

Усовершенствование упруговязкопластической модели деформирования с учетом повреждаемости металла при циклическом нагружении

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

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

Представлены результаты экспериментальных исследований циклической ползучести стали 10ГН2МФА в условиях сложного напряженного состояния с учетом кинетики повреждаемости. Высказаны соображения относительно оценки процесса накопления деформации ползучести с учетом повреждения с помощью упруговязкопластической модели. Определена взаимосвязь вязкопластических свойств исследованной стали с кинетикой повреждаемости в условиях циклического нагружения при различных видах напряженного состояния.

Ключевые слова: теплоустойчивая сталь, циклическое нагружение, сложное напряженное состояние, упруговязкопластическая модель, повреждаемость, коэффициент гомогенности, неравновесные напряжения, скорость ползучести.

Введение. Исследования механических свойств конструкционных материалов с учетом временных факторов и кинетики повреждаемости при неупругом деформировании позволяют, с одной стороны, определить условия нагружения, при которых фактором времени можно пренебречь, с другой – изучить и аналитически описать выявленные эффекты и развить на их основе новые или усовершенствовать существующие методы расчета реальных конструктивных элементов при циклическом нагружении.

Методика и анализ полученных экспериментальных данных. В проведенных исследованиях использовались подходы, положенные в основу разработанной ранее [1] упруговязкопластической (УВП) модели, экспериментально обоснованной для различных металлических материалов и позволяющей в полной мере учитывать все факторы, сопутствующие деформированию при разных условиях нагружения.

Экспериментально установленная связь между скоростью ползучести и характеристикой рассеяния результатов измерений твердости исследованного металла (относительная величина коэффициента гомогенности $m_{\text{отн}}$) свидетельствует о необходимости оценки зависимости коэффициента $m_{\text{отн}}$ от основных параметров УВП модели, учитывающих вязкие свойства металла, которые проявляются рельефно при циклической ползучести [2]: k'_i – коэффициент вязкости металла, инвариантный к виду напряженного состояния и определяемый по методике [1]; $\dot{\epsilon}_i$ – интенсивность скоростей циклической ползучести; σ_i^* – неравновесное напряжение, в усредненном виде отражающее разность между локальными пиковыми напряжениями, возникающими в объеме материала при неупругом деформировании, и средним по всему объему нагруженного материала напряжением, которая служит “движущей силой” релаксации, проявляющейся при остановке нагружения.

Испытания на циклическую ползучесть проводили с использованием модернизированного испытательного стенда СНТ-8У на тонкостенных трубчатых образцах ($D_n/\delta = 50$, где D_n – наружный диаметр образца; δ – толщина стенки образца) по ранее разработанной методике [1–3] в условиях ступенчатых и непрерывных пульсирующих мягких одноосного ($K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$) и двухосного ($K = 2; 1; 0,5$) растяжений. Для оценки повреждаемости металла использовали метод ЛМ-твёрдости [4].

В настоящей работе в качестве прочностных и деформационных характеристик исследованной стали 10ГН2МФА использовали интенсивность напряжений σ_i и деформаций ε_i . При анализе полученных результатов, характеризующих повреждаемость металла, применяли относительные значения коэффициента гомогенности $m_{отн} = m_i/m_{исх}$, рассчитанные по методике [2].

В соответствии с используемой УВП моделью [1] для определения σ_i^* необходимо кроме действительной диаграммы деформирования при скорости деформации, отличающейся от нуля, располагать равновесной (квазистатической) диаграммой при скорости деформации, стремящейся к нулю. Такие диаграммы при разных видах напряженного состояния, инвариантные к его виду, представлены на рис. 1.

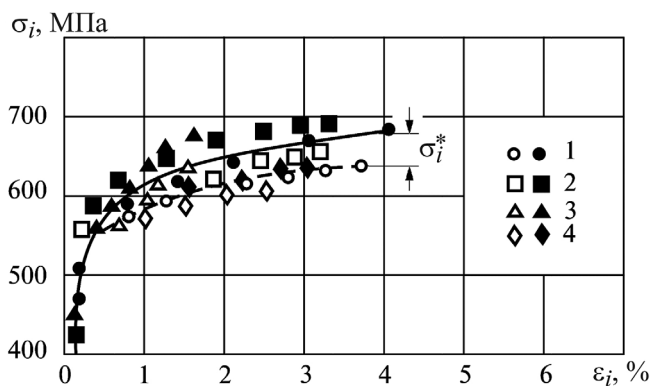


Рис. 1. Диаграммы деформирования стали 10ГН2МФА: темные точки – действительные для частоты нагружения 2 цикл/мин, светлые точки – квазистатические, полученные на основе опытов в условиях ступенчатого циклического нагружения при температуре 20°C и различном соотношении главных напряжений $K = \infty$ (1), 1 (2), 0,5 (3) и 2 (4).

Полагаем, что результаты статистической обработки данных замеров твердости исследованного металла, полученные после каждой ступени циклического нагружения или после определенного количества циклов нагружения, отражают интегрально структурные изменения в его поверхностном слое вследствие воздействия неравновесных напряжений σ_i^* . Учитываем также полученные ранее [1] для некоторых теплоустойчивых сталей выводы о том, что по мере увеличения накопленной необратимой деформации в условиях циклической ползучести возрастает доля вязкой составляющей при одновременном уменьшении доли пластической составляющей, не зависящей от времени.

Таким образом, приходим к выводу о взаимосвязи между кинетикой повреждаемости металла, характеризующейся изменениями коэффициента гомо-

генности m , и величиной неравновесных напряжений σ_i^* , что позволяет существенно упростить получение экспериментальных данных, необходимых для оценки долговечности высоконагруженных элементов конструкций.

Оценивая влияние вида напряженного состояния на развитие процессов циклической ползучести, завершающихся разрушением по квазистатическому механизму (правая часть рис. 2), отметим, что в условиях одноосного циклического растяжения скорость ползучести несколько выше, чем при двухосном, для одинаковых величин максимальных напряжений цикла нагружения. Однако при циклическом нагружении, вызывающем усталостное разрушение (левая часть рис. 2), наложение второй растягивающей компоненты напряжения снижает способность металла сопротивляться циклической ползучести при одновременном повышении скорости ползучести по сравнению с таковой при одноосном растяжении.

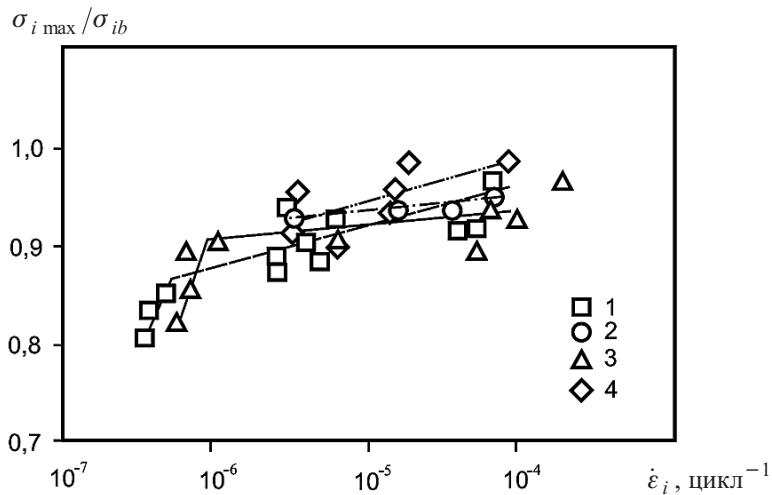


Рис. 2. Предельные кривые интенсивности скоростей установившейся ползучести стали 10ГН2МФА при $T = 20^\circ$ и различном соотношении главных напряжений. (Здесь и на рис. 3, 5–7: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$; 3 – $K = 2$; 4 – $K = 1$.)

Анализ кинетики накопления повреждений при циклической ползучести, приводящей к квазистатическому разрушению (рис. 3), показывает, что темп снижения относительных величин коэффициента гомогенности m в условиях двухосного растяжения несколько ниже, чем при одноосном [2]. Отметим, что указанное различие, очевидно, связано с меньшей величиной предельной деформации (запас пластичности), соответствующей потере устойчивости пластического деформирования, в условиях двухосного нагружения, особенно при $K = 0,5$; 2 по сравнению с предельной деформацией при $K = \infty$.

Как видно из рис. 3, достижение предельного состояния металла (потеря устойчивости пластического деформирования) сопровождается достаточно интенсивными изменениями коэффициента гомогенности при всех видах напряженного состояния, что отражает кинетику повреждаемости металла. При этом предельные значения $m_{\text{отн}}$, соответствующие началу процесса

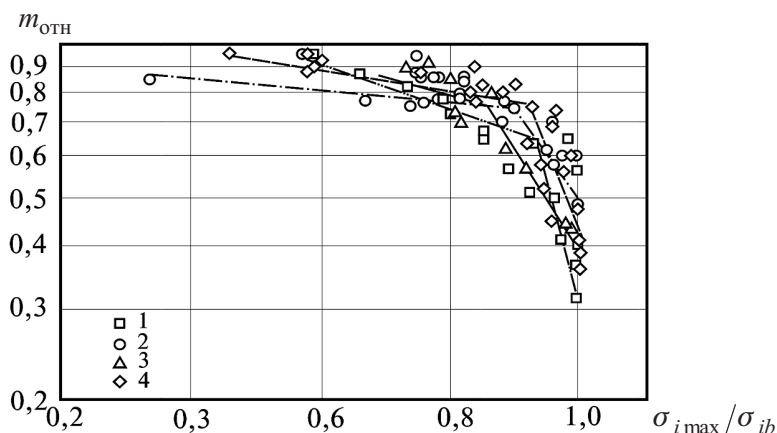


Рис. 3. Зависимость величины относительного коэффициента гомогенности стали 10ГН2МФА от уровня максимальной интенсивности напряжений цикла в условиях циклического нагружения при различном соотношении главных напряжений.

потери устойчивости пластического деформирования, зависят от вида напряженного состояния. Для случаев двухосного циклического растяжения ($K = 2; 1; 0,5$) имеем $m_{отн} = 0,75$, для одноосного циклического растяжения — $m_{отн} = 0,63$.

Испытания в условиях ступенчатого и непрерывного циклического нагружения при различных соотношениях главных напряжений показывают, что увеличение скорости циклической ползучести приводит к росту процесса повреждаемости металла, а ее уменьшение — к его замедлению. Подтверждением этого служат данные, представленные в [2, 3] и на рис. 4.

Для оценки скорости ползучести на рис. 4, как и ранее [1, 3], использовали относительные значения минимальной интенсивности скорости циклической ползучести $\xi_i = \dot{\epsilon}_{i \text{ creep}} / \dot{\epsilon}_i$ [2, 3].

Наблюдаемые изменения коэффициента гомогенности в зависимости от скорости ползучести, на которые определенным образом влияют структурные изменения металла [5], свидетельствуют о физически обоснованной корреляции между параметром m и скоростью ползучести. Анализ экспериментальных данных о взаимосвязи между скоростью ползучести и относительным коэффициентом гомогенности, представленных на рис. 4 и 5, показывает, что на стадии достижения равновесного состояния металла в процессе циклической ползучести они удовлетворительно описываются для исследованных соотношений главных нормальных напряжений степенной функцией вида

$$\dot{\epsilon}_i = c m_{отн}^{-d}, \quad (1)$$

где c и d — параметры материала, определяемые экспериментально из зависимости $\dot{\epsilon}_i - m_{отн}$ (рис. 5). Для исследуемого материала имеем $c = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $d = 4,2$.

Соотношение (1) позволяет выразить интенсивность скорости ползучести через повреждаемость.

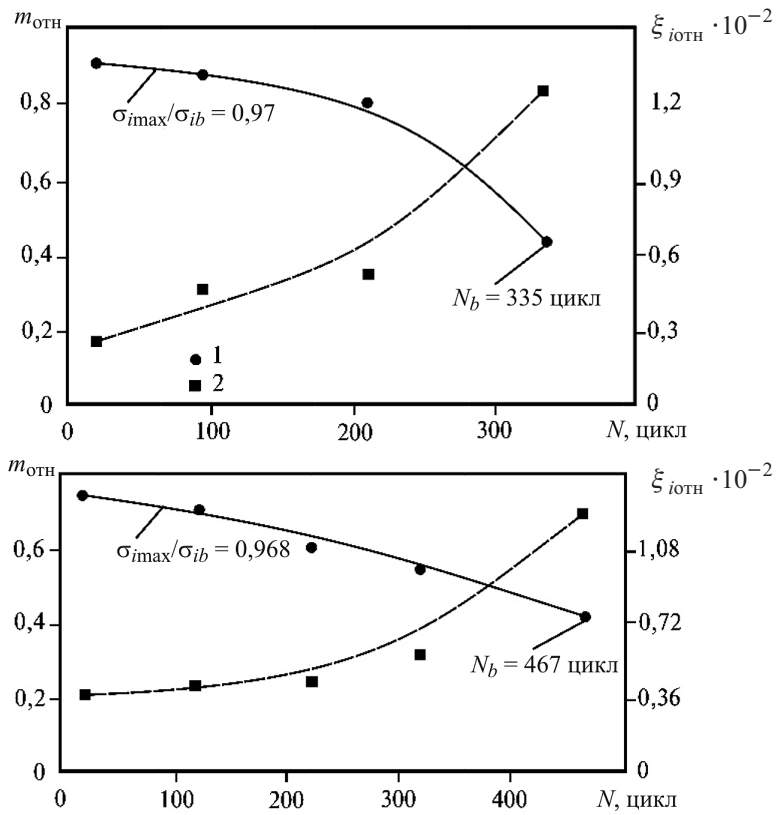


Рис. 4. Зависимость относительных коэффициента гомогенности $m_{отн}$ (1) и интенсивности скоростей установившейся циклической ползучести ξ_i (2) от наработки в условиях сложного напряженного состояния ($K = 2$) при ступенчатом циклическом нагружении стали 10ГН2МФА с частотой 2 цикл/мин и различной долговечности N_b .

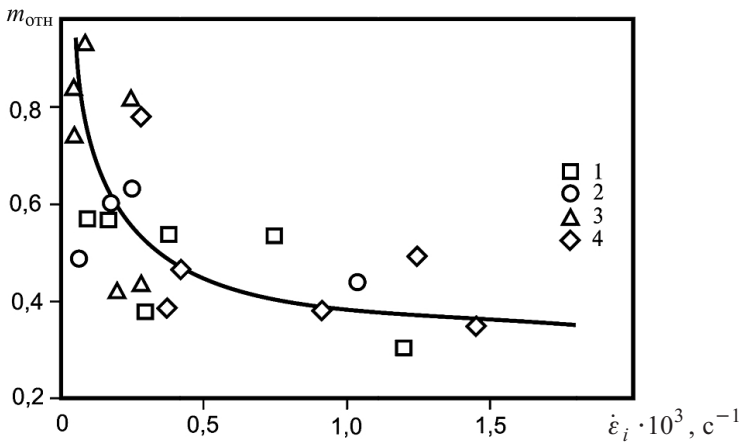


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента гомогенности стали 10ГН2МФА от интенсивности скорости циклической ползучести при различных соотношениях главных напряжений.

Эта экспериментально установленная закономерность может быть использована для модернизации имеющихся и разработки новых критериев оценки

долговечности с учетом взаимосвязи между кинетикой циклической ползучести и повреждаемостью металла. Весьма перспективными представляются также подходы к оценке квазивязких свойств металла с учетом повреждаемости по УВП модели [1]. Согласно последней развитие процессов ползучести определяется интенсивностью неравновесных напряжений σ_i^* . При этом, как и для некоторых других теплоустойчивых сталей, принимается линейная зависимость между скоростью ползучести и неравновесным напряжением [1] в виде

$$\dot{\varepsilon}_{i \text{ полз}} = k'_i \sigma_i^* . \quad (2)$$

Коэффициент вязкости k'_i определяется на основании результатов экспериментов при ступенчатом циклическом нагружении (рис. 1) по методике, подробно описанной в [1].

Известно [6], что для исследуемой стали коэффициент вязкости, являющийся параметром, инвариантным к виду напряженного состояния и величине накопленной необратимой деформации, зависит только от неравновесных напряжений. Как для исследуемой стали, так и для некоторых других конструкционных металлических материалов [1, 7] эта зависимость удовлетворительно описывается степенной функцией вида [1]

$$k'_i = a(\sigma_i^*)^b , \quad (3)$$

где a и b – характеристики материала для конкретной температуры, определяемые из экспериментов при ступенчатом циклическом нагружении. Для стали 10ГН2МФА получим $a = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ \%}/(\text{цикл} \cdot \text{МПа})$; $b = 3,11$.

Для практического использования результатов настоящей работы необходимо оценить взаимосвязь между неравновесным напряжением σ_i^* и кинетикой повреждаемости металла, характеризуемой коэффициентом гомогенности $m_{\text{отн}}$, с учетом зависимости (2).

Анализ взаимосвязи между σ_i^* и $m_{\text{отн}}$, полученной на основе обработки экспериментальных данных по достижении равновесного напряженного состояния металла на разных ступенях циклического нагружения в исследованном диапазоне соотношений главных напряжений, позволяет с определенной степенью достоверности утверждать, что коэффициент гомогенности $m_{\text{отн}}$ в условиях равновесного состояния является параметром, инвариантным к виду напряженного состояния (рис. 6).

Следовательно, приведенное неравновесное напряжение $\sigma_{\text{ипр}}^*$ на основании представленных на рис. 6 данных можно выразить через коэффициент гомогенности $m_{\text{отн}}$ в виде

$$\sigma_{\text{ипр}}^* = g m_{\text{отн}}^{-h} , \quad (4)$$

где g и h – параметры материала, определяемые экспериментально. В данном случае имеем $g = 0,95 \text{ МПа}$, $h = 2,4$.

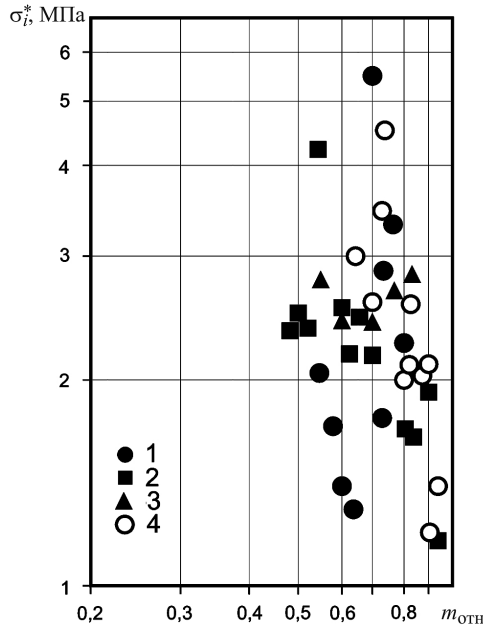
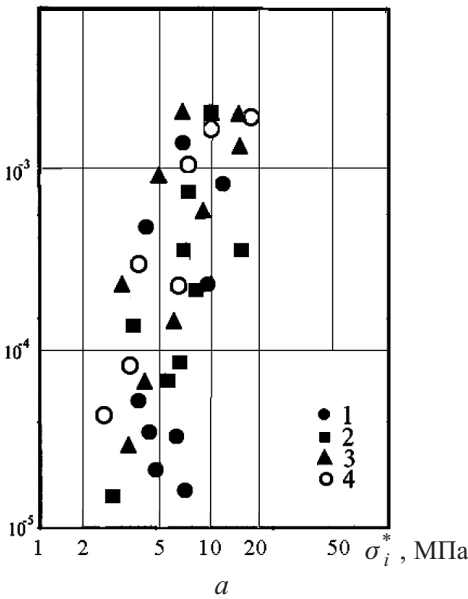


Рис. 6. Взаимосвязь между относительным коэффициентом гомогенности $m_{отн}$ и интенсивностью неравновесных напряжений σ_i^* при различном соотношении главных напряжений.

k'_i , %/(с·МПа)



k'_i , %/(с·МПа)

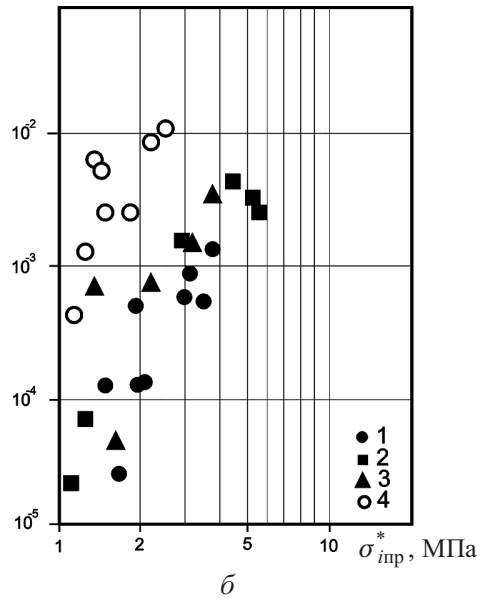


Рис. 7. Зависимость коэффициента вязкости k'_i стали 10ГН2МФА от интенсивности неравновесных напряжений σ_i^* (а) и приведенных неравновесных напряжений $\sigma_{ипр}^*$ (б) при различном соотношении главных напряжений.

Таким образом, можно существенно сократить количество экспериментов, необходимых для определения $\sigma_{ипр}^*$, и объем программы обработки результатов.

Представляет интерес сравнение экспериментальных зависимостей $k'_i - \sigma_i^*$ с $k'_i - \sigma_{iпр}^*$, полученными с использованием соотношения (4). Из рис. 7 видно, что для обеих зависимостей характерна инвариантность коэффициента вязкости k'_i исследованной стали к виду напряженного состояния (рис. 7).

Отметим, что значения коэффициентов a и b , определяемых из экспериментов при циклическом нагружении, отличаются от коэффициентов $a_{пр}$ и $b_{пр}$, полученных с учетом повреждаемости. Тогда зависимость (3) преобразуется к виду

$$k'_i = a_{пр} (\sigma_{iпр}^*)^{b_{пр}}. \quad (5)$$

Для исследуемой стали имеем $a_{пр} = 0,00025 \text{ \%}/(\text{цикл} \cdot \text{МПа})$, $b_{пр} = 0,5$. Таким образом, модернизированная упруговязкопластическая модель может быть использована при разработке метода оценки долговечности теплоустойчивой стали 10ГН2МФА с учетом повреждаемости металла при циклическом мягком нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Выводы

1. Получен большой массив экспериментальных данных о закономерностях развития циклической ползучести и изменениях коэффициента гомогенности, характеризующего повреждаемость металла в зависимости от скорости циклической ползучести при различных видах напряженного состояния.
2. Установлена взаимосвязь между характеристиками вязкости исследуемого металла и повреждаемостью.
3. Показано, что достижение предельного состояния металла (потеря устойчивости процесса деформирования) зависит от вида напряженного состояния.

Резюме

Представлено результати експериментальних досліджень циклічної повзучості сталі 10ГН2МФА в умовах складного напруженого стану з урахуванням кінетики пошкоджуваності. Висловлено міркування щодо оцінки процесу накопичення деформацій повзучості з урахуванням пошкодження за допомогою пружно-в'язкопластичної моделі. Визначено взаємозв'язок в'язкопластичних властивостей дослідженої сталі з кінетикою пошкоджуваності в умовах циклічного навантаження за різних видів напруженого стану.

1. Гігіняк Ф. Ф., Лебедєв А. О., Шкодзинський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
2. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н. Кинетика накопления поврежденных теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 120 – 126.

3. Булах П. А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 2011. – № 2. – С. 122 – 127.
4. Пат. України № 52107А. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “Метод ЛМ-твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музика, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03. Бюл. № 1.
5. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
6. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Башта В. В. и др. Вязкопластические свойства стали 10ГН2МФА при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 30 – 35.
7. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н. Оценка вязкопластических свойств высокопрочной стали ВНС-25 при сложном напряженном состоянии // Там же. – 2007. – № 6. – С. 122 – 127.

Поступила 04. 04. 2011