

УДК 621.039.546.3:66.094.16.0015

## Исследование газотермической обработки твэлов АЭС для отделения сердечника от оболочки

МАРТИНОВСКИХ Г. П., АГЕЕНКОВ А. Т., АРДУАНОВ М. М., БОГАТОВ А. Ф., ВАЛУЕВ Е. М., САВЕЛЬЕВ В. Ф., ЧЕМЗОВ В. А., ЧЕЧЕТИН Г. И., ЯСТРЕБОВ Ю. В.

Удалению оболочек облученных твэлов посвящено большое число исследований, разработано много лабораторного и опытного оборудования для механических, химических, электрохимических, пирохимических, пирометаллургических и комбинированных методов [1].

Для удаления оболочек необлученных некондиционных твэлов обычно используют способы механической резки [2]. Они разрушают значительное число топливных брикетов, которые становятся непригодными для повторной загрузки, что значительно ухудшает технико-экономические показатели производства твэлов.

Цель настоящей работы — исследование способа обработки некондиционных твэлов ВВЭР и РБМК, позволяющего извлекать без разрушения топливные брикеты из оболочек.

За основу принят метод водородной обработки (гидрирования) твэлов [3—5], который существенно изменяет физико-химические и механические свойства оболочки из циркониевого сплава  $Zr + 1\% Nb$  [6, 7] и одновременно создает условия для свободного высыпания топливных брикетов за счет увеличения кольцевого зазора между сердечником (брикетами окисного топлива) и гидрированной оболочкой.

В предложенных условиях обработки [4] процесс гидрирования протекал очень интен-

сивно (рис. 1, кривая 1). Поглощение оболочкой свыше 30 мас.% водорода проходило в течение 10—15 мин. Это приводило к локальным перегревам оболочки и вызывало искривление твэлов, что препятствовало свободному перемещению топливных брикетов внутри оболочки. Кроме того, наблюдалось разрушение или раскалывание значительного числа брикетов.

Полнота насыщения водородом оболочки из циркониевого сплава на всей длине твэла (рис. 2, кривая 1) оказалась близка к предельной, соответствующей составу  $ZrH_2$ . Циркониевый сплав становился столь непрочным (рис. 3, область В), что оболочки легко разрушались при выгрузке из аппарата и транспортировании. Поэтому необходимо было подобрать такие параметры процесса водородной обработки, при которых исключались бы деформация твэлов в процессе гидрирования и механическое разрушение во время перегрузочных и транспортных операций.

Исследованиями установлено, что оптимальная концентрация водорода в оболочке составляет 0,7—1,2 мас. % (рис. 3, область А). Внедрение водорода в оболочку происходит при 650—700 °С и давлении водорода около 15 мм рт. ст. в течение 60 мин (рис. 1, кривая 2). Указанный режим гидрирования позволил также обеспечить кольцевой зазор между сердечником и оболочкой, достаточный для свободного извлечения топливных брикетов.

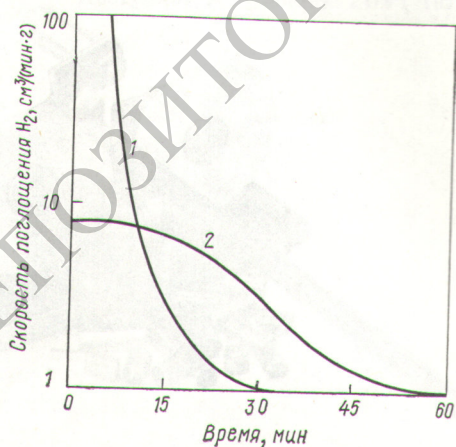


Рис. 1. Кинетика поглощения водорода оболочкой из сплава  $Zr + 1\% Nb$ :  
1, 2 — при 770, 700 °С и давлении водорода в аппарате  $200 \pm 500$ ; 10—30 мм рт. ст. соответственно

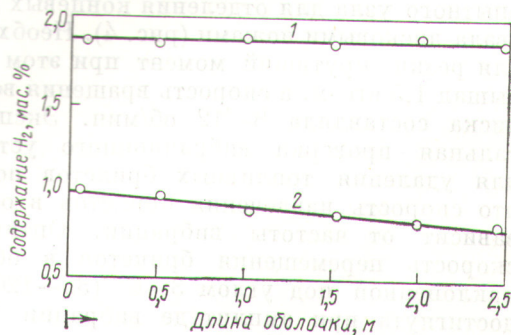
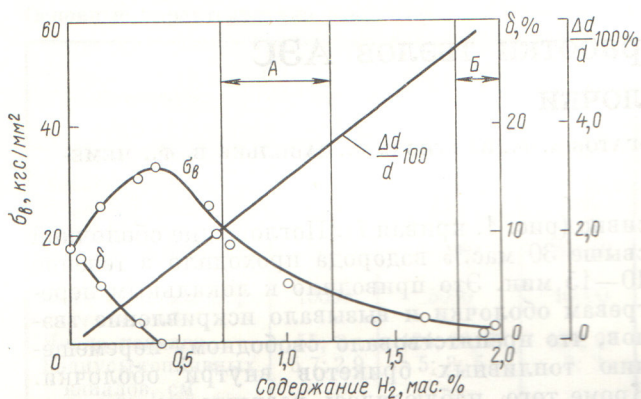


Рис. 2. Распределение водорода в оболочке из сплава  $Zr + 1\% Nb$  после насыщения в течение 60 мин: обозначения как на рис. 1, стрелка — место подачи водорода



Р и с. 3. Влияние содержания водорода на предел прочности при растяжении  $\sigma_v$ , относительном удлинении  $\delta$  сплава Zr + 1% Nb и увеличении диаметра оболочки  $\frac{\Delta d}{d} 100$

В опытах по одновременному гидрированию пучка твэлов заданная концентрация водорода по длине оболочек достигалась с точностью  $\pm 0,15$  мас.%, причем гидрирование оболочки при 700 °С уменьшается по мере удаления от места подвода газа (см. рис. 2, кривая 2). Однако даже при одностороннем торцовом подводе газа неравномерность гидрирования не превышает 0,3 мас.%. При подаче водорода со стороны торцов и в середине оболочки неравномерность насыщения не превышала  $\pm 0,1$  мас.%. Дальнейшая технология переработки твэлов

включает отделение концевых деталей, извлечение топливных брикетов из оболочки, измельчение охрупченной оболочки, дезактивацию и утилизацию лома оболочек. Для осуществления указанных технологических операций созданы и испытаны опытные устройства, выполнены исследования по дезактивации оболочек и удалению из них водорода.

Испытания подтвердили работоспособность опытного узла для отделения концевых деталей твэла дисковыми ножами (рис. 4). Необходимый для резки крутящий момент при этом не превышал 1,5 кгс·м, а скорость вращения ведущего диска составляла 8—12 об/мин. Экспериментальная проверка вибрационного устройства для удаления топливных брикетов показала, что скорость извлечения брикетов в основном зависит от частоты вибрации. Оптимальная скорость перемещения брикетов в оболочке, наклоненной под углом 3—6° (35—120 мм/с), достигнута при амплитуде вибрации 1—3 мм и частоте 9—17 Гц.

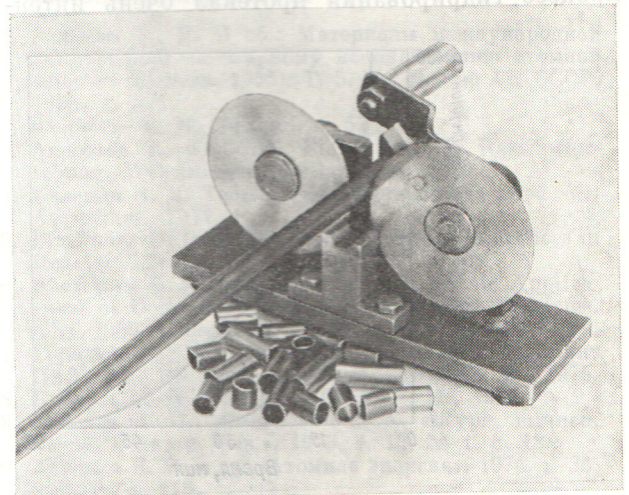
Ударная вязкость гидрированных оболочек  $\sim 1$  кгс·м/см<sup>2</sup>, что свидетельствует о их

хрупкости. Однако при механическом испытании на разрыв гидрированной оболочки диаметром 13,9 и толщиной 1,1 мм предел прочности составил  $\sim 16$  кгс/см<sup>2</sup>. Сохранение достаточно высокой прочности оболочки предотвращает деформацию твэлов и обеспечивает выполнение перегрузочных операций без опасности преждевременного механического разрушения.

В результате анализа некоторых способов измельчения (вальцами, щековой дробилкой и т. д.) установлено, что для измельчения гидрированных оболочек твэлов наиболее рационально использовать роторный механизм (рис. 5). Оболочка перемещается по направляющим, выполненным в виде роликов или трубки, и обламывается вращающимся ротором. Длина обломков оболочек находится в пределах 15—110 мм, причем использование направляющей в виде трубки обеспечивает получение более равномерных обломков.

Для утилизации водородсодержащего лома оболочек были проведены эксперименты, которые подтвердили возможность дезактивации загрязненной внутренней поверхности лома оболочек карбонатно-перекисными растворами при 50—60 °С.

Дезактивированный циркониевый лом подвергался переплавке с предварительной термической дегазацией. Экспериментальные данные (таблица) показывают, что при 800 °С в течение 3 ч удаляется 99% водорода, при этом остаточное содержание водорода в сплаве составляет 0,01 мас.%. При необходимости можно полу-



Р и с. 4. Механизм для отделения концевых деталей от твэлов после насыщения их оболочек водородом

Конечное содержание водорода в материале оболочек после термической дегазации при разрезании  $5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.

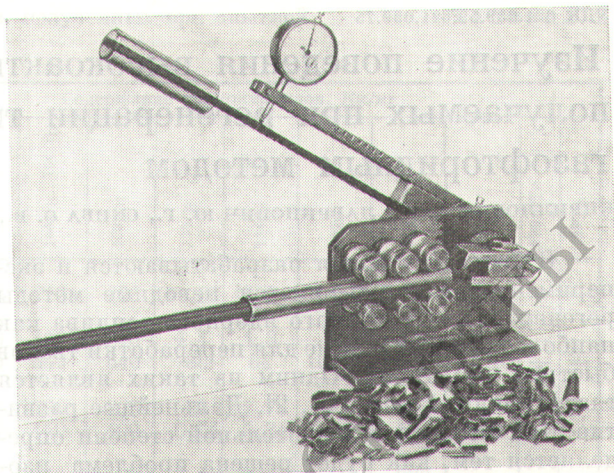
Условия опыта		Содержание водорода в оболочке, мас.%
температура, °С	продолжительность, ч	
600	1,0	0,90
600	3,0	0,29
800	1,0	0,03
800	3,0	0,01
900	1,0	< 0,01

чить и более высокую очистку циркониевого лома от водорода.

Дегазированный циркониевый лом переплавлялся в электронно-лучевой и вакуумно-дуговой печах. Содержание водорода в полученном слитке составляет  $8 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-5}$  мас.%, а содержание кислорода и азота остается на уровне исходного.

Таким образом, показана возможность использования одного из вариантов регенерации необлученных твэлов ВВЭР и РБМК, включающего следующие стадии: насыщение оболочек из сплава  $Zr + 1\% Nb$  водородом для их охрупчивания и увеличения кольцевого зазора между сердечником и оболочкой; механическое отделение концевых металлических деталей; вибрационное извлечение топливных брикетов и дробление оболочки; химическая дезактивация лома оболочек карбонатно-перекисным раствором; термическая дегазация лома оболочек в вакууме и металлургический переплав дегазированного циркониевого лома.

Поступила в Редакцию 24/VI 1976 г.



Р и с. 5. Механизм роторного типа для измельчения охрупченных оболочек твэлов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеенков А. Т., Савельев В. Ф., Валуев Е. М. Подготовка облученного ядерного горючего к химической переработке. М., ЦНИИатоминформ, 1975.
2. Переработка топлива энергетических реакторов. Сборник. Под ред. В. Б. Шевченко. М., Атомиздат, 1972.
3. Патент США № 2962371, 1960.
4. Агеенков А. Т., Савельев В. Ф. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 6, с. 474.
5. Патент США № 3135697, 1961.
6. Агеенков А. Т. и др. «Известия АН СССР. Металлы», 1973, № 4, с. 160.
7. Агеенков А. Т., Савельев В. Ф. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 1, с. 58.