

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Канаев Амангельды Токешевич

д-р техн. наук, профессор

Жусин Бейбут Тлеубаевич

канд. техн. наук, доцент

Канаев Нурлан Амангельдиевич

инженер-электронщик

Алибаева Асия Анваровна

магистр, старший преподаватель

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина

г. Астана, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЛАТУНЕЙ И БРОНЗ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

Аннотация: методом импульсного нагрева электрическим током длительностью 50–100 мкс получены экспериментальные данные для непрерывной зависимости электросопротивления от энтальпии для латуней и бронз, начиная от исходного твердого ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и кончая жидким состоянием. Обнаружено падение электросопротивления жидкой латуни сразу после ее расплавления при концентрации цинка в сплаве более 30%. Это явление приводит к перераспределению тока по сечению и неоднородному нагреванию таких расплавов и цинковой пульсации. Указана необходимость учета цинковой пульсации при плавке цинко-содержащих сплавов и подборе огнеупорных материалов для изготовления футеровки, поскольку она отрицательно сказывается не только на производительности печи, но и на окислении и качестве отливок.

Ключевые слова: электросопротивление, энтальпия, теплота плавления, импульсный нагрев, джоулево тепло, цинковая пульсация, осциллограмма.

В связи с бурным развитием мощной импульсной техники и использования высококонцентрированных источников энергии (плазменная дуга, лазерный

и электронный пучки и их взаимодействия с металлами и сплавами) актуальными становятся исследования свойств металлических материалов при экстремальных параметрах – сверхвысоких скоростях нагрева и охлаждения, высоких температурах и давлении.

Создание моделей поведения материалов при экстремальных условиях, которые могут быть просчитаны на ЭВМ, практически невозможно без привязки их к некоторым экспериментально измеренным параметрам. Измерить же эти параметры при экстремальных условиях с использованием стандартных стационарных методов не удастся. Поэтому единственной возможностью является исследование поведения материалов при высоких температурах и давлении, в частности, измерение электросопротивления при импульсном нагревании металла.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств металлических материалов в области высоких температур и давлении имеет также большое теоретическое и практическое значение. Новые данные о свойствах металлов и сплавов в этой слабоизученной области важны для развития теории конденсированного состояния (в том числе, теории жидких металлов) [1; 2].

Возможности экспериментального исследования металлических материалов могут быть значительно расширены за счет использования импульсного нагревания электрическим током большой плотности ($j = 10^6 - 10^7 \text{ А/см}^2$). В частности, исследование теплофизических свойств при быстром импульсном нагревании позволяет получать новые сведения о металлах и сплавах в двух направлениях: во-первых, удастся получить характеристики состояния материалов с большими значениями введенной энергии, недоступных для стационарных условий; во-вторых, на всех стадиях эксперимента имеется возможность выявлять те свойства металла, которые заметны только при быстрых процессах и не могут быть непосредственно обнаружены в стационарных условиях.

Следует также отметить, что современные технологии плазменного упрочнения, характеризуются сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения ($10^3 - 10^6 \text{ К/с}$) и кратковременностью воздействия ($10^{-6} - 10^{-3} \text{ с}$) на металл и по-

этому особое значение приобретают неравновесные и нестационарные процессы. При этом желаемые физико-механические свойства достигаются не в результате равновесных фазовых превращений, а благодаря формированию тех или иных метастабильных структурных составляющих, так как фазовые превращения протекают в условиях, далеких от равновесия, что сильно влияют на процессы кристаллизации и структурообразования в твердом состоянии [3].

Измерение введенной энергии и электросопротивления сплавов проводили на проволочных образцах в процессе их импульсного нагрева электрическим током большой плотности. Использовали проволоку диаметром $2a = 0,1-0,2$ мм, плотность тока в импульсе составляла $j = i / \pi a^2 = I * 10^6 - S * 10^6 A / \text{см}^2$ при длительности $\tau = 10^{-4} - 10^{-5}$ с. За счет быстрого введения джоулева тепла W и малой длительности эксперимента исключаются трудности, характерные для высокотемпературных измерений в стационарных условиях. Так, можно пренебречь испарением с поверхности проводника и всеми тепловыми потерями, а также загрязнением металла вследствие взаимодействия с окружающей средой. Кроме того, расплавившийся проводник во время эксперимента не успевает изменить свою первоначальную форму, поэтому можно обходиться без тигля, что важно, поскольку при высокой температуре жидкие металлы активно взаимодействуют с его стенками.

Преимуществом импульсной методики является однородность нагрева исследуемого образца. При импульсном нагреве результаты, полученные для образца в целом, можно отнести к его массе. Для проволоки диаметром $2a = 0,1-0,2$ мм однородный нагрев в широком интервале температур жидкого состояния соблюдается при плотности тока $j = S * 10^6 - I * 10^7 A / \text{см}^2$.

Для исследования в твердом состоянии плотность тока j может быть значительно меньше, поскольку металл не растекается и требуется возможность пренебречь потерями энергии. На рисунке 1 приведена схема получения импульсного тока $i(t)$ [1; 4].

Импульс нагревающего тока, имеющий приблизительно прямоугольную форму, создавался при разряде батарей конденсаторов (заряженной до высокого

напряжения) через балластные сопротивления и эталонное сопротивление r , включенное последовательно с образцом. Во время эксперимента записывали осциллограммы напряжения $V_R(t)$ на проволоке и $V_r(t)$ на эталонном сопротивлении r (осциллограмма тока).

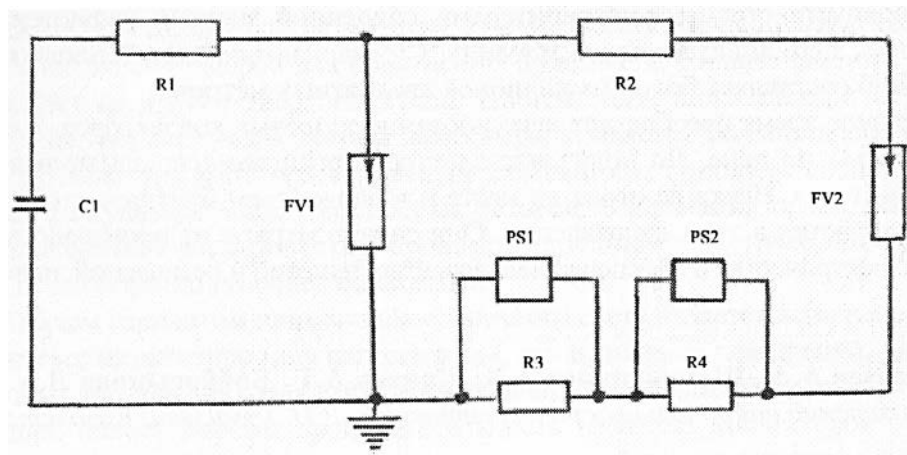


Рис. 1. Схема получения импульсного тока $I(t)$.

$C1$ – конденсатор; $R1, R2$ – балластные сопротивления;
 $FV1; FV2$ – разрядники; $R3$ – сопротивление проводника;
 $R4$ – эталонное сопротивление; $PS1, PS2$ – осциллографы.

По осциллограммам измеряли сопротивление R Проволоки в различные моменты времени t и поступившее в нее джоулево тепло W .

$$R(t) = V_R(t) / V_r(t); \quad (1)$$

$$W(t) = 1 / r S_0^t V_R V_r dt. \quad (2)$$

Если исключить время t , то по этим данным можно найти зависимость R от W .

Теплоту плавления материала определяли из условия

$$\Delta W = 1 / r S_{0^{1-2}} V_R V_r dt, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 моменты начала и окончания плавления проволоки, фиксированные по точкам перегиба осциллограммы $V_R(t)$, появляющиеся вследствие соответствующих изменений зависимости R от t . Для некоторых металлов и сплавов такие перегибы не наблюдаются. В таких случаях температуры начала и окончания плавления определялись по осциллограммам свечения поверхности проволоки, регистрируемого с помощью фотоприемника.

Следует отметить, что для проволочного датчика массой M введенная удельная энергия $\omega(t) = W(t)/M$ (джоулево тепло) идет на увеличение внутренней энергии и работу расширения при неизменном внешнем давлении (1 атм). Таким образом, в данном эксперименте в отсутствии тепловых потерь удельная энергия ω фактически равна энтальпии металла, отсчитываемой от уровня комнатных температур: $H - H_{293}$.

Поскольку при быстром нагревании процессы диффузии в металлах и сплавах могут не завершиться, то, возможно, что величины R и W , найденные импульсным методом, будут отличаться от соответствующих результатов стационарных экспериментов. Поэтому результаты импульсных измерений R и W следует проконтролировать по результатам надежных стационарных измерений. Такой контроль проводили для латуней Л80, Л68 и Л63 и некоторых марок бронз.

Таблица 1

Экспериментальные результаты электросопротивления для латуней и бронз

№ образца	Сплав	$P_0 \cdot 10^8$, Ом м	$P_{мс} \cdot 10^8$, Ом м	$H_m - H_{293}$, кДж/кг	$P_{жс} \cdot 10^8$, Ом м	$H_{жс} - H_{293}$, кДж/кг	ΔH , кДж/кг
2	Л80	5,32	15,0	452	29,7	648	196
3	Л68	6,26	16,7	427	36,1	610	183
4	Л63	6,55	17,1	410	39,0	600	190
5	Бр ОЦ 4-3	8,10	17,0	450	28,9	653	203
6	БрБ2	10,50	20,0	435	36,5	624	189
7	Бр ОФ 6,5-0,15	16,70	25,7	420	38,5	600	180
8	Бр КМц 3-1	31,00	38,1	430	55,2	630	200
9	МНМц 3-12	49,00	46,2	438	48,7	621	183
10	Бр Х 0,4	1,80	10,9	518	20,3	728	210
11	Бр XNb 0,4 -0,13	1,76	10,8	473	20,3	693	-

На рисунке 2 представлено приведенное электросопротивление $P_0 = R S_0 / l_0$ сплавов 5–9 (табл. 1) в зависимости от энтальпии $H - H_{293}$. При однородном состоянии образца получение удельной энтальпии и удельной теплоты плавления по измеренным значениям введенных энергий особых трудностей не вызывает. Сложнее обстоит дело с удельным сопротивлением:

$$P_0 = \pi a_0^2(t) R(t) / l(t), \quad (4)$$

для определения которого требуется измерение не только сопротивления проволоки $R(t)$, но еще измерение ее расширения по радиусу $a(t)$ и по длине $l(t)$. Однако

помимо удельного электросопротивления самостоятельный интерес представляет приведенное электросопротивление:

$$P_0(t) = a_0^2 R(t) / l_0(t), \quad (5)$$

т.е. значение $R(t)$, отнесенное к исходным размерам проволоки a_0 и l_0 .

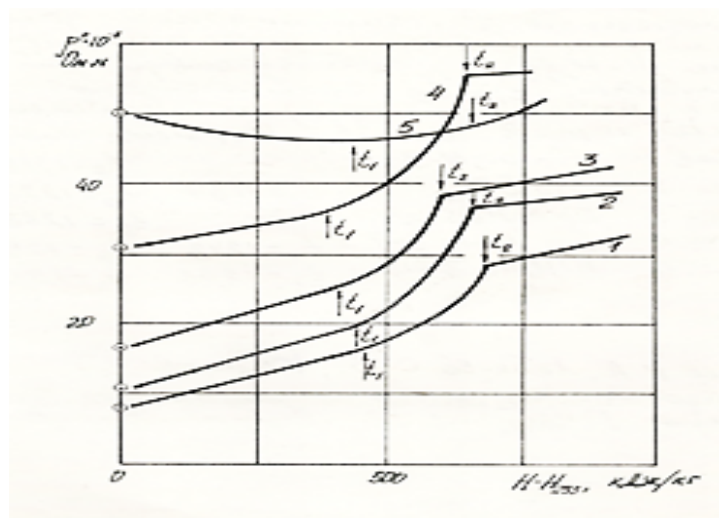


Рис. 2. Приведенное электросопротивление $P_0 = R S_0 / l_0$ сплавов 5–9
в зависимости от энтальпии $H_{ж} - H_{293}$

Приведенное сопротивление $P_0(t)$ и его зависимость от энтальпии H позволяют получить информацию о сопротивлении проводника в процессе его нагревания и связанного с этим расширения. Такие данные об электросопротивлении, отнесенные к исходным размерам, для некоторых металлов приводятся в работе [5].

Различие удельного ρ и приведенного ρ_0 электросопротивлений особенно существенно выше температуры плавления, где превышение ρ над ρ_0 в жидком состоянии может достигать 10%. Следует иметь в виду, что при быстром нагревании соотношение между приведенным $\rho_0(t)$ и удельным $\rho(t)$ сопротивлениями проволоки до и после ее плавления несколько различаются. В твердом состоянии расширение поликристаллической проволоки в направлении ее радиуса a и в направлении длины l происходит по одному и тому же закону $a(t)/a_0 = l(t)/l_0$. В этом случае при неизменной массе проволоки $M = \pi a^2 l(t) \gamma(t)$ имеем

$$\rho(t) = \rho_0(t) [\gamma_0 / \gamma(t)]^{1/3}, \quad (6)$$

где γ_0 и $\gamma(t)$ – плотность в твердом состоянии в момент начала нагревания и в момент t . В жидком состоянии при достаточно быстром нагревании проволоки малого диаметра расширяется только по радиусу a , а ее длина l не изменяется.

В этом случае при неизменных l и M получаем

$$\rho(t) = \rho_0(t)\gamma(t_2)/\gamma(t), \quad (7)$$

где t_2 – момент окончания плавления и начала нагревания в жидком состоянии, $t > t_2$.

Из данных авторов для зависимостей приведенного электросопротивления

$P_0 = R S_0 / l_0$ от энтальпии $H - H_{293}$ для латуней и бронз (рис. 1) хорошо видны достоинства импульсной методики.

Экспериментальные результаты получены для всех фазовых состояний в едином процессе нагревания каждого образца, начиная от комнатной температуры $H - H_{293} = 0$ и кончая жидким состоянием. Следует отметить то, что импульсный эксперимент выполняется на одном и том же образце при одной и той же калибровке, приводит к большой точности относительных измерений. Отметим, что полученные в импульсе значения электросопротивления в самом начале нагревания, т.е. там, где точность измерения наихудшая, близки к результатам измерений авторами начальных электросопротивлений ρ_0 тех же сплавов стационарным методом (св. точки на рис. 1 при значении $H - H_{293} = 0$).

Для латуней точки начала и окончания плавления отчетливо видны на осциллограммах V_R . Для исследованных бронз БрБ2, Бр ОФ 6,5-0,15, Бр КМц 3-1 перегибы на кривых электросопротивления (напряжения V_R) в начале отсутствуют, а для манганина МНМц 3-12 такой перегиб отсутствует также и при окончании плавления. В этих случаях регистрация плавления производилась по свечению поверхности проволоки с помощью фото умножителей. Обращает внимание существенное отличие зависимости $\rho_0 (H - H_{293})$ для медно-никелевого сплава МНМц 3-12 от всех других исследованных сплавов. Авторы [7] также отмечают необычное изменение электросопротивления некоторых сплавов, содержащих в своем составе переходные металлы, что предположительно связы-

вают внутрикристаллической неоднородностью твердого раствора. Такое предположение подтверждается рентгеновским анализом твердых растворов, содержащих переходные элементы. Из данных рентгеновского анализа следует, что величина межатомных расстояний заметно колеблется и эти колебания можно объяснить неравномерным распределением атомов-компонентов в кристалле.

Известно, что при плавке латуней в электропечах канального типа происходит так называемая цинковая пульсация – временное прекращение нагревающего сплав тока. Это нежелательное явление возникает тогда, когда весь металл в ванне расплавится и его температура достигнет 1000 °С и более, т.е. превысит температуру кипения цинка. В результате цинк бурно испаряется, образуя большую массу пузырьков. В результате уменьшается эффективное сечение канала и возрастают плотность тока в нем соответственно и электродинамические силы сжатия. Металл в канале будет прижат и ток прервется [6].

Все это снижает производительность печи и стойкость футеровки. По [6] цинковая пульсация наблюдается в сплавах с большой концентрацией цинка ($\geq 20\%$). В данной работе именно для сплавов с большим содержанием цинка ($> 30\%$) наблюдается падение ρ_0 с увеличением энтальпии. Это приводит к перераспределению тока по сечению проводника: в более нагретых участках латуни, характеризующихся более низким значением ρ_0 , выделяется большая мощность. Это способствует еще более интенсивному повышению температуры этих участков и увеличению парообразования цинка.

Перераспределение тока по сечению канала за счет падающего электросопротивления для латуней в жидком состоянии может играть важную роль в возникновении цинковой пульсации для сплавов с большим содержанием цинка.

Выводы

1. Методом импульсного нагрева электрическим током длительностью 50–100 мкс получены экспериментальные данные для непрерывной зависимости электросопротивления от энтальпии для латуней и бронз, начиная от исходного твердого ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и кончая жидким состоянием.

2. Показано возрастание приведенного электросопротивления $P_0 = R S_0 / l_0$ исследованных латуней и бронз в зависимости от энтальпии $H_{ж} - H_{293}$ с перегибом при температурах окончания плавления этих сплавов. Установлено, что для медно-никелевого сплава МНМц 3–12 з перегиб на кривой $\rho_0 - (H - H_{293})$ в отличие от латуней и бронз отсутствует, что может быть связано с внутрикристаллической неоднородностью твердого раствора.

3. Обнаружено падение электросопротивления латуни Л63 сразу после ее расплавления, что может привести к перераспределению тока по сечению металла, вызывая неоднородное нагревание расплава и цинковую пульсацию.

4. Указана необходимость учета цинковой пульсации при плавке цинкосодержащих сплавов и подборе огнеупорных материалов для изготовления футеровки, поскольку она отрицательно сказывается не только на производительности печи, но и на окислении и качестве отливок.

Список литературы

1. Канаев Н.А. Энтальпия и электросопротивление меди и ее сплавов в процессе быстрого нагрева электрическим током большой плотности / Н.А. Канаев, С.В. Лебедев, А.Т. Канаев А.Т. // Известия Вузов. Серия «Черная металлургия». – 1998. – №2. – С. 36–39.

2. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 173 с.

3. Балановский А.Е., Токмаков В.П., Петухов А.В. и др. Фазовые превращения в феррито-перлитных сталях при плазменном нагреве. Известия вузов. Серия Черная металлургия, 1993. – №9. – С. 28–36.

4. Лебедев С.В. Металлы в процессе быстрого нагрева электрическим током большой плотности / С.В. Лебедев, А.И. Савватимский. – УФН, 1984. – Т. 144. – №2. – 215 с.

5. Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоин. – М.: Атомиздат, 1976.

6. Фарбман С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1988, 703 с.

7. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. – М.: Металлургия, 1990, 319 с.