

А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, Д. А. Михайлов

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРЕВА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРАХ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

Рассматриваются принципы создания и управления комбинированным нагревом алюминиевого расплава в электрических миксерах с расположением электронагревателей под сводом и в подине. На основе результатов численного и физического экспериментов определены и подтверждены зависимости температурного перепада и распределения неметаллических включений в объеме расплава на стадиях нагрева, выдержки и литья.

Ключевые слова: температурный перепад, неметаллические включения, миксер с комбинированным нагревом, математическая модель, алгоритм управления системой нагрева.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций, посвященных проблеме повышения качества алюминиевых деформируемых сплавов показывает, что в последнее время на большинстве отечественных и зарубежных предприятий, выпускающих листовую алюминиевую прокат («Алкоа СМЗ», «Уральская фольга» и др.), наблюдается рост потребления высококачественных сплавов на основе алюминия. Изучение конъюнктуры рынка тонколистового алюминиевого проката позволяет говорить о том, что при дальнейшей модернизации заводов необходимо ориентироваться на продолжающееся уменьшение толщины холоднокатаного листа. Применяемые на предприятиях методы рафинирования и приготовления алюминиевых сплавов не обеспечивают требуемого уровня чистоты металла, геометрических размеров, качества структуры и других показателей слитков. Поэтому отечественные предприятия, производящие алюминиевый прокат, вынуждены заняться модернизацией существующего и созданием нового оборудования для плавления-литейных агрегатов.

Основной единицей плавления-литейного агрегата, в наибольшей мере определяющей качество производимого алюминиевого сплава, является электрический миксер. Технология приготовления расплава в электрических миксерах должна обеспечивать заданную производительность и качество алюминиевого сплава, которое характеризуется такими критериями, как температурный перепад и содержание неметаллических включений. Применение тех или иных систем нагрева определяет технологию приготовления расплава в электрическом миксере.

На сегодняшний день этих целей используются электрические миксеры с расположением излучающих электронагревателей под сводом и в подине. Увеличение скорости нагрева металла в электрических миксерах с электронагревателями под сводом приводит к перегреву поверхностных слоев металла и возникновению температурного перепада по высоте расплава 70...90 °С/м. Интенсификация теплообменных процессов в ванне электрических миксеров с электронагревателями в подине является причиной значительного загрязнения метал-

ла неметаллическими включениями (например, окисью алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) при взаимодействии жидкого алюминия со шлаком и атмосферой [1; 2]. В связи с этим возникает задача дифференцированного управления интенсивностью теплообмена в ванне для понижения содержания неметаллических включений и температурного перепада в расплаве.

Содержание газовых и неметаллических включений в расплаве на стадии нагрева зависит от таких факторов, как температура поверхности расплава (не более 750 °С), интенсивность движения масс металла и время его приготовления. На стадии выдержки требуется снижение содержания неметаллических включений в верхней части ванны, для чего необходимо производить отстаивание расплава. На стадии литья качество расплава определяется стабильностью температур перепада и содержанием неметаллических включений в литье, ввиду чего температурный перепад по высоте расплава должен составлять не более 8 °С/м, температуру расплава необходимо поддерживать на уровне 695...750 °С, а неметаллические включения должны быть сосредоточены у подины [3].

Проведенный анализ условий теплообмена в ванне электрических миксеров показал, что одним из наиболее перспективных способов нагрева расплава, позволяющих эффективно управлять температурным перепадом и распределением неметаллических включений в ванне, является комбинированный нагрев расплава [4]. Такой способ предполагает косвенный и прямой нагрев верхних и нижних слоев расплава при расположении электронагревателей 4 и 5 под сводом и в подине миксера (рис. 1) [5].

С учетом требований технологии приготовления алюминиевых сплавов авторами была разработана циклограмма работы миксера с комбинированным нагревом (рис. 2). В таком миксере на первой стадии приготовления расплава нагрев осуществляется с помощью подового электронагревателя (режим работы 1), за счет чего теплообменные процессы в ванне максимально интенсифицируются и происходит выравнивание температуры по объему расплава. На стадии выдержки используется сводовый электронагреватель (режим работы 2) и

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» (проект № 72-КФ «Разработка и организация производства высококачественных электронагревательных систем для цветной металлургии»).

основной тепловой поток направлен на зеркало расплава, что способствует выравниванию температуры и снижению скорости движения масс расплава. В результате этого неметаллические включения начинают оседать на подину и их содержание в верхней части ванны снижается. На стадии литья тепловые потоки направляются в расплав от подового и сводового электронагревателей (режим работы 3), благодаря чему температурный перепад и содержание неметаллических включений в объеме снижаются до минимума.

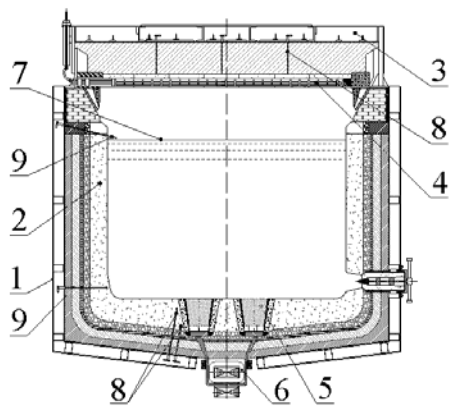


Рис. 1. Миксер с комбинированным нагревом: 1 – каркас; 2 – футеровка; 3 – свод; 4 и 5 – электронагреватели; 6 – источник питания; 7 – расплав; 8 и 9 – терпары

Для взаимосвязанного анализа электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в миксере с комбинированным нагревом при приготовлении алюминиевого сплава на стадиях нагрева, выдержки и литья, в программном комплексе ANSYS Multiphysics была разработана математическая модель системы «миксер с комбинированным нагревом – расплав» [7].

Особенностью этой математической модели является учет влияния сводового и подового электронагревателей на состояние теплового поля миксера в режимах работы системы нагрева 1, 2 и 3 с использованием совокупности граничных условий. Граничные условия, которые обеспечивают тепловой баланс между расплавом и миксером при расположении электронагревателей под

сводом и в подине, выведены на основании уравнений, представленных в [8], и могут быть записаны в виде

$$-\lambda_r \cdot \left(\frac{\partial T_r}{\partial x} + \frac{\partial T_r}{\partial y} + \frac{\partial T_r}{\partial z} \right) \Big|_{x,y,z} = -\lambda_{o,p} \cdot \left(\frac{\partial T_{o,p}}{\partial x} + \frac{\partial T_{o,p}}{\partial y} + \frac{\partial T_{o,p}}{\partial z} \right) \Big|_{x,y,z}, \quad (1)$$

$$-\lambda_r \cdot \left(\frac{\partial T_r}{\partial x} + \frac{\partial T_r}{\partial y} + \frac{\partial T_r}{\partial z} \right) \Big|_{x,y,z} = -\lambda_v \cdot \left(\frac{\partial T_v}{\partial x} + \frac{\partial T_v}{\partial y} + \frac{\partial T_v}{\partial z} \right) \Big|_{x,y,z} + \varepsilon_r c_0 (T_{s,n}^4 - T_r^4), \quad (2)$$

где T_r – температура расплава, °C; T_v – температура воздуха над расплавом, °C; $T_{s,n}$ – температура поверхности сводового электронагревателя, °C; λ_r – теплопроводность расплава, Вт/(м · °C); λ_v – теплопроводность воздуха над расплавом, Вт/(м · °C); $\lambda_{o,p}$ – теплопроводность контактирующего с расплавом материала ограждающей поверхности, Вт/(м · °C); ε_r – степень черноты поверхности расплава; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела. Граничное условие (1) определяет температурное поле на границе «футеровка – расплав» и «подовый электронагреватель – расплав» при теплообмене между расплавом и стенками ванны за счет излучения и теплопроводности, граничное условие (2) – температурное поле на границе «сводовый электронагреватель – расплав» при теплообмене между поверхностью расплава и излучающей поверхностью сводового электронагревателя за счет теплопроводности.

Ввиду того что производительность миксера и качество расплава зависят от режимов работы системы нагрева, необходимо найти соотношения мощностей сводового и подового электронагревателей P_1/P_2 на трех стадиях приготовления расплава с целью достижения его наилучшего качества, но без снижения производительности миксера. Так как производительность миксера определяется длительностью стадии нагрева расплава, а качество приготавливаемого сплава – содержанием неметаллических включений в литье и стабильностью температурного перепада, то целевой функцией на стадии нагрева является

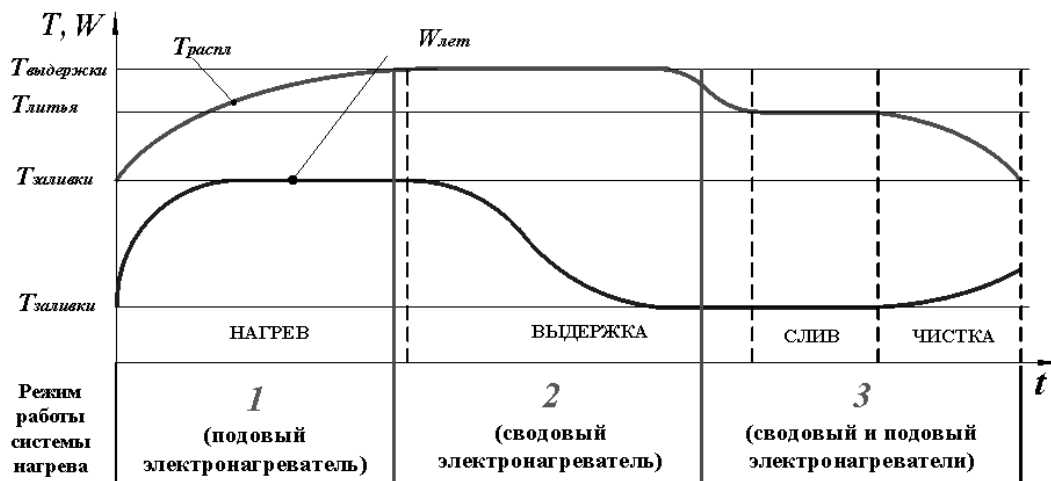


Рис. 2. Циклограмма работы миксера с комбинированным нагревом на режимах работы системы нагрева 1, 2 и 3

время нагрева расплава $t_{\text{нагр}}(P_1/P_2) \rightarrow \min$, целевой функцией на стадии выдержки – содержание неметаллических включений в верхней части ванны от их общего количества $W_{\text{верх}}(P_1/P_2) \rightarrow \min$, а целевой функцией на стадии литья – температурный перепад в расплаве и содержание неметаллических включений в верхней части ванны от их общего количества $W_{\text{верх}}, \Delta T_{\text{распл}}(P_1/P_2) \rightarrow \min$.

С помощью математической модели авторами были получены зависимости изменения времени нагрева $t_{\text{нагр}}$, содержания неметаллических включений в верхней части ванны от их общего количества $W_{\text{верх}}$ и температурного перепада в слоях расплава ΔT от соотношения мощностей P_1/P_2 , которое изменялось в диапазоне 0/1...1/0 с шагом 0,2 (рис. 3). Наиболее быстрое повышение температуры расплава на стадии нагрева обеспечивается при соотношении мощностей 0/1 за счет интенсификации тепломассообменных процессов в ванне при нагреве расплава снизу. Содержание неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества $W_{\text{верх}}$, определяющее качество расплава на стадии выдержки, достигает своего наименьшего значения при соотношении мощностей, равном 1/0, ввиду минимизации конвективного движения металла при нагреве расплава сверху. На стадии литья минимум температурного перепада $\Delta T_{\text{распл}}$ а также квазiminимум содержания неметаллических включений в верхней части ванны от их общего количества $W_{\text{верх}}$ наблюдаются при нагреве расплава нижним и верхним электронагревателями при соотношении мощностей 0,4/0,6. Для достижения наибольшей производительности и наилучшего качества расплава необходимо, чтобы соотношение мощностей P_1/P_2 на стадиях нагрева, выдержки и литья (режимах работы 1, 2 и 3) составляло соответственно 0/1, 1/0 и 0,4/0,6. Результаты поиска значений $t_{\text{нагр}}$, $W_{\text{верх}}$ и $\Delta T_{\text{распл}}$ приведены в таблице.

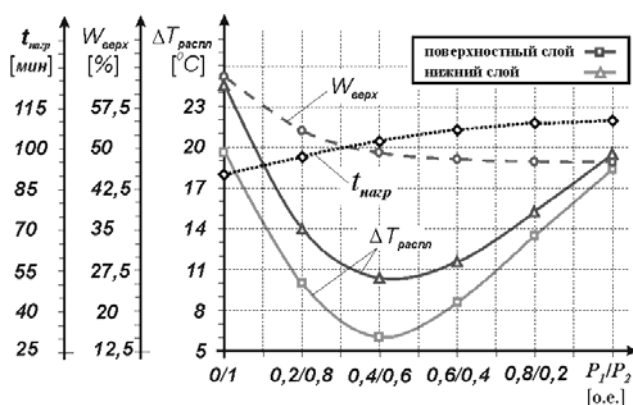


Рис. 3. Изменение $t_{\text{нагр}}$, ΔT и $W_{\text{верх}}$ при различных соотношениях P_1/P_2

В дальнейшем был определен и оценен характер изменения температурного поля расплава и распределе-

ния неметаллических включений в ванне миксера на стадиях нагрева, выдержки и литья (режимов работы системы нагрева 1, 2 и 3) для найденных соотношений мощностей электронагревателей P_1/P_2 . Анализ гидродинамического и теплового полей расплава показал, что на стадии нагрева (режим работы 1) максимум скоростей V_{max} наблюдается в непосредственной близости от поверхности резистивных блоков и на уровне лотка скорость не превышает 0,38 м/с, а температурный перепад по высоте расплава ΔT_h составляет 32 °С (характерный шаг по высоте 0,23 м) (рис. 4). На стадии выдержки (режим работы 2) поле скоростей стабилизируется по всему объему, максимум скоростей V_{max} снижается в среднем до 0,001 м/с и имеет место локальный перегрев поверхностных слоев, по причине чего температурный перепад по высоте расплава ΔT_h достигает максимума, равного 65 °С. На стадии литья (режим работы 3) поле скоростей устанавливается относительно быстро и имеет локальный максимум только в 1/4 объема расплава и в целом равномерно. При этом максимальный температурный перепад по высоте расплава ΔT_h не превышает 12 °С, что объясняется выравниванием на уровне 0,25 м тепловых потоков, направленных в расплав от подового и сводового электронагревателей.

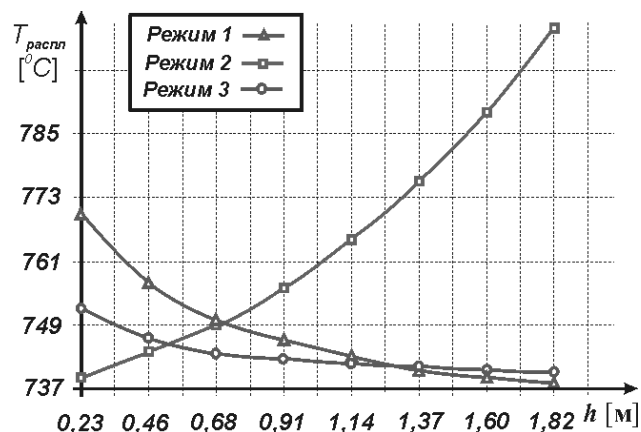


Рис. 4. Изменение температуры расплава T по высоте h в режимах 1, 2 и 3

Сопоставление зависимостей распределения неметаллических включений различного размера в ванне миксера при различных скоростях движения расплава [9] и найденного поля скоростей расплава позволяет определить распределение неметаллических включений по высоте ванны на стадиях нагрева, выдержки и литья. На стадии литья содержание неметаллических включений в верхней части ванны $W_{\text{верх}}$ от их общего количества достигает 63 %, 2/3 от которых составляют включения крупного размера. На стадии выдержки крупные неметаллические включения с относительно высокой плотностью сосредото-

Результаты поиска $t_{\text{нагр}}$, $W_{\text{верх}}$ и $\Delta T_{\text{распл}}$

Стадия приготовления	Оптимизируемые параметры		Целевые функции стадий приготовления расплава		
	P_1 , кВт	P_2 , кВт	$\Delta T_{\text{распл}}$, °С	$W_{\text{верх}}$, %	t , мин
Нагрев	0	60	25	63	90
Выдержка	60	0	20	46,5	110
Литье	24	36	10	49	78

ваются в области подины, а неметаллические включения малого размера образуют устойчивую коллоидную смесь во всем объеме ванны. На стадии литья наблюдается снижение содержания неметаллических включений в верхней части ванны $W_{\text{верх}}$ от их общего количества до 49 %.

Достоверность разработанной математической модели была оценена при сравнении результатов решения гидродинамической и тепловой задач, полученных в ходе математического и физического моделирования (рис. 5). Сравнительный анализ данных распределения температуры по объему расплава в физической и математической моделях выявил их высокую степень совпадения (относительная погрешность измерений $\varepsilon_{\text{рм}}$ не превышала 19 % при доверительной вероятности $P=95\%$).

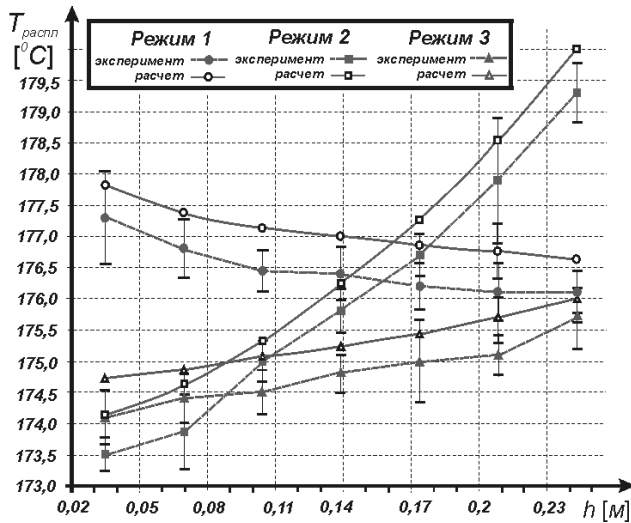


Рис. 5. Зависимости изменения температуры расплава $T_{\text{распл}}$ от высоты ванны h физической модели (характерный шаг по высоте – 3,5 см)

Проведенный анализ зависимостей распределения температурного перепада, неметаллических включений, скорости и интенсивности нагрева расплава при изменении режимов работы системы нагрева на стадиях нагрева, выдержки и литья позволил авторам разработать алгоритм управления режимами работы системы нагрева (рис. 6). В соответствии с этим алгоритмом изменение интенсивности нагрева расплава осуществляется в зависимости от температурного перепада по высоте расплава при изменении отношения мощностей сводового и подового электронагревателей P_1/P_2 в диапазоне 0/1...1/0.

В результате исследований было установлено следующее:

- применение комбинированных систем нагрева в электрических миксерах способствует упрощению технологического процесса приготовления алюминиевых сплавов, снижению неравномерности температурного перепада в расплаве и управлению распределением неметаллических включений в ванне на стадиях нагрева выдержки и литья в соответствии с заданными технологическими требованиями;

- изменение соотношения мощностей сводового и подового электронагревателей P_1/P_2 определяет содер-

жание неметаллических включений в верхней части ванны $W_{\text{верх}}$, температурный перепад по высоте расплава ΔT_h и скорость движения расплава V ;

- использование разработанного алгоритма управления режимами работы системы электронагрева позволяет снизить содержание неметаллических включений в верхней части ванны $W_{\text{верх}}$ с 63 до 49 % от их общего количества и изменить температурный перепад по высоте расплава от 6,5 до 38 °C/м.

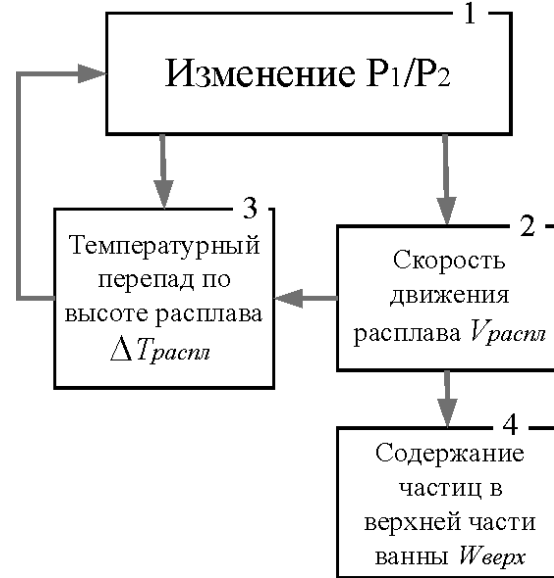


Рис. 6. Алгоритм управления режимами работы системы нагрева на стадиях нагрева, выдержки и литья

Библиографические ссылки

1. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, Г. В. Черепок, С. В. Махов и др. М. : ИнтерметИнжиниринг, 2005.
2. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. М. : Энергия, 1967.
3. Андреев А. Д., Гогин В. Б., Макаров Г. С. Высокопроизводительная плавка алюминиевых сплавов. М. : Металлургия, 1980.
4. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология : справ. изд. М. : Metallургия, 2005.
5. Пат. 2371652 Российская Федерация, МПК⁷ F 27 В 3/10, F27 D 11/04, H 05 В 3/62. Электрическая печь для приготовления сплавов цветных металлов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, Д. А. Михайлов. № 2008105016/02 ; заявл. 11.02.2008 ; опублик. 27.10.2009, Бюл. № 30.
6. Темеров А. А., Михайлов Д. А. Исследование качества алюминиевых сплавов, получаемых в миксере с комбинированным нагревом // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2009. Т. 5. № 11. С. 80–84.
7. Лыков А. В. Тепломассобмен. М. : Энергия, 1971.
8. Оводенко, М. Б. Исследование закономерностей рафинирования и разработка технологии производства алюминиевых сплавов в крупнотоннажном индукционном агрегате : автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 1984.

A. A. Temerov, V. N. Timofeev, D. A. Mikhaylov

APPLICATION OF THE COMBINED HEATING SYSTEMS IN ELECTRIC HOLDING FURNACES FOR PREPARATION OF ALUMINIUM ALLOYS

In a paper creation and control principles by the combined heat of aluminium melt in electric composite holding furnaces with an arrangement of electric heaters under the arch and in the bottom are considered. On the basis of numerical and experimental results dependences of a temperature drop and distribution of nonmetallics in melt volume at stages of heat, dead melting and casting are defined and confirmed.

Keywords: temperature drop, nonmetallics, the holding furnace with the combined heat, a mathematical model, the control algorithm of heating system.

© Темеров А. А., Тимофеев В. Н., Михайлов Д. А., 2010

УДК 621.791.3

В. И. Темных, В. С. Казаков, Е. В. Темных, Г. М. Зеер, А. К. Абкарян, П. А. Растовцев, Е. А. Потехина

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГАЛЛИЕВЫХ ПАСТ-ПРИПОЕВ*

Выявлены особенности контактного взаимодействия однофазных латуней с эвтектическими расплавами системы Ga–Zn как композиционными составляющими галлиевых паст-припоев. Определены продукты взаимодействия в зависимости от состава и температуры контактирующих компонентов.

Ключевые слова: галлий, пасты-припой, латунь, взаимодействие, эвтектика.

Взаимодействие порошковых и иных дисперсных материалов с расплавами галлия лежит в основе низкотемпературной пайки разнородных материалов. Легкоплавкие диффузионно твердеющие галлиевые пасты-припой, обладая уникальными свойствами [1–4], имеют и существенные недостатки: высокую стоимость, длительность процессов затвердевания, малую ударную вязкость, ограниченное время сохранности технологических свойств после приготовления и ряд других ограничений их применения.

Для повышения технологических возможностей и эксплуатационных характеристик галлиевых паст-припоев необходимы дополнительные исследования, направленные на поиск новых составов и структур исходных твердых и жидких фаз припоев с целью устранения имеющихся недостатков и создания новых конкурентоспособных технологий соединения разнородных материалов типа «металл–керамика», «металл–стекло», «металл–графит» и др.

В последние годы интерес к этой тематике существенно возрос [5–7], досконально изучаются обратимые и необратимые процессы, происходящие при нагреве и охлаждении основных составляющих галлиевых паст-припоев и определяющие их физико-механические свойства.

Практический интерес в качестве основных исходных твердых составляющих этих припоев представляют порошки сплавов меди с цинком в области твердых растворов и эвтектика Cu–Ag, поскольку присутствие атомов

цинка и серебра в соответствующих структурах ускоряет процесс реактивной диффузии [1; 8]. В качестве жидкой основы можно использовать легкоплавкие эвтектические сплавы галлия с цинком с температурой плавления ниже 25 °С. Варьируя составы и структуры твердых и жидких фаз, можно найти оптимальное композиционное строение припоев с минимальным содержанием галлия и серебра, а также режимы пайки в каждом конкретном случае соединения разнородных материалов.

Целью данной работы является изучение кинетики, механизма и продуктов взаимодействия компонентов (составляющих) галлиевых паст-припоев с максимальным содержанием цинка и минимальным содержанием галлия и серебра.

Для исследования контактных взаимодействий использовали стандартные однофазные латуни Л63 и Л68 с содержанием цинка 37 и 32 % по массе соответственно (остальное медь) в виде пластин, порошков и стружковых материалов, эвтектические сплавы галлия (ГОСТ 12797–77) с цинком марки ЧДА при содержании цинка до 20 % по массе и порошки припоя ПСр 72 по ГОСТ 19738–74.

Качество спая, форму и размеры образовавшихся фаз исследовали в оптическом микроскопе АХЮ-Observer.Z1m, Karl Zeiss. Для определения элементного состава фаз был использован энергодисперсионный спектрометр Oxford Instruments сканирующего электронно-

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».