

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДНОГО ТОКА ОТ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА

А.В. Иванов, А.В. Синчук, А. С. Рубан

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Экспериментально исследованы характеристики разрядного импульса тока, протекающего через проводник из сплава Al–7%Si, в температурном интервале 700–500°C. Установлено, что охлаждение и фазовый переход проводника из жидкого состояния в твердое сопровождаются уменьшением амплитуды импульсного синусоидального тока, увеличением декремента затухания и периода колебаний, а также смещением колебательного спектра в область более низких частот. Особенностью температурных зависимостей характеристик импульса является наличие скачков и перегибов в характерных точках ликвидуса и солидуса. Предполагается, что причиной наблюдаемых изменений служит увеличение как резистивной, так и реактивной (индуктивной) составляющей сопротивления проводника в процессе охлаждения и затвердевания.

УДК 537.528:669.017.16

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в литейном производстве продолжают поиски методов и технологий, которые реализуют силовое воздействие электрического тока на жидкий и кристаллизующийся металл [см., например, 1–3]. Положительные эффекты такого воздействия – это удаление газов из расплава, формирование плотного, мелкозернистого металла после его затвердевания, значительное улучшение механических и эксплуатационных свойств. В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины проводятся работы по обработке жидких и кристаллизующихся сплавов периодически повторяющимися микросекундными импульсами тока большой мощности, источником которых служит высоковольтный генератор импульсных токов (ГИТ) с емкостным накопителем энергии [4, 5]. Здесь обрабатываемый металл является одним из элементов разрядной цепи ГИТ и представляет собой, как правило, массивный проводник простого (чистые металлы) или сложного химического состава (сплавы), по которому проходят токи в единицы и десятки килоампер.

Хотя технические возможности способа, в принципе, не ограничивают генерацию импульсов любой формы, проведенные экспериментальные исследования показали достаточно высокую эффективность обработки металлических расплавов самыми простыми в реализации импульсами, характерными для колебательного разряда. Кроме того, установлено [6], что колебательный режим разряда в сравнении с согласованным и апериодическим режимами характеризуются наиболее широким спектром и высокими значениями относительной амплитуды колебаний для фиксированных частотных компонент. Таким образом, можно утверждать, что именно колебательный режим разряда реализует поступление в расплав мощного поличастотного импульса, что позволяет более эффективно обрабатывать расплав, оказывая влияние на его различные структурные уровни.

Очевидно, что при прохождении через расплав килоамперного импульса тока с частотой колебаний порядка 10^5 Гц электрофизические процессы в жидкометаллическом проводнике, в отличие от постоянного тока, в силу ярко выраженного скин-эффекта имеют ряд особенностей. Поэтому, как показано в работе [4], перегрев проводника за счет выделения Джоулева тепла ничтожно мал (не более нескольких градусов). Но, пропуская импульсы тока, необходимо учитывать, что температура жидкого проводника со временем, естественно, уменьшается, и при достижении определенного ее значения проводник начинает затвердевать. Как известно, в чистых металлах этот процесс протекает при постоянной температуре, а интервал, в котором охлаждается и переходит в другое агрегатное состояние сплав, зачастую составляет 100–200°C. Это означает, что изменяются физические характеристики проводника, прежде всего его удельное электросопротивление: для чистых металлов – скачкообразно в точке фазового перехода; для сплавов – непрерывно в интервале кристаллизации.

Таким образом, исследование характеристик импульсного тока в зависимости от температуры и внутренней структуры проводника представляет интерес не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения. Чтобы эффективность обработки расплава в различных температурных зонах

была постоянной, характеристики импульса тока в процессе обработки затвердевающего проводника необходимо стабилизировать. В то же время изменение структурно-чувствительных характеристик импульса тока можно выгодно использовать для экспресс-контроля агрегатного (фазового) состояния проводника, когда другие способы, например контроль температуры, представляются недостаточно точными.

Цель данной работы — определить зависимости характеристик импульса разрядного тока в жидкометаллическом проводнике в температурном интервале кристаллизации и проанализировать причины, обуславливающие изменение этих характеристик в процессе фазового превращения материала проводника.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальных исследований были выбраны три цилиндрических проводника диаметром 60 мм и высотой 90 мм одинакового химического состава, соответствующего двухкомпонентному алюминиевому сплаву Al-7%Si. Вначале каждый из помещенных в электроизоляционные контейнеры проводников расплавлялся в печи при 700°C. После этого контейнер с жидким проводником устанавливался на медную токопроводящую пластину, соединенную с источником питания (рис. 1). В расплав помещалась хромель-алюмелевая термопара и при помощи высокочастотного измерительного комплекса с фиксацией данных на персональный компьютер записывалась кривая охлаждения. По мере дальнейшего охлаждения проводника вплоть до его полного затвердевания (500°C) в определенных температурных точках, характеризующих различные участки кривой охлаждения, производились одиночные разряды и регистрация амплитудно-временных характеристик тока, проходящего через проводник. Токоподвод к жидкому проводнику осуществлялся с помощью погруженного на глубину до 5 мм графитового электрода диаметром 5 мм и противоэлектрода, выполненного в донной части контейнера с расплавом, то есть была реализована электродная система «острие-острие». При регистрации электрических характеристик разряда использовалась стандартная методика [7] снятия временных зависимостей тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ в $R-L-C$ цепи с помощью универсального запоминающего осциллографа, высоковольтного емкостного делителя и сильноточного коаксиального шунта. В ходе эксперимента все параметры разрядного контура, которые определяли начальные характеристики импульса, поддерживались постоянными: начальное напряжение $U_0 = 7$ кВ, емкость $C = 1$ мкФ и индуктивность разрядного контура $L = 2$ мкГн. Полученные осциллограммы оцифровывались с шагом 0,1 мкс, производилась математическая компенсация реактивной составляющей падения напряжения и находились мгновенные значения активной составляющей сопротивления $R-L-C$ цепи.

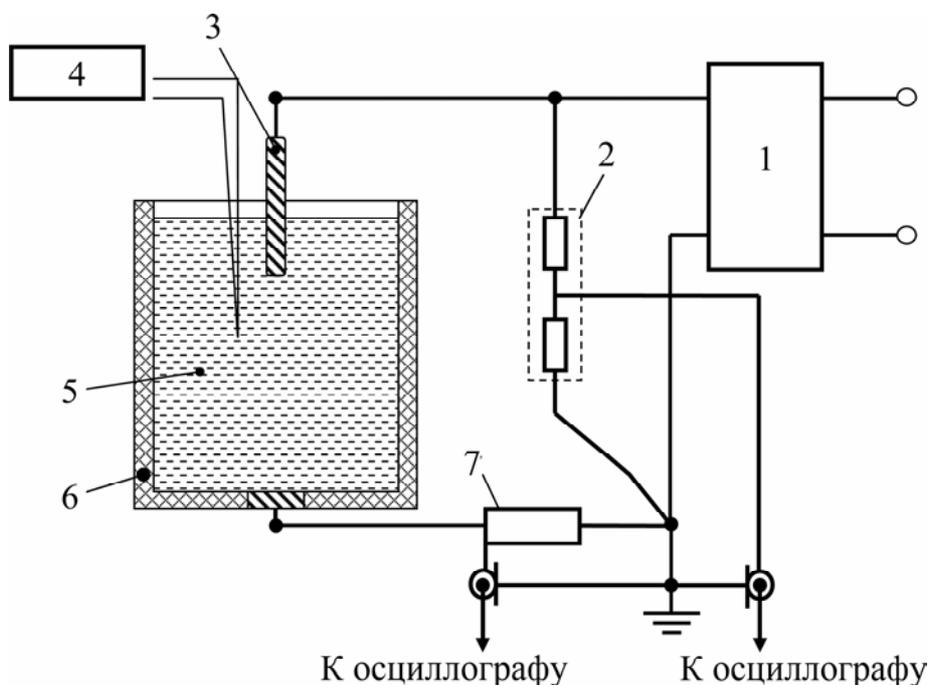


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда. 1 – генератор импульсных токов; 2 – делитель напряжения; 3 – положительный электрод; 4 – термографический комплекс; 5 – расплав; 6 – электроизоляционный контейнер; 7 – шунт тока

Спектральный анализ импульса разрядного тока был выполнен путем вычисления составляющих комплексной спектральной плотности $S(\omega)$ временной функции тока:

$$S(\omega) = S_c(\omega) + iS_s(\omega), \quad (1)$$

$$S_c(\omega) = \int_0^T y(t) \cos(\omega t) dt, \quad (2)$$

$$S_s(\omega) = \int_0^T y(t) \sin(\omega t) dt, \quad (3)$$

где ω – угловая частота, с^{-1} .

Модуль спектральной плотности $\Phi(\omega)$:

$$\Phi(\omega) = ([S_c(\omega)]^2 + [S_s(\omega)]^2)^{1/2}. \quad (4)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА

На рис. 2 представлены три экспериментальные осциллограммы: типичная кривая, характеризующая ток короткого замыкания цепи, типичная кривая, характеризующая временную зависимость тока в импульсе $i(t)$, проходящего через твердый проводник при комнатной температуре, и типичная кривая тока в импульсе, когда проводник разогрет до 700°C и находится в жидком состоянии. Как видим, при добавлении в разрядную цепь алюминиевого проводника ток затухает в соответствии с ростом его удельного электросопротивления, которое при 20°C составляет порядка $2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [8], а при температуре 700°C – в 10 раз больше, порядка $2,6 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. При этом логарифмический декремент затухания в режиме короткого замыкания $\delta = 0,23-0,24$ при пропускании тока через твердый проводник увеличивается до $0,26-0,27$, а через жидкий – до $0,30-0,32$.

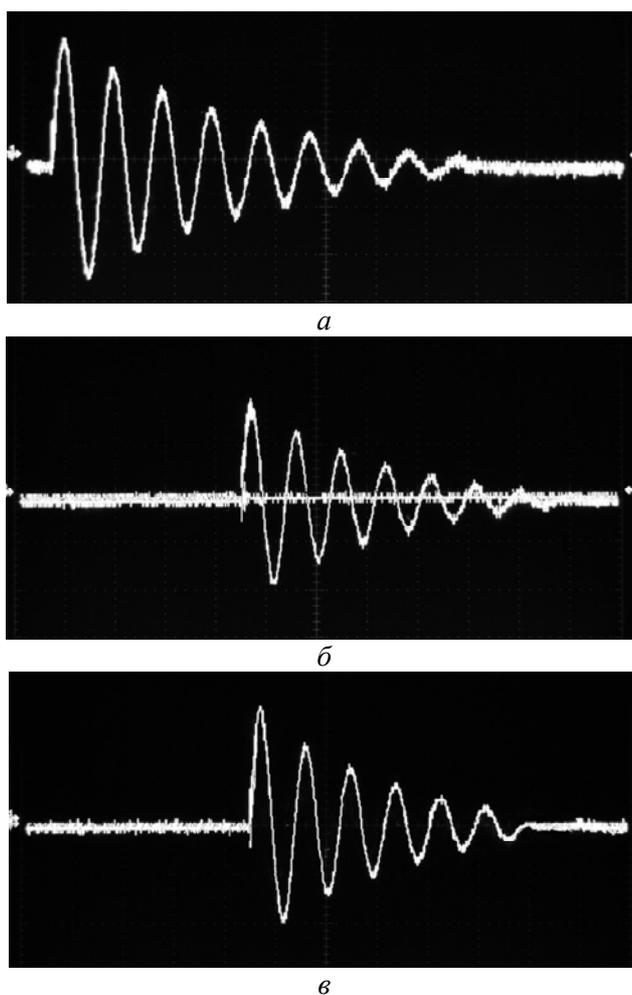


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока ($mI = 2$ В/дел., $mt = 10$ мкс/дел.): а – режим короткого замыкания; б – разрядная цепь с твердым проводником; в – разрядная цепь с жидким проводником

На рис. 3 приведена кривая охлаждения проводника с экспериментальными точками, в которых производились одиночные разряды. Точки, лежащие выше $T = 603^{\circ}\text{C}$, относятся к полностью жидкому состоянию проводника. $T = 603^{\circ}\text{C}$ – это температура ликвидуса, начиная с которой в жидкости образуются и растут твердые кристаллы практически чистого Al, то есть меняется внутреннее упорядочение жидкости, а $T = 570^{\circ}\text{C}$ – температура солидуса, или температура эвтектического превращения, при которой кристаллизация завершается и ниже которой проводник уже находится в полностью твердом агрегатном состоянии. Таким образом, экспериментальные точки, попадающие в промежуток фазового перехода $T = 603\text{--}570^{\circ}\text{C}$, относятся к двухфазному твердожидкому состоянию проводника.

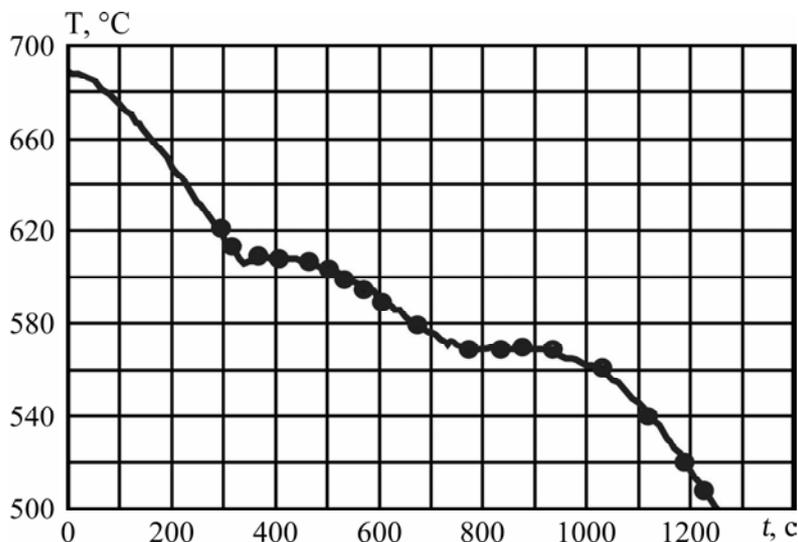


Рис. 3. Кривая охлаждения сплава с отмеченными точками, в которых производилось осциллографирование разрядного тока

Анализ полученных осциллограмм позволил установить, что при охлаждении проводника сила разрядного тока в цепи уменьшается и импульс тока становится более пологим. Для примера на рис. 4, а–в представлены температурные зависимости первого максимума тока, которые позволяют видеть, что по мере снижения температуры проводника от 700 до 500°C это уменьшение составляет порядка $20\text{--}23\%$. Характер зависимостей – немонотонный, с более пологим участком, соответствующим твердому состоянию проводника. В области твердожидкого состояния наибольший разброс экспериментальных значений наблюдается как раз в характерных точках фазового перехода (603°C и 570°C), что, по-видимому, объясняется термодинамической неустойчивостью состояния проводника в этих точках.

Проведенный анализ осциллограмм тока позволил выявить еще одну характеристику импульса, изменение которой четко фиксируется экспериментально, а именно изменение периода колебаний разрядного тока (рис. 4, г–е). По мере охлаждения и затвердевания проводника осциллограммы тока как бы растягиваются, а период колебаний увеличивается до 10% . Можно видеть явно немонотонный характер этого изменения и перегибы на температурных кривых, совпадающие с перегибами на кривой охлаждения.

Попытаемся рассмотреть ход температурных зависимостей тока и периода колебаний в рамках современных представлений о структуре жидких двухкомпонентных сплавов и процессах их затвердевания. Над ликвидусом выше 603°C анализируемые электрические характеристики изменяются плавно, так как в этой области расплав находится в однофазном гомогенном состоянии с равномерным распределением атомов Si в алюминиевой основе и существенное влияние на электрические свойства оказывает тепловое движение атомов жидкости. По мере приближения к ликвидусу металлическая система становится более микрогетерогенной в силу образования в расплаве кластеров с упорядоченной ближней структурой и преимущественно односортными атомами, а в районе 603°C наблюдается изменение наклона кривых, свидетельствующее о начале кристаллообразования, то есть появления в жидкости включений твердой фазы с иными физическими свойствами (в данном случае – кристаллов практически чистого алюминия). Затем, по мере нарастания твердой массы, вплоть до эвтектической точки, сила и период тока опять изменяются плавно. При температуре эвтектики 570°C твердые кристаллы полностью смыкаются в единый каркас, между которым сосредотачивается остаточная жидкость, обогащенная Si. Вновь происходит изотермическое скачкообразное

изменение характеристик импульса, возможно, связанное с закупориванием на заключительном этапе затвердевания междендритных пространств кристаллами Si, который обладает отличными от алюминия электрическими свойствами. Далее опять наблюдается монотонное изменение характеристик импульса, связанное с охлаждением твердого проводника.

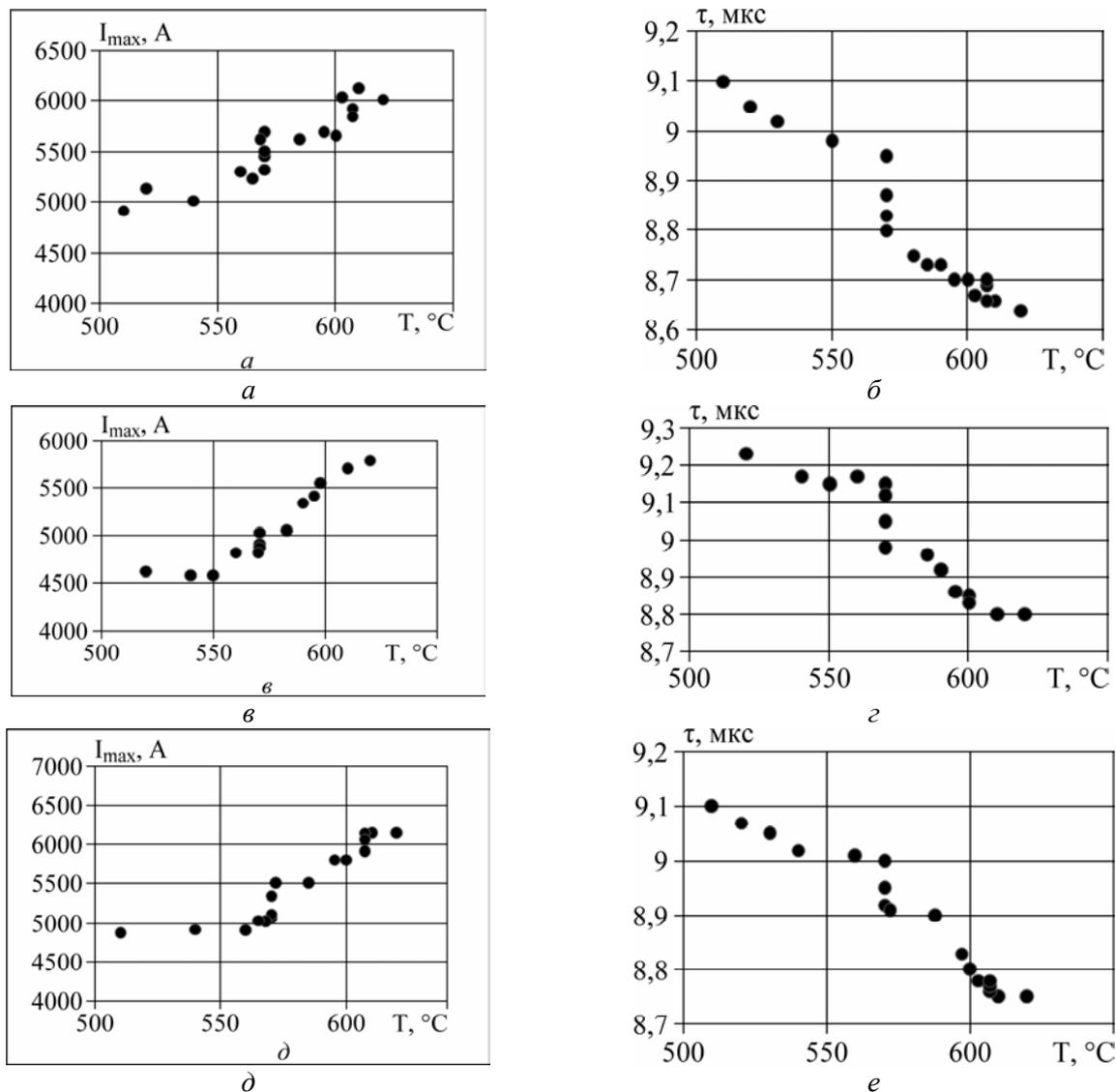


Рис. 4. Температурные зависимости характеристик импульса тока: а, в, д – первый максимум тока; б, г, е – период колебаний тока; а, б – проводник 1; в, г – проводник 2; д, е – проводник 3

Вполне очевидно, что, являясь структурно-чувствительным свойством материала, удельное электрическое сопротивление проводника изменяется при изменении его агрегатного состояния. Но, как показывает эксперимент, с изменением степени микроструктурного упорядочения проводника увеличивается период колебаний тока, соответственно уменьшается частота тока. Значит, можно сказать, что меняется не только активная составляющая, но и реактивная составляющая сопротивления цепи.

Исследованы также спектральные характеристики импульса тока, которые представляют интерес с точки зрения возбуждения резонансных явлений в микронеоднородном расплаве. Установлено, что характер высоковольтного электроимпульсного воздействия на расплавы полигармонический (в данном случае ширина частотного диапазона составляла около 30 кГц) – спектральный максимум импульса по мере затвердевания проводника смещается в область более низких частот (рис. 5). На высоких частотах спектральная плотность имеет очень маленькие значения, то есть реализуется затухание высокочастотного сигнала на различных микронеоднородностях, которыми характеризуется металл. Не исключено, что такое широкополосное воздействие вызывает вибрацию взвеси разноразмерных кристаллов твердой фазы в расплаве и сопутствующие резонансные явления, которые играют положительную роль в измельчении кристаллической структуры после затвердевания.

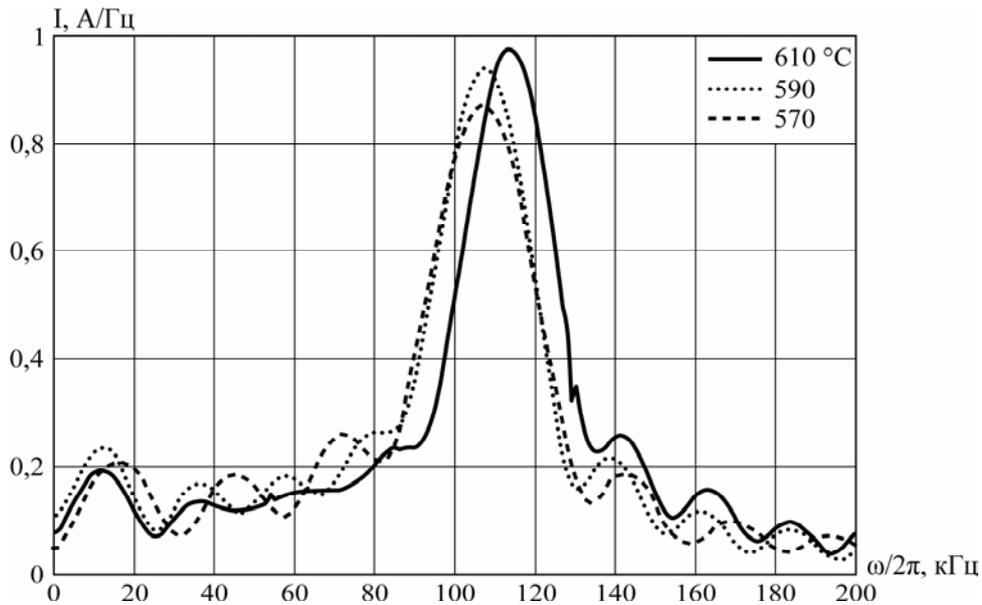


Рис. 5. Спектры импульса тока

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Следует понимать, что полученные вольт-амперные характеристики относятся к импульсу тока, протекающего по разрядной $R-L-C$ цепи, полное сопротивление которой определяется как $u(t)/i(t)$. Включенный в эту цепь жидкий проводник является лишь одним из ее элементов, имеющих собственное удельное электросопротивление, собственную емкость и собственную индуктивность. В силу малости собственной емкости проводника его полное сопротивление Z_{np} на конкретной частоте можно рассчитать по известной формуле:

$$Z_{np} = (R_{np} (1 + j\omega\tau))^{1/2}, \quad (5)$$

где $\tau = L_{np}/R_{np}$ – постоянная времени.

Учитывая то, что температурный коэффициент удельного электросопротивления алюминия и алюминиевых сплавов имеет положительный знак, логичным было бы ожидать увеличения, а не уменьшения силы тока при снижении температуры. Но полное сопротивление цепи, как известно из теории электрических цепей, определяется и силой, и частотой протекающего в ней тока (например, [9]). Таким образом, выявленное экспериментально уменьшение амплитуды импульса тока и частоты свидетельствует о том, что при снижении температуры полное сопротивление $R-L-C$ цепи, составной частью которого является и Z_{np} , увеличивается.

Известно, что при частотах 10^5 Гц в металлах ток течет в тонком скин-слое и активное сопротивление проводника определяется сопротивлением данного слоя. Для инженерных расчетов толщину скин-слоя можно вычислить по формуле:

$$\delta = (1/\mu_0\mu\sigma\omega)^{1/2}, \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость, $\mu = 1$; σ – проводимость металла $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Сопротивление проводника можно определить из соотношения

$$R_{np} = \gamma l/S, \quad (7)$$

где γ – удельное электросопротивление материала, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения проводника, м^2 .

Из справочных данных [10] удельное сопротивление алюминия $\gamma(\text{Al}700^\circ\text{C}) = 26 \cdot 10^{-8}$ $\text{Ом}\cdot\text{м}$; $\gamma(\text{Al}500^\circ\text{C}) = 8,7 \cdot 10^{-8}$ $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Несложные расчеты с учетом скин-эффекта показывают, что активное сопротивление алюминиевого проводника диаметром 60 мм и высотой 90 мм при температуре 500°C больше в 1,72 раза, чем активное сопротивление при 700°C . Получается, что хотя при остывании

удельное сопротивление падает, но за счет этого уменьшается толщина скин-слоя, которая определяет геометрию токонесущего слоя, что ведет за собой увеличение активного сопротивления проводника. Следствием этого может быть уменьшение амплитудного значения импульса тока в процессе кристаллизации расплава.

Проведенный экспериментальный анализ поведения активного сопротивления R разрядной цепи показал, что с охлаждением металла оно изменяется, но выделить конкретный вклад слагаемого R_{np} затруднительно, так как вносимые кристаллизующимся проводником изменения попадают в пределы погрешности измерений. Безусловно, это не означает, что по мере образования твердой фазы, характеризующейся наличием ближнего порядка в решетке и, следовательно, отличной от маточного расплава электропроводностью, удельное сопротивление остается постоянным. В отличие от чистого алюминия, для которого в точке плавления оно изменяется скачкообразно в 2,2 раза, для двухкомпонентного сплава в интервале 700–500°C это изменение происходит более плавно, и для точной фиксации этих изменений (в пределах 10^{-8} Ом·м) требуется разработка более чувствительных методик измерения.

Изменение частоты и амплитуды тока также может являться следствием изменения реактивной составляющей сопротивления жидкометаллического проводника. Поскольку индуктивная составляющая сопротивления жидкометаллического проводника зависит от его собственной индуктивности L_{np} , которая зависит от геометрии проводника и частоты тока.

Безусловно, переход расплава из жидкого в твердое состояние сопровождается объемной усадкой, то есть уменьшением геометрических размеров, и прежде всего длины проводника, поэтому уменьшение его индуктивности вполне возможно. В свою очередь внутренняя индуктивность обратно пропорциональна квадратному корню из частоты, а индуктивное сопротивление L_{np} прямо пропорционально частоте в первой степени. Следовательно, несмотря на снижение индуктивности от изменения геометрии проводника, с ростом частоты индуктивное сопротивление растет, что, как показывают результаты экспериментальных исследований, может являться одной из причин уменьшения силы тока. Кроме того, по мере протекания фазовых превращений может происходить изменение и температурно-зависимых парамагнитных свойств алюминиевого сплава. Косвенным подтверждением такой возможности служат, например, данные работы [11], где экспериментально зафиксировано изменение магнитной восприимчивости сплава системы Al-Cu-Fe в температурном интервале твердожидкого и жидкого состояния.

Анализируя совокупность факторов, в той или иной мере определяющих изменение характеристик разрядного импульса тока, необходимо также оценить вклад в это изменение, вносимый нагреванием погруженного в высокотемпературную жидкость электрода. Для определения доли помех, вносимых нагревом погружаемого электрода, проводники после полного остывания до комнатной температуры повторно нагревали до температуры 520°C и, подсоединяя холодный электрод, пропускали импульсы тока с теми же начальными параметрами. Анализ осциллограмм показал, что значения первого максимума тока I_{max} и декремента затухания δ несущественно отличаются от значений, соответствующих температуре проводника 520°C и нагретому электроду (см. таблицу).

Характеристики разрядного импульса тока

Проводник	Температура проводника, °C	I_{max} , кА	δ
1	620	5,8	0,275
	520	4,6	0,284
	520 (холодный электрод)	4,8	0,282
2	620	6,0	0,262
	520	5,2	0,317
	520 (холодный электрод)	5,3	0,285
3	620	6,2	0,279
	520	4,8	0,300
	520 (холодный электрод)	5,0	0,290

ВЫВОДЫ

Протекание разрядного импульса тока в виде затухающей синусоиды с частотой порядка 10^5 Гц через металлический проводник, претерпевающий фазовый переход из жидкого состояния в твердое, сопровождается уменьшением амплитуды тока, увеличением декремента затухания, периода колебаний и смещением колебательного спектра в область более низких частот. Наличие скачков и

перегибов на температурных зависимостях характеристик импульса тока в характерных точках фазового перехода (ликвидуса, солидуса) свидетельствует о чувствительности характеристик импульсного разрядного тока к изменению внутреннего структурного упорядочения проводника и возможностях его использования в системах диагностики процессов кристаллизации расплавов. Предложены возможные механизмы изменения характеристик разрядного импульса тока, связанные с изменением как активной, так и реактивной составляющей полного сопротивления жидкометаллического проводника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарембо В.И., Киселева О.Л., Колесников А.А., Подгорская Е.С., Суворов К.А. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов. *Металлургия машиностроения*. 2003, (1), 11–15.
2. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Башмакова Н.В. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо. *Литейщик России*. 2007, (8), 12–15.
3. Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui. Influence of Pulse Electric Current on Solidification Structure of Al–Si Alloy. *Electromagnetic Processing of Material*. 2007, (1), 34–37.
4. Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава. *Металлургия машиностроения*. 2010, (5), 33–39.
5. Ivanov A.V., Sinchuk A.V. and Bogoslavskaya A.S. A Study of the Electromagnetic and Hydrodynamic Processes in a Liquid-metal Conductor Exposed to Current Pulses. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, 47(1), 28–34.
6. Грабовый В.М., Иванов А.В., Мельник А.В. Использование электроразрядного генератора упругих колебаний для обработки металлов и сплавов. *Процессы литья*. 2011, (1), 36–47.
7. Шваб А. *Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения*. Пер. с нем. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
8. Арсентьев П.П., Коледов Л.А. *Металлические расплавы и их свойства*. М.: Metallurgia, 1976. 375 с.
9. Котельников А.В., Кандаев В.А., Свешникова Н.Ю. Собственные параметры элементов контура заземления различной формы. *Первая российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов*. Новосибирск, 2002.
10. Зиновьев В.Е. *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. Справ. изд. М.: Metallurgia, 1989. 264 с.
11. Грушевский К.И., Сидоров В.Е., Быков В.А., Упоров С.А., Прекул А.Ф. Магнитные свойства и структурные превращения в сплаве $Al_{62}Cu_{25,5}Fe_{12,5}$ при высоких температурах. *Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика*. 2007, (4), 98–103.

Поступила 07.11.11

Summary

Characteristics of a discharge pulse current flowing through a conductor from Al–7%Si alloy, within the temperature range of 700–500°C, are experimentally investigated. It is found out that cooling and phase transition of a conductor from a liquid to solid state is accompanied by contraction of amplitude of the pulse sine wave current, by the increase of damping decrement and of oscillation period, as well as by the displacement of an oscillatory spectrum to the area of lower frequencies. A peculiarity of temperature dependences of pulse characteristics is occurrence of discontinuities and excesses at characteristic *liquidus* and *solidus* points. It is assumed that the observed changes are due to the increase of active resistance and reactance (inductive) components of the full resistance during cooling and solidification.