

выигрыша. Например, для ступеней с постоянным потоком на входе наибольший выигрыш по сравнению с симметричной схемой наблюдается при $\theta > 0,5$, поскольку в этом случае разделительная способность имеет максимум в точке $\theta = 0,8$. Наоборот, в принятой модели разделительная способность ступени с ростом коэффициента деления потока уменьшается, и максимум кривой в точке $\theta = 0,33$ по величине больше, чем в точке $\theta = 0,8$.

В заключение отметим, что при практической реализации несимметричных схем соединения ступеней следует учитывать усложнение коммуникаций разделительной установки с ростом параметров несимметричности.

Поступило в Редакцию 20/VIII 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation. N.Y., Mc Grow-Hill, 1951.

2. Бенедикт М., Пигфорд Т. Химическая технология ядерных материалов. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
 3. Колокольцов Н. А. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 1, с. 9.
 4. Колокольцов Н. А., Лагунцов Н. И. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 4, с. 300.
 5. Колокольцов Н. А., Лагунцов Н. И., Сулаберидзе Г. А. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 4, с. 259.
 6. Колокольцов Н. А. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 1, с. 32.
 7. Гвердцители И. Т., Цхакая В. К. В сб.: Получение изотопов. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 113.
 8. Розен А. М. Теория разделения изотопов в колоннах. М., Атомиздат, 1960.
 9. Чужин В. А. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 6, с. 471.

УДК 621.039.542.344

Влияние легирования карбида урана на его взаимодействие с углеродом

АРАБЕЙ Б. Г., ЛЕВИНСКИЙ Ю. В., МАРКОВ Ю. М., ПОРТНОЙ К. И.

Двойные и тройные карбидные системы с участием карбидов урана были предметом многих исследований [1—8]. Изучение изотермических сечений диаграмм состояния систем U — Me — C (где Me — Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) показало [7, 8], что при 1700 °C изоморфные монокарбиды урана и тугоплавких металлов образуют широкие области гомогенности вплоть до непрерывных твердых растворов. Однако в контакте с избыточным углеродом в равновесном состоянии твердые растворы (U, Me)C определенных составов неустойчивы и распадаются с выделением карбида UC₂. Для стабилизации монокарбида урана при 1700 °C и предотвращения его взаимодействия с углеродом в UC необходимо добавить, мол. %: ~70 ZrC; ~86 HfC; ~72 NbC или ~77 TaC [7, 8].

Цель настоящей работы — определение влияния состава твердого раствора (U, Me)C на его взаимодействие с углеродом и в первую очередь на температуру появления жидкой фазы в системах (U, Me)C — C.

Взаимодействие в системе (U, Me)C — C и температуру образования жидкой фазы определяли по методике, разработанной ранее для определения температур плавления в системах MeC — C [9].

Исходными материалами служили порошки тугоплавких металлов и двуокиси урана со средним размером частиц 2—10 мк. Содержание примесей в исходных материалах представлено в таблице. Использованная в работе прокаленная ламповая сажа имела зольность < 0,05%.

Из смеси порошков металла, двуокиси урана и ламповой сажи, рассчитанных на получение твердого раствора (U, Me)C определенного состава, прессовали таблетки диаметром 5 и высотой 3—4 мм.

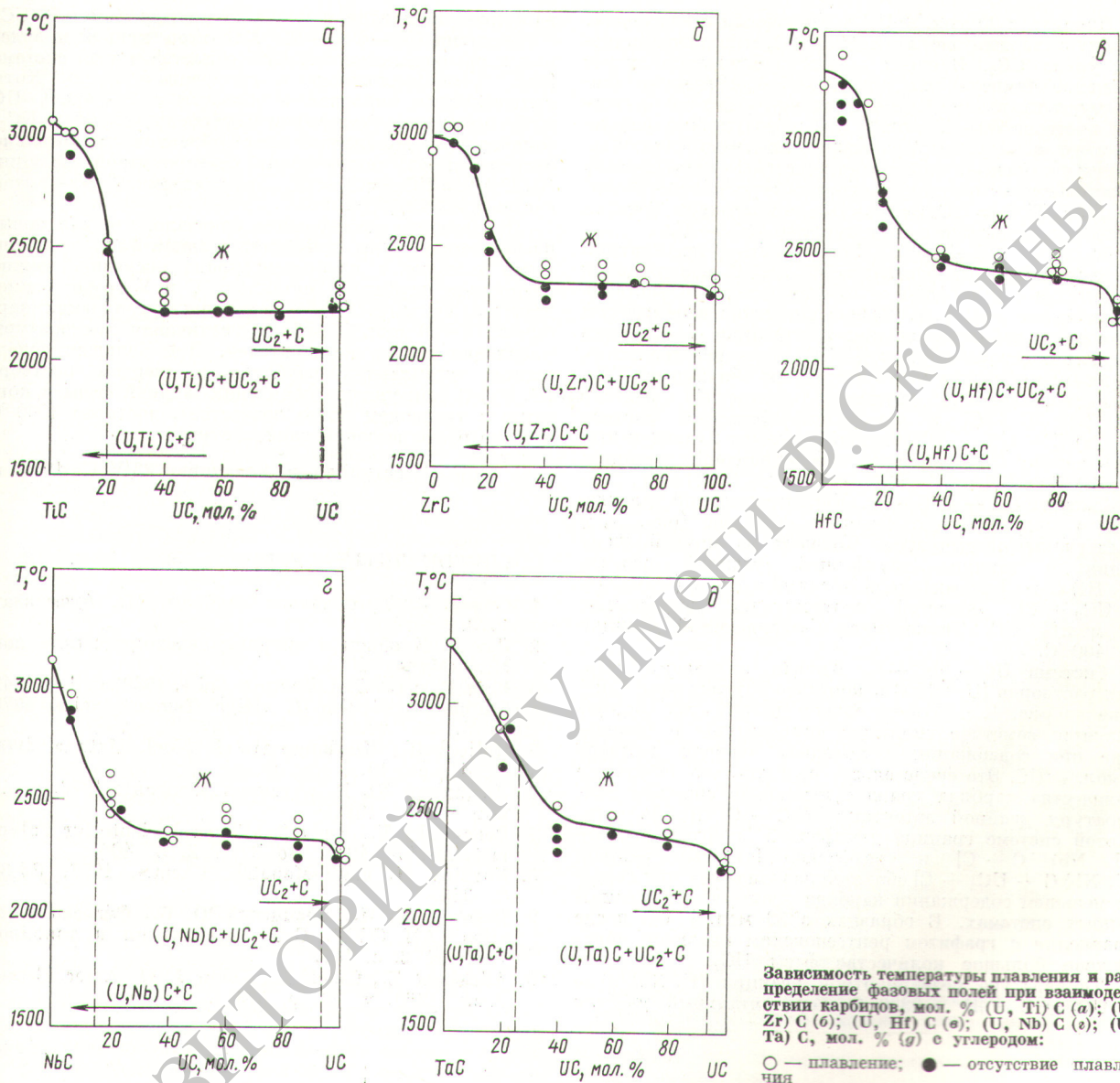
Таблетки нагревали на графитовой подложке в графитовой печи сопротивления в атмосфере аргона при 2000—3200 °C с интервалом температур вблизи плавления 20—30°. Температуру измеряли оптическим пирометром с точностью ±30°. В качестве реперных точек была выбрана найденная ранее [9] температура плавления эвтектик в системах MeC — C.

За температуру плавления принимали ту минимальную температуру, при которой после отжига на графитовой подложке образовывалась застывшая капля.

Рентгеновский анализ образцов показал, что нагрев в течение нескольких минут при температуре выше 2000 °C во всех случаях достаточен для образования

Состав исходных материалов

Материал	Содержание примесей, мас. %										
	C	O	N	Fe	Si	Ni	Al	Hf	Ti	Zr	Nb
Ti	0,1	0,15	0,05	0,3	0,15	0,1	—	—	осн.	—	—
Zr	—	—	—	0,05	0,1	—	0,02	0,05	0,063	осн.	—
Hf	—	—	—	0,05	0,07	—	0,009	осн.	0,009	2,8	—
Nb	0,16	—	—	0,06	0,05	—	—	—	0,008	—	осн.
Ta	1,91	—	—	0,128	0,58	—	—	—	0,007	—	—
UO ₂	—	12,1	0,005	0,033	0,011	0,002	0,007	—	—	—	—



полностью гомогенного твердого раствора (U, Me)C. Согласно металлографическому анализу все капли представляли собой по структуре эвтектику.

Чистый карбид урана плавился в контакте с графитом при температуре 2250 °С. Охлажденный расплав, по данным рентгеновского анализа, состоял из UC₂ и графита. Полученное значение на 100–200° ниже полученных в других работах [1], что, вероятно, как и для других систем MeC — C, объясняется наличием в исследованных образцах примесей кислорода и азота.

Система UC — TiC — C. Зависимость температуры плавления твердых растворов (U, Ti) C, находящихся в контакте с углеродом, от состава твердого раствора показана на рис. 1, а. Карбид титана, содержащий 7 и 14 мол. % карбида урана, образует с углеродом

жидкую фазу при 2800–2900 °С, что примерно соответствует эвтектической температуре в системе TiC — C [9], но несколько превышает данные работ [1, 10]. При содержании в твердом растворе 20 мол. % UC жидкая фаза появляется при 2500 °С, а начиная с содержания 40 мол. % UC — при одинаковой для всех составов температуре ~2200 °С.

В соответствии с рентгеновским анализом при исследованной температуре твердые растворы (U, Ti) C, содержащие до 15–18 мол. % UC, остаются однофазными в контакте с избыточным углеродом и образуют с ним, подобно чистому карбиду титана, эвтектику. Температура плавления эвтектики (U, Ti) C — C мало зависит от содержания урана в твердом растворе.

Начиная с 20 мол. % UC в равновесии с углеродом, наряду с твердым раствором (U, Ti) C, находится дикарибид урана UC₂. В связи с этим наблюдается резкое снижение температуры плавления. Постоянство температуры плавления при содержании в исходном твердом растворе 40—80 мол. % UC и результаты рентгеновского и металлографического анализов свидетельствуют о наличии в этой области системы четырехфазной безвариантной реакции (вероятно, трехфазной эвтектики (U, Ti)C \rightleftharpoons UC₂ \rightleftharpoons C \rightleftharpoons Ж, температура которой близка к эвтектической в системе UC₂ — C.

Система UC—Zr—C. Зависимость температуры плавления твердых растворов (U, Zr) C, находящихся в контакте с углеродом, от состава твердого раствора показана на рис. 1, б. Резкое снижение температуры плавления наблюдается при содержании в исходном твердом растворе 20 мол. % UC, хотя рентгеновским анализом в образцах этого состава не обнаружено UC₂. Очевидно, граница двухфазной [твердый раствор (U, Zr) C + C] и трехфазной [твердый раствор (U, Zr) C + UC₂ + C] областей проходит близко к этому составу. Температура безвариантной реакции (U, Zr) C \rightleftharpoons UC₂ \rightleftharpoons C \rightleftharpoons Ж \sim 2320 °C.

Система UC—HfC—C. Характер кривой плавления и распределение фазовых областей (рис. 1, в) аналогичны предыдущим. Перелом на кривой плавления и граница двухфазной [твердый раствор (U, Hf) C + C] и трехфазной [твердый раствор (U, Hf) C + UC₂ + C] областей соответствует содержанию 20 мол. % UC. Температура безвариантной реакции \sim 2400 °C.

Система UC—NbC—C. Кривая плавления твердых растворов (U, Nb) C в контакте с углеродом показана на рис. 1, г. Отличительной чертой этой системы является заметное снижение температуры плавления уже при содержании в исходном твердом растворе 7 мол. % UC. Это свидетельствует о том, что небольшие количества карбида урана существенно снижают температуру двойной эвтектики NbC—C. Кроме того, в этой системе граница двухфазной [твердый раствор (U, Nb) C + C] и трехфазной [твердый раствор (U, Nb) C + UC₂ + C] областей расположена при гораздо меньшем содержании карбида урана, чем в рассмотренных системах. В образцах с 20 мол. % UC после плавления с графитом рентгеновским анализом обнаружено большое количество фазы UC₂.

Температура безвариантной реакции (U, Nb) C \rightleftharpoons UC₂ \rightleftharpoons C \rightleftharpoons Ж \sim 2320 °C. Горизонтальный участок

на кривой плавления начинается почти с 20 мол. % UC.

Система UC—TaC—C. Характер кривой плавления и распределение фазовых областей в этой системе (рис. 1, д) аналогичны рассмотренным выше. Хотя рентгеновским анализом в образцах с 20 мол. % UC после плавления с углеродом была обнаружена фаза UC₂, температура плавления этих образцов значительно отличается от температуры безвариантной реакции (U, Ta)C \rightleftharpoons UC₂ \rightleftharpoons C \rightleftharpoons Ж, составляющей для этой системы \sim 2450 °C.

Проведенное исследование показало, что для повышения температуры появления жидкой фазы при контакте углерода с карбидами урана последние можно легировать карбидами металлов IV и V групп периодической системы. При содержании тугоплавких карбидов 70—80 мол. % эффект увеличения температуры плавления весьма значителен. При большем содержании тугоплавких карбидов в твердом растворе (U, Me) C температура появления жидкой фазы с контакте с углеродом резко возрастает, достигая 3000 °C и даже более высокой температуры.

Поступило в Редакцию 23/VIII 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сторме Э. Тугоплавкие карбиды. М., Атомиздат, 1970.
2. Гот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. М., «Мир», 1974.
3. Benz R. e.a. «High Temper. Sci.», 1969, v. 1, p. 342.
4. Storms E., Griffin J. «High Temper. Sci.», 1973, v. 5, p. 423.
5. Holleck H., Kleykamp H. «J. Nucl. Mater.», 1969, v. 1, p. 19.
6. Левинский Ю. В. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 3, с. 182.
7. Benesovsky F., Rudy E. «Planseeberichte fur Pulvermetallurgie», 1961, Bd 9, N 2, S. 406.
8. Novotny H. e.a. «Monatsh. Chem.», 1957, Bd 88, S. 336.
9. Портной К. И., Левинский Ю. В., Фадеева В. И. «Изв. АН СССР. Сер. металлургия и топливо», 1961, № 2, с. 147.
10. Adelsberg Z., Cadoff L., Tobin J. «J. Amer. Ceram. Soc.», 1966, v. 49, p. 573.

УДК 621.039.548

Статистический учет дефектов при расчете характерных температур твэла

ХРАНОВСКИЙ В. А., КУРБАТОВ И. М.

Вследствие неидеальности технологических процессов изготовления твэлов и изменения структуры материалов в процессе эксплуатации в элементах твэлов образуются случайные дефекты. К ним можно отнести пустоты в топливном сердечнике и контактном слое или неоднородности типа местных повышений концентрации делящегося материала. Поскольку подобные неоднородности искажают температурное поле в твэле,

приводя к локальным перегревам, возникает необходимость их правильного учета.

В последние годы в практике реакторных расчетов получил распространение статистический подход, учитывающий случайный характер влияния различных факторов, определяющих температурное поле [1]. Однако воздействие локальных факторов требует учета не только плотности распределения параметра неодно-