

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

620.16; 539.376

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПРИ 600°С*

Д-р физ.-мат. наук, проф. А.М. ЛОКОЩЕНКО, канд. техн. наук В.В. НАЗАРОВ

Приведены результаты испытаний сплава ВТ6 на ползучесть и длительную прочность при растяжении (температура 600°С). В испытаниях наблюдается немонотонная зависимость предельной деформации от начального напряжения. С помощью предложенного варианта теории ползучести получено хорошее соответствие экспериментальных и теоретических значений характеристик ползучести сплава ВТ6 вплоть до разрушения.

В НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова проведена серия испытаний сплава ВТ6 на ползучесть и длительную прочность при постоянных значениях растягивающей силы P . Эти экспериментальные данные получены на модернизированных установках ИМех-5 [1,2]. Испытывались цилиндрические образцы диаметром 5 мм и рабочей длиной 25 мм, температура рабочей части образцов во время испытаний поддерживалась постоянной и равной 600°С. Зави-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-08-00007).

симости деформации ползучести p от времени t получены в широком диапазоне изменения начальных напряжений σ_0 ($\sigma_0=47, 67, 117, 167$ и 217 МПа). Все кривые ползучести характеризуются установившейся и разупрочняющейся стадиями. Осредненные значения скорости \dot{p}_0 установившейся ползучести, предельной деформации p^* и времени разрушения t^* приведены в таблице. На рис. 1 и 2 точками обозначены экспериментальные значения \dot{p}_0 и t^* соответственно, рис.3 – средние экспериментальные значения $p^*(\sigma_0)$.

Достаточно большие предельные логарифмические деформации $p^* = p(t^*)$, накопленные ко времени разрушения t^* , свидетельствуют о том, что постоянная растягивающая сила приводит к существенному увеличению во времени t растягивающего напряжения $\sigma(t)$. В результатах испытаний наблюдается немонотонная зависимость предельной деформации $p^*(\sigma_0)$ с внутренним максимумом при номинальном напряжении $\sigma_0 = 67$ МПа (таблица и рис. 3).

Таблица

Анализ результатов испытаний.

σ_0 МПа	\dot{p}_0 (час) ⁻¹	p^*	t^* час
47	0.0036	0.565	83.10
67	0.0162	0.655	24.76
117	0.0556	0.613	4.72
167	0.1940	0.448	1.16
217	0.4374	0.374	0.43

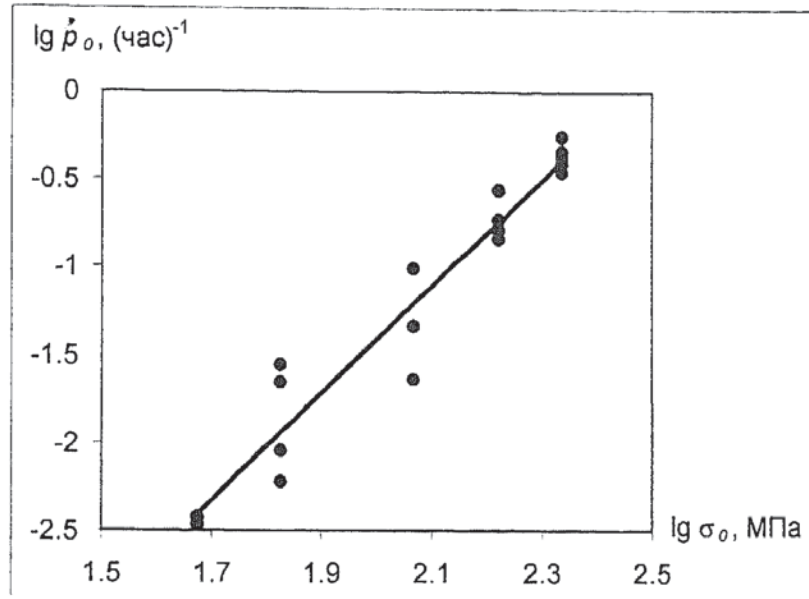


Рис. 1. Зависимости логарифма скорости установившейся ползучести $\dot{\rho}_0$ от логарифма величины номинального напряжения σ_0 .

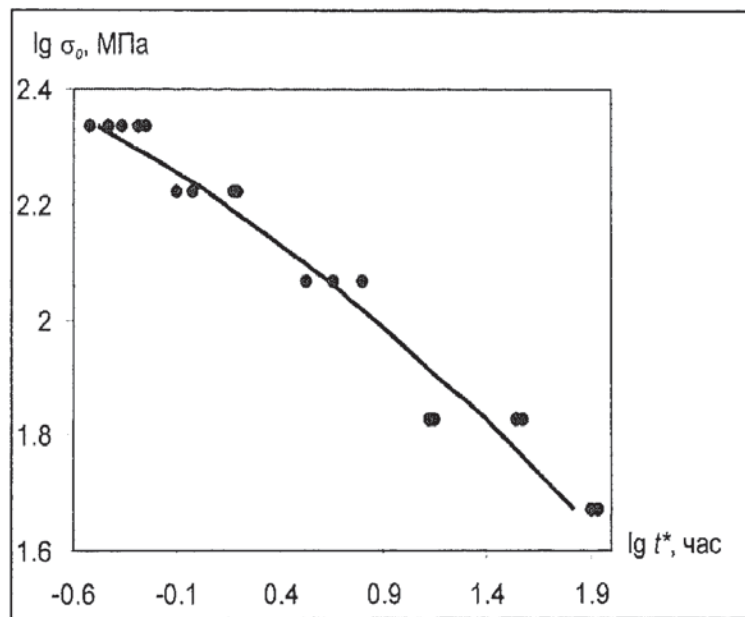


Рис. 2. Зависимости логарифма времени разрушения t^* от логарифма величины номинального напряжения σ_0 .

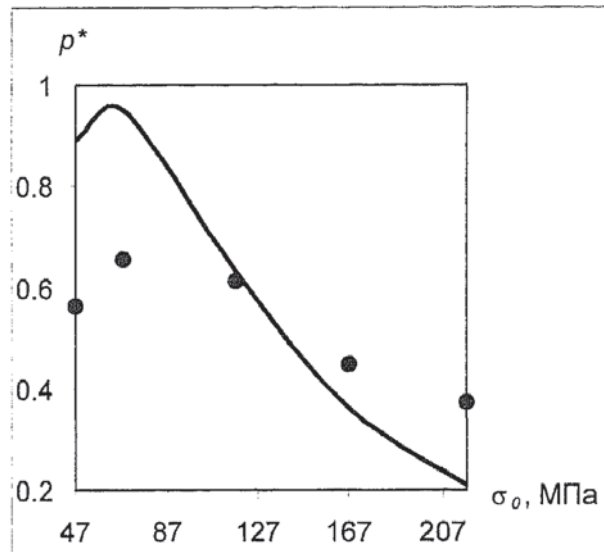


Рис. 3. Зависимости осредненной предельной деформации p^* от величины номинального напряжения σ_0 .

Установим зависимость $\sigma(t)$. Примем, что в течение всей длительности испытаний образец сохраняет цилиндрическую форму. С увеличением его длины l уменьшается площадь поперечного сечения F . Учитывая условие несжимаемости материала $lF = l_0F_0$ в соотношении для растягивающей силы $P = \sigma_0F_0 = \sigma F$, находим закон изменения напряжения σ от времени t

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(p(t)), \quad (1)$$

где l_0, F_0 — начальные значения длины и площади поперечного сечения образца.

Присутствие немонотонной зависимости $p^*(\sigma_0)$ находит свое подтверждение и в ряде других работ. Так, например, в [3] при анализе результатов испытаний стали 15X1M1Ф на длительную прочность при 565°C авторы отмечают, что в диапазоне $10^3 < t^* < 10^4$ ч зависимость $p^*(t^*)$ имеет минимум при времени разрушения t^* , равном 2500 ч. При этом зависимость количества трещин на единицу поверхности $m(t^*)$ имеет максимум, также соответствующий $t^* = 2500$ ч. В [3] приведено металлографическое объяснение указанного характера кривых $p^*(t^*)$ и $m(t^*)$ и отмечены структурные изменения в металле, существенно влияющие на характер и количество очагов разрушения.

В [4] приведены результаты испытаний цилиндрических образцов из нержавеющей стали X18N10T на ползучесть до разрушения при температуре 850°C. Результаты испытаний показали, что в диапазоне напряжений $\sigma_0 = 40 - 80$ МПа ползучесть образцов проявляется при ма-

лых деформациях, при этом наблюдается немонотонная зависимость $p^*(\sigma_0)$ с внутренним минимумом при $\sigma_0 = 55$ МПа. В [4] предложен способ описания немонотонного характера зависимости $p^*(\sigma_0)$.

В соответствии с кинетической теорией ползучести Ю.Н. Работнова [5] введем параметр поврежденности $\omega(\sigma, t)$ и рассмотрим систему дифференциальных уравнений $\dot{p} = \dot{p}(\sigma, \omega)$ и $\dot{\omega} = \dot{\omega}(\sigma, \omega)$. Как правило, в качестве этих зависимостей от номинального напряжения σ_0 рассматриваются степенные функции с различными показателями степеней k и n . В зависимости от знака разности $(k - n)$ зависимость $p^*(\sigma_0)$ может быть либо монотонно убывающей (при $(k - n) < 0$), либо монотонно возрастающей (при $(k - n) > 0$). Описание результатов испытаний с немонотонной функцией $p^*(\sigma_0)$ при использовании степенных зависимостей \dot{p} и $\dot{\omega}$ от σ_0 в принципе невозможно. Поэтому введем различные соотношения для учета влияния растягивающего напряжения $\sigma(t)$ на скорость ползучести \dot{p} и на скорость накопления поврежденности $\dot{\omega}$. В качестве зависимостей \dot{p} и $\dot{\omega}$ от σ рассмотрим соответственно степенную функцию σ^k и непрерывную возрастающую функцию $\varphi(\sigma) > 0$. Для зависимостей \dot{p} и $\dot{\omega}$ от ω вместо общепринятой степенной функции $(1 - \omega)^{-1}$ примем экспоненциальную функцию $\exp(\omega)$. Рассмотрим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp}{dt} = A^{-1}[\sigma(t) \cdot \exp(\omega)]^k, \quad k > 1, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = B^{-1}\varphi(\sigma(t)) \cdot \exp(n \cdot \omega), \quad 0 < n < k. \quad (3)$$

До проведения испытания металл считаем неповрежденным, $\omega(\sigma, 0) = 0$. В момент разрушения примем условие для поврежденности $\omega(\sigma, t^*) = \omega^* = 1$.

Рассмотрим малые деформации, при которых напряжение $\sigma(t)$ в процессе испытания практически не изменяется и можно приближенно считать $\sigma(t) = \sigma_0$. Интегрируя (3), найдем значения поврежденности ω в каждый момент времени t вплоть до разрушения:

$$\omega(\sigma, t) = -n^{-1} \ln[1 - nB^{-1}\varphi(\sigma_0)t]. \quad (4)$$

Из (4) находим время разрушения ($\omega(\sigma, t^*) = 1$):

$$t^* = \frac{B[1 - \exp(-n)]}{n \cdot \varphi(\sigma_0)}. \quad (5)$$

Разделим правую и левую части (2) на соответствующие части (3):

$$\frac{dp}{d\omega} = \frac{B\sigma_0^k \exp((k-n)\omega)}{A\varphi(\sigma_0)}. \quad (6)$$

Интегрируя (6), находим зависимость деформации p от напряжения σ_0 и поврежденности ω :

$$p(\sigma_0, \omega) = \frac{B[\exp((k-n)\omega) - 1]}{A(k-n)} \cdot \frac{\sigma_0^k}{\varphi(\sigma_0)} \quad (7)$$

Предельное значение деформации ползучести p^* при учете (7) и $\omega^* = 1$ равно

$$p^*(\sigma_0) = G \frac{\sigma_0^k}{\varphi(\sigma_0)}, \quad G = \frac{B[\exp(k-n) - 1]}{A(k-n)}. \quad (8)$$

Рассмотрим три зависимости $\varphi(\sigma_0)$:

$$\varphi_1(\sigma_0) = \text{sh}(g\sigma_0), \quad \varphi_2(\sigma_0) = [\exp(g\sigma_0) - 1] \quad \text{и} \quad \varphi_3(\sigma_0) = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b - \sigma_0} \right)^n, \quad (9)$$

где σ_b – предел кратковременной прочности материала при температуре испытаний ($0 < \sigma_0 < \sigma_b$). Подставляя (9) в (8), получаем выражения для предельной деформации p^* при различных видах $\varphi(\sigma_0)$:

$$p_1^*(\sigma_0) = G \frac{\sigma_0^k}{\text{sh}(g\sigma_0)}, \quad p_2^*(\sigma_0) = G \frac{\sigma_0^k}{[\exp(g\sigma_0) - 1]}, \quad p_3^*(\sigma_0) = G\sigma_0^{(k-n)}(\sigma_b - \sigma_0)^n. \quad (10)$$

Проведем анализ зависимости (10) предельной деформации p^* от напряжения σ_0 при использовании функции $\varphi_1(\sigma_0)$. При малых значениях σ_0 функцию $\text{sh}(g\sigma_0)$ с достаточной степенью точности можно заменить на аргумент $g\sigma_0$. Так как $k > 1$, то p^* монотонно возрастает с увеличением σ_0 . При больших значениях σ_0 функция $\text{sh}(g\sigma_0) \cong 0,5 \times \exp(g\sigma_0)$, так что p^* при этом убывает с увеличением напряжения σ_0 . Определим значение напряжения $\sigma_0 = \sigma_*$, при котором предельная деформация p^* принимает наибольшее значение $p^*(\sigma_*)$.

Из условия $\left(\frac{dp^*}{d\sigma_0}\right)_{\sigma_0=\sigma_*} = 0$ получаем уравнение:

$$\text{th}(g\sigma_*) = k^{-1}g\sigma_* \quad (11)$$

Аналогично (11) можно получить следующие соотношения для σ_* при использовании функций $\varphi_2(\sigma_0)$ и $\varphi_3(\sigma_0)$ соответственно:

$$(k - g\sigma_*) \exp(g\sigma_*) = k, \quad \sigma_* = \frac{(k - n)}{k} \sigma_b.$$

При произвольной функции $\varphi(\sigma_0)$ значение σ_* определяется из уравнения

$$k\varphi(\sigma_*) - \sigma_*\varphi'(\sigma_*) = 0.$$

Константы A , B , k , n и g при использовании $\varphi_1(\sigma)$ определяются следующим образом. Скорость установившейся ползучести согласно (2) равна $\dot{p}_0 = A^{-1}\sigma_0^k$. Постоянные A и k вычисляются методом наименьших квадратов из условия соответствия экспериментальных и расчетных значений \dot{p}_0 (рис. 1). После этого из уравнения (11) находим значение величины g , а затем из (5) оставшиеся постоянные B и n в логарифмических координатах $\lg \sigma_0 - \lg t^*$ (рис. 2). Найденные значения постоянных A и k следует использовать как в предположении малых деформаций, так и при учете значительных деформаций при решении системы дифференциальных уравнений (2),(3). Полученные выше значения g , B и n следует рассматривать как первое приближение при определении с помощью системы уравнений (2),(3) истинных значений этих материальных констант при учете изменения напряжения σ во времени согласно (1).

Сопоставляя теоретические и осредненные экспериментальные кривые ползучести, в итоге получаем следующие значения материальных констант: $A = 3 \cdot 10^7 \text{ ч} \cdot (\text{МПа})^k$, $B = 1533 \text{ ч}$, $g = 0,03 \text{ МПа}^{-1}$, $k = 3,03$, $n = 7,6$. На рис. 1–3 соответствующие теоретические кривые обозначены сплошными линиями. На рис. 4 в качестве примера приведены соответствующие напряжению $\sigma_0 = 167 \text{ МПа}$ экспериментальные и теоретические кривые ползучести (обозначенные соответственно штриховыми и сплошными линиями).

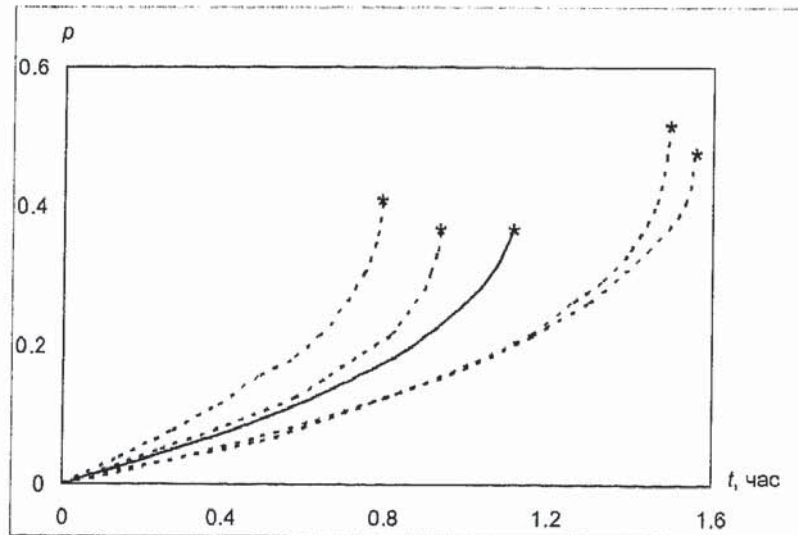


Рис. 4.

Экспериментальные и теоретическая кривые ползучести при $\sigma_0 = 167$ МПа.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты экспериментально-теоретического исследования ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 в широком диапазоне растягивающих напряжений. В испытаниях обнаружена немонотонная зависимость предельной деформации ползучести, соответствующей разрушению, от начального напряжения. Предложенный вариант кинетической теории ползучести приводит к хорошему соответствию экспериментальных и теоретических характеристик ползучести вплоть до разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальков В.К., Назаров В.В., Новотный С.В. Методика проведения высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Том 72. – №4. – С.42-44.
2. Локощенко А.М., Назаров В.В., Новотный С.В., Ковальков В.К. Экспериментальное исследование ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 при температуре 600°C // Вестник двигателестроения. Изда-во ОАО "Мотор Сич". Запорожье. – 2006. – №3. – С.56-59.

3. Мищенко Л.Д., Дьяченко С.С., Тарабанова В.П. Исследование изменений структуры и характера разрушения стали 15Х1М1Ф в процессе ползучести. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1978. – №2. – С.110-112.
4. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения. // Прикладная механика и техническая физика. – 1982. – №1. – С.160-163.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. – 752 с.

621.664

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ НАЗНАЧЕННОГО РЕСУРСА ШЕСТЕРЕННЫХ НАСОСОВ

Канд. техн. наук И.П. АЙСТОВ, д-р техн. наук, проф. Л.О. ШТРИПЛИНГ

Рассмотрена задача формирования назначенного ресурса шестеренных насосов, основанная на анализе причин их преждевременных отказов. Принимается, что основной причиной преждевременных отказов агрегатов является фактическое нагруженное состояние составляющих его деталей, для оценки которого наиболее целесообразно использовать вероятностный подход.

Оценка фактического нагруженного состояния составляющих агрегат деталей позволяет выявить причины возникновения преждевременных отказов и предложить конкретные диагностические признаки для отсева тех агрегатов, варианты сборок которых имеют предпосылки возникновения у них преждевременных отказов. Отсев этих вариантов сборок агрегата на стадии производства позволяет повысить назначенный ресурс агрегатов.

Расчеты на прочность деталей машин (подшипниковых узлов, валов, пар трения, зубчатых колес, и пр.) основаны на корректном определении их нагруженного состояния в конкретных механизмах и агрегатах. Многообразие механизмов и агрегатов различного назначения потребовало специальных исследований и разработки методов определения нагрузок на детали машин, которые учитывают особенности конструкций, условий и режимов работы агрегатов. Например, для передаточных механизмов только на основе прямозубых зубчатых передач, таких как цилиндрические,