

УДК 536:669.01

ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ Ta И W ОТ ТОЧКИ ПЛАВЛЕНИЯ ДО 7000 К ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ТОКОМ

© 2021 г. А. И. Савватимский^{1, 2, *}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Физический институт РАН, Москва, Россия

*E-mail: savvatimskiy.alexander@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Представлены экспериментальные данные о теплоте плавления 12 металлов и их электросопротивлении в точке плавления (полученные ранее) с акцентом на результаты для Ta и W. Проведено сопоставление с расчетными работами для W. Рассмотрены результаты нового эксперимента при быстром нагреве током фольг данных металлов с целью исследовать жидкое состояние до максимально возможных температур. За время нагрева фольг (5 мкс), погруженных в воду, измерены теплоемкость C_p и электросопротивление R (отнесенное к исходным размерам образца). Построены зависимости C_p и R от температуры от 2000 до ~ 7000 К.

DOI: 10.31857/S0040364421050173

ВВЕДЕНИЕ

Метод быстрого нагрева током для исследования свойств металлов при плавлении был предложен и реализован С.В. Лебедевым [1] в ФИАНе еще в 1954 г. Издатели известного четырехтомника [2], посвященного импульсному нагреву металлов, называли его “пионером исследования электро-взрыва проводников”. Использование методики импульсного нагрева позволило получить данные о физических свойствах металлов [3], карбидов [4–6] и углерода [7] до самых высоких температур (5000–8000 К), недостижимых при стационарном исследовании.

Начиная с 1971–1973 гг., в ряде публикаций группы С.В. Лебедева были продемонстрированы возможности измерения свойств тугоплавких металлов в области плавления при импульсном нагреве током (таблица). В частности, были получены свойства Ta и W в области плавления (таблица).

Обобщение результатов первого этапа исследования металлов при быстром нагревании электрическим током, выполненных в ОИВТ РАН, изложены в обзоре [12].

После первых серьезных успехов группы С.В. Лебедева по развитию импульсного нагрева экспериментаторы США также взяли на вооружение импульсный (микросекундный) метод нагрева электрическим током для исследования высокотемпературных свойств металлов [13]. Результаты [13] соответствовали данным для равновесных состояний. Появляющиеся иногда рос-

сийские публикации о “перегреве” металлов в точке плавления при микросекундном нагреве связаны с некачественными экспериментами [14] или безосновательными предположениями [15]. Например, в аннотации работы [15] говорится: “Приводится оценка скоростей нагревания импульсным методом, при которых наступает перегрев начала плавления металлов...” Под фактом перегрева авторами [15] понимается расчетный метод. Для доказательства отсутствия такого перегрева (по температуре) был выполнен отдельный импульсный эксперимент [16] при микросекундном нагреве танталовой фольги с измерением ее температуры по модели черного тела. В [16] показано, что температурное плато при плавлении металлов на зависимостях $T(t)$, полученных при быстром импульсном нагреве, могут служить основой для построения температурной шкалы при $T > T_{пл}$. Для построения температурной шкалы была использована температура плавления фольги тантала (полученная ранее на модели образца в виде модели черного тела), равная $T_{пл} = 3240$ К [16]. По справочным данным температура плавления чистого тантала – 3265–3290 К. Перегрева тантала при микросекундном нагреве в [16] не обнаружено. Температура плавления Ta при таком быстром (микросекундном) нагреве остается равной равновесному значению. При этом регистрируемый некоторый избыток энергии перед началом плавления (около 5% от введенной к началу плавления энтальпии) идет не на рост температуры

Экспериментальные результаты для металлов в точке плавления

Металл	Содержание основного вещества, %	Начальная плотность, г/см ³	Теплота плавления ΔH , Дж/г	Γ -моль для металла, г	ΔH , кДж/моль	Случайная погрешность ΔH , %	$\rho_{\text{тв}}$, мкОм м (отнесено к начальным размерам)	$\rho_{\text{ж}}$, мкОм м (отнесено к начальным размерам)	Источник
Au	99.9	19.3	70	196.97	13.79	3	0.13	0.29	[8]
Ni	Ni + Co – 99.5	8.85	318	58.7	18.67	3	0.61	0.82	[9]
Pt	Марка Пл-1 99.95	21.4	128	195.1	24.97	4	0.63	0.94	[9]
Rh	99.9	12.4	257	102.91	26.45	3	0.61	0.85	[10]
Ir	99.9	22.4	200	192.22	38.44	3	0.70	0.92	[8]
Fe	C – 0.1	7.9	244	55.85	13.63	6	1.30	1.34	[9]
Nb	99.7; Ta – 0.2	8.57	297	92.9	27.59	3	0.95	1.08	[10]
Mo	99.96	10.4	415	95.94	39.82	2	0.80	0.95	[9]
Ta	98.8	16.5	202	180.95	36.55	6	1.14	1.26	[9]
W	99.95	19.3	299	183.9	54.99	2	1.17	1.27	[9]
Zr	Йодидный Zr	6.54	153	91.2	13.95	4	1.32	1.39	[3]
Hf	ГФЭ-1 ([Zr] = 0.14 мас. %)	13.28 (перед отжигом), 13.09 (после)	90	178.5	16.06	4	р практически не изменяется при плавлении; $\gamma_{\text{тв}} = 12.0$, $\gamma_{\text{ж}} = 11.63$ г/см ³		[3, 11]

плавления, а поглощается решеткой. Последнее приводит к повышенной теплоемкости твердой фазы вблизи начала плавления, которая регистрируется при быстром нагреве как для металлов, так и для карбидов и углерода. Предполагается, что причина крутого роста C_p перед плавлением (при быстром нагреве) заключается в возникновении неравновесных точечных дефектов Френкеля в условиях невозможности насытить плавящуюся решетку равновесными вакансиями при коротком времени нагрева. Более детально этот вопрос изложен в [17].

Конечной целью работы, начатой данной публикацией, является определение возможностей импульсного нагрева для достижения максимальных температур жидких металлов и их соединений при импульсном нагреве в изолирующих жидкостях, в частности в воде. В дальнейшем планируется исследовать электросопротивление и теплоемкость (совместно с МИСиС) высокоэнтропийных смешанных соединений металлов IV и V групп таблицы Менделеева, включающих, в частности, Ta и W, например TiTaNbZrW. На данный момент есть только однократный опыт исследования смешанного соединения металлов (Ni–Cr–Al–Re–Hf–Y), которое плавилось в диапазоне температур от 1670 до 2050 К и нагревалось в жидком состоянии вплоть до 4000 К [18]. Причем температура начала плавления данного сплава при импульсном нагреве совпала с известным результатом при стационарном нагреве. Можно надеяться, что опыт исследования жидких Ta и W и полученные результаты (до температур порядка 7000 К) окажутся полезными при дальнейшем исследовании высокоэнтропийных сплавов в жидком состоянии при высоких температурах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТАНТАЛА

В данной работе методом нагрева импульсом тока исследовался тантал высокой чистоты (ТВЧ) в виде фольги толщиной 49 мкм. Подробное описание методики импульсного нагрева металлов током приведено в [3, 12]. Температура измерялась при регистрации излучения с поверхности фольг пирометром на основе быстродействующего фотодетектора PDA-10A (Thorlabs). Калибровка пирометра выполнялась по температурной лампе до $T = 2500$ К, выше – расчет по формуле Планка с учетом величины излучающей способности вещества. Для исключения возникновения шунтирующего разряда вдоль образца (при высоком напряжении на нем) нагрев выполнялся при размещении фольги в дегазированной воде. Над поверхностью образца высота уровня воды ~ 4 мм. Напряжение на батарее конденсаторов (4 шт. ИКМ50-3) составляло 8 кВ (балластное сопротивление контура $R_6 = 0.3$ Ом).

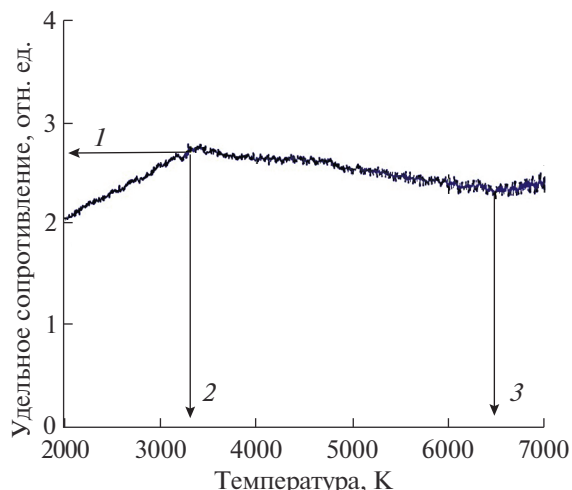


Рис. 1. Относительное электросопротивление тантала в зависимости от температуры (для Ta, согласно таблице): 1 – начало жидкого состояния, 1.26 мкОм м; 2 – $T_{пл} = 3300$ К; 3 – 6500 К, предполагаемое самое начало поверхностного кипения тантала.

На рис. 1 представлена зависимость электросопротивления (отнесенного к исходным размерам) тантала от температуры. Размеры образца: ширина – 4 мм, длина – 13.7 мм. Следует отметить, что наиболее достоверно момент плавления металла высокой чистоты может быть определен по изменению электросопротивления ρ в точке плавления – по резкому изменению хода кривой электросопротивления, для Ta $T_{пл} \sim 3300$ К. Как правило, в эксперименте одновременно фиксируется и температура плавления при регистрации поверхностного излучения фольги (температурная полка при плавлении). Справочные данные (видимо, расчетные) для $T_{кипения}$ тантала – 5730 К. Можно предположить, что в авторских условиях быстрого нагрева давление на поверхности фольги может быть несколько выше 1 атм., что смещает температуру кипения к большим значениям.

На рис. 2 представлена температурная зависимость теплоемкости Ta для твердого и жидкого состояний.

Электросопротивление – объемное свойство, и некоторое возмущение внутри объема (например, образование микропузырьков) регистрируется при прохождении тока (рассеяние электронов на дефектных областях с пузырьками). В то же время для теплоемкости это может регистрироваться слабо (видно только легкое дрожание сигнала теплоемкости при температурах 6500–7000 К), поскольку затраты энергии на образование малых поверхностных пузырьков незначительны.

Обратим внимание на то, что теплоемкость твердой фазы C_p при 2000 К (т.е. задолго до начала плавления) равна 0.15 Дж/(г К), а в области жидкого

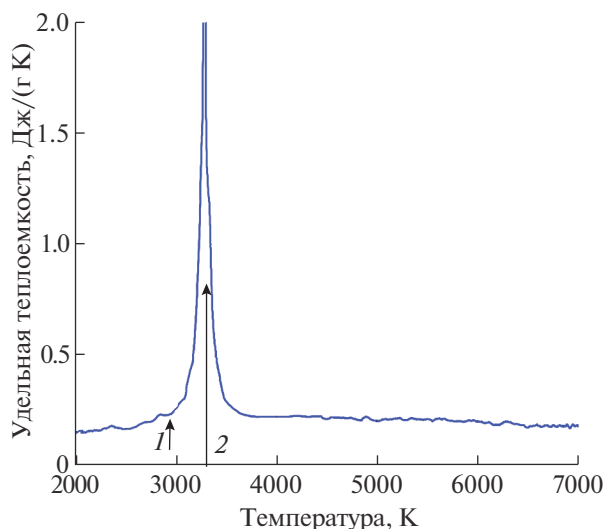


Рис. 2. Удельная теплоемкость Та марки ТВЧ в твердом и жидком состояниях (быстрый нагрев в кипящей воде): 1 – начало крутого роста теплоемкости до начала плавления, 2 – температура плавления 3300 К.

состояния (4000–6000 К) – несколько выше и составляет ~ 0.2 Дж/(г К). Это обусловлено тем, что исходный тантал – высокой чистоты, не имеет примесей и, по-видимому, избыточных дефектов. В то же время вещества со значительным количеством примесей и исходных дефектов (например, неотожженные карбиды [6, 19]) при импульсном нагреве демонстрируют большую теплоемкость для твердой фазы и меньшую для жидкого состояния.

Температура нормального кипения тантала (по справочным данным) ~ 5730 К (возможно, это расчетные данные). Если эти данные надежны, то отсутствие признаков кипения на рис. 2 при этой температуре может иметь причиной несколько повышенное давление воды вблизи фольги, которое сдвигает точку кипения тантала к более высокой температуре.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬФРАМА

На рис. 3 представлена зависимость электропроводности вольфрама от температуры при быстром нагреве фольги в дегазированной воде.

Теплоемкость жидкого вольфрама, измеренная тем же способом, не зависит от температуры (рис. 4).

На рис. 4 показана зависимость теплоемкости вольфрама от температуры, полученная при быстром нагреве электрическим током фольги вольфрама в воде.

Наблюдаемое снижение теплоемкости вблизи температуры 7000 К можно интерпретировать, как поглощение излучения в парах вскипающей воды.

Напомним, что теплоемкости жидких циркония и гафния после плавления имеют растущий

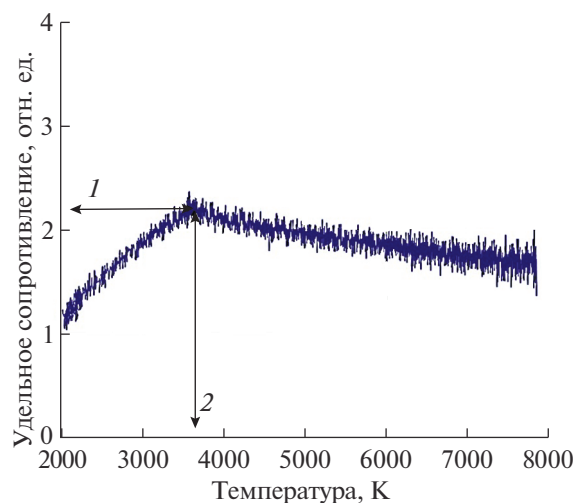


Рис. 3. Электропроводность вольфрама (отнесенное к исходным размерам образца) в зависимости от температуры; калибровка ординаты в начале жидкого состояния (3650 К) согласно таблице – 1.27 мкОм м; 1 – электропроводность в начале жидкого состояния, 2 – температура плавления 3650 К.

характер с ростом температуры [3]. В отличие от них теплоемкости жидких тантала (рис. 2) и вольфрама (рис. 4), измеренные тем же способом при быстром нагреве, – константы вплоть до самых высоких температур.

На рис. 5 приведены результаты [19] для области плавления и жидкого состояния вольфрама, опубликованные с 1984 по 2003 гг. [21–24]. Область плавления представлена температурным плато.

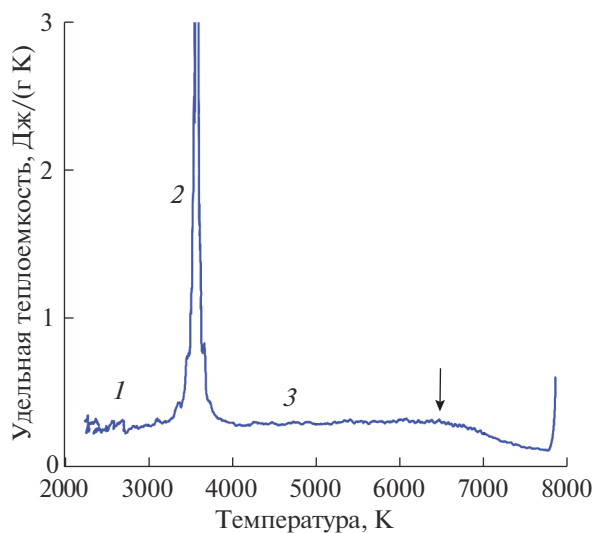


Рис. 4. Теплоемкость твердого и жидкого вольфрама при импульсном нагреве в воде: стрелка – момент начала снижения измеряемой теплоемкости; 1 – твердая фаза; 2 – плавление, 3650 К; 3 – жидкая фаза.

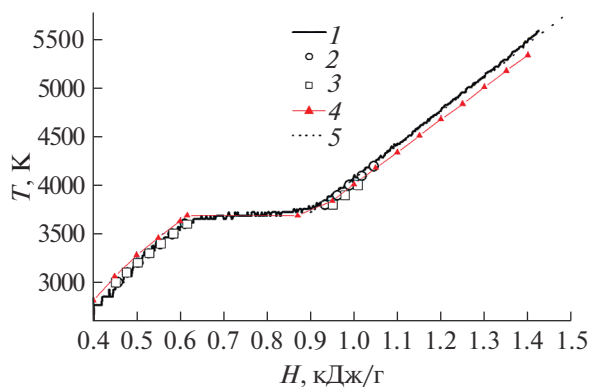


Рис. 5. Зависимость [20] температуры от удельной энтальпии H для твердого и жидкого вольфрама: 1 – экспериментальные данные, полученные с помощью клиновидной двухполосной модели черного тела [20]; 2 – экспериментальные данные [22], по излучению поверхности проволочного образца в предположении постоянства излучательной способности, нагрев электрическим током за 1 мс в аргоне под давлением 2 кбар; 3 – левитационный нагрев [23]; 4 – экспериментальные данные [24] по излучению поверхности проволочного образца в предположении постоянства излучательной способности, нагрев электрическим током за 100 мкс в аргоне под давлением 2 кбар; 5 – эксперимент [21] (импульсный токовый нагрев).

В расчетной работе [25] приводятся данные для твердого и жидкого вольфрама (рис. 6). На рис. 6 не показаны экспериментальные данные для W [20] 2003 г., хотя обе работы выполнены в одном и том же институте: эксперимент [20] – в 2003 г., а расчет [25] – в 2018 г.

Теплота плавления вольфрама ΔH на рис. 6 равна 0.25 кДж/г (расчет [25] без указания погрешности), тогда как эксперимент (таблица) показывает для вольфрама $\Delta H = 0.300$ кДж/г (со случайной погрешностью 2%). При этом в [9] (таблица) теплота плавления W определялась осреднением данных 15–20 отдельных экспериментов с регистрацией в каждом эксперименте начала и окончания плавления (по светимости поверхности образца на фотодатчике), поэтому столь мала случайная погрешность – 2%. Систематическая погрешность составила 8%. Суммарная погрешность измерения теплоты плавления вольфрама в таблице не превышает 10%. В этот диапазон не попадает значение теплоты плавления вольфрама, рассчитанное в [25] (250 Дж/г).

Справедливости ради нужно отметить, что расчетные данные [25] для зависимости энтальпии жидкого вольфрама от температуры близки к надежно измеренным экспериментальным данным [20] (рис. 6) и [21] (рис. 7).

В последнее время в научной литературе в целом (как в нашей стране, так и за рубежом) наблюдается переход от прямых измерений к расчет-

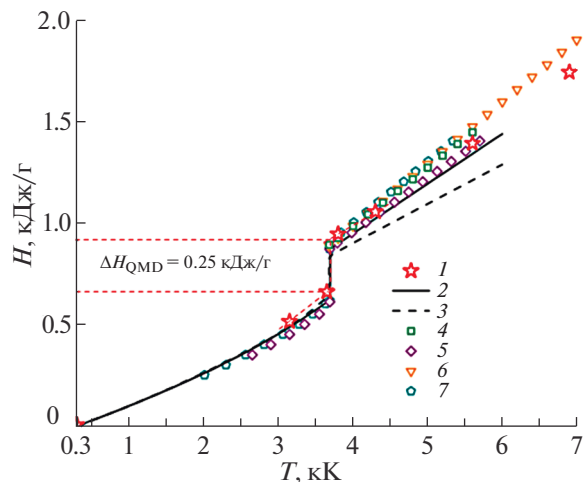


Рис. 6. Зависимость энтальпии вольфрама от температуры по данным [25]; 1 – результаты данной работы, 2 – ИВТАНТЕРМО, 3 – NIST, 4 – [26], 5 – [27], 6 – [21], 7 – [24].

ным методам. Успешное применение расчетных методов для получения свойств веществ должно быть сопряжено с экспериментальной проверкой результатов хотя бы в ключевых точках, что не всегда соблюдается, как видно на примере теплоты плавления вольфрама. Еще один яркий пример. Первые расчеты критической точки вольфрама давали величину 21000 К [28]. Затем она была снижена до 16000 К в расчетной работе [29] и, наконец, около 12000 К в расчетной работе, основанной на первопринципных методах [25]. Экспериментальный метод импульсного нагрева током позволяет достичь желаемых температур исследования (10000–12000 К). И он может применяться также

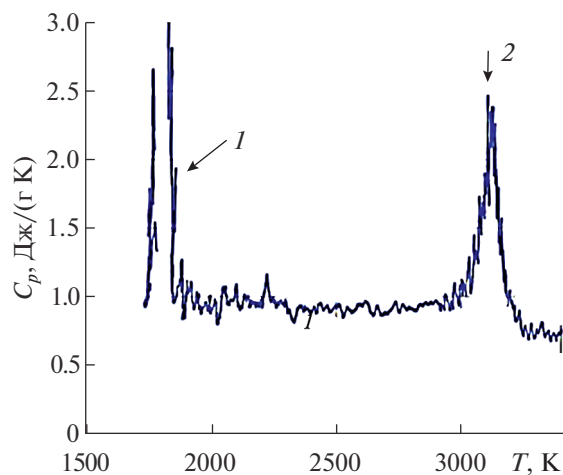


Рис. 7. Зависимость [32] удельной теплоемкости C_p от температуры для чистого железа: 1 – область плавления, 2 – кипение при ~ 3100 К и давлении, близком к нормальному.

для определения параметров критических точек, в случае разработки надежного и простого способа измерения давления при быстром нагреве.

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ТОКОМ ДЛЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОЕМКОСТИ

Погрешность измерения ρ в точке плавления (таблица) составляла порядка $\pm 3\%$ для большинства металлов. При импульсном нагреве током погрешность для ρ в точке плавления проверялась прямым сопоставлением результата контрольного импульсного измерения ρ для образца с заранее известным сопротивлением. Эти контрольные эксперименты позволили заключить, что погрешность измерения ρ в области плавления для всех металлов не превышала $\pm 3\%$. Для температур выше точки плавления погрешность составляла $\pm 5\%$ (без учета теплового расширения).

Погрешность измерения температуры T для области плавления равна ± 80 К; для температур ~ 4000 К — ± 100 К; для температур ~ 7000 К — порядка ± 200 К. Подробно методика измерения температуры T при быстром нагреве током изложена в [30].

Погрешность измерения теплоемкости C_p , как производной от энтальпии по температуре $C_p = (dH/dT)$, включает погрешность измерения энтальпии H ($\pm 8\%$) и температуры T ($\pm 2\%$) при $T \approx 4000$ К. К этому добавляется погрешность, связанная с неизвестной излучательной способностью ϵ для жидкого состояния. Как правило, она принимается равной значению для твердого состояния вблизи плавления. Поэтому суммарная погрешность определения C_p не превышает 15–20%. Подробно методика измерения теплоемкости C_p при быстром нагреве током изложена в [31]. Это не означает, что экспериментальная оценка температуры кипения металлов по наблюдаемой теплоемкости невозможна. Для однозначного понимания роли регистрации температуры кипения по поведению теплоемкости приведем данные о теплоемкости железа от точки плавления до точки кипения при импульсном нагреве током [32]. В [32] исследовалось железо высокой чистоты 99.99% (производство фирмы Goodfellow-metals). Результат типичного эксперимента, проведенного с помощью клиновидной модели черного тела, представлен на рис. 7. Эксперимент с железом выполнен в воде. Давление окружающей среды близко к 1 атм. Поглощение излучения слоем воды практически отсутствовало. Судя по постоянному наклону зависимости энтальпии от температуры для жидкой фазы, полученной в эксперименте [32], теплоемкость C_p жидкого железа должна быть постоянной. Действительно, постоянство теплоем-

кости ($C_p \approx 0.9$ Дж/(г К)) наблюдается во всем диапазоне температур (рис. 7) вплоть до температуры кипения при атмосферном давлении (стрелка 2). Падение теплоемкости после пика 2 до наиболее низких значений, возможно, связано с поглощением излучения кипящей поверхностью и с изменением излучательной способности, т.е. не отражает истинную теплоемкость и температуру. Этот вопрос подробно не исследовался. Плавление железа (рис. 7, стрелка 1) происходит при $\sim 1800 \pm 30$ К, что согласуется со справочными данными. Кипение железа при $T \approx 3100$ К (стрелка 2 на рис. 7) соответствует равновесной температуре кипения железа при атмосферном давлении (3135 К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы начаты исследования нового класса сплавов, названных высокоэнтропийными сплавами. В отличие от классических сплавов, имеющих элемент-основу и легирующие элементы, высокоэнтропийные сплавы содержат значительное количество элементов (от 5 до 12–15), вводимых в равных долях. В этих сплавах за счет большой степени беспорядка и большой величины конфигурационной энтропии идет преимущественное формирование твердого раствора на базе кристаллических решеток ОЦК или ГЦК [33]. Высокая термодинамическая стабильность таких сплавов, высокая тугоплавкость и коррозионная стойкость привлекательны для создания эффективной тепловой защиты в атомной энергетике и космической отрасли. Можно ожидать, что эксперименты с импульсным нагревом током помогут расширить знания в исследовании высокоэнтропийных веществ на основе смешанных соединений нескольких металлов, в том числе нескольких карбидов. Данная статья — это первый этап исследований смешанных соединений карбидов, включающих такие металлы, как Та и W.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-79-30086 (руководитель — Г.А. Месяц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенин В.М., Бункин Ф.В., Карлов Н.В., Кириллин В.А., Пятаевский Л.П., Прохоров А.М., Рухадзе А.А., Савватимский А.И., Фортков В.Е., Шейндрин А.Е. Памяти Сергея Владимировича Лебедева // УФН. 1991. Т. 161. № 3. С. 181.
2. Chase W.G., Moore H.K. Exploding Wires. Plenum Press, 1959–1968. V. 1–4.
3. Савватимский А.И., Коробенко В.Н. Высокотемпературные свойства металлов атомной энергетики (цирконий, гафний и железо при плавлении и в жидком состоянии). М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 216 с.
4. Kondratyev A., Muboyajan S., Onufriev S., Savvatimskiy A. The Application of the Fast Pulse Heating Method for Investigation of Carbon-rich Side of Zr–C Phase Dia-

- gram under High Temperatures // *J. Alloys Compd.* 2015. V. 631. P. 52.
5. *Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Muboyadzhyan S.A.* Thermophysical Properties of the Most Refractory Carbide Ta_{0.8}Hf_{0.2}C under High Temperatures (2000–5000 K) // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2019. V. 39. P. 907.
 6. *Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Valyano G.E., Muboyadzhyan S.A.* Thermophysical Properties for Hafnium Carbide (HfC) Versus Temperature from 2000 to 5000 K (Experiment) // *J. Mater. Sci.* 2020. V. 55. P. 13559.
 7. *Савватимский А.И., Онуфриев С.В.* Исследование физических свойств углерода при высоких температурах (по материалам экспериментальных работ) // *УФН.* 2020. Т. 190. № 10. С. 1085.
 8. *Лебедев С.В., Савватимский А.И., Смирнов Ю.Б.* Измерение теплоты плавления и электросопротивления тугоплавких металлов методом взрыва проводников // *ЖТФ.* 1972. Т. 9. № 8. С. 1752.
 9. *Лебедев С.В., Савватимский А.И., Смирнов Ю.Б.* Измерение теплоты плавления тугоплавких металлов // *ТВТ.* 1971. Т. 9. № 3. С. 635.
 10. *Савватимский А.И.* Теплота плавления и электросопротивление Nb and Rh в точке плавления // *ТВТ.* 1973. Т. 11. № 6. С. 1182.
 11. *Коробенко В.Н., Савватимский А.И.* Плотность жидкого гафния от точки плавления до точки кипения // *ТВТ.* 2007. Т. 45. № 2. С. 187.
 12. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* Металлы в процессе нагревания электрическим током большой плотности // *УФН.* 1984. Т. 144. С. 215.
 13. *Стефенс Г., Ройс С.* Метод измерения равновесных термодинамических характеристик жидких металлов при высоких температурах и давлениях // *Приборы для научных исследований.* 1972. № 12. С. 42.
 14. *Мартынюк М.М., Цапков В.И., Пантелейчук О.Г., Каримходжаев И.* Исследование физических свойств металлов при импульсном нагреве. М.: Ун-т дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1972. 130 с.
 15. *Чеховской В.Я., Пелецкий В.Э.* О релаксации точечных дефектов в металлах // *ТВТ.* 2011. Т. 49. № 1. С. 45.
 16. *Onufriev S.V., Savvatimskiy A.I., Kondratyev A.M.* Tantalum Melting Temperature under Fast (Microseconds) Heating: Overheating is not Found // *High Temp.–High Press.* 2014. V. 43. № 2–3. P. 217.
 17. *Савватимский А.И.* Неравновесные дефекты при импульсном нагреве твердых веществ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 4. С. 414.
 18. *Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Мубояджян С.А., Середкин Н.Н., Колюхов С.А.* Теплофизические свойства многокомпонентного никель-хромового сплава ВСДП-3 при плавлении и в жидкой фазе // *ТВТ.* 2017. Т. 55. № 5. С. 846.
 19. *Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Muboyadzhyan S.A.* Measurement of ZrC Properties up to 5000 K by Fast Electrical Pulse Heating Method // *J. Mater. Res.* 2017. V. 32. № 7. P. 1287.
 20. *Korobenko V.N., Savvatimskiy A.I.* Blackbody Design for High Temperature (1800 to 5500 K) of Metals and Carbon in Liquid States under Fast Heating // *Temp.: Its Meas. Control Sci. Ind. AIP Conf. Proc.* / Ed. D.C. Ripple. Melville, N.Y.: AIP, 2003. V. 7. P. 783.
 21. *Kaschnitz E., Pottlacher G., Windholz L.* High-Pressure, High-Temperature Thermophysical Measurements on Tungsten // *High Press. Res.* 1990. № 4. P. 558.
 22. *Сенченко В.Н.* Энтальпия и теплоемкость графита в окрестности точки плавления. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИВТ РАН, 1987.
 23. *Arpaci E., Frohberg M.G.* Enthalpy Measurements on Solid and Liquid Tungsten by Levitation Calorimetry // *Z. Metallkunde.* 1984. Bd. 75. S. 614.
 24. *Berthault A., Arles L., Matricon J.* High-pressure, High-temperature Thermophysical Measurements on Tantalum and Tungsten // *J. Int. J. Thermophys.* 1986. V. 7. P. 167.
 25. *Minakov D.V., Paramonov M.A., Levashov P.R.* Consistent Interpretation of Experimental Data for Expanded Liquid Tungsten near the Liquid-gas Coexistence Curve // *Phys. Rev. B.* 2018. V. 97. 024205.
 26. *Pottlacher G., Kaschnitz E., Jäger H.* Investigations of Thermophysical Properties of Liquid Metals with a Rapid Resistive Heating Technique // *J. Non-Cryst. Solids.* 1993. V. 156–158. P. 374.
 27. *Hixson R.S., Winkler M.A.* Thermophysical Properties of Solid and Liquid Tungsten // *Int. J. Thermophys.* 1990. V. 11. P. 709.
 28. *Фортвов В.Е., Дремин А.Н., Леонтьев А.А.* Оценка параметров критической точки // *ТВТ.* 1975. Т. 13. № 5. С. 1072.
 29. *Fortov V.E., Lomonosov I.V.* Equations of State of Matter at High Energy Densities // *Open Plasma Phys. J.* 2010. № 3. P. 122.
 30. *Онуфриев С.В.* Измерение температуры веществ при быстром нагреве импульсом тока // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 4. С. 430.
 31. *Онуфриев С.В., Савватимский А.И.* Измерение теплоемкости проводящих веществ в условиях микросекундного нагрева импульсом тока // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 5. С. 704.
 32. *Савватимский А.И., Онуфриев С.В.* Теплоемкость жидкого железа от точки плавления до точки кипения // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 6. С. 953.
 33. *Савченко А.* Энтропийные эффекты в реальных системах. 2015. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=6440>