

ВЛИЯНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ НА СКОРОСТЬ ПОЛЗУЧЕСТИ РЯДА ГЦК-МЕТАЛЛОВ

Е.В. Чумаков, Э.С. Айтхожин

Институт ядерной физики НЯЦ РК, г. Алматы, Республика Казахстан

Багаторічне системне вивчення деформаційної поведінки ряду металів та сплавів у режимі повзучості при різних температурно-силових умовах, під впливом реакторного опромінення та без нього виявило гостру необхідність пошуку шляхів скорочення часу на виконання подібного роду досліджень. Цього потребують наукові та практичні інтереси. Тому здійснювався пошук зв'язку між параметрами, що характеризують короточасні та тривалі властивості кристалічного твердого тіла. У даному випадку це границя плинності σ_{02} , напруження σ , температура плавлення $T_{пл.}$ та випробування T , та швидкість повзучості $\dot{\epsilon}$.

Многолетнее систематическое изучение деформационного поведения ряда металлов и сплавов в режиме ползучести при различных температурно-силовых условиях, под воздействием реакторного облучения и без него выявили острую необходимость поиска путей сокращения времени на проведение подобного рода исследований. Этого требуют научные и практические интересы. Поэтому велся поиск связи между параметрами, характеризующими кратковременные и длительные механические свойства кристаллического твердого тела. В данном случае это предел текучести σ_{02} , напряжение σ , температуры плавления $T_{пл}$ и испытания T и скорость ползучести $\dot{\epsilon}$.

The systematic study of deformation behaviors of some pure metals and alloys during the in-reactor and thermal tests has brought to light the keen necessity for the research of the shortening of creep test duration. The scientific and practical interest require that. The research of relationship in between short and long-time mechanical behavior of solid state crystals had been performed therefore. in this case these behaviors are the yield stress δ_{02} , stress δ , temperatures of melting T_m and test T , creep rate $\dot{\epsilon}$.

Исследовались однокомпонентные металлы: алюминий (Al99.99%), чистая (Cu99.99%) и техническая (Cu99.95%) медь, сплав меди с 4 ат.% титана, алюминиевый сплав Д16 и высоконикелевый сплав 03Х20Н45М4БРЦ. Испытания на ползучесть проводились при одноосном растяжении при постоянной и переменной нагрузке, напряжении и температуре в активной зоне реактора ВВР-К и в лабораторных условиях (термическая ползучесть). Цилиндрические образцы из сплава 03Х20Н45М4БРЦ диаметром 3 мм и длиной 30 мм подвергались аустенизации при 1323 К в течение 1 ч. Исследования остальных материалов проводились на плоских образцах в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 20x4x0.5 мм. Все образцы перед испытаниями подвергались термообработке для получения определенной исходной структуры. Образцы чистой меди отжигались при 1023 К 1 ч, после чего они имели размер зерна 50 мкм. Техническая медь отжигалась при той же температуре в течение 1 и 1.5 ч. Величина зерна при этом составляла 35 и 50 мкм. Сплав меди с титаном отжигался ступенчато от 923 до 573 К с последующим медленным охлаждением с печью. При этом была получена равновесная $\alpha+\beta$ структура, где α - низколегированный твердый раствор титана в меди с ГЦК-решеткой, а β - интерметаллид Cu_3Ti с орторомбической решеткой. Образцы алюминия отжигались при 623 К 1 ч и охлаждались с печью. Размер зерна составлял

40...60 мкм. Образцы алюминиевого сплава Д16 подвергались закалке после нагрева до 730 К и выдержки в течение 1 ч.

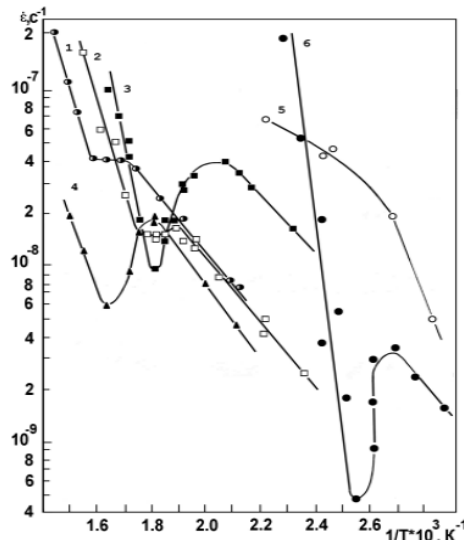


Рис.1. Зависимость скорости ползучести от температуры: 1 - Cu99/99%, $\sigma=40$ МПа (R); 2 - Cu99.95%, $\sigma=50$ МПа (T); 3 - Cu99.95%, $\sigma=50$ МПа (R); 4 - Cu-4ат%Ti, $\sigma=110$ МПа (R); 5 - Al99.99%, $\sigma=9.8$ МПа (R); 6 - Д16, $\sigma=390$ МПа (T); R-реакторная, T-термическая.

При этом варьировались режимы охлаждения и время старения для получения различных величин

предела текучести исходных образцов с целью изучения его влияния на характеристики ползучести.

Внутриреакторные испытания проводились в вертикальных каналах с плотностью потока нейтронов $1.4 \cdot 10^{16}$ нейтр./м²с при номинальной мощности аппарата 10 Мвт. Лабораторные испытания проводились на идентичных установках. Следует отметить одну, существенную их особенность, которая заключается в том, что они снабжены специально сконструированными устройствами, позволяющими задавать необходимый уровень одноосного растяжения с постоянной скоростью нагружения. Диаграммы растяжения, по которым определялись величины предела текучести, также были получены в условиях мягкого нагружения с постоянной скоростью. Скорость нагружения выбиралась таким образом, чтобы ее величина находилась в пределах $(0.07 \dots 0.08) \sigma_{02}$ мин⁻¹. Параметры испытания, такие как: температура, напряжение или нагрузка, деформация непрерывно контролировались и поддерживались с точностью не хуже, чем $\pm 1.5\%$. В процессе экспериментального изучения были определены зависимости скорости ползучести на установившейся стадии от напряжения и температуры в интервале $0.3 \dots 0.6 T_{пл}$. Область исследованных скоростей ползучести от $8 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ с. Некоторые из зависимостей $\dot{\epsilon} = f(1/T)$ представлены на рис. 1.

Наличие перегибов на графиках делит исследованный интервал на три области: низких, средних и высоких температур.

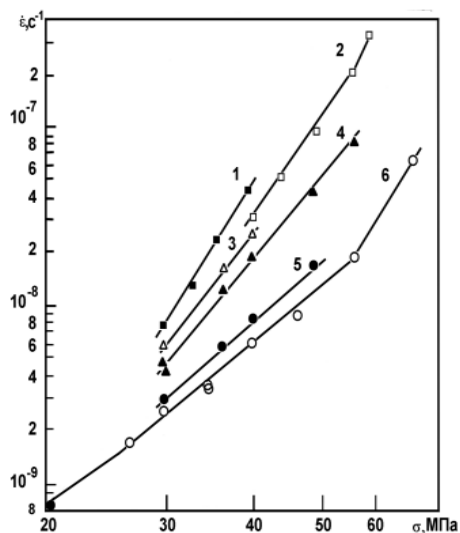


Рис.2. Зависимость скорости ползучести Si99.99% от напряжения. 1 - 653 K; 3 - 548 K; 4 - 523 K; 5 - 483 K (реакторная); 2 - 658 K; 6 - 523 K (термическая)

Сравнение графиков 2 и 3, полученных при одинаковом напряжении, показывает, что радиационный эффект в области низких температур проявляется в увеличении скорости ползучести под облучением. Причем этот эффект тем выше, чем ниже температура испытания. Зависимости, полученные для других уровней приложенного напряжения и

других материалов, имеют аналогичный вид. Подтверждением этого служит, например, сравнение графиков 2 и 6. Изменение напряжения приводит лишь к изменению скорости ползучести с сохранением качественного вида графиков. Влияние примесей и наличие второй фазы (чистая и техническая медь, и сплав меди) особенно ярко проявляются в области средних температур, где четко прослеживается эволюция скорости ползучести от плато до «провала».

Зависимости скорости ползучести от напряжения показаны на рис. 2-4. Их графики прямолинейны и сходятся в области низких напряжений. Видно, что при одинаковой температуре испытания скорости ползучести сплава Д16 имеют заметный разброс.

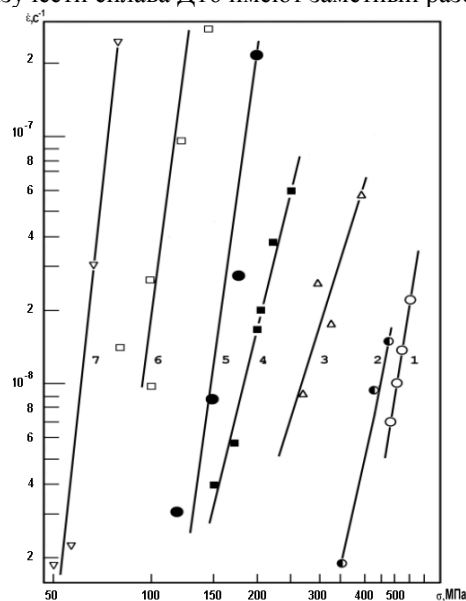


Рис.3. Зависимость скорости реакторной ползучести от напряжения стали 03X20H45M4BPЦ. 1 - 773 K; 2 - 823 K; 3 - 873 K; 4 - 923 K; 5 - 973 K; 6 - 1023 K; 7 - 1073 K

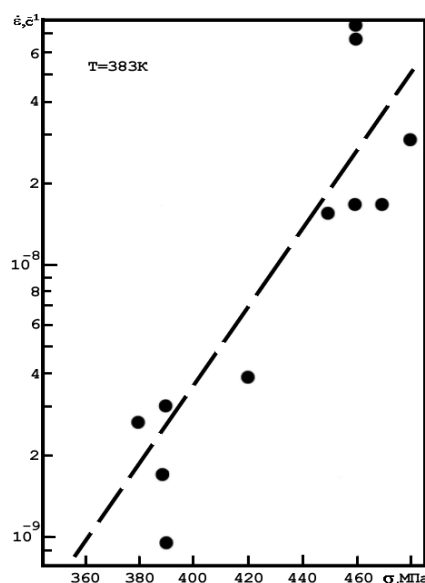


Рис.4. Зависимость скорости термической ползучести

Аналогичное явление наблюдалось и при исследовании сплава 03Х20Н45М4БРЦ. Менее ярко это выражалось при испытаниях чистых металлов (медь, алюминий). Было сделано предположение, что причиной такого явления служит неодинаковость исходной структуры образцов после предварительной обработки. Поиск параметра для достижения поставленной цели привел к пределу текучести и введению в рассмотрение экспериментальных данных еще одной нормирующей величины: температуры плавления. При этом использовались две характеристики: напряженность, представляющая собой отношение рабочего напряжения к пределу текучести (σ/σ_{02}), и относительная температура, выраженная через $T_{пл}/T$. Существующая методика проведения экспериментов позволяла снимать диаграмму растяжения каждого образца при нагружении до рабочего значения.

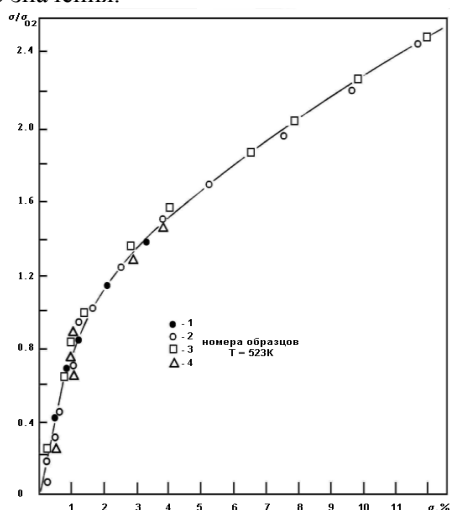


Рис. 5. Диаграмма растяжения чистой меди в приведенных координатах

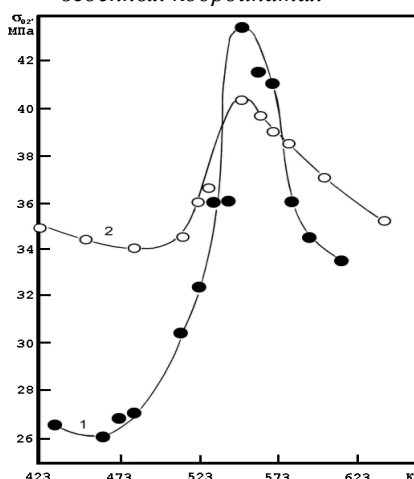


Рис. 6. Зависимость предела текучести Cu99.95% от температуры. 1 - реакторная, 2 - термическая.

Введение величины напряженности потребовало представления подобных графиков в координатах σ/σ_{02} - ε (рис. 5). И здесь выявилась интересная осо-

бенность. К примеру, для Cu99.99% диаграммы растяжения четырех образцов несколько отличались друг от друга. При построении же в указанных координатах все четыре диаграммы, практически, сливаются в одну. Это оказалось справедливым и для других исследованных материалов. Пользоваться такими диаграммами очень удобно. Во-первых, представляется возможность определять величину напряженности даже в том случае, когда диаграмма растяжения по какой-либо причине не снималась. Для этого достаточно знать лишь величину мгновенной деформации при нагружении в начальный период испытания на ползучесть. Во-вторых, такая диаграмма позволяет определить напряженность при испытании с рабочим напряжением ниже σ_{02} .

Изучение предела текучести в широком интервале температур выявило его достаточно сложное поведение. Как следует из рис. 6, графики не монотонны и имеют ярко выраженный максимум.

Для сплава Д16 величины пределов текучести не только двух разных партий образцов, подвергнутых отжигу, но и внутри одной партии отличаются. Это позволило сделать вывод, что получаемые в результате испытаний разные скорости ползучести на установившейся стадии при одинаковых температуре и напряжении обусловлены различием в величинах σ_{02} , т.е. различиями в структуре исходных образцов. Аналогичный вид имеют графики температурных зависимостей предела текучести всех исследованных материалов. Обращает на себя внимание, что величина максимума σ_{02} приходится на область средних температур и совпадает с минимумом скорости ползучести, т.е. в этой области имеется эффект упрочнения. Сравнение пределов текучести при реакторном облучении и без него (термическая ползучесть) показало, что их наибольшее различие приходится на область низких температур, т.е. облучение при этих условиях служит разупрочняющим фактором. Увеличением предела текучести в области средних температур объясняется появление плато и «провала» на графиках температурных зависимостей скоростей ползучести. Отметим, что σ_{02} в области средних температур при реакторном облучении достигает большей величины, чем для термической ползучести.

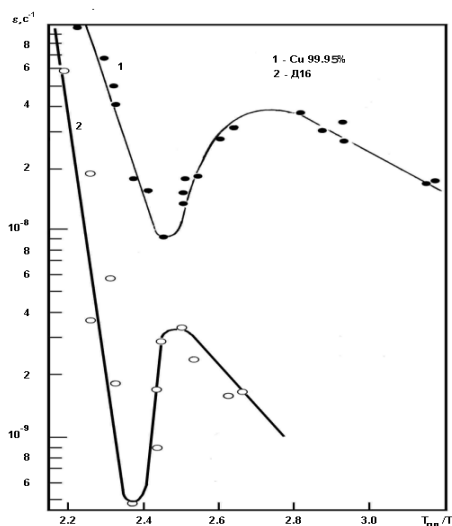


Рис.7. Зависимость скорости ползучести от температуры при постоянном напряжении: 1 - 50 Мпа, 2 - 390 Мпа

С учетом выявленного факта сложного поведения предела текучести представлялось логичным построить зависимости скорости стационарной ползучести от температуры и напряжения в ином виде. Как следует из рис.1, сравнительный анализ графиков, представленных традиционно в координатах $\ln \dot{\epsilon} - 1/T$, имеет определенные трудности вследствие их сдвига относительно друг друга по оси абсцисс. К тому же сама величина $1/T$, как и σ не отражает состояние кристаллического твердого тела. Поэтому была предпринята попытка представления температурных зависимостей в координатах $\ln \dot{\epsilon} - T_{пл}/T$. Для сравнения на рис.7 показаны два графика для меди чистой 99.95% и сплава Д16.

Видно, что в этом случае все три области совпадают, что значительно облегчает сравнительный анализ их поведения. Введение в рассмотрение понятия напряженности дает возможность построения графиков температурных зависимостей не при $\sigma = \text{const}$, а при $\sigma/\sigma_{02} = \text{const}$ и зависимостей от напряжения при $T_{пл}/T = \text{const}$. При этом следует иметь в виду, что σ/σ_{02} , в свою очередь, является функцией температуры.

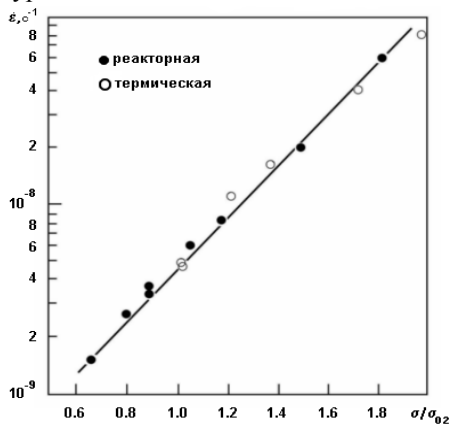


Рис.8. Зависимость скорости ползучести Cu99.99%

от напряженности при температуре 523 К

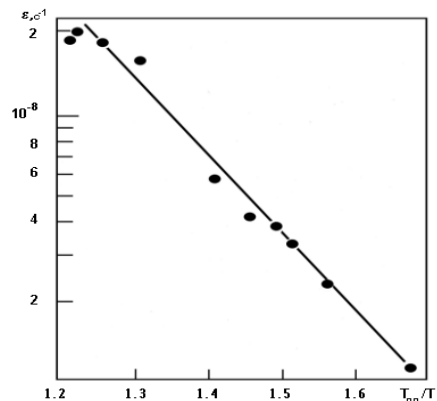


Рис.9. Зависимость скорости ползучести сплава Д16 от температуры при напряженности 0.95

На рис. 8 на примере меди показана зависимость скорости ползучести от напряженности при постоянной относительной температуре. График линейен. Следует отметить, что такое представление экспериментальных результатов, где действующее напряжение нормировано на предел текучести, привело к тому, что скорости реакторной и термической ползучестей укладываются на одну прямую. Для других исследованных материалов графики аналогичны. Кроме того, для сплава Д16 заметно уменьшился разброс точек.

На рис. 9 на примере сплава Д16 показаны зависимости скорости ползучести на установившейся стадии от температуры при постоянной напряженности. Для других исследованных материалов графики также прямолинейны.

В отличие от вышеприведенных графиков они линейны на всем исследованном интервале. Исходя из двух последних графиков, можно записать уравнения

$$\dot{\epsilon} = K \exp(\gamma \cdot \sigma / \sigma_{02}) \quad (1)$$

- для описания зависимости скорости ползучести от напряженности,

$$\dot{\epsilon} = A \exp(-Q/R \cdot T_{пл}/T) \quad (2)$$

- для описания зависимости скорости ползучести от температуры.

Здесь K , A , γ - коэффициенты; Q - энергия активации ползучести; R - постоянная Больцмана.

Приняв $Q/R = \beta$ и объединив два уравнения, запишем:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\beta T_{пл}/T + \gamma \sigma / \sigma_{02}). \quad (3)$$

Уравнение (3) в явной форме объединяет такие величины, как скорость ползучести на установившейся стадии, напряжение и предел текучести, температуру плавления и испытания, что говорит о наличии связи между кратковременными и длительными характеристиками механических свойств ГЦК-металлов. Построение графиков температур-

ных зависимостей в координатах $\ln \dot{\xi} - T_{пл}/T$ при постоянной напряженности дает в итоге удобные для анализа прямые линии, на которые укладываются экспериментальные точки скоростей реакторной и термической ползучести. В свою очередь, это свидетельствует о том, что реакторное облучение оказывает лишь стимулирующее воздействие на процес-

сы, контролирующие ползучесть. Интересным также представляется сложное поведение предела текучести в зависимости от температуры испытания в исследованном интервале. В настоящее время этот вопрос находится на стадии углубленного рассмотрения, результаты которого будут опубликованы в дальнейшем.