

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ В ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР ВІД 100 ДО 1000 °С*

Д. В. Вінниченко, магістр, мол. наук. співроб.

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Анотація. На основі аналізу електричних властивостей металів або сплавів в інтервалі кристалізації розроблено архітектурні принципи і схемотехнічні рішення, на базі яких спроектовано та створено електротехнічний комплекс для вимірювання зміни електричного опору й температури алюмінієвих сплавів в інтервалі від 100 до 1000 °С.

Ключові слова: електричний опір, рідка і тверда фази металів та сплавів, електротехнічні вимірювання, електротехнічний комплекс, температурний інтервал кристалізації.

Аннотация. На основании анализа электрических свойств металлов или сплавов в интервале кристаллизации разработаны архитектурные принципы и схемотехнические решения, на базе которых спроектирован и создан электротехнический комплекс для измерения изменения электрического сопротивления и температуры алюминиевых сплавов в интервале от 100 до 1000 °С.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, жидкая и твердая фазы металлов и сплавов, электротехнические измерения, электротехнический комплекс, температурный интервал кристаллизации.

Abstract. Architectural principles and circuit solutions are carried out on the basis of analysis of metals or alloys electrical properties in an interval of a crystallization. The electrotechnical complex for measurement of changes of electric resistance and aluminum alloys temperatures in an interval from 100 up to 1000 °С is designed on the basis of these principles and solutions.

Keywords: electrical resistance, liquid and solid phases of metals and alloys, electrotechnical measurements, electrotechnical complex, temperature interval of crystallization.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розробка методів і обладнання для визначення фазового складу металів або сплавів в інтервалі кристалізації є актуальною задачею, розв'язання якої дозволить створювати системи автома-

тичного контролю та керування виробничими і технологічними процесами в металургійній промисловості та ливарному виробництві. Найбільш простим і тому поширеним методом контролю фазового стану сплавів є реєстрація

* Роботу виконано за підтримки гранту для молодих учених НАН України.

кривих охолодження та їх зіставлення з фазовими діаграмами [8]. Але для чистих металів цей метод діагностики є малоінформативним, тому що в інтервалі кристалізації зміни фазового складу не супроводжуються зміною температури. Тому доцільним є пошук і обґрунтування більш інформативних методів визначення фазового складу металів або сплавів в інтервалі кристалізації та розробка апаратних і програмних засобів для їх реалізації.

МЕТОЮ РОБОТИ є розробка електротехнічного комплексу для вимірювання зміни електричного опору і температури алюмінієвих сплавів в інтервалі від 100 до 1000 °С, призначеного для визначення й використання нових інформаційних координат системи контролю зміни фазового складу металів або сплавів в інтервалі кристалізації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Аналіз проблеми. Ливарні розплави — це багатокомпонентні системи, для контролю яких повинні бути відомими та придатними до оперативного застосування діаграми фазових перетворень. У випадку швидкої нерівномірної кристалізації реальних металів і сплавів термограма дає обмежену інформацію про фазовий стан. Тому для підвищення точності визначення фазового стану металів в інтервалі кристалізації доцільно використовувати структурно-чутливі властивості матеріалів, наприклад залежність опору металів від співвідношення твердої та рідкої фаз у двокомпонентній системі. Теоретичною основою для розробки методу визначення фазового стану сплавів в інтервалі кристалізації є уявлення про структуру ближнього порядку металевій рідині та структурно-фазові перетворення під час кристалізації. Існують гіпотези, згідно з якими значно перегрітий вище від температури ліквідусу

розплав (понад 100 °С) знаходиться в стані, наближеному до ідеального розчину. З охолодженням до температури ліквідусу стан розплаву змінюється на квазідвофазний з утворенням в об'ємі великої кількості кластерних угруповань — осередків структури ближнього порядку [4]. З подальшим переходом через ліквідус на базі цих осередків або домішкових включень починаються зародкоутворення і виділення з розплаву частинок твердої фази із чіткою поверхнею розподілу (провідність цих частинок залежно від їх хімічного складу може бути більшою або меншою від провідності матричного розплаву). Після з'єднання кристалів та утворення твердого каркаса первинної фази, проміжки якого ще заповнені рідиною, сплав є гетерогенною системою з нерегулярним статистичним розміщенням кристалів. Ступінь гетерогенності значно підвищується під час евтектичного перетворення залишкової рідини.

Запропонований метод визначення фазового стану металів в інтервалі кристалізації базується на теоретичних і практичних даних про певні залежності питомого електричного опору металів від температури та полягає у тому, що еквівалентний опір двофазної (твердої–рідкої) системи буде визначатися як функція геометричних та електричних параметрів кожної фази. Визначення цієї функції для металу дозволить за результатами вимірювання поточного опору металу контролювати поточний фазовий стан розплаву, що кристалізується.

Аналіз залежності електричного опору металів від температури, у тому числі в інтервалі кристалізації. Питома електрична провідність металів є обернено пропорційною температурі [7, 9]. Для твердих одновалентних металів згідно з моделлю Друде [11]

$$\gamma = \frac{e^2 E d}{m_i \mu_F k T},$$

де m — маса електрона; E — модуль Юнга, Н/м²; d — період кристалічної решітки, м; k — стала Больцмана, Дж/К; u_F — швидкість руху електрона, м/с; T — температура, К.

Відомо [3], що електричний опір для більшості металів стрибкоподібно змінюється при фазовому перетворенні кристал–рідина. Електричний опір рідкого металу приблизно до двох разів більше, ніж твердого, що можна пояснити порушенням строгого порядку атомів при плавленні, а також деякою зміною міжатомного зв'язку, що, до речі, приводить і до зміни об'єму при переході металу в рідкий стан. Нагрівання рідкого металу також приводить до підвищення електричного опору. Залежність опору більшості рідких металів від температури також пропорційна.

Стрибокподібна зміна питомого опору більшості металів при фазовому перетворенні (за винятком Ga, Hg, Sb, Bi) може бути розрахована за формулою [3]

$$\frac{\rho_L}{\rho_S} = \exp\left(80 \frac{L_S}{T_S}\right), \quad (5)$$

де L_S — прихована теплота плавлення, кДж/моль; ρ_L , ρ_S — питомий опір відповідно рідкої та твердої фази, Ом·м; T_S — температура плавлення, К.

Деякі метали як при плавленні, так і в рідкому стані характеризуються аномальною зміною електричного опору.

Наведені теоретичні моделі й емпіричні залежності питомого опору твердих і рідких металів з довідника [3] отримано для сталих режимів в умовах термостатування, тому вони не дають повної картини процесів фазових перетворень в інтервалі кристалізації. Але різниця питомих електричних опорів рідких і твердих металів від двох до трьох разів дозволяє прогнозувати високу чутливість такого методу діагностики фазового стану металу. З іншого боку, висока провідність металів і кінцеві розміри зразків металів, опір яких досліджу-

ється, дають малі рівні сигналу вихідної координати, що потребує дослідження схемних рішень, які могли б забезпечити високу чутливість методу.

Метод вимірювання малого опору для системи контролю фазового стану металу в інтервалі кристалізації.

Відомо багато методів вимірювання малих значень електричних опорів [3, 5]. Найбільш придатним для використання в інформаційній системі є метод амперметра-вольтметра [1–3]. Недоліками цього методу є те, що для збудження електричного струму використовується керований стабілізатор постійної напруги, що призводить до методичної помилки, яка зумовлена невизначеними опорами ліній зв'язку і контактних опорів у точках контактів електродів з металом. Крім того необхідно реєструвати дві величини: струм і напругу, що збільшує похибку вимірювання опору.

Для подолання недоліків відомих методів розроблено метод вимірювання електричного опору твердих і рідких металів, що є розвитком методу амперметра-вольтметра, схема для реалізації якого наведена на рис. 1. Вона містить вимірювальну ємність 1 зі зразком металу, в якій розміщено чотири електроди. Два струмозбуджуючі зовнішні електроди 2 підключено до джерела збудження електричного струму, яким є кероване стабілізоване джерело постійного струму 3 . Два струмознімальні внутрішні електроди 4 приєднано до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 5 . Схема також включає в себе джерело опорного струму 6 та обчислювальну мікроконтролерну систему 7 . Вихід АЦП 5 з'єднано з обчислювальною мікроконтролерною системою 7 , один з виходів якої з'єднано з джерелом опорного струму 6 , вихід якого з'єднано з входом керованого стабілізованого джерела постійного струму 3 . На схемі 8 — носій енергонезалежної пам'яті.

Перевагами цього методу є можливість задати такий рівень струму, який не буде впливати на термодинамічні процеси в металі; задати коефіцієнт пульсацій стабілізатора струму таким, щоб не впливав на розподільну здатність системи і відповідно на точність вимірювання опору. Ця схема легко інтегрується в автоматизовану систему контролю фазового стану металу, що кристалізується.

Архітектура електротехнічного комплексу для вимірювання опору металів і сплавів. Для визначення параметрів

інтервалу кристалізації зразка металу необхідно застосовувати один з відомих методів. Найбільш інформативним методом є термографічний [6]. Тому розроблено таку архітектуру, яка забезпечує вимоги до обчислювальних потужностей, швидкодії, сполучення аналогових і цифрових пристроїв та уніфіковані інтерфейси для передачі інформації між ієрархічними рівнями комплексу. Структурну схему комплексу наведено на рис. 2.

Температуру розплаву передбачається вимірювати хромель-алюмелевою

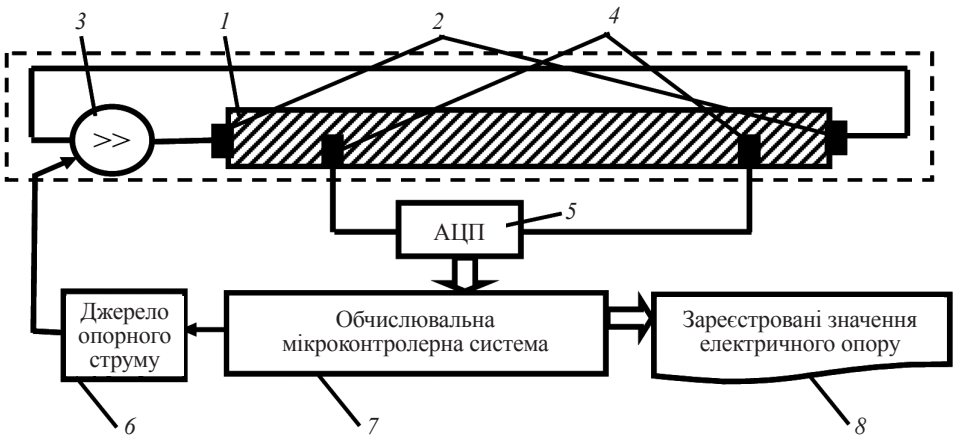


Рис. 1. Схема вимірювання малого опору для системи контролю фазового стану металу в інтервали кристалізації

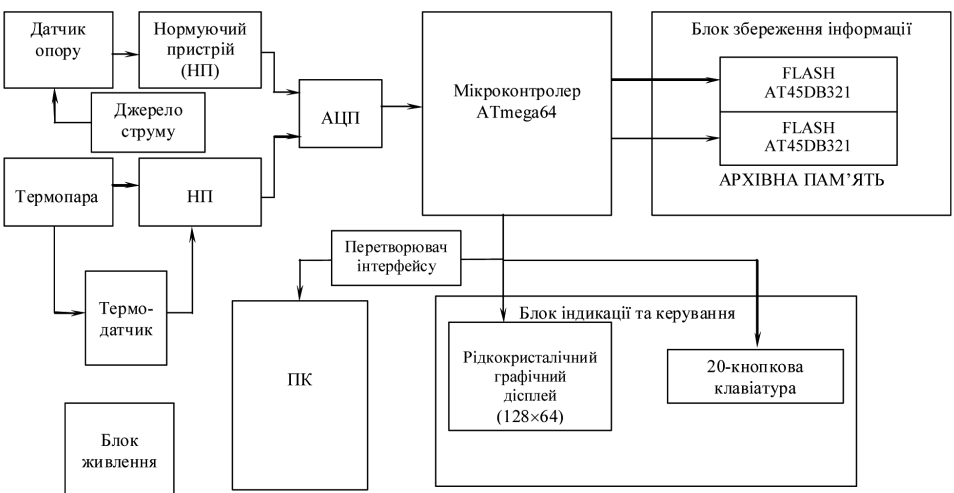


Рис. 2. Структурна схема комплексу для вимірювання опору металів та сплавів

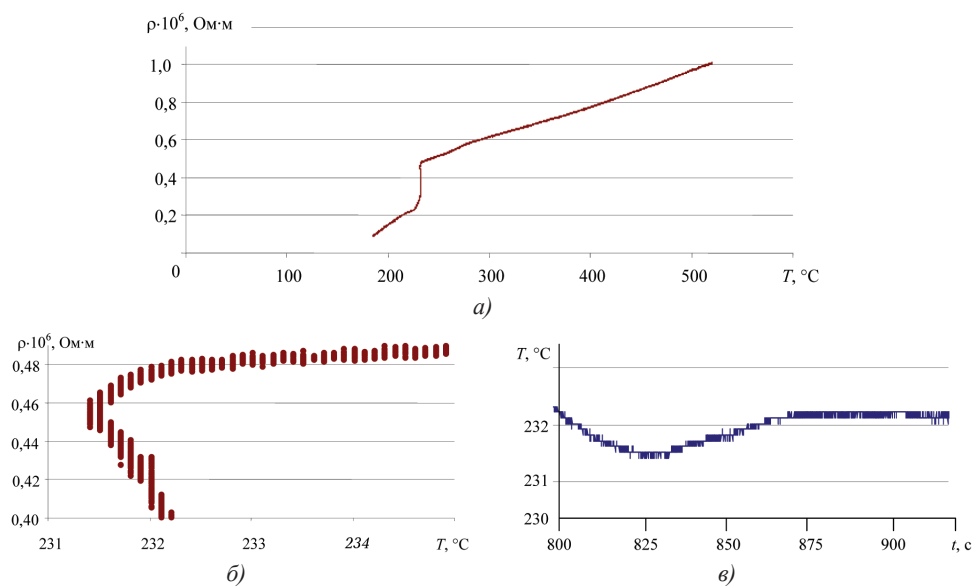


Рис. 3. Експериментальні залежності питомого опору олова від температури (а, б) і температури від поточного часу в околі точки ліквідусу при охолодженні олова (в)

термопарою [10], що забезпечує діапазон вимірювання до 1350 °С, яку кріплять у штативі й вставляють у форму, в яку потім заливають розплав. Залежно від типу сплаву в пристрої для заливання розплаву можна використати або разову склянку, виготовлену зі стрижневої суміші, або багаторазовий графітошамотний тигель відповідного розміру.

Автоматизована інформаційно-вимірювальна система комплексу для безперервного визначення електродинамічних параметрів розплаву металу в інтервалі кристалізації виконує наступні функції: вимірювання вихідної напруги датчика опору; перетворення напруги датчика опору в цифровий код; перетворення напруга–опір; зчитування сигналів з датчика температури — термопари; нормалізація сигналу; компенсація паразитних ЕРС, що виникають у з'єднаннях хромель–мідь, алюмель–мідь; перетворення напруга–температура; видача значення опору та температури на цифрові індикатори; збереження таблиці вимірюваних значень опору й температури в зовнішній пам'яті;

передача даних вимірювань на ПК для подальшої обробки. До складу системи входять наступні функціональні блоки: вимірювально-перетворювальний модуль, у складі якого використовуються промисловий мікроконтролер (МК), персональний комп'ютер (ПК), програмне забезпечення для МК і ПК. Комплекс забезпечує передачу даних у зовнішню інформаційну систему.

Випробування розробленого комплексу проведено для таких металів, як олово та алюміній, і сплаву ПОС40. Результати експериментальних досліджень температурних залежностей питомого електричного опору повністю відповідають довідковим даним [3]. Отриману при охолодженні залежність питомого електричного опору олова від температури, побудовану із 22740 експериментальних точок, наведено на рис. 3, а. На рис. 3, б показано фрагмент експериментальної залежності в околі точки ліквідусу, в якій коливання питомого електричного опору олова очевидно відповідають переохолодженню розплаву в цій точці (рис. 3, в).

Розроблений комплекс має розподільну здатність вимірювання температури (0,1 °С) і питомого опору (10^{-9} Ом·м) із частотою вимірювання до 20 Гц, що дозволяє отримати детальні експериментальні залежності.

Таким чином, розроблений електротехнічний комплекс для вимірювання зміни електричного опору й температури металів і сплавів в інтервалі від 100 до 1000 °С може застосовуватися для використання нових інформаційних координат системи контролю зміни фазового складу металів або сплавів в інтервалі кристалізації.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу електричних властивостей металів або сплавів в інтервалі кристалізації розроблено архітектурні принципи і схемотехнічні рішення, на базі яких спроектовано та створено електротехнічний комплекс для вимірювання зміни електричного опору й температури алюмінієвих сплавів в інтервалі від 100 до 1000 °С. Застосування цього комплексу дозволить визначати і використовувати нові інформаційні координати для систем контролю зміни фазового складу металів або сплавів в інтервалі кристалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Деклараційний патент на винахід 60856 А Україна, МПК (2006), G01R 27/02.** Пристрій вимірювання активного, реактивного, повного опорів, активної, реактивної та повної потужностей в електротехнічних системах [Текст] / Зеленков О. А. (UA), Соченко П. С. (UA), Пазюк О. В. (UA), Сидоренко К. М. (UA). — № 2003032356; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.
- [2] **Деклараційний патент на кор. модель 29867 Україна, МПК (2006), G01N 27/02, G01R 27/16.** Спосіб визначення електричного опору ґрунту [Текст] / Василенков В. С. (UA). — № u200711881; заявл. 29.10.2007; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.
- [3] **Зиновьев, В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст]: справочное издание / В. Е. Зиновьев. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
- [4] **Котляревский, Ф. М.** Особенности двухфазной области кристаллизующихся силуминов [Текст] / Ф. М. Котляревский, Г. П. Борисов // Процессы литья. — 2006. — № 1. — С. 22–25.
- [5] **Лившиц, Б. Г.** Физические свойства металлов и сплавов [Текст] / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.
- [6] **Мальцев, И. М.** Лекции по курсу «Материаловедение» [Текст] / И. М. Мальцев. — Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 1995. — 103 с.
- [7] **Микельсон, А. Э.** Электротермическое возбуждение и измерение колебаний в металлах [Текст] / А. Э. Микельсон, З. Д. Черный. — Рига: Знание, 1979. — 151 с.
- [8] **Оно, А.** Загвердевание металлов [Текст] / А. Оно. — М.: Металлургия, 1980. — 152 с.
- [9] **Полищук, В. П.** Магнитодинамические насосы для жидких металлов [Текст] / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн. — К.: Наукова думка, 1989. — 78 с.
- [10] Температурные измерения [Текст]: справочник; под ред. О. А. Герашенко. — К.: Наукова думка, 1989. — 704 с.
- [11] **Яворский, Б. М.** Справочник по физике [Текст] / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М.: Наука, 1990. — 624 с.