

УДК 620.172.2:620.162.3:539.376

КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT5 И VT6 ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© В. В. Назаров¹*Статья поступила 4 апреля 2014 г.*

Приведены результаты испытаний на кратковременную ползучесть (продолжительность испытаний составила менее 200 ч) титановых сплавов VT5 и VT6 при 650 °С. Измерены предельные удлинения, а также время в момент разрыва сплошных цилиндрических образцов. Определены параметры степенных зависимостей, связывающих скорости абсолютного удлинения титановых сплавов и номинальные растягивающие напряжения. Установлено, что скорость установившейся ползучести титанового сплава VT6 выше, чем сплава VT5. На основании этого титановый сплав VT5 рекомендован в качестве конструкционного материала для кратковременной работы в условиях не циклически изменяющихся во времени растягивающих усилий при 650 °С.

Ключевые слова: ползучесть; длительная прочность; титановые сплавы.

При определении механических характеристик проводят испытания на цилиндрических образцах при одноосном растяжении. Повышение температуры металлических материалов приводит к уменьшению обратной деформации упругости и увеличению необратимых деформаций пластичности и ползучести. Кратковременная ползучесть проявляется при температурах, превышающих температуру обычных условий работы металлического материала, при этом необратимые деформации превосходят более чем половину одного порядка деформации упругости. Высокая удельная прочность титановых сплавов обуславливает их применение для изготовления деталей и конструктивных элементов, например в ракетостроении, предназначенных для кратковременной работы при повышенных температурах.

Цель данной работы — исследование кратковременной ползучести двух титановых сплавов: монофазного VT5 (92 % масс. Ti, 6 % масс. Al) и гетерофазного VT6 (88 % масс. Ti, 6 % масс. Al, 5 % масс. V) [1]. Деформирование титановых сплавов VT5 и VT6 при нормальной температуре происходит в основном в области упругости и завершается хрупким разрушением [2]. Для осуществления технологических операций (прокатки, штамповки) титановые сплавы насыщают водородом до концентраций 0,15 – 1,07 % масс. [3] (концентрация водорода зависит от марки титанового сплава). Это приводит к повышению пластичности и улучшению технологичности. Между тем насыщение водородом до больших концентраций, напротив, вызывает упрочнение титановых сплавов [4, 5].

Фазовый состав титанового сплава VT5 определяется прочной α -фазой (элементарная ячейка пред-

ставлена ГПУ кристаллической решеткой). Титановый сплав VT6 при нормальной температуре содержит приблизительно 10 – 15 % масс. β -фазы (элементарная ячейка представлена ОЦК кристаллической решеткой). Именно фазовый состав титановых сплавов определяет их практическое применение при повышенных температурах. Сплав VT5 — конструкционный материал для деталей, работающих при циклически не изменяющихся во времени нагрузках (допустимые пределы по температуре и длительности работы составляют 450 °С и 10^4 ч). Высокотемпературная пластичная β -фаза повышает трещиностойкость титанового сплава VT6. Это позволяет использовать данный сплав для изготовления баллонов высокого давления, работающих при стационарном сложном напряженном состоянии и температуре не более 400 °С, а также лопаток компрессора авиационного двигателя, эксплуатирующихся при температуре не более 350 °С при циклически изменяющемся во времени сложном напряженном состоянии.

Исследования проводили следующим образом. Цилиндрические образцы диаметром 5 мм и рабочей длиной $l_0 = 25$ мм (рис. 1, а) подвергали одноосному растяжению при постоянной силе [6]. Растягивающее усилие создавали благодаря подвижной нижней тяге гирями массой 10 кг и наращивали по кусочно-постоянной программе (20 кг/с). Система измерений позволяла определять текущее удлинение $u(t)$ и время t_{**} в момент разрыва. Температура испытаний 650 °С установлена из опытов при ступенчатом изменении температуры, при этом нижние границы развитой ползучести титановых сплавов VT6 и VT5 составили 600 и 650 °С. Температуру измеряли в трех точках образца термopарами типа ХА(К). Рабочий диапазон составил 40 – 1000 °С, при этом амплитуда колебаний во време-

¹ НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия;
e-mail: inmec130@mail.ru

Экспериментальные данные кратковременной ползучести титановых сплавов BT6 и BT5 при одноосном растяжении и температуре 650 °С

Номер опыта	σ_0 , МПа	$\dot{u}_0$, мм/ч	u_{**} , мм	t_{**} , ч
BT6				
1	25	0,216	51,0	181,4
2	30	0,344	44,2	65,4
3	35	0,370	40,3	37,2
4	40	0,571	47,8	35,0
5	45	0,665	48,2	28,6
6	50	0,865	—	—
7	50	1,165	44,4	13,5
8	55	1,066	44,6	14,0
9	60	1,665	24,9	6,7
10	65	1,374	43,3	9,0
11	70	2,000	16,2	3,7
12	75	1,565	25,0	6,4
13	80	2,010	23,2	4,8
14	85	2,220	25,0	4,0
15	90	3,850	25,8	2,5
16	100	3,670	19,6	2,5
17	110	3,931	14,9	1,7
18	120	3,472	23,3	2,1
19	120	4,413	15,5	1,4
BT5				
1	80	0,053	13,6	112,2
2	100	0,287	10,0	11,8
3	120	0,943	16,2	9,7
4	140	2,569	11,1	7,4
5	160	5,882	15,1	1,2

ни и разница температур в конечных точках не превысила 4 °С.

При визуальном осмотре испытанных образцов (рис. 1, б) обнаружено формоизменение, связанное с вязким разрушением титановых сплавов при высоких температурах. Разрыв образцов происходил в верхней концевой точке, где температура оказалась максимальной и равной 652 °С (в нижней концевой точке температура оставалась минимальной и равной 648 °С). Результаты измерений (см. таблицу) получены в широком диапазоне номинального растягивающего напряжения σ_0 и представлены в абсолютной шкале, где σ_0 — напряжение в начальный момент времени $t = 0$ приложения растягивающей силы. Для титанового сплава BT6 прослеживается зависимость предельного удлинения u_{**} от номинального растягивающего напряжения σ_0 . При этом возрастание напряжения σ_0 в 4,8 раза привело к уменьшению u_{**} в 3,3 раза. Для титанового сплава BT5 зависимость $u_{**}(\sigma_0)$ не обнаружена. Предельные относительные удлинения u_{**}/l_0 оказались равными 128 % для сплава BT6 и 53 % для сплава BT5. При анализе кривых ползучести цилиндрических образцов (рис. 2) прослеживаются два последовательных участка зависимости удлинения u от времени t : I — $\dot{u}(t) = \dot{u}_0$, II — $\dot{u}(t) > \dot{u}_0$, где $\dot{u}$ — теку-



Рис. 1. Вид недеформированного (а) и испытанных (б) цилиндрических образцов из титанового сплава BT6

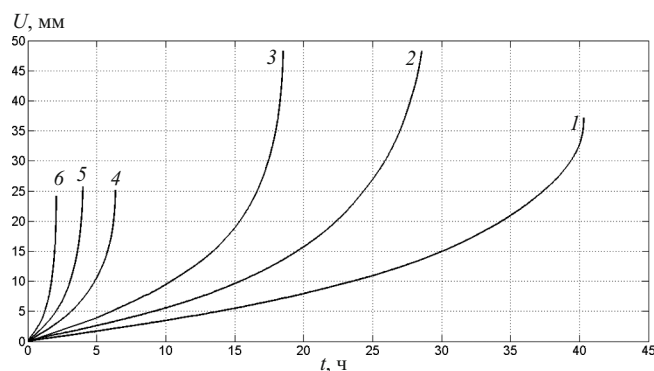


Рис. 2. Кривые ползучести титанового сплава BT6: 1 – 6 соответствуют номинальным напряжениям 35, 45, 50, 75, 85, 120 МПа

щая скорость удлинения, $\dot{u}_0$ — скорость удлинения при установившейся ползучести.

При аппроксимации опытных данных (см. таблицу) были рассмотрены степенные зависимости $\dot{u}_0(\sigma_0)$, $t_{**}(\sigma_0)$, $t_{**}(\dot{u}_0)$, средняя скорость удлинения $\dot{u}_{av}(\sigma_0) = u_{**}/t_{**}$, которые в логарифмических координатах представлены отрезками прямых. Параметры рассматриваемых зависимостей (рис. 3, 4) получены итерационными методами расчетов и соответствуют минимальному суммарному расхождению опытных данных относительно аппроксимирующей прямой.

При анализе механических характеристик титановых сплавов использовали степенные зависимости

$$\dot{u}_0^{BT6}(\sigma_0) = 6,3[\dot{u}_0^{BT5}(\sigma_0)]^{0,3}, \quad (1)$$

$$t_{**}^{BT5}(\sigma_0) = 6,0[t_{**}^{BT6}(\sigma_0)]^{2,0}, \quad (2)$$

$$t_{**}^{BT5}(\dot{u}_0) = 2,0[t_{**}^{BT6}(\dot{u}_0)]^{0,6}, \quad (3)$$

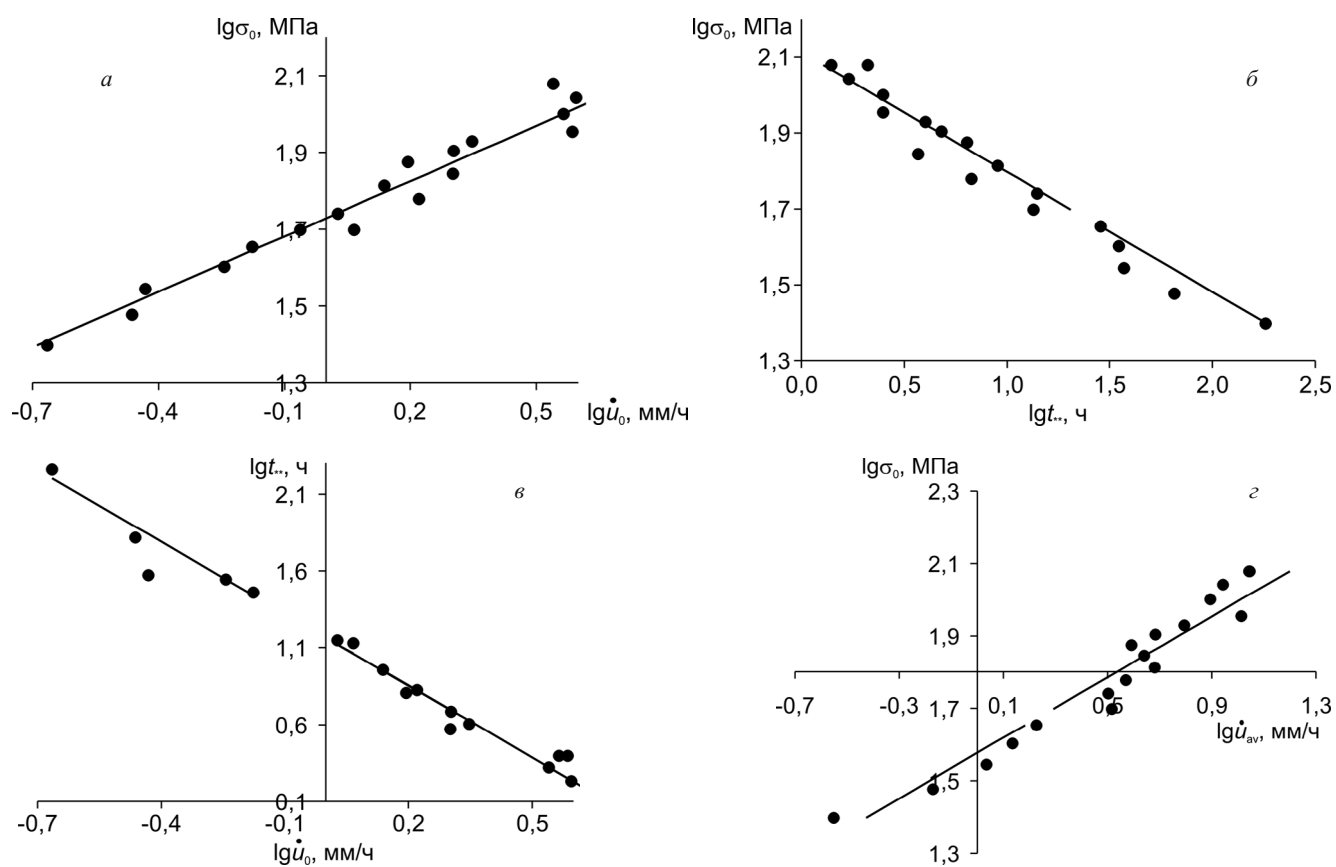


Рис. 3. Расчетные (линии) и опытные (значки) зависимости для титанового сплава BT6: $\lg \dot{\epsilon}_0 = 2,11 \lg \sigma_0 - 3,60$ (а); $\lg t_{**} = 6,70 - 3,2 \lg \sigma_0$ (б); $\lg t_{**} = 1,16 - 1,6 \lg \dot{\epsilon}_0$ (в); $\lg \dot{\epsilon}_{av} = 2,4 \lg \sigma_0 - 3,77$ (г)

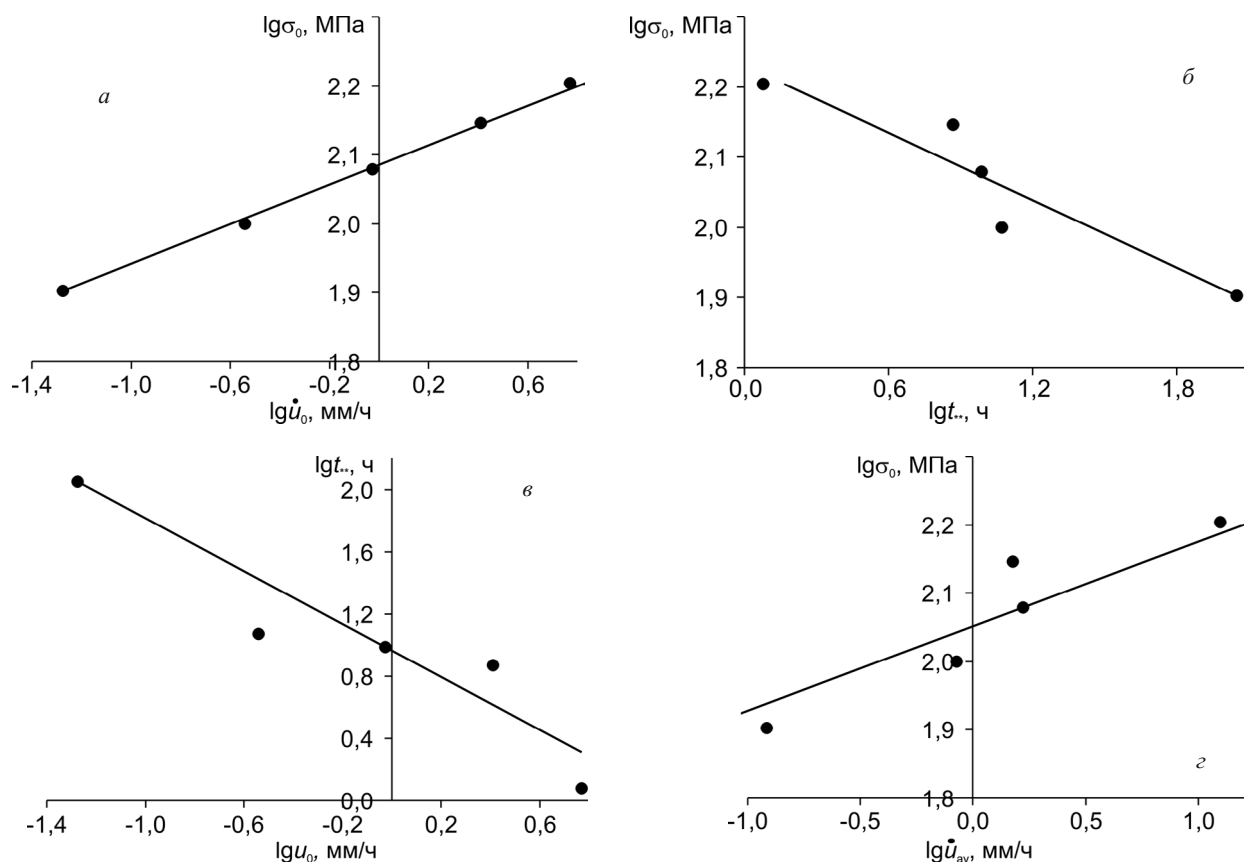


Рис. 4. Расчетные (линии) и опытные (значки) зависимости для титанового сплава BT5: $\lg \dot{\epsilon}_0 = 7,0 \lg \sigma_0 - 14,60$ (а); $\lg t_{**} = 13,97 - 6,3 \lg \sigma_0$ (б); $\lg t_{**} = 0,97 - 0,9 \lg \dot{\epsilon}_0$ (в); $\lg \dot{\epsilon}_{av} = 8,1 \lg \sigma_0 - 16,64$ (г)

$$\dot{\epsilon}_{av}^{BT6}(\sigma_0) = 17,0[\dot{\epsilon}_{av}^{BT5}(\sigma_0)]^{0,3}. \quad (4)$$

Анализ степенных зависимостей (1) – (4) показывает, что в диапазоне номинального напряжения $\sigma_0 = 80 - 120$ МПа отличие рассматриваемых сплавов по скорости установившейся ползучести $\dot{\epsilon}_0$ и предельному удлинению ϵ_{**} составляет 1,7 и 1,6 раз, а по времени в момент разрыва t_{**} — 10,5 раза. Это объясняется влиянием пластичной β -фазы титанового сплава ВТ6, которая при увеличении длительности испытаний привела к значительным предельным удлинениям ϵ_{**} .

В результате проведенного исследования установлено, что титановый сплав ВТ5 по сравнению со сплавом ВТ6 обладает относительно высоким сопротивлением кратковременной ползучести. Данный титановый сплав рекомендуется в качестве конструкционного материала для кратковременной работы в условиях не циклически изменяющегося во времени напряженного состояния при температуре 650 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов — М.: МИСИС, 2001. — 416 с.
2. Полянский В. М., Кляцкина В. Ю., Силис М. И. Оценка хрупкости титановых сплавов по механическим свойствам и рельефу поверхности излома / Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 2. С. 20 – 23.
3. Гадельшин М. Ш., Анисимова Л. И., Бойцова Е. С. Водородное пластифицирование титановых сплавов / Int. Sci. J. Alternative Energy Ecol. 2004. N 9(17). P. 26 – 29.
4. Локощенко А. М., Ильин А. А., Мамонов А. М., Назаров В. В. Экспериментально-теоретическое исследование влияния водорода на ползучесть и длительную прочность титанового сплава ВТ6 / Металлы. 2008. № 2. С. 60 – 66.
5. Назаров В. В. Влияние водорода на ползучесть и разрушение титановых сплавов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 12. С. 59 – 65.
6. Ковальков В. К., Назаров В. В., Новотный С. В. Методика проведения высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 4. С. 42 – 44.