

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Усталость и циклическая неупругость аустенитной стали после длительной эксплуатации при различных режимах нагружения

В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза

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

Представлены результаты исследования усталости и неупругости при одно- и двухчастотном нагружении аустенитной стали 08X18H12T до и после эксплуатации в течение 100 тыс. ч в качестве материала главного циркуляционного трубопровода атомного реактора ВВЭР-440. Выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: усталость, циклическая неупругость, длительная эксплуатация, одно- и двухчастотное нагружение.

Введение и постановка задачи. В процессе длительной эксплуатации материалов их свойства, в том числе механические, могут существенно изменяться. Это важно, с одной стороны, при принятии решения о возможной дальнейшей эксплуатации той или иной конструкции, с другой – при рассмотрении общих закономерностей механического поведения материалов с учетом их длительной эксплуатации.

Объектом исследования служила аустенитная сталь 08X18H12T, используемая для изготовления главных циркуляционных трубопроводов атомного реактора ВВЭР-440, до и после эксплуатации в течение 100 тыс. ч.

Исследования проводили при мало- (низкочастотном), многоцикловом (высокочастотном) и двухчастотном нагружении.

Двухчастотное нагружение имеет место при эксплуатации трубопроводов атомных реакторов, когда высокочастотное вибрационное нагружение совмещается с периодическими изменениями давления в трубопроводе.

Цель исследования: во первых, изучить, как изменяются характеристики сопротивления усталостному разрушению и циклической неупругости стали после длительной эксплуатации и при каких режимах нагружения это проявляется наиболее существенно; во-вторых, рассмотреть влияние двухчастотного нагружения на характеристики сопротивления усталости стали до и после длительной эксплуатации; в третьих, проанализировать для всего комплекса полученных экспериментальных данных (сталь до и после наработки, мало- и многоцикловое – симметричное и асимметричное, двухчастотное нагружение) возможность прогнозирования величин предела выносливости стали с использованием характеристик циклической неупругости.

Материал исследования. Исследовали аустенитную сталь 08X18H12T в исходном состоянии и после эксплуатации. Ее химический состав (%) следующий: 0,07 С; 0,48 Si; 1,15 Mn; 17,26 Cr; 11,79 Ni; 0,52 Ti; 0,011 S; 0,027 P. Механические характеристики стали представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики стали 08X18H12T

Характеристика	До эксплуатации	После эксплуатации
σ_B , МПа	555	560
$\sigma_{0,2}$, МПа	275	280
δ , %	66	73
ψ , %	50	47
HV , МПа	1574	2050
HB , МПа	1220	1330

Образцы для исследования диаметром 5 мм вырезали из новых труб и труб, бывших в эксплуатации. Трубы изготовляли методом прошивки ковальной заготовки с последующей термической обработкой, состоящей в аустенизации стали при температуре 1423 К с охлаждением в воде и последующем отпуске при 1123 К. Наружный диаметр трубы равен 560 мм, толщина стенки – 25 мм.

Рабочая температура трубопровода в процессе эксплуатации составляет 568 К, внутреннее давление теплоносителя – 12,5 МПа.

Методика исследования. Усталость и неупругость стали 08X18H12T исследовали при растяжении–сжатии в условиях одно- (мало- и многоцикловое) и двухчастотного режимов нагружения на установке с механическим нагружением с помощью кривошипного механизма с регулируемым в процессе нагружения эксцентриситетом [1, 2]. При этом максимальная нагрузка составляет ± 50 кН, частота высокочастотного нагружения – 34 Гц.

Для реализации двухчастотного режима нагружения установка дополнена системой непрерывного изменения величины асимметрии высокочастотного нагружения по треугольному и трапецеидальному циклам, что дает возможность также проводить исследования при малоцикловом нагружении.

При исследовании неупругости стали использовали [3] ранее разработанную аппаратуру, позволяющую с помощью тензодатчиков измерять напряжения и деформации в образце при различных режимах нагружения. Известно много методов исследования циклической неупругости материалов [4–8].

В данной работе при исследовании закономерностей неупругого деформирования металлов как в условиях одно-, так и двухчастотного нагружения исходными экспериментальными данными служили петли гистерезиса в координатах напряжение–деформация, непрерывно фотографируемые с экрана осциллографа для каждого образца непосредственно в процессе исследования его на усталость.

Неупругую деформацию за цикл $\Delta\varepsilon_n$, равную ширине петли гистерезиса в координатах напряжение–деформация, определяли по формуле

$$\Delta\varepsilon_n = \frac{\sigma_a(1+n_1)}{E\left(\frac{x_a}{\Delta x} - \frac{1}{2}\right)},$$

где σ_a – амплитуда напряжения; E – модуль упругости; x_a и Δx – сигналы, пропорциональные амплитуде деформации и неупругой деформации на экране осциллографа; n_1 – коэффициент, учитывающий, что приспособление для измерения деформации образца крепится на его утолщенных частях.

На рис. 1 представлены примеры петель гистерезиса, сфотографированных с экрана осциллографа при исследовании стали 08X18H12Т в условиях одно- и двухчастотного нагружения, на рис. 2 – обозначения параметров двухчастотной петли гистерезиса. Как видно, петли гистерезиса несут информацию о низкочастотной составляющей двухчастотного цикла (петля гистерезиса с амплитудой напряжения σ_{a_1} , деформации ε_{a_1} и неупругой деформации $\Delta\varepsilon_{n_1}$), высокочастотной составляющей (петля гистерезиса с амплитудой напряжения σ_{a_2} , деформации ε_{a_2} и неупругой деформации $\Delta\varepsilon_{n_2}$), а также о суммарной петле гистерезиса при максимальной амплитуде напряжения σ_{a_c} , равной сумме амплитуд низко- и высокочастотной составляющих (петля гистерезиса с амплитудой напряжения σ_{a_c} , деформации ε_{a_c} и неупругой деформации $\Delta\varepsilon_{n_c}$).

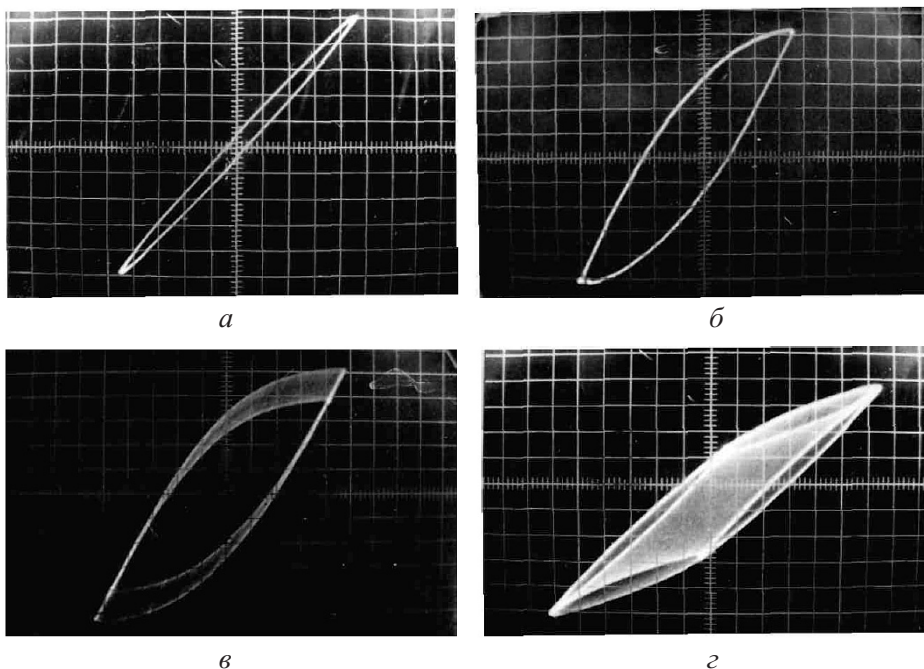


Рис. 1. Примеры петель гистерезиса при одно- (а, б) и двухчастотном (в, г) нагружении: а, б – высокочастотное и низкочастотное нагружение; в – $\sigma_{a_2}/\sigma_{a_c} = 0,25$; г – $\sigma_{a_2}/\sigma_{a_c} = 0,8$.

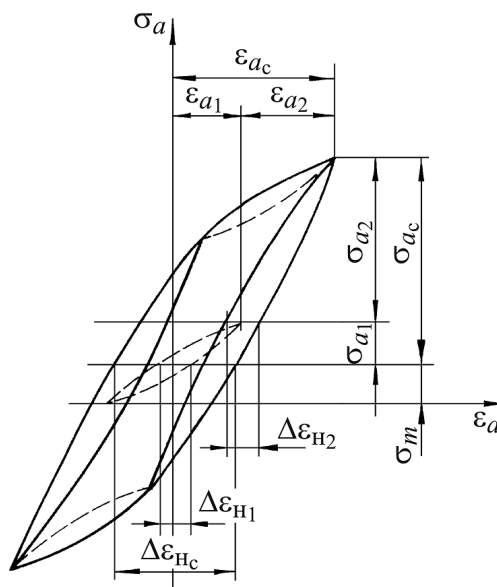


Рис. 2. Обозначение параметров двухчастотной петли гистерезиса.

Результаты исследования. Результаты исследования усталости стали 08X18H12T до и после эксплуатации представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3,а приведены кривые малоциклового усталости стали при частоте нагружения $f_1 = 0,082$ Гц и среднем напряжении цикла ($\sigma_m = 50$ МПа), на рис. 3,б – кривые многоциклового усталости при симметричном цикле нагружения с частотой $f_2 = 34$ Гц, на рис. 3,в – кривые многоциклового усталости при асимметричном цикле ($\sigma_m = 100$ МПа), на рис. 3,г – кривые усталости при двухчастотном нагружении ($f_2 = 34$ Гц, $f_1 = 0,016$ Гц) в числах циклов высокочастотного нагружения. Амплитуда низкочастотного нагружения составляет 50 МПа, среднее напряжение низкочастотного цикла $\sigma_m = 50$ МПа.

На рис. 4 приведены результаты сравнения кривых усталости стали при одно- и двухчастотном нагружении.

В процессе усталостных испытаний образцов при различных видах нагружения измеряли неупругие деформации и строили зависимости в координатах неупругая деформация за цикл $\Delta \epsilon_n$ – число циклов нагружения N .

По результатам таких исследований строили диаграммы циклического деформирования в координатах амплитуда деформации ϵ_{a2} – амплитуда напряжения σ_{a2} .

Амплитуду деформации ϵ_{a2} определяли по формуле

$$\epsilon_{a2} = \frac{\sigma_a}{E} + \frac{\Delta \epsilon_n}{2}.$$

При построении циклических диаграмм деформирования использовали значения неупругой деформации за цикл, соответствующие стадии ее стабилизации, в случае отсутствия таковой – ее величину при числе циклов нагружения, равном половине числа циклов до разрушения.

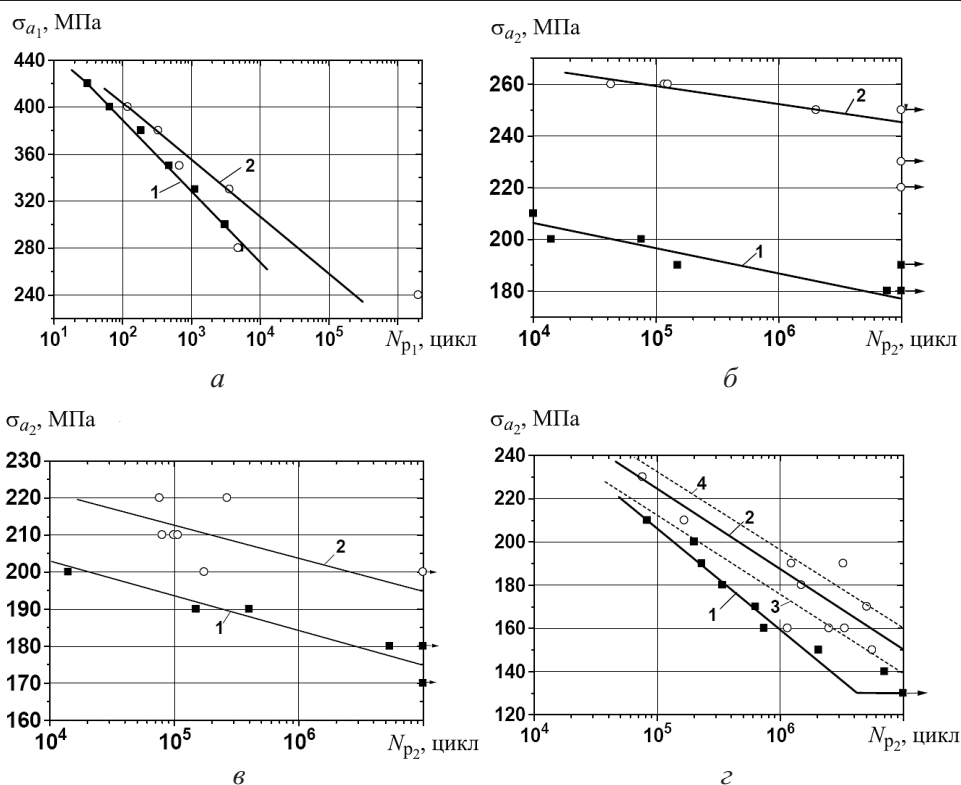


Рис. 3. Кривые усталости стали 08X18N12T при низко- и высокочастотном нагружении до (1) и после (2) эксплуатации; 3, 4 – расчетные кривые при двухчастотном нагружении; N_{p1} и N_{p2} – число циклов до разрушения в циклах низко- и высокочастотного нагружения.

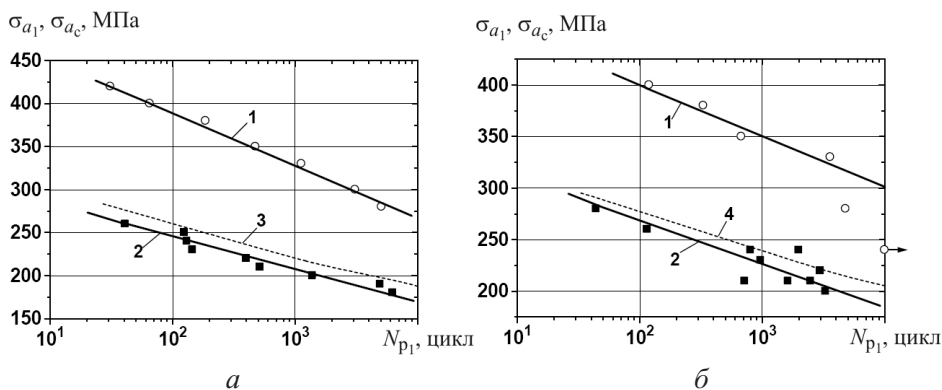


Рис. 4. Кривые усталости стали 08X18N12T при двухчастотном нагружении до (а) и после (б) эксплуатации: 1, 2 – одно- и двухчастотное нагружение соответственно; 3, 4 – расчетные кривые.

Построенные таким образом диаграммы циклического деформирования приведены на рис. 5.

Ранее [3, 9 и др.] было показано, что предел выносливости при многоцикловом нагружении σ_R равен циклическому пределу упругости σ_y^II , опре-

деленному при величине неупругой деформации, характерной для каждого класса материала. Для аустенитных сталей эта величина равна $15 \cdot 10^{-5}$ мм/мм [3].

В табл. 2 приведено сравнение пределов выносливости σ_R на базе 10^7 цикл, полученных экспериментально, с циклическими пределами упругости σ_y^H для всех исследованных режимов нагружения.

Т а б л и ц а 2

Сравнение величин σ_R с σ_y^H

Режим нагружения	σ_R , МПа	σ_y^H , МПа
Симметричный цикл ($\sigma_m = 0$)	$\frac{175}{245}$	$\frac{175}{220}$
Асимметричный цикл ($\sigma_m = 100$ МПа)	$\frac{175}{195}$	$\frac{165}{190}$
Двухчастотное ($\sigma_m \Leftrightarrow 100$ МПа)	$\frac{130}{140}$	$\frac{125}{150}$

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные до эксплуатации стали 08X18H12Т, под чертой – после эксплуатации.

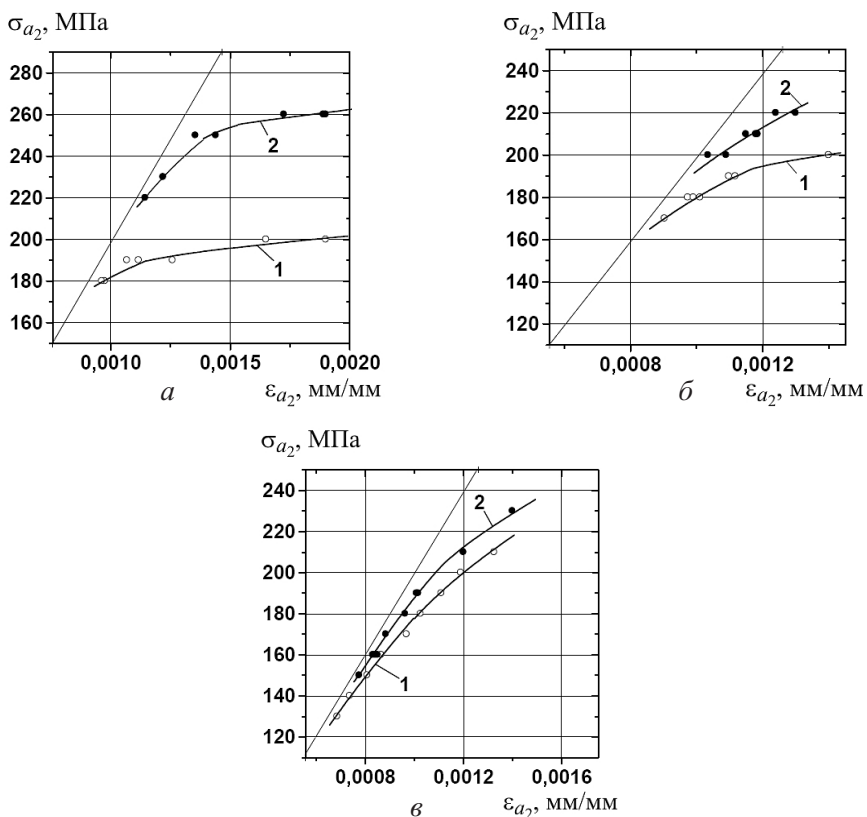


Рис. 5. Диаграммы циклического деформирования стали 08X18H12Т до (1) и после (2) эксплуатации при многоцикловом симметричном (а) и асимметричном ($\sigma_m = 50$ МПа) (б) нагружении, а также двухчастотном (в).

Обсуждение результатов. Анализ представленных выше результатов показывает, что эксплуатационная наработка в течение 100 тыс. ч приводит к повышению характеристик сопротивления усталостному разрушению стали 08X18H12T при всех исследованных режимах нагружения.

Степень повышения характеристик сопротивления усталостному разрушению после длительной эксплуатации при разных режимах нагружения различается. Наименьшее влияние наработки на характеристики сопротивления разрушению отмечается при малоцикловом нагружении (рис. 3,а), что хорошо согласуется с результатами определения механических свойств новой стали и стали после длительной эксплуатации (табл. 1). Можно заключить, что эксплуатация слабо влияет на величину пределов текучести и прочности. Значительное влияние наработку на величину предела выносливости наблюдается при многоцикловом симметричном цикле нагружения (рис. 3,б).

Детальное исследование структур материала до и после эксплуатации не проводилось. Однако очевидно, что увеличение характеристик сопротивления усталостному разрушению при многоцикловом нагружении после длительной эксплуатации обусловлено в первую очередь стабилизацией структуры стали на локальном уровне в процессе длительной эксплуатации и снижением вследствие этого опасности появления микродефектов, способствующих зарождению усталостной трещины, что особенно существенно при многоцикловой усталости.

Двухчастотное нагружение приводит к снижению характеристик выносливости стали как в неповрежденном состоянии, так и после эксплуатации, что видно из результатов, представленных на рис. 3,з, 4 и в табл. 2.

Ранее [10] была предложена методика определения долговечности металлов и сплавов при двухчастотном нагружении по данным испытаний при одночастотном нагружении. Эта методика основана на использовании энергетического критерия усталостного разрушения [11]. Предполагается, что усталостное повреждение металла при двухчастотном нагружении определяется суммой энергии высокочастотного нагружения, равной площади петли гистерезиса в координатах $\sigma_{a_2} - \varepsilon_{a_2}$, и энергии, равной площади суммарной петли гистерезиса в координатах $\sigma_{a_c} - \varepsilon_{a_c}$ (рис. 2).

Расчетная зависимость для определения долговечности при двухчастотном нагружении $N_{p_1}^*$ при амплитудах высокочастотных напряжений σ_{a_2} суммарного напряжения σ_{a_c} имеет вид

$$N_{p_1}^* = N_{p_1} \left[1 + \left(\frac{\sigma_{a_2}}{\sigma_{a_c}} \right)^{(1+n)/n} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{(1+n)/mn} \right]^{-mn/(1+n)},$$

где f_1, f_2 – низкая и высокая частоты нагружения; N_{p_1} – число циклов до разрушения при одночастотном нагружении с частотой f_1 при амплитуде $\sigma_{a_1} = \sigma_{a_c}$; n – коэффициент деформационного упрочнения в соответствии с

уравнением Рамберга–Осгуда [12]; m – показатель степени в уравнении кривой усталости.

Число циклов до разрушения $N_{p_2}^*$ при двухчастотном нагружении с высокой частотой может быть найдено по зависимости

$$N_{p_2}^* = N_{p_1}^* \frac{f_2}{f_1}.$$

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых усталости при двухчастотном нагружении свидетельствует о хорошем их соответствии (рис. 3,г и 4).

Закономерности изменения кривых усталости в зависимости от механических свойств в процессе длительной эксплуатации и влияния режима нагружения (симметричный и асимметричный циклы нагружения, двухчастотное нагружение) хорошо коррелируют с изменением неупругих циклических деформаций.

Так, эксплуатационная наработка приводит к увеличению пределов выносливости стали при всех режимах нагружения (рис. 3,б, в, г). Уровень напряжений, при которых наблюдается переход от упругого деформирования к неупругому, для стали после эксплуатации также увеличивается (рис. 5). При двухчастотном нагружении пределы выносливости стали как до эксплуатации, так и после снижаются (рис. 3,г и 4), при этом напряжения, соответствующие переходу от упругого деформирования к неупругому (рис. 5), также уменьшаются.

Выполненное сравнение пределов выносливости σ_R новой стали и стали после длительной эксплуатации при различных режимах нагружения с напряжениями σ_y^H , соответствующими циклической неупругой деформации $15 \cdot 10^{-5}$ мм/мм при различных условиях испытания, показывает, что величины σ_R и σ_y^H практически совпадают (табл. 2). Это свидетельствует о том, что величина предела выносливости в исследованном случае зависит в первую очередь от процессов, связанных с нелокализованным (рассеянным) усталостным повреждением, характеристикой которого, как известно [3, 13], является неупругая деформация или энергия неупругого деформирования за цикл.

Выводы

1. В процессе длительной эксплуатации в течение 100 тыс. ч стали 08X18H12T в качестве материала главного циркуляционного трубопровода атомного реактора ВВЭР-440 ее характеристики сопротивления усталостному разрушению при мало- и многоцикловом (симметричном и асимметричном), а также двухчастотном нагружении увеличиваются. Наиболее существенное увеличение (до 30%) наблюдается при высокочастотном симметричном нагружении, в то время как при малоцикловом нагружении оно незначительное. Очевидно, это объясняется тем, что в процессе длительного нагружения происходит стабилизация свойств стали на локальном уровне, что снижает

опасность появления микродефектов, вызывающих зарождение усталостной трещины.

2. Двухчастотность нагружения стали приводит к снижению характеристик сопротивления усталостному разрушению как до, так и после эксплуатации. Это проявляется как при представлении результатов испытания в координатах амплитуда высокочастотного нагружения – число циклов высокой частоты до разрушения, так и в координатах суммарная амплитуда напряжения – число циклов низкой частоты до разрушения.

Полученные экспериментальные результаты хорошо соответствуют расчету долговечности при двухчастотном нагружении по ранее предложенной методике, основанной на энергетических подходах.

3. Величина предела выносливости на базе 10^7 цикл стали в неповрежденном состоянии и после эксплуатации при всех исследованных режимах циклического нагружения совпадает (с небольшими отклонениями) с величиной напряжений, соответствующих неупругой деформации $15 \cdot 10^{-5}$ мм/мм. Это свидетельствует о том, что величина предела выносливости в исследованном случае зависит в первую очередь от процессов, связанных с нелокализованным (рассеянным) усталостным повреждением, характеристикой которого является неупругая деформация или энергия неупругого деформирования за цикл.

Резюме

Представлено результати дослідження втоми і непружності за одно- і дво- частотного навантаження аустенітної сталі 08X18H12T до та після експлуатації протягом 100 тис. годин як матеріала головного циркуляційного трубопроводу атомного реактора ВВЕР-440. Проаналізовано отримані результати.

1. *Гарф М. Э., Ищенко И. И., Филатов Э. Я. и др.* Установка для высокотемпературных испытаний образцов на усталость при осевом нагружении // Прикл. механика. – 1974. – **10**, № 4. – С. 94 – 100.
2. *Установка МИР-СТ* для высокотемпературных испытаний образцов на усталость при симметричном и асимметричном циклах осевого нагружения и программного изменения нагрузок. – Киев, 1975. – (Информ. письмо Ин-та механики АН УССР).
3. *Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Цыбанев Г. В.* Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. – Киев: Наук. думка, 1979. – 174 с.
4. *Троценко В. Т.* Рассеяние усталостного повреждения металлов и сплавов. Сообщ. 1. Неупругость, методы и результаты исследования // Пробл. прочности. – 2005. – № 4. – С. 5 – 32.
5. *Троценко В. Т.* Рассеяние усталостного повреждения металлов и сплавов. Сообщ. 2. Взаимосвязь между усталостью и неупругостью // Там же. – № 5. – С. 5 – 29.

6. Троценко В. Т. Рассеяние усталостного повреждения металлов и сплавов. Сообщ. 3. Деформационные и энергетические критерии // Там же. – 2006. – № 1. – С. 5 – 31.
7. Романов А. Н. Энергетические критерии разрушения при циклическом нагружении (обзор) // Там же. – 1971. – № 3. – С. 3 – 9.
8. Майло А. Н. Резонансный метод контроля неупругости конструкционных материалов // Там же. – 2009. – № 3. – С. 124 – 133.
9. Troshchenko V. T. Cyclic inelasticity and high-cycle fatigue of metals with consideration of the stress gradient effect // Там же. – 2011. – №. 4. – С. 48 – 58.
10. Хамаза Л. А., Коваленко В. А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщ. 1. Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении. Сообщ. 2. Методика оценки циклической долговечности при двухчастотном нагружении // Там же. – 1989. – № 10. – Сообщ. 1: С. 7 – 13; Сообщ. 2: С. 13 – 18.
11. Троценко В. Т. Критерии усталостной прочности металлов и сплавов, основанные на учете рассеяния энергии // Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 168 – 177.
12. Ramberg W. and Osgood W. R. Description of Curves by Three Parameters // NACA Techn. Note No. 902. – 1943.
13. Klesnil M. and Lukas P. Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.

Поступила 11. 01. 2012