

ствах, суммарные изменения объема материала шестигранника должны быть меньше найденных расчетом на основании электронно-микроскопических исследований этих участков.

Как уже отмечалось, науглероживание стали ОХ18Н9Т способствует повышению концентрации выделений в теле зерен. Эти выделения могут действовать как нейтральные стоки точечных дефектов или тормозить рост дислокационных петель, уменьшая тем самым их способность захватывать межузельные атомы, или препятствовать радиационному отжигу сетки дислокаций. Такие явления в конечном счете должны привести к снижению установившейся концентрации точечных дефектов и, следовательно, к подавлению процесса зарождения и роста пор. Возможны и другие объяснения, основан-

ные, в частности, на изменении коэффициентов диффузии, поверхностной энергии, появлении локальных напряжений, поскольку все эти факторы могут оказать существенное влияние на образование пор.

Поступила в Редакцию 1/ХІІ 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладыгин А. Я. и др. IV Женевск. конф., 1974, докл. № 707.
2. Norris D. «Rad. Effects», 1972, v. 14, p. 4.
3. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 4, с. 247.
4. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 1, с. 24.
5. Невзоров Б. А. Коррозия конструктивных материалов в натрии. М., Атомиздат, 1968.
6. Claxton K., Collier J. «J. Brit. Nucl. Energy Soc.», 1973, v. 12, p. 63.

УДК 669.822

p-T-диаграмма состояния системы уран — углерод

ЛЕВИНСКИЙ Ю. В.

Подробный анализ равновесия фаз в системе уран — углерод дан в работе [1], а наиболее вероятная диаграмма состояния этой системы, представляющая собой проекцию линий максимальной растворимости на плоскость температура — состав, предложена в работе [2].

Более подробные сведения о равновесии в этой системе дает *p-T-x*-диаграмма состояния или проекция линии моновариантного равновесия этой системы на плоскость температура — давление (*p-T*-диаграмма состояния). Известная неопределенность значений общего равновесного давления над большинством фаз в системе уран — углерод позволяет предложить схему *p-T*-диаграммы состояния только в области температуры 1000—2600 °С и давления 0—10⁻¹⁶ ат. Однако даже такая схема может оказаться очень полезной при построении изобарных и изотермических сечений диаграммы состояния.

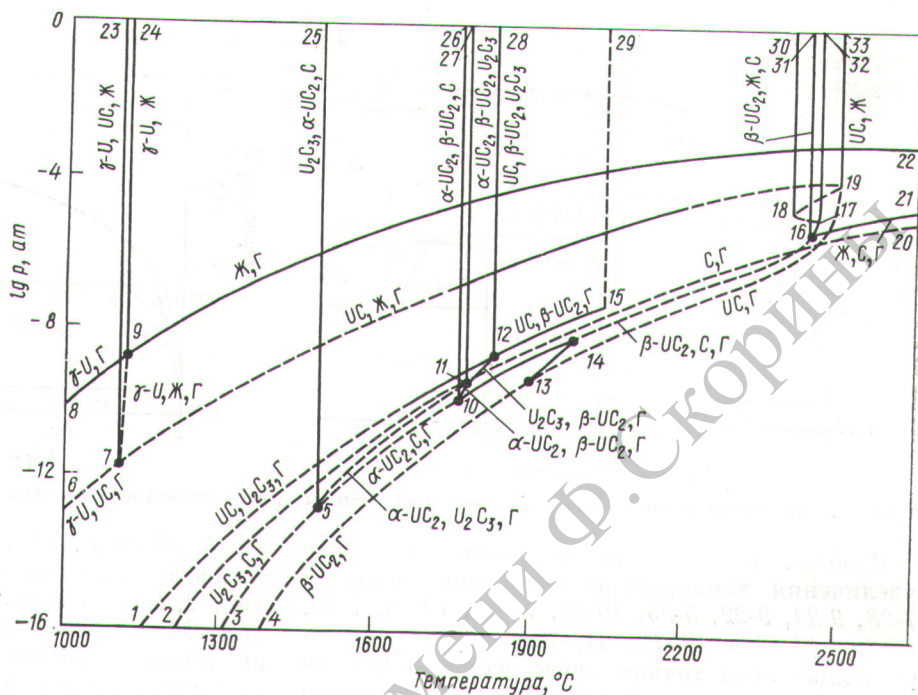
На схеме *p-T*-диаграммы состояния (рис. 1) кривые 8-9 и 9-22 характеризуют давление пара над твердым и жидким ураном, а кривая 9-24 — плавление урана. В точке 7 в равновесии находятся четыре фазы: γ — U, UC, жидкость и газ. Из этой точки выходят кривые 7-23, 7-9, 7-6 и 7-19 трехфазных равновесий γ -U \rightleftharpoons UC \rightleftharpoons Ж, γ -U \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г, γ -U \rightleftharpoons UC \rightleftharpoons Г и UC \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г. Кривая 7-23 вертикальна ($T = 1117$ °С), кривая 7-19 на участке температуры 1800—2100 °С построена по данным

работы [1], а при более низкой температуре, как и кривая 7-6, — экстраполяцией этих данных.

Кривые 19-33, 17-32 и 18-30 обозначают конгруэнтное плавление UC, UC₂ и их твердого раствора. В точке 16 наблюдается четырехфазное равновесие: β -UC₂ \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Из этой точки начинаются кривые 16-31, 16-21, 16-17 и 16-10 трехфазных равновесий β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Ж, Ж \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г, β -UC₂ \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г и β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Кривая 16-31 равновесия трех конденсированных фаз вертикальна ($T = 2430$ °С), кривые 16-21 и 17-16 нанесены ориентировочно, а кривая 6-10 в области температуры 1800—2100 °С построена с учетом данных [1] и в предположении, что общее давление газа над смесью β -UC₂ + С соответствует парциальному давлению урана.

Четырехфазное равновесие α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г отмечено точкой 10 ($T = 1765$ °С, $p = 10^{-10}$ ат), откуда, кроме кривой 10-16, выходят кривые 10-26, 10-11 и 10-5 трехфазных равновесий α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons С, α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons Г и α -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Последняя кривая получена экстраполяцией кривой 10-16. В точке 5 в равновесии находятся фазы: U₂C₃, α -UC₂, С и газ. Трехфазным реакциям U₂C₃ \rightleftharpoons α -UC₂ \rightleftharpoons Г, U₂C₃ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г, U₂C₃ \rightleftharpoons α -UC₂ \rightleftharpoons С соответствуют кривые 5-11, 5-3 и 5-25. Кривые 5-11 и 5-3 нанесены ориен-

Рис. 1. р-Т-диаграмма состояния системы уран — углерод



тировочно, а кривая 5-25 вертикальна ($T = 1514^\circ\text{C}$). Четырехфазное равновесие $\alpha\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \text{U}_2\text{C}_3 \rightleftharpoons \beta\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \Gamma$ обозначено точкой 11 ($T \approx 1775^\circ\text{C}$, $p = 10^{-10}$ ат). Кривые 11-27 и 11-12 трехфазных равновесий $\beta\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \text{U}_2\text{C}_3 \rightleftharpoons \alpha\text{-UC}_2$ и $\text{U}_2\text{C}_3 \rightleftharpoons \beta\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \Gamma$ нанесены ориентировочно.

В точке 12 ($T = 1780^\circ\text{C}$, $p = 5 \cdot 10^{-10}$ ат) в равновесии находятся четыре фазы: UC, $\beta\text{-UC}_2$, U_2C_3 и газ. Кривая 12-28 трехфазного равновесия $\text{UC} \rightleftharpoons \beta\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \alpha\text{-U}_2\text{C}_3$ вертикальна, а кривая 12-15 трехфазного равновесия $\text{UC} \rightleftharpoons \beta\text{-UC}_2 \rightleftharpoons \Gamma$ построена с учетом данных работы [1]. Критическая точка 15 имеет следующие координаты: $T = 2100^\circ\text{C}$, $p \approx 2 \cdot 10^{-7}$ ат. Можно предположить, что критическая кривая 15-29 в области обозначенного на рис. 1 давления практически вертикальна.

Установлено, что от температуры плавления до $\sim 1960^\circ\text{C}$ конгруэнтно испаряющийся карбид урана имеет состав $\text{UC}_{1.1}$, в узкой области температуры (около 1960°C) конгруэнтно испаряются два карбида — $\text{UC}_{1.1}$ и $\text{UC}_{1.8}$, а при более низкой температуре — только карбид $\text{UC}_{1.8}$ [1]. В связи с этим кривая конгруэнтного испарения монокарбида урана начинается в точке 19 плавления UC и заканчивается при температуре $\sim 1900^\circ\text{C}$ в точке 13, лежащей на кривой конгруэнтного испарения дикарбида урана. Последняя берет начало в точке 14

кривой 10-16 и продолжается до области низкой температуры. Точных данных о положении кривых конгруэнтного испарения карбидов урана нет, ясно только, что они должны быть расположены ниже кривых трехфазного равновесия с участием UC и UC_2 .

Опубликованные сведения о равновесном давлении газа над чистым углеродом очень противоречивы и при заданной температуре могут отличаться на три — четыре порядка [3]. Поэтому на рис. 1 кривая 2-20 испарения углерода нанесена условно. При температуре выше плавления монокарбида урана давление газа над углеродом должно быть минимальным для всей системы уран — углерод, при более низкой температуре это давление может быть как выше, так и ниже равновесного давления газа над различными двухфазными смесями. Ввиду неопределенности положения кривой 2-20 равновесие с участием чистого углерода в изобарных и изотермических условиях в дальнейшем рассматриваться не будет.

Нетрудно убедиться, что при давлении выше 10^{-2} ат изобарные сечения диаграммы состояния системы уран — углерод в рассматриваемом интервале температуры полностью идентичны проекции линии максимальной растворимости [2], так как в этих условиях в системе нет газовой фазы. При более низком давлении эта идентичность уже не наблюдается [2] (рис. 2).

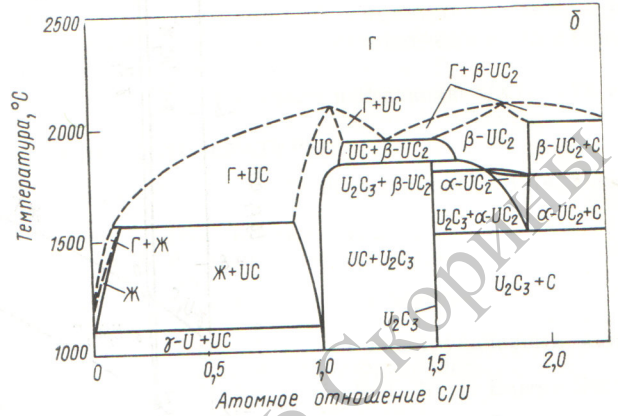
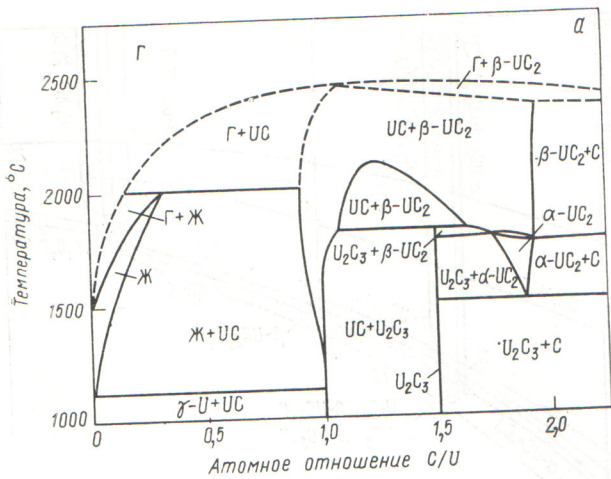


Рис. 2. Изобарные сечения диаграммы состояния системы уран — углерод при давлении 10^{-6} (а) и $5 \cdot 10^{-9}$ ат (б)

Изобара $p = 10^{-6}$ ат пересекает по мере увеличения температуры следующие кривые: 7-23, 9-24, 9-22, 5-25, 10-26, 11-27, 12-28, 7-19, 15-29, 10-16 и 13-19. Превращения, соответствующие этим точкам пересечения, показаны на изобарном сечении рис. 2, а. Характерной особенностью этого изобарного сечения является конгруэнтное испарение, а не плавление монокарбида урана и появление ряда двухфазных областей с участием газовой фазы. Нижняя граница области гомогенности монокарбида урана сдвинута в сторону углерода, так как состав конгруэнтно плавящейся фазы — $UC_{1,0}$, а конгруэнтно испаряющейся — $UC_{1,1}$. Изобара $p = 5 \cdot 10^{-9}$ ат пересекает кривые: 7-23, 9-24, 9-22, 7-19, 10-26, 11-27, 12-28, 12-15,

10-16, 13-14 и 13-19. Семь из них представляют трехфазные равновесия, поэтому на диаграмме рис. 2, б семь горизонталей трехфазных реакций. Область жидкого раствора углерода в уране узкая, а состав максимально насыщенной углеродом жидкости — $UC_{0,15}$ при температуре $1600^\circ C$, когда жидкость разлагается на газ, содержащий в основном уран и монокарбид состава $UC_{0,9}$. Монокарбид урана состава $UC_{1,1}$ и дикарбид урана состава $UC_{1,8}$ испаряются конгруэнтно при давлении $5 \cdot 10^{-9}$ ат. Фазы UC и $\beta-UC_2$ не образуют непрерывных твердых растворов, а занимают на диаграмме обособленные поля, разделенные двухфазной областью $UC + \beta-UC_2$. Состав максимально насыщенного углеродом монокарбида $UC_{1,13}$, а максимально

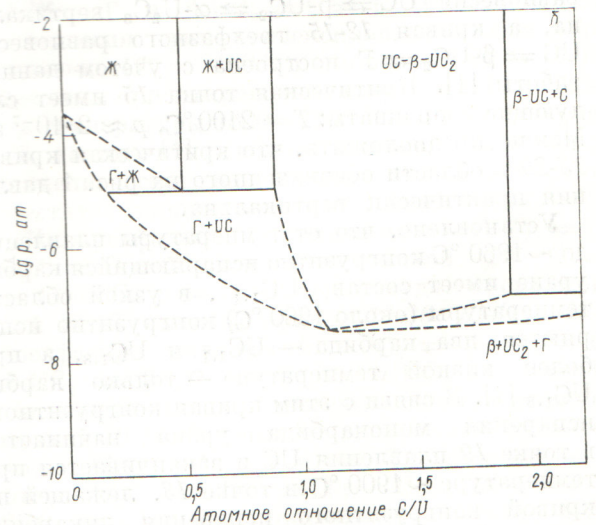
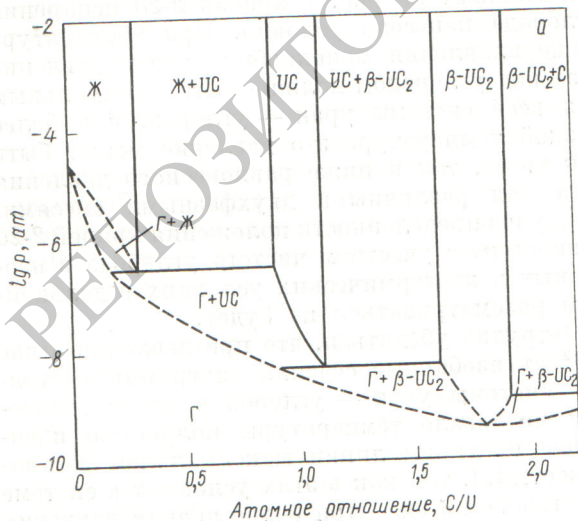


Рис. 3. Изотермические сечения диаграммы состояния системы уран — углерод при температуре $1900^\circ C$ (а) и $2200^\circ C$ (б)

насыщенного ураном дикарбида — $UC_{1,47}$. В остальных областях изобарные сечения (см. рис. 2, а и б) совпадают.

Изотермические сечения диаграммы состояния системы уран — углерод при температуре 1900 и 2200 °С показаны на рис. 3. Изотерма $T = 1900$ °С пересекает кривые 9-22, 7-19, 12-15, 10-16 и 4-13. Три точки пересечения соответствуют горизонталям (см. рис. 3, а), а последняя — конгруэнтному испарению дикарбида урана. В трехфазном равновесии при давлении $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ ат принимают участие газ, богатый ураном, жидкость состава $UC_{0,3}$ и монокарбид состава $UC_{0,9}$. При давлении $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ ат монокарбид состава $UC_{1,1}$ разлагается на газ и дикарбид состава $UC_{1,6}$. Состав конгруэнтно испаряющегося дикарбида урана $UC_{1,8}$.

Изотерма $T = 2200$ °С пересекает кривые 9-22, 7-19, 10-16 и 13-19. Только две из них представляют трехфазные равновесия. В соот-

ветствии с этим на изотермическом сечении (см. рис. 3, б) при давлении 10^{-5} ат жидкость состава $UC_{0,5}$ разлагается на газ и карбид состава $UC_{0,9}$, а при давлении 10^{-7} ат дикарбид урана состава $UC_{1,9}$ разлагается на газ и углерод. Состав конгруэнтно испаряющегося карбида — $UC_{1,1}$.

Рассмотренная p - T -диаграмма состояния может быть использована для оценки поведения карбидов урана при работе в вакууме или в среде с малым парциальным давлением углерода и урана.

Поступила в Редакцию 1/Х 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. М., Атомиздат, 1970.
2. Benz R., Hoffman C., Rupert G. «High. Temp. Sci.», 1969, v. 1, p. 342.
3. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. М., Изд-во АН СССР, 1961.

УДК 539.172.4

Тепловые сечения и резонансные интегралы деления и захвата

^{241}Am , ^{243}Am , ^{245}Cm , ^{249}Bk , ^{249}Cf

ГАВРИЛОВ В. Д., ГОНЧАРОВ В. А., ИВАНЕНКО В. В., КУСТОВ В. Н., СМИРНОВ В. П.

Оптимизация процессов накопления транс-плутониевых элементов в реакторах требует знания сечений взаимодействия нейтронов с ядрами всех изотопов, участвующих в процессе накопления. В настоящей работе методом кадмиевой разности измерялись тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления ^{241}Am , ^{243}Am , ^{245}Cm , ^{249}Bk , ^{249}Cf . Толщина кадмиевого экрана 1 мм. В качестве мониторов нейтронного потока использовались образцы ^{197}Au и ^{59}Co ($\sigma = 98,8$ и $37,5$ б; $I = 1558$ и 70 б соответственно) [1]. Наведенная γ -активность облученных мониторов измерялась на гамма-спектрометре с Ge(Li)-полупроводниковым детектором. Эффективность регистрации γ -квантов определялась по образцовым спектротометрическим гамма-источникам (ОСГИ), изготовленным с погрешностью 3—5%.

Сечения деления. Сечения деления измерялись на выходе горизонтального канала реактора СМ-2. Для регистрации актов деления использовались твердые трековые детекторы (ТТД) из слюды и фотостекла, обладающие довольно высокой эффективностью регистрации осколков деления и практически не чувстви-

тельные к α -, β -, γ - и нейтронному излучению [2]. Небольшие геометрические размеры детекторов позволяют уменьшить или исключить влияние возмущения нейтронного потока.

Стартовое число ядер исследуемых изотопов определялось по α -активности мишени. Исследуемые изотопы в виде раствора наносились на алюминиевые подложки и измерялись на 2л-пропорциональном проточном счетчике. Образцы облучались в виде сэндвича: мишень, детектор. Количество исследуемого вещества и время облучения мишеней выбирались с таким учетом, чтобы число треков на детекторе было в пределах $(0,8 \div 1,5) \cdot 10^3$. Фоновые треки учитывались предварительным травлением детекторов до облучения.

Эффективность регистрации осколков деления трековыми детекторами определялась из опытов со спонтанно делящимися изотопами ^{252}Cf и ^{244}Cm . В результате обработки четырех серий измерений десяти мишеней ^{252}Cf и семи мишеней ^{244}Cm были получены следующие значения эффективности: для стекла $\varepsilon_1 = 0,396 \pm 0,004$ и для слюды $\varepsilon_2 = 0,812 \pm 0,010$. При определении эффективности