

К оценке долговечности высокопрочных материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния

Ф. Ф. Гигиняк, Т. Н. Можаровская, П. А. Булах

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

Проведена экспериментальная оценка долговечности высокопрочных материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния с использованием деформационно-кинетического критерия.

Ключевые слова: высокопрочные материалы, циклическое нагружение, сложное напряженное состояние.

Введение. Результаты исследований вязкопластических свойств титановых сплавов и сталей при циклическом нагружении [1, 2] показывают, что оценка их долговечности должна выполняться с учетом кинетики направленного пластического деформирования. Одним из оптимальных вариантов расчета долговечности может быть расчет с использованием деформационно-кинетического критерия, разработанного в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины [3]:

$$N_b = \frac{C'_i}{a(\sigma_{i\max} - \sigma_{i\text{ш}})^{b+1}}, \quad (1)$$

где C'_i – параметр деформационных свойств материала и вида напряженного состояния, определяемый согласно [4] из условия потери устойчивости пластического деформирования при ступенчатом циклическом нагружении; $\sigma_{i\max}$ – максимальная интенсивность напряжений цикла; $\sigma_{i\text{ш}}$ – напряжение перехода от разрушения по механизму усталости к квазистатическому разрушению, определяемое из условия потери устойчивости пластического деформирования; при этом уравнение обобщенной кривой $\sigma_3(\varepsilon_i)$ заменяется уравнением равновесной квазистатической кривой $\sigma_{\text{эравн}}(\varepsilon_i)$; a , b – константы материала для конкретных условий, определяемые из опытов при ступенчатом циклическом нагружении или по результатам двух экспериментов в условиях одноосного пульсирующего растяжения.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном обосновании применимости критерия вида (1) для расчетов долговечности высокопрочных титановых сплавов ВТ6С, ВТ20 и стали ВНС-25.

Методы, результаты исследований и их обсуждение. Испытания проводили на тонкостенных трубчатых образцах из стали ВНС-25 и титановых сплавов ВТ6С и ВТ20 при температуре 20°C на стенде СНТ-8У по методике, подробно описанной в [5]. В экспериментах реализовывали одноосное ($K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$) и двухосное ($K = 0,5$) пульсирующее растяжение.

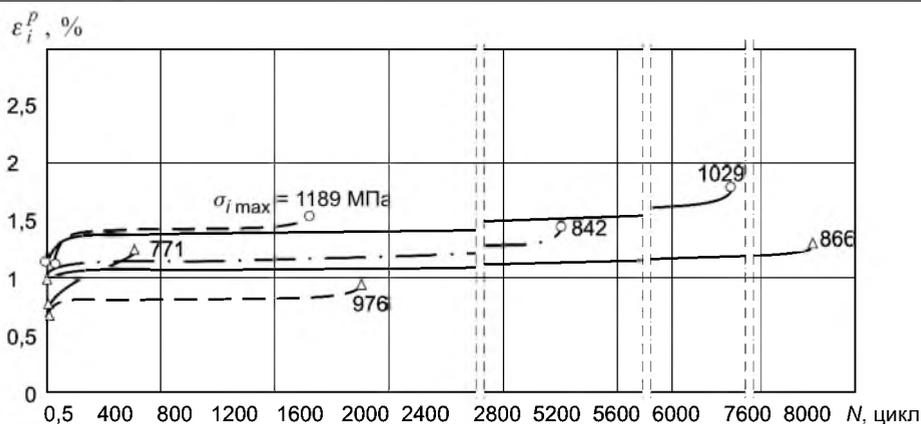


Рис. 1. Кривые циклической ползучести стали ВНС-25 (сплошные линии) и титановых сплавов ВТ20 (штриховые линии), ВТ6С (штрихпунктирные линии) при сложном напряженном состоянии. Здесь и на рис. 2: $\circ - K = \infty$; $\triangle - K = 0,5$.

Анализ полученных кривых ползучести исследуемых материалов свидетельствует о том, что вид напряженного состояния оказывает влияние на процессы циклической ползучести (рис. 1).

Так, при $K = 0,5$ существенно сокращаются участки установившейся ползучести по сравнению с такими же участками при одноосном пульсирующем растяжении. При этом о продолжительности участков ускоренной ползучести при неравномерном двухосном растяжении судить сложно, поскольку методика испытаний не всегда позволяет с необходимой точностью регистрировать деформации, которые соответствуют разрушению, в связи с их локализацией.

Квазистатическое разрушение наступает по достижении интенсивностью пластической деформации уровня, который соответствует уровню интенсивности остаточной деформации, определенной после разрушения при однократном нагружении для данного вида напряженного состояния. При переходе в область усталостного разрушения величины накопленных деформаций исследуемых материалов при различных соотношениях главных напряжений существенно уменьшаются.

Характерные особенности кривых ползучести полностью коррелируют с изменениями кривых малоциклового усталости, построенных в координатах относительная интенсивность ($\sigma_{i \max} / \sigma_{ib}$) – число циклов (N_b), где σ_{ib} , N_b – соответственно интенсивность напряжений и число циклов, соответствующие разрушению образца в условиях однократного нагружения (рис. 2).

Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о существенном влиянии вида напряженного состояния на процессы циклической ползучести, начиная с установившейся стадии, т.е. с момента перехода к потере устойчивости пластического деформирования. Следует отметить, что в условиях квазистатического разрушения для одинаковых уровней максимальной интенсивности напряжений цикла исчерпание долговечности при двухосном растяжении наступает раньше, чем при одноосном. Особенности характера разрушения образцов исследуемых материалов при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния обусловлены влия-

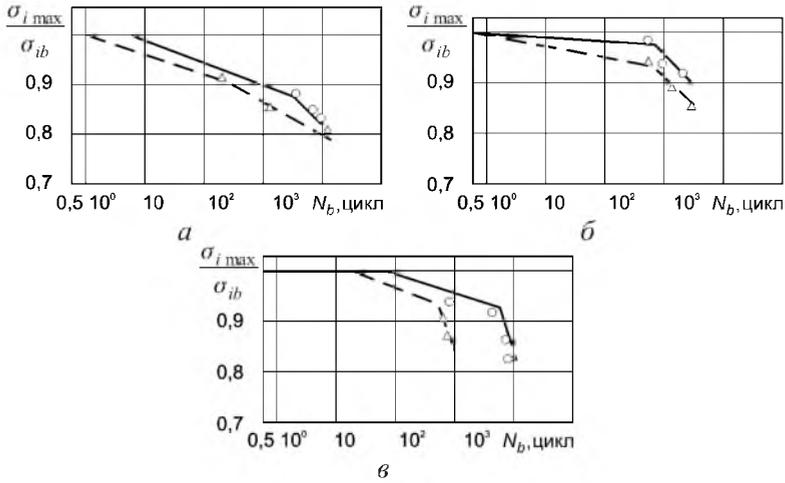


Рис. 2. Кривые малоциклового усталости стали ВНС-25 (а) и титановых сплавов ВТ20 (б), ВТ6С (в) при сложном напряженном состоянии.

нием вида напряженного состояния. Так, при соотношении главных напряжений $K = \infty$ магистральная трещина развивается перпендикулярно оси образца, при $K = 0,5$ – вдоль образующей. Разрушение по квазистатическому механизму происходит по плоскостям действия максимальных касательных напряжений (под углом 45° к поверхности образца).

Возвращаясь к расчетам долговечности исследуемых сплавов, остановимся подробнее на методах определения некоторых параметров расчетной зависимости (1).

Известно [4], что значения параметра C'_i в критерии (1) для различных видов напряженного состояния должны коррелировать с величинами параметра C'_p , полученными при однократном нагружении с использованием условия потери устойчивости процесса пластического деформирования. Отмеченная закономерность характеризуется тем, что стадия установившейся ползучести при циклическом нагружении в случае квазистатического разрушения определяется условием самокомпенсации снижения несущей способности объекта испытаний (образца), связанной с его деформированием, при одновременном деформационном упрочнении материала. Сравнение расчетных значений C'_i (таблица) с полученными экспериментально свидетельствует о хорошем их соответствии (рис. 3).

Поскольку разрушение носило квазистатический характер, с учетом упруговязкопластической модели [6–8] можно принять, что установившаяся скорость циклической ползучести определяется значением максимального напряжения цикла $\sigma_{i \max}$, превышающим величину напряжения перехода σ_{in} .

Тогда для пульсирующего растяжения имеем

$$\dot{\varepsilon}_{i \min} = k'_i (\sigma_{i \max} - \sigma_{in}) \tag{2}$$

или с учетом представленной в [1, 2] зависимости

$$k'_i (\sigma_i^*) = a (\sigma_i^*)^b \tag{3}$$

получаем

$$\dot{\varepsilon}_{i \min} = a(\sigma_{i \max} - \sigma_{in})^{b+1}. \quad (4)$$

Изложенный выше подход позволяет на основе ограниченного объема относительно простых базовых опытов в условиях одноосного пульсирующего растяжения при ступенчатом повышении напряжения рассчитать долговечность для различных видов напряженного состояния в условиях циклического нагружения, когда реализуется квазистатическое разрушение. На рис. 4 для сравнения представлены расчетные значения долговечности по уравнению (1) и экспериментальные данные. Видно, что соотношение (1) можно использовать для расчета долговечности исследованных высокопрочных материалов при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Усредненные значения параметра

Материал	$C'_i, \%$	
	$K = \infty$	$K = 0,5$
ВНС-25	0,380	0,0762
ВТ6С	0,126	0,2180
ВТ20	0,076	0,0297

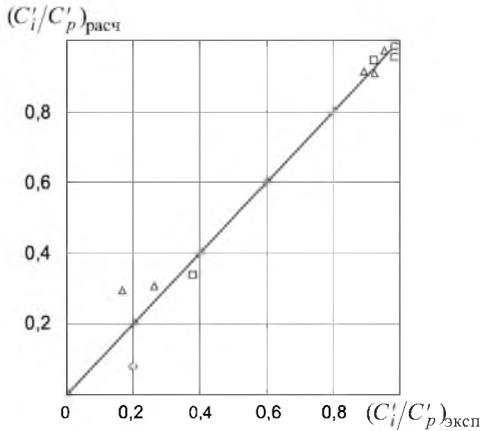


Рис. 3

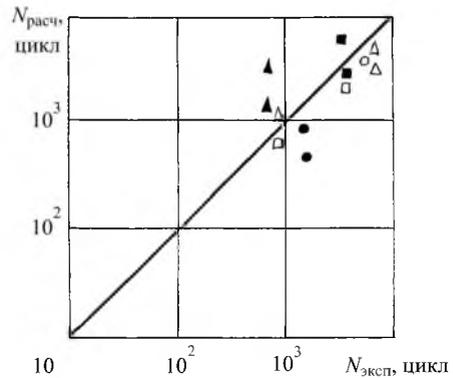


Рис. 4

Рис. 3. Сравнение относительных расчетных значений параметра C'_i , характеризующих деформацию установившейся ползучести, с экспериментальными для высокопрочных материалов ВНС-25 (○), ВТ20 (□), ВТ6С (△).

Рис. 4. Сопоставление расчетных значений долговечности по зависимости (1) с экспериментальными в условиях одноосного (светлые точки) и двухосного (темные точки) пульсирующего растяжения для высокопрочных материалов ВНС-25 (○, ●), ВТ20 (□, ■), ВТ6С (△, ▲).

Заключение. Выполненные исследования позволяют экспериментально обосновать возможность применения предложенных ранее разработок по расчетам долговечности для широкого круга конструкционных материалов различных классов.

Резюме

Проведено експериментальне обґрунтування оцінки довговічності високоміцних матеріалів при циклічному навантаженні в умовах складного напруженого стану з використанням деформаційно-кінетичного критерію.

1. Гигиняк Ф. Ф., Можаровская Т. Н., Баишта В. В. Оценка вязкопластических свойств титановых сплавов // Пробл. прочности. – 2005. – № 3. – С. 37 – 44.
2. Гигиняк Ф. Ф., Можаровская Т. Н., Булах П. А. Оценка вязкопластических свойств высокопрочной стали ВНС-25 при сложном напряженном состоянии // Там же. – 2007. – № 6. – С. 122 – 127.
3. 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.
4. 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.
5. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Федоров Р. К. и др. Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – С. 70 – 74.
6. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Шкодзинский О. К. Метод оценки долговечности конструкционных сталей в условиях пульсирующего нагружения при сложном напряженном состоянии // XXII Всесоюз. науч. совещ. по проблемам прочности двигателей: Тез. докл. – М.: ЦИАМ, 1988. – С. 65.
7. 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.
8. Шкодзинский О. К. Феноменологическая модель упруговязкопластического материала // Пробл. прочности. – 1987. – № 11. – С. 53 – 56.

Поступила 18. 03. 2008