

## Механические свойства облученного урана

М. А. ВОРОБЬЕВ, Ю. М. ГОЛОВЧЕНКО,  
А. С. ДАВИДЕНКО, Б. А. БЫЧКОВ

УДК 621.039.543.4:621.039.548

Тепловыделяющий элемент реактора КС-150 Чехословацкой атомной электростанции А-1 представляет собой урановый пруток длиной 4 м и диаметром 6,3 мм в оболочке из магниевого сплава [1, 2]. Прутки собираются в отдельные сборки, по несколько десятков прутков в каждой. В качестве теплоносителя в реакторе используется углекислый газ под давлением, прокачиваемый через сборки сверху вниз. В связи с большой теплонапряженностью поверхности твэлов динамические нагрузки на прутки достигают больших значений. Максимальному динамическому воздействию потока теплоносителя подвергаются нижние концы прутков. Кроме того, в сердечниках твэлов возникают большие термические напряжения. Поэтому изучение влияния облучения на механические свойства урана представляет большой практический интерес.

В процессе разработки конструкции и технологии изготовления проводились радиационные испытания твэлов пруткового типа в специальной реакторной петле. Для механических испытаний использованы твэлы ранней серии опытов.

### Характеристика образцов

Сердечники твэлов экспериментальныхборок изготавливались из обогащенного металлического урана прессованием и волочением в  $\alpha$ -фазе с последующей закалкой из  $\beta$ -фазы в воду. Средняя величина зерна составляла 100—150 мк. Для изучения было выбрано семь прутков из четырехборок. Основные параметры радиационных испытаний приведены в табл. 1.

В таблице указано максимальное выгорание, достигнутое в средней части прутка. Выгорание для каждого образца, вырезанного из прутка, рассчитывалось в соответствии с экспериментальной кривой распределения плотности ней-

Основные параметры радиационных испытаний твэлов Таблица 1

Номер прутка	Диаметр прутка по урану, мм	Длительность испытаний, ч	Число остановок реактора	Максимальное выгорание, %
1	4	1500	92	0,093
2	4	2100	82	0,17
3	6	2100	82	0,17
4	4	3300	90	0,27
5	4	3300	90	0,27
6	4	3300	90	0,27
7	4	6000	220	0,40

тронов по высоте активной зоны реактора. Максимальная теплонапряженность урана в этих испытаниях составляла 12—15 квт/кг. Температура прутков изменялась по их длине: от 120—150° С на входе в сборку до 450—500° С в области максимальной температуры.

Как видно из таблицы, испытания каждой сборки твэлов отличались друг от друга длительностью, достигнутым выгоранием, числом термических циклов. Температурный режим во время испытаний был нестабильным из-за колебаний уровня мощности реактора, подпитки контура газом и т. п. Поэтому приводимые ниже температуры облучения образцов представляют собой средние расчетные значения.

### Исследование механических свойств облученных образцов

Изучение механических свойств облученного урана проводилось на образцах, вырезанных из гладких прутков, с которых предварительно снималась защитная оболочка.

**Испытания на растяжение.** Облученные и необлученные образцы испытывались на дистанционной разрывной машине УМД-5.

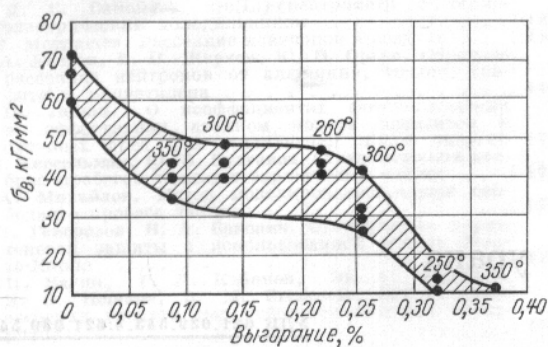


Рис. 1. Зависимость прочности при растяжении ( $T_{исп.} = 20^\circ \text{C}$ ) урана, облученного при температуре  $250\text{--}360^\circ \text{C}$ , от степени выгорания.

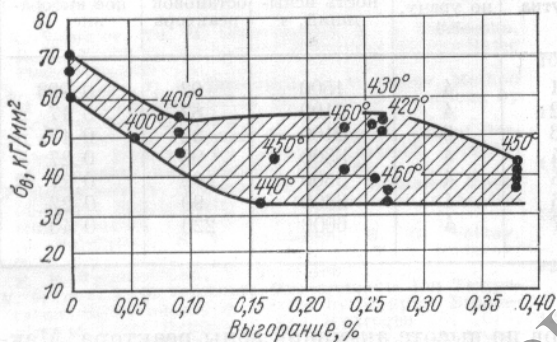


Рис. 2. Зависимость прочности при растяжении ( $T_{исп.} = 20^\circ \text{C}$ ) урана, облученного при температуре  $400\text{--}450^\circ \text{C}$ , от степени выгорания.

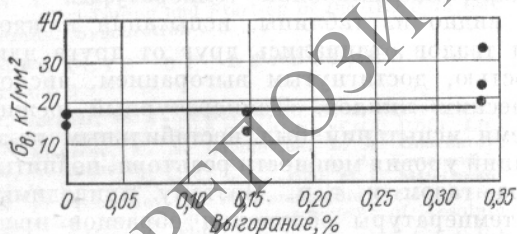


Рис. 3. Зависимость прочности при растяжении ( $T_{исп.} = 500^\circ \text{C}$ ) урана, облученного при температуре около  $500^\circ \text{C}$ , от степени выгорания.

Образцы с расчетной длиной 20—25 мм закреплялись в специальных пневматических захватах, снабженных самозакрывающимися клиновыми губками с насечкой. Скорость движения захвата составляла 1 мм/мин. Для испытаний при повышенных температурах на образцы наносился защитный слой никеля толщиной 20—25 мк. Нагрев до заданной температуры

осуществлялся в течение 10—15 мин, выдержка перед испытанием составляла 15 мин. В случае использования гладких образцов в местах соприкосновения насечки губок с образцом возникают большие контактные напряжения, кроме того, такие образцы трудно центровать в захватах. В результате могут возникать трудно учитываемые искажения, особенно для облученных образцов.

Обработать полученные результаты было трудно из-за различий в исходных характеристиках и условиях облучения образцов, а также из-за большого разброса результатов при малом числе образцов. Поэтому результаты испытаний всех образцов представлены на рис. 1—3 в виде общей зависимости прочности от степени выгорания.

Из полученных данных следует, что предел прочности при растяжении снижается после облучения при всех температурах, но наиболее резко — при  $250\text{--}360^\circ \text{C}$ . С увеличением выгорания (во всяком случае до 0,37%) прочность уменьшается. Прочность облученного урана, подвергнутого растяжению при высокой (около  $500^\circ \text{C}$ ) температуре, практически такая же, как необлученного урана.

### Испытания на сжатие

Эти испытания должны были подтвердить вывод о большей повреждаемости урана, облучаемого при  $350^\circ \text{C}$ , чем при  $450^\circ \text{C}$ . Испытания проводились на машинах УМД-5 и ММ-150Д при скорости движения захвата 1 мм/мин. Использовались образцы в виде цилиндров диаметром 4 мм и высотой 5—6 мм. Испытания при повышенных температурах проводились в вакууме. На рис. 4 и 5 приведены типичные диаграммы сжатия необлученных и облученных образцов. По оси абсцисс отложены истинные напряжения. Стрелки по ходу диаграмм означают остановку испытания без разрушения образца; стрелки, направленные вниз, означают окончание испытания при разрушении образца. Анализ этих диаграмм позволяет установить следующее.

Во-первых, у облученных образцов по сравнению с необлученными резко возрастает предел текучести при сжатии как при комнатной, так и при повышенной температуре.

Во-вторых, необлученные образцы в отличие от облученных не разрушались при всех температурах испытаний. Необлученные образцы претерпевают непрерывное деформационное упрочнение, сохраняющееся до значительных

(30% и более) деформаций, у облученных образцов это упрочнение значительно меньше, а в некоторых случаях практически отсутствует. Характерным для диаграмм сжатия облученных образцов является наличие максимума напряжения, предшествующего деформации, при которой происходит разрушение образца, или совпадающего с ней. Наличие максимума можно связать с началом внутризеренного микроразрушения. Если повреждаемость облученного урана оценивать по величине деформации, соответствующей этому максимуму напряжения, то подтверждается вывод о большей повреждаемости урана при 350° С, чем при 450° С.

Полученные результаты являются в некоторой степени неожиданными, если учесть сложившееся представление о хрупкости поликристаллического урана, облученного даже до незначительной степени выгорания [3—5]. Как видно из рис. 4 и 5, облученные до выгорания 0,38% в сложных термических условиях образцы урана сохраняют способность к пластической деформации до 7% и более. По-видимому, объяснение этого факта следует искать не только в различии напряженного состояния при растяжении и сжатии [6], но и в особенностях накопления дефектов в поликристаллическом уране при облучении.

### Испытания на усталость

Испытания проводились на машине УКИТ-6000 по схеме кручения консольно закрепленного образца, на свободный конец которого подвешен неподвижный груз. Образцы имели диаметр 4 мм. Расстояние от точки заземления образца до точки приложения нагрузки составляло 25 мм. Испытания проведены при комнатной температуре. Результаты представлены в табл. 2.

Поскольку испытано ограниченное число образцов, трудно сделать количественную оценку полученных результатов. Тем не менее видно, что облучение ускоряет разрушение металла при усталостных испытаниях.

### Обсуждение результатов и выводы

Несмотря на большой разброс экспериментальных точек, определенно можно утверждать, что с возрастанием глубины выгорания предел прочности при растяжении снижается при всех температурах облучения. При сопоставимых уровнях выгорания более резкое снижение прочности наблюдается на образцах, облученных при температурах 250—350° С. Испытания на усталость и сжатие в общем подтверждают эти результаты.

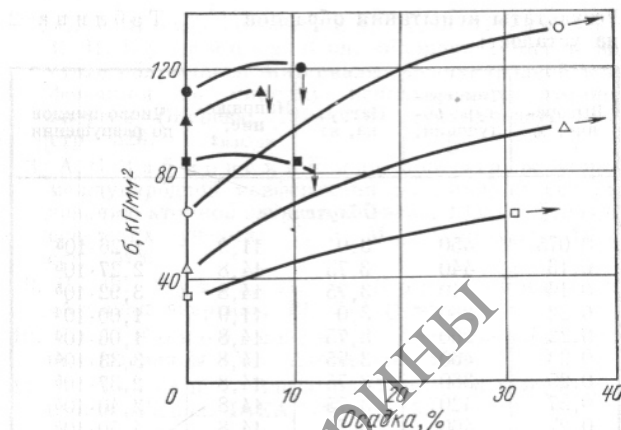


Рис. 4. Диаграммы сжатия необлученных и облученных ( $T_{обл.} = 350^{\circ}C$ ; выгорание 0,38%) образцов из прутка № 7:

Необлученные	Облученные	$T_{исп} = 20^{\circ}C$
○	●	100° C
△	▲	200° C
□	■	

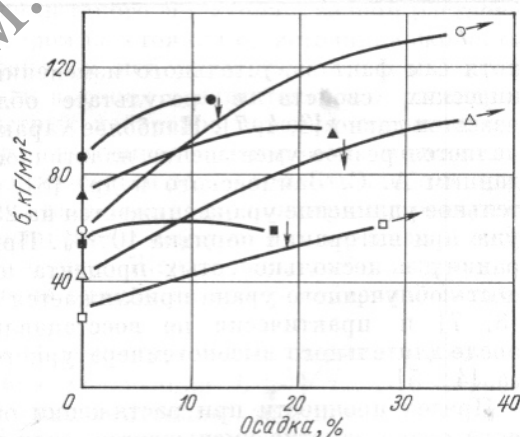


Рис. 5. Диаграммы сжатия необлученных и облученных ( $T_{обл.} = 450^{\circ}C$ ; выгорание 0,35%) образцов из прутка № 7:

Необлученные	Облученные	$T_{исп} = 20^{\circ}C$
○	●	100° C
△	▲	250° C
□	■	200° C
—	—	

ставимых уровнях выгорания более резкое снижение прочности наблюдается на образцах, облученных при температурах 250—350° С. Испытания на усталость и сжатие в общем подтверждают эти результаты.

В литературе нет систематических данных о зависимости механических свойств урана от температуры облучения и глубины выгорания,

Результаты испытания образцов на усталость

Таблица 2

Выгорание, %	Температура облучения, °С	Нагрузка, кг	Напряжение, кг/мм <sup>2</sup>	Число циклов до разрушения
<i>Облученные</i>				
0,075	450	3,0	11,9	1,26·10 <sup>5</sup>
0,16	440	3,75	14,8	2,27·10 <sup>5</sup>
0,16	440	3,75	14,8	3,92·10 <sup>5</sup>
0,22	260	3,0	11,9	1,00·10 <sup>4</sup>
0,22	260	3,75	14,8	1,06·10 <sup>4</sup>
0,23	460	3,75	14,8	3,33·10 <sup>4</sup>
0,25	360	3,75	14,8	2,37·10 <sup>5</sup>
0,27	420	3,75	14,8	3,40·10 <sup>5</sup>
0,27	460	3,75	14,8	4,50·10 <sup>5</sup>
0,40	430	3,75	14,8	2,38·10 <sup>5</sup>
<i>Необлученные</i>				
—	—	3,75	14,8	3,07·10 <sup>6</sup>
—	—	3,75	14,8	3,15·10 <sup>6</sup>
—	—	3,75	14,8	2,13·10 <sup>6</sup>
—	—	3,75	14,8	1,56·10 <sup>6</sup>
—	—	3,75	14,8	3,17·10 <sup>6</sup>

хотя сам факт значительного изменения механических свойств в результате облучения известен давно [3, 4, 7]. Наиболее характерным является резкое уменьшение пластичности. По данным А. С. Займовского и др. [8], относительное удлинение урана снижается на 25—30% уже при выгорании порядка 10<sup>-5</sup>%. При выгораниях в несколько сотых процента пластичность облученного урана приближается к нулю [3, 7] и практически не восстанавливается после длительного высокотемпературного отжига [4, 5].

Предел прочности при растяжении облученного урана заметно уменьшается, если выгорание превышает 0,01% [3, 7]. Только при очень малой дозе облучения наблюдалось некоторое повышение предела прочности [8].

С. Т. Конобеевский и др. [7] отмечали, что снижение прочности объясняется наличием значительного числа внутренних трещин, возникающих в поликристаллическом металле при облучении. Это подтверждалось как металлографическим исследованием, так и тем, что пластичность и прочность не восстанавливаются отжигом облученных образцов [5]. В то же время монокристалл, облученный до выгорания 0,16%, еще обладает значительной пластичностью [9].

Сопоставляя результаты испытаний монокристаллов и поликристаллического урана, можно

прийти к выводу, что снижение прочности и пластичности вызвано в основном явлениями, происходящими на границах зерен. Вследствие радиационного роста между различно ориентированными зернами во время облучения возникают напряжения, скорость нарастания которых пропорциональна скорости роста. Это должно приводить к возникновению на границах зерен микротрещин, ослабляющих металл.

Полученные данные о прочности при растяжении, очевидно, можно объяснить на основе этих соображений, развитых С. Т. Конобеевским [10]. Металлографическое изучение образцов показало, что в области температур 250—350°С структура облученного урана практически не выявляется, что свидетельствует об интенсивном радиационном росте. Однако трещины по границам зерен в этой области температур не наблюдаются даже при электронно-микроскопическом изучении с разрешением 0,01 мк. Это может свидетельствовать либо о том, что трещины слишком малы и не выявляются с помощью применяемых методов, либо о том, что ослабление границ зерен происходит за счет вакансионных микропар, образующихся в результате усилий, возникающих между различно ориентированными зернами в процессе облучения. Влияние термических циклов, по-видимому, играет второстепенную роль, так как оно должно больше проявляться в области высоких температур [11]. Относительно высокая пластичность облученного урана при сжатии, очевидно, свидетельствует о том, что разупрочнение обусловлено зернограницными дефектами, а не накоплением радиационных дефектов в теле зерна. Поскольку границы зерен ослаблены, то при сжатии «работает» тело зерна, и его пластичность определяет пластичность всего образца.

С технологической точки зрения полученные результаты являются удовлетворительными, поскольку область максимального разупрочнения урана под облучением не совпадает с областью максимальных динамических нагрузок на твэл. Причиной снижения прочности и пластичности облученного урана, по-видимому, являются зернограницные дефекты типа микротрещин и вакансионных микропор с размерами менее 0,01 мк, образующиеся в результате взаимодействия различно ориентированных зерен в процессе облучения. Температурная зависимость этого эффекта требует дальнейшего изучения.

Поступила в Редакцию 14/1 1969 г.  
В окончательной редакции 25/VII 1969 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Христенко и др. «Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Доклады советских ученых. Т.З.М., Атомиздат, 1959, стр. 655.
2. Е. А. Коробейников. «Атомная энергия», 23, 479 (1967).
3. С. Н. Пейн, Д. Г. Киттел. В кн. «Металлургия ядерной энергетики и действие облучения на материалы». Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. М., Metallurgizdat, 1956, стр. 642.
4. R. Hueshen, R. Hemper, N. Kelly. Proc. Nucl. Eng. Conference. Vol. 2, 1957, p. 163.
5. O. Shaw. Nucl. Engng, 5, 214 (1960).
6. Я. Б. Фридман. Механические свойства металлов. М., Оборонгиз, 1952.
7. С. Т. Конобеевский, Н. Ф. Правдюк, В. И. Кутайцев. В кн. «Ядерная химия и действие облучения». Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). М., Госхимиздат, 1958, стр. 526.
8. А. С. Займовский и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Доклады советских ученых. Т. З. М., Атомиздат, 1959, стр. 573.
9. П. Ф. Бутра, И. А. Коробейников. «Атомная энергия», 19, 372 (1965).
10. С. Т. Конобеевский. Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967.
11. R. Bellamy. Radiation damage in reactor materials. Vienna, IAEA, 1963, p. 59.

## Исследование метода анализа делящихся веществ в растворах с помощью подсветки нейтронами

В. К. БОГАТЫРЕВ, Б. Г. ДУБОВСКИЙ, В. В. ФРОЛОВ

УДК 539.173.84

В связи с быстрым развитием технологии переработки ядерного горючего продолжают совершенствоваться и вновь разрабатываться различные методы ядернофизического контроля концентрации делящихся веществ. К приборам такого типа предъявляются весьма сложные требования, например бесконтактность, дистанционность и непрерывность анализа в условиях, когда датчик-концентрамер работает в присутствии высокой  $\gamma$ -активности и нейтронного фона спонтанно делящихся изотопов и фона ( $\alpha$ ,  $n$ )-реакций. Эти особенности ограничивают чувствительность одних методов и делают невозможным применение других (основанных на  $\gamma$ -спектрометрии).

В настоящей работе изложены экспериментальные данные по измерению концентрации  $U^{235}$  с помощью подсветки раствора нейтронами от  $Sb - Be$ -источника и регистрации быстрых нейтронов деления. В работе [1] предлагается использовать подсветку нейтронами от  $Sb - Be$ -источника для анализа выгорания урана в твэле, причем для регистрации нейтронов деления была выбрана ториевая камера. Практически данный метод измерения количества  $U^{235}$  является бесфоновым, так как ториевая камера не чувствительна к нейтронам  $Sb - Be$ -источника и  $\gamma$ -излучению. Однако для измерений малых концентраций  $U^{235}$  ( $\sim 10$  мг/л) при разумной интенсивности источника  $Sb^{124}$  эффективность ториевой камеры недостаточна.

В качестве детектора в настоящей работе использовались детекторы на основе  $BF_3$  и  $He^3$ ,

окруженные слоем парафина и кадмием. При размещении такого детектора в водном растворе на некотором расстоянии от источника скорость счета фоновых нейтронов резко падает, в то время как высокая чувствительность регистрации быстрых нейтронов деления сохраняется.

### Выбор источника нейтронов подсветки.

Источник подсветки должен давать наибольшую плотность тепловых нейтронов при наименьшей длине релаксации нейтронов с первоначальной энергией в воде. Желательно, чтобы излучение раствора не влияло на выход нейтронов источника.

Согласно многогрупповой теории, в случае если длина релаксации  $L > \sqrt{\tau_{\text{тепл}}}$  ( $\tau$  — возраст тепловых нейтронов), то отношение потока тепловых нейтронов к надтепловому возрастает при удалении от источника, что соответствует условию быстрого замедления. В работе [2] приведены характеристики некоторых источников, длины релаксации нейтронов в воде в зависимости от энергии  $E_0$  и возраст  $\tau_{\text{тепл}}$  для воды как функция энергии нейтронов источника. При  $L = 2,78$  см для воды соотношению  $\sqrt{\tau_{\text{тепл}}} < L$  удовлетворяют нейтроны источника с энергией  $E_0 < 300$  кэв. Минимальное значение  $\tau_{\text{тепл}}$  соответствует максимальной плотности тепловых нейтронов. Если  $E_0 > 500$  кэв, то пространственное распределение определяется быстрой группой нейтронов и удаление детектора от источника не дает заметной дискриминации фоновых отсчетов при регистрации нейтронов деления.