

# ВЛИЯНИЕ СВЧ-ТЕРМООБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВА Zr-2,5%Nb МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

*Т.П. Черняева, С.П. Клименко, В.М. Грицина, В.А. Долгий*  
*Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл» ННЦ ХФТИ,*  
*Харьков, Украина*

Представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов, вырезанных из канальных труб (сплав Zr-2,5%Nb) в состоянии поставки (финишный отжиг 550 °С в течение 5 ч, данное состояние принято за исходное), а также СВЧ-закаленных от 980 °С и СВЧ-закаленных и затем отожженных при 580 °С в течение 24 ч. Проведено сравнение полученных результатов с опубликованными данными аналогичных исследований на циркониевых сплавах. Показана перспективность использования двойной фазовой перекристаллизации  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  с последующим отжигом для получения изделий реакторного назначения с высоким сопротивлением разрушению при малоцикловой усталости.

## ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации в реакторах оболочек твэлов и других циркониевых комплектующих ТВС технологические каналы подвергаются действию циклически изменяющихся напряжений вследствие изменения режима работы реактора, температуры теплоносителя, внутреннего давления и потока теплоносителя.

При оценке прочности циркониевых узлов и деталей необходимо располагать данными о долговечности конструкционного материала при циклическом нагружении. Установлено, что СВЧ-термообработка (двойная фазовая перекристаллизация  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  с последующим отжигом при температуре ниже монотектоидной) сплава Zr-2,5%Nb приводит к уменьшению склонности его к радиационному росту [1,2]. В данной работе исследовано влияние СВЧ-термообработки на сопротивление малоцикловой усталости.

## 1. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания на малоцикловую усталость проведены на образцах, вырезанных из канальных труб (сплав Zr-2,5%Nb) в состоянии поставки (финишный отжиг 550 °С в течение 5 ч, данное состояние принято за исходное), а также на образцах, вырезанных из СВЧ-закаленных канальных труб (с закалкой от 980 °С) и СВЧ-закаленных труб с последующим отжигом при 580 °С в течение 24 ч. Форма и размеры образцов для испытаний на малоцикловую усталость представлены на рис. 1. Образцы вырезались как вдоль, так и поперек исходной трубы.

Схема установки для испытаний на малоцикловую усталость приведена на рис. 2, 3. Испытания на установке могут проводиться как на воздухе, так и в вакууме ( $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па).

Испытания проведены на воздухе при температурах 25 и 350 °С по методике, использованной в работе [3]. Амплитуда деформации  $6 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ , частота циклов  $\sim 0,2$  Гц.

Образец закрепляется в зажиме 1 (см. рис. 3), который жестко фиксируется в установке. Нагружающая штанга движется справа  $\leftrightarrow$  налево.

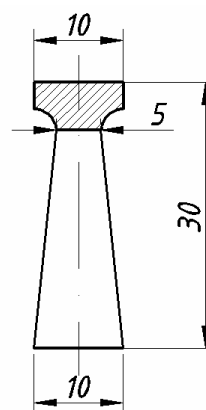


Рис. 1. Форма образца и размеры в миллиметрах. Толщина образца 0,9 мм. Заштрихованная часть фиксируется в зажиме во время испытаний

Жесткость образца на изгиб была наименьшей в верхнем фиксированном зажиме и наибольшей на свободном конце (см. рис. 1) для достижения контакта между образцом и поверхностью оправки, вырезанной с определенным радиусом. Амплитуда деформации на поверхности образца дается следующим уравнением:

$$\varepsilon = \ln \frac{R+t}{R+t/2}, \quad (1)$$

где  $t$  - толщина образца,  $R$  - радиус кривизны зажима.

Если толщина образца значительно меньше, чем радиус кривизны, уравнение (1) упрощается:

$$\varepsilon = t/2R. \quad (2)$$

Для получения деформации с разной амплитудой использовалось несколько зажимов с разными радиусами.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 4 приведены данные по сопротивлению сплава Zr-2,5%Nb разрушению при малоцикловой усталости при температуре 350 °С.

Из этих данных следует:

- СВЧ-закалка с последующим отжигом при 580 °С и длительностью 24 ч приводит к повышению малоцикловой прочности сплава Zr-2,5%Nb;

- каналные трубы из сплава Zr-2,5%Nb как в состоянии поставки, так и после СВЧ-термообработки (закалка от 980 °С + отжиг при 580 °С 24 ч) имеют практически одинаковую малоцикловую прочность в продольном и поперечном направлениях трубы.

Данные по сопротивлению разрушению при малоцикловой усталости при комнатной температуре материала каналных труб (сплав Zr-2,5%Nb) в исходном и СВЧ-закаленном (от 980 °С) состояниях (продольное направление трубы) показаны на рис. 5.

Из этих данных следует:

- СВЧ-закалка (даже без последующего отжига) приводит к повышению сопротивления каналных труб из сплава Zr-2,5%Nb разрушению при малоцикловой усталости;

- к дополнительному повышению сопротивления СВЧ-закаленных труб из сплава Zr-2,5%Nb приводит отжиг при температуре 580 °С в течение 24 ч.

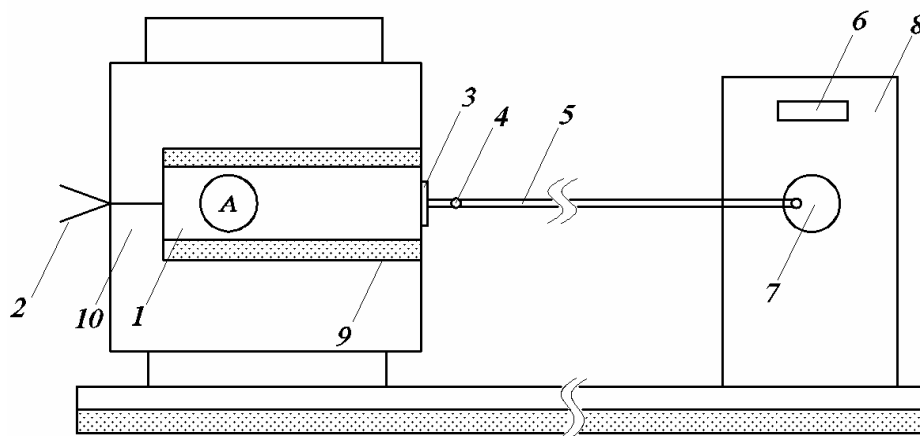


Рис. 2. Схема установки для испытаний на малоцикловую усталость:

1 - образец; 2 - терморепаратор; 3 - уплотнение, обеспечивающее передачу в камеру колебательных движений; 4 - цилиндрический шарнир; 5 - нагружающая штанга; 6 - электрическая лампочка для визуальной сигнализации об обрыве образца; 7 - кривошип; 8 - циклическое нагружающее устройство; 9 - печь нагрева; 10 - вакуумная камера

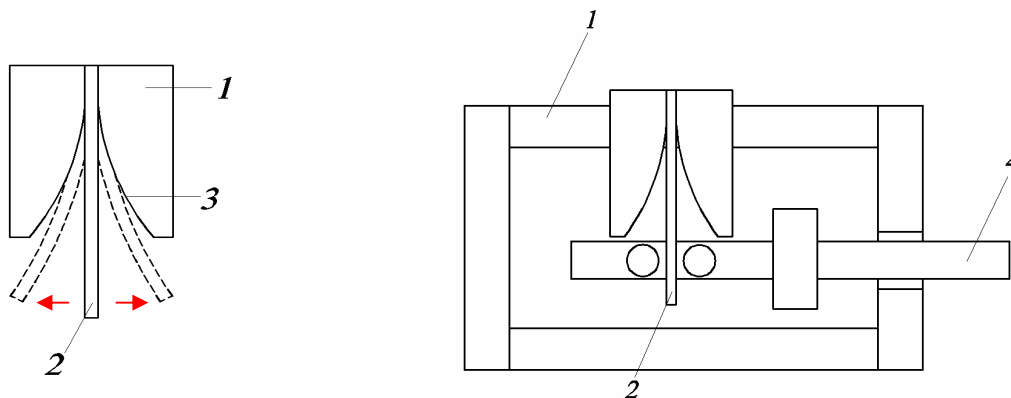


Рис. 3. Детали узла А (см. рис. 2):

1 - зажим; 2 - образец; 3 - радиус кривизны (R); 4 - нагружающая штанга

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследовано влияние СВЧ-закалки, а также СВЧ-закалки с последующим отжигом на сопротивление материала каналных труб из сплава Zr-2,5%Nb разрушению при малоцикловой усталости (температура испытаний 25 и 350 °С).

2. Установлено, что СВЧ-закалка приводит к повышению сопротивления материала труб из

Zr-2,5%Nb малоцикловой усталости. К дополнительному повышению сопротивления малоцикловой усталости приводит последующий отжиг при 580 °С в течение 24 ч.

3. Показана перспективность использования двойной фазовой перекристаллизации  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  с последующим отжигом для получения изделий реакторного назначения с высоким сопротивлением разрушению при малоцикловой усталости.

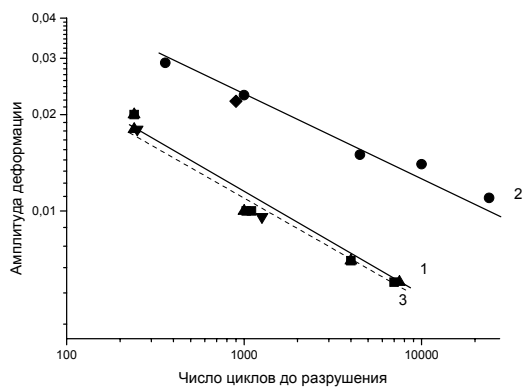


Рис. 4. Сопротивление сплава Zr-2,5%Nb разрушению при малоциклового усталости:  
 1 – исходное состояние (продольное (▲) и поперечное направления (▼));  
 2 - СВЧ-закалка от 980 °C + отжиг при 580 °C 24 ч (продольное (●) и поперечное направления (◆));  
 3 – сплав Zr-2,5%Nb в исходном состоянии (■), согласно [4]

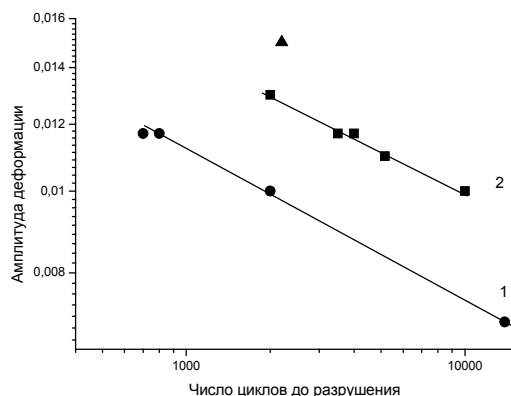


Рис. 5. Сопротивление сплава Zr-2,5%Nb разрушению при малоциклового усталости:  
 1 – исходное состояние (●);  
 2 - СВЧ-закаленное от 980 °C (■);  
 ▲ - СВЧ-закалка от 980 °C + отжиг при 580 °C 24 ч.  
 Продольное направление труб

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Стукалов. Создание радиационно-стойких структур в циркониевых сплавах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, в.3 (69), 4(30), с.64-65.
2. А.И. Стукалов, В.М. Грицина, Т.П. Черняева, В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, Н.И. Рагулина, В.И. Савченко, Д.Г. Малыхин. *Воздействие СВЧ-термообработки на структурное состояние и механические свойства сплава Zr-2,5%Nb*: Препринт ХФТИ 99-1. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999, 56 с.
3. T. Kubo, T. Motomiya, and Y. Wakashima. Low-cycle corrosion fatigue of zircaloy-2 in iodine atmospheres // *J. Nucl. Mater.* 1986, v. 140, N 2, p. 185-196.
4. Е.Ю. Ривкин, Б.С. Родченков, В.М. Филатов. *Прочность сплавов циркония*. М.: «Атомиздат», 1974, с. 99-101.

Статья поступила в редакцию 03.09.2010 г.

## ВПЛИВ СВЧ-ТЕРМООБРОБКИ НА ОПР СПЛАВА Zr-2,5%Nb МАЛОЦИКЛОВІЙ УТОМІ

*Т.П. Черняєва, С.П. Клименко, В.М. Грицина, В.А. Долгий*

Представлені результати випробувань на малоциклового утому зразків, вирізаних із каналних труб (сплав Zr-2,5%Nb) у стані поставки (фінішний відпал 550 °C протягом 5 годин, даний стан прийнятий за вихідний), а також СВЧ-загартованих від 980 °C і СВЧ-загартованих і потім відпалених при 580 °C протягом 24 години. Проведено порівняння отриманих результатів з опублікованими даними аналогічних досліджень на цирконієвих сплавах. Показано перспективність використання подвійної фазової перекристалізації  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  з наступним відпалом з метою одержання виробів реакторного призначення з високим опором руйнуванню при малоциклової утомі.

## EFFECT OF HEAT TREATMENT ON Zr-2,5%Nb LOW-CYCLE FATIGUE STRENGTH

*T.P. Chernyayeva, S.P. Klimenko, V.M. Grytsyna, V.A. Dolgiy*

The results of low-cycle fatigue tests on the samples cut out from as received Zr-2,5%Nb channel tubes (final annealing at 550 °C during 5 hours; the state assumed initial), microwave quenched (from 980 °C) and microwave quenched and annealed at 580 °C during 24 hours are presented. The obtained results have been compared with the published data from similar investigations carried out on zirconium alloys. There has been demonstrated the perspectiveness of application of double phase  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  recrystallization with subsequent annealing for production of reactor grade items with high low-cycle fatigue strength.