

Лекция 24.

Цель.

Познакомить слушателей с результатами экспериментальных исследований влияния деформации ползучести на выход ГПД. Предложить диффузионно-конвективную модель для описания выхода ГПД при наличии пластической деформации. Поставить и решить стационарную задачу. Сопоставить аналитическое решение с экспериментом.

План.

1. Результаты экспериментальных исследований влияния деформации ползучести на выход ГПД.
2. Диффузионно-конвективную модель для описания выхода ГПД при наличии пластической деформации.
3. Постановка и решение стационарной задачи.
4. Сопоставление аналитического решения с экспериментом.

Выход ГПД при ползучести диоксида урана.

В восьмидесятые годы прошлого века на ИРТ-МИФИ выполнялась программа сотрудничества с Францией по исследованию пластических свойств ядерного топлива в радиационных условиях.

Эксперименты по исследованию высокотемпературной ползучести в инициативном плане сопровождались регистрацией газов-продуктов деления (ГПД).

На образцах технологии DCI, обладающих повышенной пластичностью и низкими значениями выходов ГПД, были получены нетривиальные результаты.

При малых установившихся скоростях деформации ползучести выход ГПД был ниже стационарного выхода при отсутствии деформации и превышал его при больших скоростях.

Этот эффект был менее заметен на образцах отечественного топлива из диоксида урана штатной технологии ВВЭР.

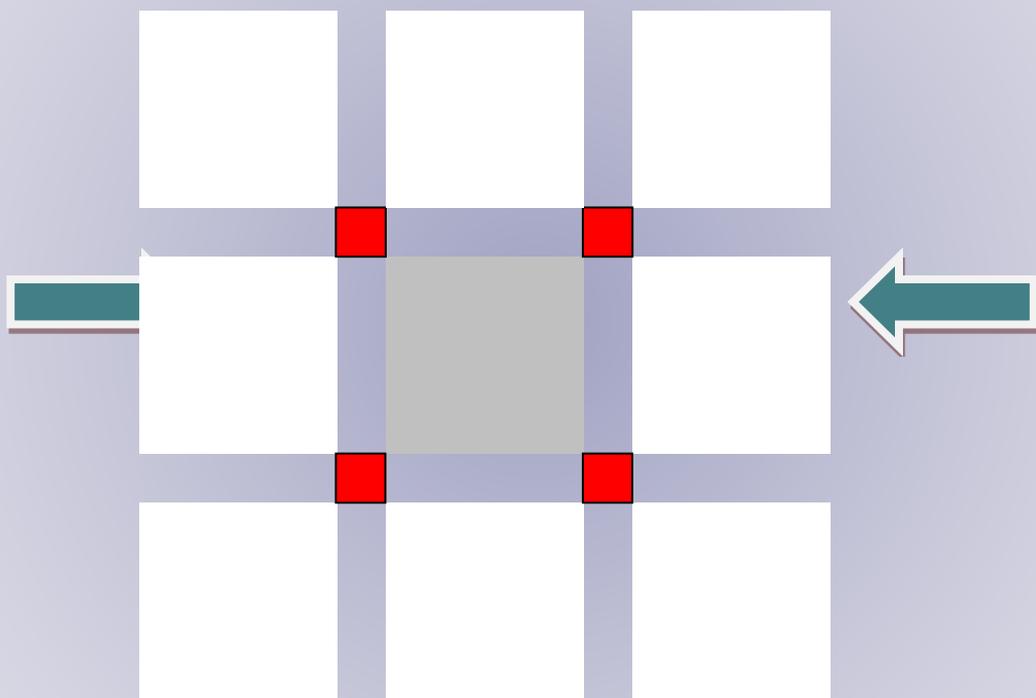
Диффузионно-конвективная модель.

Объяснить полученные результаты можно с помощью следующей модели:

- при высоких температурах в эксперименте (1400 К-1700 К) ГПД диффундируют в твердом теле по дефектам кристаллической решётки внутри зерна.
- в результате приложенного механического напряжения возникает направленное движение дефектов, приводящее к пластической деформации материала.
- движение ГПД описывается уравнением диффузионно-конвективного переноса.
- пластическая деформация образца в основном определяется деформацией зерна.
- эмиссия ГПД из зерна полностью определяет выход газа из поликристаллического образца в предположении, что коэффициент зернограничной диффузии значительно больше объёмного коэффициента.

$$R = (1 - k)R_c + kR_p$$

Диффузионно-конвективная модель. Схема нагружения пористого образца.



- в поликристаллическом пористом образце при воздействии **внешней сжимающей нагрузки** на поверхности зерна возникают зоны с деформацией сжатия (плотный контакт между зернами) и зоны с **деформацией растяжения (ослабленный пористостью контакт между зернами)**, соответственно потоки дефектов направлены из зоны с деформацией сжатия и в зону с **деформацией растяжения**, в этом случае суммарный поток ГПД с поверхности зерна можно представить в виде:

$$R = (1 - k)R_c + kR_p \quad (1) ,$$

где R_c , R_p - потоки газа с поверхности зерна при деформациях сжатия и растяжения.

S , S_p , $k = S_p / S$ - площадь поверхности зерна, **площадь зоны растяжения, доля поверхности растяжения.**

Диффузионно-конвективная модель. Постановка стационарной задачи

Для количественного определения выхода ГПД рассмотрим стационарное диффузионно-конвективное уравнение для полупространства с нулевыми граничными условиями, предполагая, что коэффициент диффузии весьма мал и основное падение концентрации происходит в тонком поверхностном слое зерна:

$$d \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \pm u \frac{\partial N}{\partial x} - \lambda N + b = 0, \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)_{x \rightarrow \infty} = 0, N_{x=0} = 0 \quad (2) .$$

где

N – концентрация изотопа, d – коэффициент диффузии, u – скорость движения дефектов, λ – постоянная распада, b – плотность источников газа.

Диффузионно-конвективная модель. Решение стационарной задачи

Решение системы (2) с учётом соотношения (1) можно выразить в следующем виде:

$$W = \frac{R}{R_0} = \sqrt{1 + V^2} - (1 - 2k)V \quad (3)$$

Безразмерная скорость движения дефектов дается выражением:

$$V = \frac{u}{2\sqrt{\lambda d}}. \quad (4)$$

Выход с поверхности зерна при $V=0$ равен:

$$R_0 = b\sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (5)$$

Диффузионно-конвективная модель. Анализ стационарной задачи

Соотношение (3) дает возможность определить эффект влияния пластической деформации на выход ГПД:

$$\begin{aligned} W < 1 & \text{ при } 0 < k < 0.5 \text{ и } 0 < V < V_1, \\ W > 1 & \text{ при } 0 < k < 0.5 \text{ и } V > V_1, \end{aligned}$$

где $V_1 = \frac{2(1-2k)}{1-(1-2k)^2}$;

$$W_{\min} = \sqrt{1 - (1 - 2k)^2} \quad \text{при} \quad V_{\min} = \frac{1 - 2k}{\sqrt{1 - (1 - 2k)^2}}$$

Диффузионно-конвективная модель. Сопоставление с экспериментом.

Для сопоставления экспериментальных результатов с уравнением (3) выразим величину V через параметры, регистрируемые в эксперименте:

- **скорость движения дефектов u** пропорциональна скорости ползучести:

$$u \sim \dot{\epsilon} L, \quad (6)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость ползучести, L – линейный размер зерна.

- **относительный выход** (отношение выходящего на внешнюю поверхность газа к образующемуся внутри объёма зерна- утечка) при $u=0$ определяется экспериментально и равен:

$$F_0 = \frac{R_0 S}{b \vartheta} \quad (7)$$

где S , ϑ - поверхность и объём зерна.

Используя систему уравнений (4,5,6,7) для определения V получим:

$$V = \frac{\epsilon}{2F_0 \lambda} \left(\frac{LS}{\vartheta} \right) \quad (8)$$

В уравнении (8) выражение в скобках порядка единицы.

Диффузионно-конвективная модель.
Сопоставление с экспериментом.

Сопоставление экспериментальных результатов по выходу $^{88}\text{Kг}$ с уравнением (3) при ползучести диоксида урана в температурном интервале 1400-1800 К и механическом напряжении на образце от 0 до 40 МПа проведены с использованием стандартной программы Statistica 6, нелинейной её части.

Определялся параметр k – доля поверхности растяжения.

На рисунке представлены результаты сопоставления при $k = 0,06$.

Полученное значение несколько ниже консервативной оценки [8] по соотношению:

$$k = a \sqrt[3]{(\xi p)^2}$$

где a - величина порядка единицы, зависит от выбранной геометрии зерна (типа многогранника),

ξ - доля пористости сосредоточенная по границам зерен,
 p - пористость.

Если принять $a = \xi = 1$ (консервативная оценка), то для топлива из диоксида урана $k = 0,074 - 0,17$ при изменении пористости $p = 0,02 - 0,07$.

Диффузионно-конвективная модель. Заключение.

В решении задачи по определению параметров переноса ГПД в диоксиде урана в процессе его облучения в ядерном реакторе положен весьма общий подход

- феноменологическое рассмотрение процесса диффузии продуктов деления.

Этот принцип изначально предполагает использование математического аппарата в однородной среде, с учетом фундаментальных физических законов, с последующей опорой на экспериментальные результаты для нахождения физических параметров вещества.

Полученные таким образом физические параметры могут быть в последствии использованы для решения более сложных практических задач.

Представленные результаты обработки экспериментального материала позволяют определить

радиационно-стимулированные параметры переноса,

существенно отличающиеся от соответствующих аналогов,

получаемых вне поля облучения. Эти параметры могут быть использованы в программах расчета твэлов ядерных реакторов и при рассмотрении нестационарных явлений в твэлах.