

УДК 669.296:539.377

PACS 62.20Ng, 61.72.Ff, 62.10.-i

Ползучесть и электрофизические свойства Zr, деформированного прокаткой при 100 К и 300 К

Е.В. Карасева, В.И. Соколенко, В.А. Фролов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина, vsokol@kipt.kharkov.ua*

Изучены электрофизические свойства и характеристики ползучести Zr с различной структурой, сформированной в результате пластической деформации прокаткой при 100 К и 300 К.

Показано, что в условиях больших пластических деформаций температура и степень прокатки слабо влияют на электрофизические свойства сформированной структуры. Ползучесть, вне зависимости от степени предварительной деформации, описывается степенным законом, при этом электросопротивление уменьшается на всех этапах деформирования, что может быть результатом динамического равновесия процессов упрочнения и возврата.

Ключевые слова: цирконий, ползучесть, термоэдс, электросопротивление, прокатка.

Вивчені електрофізичні властивості і характеристики повзучості Zr з різною структурою, сформованою в наслідок інтенсивної пластичної деформації прокаткою при 100 К та 300 К.

Показано, що в умовах великих пластичних деформацій температура і ступінь прокатки слабо впливають на електрофізичні властивості структури, що сформувалася. Повзучість, незалежно від ступені попередньої деформації, описується степенним законом, при цьому електроопір зменшується на всіх етапах деформації, що може бути результатом динамічної рівноваги процесів зміцнення і повернення.

Ключові слова: цирконій, повзучість, термоерс, електроопір, прокатка.

Electrophysical properties and creep characteristics of Zr with a different structure, formed by intensive deformation by rolling at 100 K and 300 K are studied.

It is shown, that in conditions of large plastic deformation a temperature and strain degree by rolling weakly influence on electrophysical properties of formed structure. A creep, without depending on the prestrain degree, is described by power law, here specific electrical resistance decrease on all of the deformation stages, that can be the result of dynamic equilibrium of work-hardening and recovery processes.

Key words: zirconium, creep, thermal e.m.f., electrical resistance, rolling deformation.

Введение

Исследование материалов, подвергнутых интенсивным пластическим деформациям, вызывает большой интерес в связи с задачей получения мелкодисперсных и нанокристаллических структур и установления взаимосвязей характеристик структуры и свойств материала. Характерной особенностью материалов с такими структурами являются высокие прочностные свойства и достаточный запас пластичности. Поэтому они широко применяются в качестве конструкционных материалов ядерных реакторов, особенно цирконий и сплавы на его основе. Несмотря на активные исследования последних лет, поведение циркония в условиях эксплуатации изучено не достаточно, в связи с большой сложностью и неоднозначностью процессов, развивающихся в условиях интенсивной пластической деформации. Это

связано с возникновением структурной неустойчивости, которая приводит к непредсказуемости свойств полученного материала.

Целью работы является изучение электрофизических характеристик и особенностей ползучести циркония, деформированного прокаткой, что позволит судить о развитии процессов активированного пластического течения в сильно искаженных структурах.

Материалы и методы исследования

Цирконий, полученный методом электронно-лучевой плавки, деформировали прокаткой при $T=100\text{ К}$ и 300 К на различные степени. Образцы для дальнейших измерений были вырезаны из деформированных полос в направлении оси прокатки. Электросопротивление R вычисляли по разности потенциалов $\Delta U(I)$, возникавшей на среднем участке образца длиной 30 мм

вследствие пропускания через образец тока $I=10$ ма. Она измерялась по 4-х точечной схеме с погрешностью не больше 0,05 % с использованием потенциометра Р-363-3. Разброс значений удельного электросопротивления ρ , рассчитанного по значениям R и текущим размерам образца, не превышал $\pm 0,5$ %.

Дифференциальная термоэдс $S=\Delta U(\Delta T)/\Delta T$, где ΔT разность температур между потенциальными контактами, определялась относительно меди. Для создания $\Delta T \approx 10$ К применялся нагреватель на одном из концов образца, ΔT измерялась дифференциальным способом с помощью двух термопар медь-константан, электрически изолированные спаи которых закреплялись на противоположной стороне полоски напротив потенциальных контактов. Точность измерения температуры составляла $\pm 0,1$ К. Разность потенциалов $\Delta U(\Delta T)$, возникавшая вследствие установления градиента $\Delta T/l$, где $l \sim 30$ мм - база измерений, измерялась потенциометром Р-363-3.

Испытания на ползучесть проводили в режиме ступенчатого нагружения, точность измерения составляла $5 \cdot 10^{-5}$ см. Все исследования проведены при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Для образцов циркония, деформированных прокаткой на различные степени при 100 К и 300 К, были определены значения удельного электросопротивления (ρ) и термоэдс (S). Полученные зависимости ρ и S от величины истинной деформации ϵ приведены на рис.1.

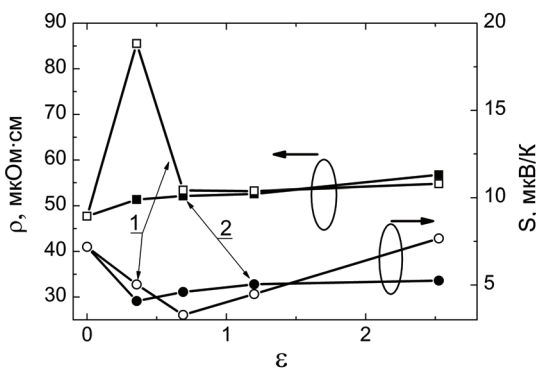


Рис.1. Зависимость удельного электросопротивления (ρ) и термоэдс (S) от степени истинной деформации (ϵ): 1 - $T=100$ К; 2 - $T=300$ К.

Характер и скорость накопления дефектов, судя по изменениям электрофизических характеристик, зависят от температуры деформирования только на начальных стадиях прокатки ($\epsilon < 0,7$). При дальнейшем увеличении степени прокатки удельное электросопротивление и термоэдс практически не зависят ни от температуры,

ни от величины деформации.

Наблюдаемое различие характера зависимостей $\rho(\epsilon)$ и $S(\epsilon)$ может быть связано с тем, что эти величины определяются различными временами рассеяния импульса τ_p и энергии τ_e электронов.

В процессе ползучести при 300 К для всех образцов деформированного Zr характерным является большая скорость ползучести, по сравнению с классическими представлениями о логарифмической затухающей ползучести при низких температурах ($T < 0,2 T_{пл}$). Это соответствует степенному закону зависимости деформации ползучести от времени испытания. При этом электросопротивление уменьшается на всех этапах деформирования, что свидетельствует о снижении уровня внутренних напряжений. Это может быть результатом динамического равновесия процессов упрочнения и возврата. Зависимость скорости ползучести циркония, деформированного прокаткой на разные степени, от приложенного напряжения и соответствующее изменение удельного электросопротивления приведены на рис.2.

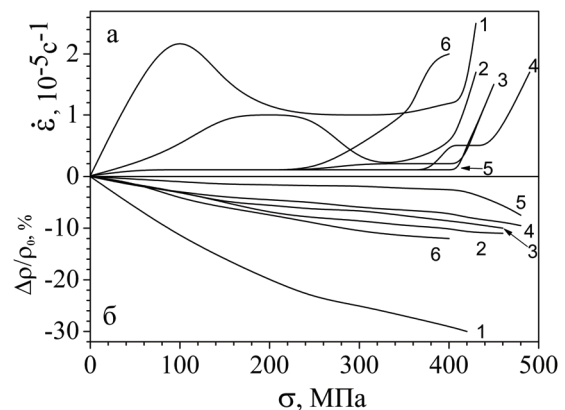


Рис.2. Зависимость скорости ползучести ($\dot{\epsilon}$) и удельного электросопротивления (ρ) циркония, деформированного прокаткой при температуре 100 К (2,4,6) и 300 К (1,3,5) от приложенного напряжения (σ): 1,2 - $\epsilon \approx 0,35$; 3,4 - $\epsilon \approx 0,7$; 5,6 - $\epsilon \approx 2,5$.

Из рисунка видно, что в цирконии после первой стадии прокатки ($\epsilon \approx 0,35$) наблюдается большая скорость ползучести при всех напряжениях, даже при $\sigma < \sigma_{0,2}$ (кривые 1,2). Начиная с $\epsilon \approx 0,7$ и выше, скорость ползучести и удельное электросопротивление слабо зависят от величины предварительной деформации прокаткой.

Рассмотрим возможные причины наблюдаемого эффекта. Согласно литературным данным [1], в цирконии в результате прокатки при деформациях $\epsilon \approx 0,3$ наблюдается развитая сетка двойников с плотностью дислокаций внутри них $\rho \approx 9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Причем, при

температуре деформации 300 К уже появляются признаки коллективной организации дислокаций: клубки, скопления, в то время как после прокатки при 100 К наблюдается достаточно равномерное хаотичное распределение дислокаций. В процессе ползучести, в силу изменения геометрии пластической деформации и небольшой скорости деформирования, созданные в результате прокатки структуры становятся кинетически неустойчивыми и легко релаксируют даже при $\sigma < \sigma_{0,2}$. Пластическое течение материала при этом может осуществляться вначале деформирования за счет внутрифрагментного скольжения дислокаций, а с ростом напряжения увеличивается вклад возвратных процессов, определяемый переползанием и поглощением дислокаций у границ двойников и фрагментов [2,3].

Последующая деформация прокаткой слабо влияет на плотность дислокаций, при этом резко меняется характер их пространственного распределения [1,2]. Начиная с $\varepsilon \approx 0,7$, структура становится полностью фрагментированной и дислокационное строение стенок упорядочивается, более отчетливо проявляется вытянутость фрагментов вдоль направления прокатки. В итоге, при деформации $\varepsilon \approx 2,5$, как было показано в работе [3], образуется однородная мелкодисперсная фрагментированная структура вытянутая практически параллельно оси прокатки, причем, полученная кристаллографическая текстура одинакова для обеих температур деформирования прокаткой 100 К и 300 К. Это связано с тем, что при высокой степени деформации пластическое течение реализуется за счет узкого набора систем кристаллографических смещений, обусловленного уже сформированной текстурой.

Представляется, что именно упорядочение структуры и подобие образовавшихся текстур являются причинами слабой зависимости электрофизических характеристик и скорости ползучести от степени и температуры предварительной деформации. В условиях ползучести, т.е. при изменении упруго-напряженного и скоростного режима деформирования, происходит перестройка дефектной структуры циркония, сопровождающаяся релаксацией напряжений [1,3]. Этот процесс может включать разрушение исходной структурной конфигурации, созданной прокаткой, и формирование новой фрагментированной структуры, менее напряженной и более устойчивой к последующему деформированию. Значительный вклад в пластическое течение такого сильнодеформированного материала наряду со всеми вышеперечисленными процессами упрочнения и возврата могут вносить ротационные моды пластичности.

1. В.В.Рыбин Большие пластические деформации и разрушение металлов. Металлургия, М. (1988), 224 с.
2. Е.В.Карасева, А.В.Мац, В.И.Соколенко. ВАНТ, Серия: «Чистые металлы», 4, 16, 34, (2007).
3. И.Ф.Борисова, И.Н.Бутенко, Е.В.Карасева, Д.Г.Малыхин, А.В.Мац, В.И.Соколенко. ВАНТ, Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» 2, 93, 100, (2009).