70] отмечается, что повышение качества литого металла достигается увеличением интенсивности отвода тепла. Увеличение интенсивности теплоотвода при затвердевании прутка приводит к измельчению структурных

составляющих литых заготовок, что в свою очередь уменьшает неоднородность структуры и свойств прутков из медных сплавов. Автором работы внесены изменения в конструкцию кристаллизатора: раздела внутреннего пространства кристаллизатора на две зоны, для того чтобы охлаждающая жидкость не смешивалась во внутренней полости. Увеличен объем прогоняемой охлаждающей жидкости для уменьшения градиента температур в кристаллизаторе и улучшена стойкость теплоизолирующего наполнителя кристаллизатора.

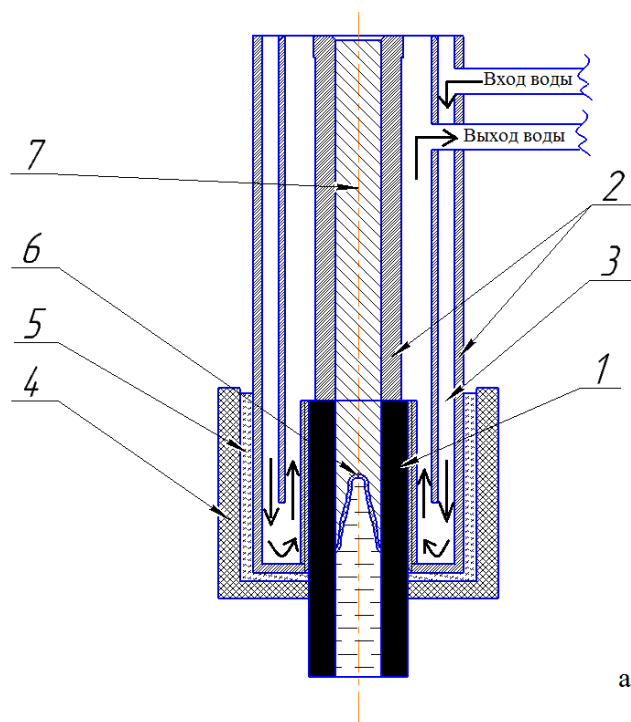


Рисунок 65 – Усовершенствованный кристаллизатор для непрерывного литья вверх: *а* – принципиальная схема кристаллизатора: 1 – графитовая рубашка; 2 – медный корпус; 3 – охлаждающая вода; 4 – огнеупорный чехол; 5 – огнеупорный наполнитель; 6 – двухфазная зона в затвердевающей заготовке; 7 – сформировавшаяся заготовка; *б* – внешний вид кристаллизатора для литья высокотемпературных припоев

5.4 Промышленные режимы непрерывно пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов

При производстве заготовок из высокотемпературных припойных сплавов диаметром от 4 до 10 мм методом непрерывного вытягивания заготовок вверх варьировали шаг вытягивания и время цикла вытяжки. На основании проведенного моделирования процесса затвердевания заготовки внутри кристаллизатора, и распределения температуры заготовки по её длине, было решено, что скорость вытягивания заготовки должна быть не более 0,77 м/мин (770мм/мин) и отношение длины шага к диаметру заготовки в интервале от 2 до 3 [58-61]. В связи с этим были разработаны промышленные режимы литья для заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов. За базовые показатели было принято, что перепад температуры охлаждающей воды не должен превышать 10...15 °С (температура входящей воды 25...30°С, температура выходящей воды 35...40°С), температура литья медно-фосфорных сплавов 850...880°С, температура литья медно-цинковых сплавов 960...970°С. В качестве критерия оценки качества поверхности заготовки при непрерывном вытягивании заготовки вверх диаметром от 4 до 10 мм использовали органолептический метод контроля качества поверхности получаемых заготовок (шероховатость, наличие трещин, пошаговых разрывов и т.п.). Промышленные режимы представлены в таблице 22.

Таблица 22 Промышленные режимы непрерывно пошагового литья вверх заготовок диаметром от 4 до 10 мм из медно-фосфорных и медно-цинковых сплавов.

Диаметр прутка, мм	Марка сплава	Шаг вытягивания, мм	Пауза, с	Время цикла, с	Температура расплава, °С	
					В плавильной печи	В металлоприемнике
4	П211; ЛОК; ЛК	9	0,8	1,2	990	960
4	ПМФ9, ПМФ7, П14	9	0,8	1,2	900	860
5	ЛНМЦ49- 9-0,2; ЛОК; П211	15	1	1,6	990	960
6	ПМФСy; П14; ПМФ9; ПМФ7	18	1,2	1,4	900	860
10	ПМФСy; П14; ПМФ9; ПМФ7	26	2,8	3,4	900	860

5.5 Выводы по главе

1. Установка непрерывного литья вверх позволяет получать припой на основе систем Cu-P и Cu-Zn (П14, ПМФ7, ПМФ9, П211, ЛОК59-1-0,3 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, минуя многостадийные операции по обработке давлением, чем позволило обеспечить снижение трудоемкости процесса получения мерных заготовок и повышение выхода годного до 98%.

2. Разработанная конструкция кристаллизатора позволила увеличить производительность на 30% за счет увеличения объема прокачиваемой жидкости, изменения конструкции и повышения стойкости теплоизоляции кристаллизатора.

3. Увеличение производительности установки непрерывно пошагового литья вверх достигнуто за счет увеличения количества ручьев, одновременно вытягиваемых в процессе литья.

Общие выводы по работе

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 неустойчивости 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 влияет на 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.

Список литературных источников

1. Лашко С.В., Лашко Н.Ф., Нагапетян И.Г. Проектирование технологии пайки неметаллических изделий: Справочник. М.:Металлургия, 1983.
2. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.:Машиностроение, т.2, 1988.
3. Нормирование расхода материальных ресурсов в машиностроении: Справочник. М.:Машиностроение, т.2. 1988.
4. Гржимальский Л.Л. Самофлюсующие припои. Л.:Знание, 1972.
5. T.Sheppard and H.L.Yiu: «Microstructure and prorerties of some extruded copper-phosphorus alloys», Metal Science Vol.18, September 1984.
6. Гришанович К.В. Исследование процесса изотермического прессования и разработка технологии получения проволоки из бессеребряных меднофосфористых припоев: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Минск, 1984. 145 с.
7. Справочник по пайке: Справочник под ред. И.Е. Петрунина – М-Машиностроение, 1984.
8. Мальцев М.В., Барсукова Т.А., Борин Ф.А. Металлография цветных металлов и сплавов.: М. Metallurgizdat, 1960. 30с.
9. Ливанов В.А. Металлургические основы непрерывного литья. Труды конференции металлургов, НКАП, 1964.
10. ГОСТ 1535-2006 Прутки медные. Технологические условия.
11. Н.С. Арсеньева, Е.А. Казанцев, А.В. Сулицын, Л.М. Железняк, Л.Н. Марущак, О.Л. Глухова Технология производства сварочной проволоки из различных сплавов на Каменск-Уральском заводе ОЦМ. // Металлург №3, 2008 г. с. 67 – 69.
12. Железняк Л.М.Совершенствование технологии производства цинковой проволоки в условиях Каменск-Уральского завода ОЦМ/Железняк Л.М., Популовских Д.Л., Хайкин Б.Е., Снегирев А.И.// Цветные металлы. – 2000. - №5.

13. А.М. Кац, Ю.Н. Райков, Б.А. Романцев Перспективный процесс производства прутково-проволочной продукции на основе горизонтального непрерывного литья и горячей винтовой прокатки. //Цветные металлы №2, 2002 г. с. 104 – 107.
14. Исследование формирования непрерывно-литых заготовок из медно-фосфорных сплавов, Сб. трудов III Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Таволжанский С.А., Пашков И.Н. М: МИСиС 2005. С. 247-253.
15. Технология XXI века. Перспективы России / В. Ганьжин, Ю. Киселев // Национальная металлургия. – 2003. - №1.
16. Марширов В.В., Севастьянов В.П., Гагарин Н.А. Тепловые процессы при затвердевании расплавов с повышенными скоростями. – М. Горький, 1990г.
17. Бойченко М.С., Непрерывная разливка стали. М.: Металлургиздат, 1957.
18. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М. Литейное производство цветных и редких металлов. 2-ое изд. М.: Металлургия, 1982.
19. Черняк О.В. Заготовительное литье цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
20. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М., Бибииков Е.Л. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Мисис, 1996.
21. CONTIROD technology: официальный сайт компании SMS-MEER [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sms-meer.com/fileadmin/user_upload/pdf/publication/ne_anlagen_kupfer/20130_508_Produktblatt_Contirod_Ansicht.pdf (дата обращения 11.09.2016).
22. Бахтиаров Р.А., Воробьева Л.А. Производство слитков тяжелых цветных металлов методами полунепрерывного и непрерывного литья. М.: ЦветМетИнформация, 1974. 98 с.
23. Производство слитков из цветных металлов и сплавов: непрерывное литье слитков из цветных металлов и сплавов в неподвижные кристаллизаторы: учеб. пособие/ С.А. Таволжанский. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. - 76 с.
24. Р.А.Бахтиаров, Л.А.Воробьева, Производство слитков тяжелых цветных металлов методами полунепрерывного и непрерывного литья, Металлургия 1974.

25. Е.И. Марукович, В. А. Харьков, Оборудование для непрерывного литья проволоки.// Литье и металлургия. 2001. №2 – с.79.
26. Марукович Е.И., Земцов В.А., Харьков В.А., и др. Разработка установки непрерывного литья заготовок для ювелирного производства.// Литье и металлургия. 2000. №1 – с.37.
27. Cole Y. S., Wintgard W.-C —«J. Inst, of Metals», v. 1, January, 1965.
28. Зигель О.Д. Непрерывная разливка стали. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 164—177.
29. Добаткин В. И. Слитки алюминиевых сплавов. Свердловск, Металлургиздат, 1960. 173 с.
30. Добаткин В. И. Непрерывное литье и литейные свойства сплавов. М., Оборонгиз, 1948. 155 с.
31. Шатагин О. А., Сладкошteeв В. Т., Вартазаров М. А., Козаченко С. М., Терехов В. Н. М., Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов. «Металлургия», 1974.
32. Р.А.Бахтиаров, Л.А.Воробьева, Производство слитков тяжелых цветных металлов методами полунепрерывного и непрерывного литья, Металлургия 1974.
33. Шатагин О.А., Горизонтальное непрерывное литьё цветных металлов и сплавов, Металлургия 1974.
34. Rantanen M. Upcast-Outokumpu method of producing copper wire rod //Wire industry. – July 1976, №511, vol 43, p. 565-567.
35. K. HAˆ RKKI and J. MIETTINEN. Mathematical Modeling of Copper and Brass Upcasting, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, VOLUME 30B, FEBRUARY 1999, s. 75-98.
36. S.A. Tavalzhanskii, I.N. Pashkov , K.F. Koletvinov // Developing and using alternative methods of continuous casting to make a narrow range of high-temperature solders. (Научная статья на английском языке, Web of Science, ISSN 0026-0894) // Metallurgist, Vol. 57, issue 9, 2014, P. 944-948.
37. Машины непрерывного литья//Машины непрерывного литья компании Rautomead Limited. - URL: <http://www.rautomead.ru> (дата обращения 15.05.2016).

38. Бахтиаров Р.А., Воробьева Л.А. Производство слитков тяжелых цветных металлов методами полунепрерывного и непрерывного литья. М.: ЦветМетИнформация, 1974. 98 с.
39. ГОСТ 859-2014 Медь. Марки – Переизд. с поправкой 2015 М.:Изд-во стандартов, 2015.
40. ГОСТ 849-2008 Никель. Никель первичный - Переизд. с поправкой 2009 М.:Изд-во стандартов, 2009.
41. ГОСТ 3640-94 Цинк. Технические условия – Переизд. 2001 М.:Изд-во стандартов, 2001.
42. ГОСТ 860-75 Олово. Технические условия – Переизд. с изм. 1;2;3;4 2008 М.:Изд-во стандартов, 2008.
43. ГОСТ 11069-2001 **Алюминий первичный. Марки -** Переизд. 2003 М.:Изд-во стандартов, 2003.
44. Материалы для литейного производства//Многофункциональный порошкообразный флюс компании Polyteg. - URL: [http://pmet.ru/catalog/rubric3/liteynoe_pr/\(дата обращения 30.10.2016\)](http://pmet.ru/catalog/rubric3/liteynoe_pr/(дата_обращения_30.10.2016)).
45. ГОСТ 4515-93. Сплавы медно-фосфористые. Технические условия – Переизд. 2000 М.:Изд-во стандартов, 2001.
46. М. Беккерт, Х. Клемм. Способы металлографического травления, пер. с нем.: Н.И. Туркиной, Е.Я. Капуткина. Металлургия. Москва, 1988.
47. Баранова Л.В., Демина Э.Л. Металлографическое травление металлов и сплавов. Справочник. – М.: машиностроение, 1996.
48. Малоотходные и энергосберегающие процессы плавки и литья цветных металлов и сплавов.: Темат. сб. науч. тр./Гипроцветметобработка; отв. ред.: Д.П. Ловцов, А.В. Новиков. – М.: Металлургия, 1987. -80 с.
49. Лабораторные работы по технологии литейного производства/ под ред. А.В. Курдюмова; - М.:Машиностроение, 1990.
50. Сулицин, А. В. Литейные пороки отливок. Причины возникновения и способы их предупреждения: Учебное пособие / А. В. Сулицин, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, Е. Л. Фурман. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. - 266 с.

51. Сулицын А.В. Непрерывное горизонтальное литьё заготовок малого сечения из медных сплавов, содержащих легкоокисляемые компоненты.: Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Екатеринбург. – 2006.
52. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Мейлихова З.А. Физические величины. Справочник. – М.:Энергоатомиздат, 1991.
53. Белай Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента/Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Соценко – М.:Металлургия,1993. – 140с.
54. Таволжанский С.А., Колетвинов К.Ф., Золин П.В. Изготовление прутков Cu-P припоев методом непрерывного вытягивания расплава вверх через кристаллизатор скольжения. // Металлургия машиностроения №3, 2015 г. с. 40 – 44.
55. Разработка и применение технологий изготовления высокотемпературных припоев на медной основе на базе процессов непрерывного литья // Литейщик России. №11, 2015. С. 21-24.
56. Довженко Н.Н., Сидельников С.Б. Мини-производства на базе устройств непрерывного литья и прокатки-прессования.// Металлургия машиностроение. – 1997. - №5.
57. Перспективный процесс производства прутково-проволочной продукции на основе горизонтального непрерывного литья и горячей винтовой прокатки/ Кай А.М., Райков Б.А.// Цветные металлы. – 2002. №2.
58. С.А. Таволжанский, И.Н. Пашков, К.Ф. Колетвинов, // Разработка и применение альтернативных способов непрерывного литья для изготовления высокотемпературных припоев малого сортамента (Научная статья, **№ 1260 перечня ВАК от 30.06.2015**) // Металлург. №10, 2013. С. 84-87.
59. С.А. Таволжанский, К.Ф. Колетвинов // Разработка и применение способа непрерывного литья вверх заготовок высокотемпературных припоев малого сортамента (Научная статья, **№ 2104 перечня ВАК от 30.06.2015**) // Цветные металлы. №11, 2015. С. 85-88.
60. С.А. Таволжанский, П.В. Золин, К.Ф. Колетвинов // Изготовление прутков Cu-P припоев методом непрерывного вытягивания расплава вверх через кристаллизатор скольжения (Научная статья, **№ 1261 перечня ВАК от 30.06.2015**) // Металлургия машиностроения. №3, 2015. С. 40-44.

61. С.А. Таволжанский, К.Ф. Колетвинов // Разработка и применение технологий изготовления высокотемпературных припоев на медной основе на базе процессов непрерывного литья (Научная статья, № 1179 перечня ВАК от 30.06.2015) // Литейщик России. №11, 2015. С. 21-24.
62. Сулицин А.В. Непрерывное литьё меди / А.В. Сулицин, Р.К. Мысик, С.В. Брусницын, Ю.Н. Логинов // Екатеринбург. Изд-во УМЦ УПИ, 2016. – 221 с.
63. Ефимов В.А. Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов. – М.:Машиностроение, 1991. – 734 с.
64. Мысик Р.К. Литье и обработка бронз со специальными свойствами / Р.К. Мысик, Ю.Н. Логинов, А.В. Сулицин // Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2008. – 19 с.
65. Мартынов О.В. Влияние внешнего магнитного поля на кристаллизацию стального слитка / О.В. Мартынов, С.С. Голиков // Разливка стали в изложницы. №5. 1984. – 370с.
66. Рутес В.С. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев. – М.:Металлургия, 1971. – 295с.
67. Ефимов В.А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдерханов – М.:Машиностроение, 1998. – 360 с.
68. Скворцов А.А. Влияние внешних воздействий на процессы формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М.:Металлургия, 1991. – 160 с.
69. Мадянов А.М. Затвердевание и новые способы разливки стали / А.М. Мадянов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 110 с.
70. Вейник А.И. Теория особых видов литья / А.И. Вейник. – М.: Машгиз, 1958. – 300с.
71. Кац А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / А.М. Кац, Е.Г. Шадек. – М.: Металлургия, 1983. – 326 с.
72. Берзинь В.А. Оптимизация режимов затвердевания непрерывного слитка / В.А. Берзинь. – Рига:Зинатне, 1977. – 147 с.

73. Головешко В.Ф. Опыт ЛПО «Красный выборжец» по интенсификации процесса литья меди и медных сплавов в свете реализации программы «Интенсификация -90» / В.Ф. Головешко. – Л.: ЛДНТП, 1986. – 28 с.
74. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.Н. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСиС, 2001. – 416с.
75. Мальчев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.