

УДК 661.883+669-154

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ (ZrC, HfC, TaC + HfC) В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

© 2020 г. А. И. Савватимский^{1, 2, *}, С. В. Онуфриев^{2, **}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: savva@iht.mpei.ac.ru

**E-mail: s-onufriev@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.05.2020 г.

После доработки 15.07.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Методом нагрева импульсом тока (единицы микросекунд) измерено удельное электросопротивление карбида гафния в интервале температур 2000–5000 К. Данные для жидкой фазы получены впервые. Значения удельного электросопротивления рассчитывались по размерам образцов при комнатной температуре (тепловое расширение не учитывалось). Выполнено сравнительное исследование удельного электросопротивления (измеренного тем же методом) тугоплавких карбидов ZrC, HfC, TaC + HfC в широком диапазоне температур (2000–5000 К). Сравниваются зависимости электросопротивления от температуры и от энергии нагрева для образцов, полученных методом искрового плазменного спекания и методом магнетронного напыления.

DOI: 10.31857/S0040364420060186

ВВЕДЕНИЕ

Исследования сверхтугоплавких карбидов с температурой плавления выше 3000 К (карбиды металлов IV, V групп) представляют научный и практический интерес. Актуальность исследования карбидов определяется потребностями авиации, ракетной техники и космонавтики. В частности, сопла современных ракет должны выдерживать температуру порядка 3000–4000 К. При скоростях полета летательных аппаратов с числами Маха порядка 10 высокие требования предъявляются также к покрытиям аэродинамических поверхностей. В ядерной технике защитные оболочки микротвэлов высокотемпературного реактора изготавливаются из слоев карбидов и графита, причем они предназначены для длительной работы при высоких температурах.

Лазерный поверхностный нагрев дает возможность измерять высокие температуры с приемлемой точностью, однако он редко применяется для измерения теплофизических объемных свойств (теплоемкости, электросопротивления и введенной удельной энергии). Импульсный нагрев током позволяет измерять высокие температуры веществ достаточно надежно. Методом быстрого нагрева током можно фиксировать фазовые переходы различного типа в зависимости не только от температуры, но и от введенной энергии (энтальпии). Это наиболее совершенный способ исследования свойств веществ, так как он более ин-

формативен и позволяет получить широкий спектр теплофизических свойств при высоких температурах.

К существующим технологиям получения таких карбидов в последнее время добавились метод искрового плазменного спекания (ИПС) исходных порошков и метод магнетронного напыления слоя карбида. В первом случае размер зерен в образце, как правило, составляет ~1–10 мкм, во втором случае образуется мелкодисперсная структура с размером зерен ~10–100 нм. Эти карбиды имеют кубическую решетку типа NaCl и широкую область гомогенности. Представляет интерес сравнение поведения электросопротивления образцов с различной исходной микроструктурой. Особенно важно учитывать это различие при использовании метода быстрого (микросекундного) нагрева током, который находит все более широкое применение в исследовании свойств веществ как в твердом, так и в жидком состояниях. Здесь необходимо отметить, что вследствие высокой температуры плавления свойства сверхтугоплавких карбидов в области предплавления, плавления и жидкой фазы практически не исследованы. Методы импульсного нагрева током и лазерного нагрева позволяют провести такие исследования.

Впервые область плавления карбидов ZrC и TaC при быстром нагреве током исследовалась в [1, 2]. Образцы карбида ZrC имели плотность

~6.6 г/см³ и содержали 14 мас. % свободного и связанного углерода и 86.2 мас. % циркония, что соответствовало 55.2 ат. % свободного и связанного углерода и 44.7 ат. % Zr ($[C]/[Zr] \approx 1.2$). Измерены электросопротивление и энтальпия карбида в области плавления, измерения температуры не проводились. Удельное электросопротивление ρ спеченного карбида ZrC (отнесенное к исходным размерам образцов) в области плавления составило 320 и 340–350 мкОм см для твердой и жидкой фазы соответственно. Во всей области твердого состояния ρ плавно увеличивалось с ростом энтальпии. Энтальпия в начале плавления равна 2.1 кДж/г (определено по видимой точке излома кривой электросопротивления). Энтальпия при окончании плавления получена с большой погрешностью из-за нестабильности электросопротивления в этой области. Погрешности измерения энтальпии и электросопротивления составили 6 и 4% соответственно.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ КАРБИДОВ

В данной работе применена методика измерений [3]. Образец нагревался до 5000 К за время ~10 мкс путем пропускания импульса тока через образец. Импульс тока длительностью около 20 мкс формировался при разряде конденсаторной батареи. В процессе нагрева с помощью запоминающего осциллографа (Tektronix-3034) фиксировались ток $I(t)$, падение напряжения на образце $U(t)$ и сигнал быстродействующего пирометра, регистрирующего светимость поверхности образца, в зависимости от времени. Удельное электросопротивление рассчитывалось по значениям измеренного сопротивления образца $R = (U - LdI/dt)/I$ (где L — индуктивность образца) и его геометрическим размерам. В силу малой длительности эксперимента можно пренебречь всеми видами тепловых потерь, химическими реакциями с окружающей средой, изменением состава образца. Температура плоского образца определялась по свечению его поверхности с привлечением литературных данных о нормальной спектральной излучатель-

ной способности исследуемого материала или по излучению модели черного тела, изготовленной из этого материала [4]. В настоящей статье все измерения выполнены на плоских образцах.

Исследованы образцы двух типов: полученные методом ИПС и методом магнетронного напыления. Первым методом получены образцы ZrC [5] и HfC, вторым — образцы Ta_{0.8}Hf_{0.2}C [6, 7]. Искровое плазменное спекание предварительно измельченных порошков карбидов выполнялось в графитовых тиглях при температурах 2300–2400 К и давлении 35–45 МПа. Полученные диски диаметром 50 × 4 мм с помощью алмазного инструмента разрезались на пластинки, которые затем шлифовались до получения образцов окончательных размеров (0.1–0.15) × 4 × 15 мм. Для проведения эксперимента пластинка клеивалась между двумя стеклянными пластинами (стекло К8, кварцевое стекло размерами 3.5 × 8 × 15 мм). Такая конструкция ячейки с образцом препятствовала развитию шунтирующего разряда вдоль образца, обеспечивала надежный электрический контакт токоподводов с хрупким образцом и препятствовала испарению образца при высоких температурах.

Полученные методом ИПС мишени диаметром 50 × 4 мм использовались для магнетронного напыления покрытия Ta_{0.81}Hf_{0.19}C_{0.94} толщиной 1 мкм на пластины из стекла К8. Размеры образца в этом случае были 0.001 × 8 × 15 мм. Для проведения эксперимента этот образец покрывался сверху второй стеклянной пластиной.

В таблице даны основные характеристики образцов карбидов в исходном состоянии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ КАРБИДОВ

Карбид циркония ZrC. Температурные зависимости свойств спеченного карбида циркония ZrC исследовались в [5]. Характеристики образцов ZrC приведены в таблице. Температура начала плавления определялась по зависимости введенной удельной энергии (энтальпии) от температуры и составила 3420 К (рис. 1а). Температура

Характеристики образцов карбидов в исходном состоянии

Карбид	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Параметр решетки, нм	Размер зерна, мкм	Способ изготовления
ZrC _x +C, $[C]/[Zr] \approx 1.2$ [1, 2]	~6.6	~1.5	0.4691	0.1	—
ZrC _{0.95} [5]	6.57	~2.4	0.4694	2–15	ИПС
HfC _{0.85}	12.45	~2.0	0.463451	15–20	
Ta _{0.81} Hf _{0.19} C _{0.94} [6, 7] (Ta _{0.8} Hf _{0.2} C)*	13.5	~4	0.450893	0.03–0.07	Магнетронное напыление

* Условное обозначение состава.

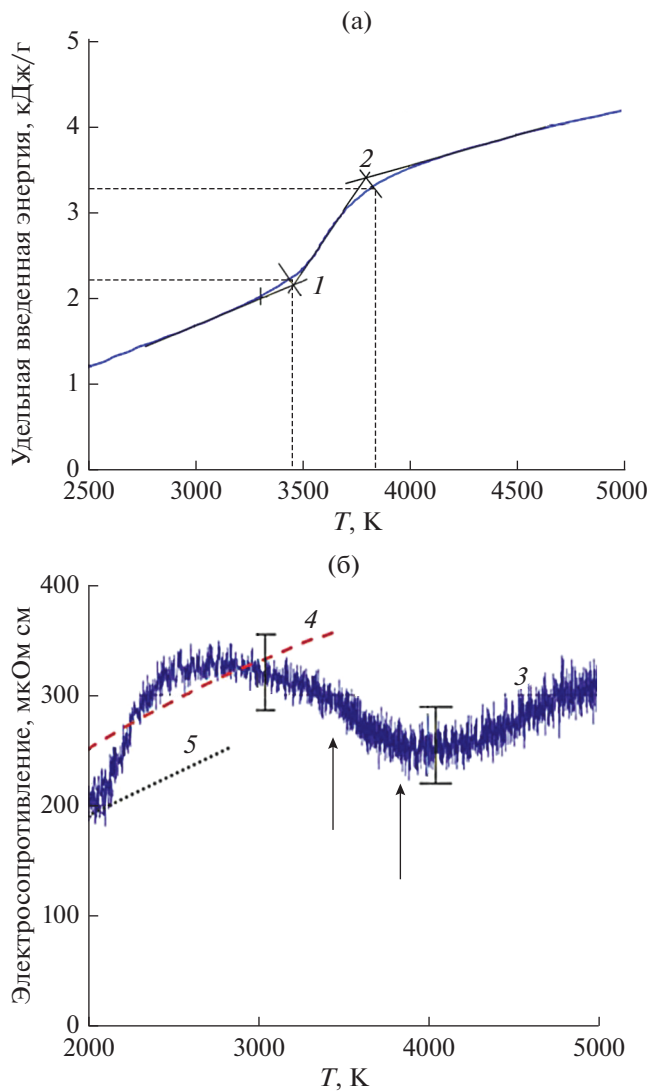


Рис. 1. Зависимость энтальпии (а) спеченного ZrC от температуры: 1, 2 — начало и окончание плавления 3420 и 3840 К [5]; (б) электрического сопротивления: 3 — эксперимент [5], 4 — стационарный эксперимент [8], 5 — пересчитанные к начальным размерам данные [9]; стрелками отмечены начало и окончание плавления, погрешность измерений указана при 3000 и 4000 К.

окончания плавления равна 3840 К (рис. 1а). Область фазового перехода определялась по точкам 1, 2 изменения наклона температурной кривой энтальпии. Электросопротивление при этих температурах составляет (рис. 1б) в начале плавления 290 ± 20 мкОм см и при окончании плавления 250 ± 20 мкОм см. Теплота плавления равна разности энтальпий в области фазового перехода 1.1 кДж/г (рис. 1а).

Из сравнения данных [1, 2] и [5] видно различие скачка электросопротивления в области плавления образцов карбида ZrC примерно одинаковой плотности: 320–340–350 мкОм см в [1, 2]

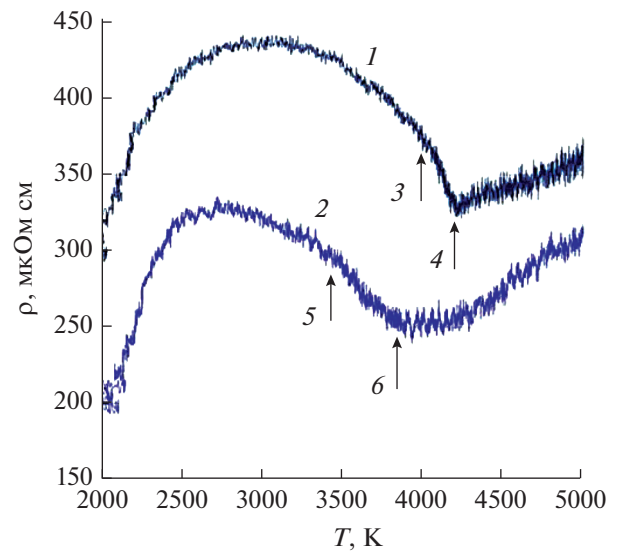


Рис. 2. Электросопротивление карбидов HfC (1) и ZrC (2) в зависимости от температуры: 3, 5 — начало плавления; 4, 6 — окончание плавления.

и 290–250 мкОм см в [5]. Более высокое сопротивление в [1, 2] может быть объяснено присутствием избыточного углерода в образцах (см. таблицу). Причины, по которым в образцах [5] наблюдается отрицательный скачок сопротивления при плавлении, обсуждаются ниже.

Известно [10], что электросопротивление монокристаллического ZrC (при 3000 К) равно 280 мкОм см, а спеченного $ZrC_{1.06}$ — 330 мкОм см при той же температуре. В данном случае (рис. 1б) электросопротивление спеченного ZrC при 3000 К составляет 320 мкОм см, что согласуется с данными [10] для спеченного ZrC.

Карбид гафния HfC. Характеристика образцов исследованного карбида гафния HfC приведена в таблице. Образцы содержали 7 ат. % О в виде примеси. В образцах рентгенографически выявлена только одна фаза — HfC. Зависимость $\rho(T)$ показана на рис. 2.

В [11] приведена термограмма нагрева образца HfC, с помощью которой при выполнении построений, аналогичных рис. 1а, определены температуры солидуса — 4000 К и ликвидуса — 4300 К. Зависимости электросопротивления от температуры для ZrC и HfC (рис. 2) говорят о возможности фиксации начала жидкого состояния по изменению сопротивления. Наиболее ясно это представлено на примере HfC (рис. 2, стрелка 4). Резкое изменение сопротивления с выходом на линейную зависимость указывает на достижение жидкого состояния большей частью образца, что дает температуру ликвидуса не ниже 4200 К. Поскольку отсутствуют аргументы для выбора одного из двух полученных значений — 4200 или

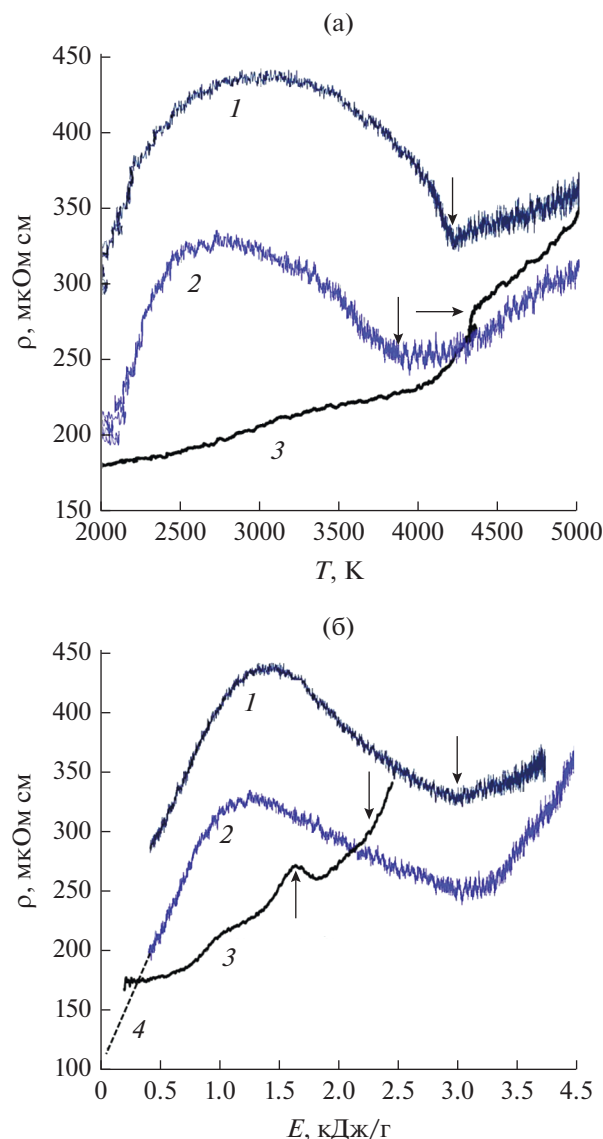


Рис. 3. Зависимость электросопротивления от температуры (а) для трех карбидов: 1 – HfC, 2 – ZrC, 3 – TaC + HfC; стрелки – окончание плавления (начало жидкого состояния); (б) – зависимость $\rho(E)$: стрелки, направленные вниз, – окончание плавления (начало жидкого состояния); стрелка, направленная вверх, – начало плавления; 4 – линейная экстраполяция экспериментальных значений к начальным условиям.

4300 K, для температуры ликвидуса $\text{HfC}_{0.85}$ принимается значение 4250 ± 80 K. К моменту начала плавления удельное электросопротивление $\text{HfC}_{0.85}$ составляет 375 ± 20 мкОм см, к моменту достижения жидкой фазы – 325 ± 20 мкОм см. Измерение теплоты плавления $\text{HfC}_{0.85}$ дало значение 0.8 кДж/г [11].

Смешанный карбид TaC + HfC. В [6, 7] представлены результаты исследования смешанного карбида состава $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ на образцах, полученных методом магнетронного напыления (см. таб-

лицу). До последнего времени образцы данного состава считались наиболее тугоплавкими. Для напыления использовалась мишень такого же состава, изготовленная из смеси порошков карбидов TaC и HfC методом ИПС. Анализ микроструктуры показал, что слой карбида сложен из плотноупакованных столбчатых кристаллитов с поперечными размерами $\sim 30\text{--}70$ нм и высотой 1 мкм, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки [6].

На рис. 3 показаны зависимости $\rho(T)$ и $\rho(E)$ (E – удельная введенная энергия) для трех исследованных карбидов, включая $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$. В отличие от HfC и ZrC (крупные кристаллиты) смешанный карбид $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ (кристаллиты малого размера) показывает положительный рост ρ вплоть до ясно видимого окончания плавления (рис. 3а, горизонтальная стрелка) [7]. В твердой фазе сопротивление этого карбида растет от 170 мкОм см при 2000 K до 260 мкОм см к началу плавления (рис. 3б, стрелка, направленная вверх). После этого начинается линейный рост ρ в жидком состоянии от 280 до 350 мкОм см вплоть до 5000 K (рис. 3а) подобно данным для жидкого HfC.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Электросопротивление твердой фазы карбидов.

Электросопротивление, являясь структурно чувствительным свойством, зависит от пористости образцов, размера пор, размера и дефектности зерен, структуры и размеров межзеренных границ [12, 13]. Например, в [12] приведено изменение электросопротивления образца состава $\text{ZrC}_{0.94}$ в процессе нагрева и охлаждения (рис. 4). Авторы [12] в условиях стационарного нагрева исследовали образцы карбида циркония, приготовленные “из крупнодисперсных порошков повышенной и технической чистоты”. Размер зерен в [12] не указан. Следует заметить, что характер роста и последующего падения электросопротивления карбида в твердой фазе при стационарном нагреве имеет тот же вид, что и в настоящих экспериментах для твердой фазы спеченных карбидов (рис. 2).

По мнению авторов [12], такой вид зависимости электросопротивления от температуры объясняется тем, что процесс спекания образцов при 2100 K за время их изготовления не был завершен и продолжился при нагреве в эксперименте до температур выше 2100 K. Это и привело к падению сопротивления при высоких температурах.

Анализируя результаты измерения электросопротивления, полученные при импульсном нагреве, необходимо учитывать возможность изменения структуры образцов в ходе нагрева, а также специфику нагрева импульсом тока – как правило, образец после эксперимента не сохраняется и повторный нагрев и охлаждение образцов невоз-

можно. Здесь следует заметить, что при импульсном нагреве (в случае необходимости) можно оборвать импульс тока в любой момент при шунтировании тока дополнительным разрядником и тем самым сохранить образец. На образец с током также действует электромагнитное давление, сжимающее образец.

Отметим характерную картину на рис. 2: электросопротивление карбидов в твердом состоянии с большими исходными размерами кристаллитов при повышении температуры существенно возрастает, достигает максимума и далее снижается. Максимум сопротивления достигается для ZrC при $T_{\max} = 2700$ К, что составляет ~ 0.78 от температуры солидуса T_{sol} , для HfC — при 3000 К ($T_{\max} \approx 0.75 T_{\text{sol}}$). Рост электросопротивления с ростом температуры принято считать признаком металлической природы вещества, в то время как падение — признаком полупроводников. Однако в данном случае вряд ли возможно считать последующее падение сопротивления этих двух карбидов проявлением полупроводниковых свойств.

Поведение электросопротивления исследованных карбидов можно объяснить следующим образом. Электросопротивление образца определяется сопротивлением материала зерен и сопротивлением межзеренных границ. Причем сопротивление границ из-за дефектности должно быть выше. Образцы карбида циркония во время изготовления спекались при $T_{\text{сint}} \approx 2300$ К и давлении 35 МПа [5], карбида гафния — при $T_{\text{сint}} \approx 2400$ К и 45 МПа. Предположим, что температурный ход электросопротивления определяется двумя факторами: 1) ростом сопротивления с увеличением температуры, характерным для веществ с металлической проводимостью (рассеяние электронов на фононах); 2) падением сопротивления, возникающим вследствие изменения структуры образца, в частности, границ зерен при высоких температурах.

Вначале электросопротивление карбидов растет с температурой. Одновременно с повышением температуры экспоненциально растут коэффициенты диффузии и подвижность точечных дефектов, дислокаций и границ зерен. До температуры $T_{\text{сint}}$ структура образцов практически не меняется. В интервале температур $T_{\text{сint}} - T_{\max}$ начинается перестройка структуры, однако это не отражается на росте сопротивления. После достижения температуры $T_{\max}$ второй фактор становится преобладающим и происходит снижение сопротивления, в частности, вследствие улучшения структуры границ зерен.

Оценим время, необходимое для протекания диффузионных процессов на межзеренных границах — $\tau \sim \delta^2/D$ (δ — толщина границы с приграничной областью, D — коэффициент диффузии).

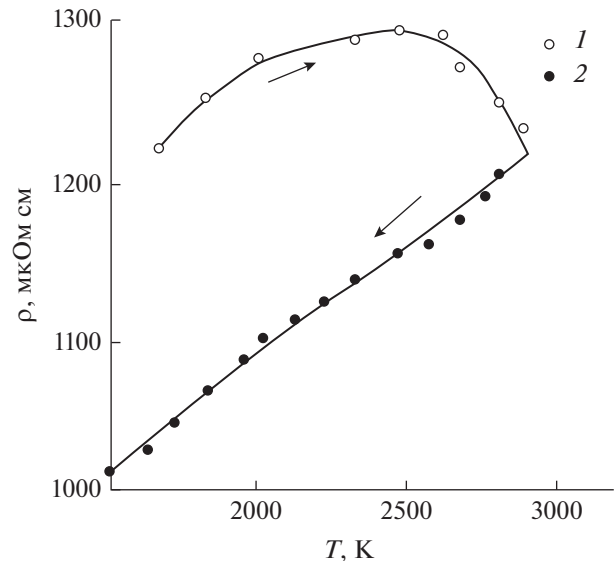


Рис. 4. Изменение электросопротивления образца состава $\text{ZrC}_{0.94}$ в ходе эксперимента (пористость — 42.5%, начальное сопротивление — 439 мкОм см, параметр решетки — 0.4691 нм) [12]: 1, 2 — экспериментальные точки прямого и обратного температурного хода соответственно.

Полагая $\delta \sim 2\text{--}10$ нм и $D \sim 10^{-3}$ см²/с (характерное значение для циркония и гафния при высоких температурах [14]), получим $\tau \sim 10^{-5}\text{--}10^{-3}$ мкс, т.е. при длительностях нагрева ~ 5 мкс времени для диффузионной перестройки межзеренных границ достаточно.

Границы зерен в поликристалле являются двумерным дефектом и представляют собой области с повышенной концентрацией точечных дефектов и дислокаций. При прохождении тока через зерна и их границы на границах зерен происходит повышенное удельное тепловыделение, поскольку сопротивление этих участков выше за счет примесей и концентрации дефектов. Поэтому плавление начинается на границах зерен. Далее за счет теплопроводности и выделения тепла в зерне плавление распространяется на все зерно. После достижения температуры солидуса на границах зерен начинается плавление, приводящее к улучшению контактов между зернами. Сопротивление продолжает падать до момента полного расплавления вещества, после которого начинается рост электросопротивления жидкой фазы (рис. 2).

Данную схему можно проверить экспериментально, если провести опыты со спеченными карбидами, предварительно выдержанными при температурах, близких к температуре плавления. В этих экспериментах падение сопротивления в твердой фазе должно быть меньше или отсутствовать. Например, в [8] наблюдается стабильный

рост сопротивления спеченного карбида ZrC при нагреве до 3500 К (рис. 1б, линия 4). Технология изготовления карбида в [8] состояла в следующем: холодное прессование порошка и последующее двукратное спекание в атмосфере аргона при температуре 2800 К. Полученные образцы имели размер зерен 15–20 мкм (близкий к условиям экспериментов данной работы) и пористость — 12.6–13.3%. Здесь спекание (выдержка) при максимальной температуре ($0.8T_{\text{sol}}$) было достаточным для стабилизации структуры, и повторный нагрев до более высоких температур (3500 К), судя по поведению ρ (рис. 1б), не привел к существенным изменениям структуры.

Давление, возникающее в образце при импульсном нагреве, также может играть заметную роль в изменении структуры образца и его сопротивления. В плоском образце с током возникает электромагнитное давление, которое можно оценить по формуле [15]

$$P(z) = \frac{1}{4} \mu_0 j^2 (a^2 - z^2), \quad (1)$$

где j — плотность тока; $\mu = 1$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Н/м — магнитные проницаемости карбида и вакуума; $2a$ — толщина образца; z — расстояние от плоскости симметрии образца. К этому давлению добавляется давление термокомпрессии — давление, возникающее в образце при его нагреве в ограниченном объеме. По оценкам [15], для близких условий проведения эксперимента суммарное давление составляет ~ 10 МПа. В свое время [16] было обнаружено, что при быстром (микросекундном) нагреве электрическим током графит невысокой плотности (~ 1.8 г/см³) сжимается еще в твердой фазе при высокой температуре, достигая наивысшей плотности 2.2 г/см³, и только затем начинает расширяться с ростом температуры. Позже этот факт подтвержден в [17] при нагреве графита током в том же временном масштабе. Причиной этого сжатия предполагается повышенное давление (внешнее 4 кбар [16]) либо давление собственного магнитного поля импульсного тока [17]. Известно, что твердый графит проявляет пластичность при высоких температурах. Не исключено, что при высоких температурах недостаточно плотные карбиды (например, карбид гафния с пористостью 3.4%) также могут претерпевать сжатие под воздействием импульсного давления и, как следствие, падение электросопротивления вследствие улучшения контактов между зернами.

Электросопротивление смешанного карбида $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ не показывает подобного снижения сопротивления в твердой фазе (рис. 3) при таком же импульсном нагреве (амплитуда тока ~ 1 кА). Такое поведение электросопротивления свидетельствует о стабильности структуры напыленного слоя карбида при нагреве. Электросопротивле-

ние образца слегка снижается в начале плавления с 260 до 250 мкОм см предположительно в результате уменьшения пористости [10]. Оценка по формуле (1) показывает, что электромагнитное давление в этом случае пренебрежимо мало и давление в образце растет только в результате термокомпрессии.

Электросопротивление жидкой фазы карбидов. Полученные зависимости (рис. 3а) показывают, что электросопротивление жидкой фазы спеченных карбидов, полученных методом ИПС, при температуре ликвидуса ниже или равно электросопротивлению твердой фазы при температуре спекания карбида. Только для карбида, полученного магнетронным напылением, $\rho(T)$ в области плавления изменяется так же, как у металлов, — растет при плавлении по сравнению с сопротивлением твердой фазы.

Рис. 3б показывает, что карбид с наиболее высокой температурой плавления $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ ($T_m = 4300$ К) требует гораздо меньшей введенной энергии для достижения точки плавления (около 1.8 кДж/г), чем менее тугоплавкие карбиды. Карбиды HfC и ZrC при подходе к жидкому состоянию оба поглощают значительно большую удельную энергию (~ 3.4 кДж/г), хотя имеют меньшие температуры плавления: 4200 и 3840 К соответственно. Этот факт наряду с тугоплавкостью необходимо учитывать при проектировании элементов теплозащиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнены измерения электросопротивления жидкой фазы карбида гафния $\text{HfC}_{0.85}$ в зависимости от температуры до 5000 К.

Проведенный сравнительный анализ температурных зависимостей электросопротивления тугоплавких карбидов, изготовленных по различным технологиям, показал, что электросопротивление слоя карбида, нанесенного методом магнетронного напыления, увеличивается с ростом температуры в твердой фазе при плавлении и в жидкой фазе подобно тому, как растет сопротивление металлов.

Электросопротивление карбидов, полученных методом ИПС, в твердой фазе увеличивается с ростом температуры до $\sim 0.75T_{\text{sol}}$ и далее снижается, включая область плавления, до значений, меньших или равных значению при температуре спекания. Причиной такого поведения электросопротивления является изменение структуры образцов во время импульсного нагрева, что связано с диффузионной перестройкой межзеренных границ в твердой фазе и с плавлением образца. В жидкой фазе электросопротивление спеченных образцов растет с температурой.

Установлено, что при температуре ликвидуса трех исследованных карбидов энтальпия наиболее тугоплавкого карбида ($\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$, 1.8 кДж/г) почти в два раза меньше энтальпии двух других менее тугоплавких карбидов $\text{HfC}_{0.85}$ и $\text{ZrC}_{0.95}$. Этот факт необходимо учитывать при проектировании теплозащиты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-30086, руководитель Г.А. Месяц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knyazkov A.M., Kurbakov S.D., Savvatimskiy A.I., Sheindlin M.A., Yanchuk V.I. Melting of Carbides by Electrical Pulse Heating // High Temp.—High Press. 2011. V. 40 (3–4). P. 349.
2. Онуфриев С.В., Савватимский А.И., Янчук В.И. Измерение теплофизических свойств карбидов циркония и тантала при высоких температурах (до и выше точек плавления) // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 49.
3. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. Метод и техника исследования высокотемпературных свойств проводящих материалов в интересах ядерной энергетики // Ядерная физика и инжиниринг. 2015. Т. 6. № 11–12. С. 622.
4. Онуфриев С.В. Измерение температуры веществ при быстром нагреве импульсом тока // Изв. РАН. Сер. физическая. 2018. Т. 82. № 4. С. 430.
5. 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.
6. Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Muboyadzhyan S.A. Thermophysical Properties of the Most Refractory Carbide $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ under High Temperatures (2000–5000 K) // J. Europ. Ceram. Society. 2019. V. 39. P. 907.
7. Savvatimskii A.I., Onufriev S.V. Electrical Resistance of the Most Refractory Carbide $\text{Ta}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{C}$ in the Solid and Liquid States (2000–5000 K) // High Temp. 2019. V. 57. № 1. P. 140.
8. Петров В.А., Чеховской В.Я., Шейндлин А.Е., Николаева В.А., Фомина Л.П. Интегральная полусферическая излучательная способность, монохроматическая ($\lambda = 0.65$ мкм) излучательная способность и удельное электросопротивление карбидов циркония и ниобия в интервале температур 1200–3500 K // ТВТ. 1967. Т. 5. № 6. С. 995.
9. Grossman L.N. High-temperature Thermophysical Properties of Zirconium Carbide // J. Am. Ceram. Soc. 1965. V. 48(5). P. 236.
10. Jackson H.F., Lee W.E. Properties and Characteristics of ZrC. In: Comprehensive Nuclear Materials / Ed. Jackson H.F. London: Elsevier Ltd., 2012. P. 339.
11. Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Valyano G.E., Muboyadzhyan S.A. Thermophysical Properties of Hafnium Carbide (HfC) Versus Temperature from 2000 to 5000 K (Experiment) // J. Mater. Sci. 2020. V. 55. P. 13559.
12. Вишневецкая И.А., Кудряшева Л.В., Орданьян С.С., Петров В.А. Исследование теплопроводности и электросопротивления карбидов циркония в области гомогенности при высоких температурах // ТВТ. 1980. Т. 18. № 3. С. 523.
13. Вишневецкая И.А., Кудряшева Л.В., Орданьян С.С., Петров В.А. Влияние степени дисперсности исходного порошка на тепло- и электропроводность спеченного карбида циркония // ТВТ. 1980. Т. 18. № 4. С. 756.
14. Физические величины. Спр. / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. Onufriev S.V., Savvatimskiy A.I., Muboyadzhyan S.A. Investigation of Physical Properties of $0.9\text{ZrN} + 0.1\text{ZrO}_2$ Ceramics at 2000–4500 K by Current Pulse Heating // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. 125554.
16. Gathers G.R., Shaner J.W., Young D.A. High Temperature Carbon Equation of State // UCRL-51644. Livermor, 1974. 13 p.
17. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Электросопротивление графита в широкой области конденсированного состояния // ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 892.