

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.296:539.377

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Zr1Nb В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300...770 К

*В.М. Ажажа, И.Н. Бутенко, П.Н. Вьюгов, Н.П. Вьюгов, Е.В. Карасева,
В.И. Савченко, В.И. Соколенко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина; E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua*

В интервале температур 300...700 К изучены механические свойства образцов сплава Zr1Nb с различной текстурой, сформированной в результате деформации прокаткой и последующего отжига. Показано, что прочностные характеристики материала не зависят от текстуры, а относительное удлинение образцов, ориентированных поперек направления прокатки, ниже, чем образцов, ориентированных вдоль прокатки. Ползучесть сплава вне зависимости от текстуры при всех исследованных температурах описывается степенным законом. При этом скорость ползучести в случае взаимно перпендикулярных направлений прокатки и растяжения ниже, чем при совпадении этих направлений. Пластическая деформация материала обусловлена одновременным действием трех механизмов - механизмом внутризеренного скольжения, поперечного скольжения дислокаций и зернограничного проскальзывания. Однако вклад каждого из них не является постоянным и зависит от температуры испытания, приложенного напряжения и текстуры, созданной в образце предварительной обработкой.

Сплавы циркония широко применяются в ядерной энергетике в качестве конструкционных материалов оболочек твэлов ядерных реакторов. Проблема разработки новых перспективных сплавов циркония обусловлена необходимостью повышения эксплуатационных характеристик изделий для активной зоны реакторов. В соответствии с этими задачами представляет интерес изучение механических свойств сплава Zr1Nb украинского производства в условиях активного растяжения и ползучести, что необходимо для определения ресурса работоспособности труб-оболочек твэлов.

1. МЕТОДИКА

Исходный слиток сплава был получен двойной вакуумно-дуговой плавкой. Химический состав сплава удовлетворяет требованиям Технических условий на сплав Э-110. С помощью вакуумной прокатки при повышенных и комнатной температурах из слитка получали полосы, из которых вырезали образцы с ориентацией вдоль и поперек направления прокатки. После отжига в вакууме при температуре 970 К в течение 20 мин средний размер зерна составлял 5... 6 мкм.

Изучение механических свойств образцов (предела текучести $\sigma_{0.2}$, предела прочности σ_B и относительного удлинения δ) осуществляли в условиях одноосного растяжения со скоростью 10^{-3} с^{-1} на вакуумной высокотемпературной установке типа 1245P-2/2300. Исследования ползучести проводили в режиме ступенчатого нагружения с приростом напряжения на каждой степени 4...5 МПа при точности измерения удлинения $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$.

Активационные параметры (эффективную энергию активации и эффективный активационный объем) определяли с помощью дифференциальной

методики путем изменения температуры на 10 % или напряжения в процессе ползучести по достижении скорости $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ [1].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 приведены температурные зависимости механических свойств образцов сплава Zr1Nb, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки. Прочностные характеристики сплава - предел текучести $\sigma_{0.2}$ и предел прочности σ_B - уменьшаются с ростом температуры и не зависят от текстуры материала. Влияние текстуры заметно сказывается на величине относительного удлинения δ так, что у образцов, ориентированных поперек направления прокатки, пластичность меньше во всем исследованном интервале температур.

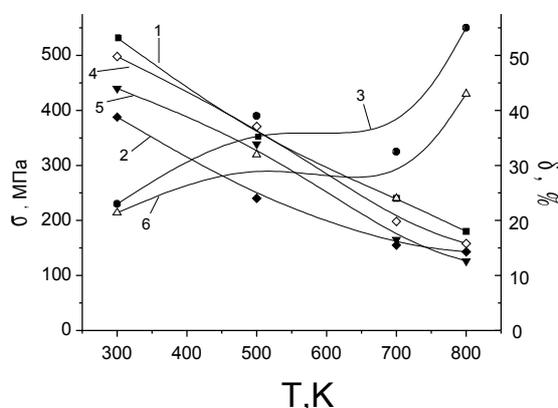


Рис. 1. Температурная зависимость механических свойств: 1, 4 - предел текучести; 2, 5 - предел прочности; 3, 6 - относительное удлинение образцов сплава Zr1Nb, вырезанных вдоль (кривые 1, 2, 3) и поперек (кривые 4, 5, 6) направления прокатки

Анализ полученных кривых ползучести показал, что развитие деформации ползучести со временем испытания описывается степенной зависимостью, что свидетельствует о наличии процессов, приводящих к релаксации внутренних напряжений и обеспечивающих большую скорость ползучести даже при комнатной температуре [2]. Такой характер ползучести наблюдался для образцов обеих партий, т.е. не зависел от текстуры материала.

Результаты проведенных металлографических исследований свидетельствуют о том, что после деформации границы зерен утолщаются и становятся более ровными, наблюдаются также идущие от границ линии скольжения. При этом зёрна остаются равноосными.

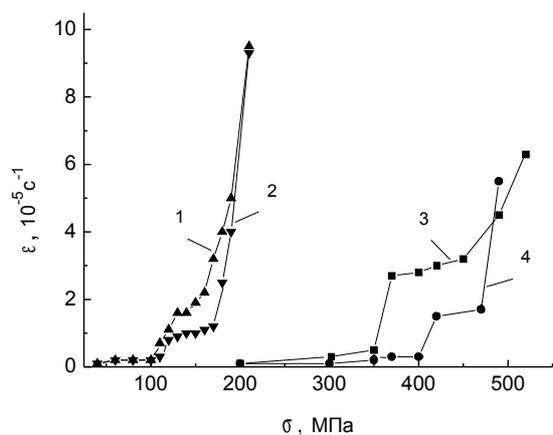


Рис.2. Зависимость скорости ползучести образцов сплава Zr1Nb, вырезанных вдоль (1,3) и поперек (2,4) направления прокатки, от приложенного напряжения при температуре испытания $T=300$ К(3,4) и $T=700$ К(1,2)

На рис.2 приведена зависимость скорости ползучести от приложенного напряжения при различных температурах для образцов, ориентированных вдоль и поперек направления прокатки. Как видно из рисунка, во всем исследованном интервале напряжений скорость ползучести образцов, ориентированных поперек направления прокатки ниже, чем у образцов, ориентированных вдоль направления прокатки. Ступеньки на кривых, вероятно, соответствуют напряжению, при котором происходит изменение механизма деформации.

Для выяснения механизмов, ответственных за пластическое течение материала, в рамках термофлуктуационной модели пластической деформации были определены активационные параметры - эффективная энергия активации $U_{эф}$ и эффективный активационный объем $V_{эф}$. Величина полной энергии активации, необходимой для преодоления барьера на пути движущейся дислокации, определялась с помощью соотношения $U_o = U_{эф} + V_{эф}T^*$, где T^* - величина эффективного напряжения, соответствующего моменту измерения [3].

Очевидно, что в данном случае движение дислокаций определяется преодолением нескольких типов барьеров. В такой ситуации активационные параметры представляют собой некоторые усредненные

величины, характеризующие все типы препятствий, составляющих данный спектр, и для большей определенности необходим анализ зависимостей активационных параметров от температуры и приложенного напряжения.

На рис.3 приведена зависимость полной энергии активации и активационного объема от температуры и напряжения.

Наблюдаемое изменение активационных параметров U_o и $V_{эф}$ с ростом температуры свидетельствует о том, что механизм деформации, ответственный за пластическое течение материала в этом температурном интервале, не остается постоянным. Активационный объем с ростом напряжения от предела текучести до предела прочности, т.е. на стадии развитого пластического течения, не изменяется, что свидетельствует об отсутствии деформационного упрочнения в процессе ползучести материала.

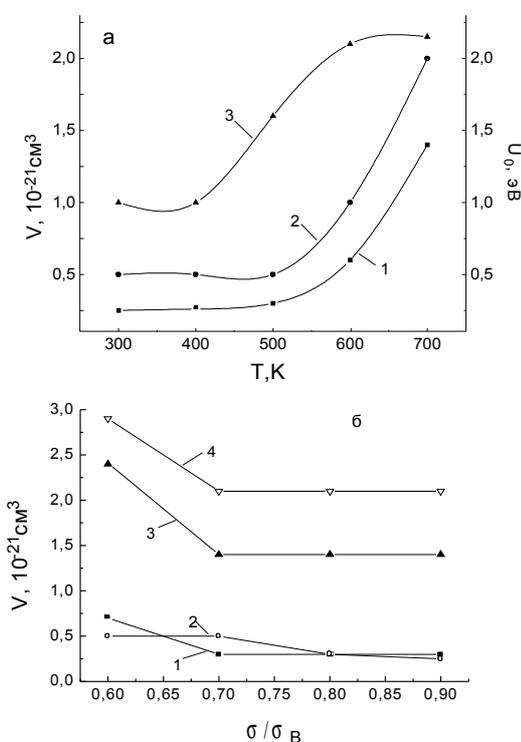


Рис.3. Зависимости полной энергии активации U_o и активационного объема $V_{эф}$ от температуры T и напряжения σ : а - зависимость $V_{эф}$ от T для образцов, вырезанных вдоль (1) и поперек (2) направления прокатки, зависимость U_o от T (3); б - зависимость $V_{эф}$ от σ для образцов, ориентированных вдоль (1,3) и поперек (2,4) направления прокатки, при температуре испытания $T=300$ К (1,2) и $T=700$ К (3,4)

Анализ полученных результатов позволяет предполагать, что пластическое течение материала обусловлено совместным действием трех механизмов: механизмом внутризеренного скольжения, поперечным скольжением и зернограницным проскальзыванием.

Внутризеренное скольжение согласно проведенным оценкам по схеме, описанной в работе [4], контролируется взаимодействием дислокаций с при-

месями и дислокациями леса и развивается при напряжениях, близких к пределу текучести, обеспечивая приток дислокаций к границам зерен и образование дислокационных скоплений. Однако отсутствие деформационного упрочнения свидетельствует о том, что дальнедействующие напряжения в процессе ползучести не увеличиваются [5], а это означает, что скопления дислокаций могут быстро рассасываться в объеме зерна или вдоль границ.

Релаксация напряжений может быть обусловлена процессами поперечного скольжения и переползания дислокаций вдоль границ зерен, зарождением и поглощением дислокаций на границах и развитием зернограницного проскальзывания. По мере роста напряжений и температуры вклад этих механизмов становится определяющим.

Влияние текстуры проявляется в более низкой пластичности и скорости ползучести образцов, ориентированных поперек направления прокатки. Это может быть связано с процессами подстройки и разворота зерен в направлении оси действия приложенного напряжения за счет внутризеренного скольжения и переползания дислокаций. При напряжениях $\sigma \sim 0,9\sigma_B$ по границам благоприятно ориентированных зерен лавинообразно развивается скольжение, что соответствует наблюдаемому резкому возрастанию скорости ползучести при этих напряжениях во всем исследованном интервале температур. Представляется, что здесь основным механизмом деформации становится зернограницное проскальзывание. При совпадении направления прокатки и направления действия нагрузки зернограницное проскальзывание реализуется при более низких напряжениях, что обеспечивает высокие значе-

ния скорости ползучести и пластичности материала.

ВЫВОДЫ

Таким образом, характер зависимости деформации ползучести от времени и активационных параметров от температуры и напряжения, а также наблюдаемые структурные изменения позволяют заключить, что деформация ползучести сплава Zr1Nb обусловлена одновременным действием трех механизмов - механизмом внутризеренного скольжения, поперечного скольжения и переползания дислокаций и скольжением по границам зерен. Однако вклад каждого из них не остаётся постоянным и зависит от температуры испытания, приложенного напряжения и текстуры, созданной в образце предварительной обработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. *Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах*. М.: «Металлургия», 1975, с.244.
2. В.М. Розенберг. *Ползучесть металлов*. М.: «Металлургия», 1967, с.275.
3. А. Ивенс, Р. Роулингс. *Термически активированные процессы в кристаллах*. М.: «Мир», 1973, с.208.
4. Е.В. Карасева, В.И. Соколенко, К.В. Ковтун, Р.В. Ажажа. Особенности ползучести и механизмы пластической деформации поликристаллического гафния в интервале температур 77...650 К // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (89)*. 2006, №4, с.133-137.
5. Ж. Фридель. *Дислокации*. М.: «Мир», 1967, с.643.

МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ Zr1Nb В ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР 300...700 К

В.М. Ажажа, І.М. Бутенко, П.М. В'югов, М.П. В'югов, Є.В. Карасьова, В.І. Савченко, В.І. Соколенко

В інтервалі температур 300...700 К вивчені механічні властивості сплаву Zr1Nb з різною текстурою, сформованою під час деформації прокаткою та термообробкою. Показано, що характеристики міцності матеріалу не залежать від текстури, а відносне подовження зразків, орієнтованих у поперек напрямку прокатки, нижче, ніж зразків, орієнтованих уздовж прокатки. Повзучість сплаву не залежно від текстури при всіх досліджених температурах описується степенем законом. При цьому швидкість повзучості у разі взаємно перпендикулярних напрямів прокатки та розтягування нижче, ніж при збігу цих напрямів. Пластична деформація матеріалу обумовлена одночасною дією трьох механізмів - механізмом внутризереного ковзання, поперечного ковзання дислокацій і зернограницного прослизання. Проте внесок кожного з них не є постійним і залежить від температури випробування, прикладеної напруги і текстури матеріалу.

MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY Zr1Nb IN THE TEMPERATURES RANGE 300...700 K

V.M. Azhazha, I.M. Butenko, P.N. V'yugov, N.P. V'yugov, E.V. Karaseva, V.I. Savchenko, V.I. Sokolenko

In the temperatures range 300...700 K mechanical properties of alloy Zr1Nb with a various texture, created by rolling and thermoprocessing, was investigated. It is shown, that characteristics of material strength do not depend on the texture, but relative elongation of samples orientated across of rolling direction is lower, than thus of samples orientated along the rolling. Creep at all investigated temperatures is described by the power law and it does not depend on the texture of material. Thus speed of creep in the case of mutually perpendicular rolling direction and tension are lower, than at coincidence of these directions. Plastic deformation of material is explained by simultaneous action of three mechanisms - the mechanism of slip inside the grain, cross slipping of dislocations and slipping at the grain boundaries. However the contribution of each of them does not remain to constants and depends on temperature of the test, the working stress and the material texture.