

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТЛИВКИ НА МОДЕЛЬНОМ СПЛАВЕ Pb-Sn

И. Ф. Селянин, А. А. Куценко, С. Н. Старовацкая, А. И. Куценко
Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия

В последние годы в области литейного производства активно ведутся исследования по разработке таких физических методов, которые позволяют воздействовать на металл в момент формирования структуры, дают возможность управлять процессом кристаллизации металлов и сплавов, получать отливки с новым набором служебных свойств

по ее объему [1 – 6]. Одним из таких методов воздействия на кристаллизующийся расплав является метод токового воздействия.

Для проведения исследований влияния параметров электрического тока на кристаллизующийся расплав, была разработана специальная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

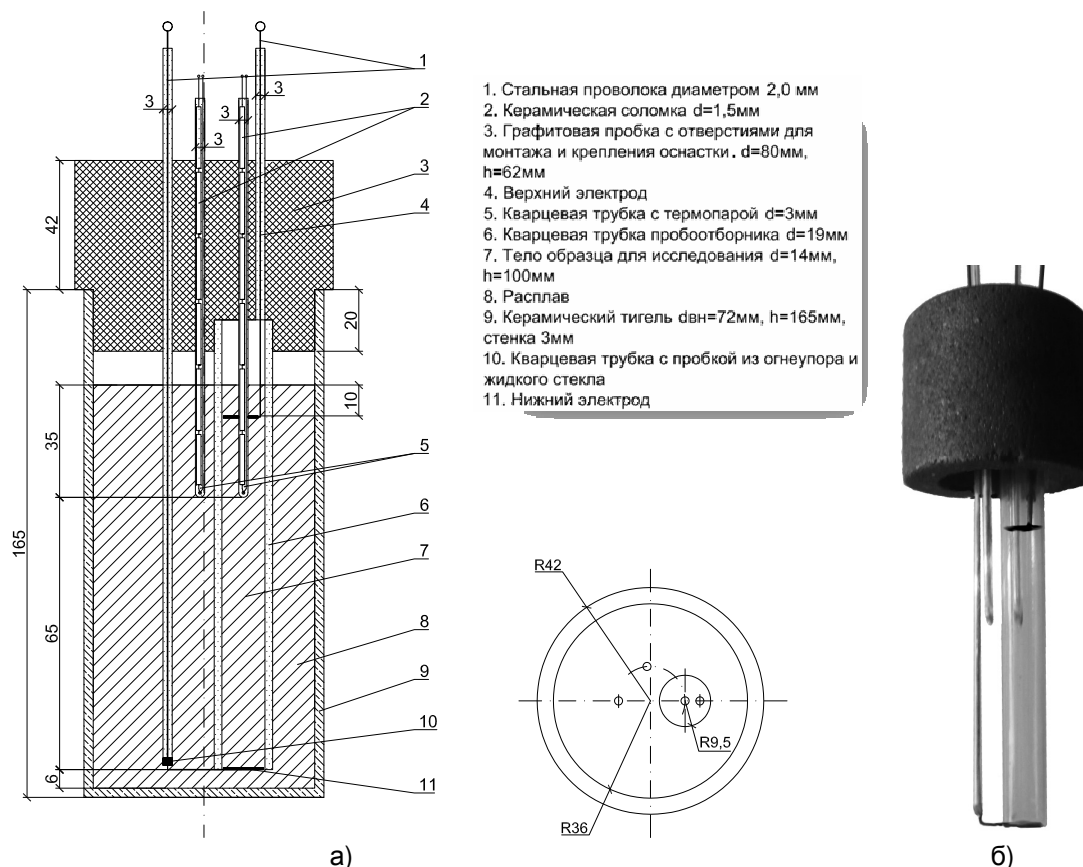


Рисунок 1 – Конструкция (а) и внешний вид верхней части (б) экспериментальной пробы для приготовления расплава и исследования токового воздействия на кристаллизующийся расплав

Конструктивно, экспериментальная проба представлена двумя элементами: керамическим тиглем (9) и графитовой пробкой (3) с отверстиями для монтажа и крепления экспериментальной оснастки. Керамический тигель

имел следующие размеры: внутренний диаметр 72 мм, высота 165 мм, толщина стенки 3 мм. В тигель осуществлялась загрузка шихты и ее расплавление для получения экспериментального расплава (8), причем, высота

расплавленного металла в тигле поддерживалась на уровне 106 мм от его дна.

Верхняя часть пробы представляла собой пробку специальной конструкции, изготовленной из графита и имеющей внешний диаметр 82 мм и высоту 62 мм. Для устойчивой фиксации пробки в верхней полости керамического тигля на нижней ее части пробки был предусмотрен поясик высотой 20 мм и диаметром 72 мм.

Для размещения и крепления электродов, термопар и прочей оснастки, согласно приведенной схеме, в пробке было высверлено 4 сквозных отверстия, и сформировано дополнительное углубление в нижней части.

В два отверстия в пробке диаметром 3 мм были вставлены кварцевые трубки с смонтированными в них электродами. Электроды изготавливались из стальной проволоки диаметром 2 мм, места их контакта с расплавом специальным образом подготавливались (расплющивались и зачищались).

Верхний электрод (4) погружался в расплав на глубину 10 мм. Нижний электрод (11) на выходе из кварцевой трубки заделывался огнеупорным материалом и жидким стеклом (10), что предотвращало затекание жидкого металла в полость кварцевой трубочки. Электрод размещался на удалении 5–6 мм от дна керамического тигля.

Два оставшихся сквозных отверстия в графитовой пробке использовались для монтажа хромель-алюмелевых термопар (5). Термопара в сборе представляла собой кварцевый колпачок диаметром 3 мм, в кото-

рый вставлены две термопарные проволоки, одна из которых защищена керамической соломкой с внешним диаметром 1,5 мм.

Металл (7), подвергаемый токовому воздействию в процессе охлаждения и затвердевания, формировался во внутренней полости керамического тигля за счет кварцевой трубки диаметром 19 мм, которая вставлялась поверх верхнего электрода (4) и кварцевой трубочки с термопар (5) в графитовую пробку. Нижняя часть кварцевой трубки дополнительно фиксировалась нижним электродом (11).

Данная конструкция экспериментальной установки позволяла воздействовать током на ограниченный объем расплава, а после кристаллизации получать образец диаметром 14 мм и высотой 100 мм, используемый для дальнейших исследований.

Для проведения экспериментов и исследований в работе в качестве модельного сплава был выбран сплав системы Pb–Sn (27 % Sn, 73 % Pb), который приготавливался в лабораторных условиях из компонентов технической чистоты ($\approx 99,9\%$). Как известно, свинец и его сплавы с оловом кристаллизуются в интервале $183 - 232^\circ\text{C}$. Основу таких сплавов составляет α -фаза и двойная эвтектика, которая имеет в своем составе фазы на основе твердых растворов основных элементов, что схоже с другими литейными сплавами.

Исходя из целей и задач исследования, предполагалось варьировать параметры токового воздействия (плотность тока и положение электродов) в соответствии с планом эксперимента, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы токового воздействия на расплав

№ эксперимента	Плотность тока, $\text{A}/\text{м}^2$ (сила тока в цепи)	Напряжение, В	Полярность электродов
1	0	0	–
2	$6,5 \cdot 10^4$ (10 А)	26,4	верхний – отрицательный нижний – положительный
3	$6,5 \cdot 10^4$ (10 А)	26,4	верхний – положительный нижний – отрицательный
4	$1,3 \cdot 10^5$ (20 А)	22,2	верхний – положительный нижний – отрицательный
5	$1,3 \cdot 10^5$ (20 А)	22,2	верхний – отрицательный нижний – положительный

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТЛИВКИ НА МОДЕЛЬНОМ СПЛАВЕ Pb-Sn

Эксперимент с использованием разрабатываемой пробы проводился в следующем порядке. Керамический тигель устанавливался в печь и загружался шихтой. По окончании процесса расплавления шихты, в тигель в кварцевом колпачке опускалась хромель-алюмелевая термопара и температура расплава доводилась до требуемой – 45 – 50 °С выше температуры ликвидуса.

После отключения печи от источника тока, в керамический тигель опускалась графитовая пробка с установленной в ней оснасткой, к электродам подключался источник постоянного тока, термопары присоединялись к АЦП, на электроды подавался ток и начиналась запись результатов измерения на персональный компьютер. Тигель с пробой охлаждался вместе с печью до комнатной температуры.

Подача тока на электроды экспериментальной пробы прекращалась при достижении сплавом температуры 100 °С.

Для регистрации аналоговых сигналов силы тока, напряжения и термо-ЭДС от термопар, использовали 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь ZET 220, предназначенный для измерений параметров сигналов с высокой точностью и большим динамическим диапазоном. Модуль АЦП ЦАП ZET 220 подключается к персональному компьютеру по шине USB 2.0. Хромель-алюмелевые термопары подключали непосредственно к клеммной колодке прибора без применения удлинительно-компенсационных проводов. Температура «холодных спаев» измерялась в зоне подключения термопар (вблизи клеммной колодки) специальным термодатчиком (встроенным компенсатором холодного спая) и учитывалась при вычислении измеренной температуры.

Регистрация измеренных сигналов осуществлялась базовым программным обеспечением ZETLAB BASE, которое входит в комплект поставки модулей ZET 220. Численное дифференцирование аналоговых сигналов от термопар производилось с использованием программного обеспечения «Темполь».

После охлаждения экспериментальной пробы, графитовая пробка вынималась, металл извлекался из керамического тигля, нижняя часть слитка отпиливалась по кругу на уровне кварцевой трубки и вытягивалась оставшаяся часть слитка.

В процессе анализа и обработки полученных результатов использовалось следующее оборудование и методики.

Микротвердость поверхностного слоя шлифов измеряли на цифровом микротвердомере HVS-1000 по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 9450-76, при нагрузке на индентор 50 гс и температуре 20 °С. Расстояние между отпечатками составляло 20 – 50 мкм, погрешность измерений $\pm 0,2$ мкм.

Химический состав образцов определяли рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском спектрометре XRF-1800.

Микроструктуру сплава изучали на поперечных и продольных образцах после травления поверхности шлифа в концентрированной азотной кислоте с многократными полировками. Исследование проводилось с помощью инвертированного металлографического микроскопа OLIMPUS GX-51 при различных увеличениях в светлом поле.

Обработку полученных экспериментальных данных производили на персональных ЭВМ с использованием программного пакета для статистического анализа Statistica и стандартного пакета прикладных программ Microsoft Excel.

Серия проведенных экспериментов показала, что пропускание через расплав постоянного электрического тока разной направленности не приводит к существенному изменению положения точки ликвидуса исследуемого сплава.

Полученные данные показывают, что положение точки ликвидус сплава не зависит от воздействия на расплав постоянного электрического тока. Продолжительность времени температурной остановки при температуре ликвидус так же остается практически постоянной.

В результате последующего охлаждения под действием постоянного электрического тока наблюдается более медленное охлаждение образца по сравнению с его охлаждением без токового воздействия. Данный факт обусловлен разогревом тела образца за счет активного влияния Джоулева тепла. На экспериментальных термических кривых хорошо видно, что с увеличением силы тока в цепи температура в экспериментальных образцах снижалась медленнее, чем в образце без токового воздействия на кристаллизующийся расплав. Чем больше токовое воздействие на

расплав, тем большая разница наблюдается в температурах охлаждения.

Абсолютно иная картина наблюдается при прохождении сплавом температуры солидуса.

Из полученных результатов следует, что при воздействии постоянным электрическим током на кристаллизующийся расплав наблюдается повышение температуры солидуса в области расплава, подвергающейся токовой обработке, по отношению к температуре солидуса в тигле.

При воздействии на кристаллизующийся расплав постоянным током в 10 А, температура

солидус увеличивается на $1,8 - 2,4^{\circ}\text{C}$, при токовом воздействии в 20 А возрастает до $2,2 - 4,0^{\circ}\text{C}$. Время задержки температуры при прохождении точки солидуса во всех случаях практически не меняется.

В процессе анализа химического состава по высоте образца установлено, что при токовом воздействии на кристаллизующийся расплав плотностью $6,5 \cdot 10^4$ (10 А) существенного изменения не наблюдается. При токовом воздействии плотностью $1,3 \cdot 10^5$ (20 А) наблюдается существенное изменение содержания олова в нижней части образца в районе нижнего электрода (рисунок 2).

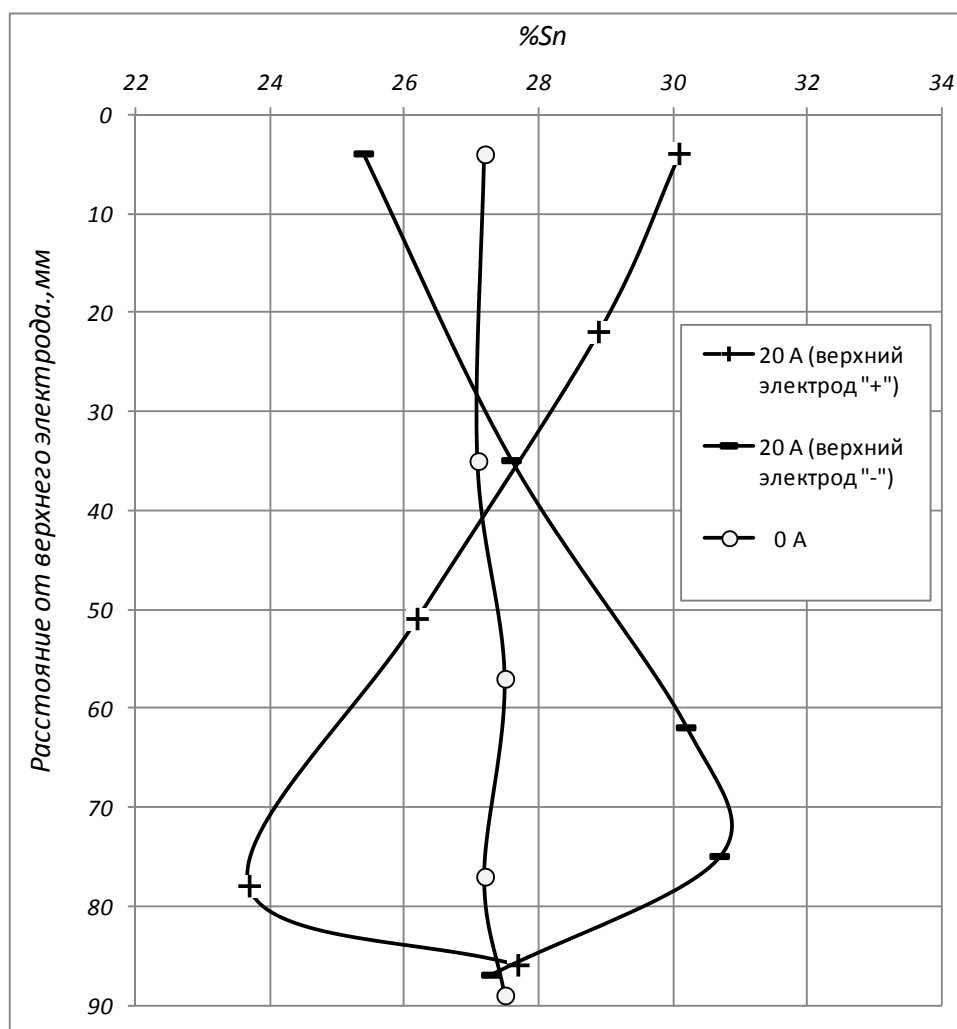


Рисунок 2 – Изменение содержания олова по высоте образца при токовом воздействии на расплав

В случае приложения электрического тока в направлении, совпадающем с силой тяжести (на верхнем электроде «плюс»), содержание олова в нижней части образца снижа-

лось до 24 % с последующим увеличением содержания в верхней части образца до 30 %.

В случае приложения электрического тока в образце в направлении, противоположном

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТЛИВКИ НА МОДЕЛЬНОМ СПЛАВЕ Pb-Sn

силе тяжести (на верхнем электроде «минус»), содержание олова в нижней части образца увеличивалось до 31 %, в верхней части образца содержание снижалось до 25 %.

Максимальное изменение содержания олова в образце наблюдается на удалении 10 – 12 мм от положения нижнего электрода. На удалении 35 – 40 мм от верхнего электрода наблюдается выравнивание содержания олова в расплаве с исходным составом.

Согласно диаграмме состояний Pb-Sn

модельный сплав (27 % Sn, 73 % Pb) относится к доэвтекктическим. Фазовый состав его представлен двумя фазами – первичными кристаллами свинца, кристаллизующимися из жидкой фазы и двойной свинцово – оловянной эвтектикой, кристаллизующейся при 183,3 °С.

На сводном рисунке 3 приведены изображения микроструктур сплавов после различных токовых воздействий. Показана структура верхних, средних и нижних частей слитков.

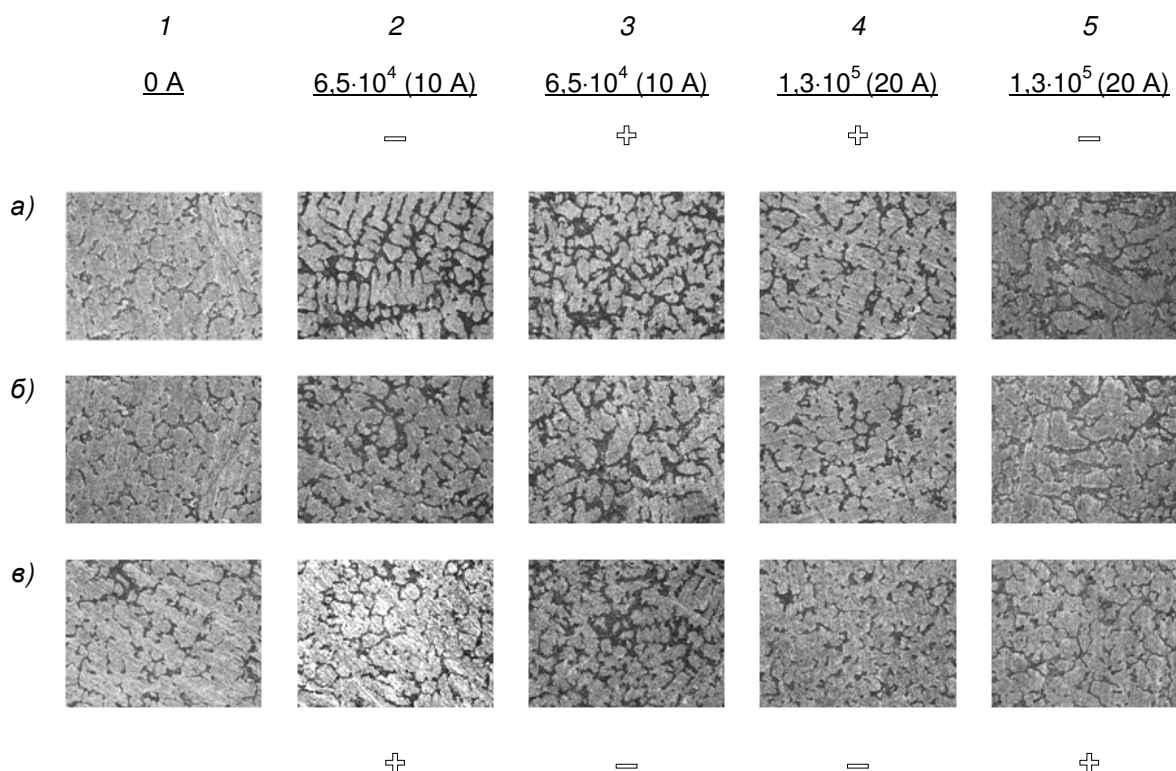


Рисунок 3 – Структуры сплавов: а, б, в – верхняя, средняя и нижняя части образцов; х 50

Как видно из полученных результатов, в исходном состоянии (без обработки электрическим током) в микроструктуре наблюдается значительное количество α -фазы и разрозненные эвтекктические выделения. В сплаве, подвергнутом обработке электрическим током с параметрами $6,5 \times 10^4$ (10 А) заметно увеличение количества эвтектики (причем, эвтекктические кристаллы образуют практически сплошную сетку) и снижение количества свинцовой фазы. В верхней части слитка этот эффект наиболее ярко выражен. При увеличении

силы тока до 20 А доля эвтектики в структуре вновь уменьшается, в то же время происходит увеличение размеров зерен α -фазы.

Результаты измерения микротвердости поверхностного слоя верхних, средних и нижних частей шлифов изученных образцов при различных токовых воздействиях представлены на рисунке 9. Полученные результаты также показали изменение величины микротвердости по высоте образца под действием постоянного электрического тока, а именно ее увеличение у положительного электрода.

	1	2	3	4	5
	<u>0 A</u>	<u>$6,5 \cdot 10^4$ (10 A)</u>	<u>$6,5 \cdot 10^4$ (10 A)</u>	<u>$1,3 \cdot 10^5$ (20 A)</u>	<u>$1,3 \cdot 10^5$ (20 A)</u>
		—	+	+	—
а)	12,4	10,5	12,9	12,0	12,4
б)	12,3	12,8	12,9	11,4	12,3
в)	12,4	12,9	11,5	11,6	12,9
		+	—	—	+
г)	12,5	12,8	12,7	12,4	13,2

Рисунок 4 – Значение микротвердости на поверхности образцов (H_{μ} , кг·мм⁻²): а, б, в – верхняя, средняя и нижняя части образцов, г – расплава в тигле

Выводы. Экспериментально доказано, что воздействие электрического постоянного тока на затвердевающий расплав позволяет изменить распределение химических элементов по сечению отливки и, как следствие, изменить его механические и эксплуатационные свойства в поверхностном слое отливки, а данный метод обработки жидкого и кристаллизующегося металла электрическим током обладает инновационной привлекательностью.

Список литературы:

1. Воздействие постоянного электрического тока на формирование поверхностного слоя отливки / И. Ф. Селянин и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 34-36.
2. Кольчурина, И. Ю. Влияние внешних воздействий на микроструктуру кристалли-

зующегося сплава / И. Ю. Кольчурина, И. Ф. Селянин // Литейное производство. – 2009. – № 8. – С. 13-15.

3. Якимов В. И. Воздействие электрического тока на жидкий алюминиевый сплав / В.И. Якимов, Б.Н. Марьин, В.В. Зелинский и др. // Металлургия машиностроения. – 2003. – №3. – С. 36-39.

4. Рыбкин В. А., Тимченко С. Л. Кристаллизация алюминиевого сплава под действием электрического тока // Литейное производство. – 2003. – №10. – С. 17-19.

5. Тимченко С. Л., Задорожный Н. А. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава // Литейное производство. – 2005. – №9. – С. 12-13.

6. Миненко Г. Н. Обработка электротокмодифицированного серого чугуна / Г.Н. Миненко // Литейное производство. – 2001. – № 2. – С. 11.