

Исследование закономерностей деформирования теплоустойчивых сталей в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии

Ф. Ф. Гигиняк^а, П. А. Булах^а, В. Н. Можаровский^б, Т. Н. Можаровская^б

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

^б Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

Исследованы закономерности деформирования стали 1X18H9T при длительном статическом нагружении по различным траекториям радиального нагружения с учетом влияния вида напряженного состояния. Оценены вязкопластические свойства стали 08X18H10T-ВД при ступенчатом статическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, длительное и ступенчатое статическое нагружение, сложное напряженное состояние, повреждаемость, вязкопластические свойства стали.

Введение. Большинство реальных элементов конструкций в процессе эксплуатации подвергается действию комплекса термомеханического нагружения, существенно влияющего на их несущую способность. Практический интерес с точки зрения совершенствования методов расчета элементов конструкций представляет всестороннее исследование свойств различных металлов и сплавов в процессе ползучести в условиях сложного напряженного состояния.

Анализ известных результатов, полученных при длительных испытаниях конструкционных материалов, работающих в условиях сложного напряженного состояния показывает, что процессы пластического деформирования материалов при ползучести существенно зависят от вида напряженного состояния [1–7 и др.].

Многие расчеты элементов конструкций, работающих в условиях ползучести, в основном базируются на результатах, полученных при одноосном растяжении. Попытка распространить описывающие ползучесть материалов уравнения, разработанные и экспериментально обоснованные применительно к одноосному напряженному состоянию, на случай произвольной системы напряжений путем введения некоторых обобщенных напряжений без учета влияния первого инварианта тензора и третьего инварианта девиатора напряжений на механические свойства материала не всегда оправданы.

В настоящей работе рассматриваются закономерности деформирования теплоустойчивых сталей при длительном статическом нагружении по различным траекториям радиального нагружения (1X18H9T, $T = 600^\circ\text{C}$) и ступенчатым статическом нагружении (08X18H10T-ВД, $T = 320^\circ\text{C}$) в условиях сложного напряженного состояния.

Влияние вида напряженного состояния на величину минимальной интенсивности скоростей деформаций ползучести. На рис. 1 представлена построенная по результатам экспериментов [8] зависимость минимальной интенсивности скоростей ползучести $\xi_{ic\min}$ от интенсивности напряжений

σ_i для стали 1X18H9T при $T = 600^\circ\text{C}$. Видно, что зависимость не инвариантна к виду напряженного состояния. Это обусловлено тем, что одно и то же значение σ_i , полученное различными путями радиального нагружения (рис. 2) [9], приводит к накоплению в материале разной по величине повреждаемости ω_j при различных видах напряженного состояния.

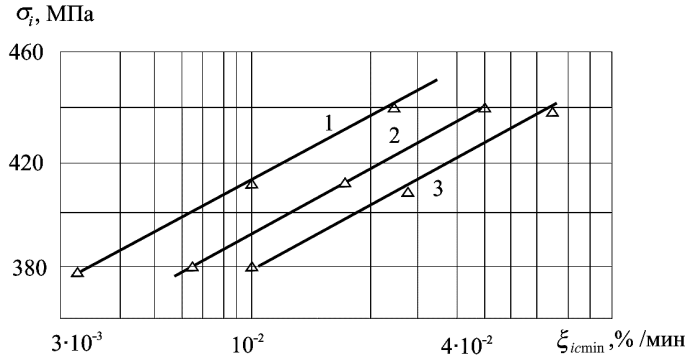


Рис. 1. Зависимость $\xi_{ic\ min} - \sigma_i$ для стали 1X18H9T при $T = 600^\circ\text{C}$ для некоторых режимов нагружения $\varphi_s = 0$: 1 - $\gamma_s = 0$; 2 - $\gamma_s = \pi/4$; 3 - $\gamma_s = \pi/2$. (Обозначения φ_s и γ_s приведены на рис. 2.)

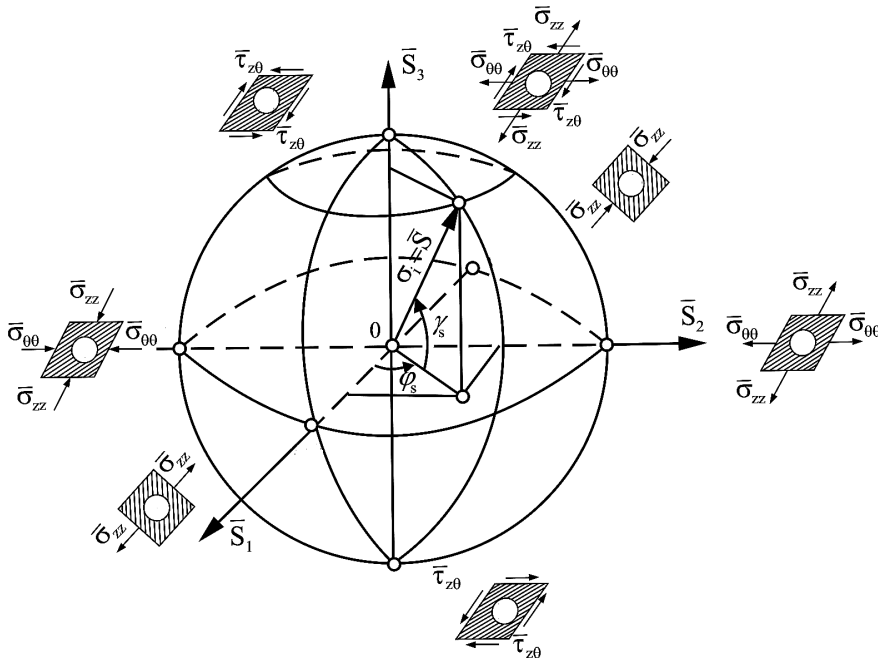


Рис. 2. Векторное пространство напряжений для плоского напряженного состояния.

Для описания кривых, представленных на рис. 1, использовалась гипотеза Людвика:

$$\xi_{c\ min} = \Lambda \exp(\sigma_i / c), \quad (1)$$

где Λ , c – параметры материала, определяемые при линейном напряженном состоянии.

Поскольку параметры Λ , c зависят от вида напряженного состояния, для описания кривых (рис. 1) их необходимо определять для каждой j -й траектории нагружения, что создает определенные трудности. Исходя из вышеизложенного заключим, что с помощью функции изменения величины повреждаемости ω_j при плоском напряженном состоянии, накопленной при нагружении по j -й траектории, в зависимости от накопленной повреждаемости ω при линейном напряженном состоянии можно получить соотношение для расчета минимальной интенсивности скоростей деформации ползучести в условиях исследуемого вида напряженного состояния, сохранив при этом постоянные материала, определяемые при линейном напряженном состоянии.

Представим эту функцию в виде

$$\Phi = \frac{1 - \omega_j}{1 - \omega}. \quad (2)$$

С помощью гипотез Работнова и Качанова [10–12] величину эквивалентной удельной потенциальной энергии деформации при линейном напряженном состоянии можно записать так:

$$\tilde{W} = \frac{\sigma^2}{2E(1 - \omega)^2}. \quad (3)$$

При плоском напряженном состоянии для случая нагружения по j -й траектории эта величина определяется следующим образом:

$$\tilde{W}^{(j)} = \frac{1}{2(1 - \omega)^2} [e_{ij} S_{ij} + 3\varepsilon_0 \sigma_0]. \quad (4)$$

С использованием зависимости изменения формы и объема, учитывая, что $|\bar{S}| = \sigma_i$, уравнение (4) преобразуется к виду

$$\tilde{W}^{(j)} = \frac{\sigma_i^2}{2E(1 - \omega_j)^2} \left[\frac{2}{3}(1 + \mu) + \frac{4}{3}(1 - 2\mu) \cos^2 \gamma_s \cos^2 \left(\varphi_s - \frac{\pi}{3} \right) \right], \quad (5)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Данная зависимость справедлива для любой траектории нагружения, в том числе и для случая $\varphi_s = 0$, $\gamma_s = 0$.

Учитывая, что $\sigma_i = \text{const}$, получаем

$$\Phi(\mu, \gamma_s, \varphi_s) = \frac{1 - \omega_j}{1 - \omega} \left[\frac{2}{3}(1 + \mu) + \frac{4}{3}(1 - 2\mu) \cos^2 \gamma_s \cos^2 \left(\varphi_s - \frac{\pi}{3} \right) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Таким образом, для учета влияния вида напряженного состояния на величину минимальной интенсивности скоростей деформации ползучести необходимо использовать уравнение в виде

$$\xi_{ic\min} = \Lambda \exp \left[\frac{\sigma_i}{c \Phi(\mu, \gamma_s, \varphi_s)} \right], \quad (7)$$

где $\Phi(\mu, \gamma_s, \varphi_s)$ – функция, характеризующая влияние вида напряженного состояния на величину минимальной интенсивности скоростей деформации ползучести. В результате сравнения уравнений (1) и (7), учитывая, что все экспериментальные исследования проводились при $\sigma_i = \text{const}$, можно получить выражение

$$\frac{\xi_{ic\min}}{\xi_{c\min}} = \exp \left[\frac{\sigma_i}{c} \left(\frac{1}{\Phi(\mu, \gamma_s, \varphi_s)} - 1 \right) \right]. \quad (8)$$

Представленный в правой части уравнения функционал

$$\Psi = \exp \left[\frac{\sigma_i}{c} \left(\frac{1}{\Phi(\mu, \gamma_s, \varphi_s)} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

характеризует влияние вида радиального нагружения на величину минимальной интенсивности скоростей деформации ползучести по достижении одной и той же величины интенсивности напряжений σ_i .

С использованием функционала (9) зависимость $\xi_{ic\min} - \sigma_i$ (рис. 1) можно представить единой кривой (рис. 3).

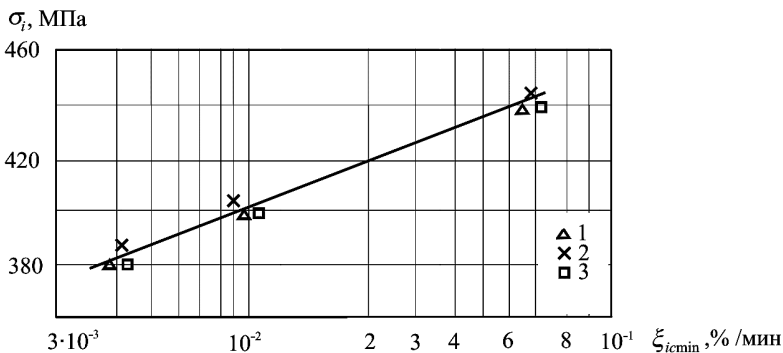


Рис. 3. Зависимость $\xi_{ic\min} - \sigma_i$ для стали 1X18N9T при $T = 600^\circ\text{C}$ для некоторых режимов нагружения $\varphi_s = 0$: 1 – $\gamma_s = 0$; 2 – $\gamma_s = \pi/4$; 3 – $\gamma_s = \pi/2$.

Оценка вязкопластических свойств теплоустойчивых сталей. В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины разработан расчетно-экспериментальный метод оценки долговечности конструкционных материалов на основе УВП-модели [13].

В данной работе оценивались вязкопластические свойства теплоустойчивой стали 08X18N10T-ВД в исходном состоянии с учетом вида напряжен-

ного состояния. Испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах в условиях ступенчатого статического нагружения при сложном напряженном состоянии ($K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty; 1; 0,5$) с использованием методики и установки, описанных ранее [14, 15]. По результатам испытаний строили кривые ползучести, полученные для каждой ступени нагружения (рис. 4).

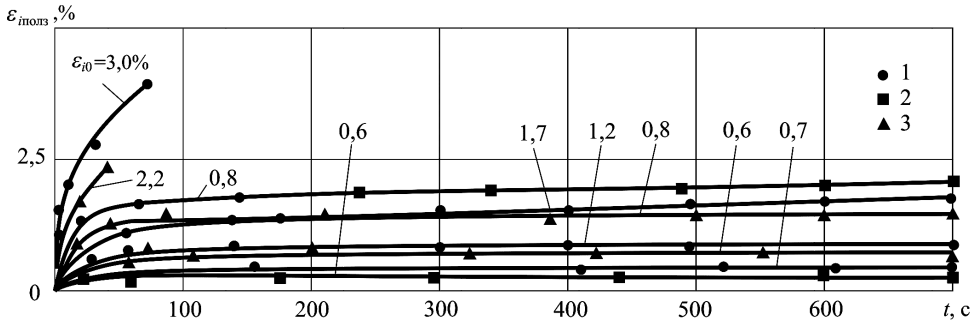


Рис. 4. Влияние предварительного деформирования на замедленную ползучесть стали 08X18N10T-ВД в исходном состоянии при 320°C в условиях ступенчатого статического нагружения при различных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$. ($\epsilon_{иполз}$ – текущее значение деформации ползучести; ϵ_{i0} – величина предварительной деформации.)

Как видно из рис. 4, процесс ползучести интенсифицируется с ростом предварительной пластической деформации. По мере увеличения необратимой деформации доля вязкой составляющей полной деформации повышается при одновременном уменьшении доли пластической деформации, не зависящей от времени при всех реализованных соотношениях $K = \sigma_z / \sigma_\theta$, о чем свидетельствуют данные рис. 5.

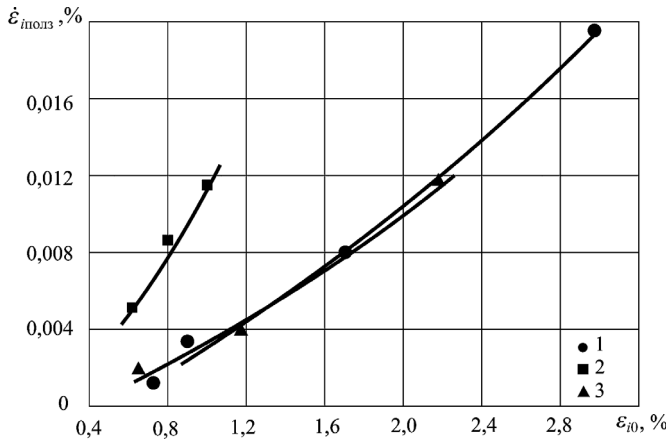


Рис. 5. Зависимость интенсивности скоростей ползучести стали 08X18N10T-ВД от величины предварительной деформации активного нагружения при различных соотношениях главных напряжений, $T = 320^\circ\text{C}$: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$.

Анализ кривых ползучести в области равномерного деформирования показывает, что динамика процессов ползучести слабо зависит от вида напряженного состояния при представлении в интенсивностях деформаций (рис. 4).

Обнаруженное свойство более четко прослеживается при сопоставлении необратимых деформаций, накопленных на первой стадии ползучести (ε_{i1}) за одинаковый промежуток времени, в зависимости от величины предварительной деформации (ε_{i0}) для разных соотношений главных напряжений (рис. 6).

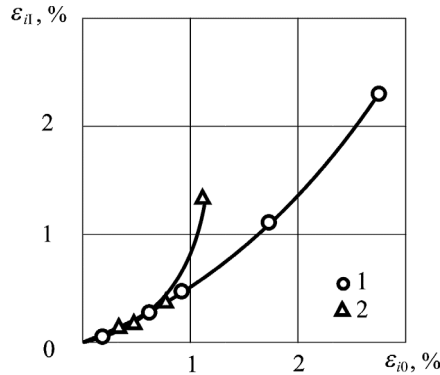


Рис. 6. Зависимость интенсивности деформаций замедленной ползучести за время выдержки 600 с от уровня предварительной пластической деформации стали 08X18H10T-ВД при $T = 320^\circ\text{C}$ и разных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$.

Анализируя динамику процесса ползучести в зависимости от степени предварительного деформирования, приходим к выводу, что в условиях устойчивого развития деформации параметры, характеризующие вязкопластические свойства металла и выраженные через обобщенные деформации, инвариантны к виду напряженного состояния. При переходе в область неустойчивого развития процесса деформирования (достаточно большой уровень остаточной деформации, достигнутой в результате начального активного деформирования) наблюдается интенсификация процессов ползучести, темп которой, как и для других теплоустойчивых сталей [16], существенно зависит от вида напряженного состояния (рис. 6).

Вязкая компонента деформации изучалась по данным обработки начальных участков кривых ползучести и по результатам определения коэффициента вязкости k исследуемого материала в соответствии с методикой, изложенной в [16].

При этом использовали линейную зависимость скорости ползучести $\dot{\varepsilon}_{i\text{полз}}$ от величины неравновесного напряжения σ_i^* [16]:

$$\dot{\varepsilon}_{i\text{полз}} = k_i \sigma_i^* \quad (10)$$

Проинтегрировав уравнение (10), имеем

$$\varepsilon_{i\text{полз}} = \varepsilon_{i1} \exp\left(\frac{k_i \sigma_i^* \tau}{\varepsilon_{i1}}\right), \quad (11)$$

где τ – время; ε_{i1} – величина необратимой деформации, накопленная на первой стадии ползучести.

Из (11) получим

$$k_i = \frac{\varepsilon_{i1}}{\sigma_i^* \tau} \ln \left(\frac{\varepsilon_{i0} + \varepsilon_{i1} - \varepsilon_{i\text{полз}}}{\varepsilon_{i1}} \right), \quad (12)$$

где ε_{i0} – предварительная деформация, достигнутая в результате исходного активного деформирования; $\varepsilon_{i\text{полз}}$ – текущее значение деформации ползучести.

Анализируя представленную на рис. 7 зависимость $k_i - \sigma_i^*$ для различных видов напряженного состояния, приходим к выводу, что коэффициент вязкости является параметром, инвариантным к виду напряженного состояния и зависит лишь от σ_i^* :

$$k_i = a(\sigma_i^*)^b, \quad (13)$$

где a и b – параметры, определяемые по данным рис. 7, $a = 5 \cdot 10^{-14} \%$ /(с·МПа); $b = 10$.

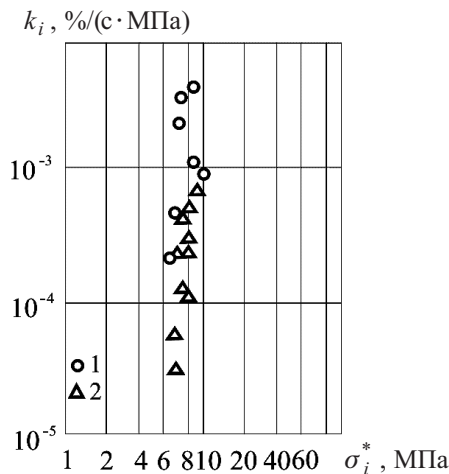


Рис. 7. Зависимость коэффициента вязкости от величины интенсивности неравновесных напряжений стали 08X18N10Т-ВД при $T = 320^\circ\text{C}$ в условиях ступенчатого статического нагружения со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_i = 0,025 \%$ /с при сложном напряженном состоянии: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$.

На рис. 8 представлены квазистатические (равновесные) и действительные диаграммы деформирования стали 08X18N10Т-ВД в интенсивностях напряжений и деформаций при разных соотношениях главных напряжений.

Расхождение между диаграммами при различных видах напряженного состояния не превышает 6% по напряжениям. Таким образом, для исследуемой стали можно утверждать, что гипотеза о существовании обобщенной диаграммы деформирования, инвариантной к виду напряженного состояния, для квазистатической диаграммы подтверждается с той же степенью точности, что и для действительной, с определенной, отличной от нуля, скоростью деформации.

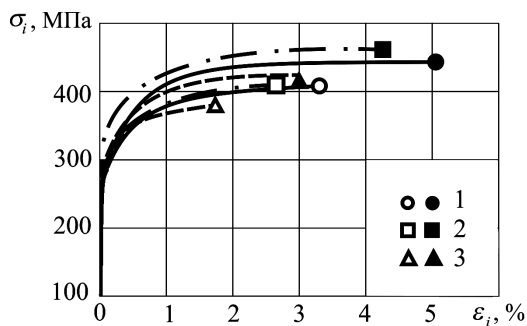


Рис. 8. Обобщенные действительные (темные точки) и квазистатические (светлые точки) диаграммы деформирования стали 08X18N10T-ВД при ступенчатом статическом нагружении при $T = 320^{\circ}\text{C}$ в условиях сложного напряженного состояния: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$.

Отмеченное выше представляется принципиально важным при использовании предложенного ранее [13] расчетно-экспериментального метода, основанного на деформационно-кинетических подходах к оценке долговечности исследуемой стали существенно упростит методику расчета долговечности материала для случая сложного напряженного состояния. Метод позволит сократить объем экспериментов, необходимых для получения исходных данных.

Резюме

Досліджено закономірності деформування сталі 1X18N9T при довготривалому статичному навантаженні по різних траєкторіях радіального навантаження з урахуванням впливу виду напруженого стану. Оцінено в'язкопластичні властивості сталі 08X18N10T-ВД за ступінчатого статичного навантаження в умовах складного напруженого стану.

1. Можаровская Т. Н., Гигиняк Ф. Ф., Улин В. П., Тимофеев Б. Т. Уравнения ползучести и критерий длительной прочности сталей перлитного и аустенитного классов с учетом вида напряженного состояния // II Всесоюз. конф. "Ползучесть в конструкциях": Тез. докл. – Новосибирск, 1984. – 175 с.
2. Гигиняк Ф. Ф., Сторчак М. В., Баишта В. В. и др. Циклическая прочность и ползучесть теплоустойчивых сталей в условиях сложного напряженного состояния // Всесоюз. науч.-техн. конф. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии": Тез. докл. – Киев, 1984. – Ч. 1. – 82 с.
3. Горев Г. В., Рубанов В. В., Соснин О. В. О построении уравнений ползучести для материалов с различными свойствами на растяжение и сжатие // Прикл. математика и техн. физика. – 1979. – № 4. – С. 121 – 128.
4. Гольденблат И. И., Бажанов В. Л., Копнов В. А. Длительная прочность в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

5. Наместников В. С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1957. – № 4. – С. 141 – 146.
6. Можаровский Н. С., Бобырь Н. И. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов в условиях плоского напряженного состояния при различных путях пропорционального нагружения // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 73 – 79.
7. Можаровский В. Н. Влияние истории нагружения на основные характеристики ползучести // Вестн. КПИ. Машиностроение. – 1992. – № 29. – С. 20 – 23.
8. Можаровский Н. С., Антипов Е. А., Бобырь Н. И. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении. – Киев: Вища шк., 1982. – 282 с.
9. Ильющин А. А. Пластичность. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
10. Жуков А. М., Работнов Ю. Н. Исследование пластических деформаций стали при сложном нагружении // Инж. сб. – 1954. – № 8. – С. 82 – 92.
11. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Физматгиз, 1960. – 342 с.
12. Качанов Л. М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 342 с.
13. Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф. К оценке долговечности теплоустойчивых сталей при пульсирующем мягком нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1989. – № 5. – С. 36 – 39.
14. 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.
15. 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.
16. Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.

Поступила 27. 11. 2009