

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.54

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК ТВЭЛОВ

Аверин С.И., Алымов М.И., Гнедовец А.Г.

(Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

В процессе эксплуатации твэлов происходит разрушение топливных таблеток в результате появления окружных растягивающих термических напряжений. Одним из путей снижения этих напряжений является создание градиентной микроструктуры таблетки из диоксида урана в целях изменения коэффициента теплового расширения по радиусу. Согласно многочисленным данным [1—4] коэффициент теплового расширения некоторых материалов увеличивается с уменьшением размера зерна. Если это справедливо для диоксида урана, то задача сводится к обеспечению градиентной микроструктуры топливных таблеток.

Известно, что размер зерна спекаемого диоксида урана зависит от температуры спекания [5, 6]. Спекание топливных таблеток из диоксида урана в условиях градиента температуры позволит создать микроструктуру с большим размером зерна в центре и малым размером зерна на периферии. При такой градиентной микроструктуре коэффициент теплового расширения будет зависеть от радиуса, причем в центре он будет в 2—3 раза меньше, чем на периферии. Градиентное распределение зерна по радиусу таблетки можно создать методом порошковой металлургии: спеканием в условиях градиента температуры или введением активаторов роста зерен в центральную часть таблетки и ингибиторов роста зерен во внешнюю часть, что потребует модернизации технологии.

Расчеты возникающих в процессе эксплуатации термических напряжений в топливной таблетке с градиентной микроструктурой на основании совместного решения задач термоупругости и теплопроводности позволяют получать количественные данные о напряжениях в телах различной формы при конкретном температурном поле. В этой области выполнены обширные исследования [7, 8]. Но для качественного анализа и сопоставления роли различных факторов в формировании напряженного состояния в топливной таблетке желательнее получить хотя бы приближенные аналитические выражения для компонентов на-

пряжений в рамках классических теорий упругости и теплопроводности [8, 9].

Температурные радиальные σ_r и окружные напряжения σ_θ в топливной таблетке рассчитываются по формулам для диска постоянной толщины с отверстием [8]:

$$\sigma_r(r) = E_0 \left[F(b) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - F(r) \right];$$

$$\sigma_\theta(r) = E_0 \left[F(b) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + F(r) - \alpha(r)T(r) \right],$$

где

$$F(r) = \frac{1}{r^2} \int_a^r r \alpha(r) T(r) dr; \quad F(b) = \frac{1}{b^2} \int_a^b r \alpha(r) T(r) dr;$$

E_0 — модуль упругости; $\alpha(r)$ — коэффициент линейного теплового расширения; a, b — внутренний и внешний радиус цилиндрической таблетки соответственно.

Распределение температуры по радиусу цилиндрической таблетки с отверстием и объемными источниками тепла рассчитывается по уравнению теплопроводности [9]

$$T(r) = T_b + \frac{a^2 Q}{2\lambda} \ln \left(\frac{r}{b} \right) + \frac{Q}{4\lambda} (b^2 - r^2), \quad (1)$$

где $T_b = T(b)$ — температура на внешней стенке таблетки; Q — мощность объемных источников тепла; λ — коэффициент теплопроводности.

Топливную таблетку без температурных напряжений теоретически создать можно. Для этого необходимо выполнение условия $\alpha(r)T(r) = \text{const}$, т.е. коэффициент теплового расширения $\alpha(r)$ должен изменяться по радиусу обратно пропорционально температуре $\alpha(r) \sim 1/T(r)$. На практике изготовить такую таблетку с оптимальным распределением коэффициента теплового расширения вряд ли возможно, поскольку температура изменяется с радиусом сложным образом. Поэтому численно оценим напряженное состояние для простейшего случая с линей-

ным законом радиального изменения коэффициента теплового расширения и характерного температурного поля (1).

Для линейного закона изменения коэффициента теплового расширения

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 r \tag{2}$$

и поля температуры (1) получается следующее аналитическое выражение для функции $F(r)$:

$$F(r) = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{1}{2} C_1 (r^2 - a^2) + \frac{1}{3} C_2 (r^3 - a^3) + \frac{1}{4} C_3 (r^4 - a^4) + \frac{1}{5} C_4 (r^5 - a^5) + \frac{1}{2} C_5 \left[r^2 \ln \left(\frac{r}{b} \right) - a^2 \ln \left(\frac{a}{b} \right) - \frac{1}{2} (r^2 - a^2) \right] + \frac{1}{3} C_6 \left[r^3 \ln \left(\frac{r}{b} \right) - a^3 \ln \left(\frac{a}{b} \right) - \frac{1}{3} (r^3 - a^3) \right] \right\}$$

с постоянными коэффициентами

$$C_1 = \alpha_0 \left(T_b + \frac{Qb^2}{4\lambda} \right); \quad C_2 = \alpha_1 \left(T_b + \frac{Qb^2}{4\lambda} \right); \quad C_3 = -\frac{\alpha_0 Q}{4\lambda};$$

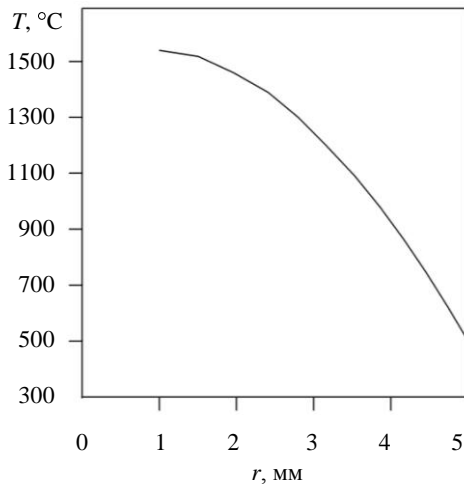
$$C_4 = -\frac{\alpha_1 Q}{4\lambda}; \quad C_5 = \frac{\alpha_0 Q a^2}{2\lambda}; \quad C_6 = \frac{\alpha_1 Q a^2}{2\lambda}.$$

Коэффициенты α_0, α_1 уравнения (2) связаны с коэффициентами теплового расширения на внутренней $\alpha(a)$ и внешней поверхности $\alpha(b)$ таблетки как

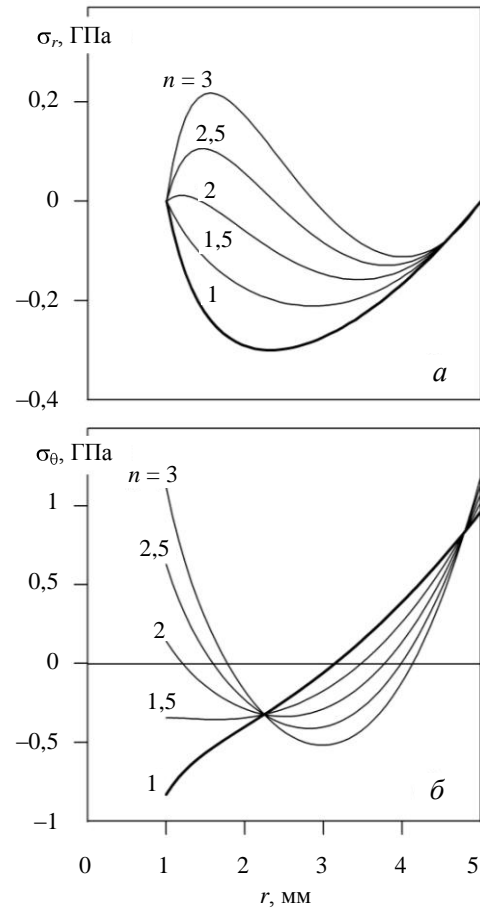
$$\alpha_0 = \alpha(a) [1 - a(n-1)/(b-a)];$$

$$\alpha_1 = \alpha(a)(n-1)/(b-a); \quad n = \alpha(b)/\alpha(a).$$

Расчеты проводили для следующих параметров таблетки из диоксида урана: $E_0 = 164,5$ ГПа, $\alpha(a) = 10,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, $a = 1$ мм, $b = 5$ мм, $T_b = 500$ °С, $\lambda = 3$ Вт/(м·°С), $Q = 600$ МВт/м³. Для установившегося температурного поля в таблетке (рис. 1) пространственное распределение окружных и радиальных температурных напряжений существенным образом



Р и с. 1. Радиальное распределение температуры в таблетке



Р и с. 2. Влияние перепада коэффициента теплового расширения на радиальные (а) и круговые напряжения (б) в топливной таблетке (цифры у кривых $\alpha(b)/\alpha(a)$)

зависит от перепада коэффициента теплового расширения (рис. 2), определяемого размерами зерен материала. В случае безградиентной микроструктуры растягивающие окружные напряжения действуют на значительной части таблетки, их амплитуда достигает ~1 ГПа на ее периферии. На рис. 2 видно, что создание градиентной микроструктуры может как улучшить, так и ухудшить напряженное состояние. Оптимальное повышение трещиностойкости топливных таблеток достигается при создании градиентной зернистой структуры, обеспечивающей перепад коэффициента теплового расширения по радиусу примерно в 2 раза ($n = \alpha(b)/\alpha(a) \sim 2$). В этом случае в 2 раза уменьшается амплитуда радиальных напряжений, а также сужается область действия и значительно снижается интенсивность растягивающих окружных термических напряжений.

В заключение отметим, что экономия в результате повышения срока службы таблеток и твэлов значительно превысит расходы на модернизацию технологии. Наряду с этим необходимо оценить влияние уменьшения размера зерен диоксида урана на газоразделение и давление внутри твэла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 53 с.
2. Крынецкий И.Б., Гижевский Б.А., Наумов С.В., Козлов Е.А. Размерный эффект теплового расширения наноструктурного оксида меди. — Физика твердого тела, 2008, т. 50, вып. 4, с. 723—725.
3. Zhao Y., Zhang K., Lu K. Structure characteristics of nanocrystalline element selenium with different grain sizes. — Phys. Rev. B., 1997, v. 56, p. 14322—14329.
4. Sui M., Lu K. Thermal expansion behaviour of nanocrystalline Ni—P alloys of different grain sizes. — Nanostr. Mater., 1995, v. 6, p. 651—654.
5. Song K., Kim K., Kang K., Jung Y. Grain size control of UO_2 pellets by adding heat-treated U_3O_8 particles to UO_2 powder. — J. Nucl. Mater., 2003, v. 317, p. 204—211.
6. Yang J., Song K., Lee Y. e.a. Microwave process for sintering of uranium dioxide. — Ibid., 2004, v. 325, p. 210—216.
7. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1995. 336 с.
8. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.
9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.

Поступило в Редакцию 29.09.10

УДК 621.039.548

АГРЕГАТ ДЛЯ ОТРЕЗКИ ТОПЛИВНОЙ ЧАСТИ ОТРАБОТАВШЕЙ ТВС

Ладейнов К.А., Поляков И.В., Швецов С.А. (ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

Отработавшие ТВС после извлечения из активной зоны реактора помещают в ячейки специальных контейнеров или хранилищ, которые являются дорогостоящим оборудованием. Можно двукратно увеличить число топливных частей ТВС, хранимых в ячейках, путем отделения высокоактивной топливной части ТВС от низкоактивной подвески и размещения топливных частей в два яруса по высоте (рис. 1). Хранение и утилизация низкоактивных подвесок не вызывают трудностей, а полное использование полезного объема контейнеров и хранилищ позволяет получить значительный экономический эффект, поскольку исключаются затраты на создание дополнительных контейнеров и хранилищ и снижаются

на транспортировку контейнеров с топливными частями.

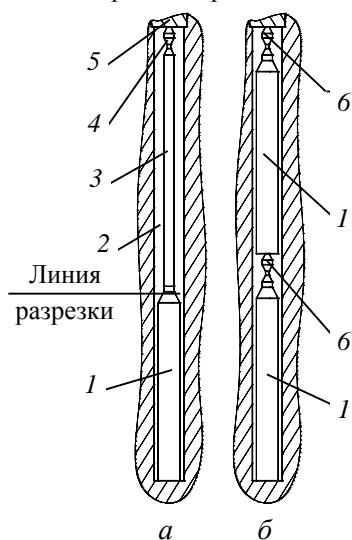
В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкторская, технологическая, эксплуатационная документация и изготовлен агрегат для отделения топливной части ТВС ядерного реактора и подготовки к компактной двухъярусной упаковке. С 2003 г. такой агрегат используется в Атомфлоте при разрезке ТВС ядерных реакторов атомного ледокольного флота.

Агрегат дистанционно разрезает помещаемую в него ТВС дисковой фрезой, подвеска удаляется, на топливной части устанавливается и крепится технологический наконечник, аналогичный наконечнику подвески (рис. 2). Топливная часть извлекается из агрегата и поступает в ячейку контейнера или хранилища. При этом используется унифицированное оборудование для выгрузки ТВС из реактора.

В процессе эксплуатации агрегат обеспечивает необходимую радиационную защиту обслуживающего персонала, дистанционный контроль операций с помощью радиационно-стойкой телевизионной системы, сбор и удаление отходов разрезки, замену режущего инструмента, дезактивацию. Предусмотрена наладка агрегата для разрезки ТВС различных видов.

Агрегат выполнен компактным, поставляется в собранном виде и может быстро монтироваться на месте выполнения работ. Его габаритные размеры 1480×2330×2850 мм, масса 17,85 т.

Агрегат работает следующим образом. ТВС в перегрузочном контейнере устанавливается подъемным краном на плите 2 и центрируется с помощью направляющей воронки 7 над загрузочным отверстием. С помощью оператора открываются шиберы перегрузочного контейнера и агрегата. ТВС опускается в ампулу 14 до упора и фиксируется верхним и нижним механизмами крепления 10 и 12, приводимыми в



Р и с. 1. Отработавшая ТВС до (а) и после отрезки топливной части (б) в ячейке контейнера (хранилища): 1 — топливная часть ТВС; 2 — ячейка контейнера (хранилища); 3 — подвеска ТВС; 4 — наконечник подвески; 5 — пробка; 6 — технологический наконечник