УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ5 И ВТ1-0 ПРИ НАГРЕВЕ В ВОЗДУШНОЙ И АРГОНОВОЙ СРЕДАХ

Замараев Л.М., Смирнов С.В., Матафонов П.П.

Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, e-mail: svs@imach.uran.ru

Проведены экспериментальные исследования кратковременной высокотемпературной ползучести образцов из титановых сплавов BT5 и BT1-0 в условиях ступенчатого нагрева до температур 1373 К и действия номинальных растягивающих напряжениях до 9,36 МПа в воздухе и аргоне. Получены эмпирические зависимости, описывающие скорость кратковременной ползучести сплавов в зависимости от температуры нагрева и номинального напряжения растяжения. Рассчитаны энергии активации процессов ползучести исследованных сплавов.

Ключевые слова: титановый сплав, кратковременная ползучесть в инертных средах, предел ползучести, скорость ползучести, энергия активации

CREEP DEFORMATION OF TITANIC ALLOYS OF VT5 AND VT1-0 UNDER HEATING IN AIR AND ARGON ENVIRONMENTS

Zamaraev L.M., Smirnov S.V., Matafonov P.P.

Institute of Engineering Science, Russian Academy of Sciences Urals Branch, Ekaterinburg, e-mail: svs@imach.uran.ru

The short-term high-temperature creep of samples from titanic alloys of VT5 and VT1-0 in the conditions of step heating up to temperatures of 1373 K under tensile stresses up to 9,36 MPa in air and argon are investigated. The empirical dependences describing the velosity of short-term creep of alloys depending on temperature of heating and nominal tensile stress are defined. The activation energy of creep processes of the studied alloys is calculated.

Keywords: titanium alloy, short term creep in inert environments, creep stress limit, energy of activation

На механизм пластической деформации металлов и сплавов, находящихся под нагрузкой ниже предела текучести существенно влияет температура нагрева. Как показал анализ литературы [1, 2] исследованиям таких процессов при нагреве на воздухе уделялось достаточно большое внимание. Эти исследования показали что, механизм пластической деформации металлов и сплавов под нагрузкой существенно меняется в зависимости от температуры испытания.

При определенных температурах происходит смена низкотемпературного механизма, связанного с консервативным движением дислокаций на высокотемпературный, обусловленный диффузионными процессами. В низкотемпературной области скорость стационарной ползучести в зависимости от приложенного напряжения и температуры описывается экспоненциальными, а в высокотемпературной степенными зависимостями. Температуры этого перехода зависят как от исследованного материала, так и от окружающей среды.

Цель исследований

Целью данных исследований является определение влияние инертной аргоновой среды на деформацию ползучести технически чистого титана ВТ1-0 и сплава системы титан – алюминий ВТ5 в процессе их нагревания при постоянном растягивающем напряжении.

Материалы и методы исследования

Технически чистый титан ВТ1-0 содержит: Al – 0,028%; Si – 0,002%; Fe – 0,036%; C – 0,008%; O₂ – 0,115%; H₂ – 0,003%; Cr+Mn – 0,012; Cu+Ni – 0;015%, Ti – остальное. Сплав ВТ5 имеет следующий химический состав Al – 5,563%; Si – 0,145%; Fe – 0,3%; C – 0,09%; O₂ – 0,18%; H₂ – 0,012%; Cr – 0,28; Ni – 0;045%; Ti – остальное. Для повышения теплостойкости и коррозионной стойкости сплав ВТ5 легирован алюминием. Образцы для исследований были изготовлены из прессованных прутков диаметром 12 мм и имели размеры рабочей части: диаметр 5 ± 0,05 мм, длина $30 \pm 0,2$ мм.

В экспериментальных исследованиях применялся метод Дорна, при котором в процессе нагрева образцов при постоянных растягивающих напряжениях температуру изменяли скачкообразно. Скачек температуры ∆Т составлял 30 К. За периодом скачкообразного увеличения температуры следовал период выдержки. После достижения на этом этапе некоторой деформации вновь скачкообразно меняли температура. Поскольку скачек температур незначителен, а напряжение до и после изменения температуры оставалось постоянным, изменением модуля упругости и субструктуры можно пренебречь. При таком допущении изменение скорости ползучести определяется только изменением температуры. Испытания образцов проводились в диапазоне температур от 673 до 1323 К при постоянных растягивающих напряжениях $\sigma = 2,00; 4,45; 6,91$ и 9,36 МПа, что значительно ниже предела текучести исследуемых сплавов при заданных температурах.

Испытания проводились на оригинальном специализированном стенде, позволяющем непрерывно фиксировать удлинение образцов при их нагреве в условиях постоянно действующих механических напряжений растяжения в средах различных газов при их давлении 0,5 МПа. Такое давление применялось для усиления эффекта внедрения газов в титановый сплав. Детальное описание стенда приведено в статье [3]. В процессе проведения экспериментов фиксировались время процесса (τ), температура (T) и удлинение образцов (L). Для устранения влияния на скорость ползучести температурного удлинения образца и веса подвесок стенда каждый эксперимент с нагружением образца дублировался экспериментом без нагрузки при тех же временных и температурных параметрах. Разница в удлинениях образца, определенная из этих графиков представляет удлинение за счет ползучести. В качестве поясняющего примера на рис. 1 приведены фиксируемые экспериментальные данные на одной из ступеней нагрева сплава BT5 при действии растягивающей нагрузки 9,36 МПа.



Рис. 1. Фрагмент диаграммы удлинения образца из титанового сплава BT5 в среде аргона на временном интервале 4000–4500 с

На диаграмме выделялся этап ползучести с относительно постоянной скоростью (участок ВС рис. 1). На этом этапе рассчитывалось относительное удлинение образца.

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\Delta l_{i+1} - \Delta l_i}{L_i} \tag{1}$$

где i = 0...n – номер паузы, на которой происходит выдержка образца при постоянной температуре; Δl_{i+1} и Δl_{i} , мм – удлинение образца за счет ползучести в конце и начале периода выдержки; L_{i} , мм – полная длина образца в начале каждого периода выдержки.

Среднюю скорость ползучести на участке выдержки рассчитывали по формуле:

$$V = \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \tau_i}, \ 1/c \tag{2}$$

где $\Delta \tau_i$ – время паузы, с; $\Delta \varepsilon_i$ – относительное удлинение образца за счет ползучести на i-ой ступени изменения температуры.

За условный предел ползучести принимали напряжение, при котором удлинение образца за счет ползучести составляет 0,2%. В процессе экспериментов при постоянной нагрузке фиксировалась температура начала деформации ползучести, при которой достигалось такое удлинение. В результате проведенного анализа для исследованных нагрузок и газовых сред и температуре T определялся предел ползучести при растяжении σ_n^T .

Поскольку процесс ползучести является энергетически активируемым процессом, в процессе исследований рассчитывалась также приращение энергии активации ΔH_i ползучести на *i*-ой ступени нагрева [4].

$$\Delta H_{i} = \frac{R Ln\left(\frac{V_{i-1}}{V_{i}}\right)}{\frac{1}{T_{i}} - \frac{1}{T_{i-1}}}, \, \text{кДж/моль}$$
(3)

где R = 0,00831 Кдж/(моль-К) – универсальная газовая постоянная.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные экспериментальные данные были подвергнуты нелинейному регрессионному анализу в программном комплексе Statistica v. 8.0 для построения аппроксимирующих зависимостей, которые позволяют для исследованных газовых сред и действующих напряжений растяжения σ рассчитывать скорость V и предел ползучести σ_i^T на стадии установившейся ползучести.

Скорости ползучести описывали экспоненциальной зависимостью

$$V = a_1 \exp(a_2 \sigma) - a_3, \qquad (4)$$

где а₁, а₂, а₃ – коэффициенты аппроксимации, значения которых для слава BT5 представлены в табл.1, а для слава BT1-0 – в ранее опубликованной статье [3].

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH №11, 2014 ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

σ, МПа a, 10¹⁵ $a_{2} \cdot 10^{2}$ $a_{2} \cdot 10^{6}$ Температурный интервал, К Аргон 4,45 130 1,41 5,30 1238-1323 44 1,53 3,10 1153-1323 6,91 9.36 1.4 1,83 1,18 1113-1323 2,40 0.014 0,57 1023-1273 Воздух 4,45 6,91 1,2 2,13 1,40 973-1223 9,36 2,21 1,90 923-1173 2,7

Коэффициенты аппроксимации в формуле (4) для сплава

Зависимость предела ползучести от температуры для исследованных сред подчиняется логарифмической зависимости

$$\sigma_i^T = -b_1 ln(T) + b_2, \qquad (5)$$

где коэффициенты аппроксимации b_{l} , b_{2} для сплава BT5 приведены в табл. 2., а для сплава BT1-0 – статье [3]. Величина достоверности аппроксимации R² в зависимостях 4 и 5 составляет не менее 0,98.

Таблица 2 Коэффициенты аппроксимации в формуле (5) для сплава BT5

	Аргон	Воздух
b_{I}	44.41	46.32
<i>b</i> ,	320.86	325.6

Полученные результаты свидетельствуют, что состав газовой среды, в которой

0,0009

0,0008

0.0007

0,0006

0,0005

проводятся испытания, оказывает существенное влияние на характеристики ползучести. При нагреве образцов из обоих сплавов в среде аргона наблюдалось значительное снижение скорости ползучести V и повышение предела ползучести σ'_n по сравнению с аналогичным нагревом в воздушной среде. Однако, при качественной аналогии указанных закономерностей для обоих сплавов ползучесть в сплаве ВТ5 по сравнению с ВТ1-0 фиксируется при более высоких температурах и имеет более низкую скорость. Так же как и в экспериментах с ВТ1-0 [3], при увеличении нагрузки температура начала ползучести сдвигается в область более низких температур и имеет более высокую скорость. В качестве примеров на рис. 2 и 3 приведены некоторые графики, построенные по экспериментальным данным.

ВТ5 варгоне

▲ BT1-0 в аргоне

ВТ5 на воздухе

ВТ1-0 на воздухе

0,0004 0,0003 0,0002 0,0001 0 850 950 1050 T, K 1150 1250 1350

Рис. 2. Зависимость скорости на установившейся стадии ползучести от температуры нагрева (точки на графиках – усредненные экспериментальные данные)

Приращение энергии активации ползучести ΔH_i на этапах нагрева рассчитывалось по формуле 3.

Наиболее энергоемким является процесса ползучести при пониженных темпертаурах (рис. 4). С ростом температуры энергозатраты на увеличение скорости ползучести при температурном скачке снижаются. Приращение энергии активации снижается также и при увеличении растягивающих

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ №11, 2014 напряжений. При прочих равных условиях энергозатраты для сплава BT5 выше чем для BT1-0. При пониженных температурах приращение энергии активации при нагреве обоих исследованных сплавов аргоне выше, чем в воздушной среде. При дальнейшем повышении температуры величины приращения энергии активации для сплавов в исследованных газовых сред становятся приблизительно одинаковыми.



Рис. 3. Зависимость предела ползучести σ_n^T для сплавов BT5 и BT1-0 в аргоне и на воздухе– (точки на графиках – усредненные экспериментальные данные)



Рис. 4. Изменение энергии активации сплавов BT5 и BT1-0 в процессе их нагревания в среде аргона при растягивающих напряжениях σ = 4,45 и 9,36 МПа

Выводы

Анализ полученных результатов позволил установить ряд фактов и закономерностей ползучести сплавов ВТ 5 и ВТ 1-0 при их нагреве в аргоне и на воздухе.

 При испытаниях в среде аргона, по сравнению с испытаниями на воздухе, появление признаков кратковременной ползучести смещается в область более высоких температур и наблюдается снижение скорости ползучести при одинаковых номинальных напряжениях во всем температурном диапазоне испытаний.

2. Получены аппроксимирующие зависимости, описывающие скорость кратковременной ползучести сплава BT5 на

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH №11, 2014 установившейся стадии в аргоне и воздухе от температуры нагрева и номинального напряжения растяжения.

3. Установлено, что при качественно одинаковом характере установленных зависимостей ползучесть в сплаве ВТ5, по сравнению с ВТ1-0, происходит при более высоких температурах и с более низкими скоростями.

4. При прочих равных условиях энергия активации ползучести для сплава BT5 выше, чем для BT1-0. При фиксированном напряжении растяжения разница в приращениях энергии активации для исследованных сплавов максимальна при низких температурах и снижается при повышении температуры испытания вплоть до того, что они практически сравниваются. Работа выполнена в соответствии с планом работ по программе ОЭММПУ РАН № 11 и гранту РФФИ № 13-08-00989.

Список литературы

1. Орыщенко А.С., Попова И.П., Гецов Л.Б. Методика расчетного определения характеристик ползучести на первой и второй стадиях на основании ограниченного числа изохорных кривых ползучести // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 2(62). – С. 83–96.

2. Петров А.И., Разуваева М.В. Скачок энергии активации на силовой зависимости скорости стационарной ползучести при растяжении алюминия и свинца // Журнал технической физики. – 2012. – Т 82, № 9. – С. 24–27.

3. Смирнов С.В., Замараев Л.М., Матафонов П.П. Скорость кратковременной ползучести титанового сплава ВТ1-0 при высоких температурах в среде инертных газов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11. – Ч. 2. – С. 392–396.

4. Розенберг В.М. Щсновы жаропрочности металлургических материалов. – М.: Металлургия, 1973. – 325 с.