

Ошибка управления складывается из погрешности дискретности, пропорциональной квадрату шага ячейки h [7], ошибки измерения, вносимой датчиком потока нейтронов, и ошибки собственно регулятора, зависящей от его коэффициента усиления.

Естественно, при использовании описанного многоканального регулятора надобность в регуляторах интегральной мощности отсутствует.

В заключение автор выражает признательность Е. В. Филипчуку за обсуждение работы.

Поступила в Редакцию 22/V 1968 г.
В окончательной редакции 6/III 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Джеффри. В кн. «Тр. Первого международного конгресса ИФАК». Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 293.
2. R. Murray, C. Bingham, C. Martin. Nucl. Sci. and Engng, 18, 481 (1964).
3. У. Карплюс. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Г. Е. Пухов, К. Д. Жук. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. Киев, «Наукова думка», 1966.
5. М. А. Шульц. Регулирование энергетических ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
6. П. И. Попов, Е. В. Филипчук. «Атомная энергия», 6, 666 (1959).
7. П. Т. Потапенко. «Атомная энергия», 24, 340 (1968).

Определение углерода в сетчатой субструктуре урана методом активационной авторадииографии

А. А. БОЧВАР, П. Л. ГРУЗИН, Г. И. ТОМСОН, Ю. Ф. БАБЕНКОВА,
Ю. Я. КУРОЧКИН, В. М. МИНАЕВ, Ю. И. ПЕТРОВ

УДК 661.879.1

В уране при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении образуется сетчатая субструктура. Подробные исследования закономерностей ее формирования [1, 2] показали, что сетки, возникающие при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении, очерчивают границы зерен и субзерен β -фазы, и их образование зависит от скорости охлаждения. Образованы сетки либо частицами второй фазы, либо сегрегациями атомов примесей. В некоторых работах отмечалось, что в формировании сеток могут принимать участие как металлические примеси, такие, как хром, железо, алюминий [1, 2], так и примеси внедрения — углерод, азот, кислород [2, 3].

В работе [2] проводилась идентификация примесей в сетках методом электронной дифракции с использованием частиц, извлеченных из образцов при отделении реплик, а также металлографически по их поведению при травлении. Таким путем в сетках урана были обнаружены частицы UC и U_6Fe .

В описываемой работе для определения элементов, образующих сетчатую субструктуру в уране, был применен авторадииографический метод, который, по нашему мнению, позволяет получить более убедительные данные. Поскольку применение обычных методов авторадииографии затруднено ввиду собственной радиоактивности урана, возникла необходимость разработки метода активационной авторадииографии при радиоактивной матрице. Использование

в этом методе короткоживущих изотопов для целей авторадииографии позволяет и при наличии активной матрицы получать картину распределения интересующего элемента. Высокая чувствительность метода дает возможность идентифицировать примеси, содержащиеся в очень малых количествах. Анализ диаграмм состояния урана с основными его примесями, подробно изученных в области малых концентраций, показывает, что наиболее вероятно участие углерода в образовании сетчатой субструктуры в уране при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении.

Ниже приводятся результаты исследований по определению углерода в сетках методом активационной авторадииографии.

Материал и методика исследования *. Исследование проводилось на уране, очищенном электролитически до 99,98 вес.% и содержащем $(2-6) \cdot 10^{-3}$ вес.% углерода. Образцы диаметром 8 мм и толщиной 2 мм были изготовлены из прутков, отпрессованных в α -фазе, и подвергнуты отжигу или закалке.

Отжиг в γ -фазе проводится по следующему режиму: нагрев до $950^\circ C$, выдержка в течение 30 мин, охлаждение в печи со скоростью $\sim 10^\circ/min$. Закалка из γ -фазы предусматривала: нагрев до $950^\circ C$, выдержку в течение

* Подробное изложение методики активационной авторадииографии углерода в уране будет дано в отдельной статье.

30 мин, охлаждение в воде со скоростью $\sim 35^\circ/\text{сек}$. Нагрев образцов осуществлялся в вакууме $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Шлифы для металлографического исследования после механической полировки подвергались электрополировке при напряжении 40 в (для незамкнутой цепи) в растворе, состоящем из одной части хромовой и трех частей уксусной кислот.

Сетчатая субструктура выявлялась химическим травлением в кипящей смеси равных объемов азотной и уксусной кислот.

Для активации углерода в уране была выбрана реакция $\text{C}^{12}(d, n)\text{N}^{13}$. Активация проводилась в течение 10 мин дейтонами с энергией 2 Мэв. Образующийся изотоп азота N^{13} β -активен с периодом полураспада 10,08 мин, максимальная энергия β -частиц 1,185 Мэв. Расчеты показывают, что в результате отдачи сдвиг ядер изотопа N^{13} не превышает 0,1 мк, следо-

вательно, фиксируя методами автордиографии излучение азота N^{13} , можно получить распределение углерода в урановой матрице. Высокий выход реакции позволил в этих условиях облучения получать достаточную активность для уверенного автордиографирования образца.

Поскольку при данных условиях наведенная активность возникает в тонком поверхностном слое, отпадает необходимость в последующей специальной обработке активированных образцов. После облучения отполированная поверхность подвергалась дополнительной очистке и по истечении времени «охлаждения», необходимого для распада короткоживущих мешающих изотопов O^{15} и F^{17} , приводилась в контакт с ядерной фотоэмульсией. Время экспозиции составляло 3–10 мин. Почернение, создаваемое собственной радиоактивностью урана, при такой экспозиции практически отсутствует.

При выбранных условиях облучения кроме углерода активируются также атомы бора. Однако анализ γ -спектров показал, что при том незначительном количестве бора, которое имеется в исследуемых образцах, его активность не оказывает заметного влияния.

Результаты исследования. На рис. 1 представлены автордиограммы распределения углерода в отожженном и закаленном уране. Видно, что углерод не распределен равномерно в урановой матрице, а сосредоточен в определенных местах в виде сетки, похожей на сетку, наблюдаемую металлографически.

Для прямого доказательства присутствия углерода в сетках были сделаны автордиограммы и фотографии сетчатой субструктуры с одних и тех же участков образцов (рис. 2, 3). Видно, что картина распределения углерода на автордиограмме идентична контурам сетчатой субструктуры, выявленной металлографически.

Это означает, что элементам сетчатой субструктуры соответствуют области с высокой концентрацией углерода. Следовательно, углерод является одним из элементов, образующих сетчатую субструктуру в уране при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении.

Этот результат, полученный на чистом уране, по-видимому, справедлив и для урана с большим содержанием углерода и других примесей, в котором при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении также образуются сетки, хотя в этом случае получить качественные автордиограммы не удалось из-за большой наведенной активности крупных карбидных частиц.

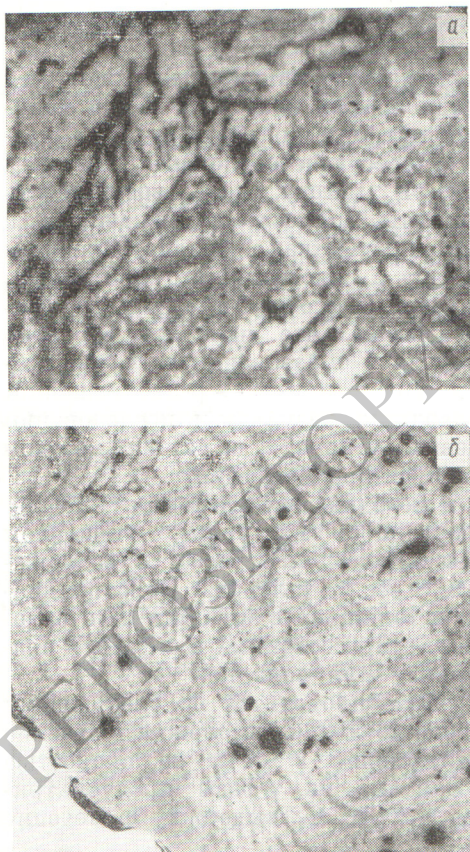


Рис. 1. Распределение углерода в отожженном (а) и закаленном (б) уране автордиограммы ($\times 40$).

Рис. 2. Распределение углерода и сетчатая субструктура в одних и тех же местах образцов отожженного урана ($\times 40$):

а, б — автордиографическая картина распределения углерода; в, г — металлографическая картина сетчатой субструктуры.

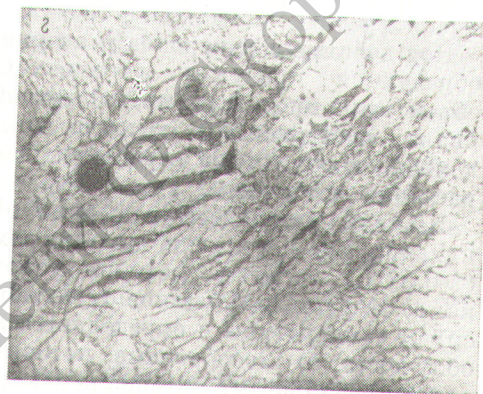
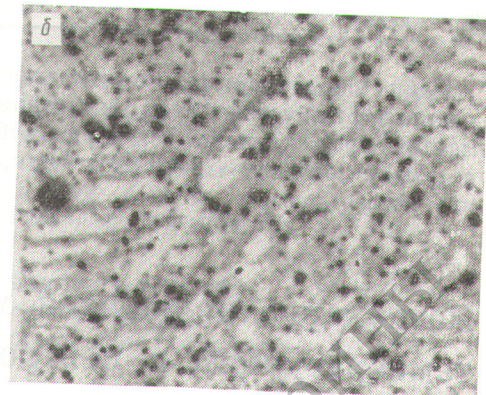
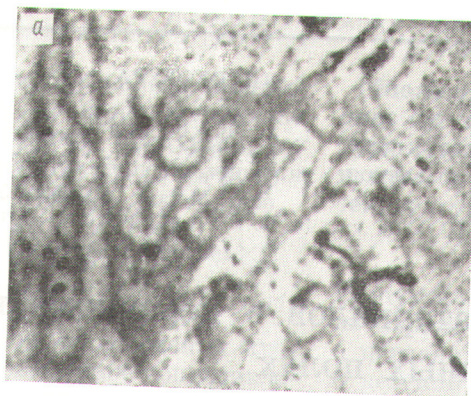
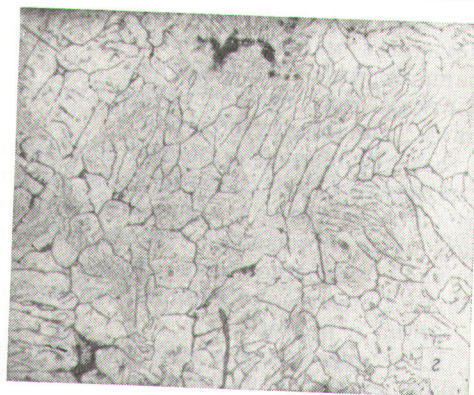
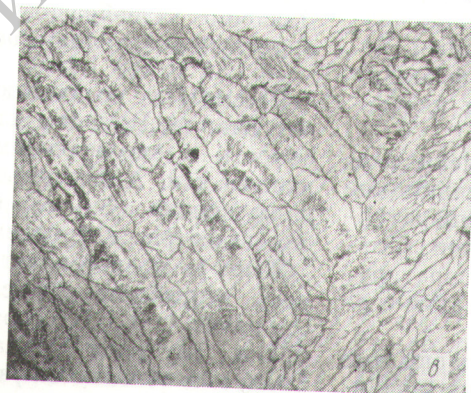
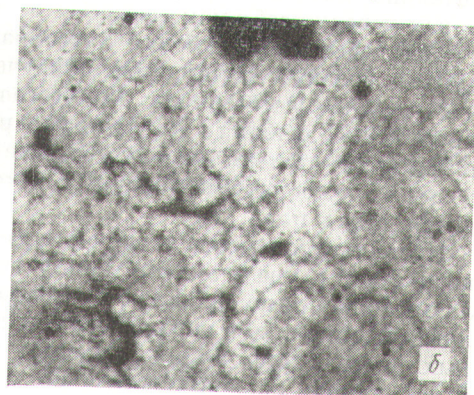


Рис. 3. Распределение углерода и сетчатая субструктура в одних и тех же местах образцов закаленного урана ($\times 40$):

а, б — автордиографическая картина распределения углерода; в, г — металлографическая картина сетчатой субструктуры.



Таким образом, методом активационной авто-
радиографии установлено, что одним из эле-
ментов, образующих сетчатую субструктуру
в уране при $\gamma \rightarrow \beta$ -превращении, является
углерод.

Поступила в Редакцию 9/IV 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Robillard, D. Calais, P. Lacom-
be. Rev. Met., 55, No. 9, 815 (1958).
2. C. Angerman, R. Houtoon. J. Less-Com-
mon Metals, 9, No. 5, 338 (1965).
3. B. Blumenthal. Trans. AIME, 203, 1199 (1955).

Распухание делящихся материалов в неравномерных температурных и нейтронных полях

Ю. И. ЛИХАЧЕВ, В. П. ЗВОНАРЕВ

УДК 620.192.6

Под действием нейтронов в ядерном горючем образуются продукты деления. Суммарный объем этих продуктов превышает объем материала, претерпевшего деление, что приводит к увеличению объема сердечника по мере возрастания выгорания.

По вкладу в процесс увеличения объема (распухание) при достаточно высоких температурах ($>0,5T_{пл}$) продукты деления подразделяются на: а) твердые, распухание от которых не зависит от температуры и определяется лишь дозой облучения; б) газообразные, которые после облучения делящегося материала некоторой (относительно небольшой) дозой собираются в его порах и ведут себя как газы.

Под действием давления газообразных продуктов деления начинается ползучесть окружающего пору материала. Вклад газообразных продуктов деления в процесс распухания в сильной степени зависит (кроме величины дозы) от температуры объема, в котором находится такая пора [1].

Поскольку скорость ползучести весьма резко возрастает с увеличением температуры, а давление тоже прямо зависит от температуры и выхода осколков, то в неравномерных температурных полях или полях делений распухание будет также неравномерным по объему, что связано с появлением макронапряжений, аналогичных макронапряжениям, вызванным неравномерным нагреванием тела, поскольку частицы тела препятствуют взаимным изменениям локальных объемов.

Уже условное в значительной степени рассмотрение [2] зависимости распухания цилиндрического твэла в неравномерном температурном поле показало, что внешние слои материала, имеющие более низкую температуру, могут существенно сдерживать распухание сердечника в целом.

Для современных реакторов характерны высокие тепловые нагрузки, вызывающие значи-

тельные температурные перепады по сечению твэла [3, 4]. Это требует учета неравномерного поля температур по сечению твэла для быстрых реакторов, а для тепловых — и неравномерного поля делений, связанного с «выеданием» нейтронного потока [5].

Ниже рассматривается распухание тел простой формы (цилиндр, сфера, пластина) в неравномерных температурных и нейтронных полях при достаточно высоких температурах ($>0,5T_{пл}$) и охлаждаемых наружных поверхностях. При этом предполагается, что: 1) отдельный элементарный объем тела содержит достаточно большое число полостей с газообразными продуктами деления и имеет постоянную температуру во всех точках, 2) для распухания справедлива модель «газовых пор» [1, 6], 3) существенный вклад вносят лишь деформации ползучести, причем при рассмотрении ползучести в элементарных расчетных ячейках используются константы для сплошного материала, а при анализе ползучести всего тела в целом — константы для пористого материала.

При таких же основных предпосылках решения задача о неравномерном распухании керамического топлива, сдерживаемом оболочкой [7].

Давление газообразных продуктов деления и распухание делящегося материала

Рассмотрим развитую стадию распухания материалов. Выделим из элементарного объема полость с окружающим ее делящимся материалом так, чтобы объемные доли полости ϵ_0 и материала ($1 - \epsilon_0$) были такими же, как для всего рассматриваемого объема.

Если b_v представляет собой долю делящихся ядер в решетке урансодержащего материала (b_v равно 1; 0,5; 0,7 соответственно для чистого урана, двуокиси урана, карбида урана при 100%-ном обогащении) и если за счет процессов