

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

В. И. Цапков

**Фазовые переходы и тепловое излучение
металлов и сплавов в условиях
больших скоростей нагрева**

Монография

Утверждено редакционно-издательским советом
Академии ГПС МЧС России

Москва
2018

УДК 536:669.01
ББК 22.317+34.2
Ц17

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор
С. В. Пузач

Доктор технических наук, доцент
А. Л. Холостов

Цапков В. И.

Ц17 Фазовые переходы и тепловое излучение металлов и сплавов
в условиях больших скоростей нагрева: Монография. — М. :
Академия ГПС МЧС России, 2018. — 161 с.

При больших скоростях нагрева (до 10^7 К/с) исследованы фазовые превращения в восьми переходных металлах (никель, ниобий, тантал, молибден, вольфрам, родий, иридий, платина); в четырех редкоземельных металлах (гадолиний, гольмий, иттрий, скандий); в шести сплавах на основе меди, никеля и железа; в одиннадцати сплавах на основе вольфрама, молибдена и ниобия. Выявлены особенности теплового излучения перечисленных металлов и сплавов в области фазовых переходов при больших скоростях нагрева. Проведены оценки некоторых параметров металлов в окрестности точки плавления.

Издание предназначено для научных сотрудников АГПС МЧС России, адъюнктов, соискателей и курсантов.

Издано в авторской редакции.

УДК 536:669.01
ББК 22.317+34.2

© Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В ядерной энергетике, ракетной и космической технике, противопожарной технике, высокотемпературной химической технологии и других областях техники и технологии широко используются тугоплавкие металлы и сплавы. Все тугоплавкие металлы относятся к переходными элементами. Сплавы являются основой современной техники и технического прогресса, так как по своим параметрам значительно превосходят чистые металлы.

Физические свойства тугоплавких металлов и сплавов в области фазовых переходов исследованы мало. Это объясняется серьезными экспериментальными трудностями, которые в основном вызваны большой величиной и нелинейным характером теплообмена излучением, учесть или исключить который очень сложно при использовании традиционных стационарных методов исследования.

В связи с этим обращает на себя внимание метод нагревания образцов одиночным импульсом тока большой плотности. При этом проводящий образец нагревается одиночным мощным импульсом тока длительностью не более 500 мкс, а для регистрации процесса нагрева применяется метод импульсной осциллографии. Скорость нагрева при этом может достигать 10^7 К/с и более.

Экспериментальное изучение тепло- и электрофизических свойств металлов и сплавов при нагревании электрическим током большой плотности имеет важное значение ввиду широкого применения быстропротекающих и импульсных процессов. В условиях быстрого нагревания исследования проводятся в двух основных направлениях: измерение равновесных свойств преимущественно в той области температур, которые трудно достижимы при стационарных условиях нагревания; исследование неравновесных эффектов, обусловленных быстрым нагреванием. Последнее представляет, по-видимому, большой интерес для физики твердого и жидкого состояний.

В связи с этим получение экспериментальных данных о неравновесных свойствах вещества представляет самостоятельную задачу. Так, например, существующие теории плавления не дают однозначного ответа относительно природы теплового эффекта при переходе вещества из твердого состояния в жидкое и механизма плавления, поэтому необходимы экспериментальные данные о параметрах плавления, полученные не только в условиях стационарного нагрева, но и при импульсном нагреве.

В монографии изложены результаты исследований высокотемпературных фазовых переходов переходных металлов и некоторых их сплавов в условиях больших скоростей нагрева (порядка 10^7 К/с). Подавляющая часть приведенных в книге экспериментальных данных получена автором

на кафедре физики Московского государственного университета прикладной биотехнологии (МГУПБ). В эксперименте на различных его этапах вместе с автором принимали участие сотрудники кафедры физики МГУПБ Анурин В. О., Римский Н. Н., Костышева У. В. Автор данной монографии был у них научным руководителем в процессе работы над кандидатскими диссертациями.

В работе на основе установленных автором взаимосвязей между отдельными свойствами металлов проведены оценки их ряда параметров в окрестности точки плавления, предложена модель уравнения состояния металлов в твердой фазе и оценены параметры этого уравнения для большинства металлов.

1. О МЕТОДЕ НАГРЕВАНИЯ ОБРАЗЦА ОДИНОЧНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

1.1. Общие сведения о методе

Метод нагрева образца одиночным импульсом тока большой плотности иногда называется методом взрывающейся проволоочки. В этом методе одновременно с током $I(t)$, проходящим через образец, с помощью двухлучевого осциллографа регистрируется и падение напряжения на образце $U(t)$. По этим данным рассчитываются зависимости электросопротивления $R(t)$ и вложенной энергии $E(t)$ от времени t , а также электросопротивления от энергии.

Расчет производят по формулам [1]:

$$\frac{R(t)}{R_0} = \frac{U(t) - L \frac{dI(t)}{dt}}{R_0 \cdot I(t)}, \quad (1.1)$$

$$E(t) = \frac{1}{m} \left[\int_0^t I(t)U(t)dt - 0,5LI^2(t) \right], \quad (1.2)$$

где R_0 — электросопротивление образца при температуре 298 К, L — индуктивность образца, m — его масса.

Кроме электросопротивления и энергии, можно одновременно измерять ряд других физических величин (например, интенсивность теплового излучения).

При использовании классических методов для высокотемпературных измерений обычно твердый металл нагревается в течение сравнительно длительного времени, за которое успевает произойти заметная реакция образца с окружающей средой, что неизбежно приводит к искажению результатов измерений. Помещение образца в вакуум или в атмосферу инертного газа не всегда может исправить положение, что видно на примере таких металлов как титан, цирконий, гафний. Кроме того, образец будет неизбежно реагировать с материалом сосуда, в котором он находится.

В монографии М. М. Мартынюка (1999 г.) [2] приводится краткий обзор исследований теплофизических свойств металлов и фазовых переходов методом нагрева одиночным импульсом тока как в нашей стране (ИВТ РАН, Российский университет дружбы народов), так и за рубежом: Национальная Ливерморская лаборатория им. Лоуренса (США), Университет

г. Киль (Германия), Институт экспериментальной физики технического университета г. Грац (Австрия). Этот обзор охватывает период до 1998 г.

По проблеме исследований теплофизических свойств веществ методом импульсного нагрева, начиная с 1988 года, регулярно проводились международные конференции под названием «Субсекундная теплофизика»: Гейтерсбург, 1988 (США), Турин, 1990 (Италия), Грац, 1992 (Австрия), Кельн, 1995 (Германия), Экс-ан-Прованс, 1998 (Франция) [2].

Приведем краткий обзор работ после 1998 г. В работе [3] (1999 г.) исследовались теплофизические свойства жидкого вольфрама. Образцы представляли собой проволоочки длиной 5 мм и диаметром 0,2 мм. Нагрев осуществлялся путем разряда высоковольтного конденсатора емкостью 0,35 мкФ. Время нагрева составляло 0,1-0,2 мкс. Температура измерялась оптическим пирометром, который калибровался по точке плавления.

В последние годы (с 1999 г. по настоящее время) большая работа по применению импульсного метода к исследованию теплофизических характеристик тугоплавких материалов (цирконий, графит, гафний, вольфрам) проводится в ИВТ РАН А. И. Савватимским и В. Н. Коробенко [4-13] (микросекундная длительность импульсов для исследования жидкого состояния) и В. Э. Пелецким [14, 15] (миллисекундная длительность импульсов для исследования полиморфных переходов).

Существуют два варианта метода взрывающейся проволоочки. В одном из них импульс тока получается посредством разряда батареи высоковольтных конденсаторов на проводящий образец, а в другом варианте — в результате разряда на образец формирующей линии, представляющей собой ряд ячеек, каждая из которых содержит катушку индуктивности и конденсатор. Последний вариант методики был разработан В. И. Цапковым и М. М. Мартынюком [16, 17]. Были выбраны оптимальная форма импульса тока (пологий фронт и плоская вершина) и длительность импульса (порядка 100-500 мкс). Такие параметры импульса позволяют резко уменьшить искажения импульса напряжения на образце за счет индуктивных наводок, пренебречь скин-эффектом. Одновременно с этим при такой длительности импульса можно пренебречь тепловым и химическим взаимодействием нагретого образца с окружающей средой и опыты можно проводить в воздухе при атмосферном давлении. Кроме того, в этом случае образец не успевает разрушиться в процессе плавления и наблюдается заход в область жидкого состояния.

Существенная особенность этой методики состоит в том, что исследуемые зависимости регистрируются не по точкам, а в виде непрерывной кривой. Каждый образец и каждый импульс дают всю кривую нагрева, на которой фиксируются начало и конец плавления и тем самым выделяются области твердого и жидкого состояния, а также двухфазная область.

Непрерывность записи позволяет выполнять достаточно точные относительные измерения и достоверно фиксировать малые по величине особенности изменения исследуемых характеристик.

Методом взрывающихся проволочек с применением искусственной формирующей линии в ряде работ, например, [16-18] для ряда тугоплавких металлов и сплавов была получена зависимость электросопротивления от энергии, впервые измерены теплота плавления, вложенная энергия и удельное электросопротивление в начале и в конце плавления.

1.2. Исследование особенностей физических свойств металлических проводников при импульсном нагреве

В работе Л. А. Игнатъевой и С. Г. Калашникова [19] сообщалось, что в процессе измерения зависимости электросопротивления R Pt и W от введенной в них энергии E при плотности тока свыше 10^8 А/м² обнаружена зависимость R от скорости нагрева, однако в работе В. В. Бондаренко с соавторами [20] этот эффект не был подтвержден и показано, что кажущаяся зависимость в [19] является следствием индуктивных наводок. Это лишний раз подчеркивает сложность импульсных измерений при больших плотностях тока.

В работах группы М. М. Мартынюка [18, 21] обнаружено смещение вправо точки начала плавления (перегрев) свинца на аномально большую величину (43°C). Относительная величина смещения здесь незначительно выходит за уровень погрешности измерений и обработки данных. В работе А. М. Искольдского с соавторами [22] зафиксировано подобное смещение в опытах с медными проволочками.

В монографии М. М. Мартынюка [2] сообщалось, что при скорости нагрева 10^6 – 10^7 К/с перегрев твердой фазы выше равновесной точки плавления на несколько десятков градусов автором наблюдался для Pb, In, Ga, Bi, Ag, Zn, Ni и Pt.

В работах М. М. Мартынюка и В. И. Цапкова [2, 18] наблюдался перегрев α -фазы титана и циркония соответственно на 90 К и 160 К при скорости нагрева 10^7 К/с, что более чем на порядок превышает значения, полученные раньше В. Н. Гридневым [23-25] при скоростях нагрева 10^3 – 10^4 К/с.

В экспериментальных работах С. В. Лебедева и сотрудников [26-31] было обнаружено, что в условиях импульсного нагрева ($dT/dt \approx 5 \cdot 10^8$ К/с) теплоемкость W, Mo, Ta и Nb в твердом состоянии существенно превысила соответствующие равновесные данные в области температур $0,9T_{пл} < T < T_{пл}$. При более низких температурах результаты измерения теплоемкости совпали с равновесными. Измерение температуры проводилось

с использованием нескольких методик: по модели абсолютно черного тела; по зависимости электросопротивления от температуры для стационарного случая; по свечению поверхности образцов.

Такое поведение высокотемпературной теплоемкости, согласно С. В. Лебедеву [27], можно объяснить неравновесными точечными дефектами. Известно, что в установлении равновесной концентрации точечных дефектов кристаллической решетки существенную роль играет их диффузия (механизм Шоттки). Поэтому при достаточно быстром нагревании, когда диффузия еще не успевает проявиться, можно ожидать неравновесной концентрации дефектов. Предположение о таком неравновесном состоянии металла было сделано С. В. Лебедевым [27] и при попытке объяснить «аномальную эмиссию» электронов, наблюдавшуюся им вблизи точки плавления при быстром нагревании металла током большой плотности [29].

В. И. Цапков [32] обнаружил более быстрое по сравнению с медленным нагревом увеличение теплоемкости (большее значение производной от теплоемкости по температуре) у Mo, W, Nb и Ta при скорости нагрева 10^7 К/с в области температур $0,9T_{пл} \leq T \leq T_{пл}$. Для объяснения полученных результатов выдвигалось предположение об образовании дефектов по Френкелю в условиях больших скоростей нагрева. Следует заметить, что точность определения теплоемкости при этом была невелика, так как последняя находилась путем дифференцирования зависимости сопротивления от вложенной энергии с привлечением литературных данных зависимостей температурного коэффициента сопротивления и сопротивления от температуры, полученных в условиях стационарного нагрева. Отметим, что в настоящее время нет однозначного толкования физических причин аномального поведения теплоемкости тугоплавких металлов вблизи точки плавления в условиях больших скоростей нагрева.

В работе Б. С. Бокштейна с соавторами [33] обнаружена зависимость теплоемкости от скорости нагрева для твердых свинца и алюминия вблизи точки плавления. Этот эффект объяснялся запаздыванием установления равновесной концентрации вакансий в образце при достаточно большой скорости нагрева.

Вермий (L. Vermij) [34] в результате своих экспериментов пришел к выводу, что процесс плавления серебряных проволочек при их нагреве импульсами тока длительностью 100 мкс является неизотермическим.

При исследовании теплового излучения проводников в условиях импульсного нагрева также был обнаружен ряд аномалий. Цезайрлиан (A. Cezairliyan) и соавторы при нагреве полосок ниобия [35] и молибдена [36] импульсами тока длительностью 0,05 - 1 с установили, что в начале плавления интенсивность теплового излучения повышается, а затем быстро уменьшается до постоянного уровня. Аналогичная закономерность была обнаружена у железа [37] и ванадия [38].

С. В. Лебедев и сотрудники [39] исследовали особенности излучения W, Au, Pt и Ir в области плавления при нагреве импульсом тока плотностью 10^{10} А/м²; скорость нагрева при этом достигала 10^7 - 10^8 К/с. Для металлов с чистой поверхностью в области плавления наблюдался монотонный рост интенсивности излучения.

В. И. Цапков и В. О. Анулин [40] изучали закономерности теплового излучения в области фазовых переходов редкоземельных металлов, никеля, меди, кристаллических сплавов (константан, манганин, ферронихром, копель, алюмель), аморфных сплавов на основе меди при импульсном нагреве со скоростью 10^7 К/с.

В работе В. И. Цапкова и Н. Н. Римского [1] исследовались особенности теплового излучения сплавов на основе вольфрама, молибдена и ниобия в твердом состоянии и в области плавления при нагреве одиночным импульсом тока со скоростью 10^7 К/с.

1.3. О проблемах методики эксперимента в условиях больших скоростей нагрева импульсом тока

Многие проблемы методики эксперимента в условиях больших скоростей нагрева одиночным импульсом тока не решены. Сюда относится проблема измерения быстроменяющихся высоких температур. В этих случаях температура определяется оптическим пирометром, который дает некоторую условную температуру поверхности образца, для перерасчета которой в истинную температуру поверхности необходима информация как об излучательной способности металлического образца, что само по себе является непростой задачей. Обычно в этих случаях делается предположение о постоянстве спектральной излучательной способности ϵ в широком интервале температур, что ведет к большим погрешностям, т. к. ϵ зависит от температуры. Кроме того, накладываются жесткие требования на точность определения эффективной длины волны $\lambda_{\text{эф}}$ в случае яркостного пирометра.

Для монохроматизации излучения в настоящее время обычно используют интерференционные светофильтры из-за их довольно узкой полосы пропускания (полуширина пропускания порядка 15-20 нм при максимуме пропускания от 600 нм до 900 нм). Однако, этим светофильтрам свойствен очень крупный недостаток (который часто не учитывается), заключающийся в резкой зависимости длины волны, соответствующей максимуму пропускания $\lambda_{\text{макс}}$, от угла падения излучения. Проблему не решает и помещение фильтра в параллельный пучок света, так как малейшее отклонение фильтра от вертикали приведет к весьма существенному изменению $\lambda_{\text{макс}}$, а следовательно и $\lambda_{\text{эф}}$ пирометра.

В последнее время для регистрации тока через образец, падения напряжения на нем и сигнала пирометра применяются цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО), а в качестве датчиков коротких мощных импульсов тока используется пояс Роговского (см., например, работы Савватимского А. И. и Коробенко В. Н.)

Однако следует иметь в виду, что применение ЦЗО не всегда приводит к повышению точности измерений в условиях коротких мощных импульсов тока (длительность единицы мкс, амплитуда свыше 10 кА), используемых в экспериментах. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Аналоговые осциллографы, построенные на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), в которых исследуемый сигнал после предварительного усиления подается непосредственно на отклоняющие электроды ЭЛТ, имеют ряд преимуществ (ЦЗО): Легко работать с неизвестным сигналом. Нет необходимости знать частоту и форму сигнала, чтобы корректно отобразить его на экране. Корректное отображение сигнала на высоких частотах. У цифровых осциллографов восстановление формы сигнала на краю частотного диапазона происходит всего по нескольким точкам на период, (когда частота дискретизации ненамного превосходит частоту измеряемого сигнала), что неизбежно приводит к ошибкам. Аналоговый осциллограф свободен от этой проблемы.

Высокая скорость обновления экрана аналогового осциллографа – от 200000 до 1000000 осциллограмм в секунду гарантирует адекватное и полное отображение сигнала. В аналоговом осциллографе практически вся информация, поступающая на входы осциллографа (за исключением времени обратного хода луча ЭЛТ) захватывается и попадает на экран, участвуя в построении осциллограммы, т. е. прибор отображает почти всю информацию о форме сигнала в режиме реального времени, тогда как в обычном ЦЗО время обработки собранного буфера памяти занимает до 99% всего времени, в течение которого входной сигнал не регистрируется и не отображается. Это искажает отображение сложных модулированных быстроменяющихся сигналов и существенно замедляет поиск редких случайных аномалий, по которым невозможно настроить схему запуска. От этой проблемы аналоговые осциллографы также избавлены.

Более высокое разрешение по вертикали и отношение сигнал/шум. ЦЗО имеют, как правило, 8-битовое разрешение по вертикали — 256 уровней (что может наблюдаться при увеличении выбранного участка осциллограммы в режиме ZOOM в виде ступенек на осциллограмме), тогда как аналоговые приборы не имеют этого ограничения. Шум младшего разряда 8-битового АЦП в ЦЗО также вносит существенный вклад в шумовой фон прибора, ухудшая его эффективную разрядность и реальное вертикальное разрешение. Поэтому аналоговые осциллографы, как правило, имеют

лучшие параметры по шуму, чем цифровые. Аналоговые осциллографы за счет послесвечения экрана ЭЛТ дают пользователю яркостную информацию о повторяемости того или иного участка осциллограммы в периодическом сигнале. Тогда как обычные ЦЗО имеют одинаковую насыщенность любого участка осциллограммы. Сюда следует также добавить, что ЦЗО (особенно широкополосные с высокой чувствительностью) также не решают проблемы наводок на измерительный контур, возникающих при больших скоростях изменения килоамперных токов через исследуемый образец. Для иллюстрации некоторых положений изложенного приведем осциллограммы, получаемые исследователями на одном из лучших и дорогих ЦЗО TDS 640A, TDS 754C (рисунки 1.1 и 1.2).

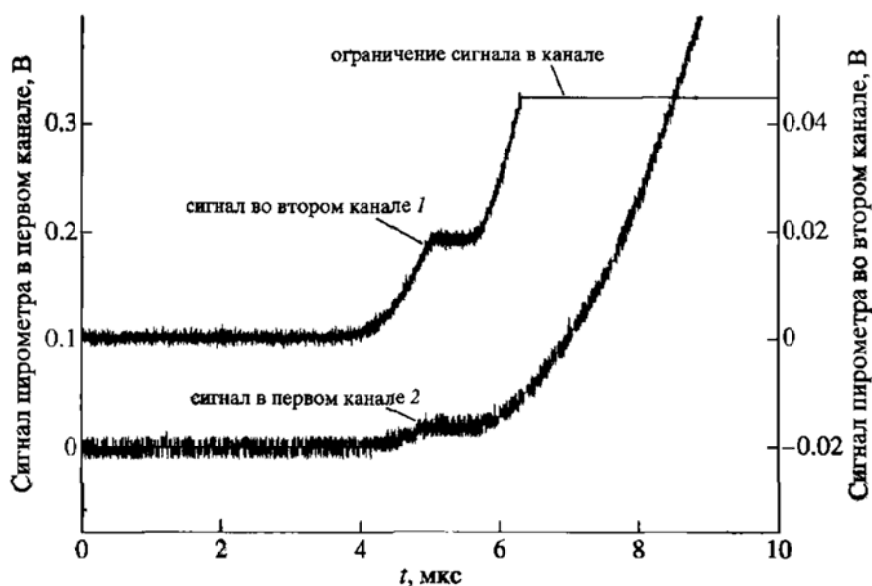


Рис. 1.1. (Займствован из [4]). Сигналы импульсного пирометра, зафиксированные цифровым запоминающим осциллографом TDS 754C

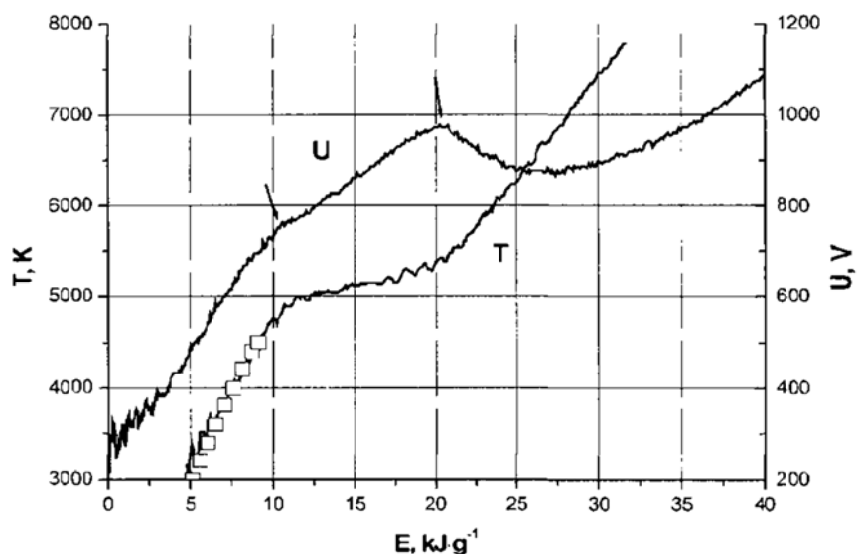


Рис. 1.2. (Займствован из [8]). Зависимости температуры и напряжения на образце графита от вложенной энергии; время нагрева 1,5 мкс

Рассмотрим теперь недостатки пояса Роговского. Как известно, при малых длительностях импульса происходит сильное искажение формы регистрируемого сигнала [41], что приводит к существенным погрешностям.

При вычислении сопротивления образца и вложенной энергии в соответствии с формулами 1.1 и 1.2 нужно знать индуктивность L образца. Индуктивная составляющая падения напряжения на образце $U_L(t) = L(di/dt)$. Как правило, исследователи полагают, что $L = \text{const}$. Однако это не так, так как в процессе нагрева образец расширяется и его индуктивность изменяется с течением времени. Поэтому $U_L(t)$ должна определяться по формуле $U_L(t) = L(di/dt) + I(dL/dt)$.

Индуктивность образцов в виде проволочек и полосок легко вычисляется. Если образец имеет сложную конфигурацию (как, например, в работах Савватимского А. И. и Коробенко В. Н. использовались образцы в виде клинообразной модели абсолютно черного тела), то вклад индуктивного члена в электросопротивление и энергию учесть практически невозможно. Кроме того, при малых длительностях импульсов (порядка единиц микросекунд) погрешность сильно возрастает за счет больших скоростей изменения тока и индуктивности. С учетом всего изложенного выше следует заметить, что реальная погрешность измерений электросопротивления и энергии в экспериментах Савватимского А. И. и Коробенко В. Н. может выражаться десятками процентов, а не единицами, как это утверждают авторы.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Импульсная установка для исследования зависимости электросопротивления проводников от введенной энергии

Для исследования зависимости электросопротивления сплавов от введенной энергии при импульсном нагреве была использована установка, аналогичная той, которая описана в [1]. Принципиальная схема установки изображена на рис. 2.1.

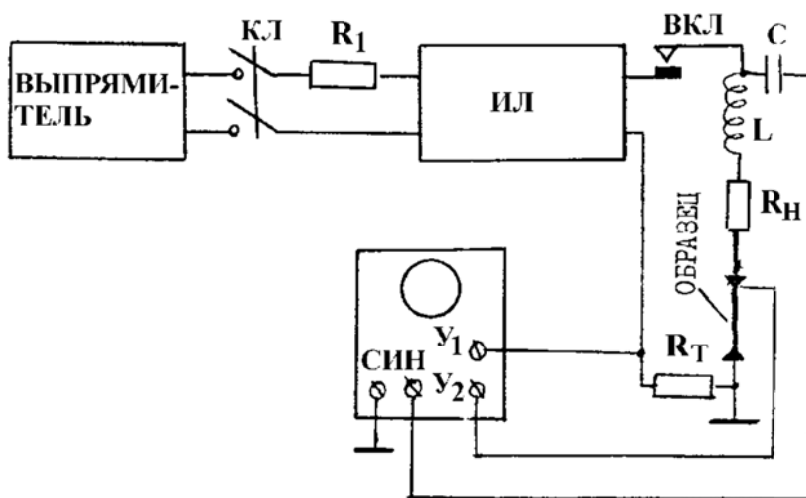


Рис. 2.1. Функциональная схема импульсной установки

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. О МЕТОДЕ НАГРЕВАНИЯ ОБРАЗЦА ОДИНОЧНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ.....	5
1.1. Общие сведения о методе	5
1.2. Исследование особенностей физических свойств металлических проводников при импульсном нагреве	7
1.3. О проблемах методики эксперимента в условиях больших скоростей нагрева импульсом тока	9
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	12
2.1. Импульсная установка для исследования зависимости электросопротивления проводников от введенной энергии.....	12
2.2. Методика получения и обработки осциллограмм	14
2.3. Фотоприемник для регистрации теплового излучения	14
2.4. Факторы, влияющие на результаты импульсных измерений электросопротивления и энергии	15
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	16
3.1. Результаты опробования методики импульсных измерений на образцах никеля.....	16
3.2. Фазовые переходы в <i>d</i> - переходных металлах в условиях импульсного нагрева	20
3.3. Температурная зависимость введенной энергии и теплоемкости <i>d</i> - переходных металлов при импульсном нагреве.....	28
3.4. Фазовые переходы в редкоземельных металлах в условиях импульсного нагрева	30
3.5. Фазовые переходы в сплавах на основе вольфрама, молибдена и ниобия в условиях импульсного нагрева	34
3.5.1. Сплавы вольфрам-рений	34
3.5.2. Сплавы вольфрам-молибден.....	39
3.5.3. Сплавы ниобий-титан	43
3.5.4. Сплав молибден-рений	44
3.5.5. Экспериментальные данные параметров плавления сплавов на основе вольфрама, молибдена и ниобия	46
3.6. Фазовые переходы в сплавах на основе меди, никеля и железа в условиях импульсного нагрева	47
3.6.1. Сплавы на основе меди и никеля	47
3.6.2. Сплав на основе железа.....	50
3.7. Зависимость электросопротивления аморфных сплавов от энтальпии	52
3.7.1. Общие сведения об аморфных сплавах	52

3.7.2. Зависимость электросопротивления аморфного сплава на основе меди от энтальпии	52
3.7.3. Зависимость электросопротивления аморфного сплава на основе кобальта от энтальпии	54
3.8. Тепловое излучение металлов и сплавов в области фазовых переходов	55
3.8.1. Редкоземельные металлы, никель и сплавы на основе меди, никеля и железа	55
3.8.2. Сплавы на основе вольфрама, молибдена и ниобия.....	61
4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	64
4.1. Анализ энтальпии переходных металлов	64
4.2. Параметры плавления переходных металлов и электронная структура их атомов	66
4.3. Параметры плавления редкоземельных металлов.....	80
4.3.1. Электросопротивление и энтальпия РЗМ.....	80
4.3.2. Изменение внутреннего давления при плавлении РЗМ и оценка барического коэффициента электросопротивления	83
4.3.3. О неприменимости формулы Мотта к плавлению РЗМ	84
4.3.4. Связь между энтальпией РЗМ и их теплотой Плавления.....	85
4.4. Анализ данных для сплавов	86
5. ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ПЛАВЛЕНИЯ	91
5.1. Энергия образования вакансий.....	91
5.2. Изменение объема при плавлении металлов.....	98
5.3. Термический коэффициент устойчивости металлов.....	103
5.4. Энергия поверхности раздела между твердой и жидкой фазой металлов	113
5.5. Оценка площади поверхности Ферми переходных металлов вблизи точки плавления.....	119
6. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ И ОЦЕНКА ЕГО ПАРАМЕТРОВ	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
ЛИТЕРАТУРА	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Зависимость относительного электросопротивления металлов и сплавов от энтальпии	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Литературные данные зависимости $H(T)$	155

Научное издание

ЦАПКОВ Виктор Иванович

Фазовые переходы и тепловое излучение
металлов и сплавов в условиях
больших скоростей нагрева

Монография

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 26.02.2018. Формат 60×90¹/₁₆.

Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 7,3. Бумага офсетная.

Тираж 500 экз. Заказ 57

Академия ГПС МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4