

## Оценка вязкопластических свойств высокопрочной стали ВНС-25 при сложном напряженном состоянии

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

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

*Представлены результаты исследования высокопрочной стали ВНС-25 при ступенчатом циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Экспериментально обосновано применение упруговязкопластичной модели для исследования конструкционных материалов.*

**Ключевые слова:** высокопрочная сталь, вязкопластические свойства, циклическое нагружение, сложное напряженное состояние.

При проектировании современных высоконагруженных элементов конструкций предполагается использовать результаты исследований закономерностей поведения материалов, обусловленных влиянием основных эксплуатационных факторов (вид напряженного состояния, способ нагружения, температура) на их механические свойства, и на этой основе разработать новые модели процессов деформирования и разрушения, а также высокоточные методы расчета долговечности. В частности, экспериментальные исследования при различных видах напряженного состояния с учетом временных факторов позволяют определить условия нагружения, при которых фактором времени можно пренебречь, и аналитически описать обнаруженные эффекты.

В данной работе приведены результаты исследования вязкопластических свойств стали ВНС-25 при сложном напряженном состоянии. Исследования проводили на тонкостенных трубчатых образцах при ступенчатом циклическом нагружении по трапециевидному циклу с выдержкой 6 с при максимальной интенсивности напряжений в цикле с реализацией соотношений  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty; 1; 0,5$  и температуре 20°С на установке СНТ-8У по ранее разработанной методике [1, 2].

В процессе нагружения скорость деформации выражена в интенсивностях деформаций  $\dot{\epsilon}_i = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что обеспечивалось выбором определенной частоты нагружения на каждой ступени. На рис. 1 представлены диаграммы ступенчатого циклического деформирования стали ВНС-25.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности использования упруговязкопластической модели [3, 4] для описания ступенчатого циклического деформирования стали ВНС-25 при различных соотношениях главных напряжений. Для некоторых материалов [5], в том числе и для исследуемой стали ВНС-25, в качестве прочностных и деформационных характеристик можно использовать интенсивность напряжений и интенсивность деформаций [4, 6].

С использованием диаграмм, представленных на рис. 1, можно получить кривые циклической ползучести [7] – участки замедленной ползучести.

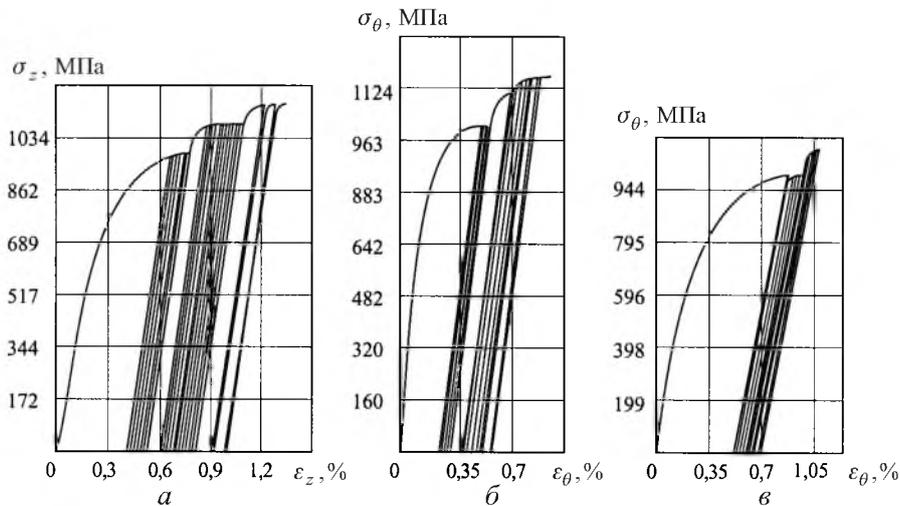


Рис. 1. Диаграммы ступенчатого циклического деформирования стали ВНС-25 в направлении действия максимального главного напряжения: *a* –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ; *b* –  $K = 1$ ; *v* –  $K = 0,5$ .

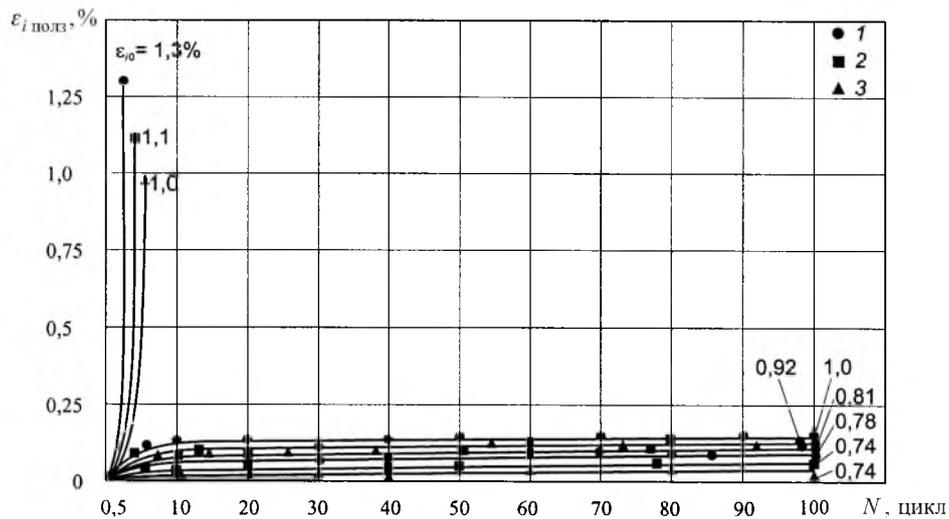


Рис. 2. Кривые ползучести стали ВНС-25 в условиях ступенчатого циклического нагружения при различных уровнях предварительной деформации  $\epsilon_{i0}$  и соотношениях главных напряжений: 1 –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Для стали ВНС-25 при некоторых реализованных соотношениях главных напряжений такие начальные участки приведены на рис. 2.

С целью определения начальных скоростей ползучести при различных соотношениях главных напряжений осуществляли обработку полученных результатов в координатах логарифм скорости ползучести – деформация ползучести с экстраполяцией зависимости до нулевого значения деформации ползучести (рис. 3). Установлено, что начальная скорость ползучести меньше скорости предшествующего активного деформирования, т.е. при мгновенной остановке нагружения скорость деформации изменяется скачкообразно. Это обстоятельство является экспериментальным подтверждением

применимости упруговязкопластической модели для исследуемого материала. Наиболее существенно проявляется этот эффект для стали ВНС-25 в условиях равномерного двухосного растяжения, наименее – при одноосном растяжении.

Определенные с помощью кривых ползучести начальные скорости при различных соотношениях главных напряжений в зависимости от предварительной деформации иллюстрирует рис. 4. Видно, что с увеличением необратимой деформации при активном деформировании стали ВНС-25 доля вязкой компоненты полной деформации возрастает с одновременным уменьшением доли пластической деформации, не зависящей от времени.

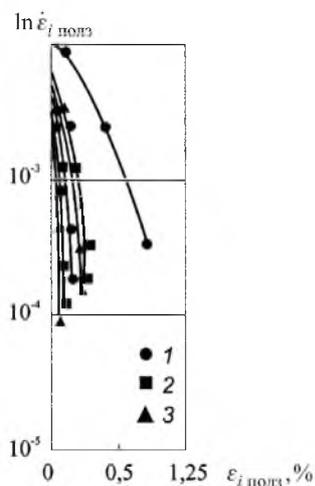


Рис. 3

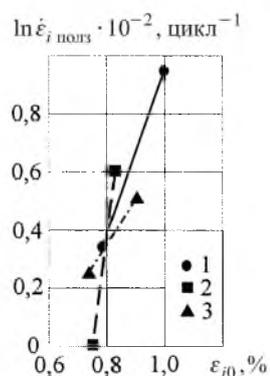


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость скорости ползучести от деформации ползучести стали ВНС-25 в условиях сложного напряженного состояния при ступенчатом циклическом нагружении: 1 –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Рис. 4. Зависимость интенсивности начальных скоростей ползучести стали ВНС-25 от величины предварительной деформации при различных соотношениях главных напряжений: 1 –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Анализ динамики процесса ползучести в зависимости от степени предшествующей активной деформации показал, что в условиях устойчивого деформирования исследуемого материала характеристики вязкопластических свойств представленные в интенсивностях деформаций, инвариантны к виду напряженного состояния. При переходе к неустойчивому деформированию процесс ползучести интенсифицируется и существенно зависит от вида напряженного состояния, что наблюдается также для других материалов [6] (рис. 5).

Результаты экспериментальных исследований стали ВНС-25, полученные при пульсирующем ступенчатом нагружении, позволяют определить механические характеристики материала при циклическом силовом воздействии, в частности величины напряжения перехода от усталостного разрушения к квазистатическому и предельных деформаций, которые являются основными параметрами при расчете долговечности конструкций.

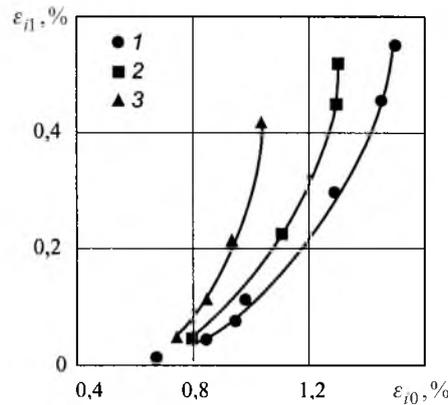


Рис. 5. Зависимость интенсивности деформаций замедленной ползучести за 50 цикл нагружения от уровня предварительной пластической деформации стали ВНС-25 при различных соотношениях главных напряжений: 1 –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Для исследуемой стали на основе экспериментальных данных была построена квазистатическая диаграмма, которую сравнивали с действительной, полученной при заданной скорости активного деформирования (рис. 6). В результате такого сравнения можно определить величину деформации, накопленной в условиях ползучести при заданном уровне максимальных напряжений цикла и различных соотношениях главных напряжений, а также условия перехода от усталостного разрушения к квазистатическому. Значения напряжений такого перехода при различных видах напряженного состояния стали ВНС-25 таковы: при  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$  имеем  $\sigma_{in} = 1076$  МПа, при  $K = 1$  –  $\sigma_{in} = 1065$  МПа, при  $K = 0,5$  –  $\sigma_{in} = 952$  МПа. Таким образом, для описания кинетики ползучести стали ВНС-25 при циклическом нагружении необходимо получить квазистатическую диаграмму и определить зависимость коэффициента вязкости от величины неравновесных напряжений, используя соотношение [8]

$$k_i = \frac{\varepsilon_{i1}}{\sigma_i^* N} \ln \left( \frac{\varepsilon_{i0} + \varepsilon_{i1} - \varepsilon_{i\text{полз}}}{\varepsilon_{i1}} \right), \quad (1)$$

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

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента вязкости при циклическом нагружении от величины неравновесных напряжений стали ВНС-25, которая описывается уравнением вида

$$k_i = a(\sigma_i^*)^b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые по данным двух базовых опытов на ползучесть при одноосном пульсирующем растяжении,  $a = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/(\text{цикл} \cdot \text{МПа})$ ;  $b = 0,64$ .

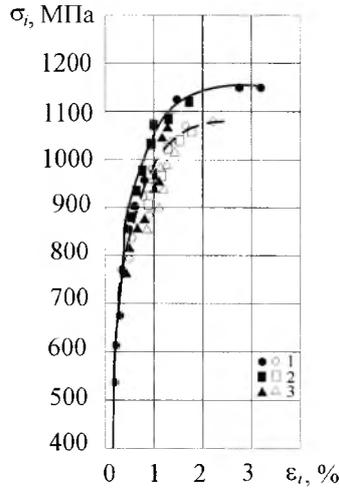


Рис. 6. Действительная (темные точки) при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и квазистатическая (светлые точки) диаграммы деформирования стали ВНС-25, полученные на основе экспериментов при ступенчатом пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния: 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

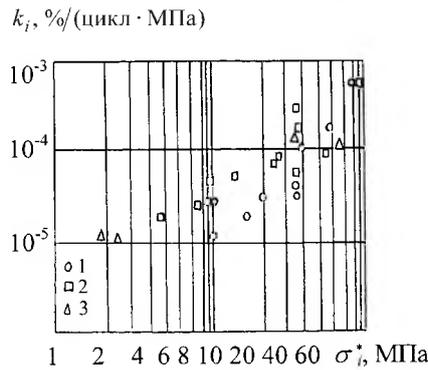


Рис. 7. Зависимость коэффициента вязкости от величины неравновесных напряжений стали ВНС-25 в условиях сложного напряженного состояния: 1 –  $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ; 2 –  $K = 1$ ; 3 –  $K = 0,5$ .

Таким образом, для описания ползучести высокопрочной стали ВНС-25 в области устойчивого пластического деформирования при циклическом нагружении необходимо получить квазистатическую диаграмму при одноосном растяжении, определить зависимость коэффициента вязкости от величины неравновесных напряжений. Эти результаты можно использовать для различных соотношений главных напряжений, что существенно упрощает методику экспериментальных исследований, уменьшает объем эксперимента и его продолжительность.

Полученные экспериментальные результаты позволяют учитывать изменения прочностных и деформационных характеристик исследуемой стали в зависимости от вида напряженного состояния и могут эффективно использоваться для оценки долговечности элементов конструкций, работающих при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

**Резюме**

Представлено результати досліджень високоміцної сталі ВНС-25 при ступінчатому циклічному навантаженні в умовах складного напруженого стану. Експериментально обґрунтовано застосування пружно-в'язкопластичної моделі для дослідження 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. – Опубл. 30.11.89. Бюл. № 44.
3. 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.
4. Гигиняк Ф. Ф., Можаровская Т. Н., Баица В. В. Оценка вязкопластических свойств титановых сплавов // Пробл. прочности. – 2005. – № 3. – С. 37 – 44.
5. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Гигиняк Ф. Ф., Ламашевский В. П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Издательский Дом “Ин Юре”, 2003. – 540 с.
6. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Тимофеев Б. Т. О потере устойчивости процесса пластического деформирования при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. – С. 3 – 8.
7. Гігіняк Ф. Ф., Лебедєв А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловогому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
8. 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.

Поступила 23. 02. 2007