

## Оценка вязкопластических свойств титановых сплавов

Ф. Ф. Гигиняк, Т. Н. Можаровская, В. В. Башта

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Представлены результаты исследований вязкопластических свойств некоторых титановых сплавов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Экспериментально подтверждена применимость упруговязкопластической модели для исследованных конструкционных материалов.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, вязкопластические свойства, циклическое нагружение, сложное напряженное состояние.

Известно, что неупругое деформирование металлов, даже при комнатной температуре и скоростях, превышающих  $10^{-4}$  %/с, сопровождается эффектами, обусловленными влиянием времени (ползучесть, релаксация, чувствительность к скорости нагружения и т.д.).

В настоящем сообщении представлены результаты исследований вязкопластических свойств некоторых титановых сплавов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Исследования проводили на тонкостенных трубчатых образцах, изготовленных из титановых сплавов ВТ6С и ВТ20, в условиях ступенчатого циклического нагружения при сложном напряженном состоянии по методике, описанной в [1, 2], на установке СНТ-8У. Нагружение осуществлялось по трапецеидальному циклу с выдержкой 6 с при максимальной интенсивности напряжений в цикле с реализацией соотношения  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty; 1; 0,5$  при температуре 20°C. Частота нагружения на каждой ступени выбиралась такой, чтобы обеспечить в процессе нагружения интенсивность скоростей активного деформирования  $\dot{\varepsilon}_i = 0,025$  %/с.

На рис. 1 и 2 представлены диаграммы циклического ступенчатого деформирования титановых сплавов ВТ20 и ВТ6С, которые качественно подобны таковым для теплоустойчивых сталей [3–6]. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности использования упруговязкопластической модели материала [4] для случая ступенчатого циклического деформирования исследуемых материалов при разных соотношениях главных напряжений.

На основании подходов, которые используются для теплоустойчивых сталей [7], можно заключить, что долговечность указанных сплавов при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния, когда разрушение развивается по квазистатическому механизму, будет зависеть как от ресурса располагаемой равномерной пластичности, определяющего наступление потери устойчивости процесса деформирования, так и от скорости циклической ползучести при заданных условиях нагружения, которая обуславливает кинетику достижения предельного состояния.

Для некоторых, в том числе и для исследованных, материалов данного класса в качестве прочностных и деформационных характеристик с доста-

точной для инженерных расчетов точно можно использовать интенсивность напряжений и интенсивность деформаций [8].

На основании полученных диаграмм (рис. 1 и 2) строили кривые циклической ползучести, ограничиваясь участками замедленной ползучести (рис. 3).

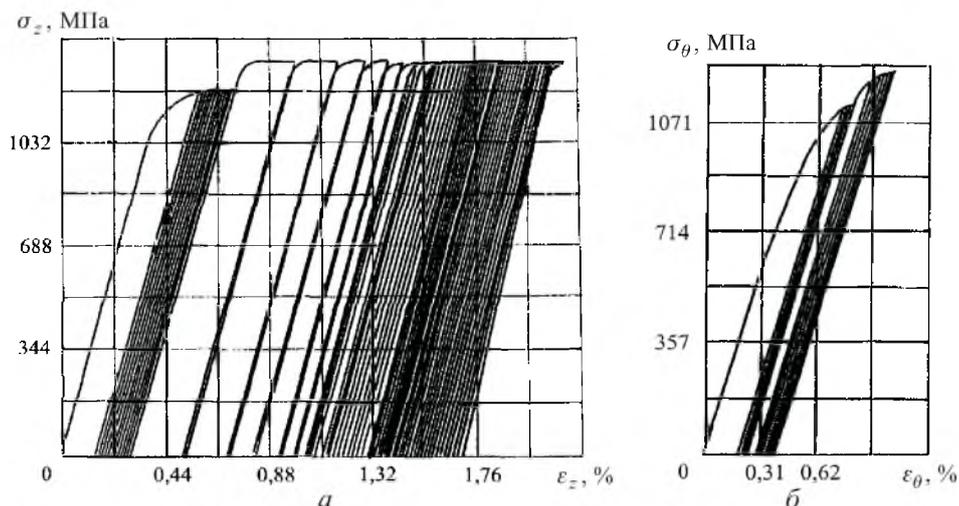


Рис. 1. Диаграммы циклического ступенчатого деформирования титанового сплава ВТ20 в направлении действия максимального главного напряжения:  $a - K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ;  $b - K = 0,5$ .

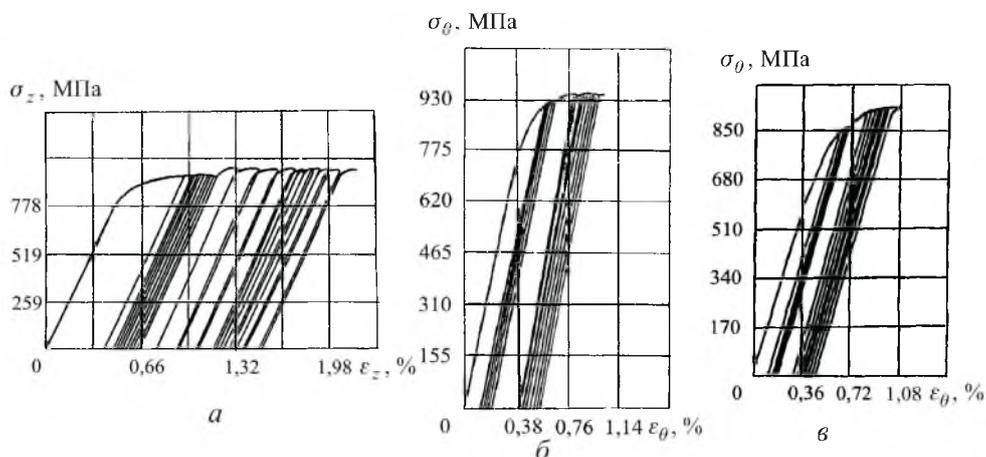


Рис. 2. Диаграммы циклического ступенчатого деформирования титанового сплава ВТ6С в направлении действия максимального главного напряжения:  $a - K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ;  $b - K = 1$ ;  $b - K = 0,5$ .

С целью определения начальных скоростей ползучести при различных соотношениях главных напряжений полученные результаты в координатах логарифм скорости ползучести – деформация ползучести подвергались обработке с экстраполяцией зависимости до нулевого значения деформации ползучести. Данные обработки, представленные на рис. 4, показали, что начальная скорость ползучести для сплавов ВТ6С и ВТ20 меньше скорости

предшествующего активного деформирования, т.е. при мгновенной остановке нагружения скорость деформации изменяется скачкообразно. Указанное обстоятельство служит экспериментальным подтверждением применимости выбранной УВП-модели для исследованных конструкционных материалов.

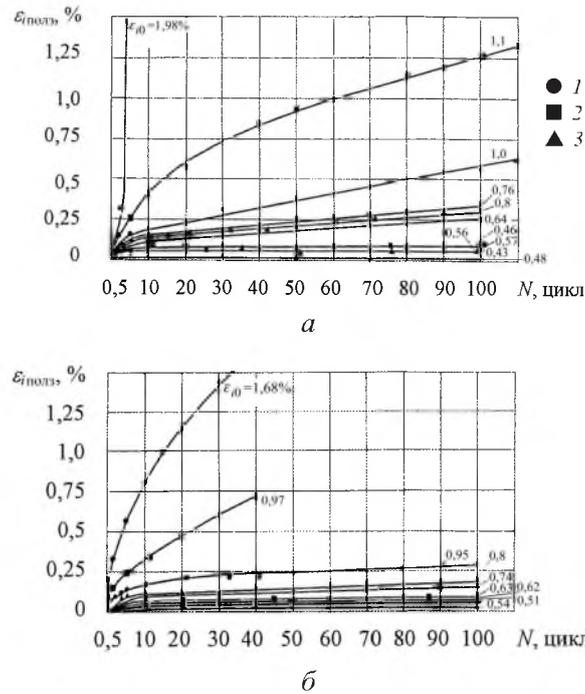


Рис. 3. Кривые ползучести титановых сплавов VT6C (а) и VT20 (б) в условиях ступенчатого циклического нагружения при различных уровнях предварительной деформации ( $\epsilon_{i0}$ ): 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

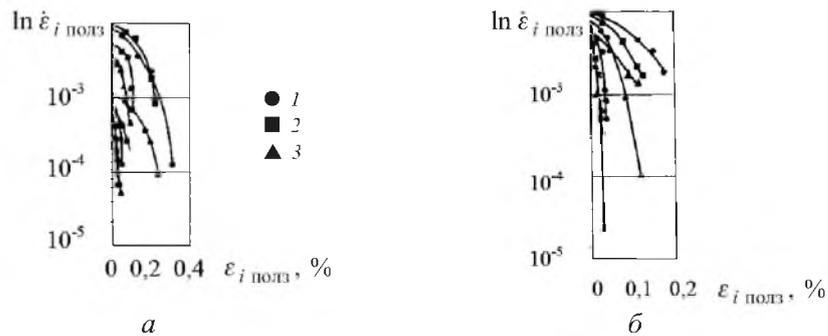


Рис. 4. Зависимость скорости ползучести от деформации ползучести титановых сплавов VT20 (а) и VT6C (б) при ступенчатом циклическом нагружении: 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Анализ данных (рис. 4) свидетельствует о том, что наиболее существенно эффект скачкообразного изменения скорости деформации при мгновенной остановке нагружения проявляется в условиях равномерного двухосного растяжения сплавов, наименее – в условиях одноосного растяжения.

Определенные по кривым ползучести начальные скорости ползучести для каждого сплава при различных соотношениях главных напряжений в зависимости от предварительной деформации представлены на рис. 5. Как видно, по мере увеличения необратимой деформации в условиях активного деформирования доля вязкой компоненты полной деформации возрастает при одновременном уменьшении доли пластической деформации, не зависящей от времени. При этом интенсивность развития указанного процесса при всех реализованных соотношениях главных напряжений наиболее низкая у сплава ВТ6С.

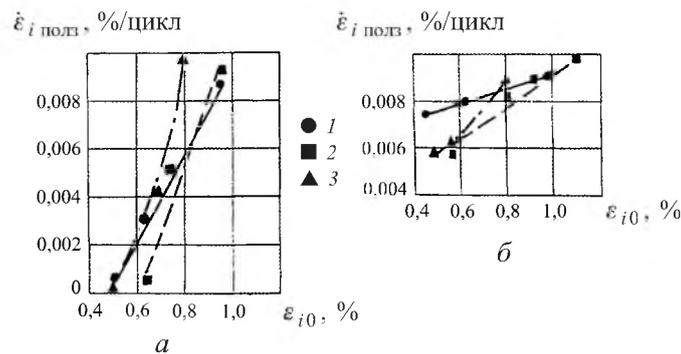


Рис. 5. Зависимость интенсивности начальных скоростей ползучести титановых сплавов ВТ20 (а) и ВТ6С (б) от величины предварительной деформации при различных соотношениях главных напряжений: 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Опыты также показали, что в условиях устойчивого деформирования для обоих исследованных материалов характеристики вязкопластических свойств, выраженные в интенсивностях деформаций, инвариантны к виду напряженного состояния. При переходе к неустойчивому развитию деформаций наблюдается интенсификация ползучести, темп которой существенно зависит от вида напряженного состояния (рис. 6).

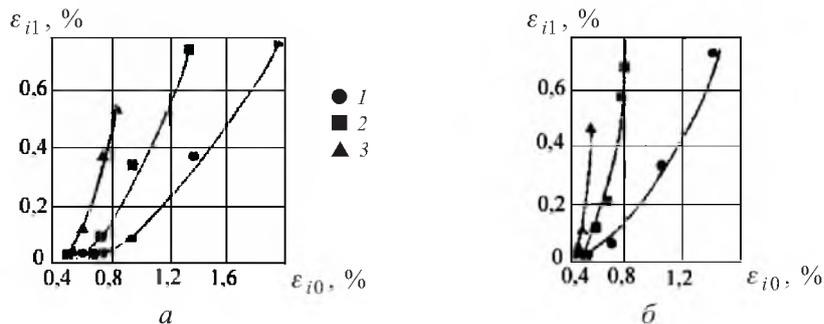


Рис. 6. Зависимость интенсивности деформаций замедленной ползучести за 50 циклов нагружения от уровня предварительной пластической деформации титановых сплавов ВТ6С (а) и ВТ20 (б): 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Общим признаком квазистатического разрушения при циклическом нагружении в условиях ползучести является потеря устойчивости процесса деформирования.

Таким образом, долговечность материала при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния, когда разрушение развивается по квазистатическому механизму, будет зависеть от ресурса располагаемой пластичности (потери устойчивости пластического деформирования) и от скорости циклической ползучести при заданных условиях нагружения (кинетики достижения предельного состояния).

Важной характеристикой материала при расчетах на долговечность в условиях циклического деформирования является напряжение перехода  $\sigma_{in}$  от усталостного вида разрушения к квазистатическому [9]. Напряжение перехода  $\sigma_{in}$  – это максимальное напряжение, при котором возможно достижение равновесного напряженно-деформированного состояния.

Результаты испытаний сплавов при ступенчатом пульсирующем нагружении позволяют определить характеристики материала при циклическом силовом воздействии, в частности такие важные для расчета долговечности конструкции параметры, как напряжения перехода и предельные деформации. На основе экспериментальных данных по точкам, соответствующим равновесному напряженно-деформированному состоянию при циклической ползучести, построены квазистатические диаграммы для каждого сплава. В результате сравнения последних с действительными диаграммами (рис. 7), полученными при заданной скорости активного деформирования, определены деформации, которые накоплены в условиях ползучести при заданном уровне максимальных напряжений цикла, и условия перехода от усталостного разрушения к квазистатическому, о чем упоминалось выше.

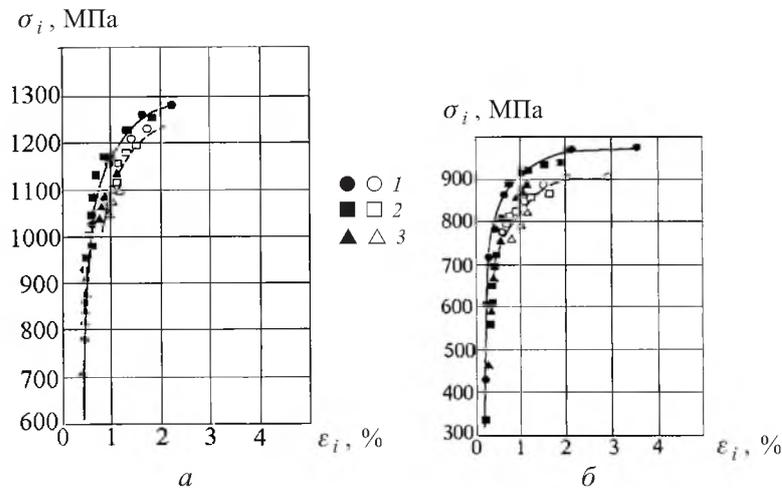


Рис. 7. Действительные (темные точки) и квазистатические (светлые точки) диаграммы деформирования титановых сплавов ВТ20 (а) и ВТ6С (б) при ступенчатом пульсирующем нагружении: 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ . (Скорость деформации  $\dot{\epsilon}_i = 0,025$  %/с.)

В табл. 1 представлены расчетные значения интенсивности напряжений перехода для сплавов ВТ20 и ВТ6С при различных соотношениях главных напряжений, которые получены с использованием системы уравнений, предложенной в [10], на основе условия потери устойчивости процесса пластического деформирования. При этом в указанной системе уравнений обоб-

щенная действительная диаграмма деформирования заменяется обобщенной квазистатической диаграммой. Существование таких квазистатических диаграмм обосновано экспериментально. В случае ступенчатого циклического нагружения для каждого из сплавов существует своя обобщенная квазистатическая диаграмма деформирования, инвариантная к виду напряженного состояния (рис. 7).

Т а б л и ц а 1

**Напряжения перехода от усталостного разрушения к квазистатическому при различных соотношениях главных напряжений сплавов ВТ20 и ВТ6С при  $T = 20^{\circ}\text{C}$**

Материал	$\sigma_{\text{п}}$ , МПа, при $K = \sigma_z / \sigma_{\theta}$ , равном			
	$\infty$	2	1	0,5
ВТ20	1236	1076	1205	1067
ВТ6С	900	762	820	820

Характеристики квазивязких свойств материалов при циклическом нагружении рассчитывали согласно зависимости коэффициента вязкости при циклическом нагружении  $k'_i$  от величины интенсивности неравновесных напряжений  $\sigma_i^*$  [6]. При этом для расчетов использовали соотношение

$$k'_i = \frac{\varepsilon_{i1} \ln \left( \frac{\varepsilon_{i0} + \varepsilon_{i1} - \varepsilon_{\text{иполз}}}{\varepsilon_{i1}} \right)}{\sigma_i^* N}, \quad (1)$$

где  $N$  – число циклов;  $\varepsilon_{i0}$  – деформация, достигнутая в результате предварительного активного нагружения;  $\varepsilon_{i1}$  – величина необратимой деформации, накапливаемой на первой стадии ползучести;  $\varepsilon_{\text{иполз}}$  – текущее значение деформации ползучести.

Экспериментально установлена инвариантность вязкопластических свойств сплавов ВТ20 и ВТ6С к виду напряженного состояния и величине предшествующей пластической деформации (рис. 8).

Зависимость коэффициента вязкости  $k'_i$  от интенсивности неравновесных напряжений  $\sigma_i^*$  описывается для данных сплавов уравнением вида

$$k'_i = a(\sigma_i^*)^b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые по данным двух опытов на ползучесть при одноосном пульсирующем растяжении (табл. 2).

Из представленных выше результатов следует, что для описания ползучести титановых сплавов в области устойчивого пластического деформирования, как и для теплоустойчивых сталей, при циклическом нагружении достаточно располагать квазистатической диаграммой и определить зависимость коэффициента вязкости от величины неравновесных напряжений. При

переходе в область потери устойчивости процесса пластического деформирования, достижение которой зависит от вида напряженного состояния, кинетика ползучести определяется, как и для других материалов, балансом между упрочнением материала и снижением несущей способности конструкции в результате изменения ее размеров.

Т а б л и ц а 2

Параметры  $a$  и  $b$  для титановых сплавов ВТ20 и ВТ6С при  $T = 20^\circ\text{C}$

Материалы	$a \cdot 10^7, \%/цикл \cdot \text{МПа}$	$b$
ВТ20	7,8	1,333
ВТ6С	9,3	1,126

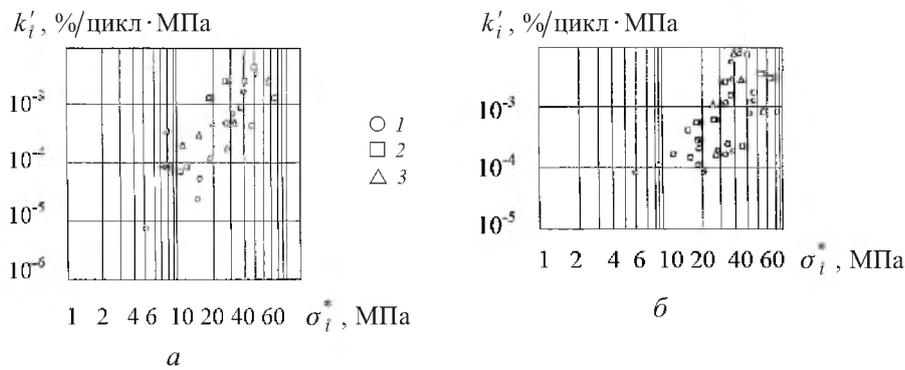


Рис. 8. Зависимость коэффициента вязкости при циклическом нагружении от уровня неравновесных напряжений титановых сплавов ВТ20 (а) и ВТ6С (б): 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Таким образом, экспериментально обоснована упруговязкопластическая модель поведения титановых сплавов, позволяющая с единых позиций описать процессы пластического деформирования при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Полученные экспериментальные результаты могут использоваться для оценки долговечности титановых сплавов с помощью разработанного ранее расчетно-экспериментального метода, учитывающего потерю устойчивости пластического деформирования материала.

## Резюме

Представлено результати досліджень в'язкопластичних властивостей деяких титанових сплавів при циклічному навантаженні в умовах складного напруженого стану. Експериментально обґрунтовано застосування пружно-в'язкопластичної моделі для досліджених конструкційних матеріалів.

1. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Федоров Р. К. и др. Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. – С. 70 – 74.

2. А. с. 1525533 СССР. Способ определения упруговязкопластических свойств металлических материалов при статическом нагружении / Ф. Ф. Гигиняк, О. К. Шкодзинский, А. А. Лебедев. – Оpubл. 30. 11. 89. Бюл. № 44.
3. Шкодзінський О. К., Гігіняк Ф. Ф., Баица В. В., Сторчак М. В. Вплив радіаційного опромінювання на механічні властивості реакторних сталей при складному напруженому стані // Лучевая обработка композиционных материалов в технике: Тр. Республ. науч.-практ. семинара. – Тернополь: Тернопольский дом техники НТО, 1990. – С. 42 – 43.
4. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Шкодзинский О. К. Упруговязкопластическая модель, описывающая свойства сталей перлитного класса // XXI Всесоюз. науч. сов. по проблемам прочности двигателей: Тез. докл. – М.: ЦИАМ, 1986. – С. 57.
5. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Тимофеев Б. Т. и др. Характеристики вязкопластичности теплоустойчивых сталей при сложном напряженном состоянии на основе упруговязкопластической модели // III Всесоюз. симп. “Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии”: Тез. докл. – Киев: ОНТИ ИПП АН УССР, 1989. – Ч. 1. – С. 39 – 40.
6. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Баица В. В. и др. Вязкопластические свойства стали 10ГН2МФА при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 30 – 34.
7. Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф. К оценке долговечности теплоустойчивых сталей при пульсирующем мягком нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 1989. – № 5. – С. 32 – 37.
8. Хакимов А. Ф. Закономерности неупругого деформирования высокопрочных конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 16 с.
9. Стрижало В. А. Исследование закономерностей перехода от квазистатического к усталостному разрушению легких сплавов при малоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1974. – № 5. – С. 42 – 43.
10. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Тимофеев Б. Т. О потере устойчивости процесса пластического деформирования при сложном напряженном состоянии // Там же. – 1991. – № 10. – С. 3 – 8.

Поступила 04. 07. 2003