

Амплитудные характеристики неупругости стали X18H10T при многоцикловом нагружении

Г. Г. Писаренко, А. Н. Майло

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина
method@ipp.kiev.ua

Установлены амплитудные параметры статистических характеристик неупругости поверхностного слоя стали X18H10T, описывающих кинетику накопления неупругих деформаций структуры исследуемого материала при многоцикловой усталости. Определены особенности изменения параметров статистических характеристик неупругих деформаций образца материала.

Ключевые слова: неупругость, поликристаллический материал, нормированный размах, временной ряд, описательная статистика, многоцикловая усталость.

Введение. Современные подходы механики деформируемого твердого тела к анализу способности конструкционного материала сопротивляться усталости представлены моделью механизма эволюции состояния диссипативной среды [1]. Согласно этому поликристалл имеет пространственно-временную согласованность, вследствие чего при неоднородном деформировании структурных элементов среды неупругое деформирование материала развивается во времени на разных масштабных уровнях и имеет признаки стохастического процесса. Микропластическое деформирование инициируется последовательным действием механизмов структурной эволюции на разных уровнях.

Сопротивление усталости конструкционного материала развивается как нелинейный процесс, интенсивность которого монотонно возрастает вследствие активизации локальных изменений структуры на стадиях смены механизмов повреждения. В целом интегрально это соответствует обобщенной диаграмме усталости [2], на которой выделяют две основные стадии повреждения: рассеянное и локализованное. Стадия рассеянного повреждения многоцикловой усталости составляет около 90% относительной долговечности. Естественная неоднородность структуры поликристаллического материала вызывает неоднородность напряжений второго рода, которые в перенапряженных зернах [3] инициируют микропластическое деформирование вследствие превышения предельно допустимых напряжений в элементах структуры. Исчерпание материалом свойства сопротивляться усталости во времени проходит ряд стадий неупругих изменений на разных масштабных уровнях [4]. Мера микропластических изменений определяется величиной рассеянной энергии как интегральная оценка неупругости материала на стадии нелокализованного разрушения при усталости [5]. Результаты исследований [6] показали, что существующие критерии перехода от рассеянной к локализованной стадии усталостного повреждения базируются на подходах механики разрушения.

В данной работе представлены кинетические закономерности изменения статистических характеристик неупругости поверхностного слоя конструкционной стали при многоцикловом нагружении.

Методика исследований. В качестве объекта исследования были выбраны лабораторные образцы стержневой формы размером $50 \times 7 \times 2$ мм из стали X18H10T. Ее механические свойства ($\sigma_{0,2} = 314$ МПа, $\sigma_B = 628$ МПа, $E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_{-1} = 230$ МПа) определяли по результатам испытаний образцов на установке типа

INSTRON* [7]. Образцы нагружали в резонансном режиме по стандартному методу на установке ВЭДС-200 с частотой 150 Гц. Амплитуду циклических напряжений в сечении разрушения определяли по методике, описанной в [8]. Разрушение фиксировали по падению резонансной частоты колебаний образца относительно ее начального значения на 3% при $\sigma_a = 528$ МПа. Диаграмма распределения напряжений в рабочей части образца при периодическом нагружении показана на рис. 1. Усталостная трещина в сечении, где измеряли неупругие свойства поверхности, расположена нормально к оси образца в 13 мм от места крепления.

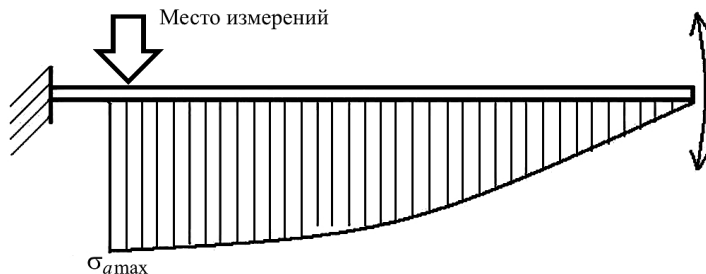


Рис. 1. Диаграмма нагружения.

Характеристики неупругости определяли контактно-резонансным способом по амплитуде электрического сигнала датчика, пропорционального углу сдвига фазы между напряжением и деформацией [9]. Характеристика нагружения датчика при упругоциклическом деформировании материала имеет линейный участок в диапазоне контактных усилий сжатия 0,1...0,3 Н.

При построении диаграмм распределения неупругих деформаций аналоговый сигнал датчика преобразуется в последовательность значений амплитуд, которые характеризуют интенсивность накопленной неупругости. Добротность резонансной системы зависит от параметров составляющих элементов колебательной системы в зоне контактного взаимодействия. Амплитуды дискретных элементов последовательности пропорциональны значениям неупругих деформаций материала в зоне контактных площадок, расположенных по линии сканирования поверхности. Генеральную совокупность данных измерений амплитуд неупругих деформаций в “нулевом” состоянии образуют выборки (рис. 2). Выборка является результатом статистических измерений локальных участков поверхности ненагруженного образца материала. Данные измерения неупругости поверхностного слоя, упорядоченные во времени, образуют ряд, характеризующий кинетику эволюции структуры материала на стадии рассеянной повреждаемости.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2, 3 приведены спектры амплитуд неупругих деформаций поверхностного слоя образца исследуемого материала на разных стадиях нагружения. Спектры двух упорядоченных выборок генеральной совокупности данных иллюстрирует рис. 3, где значения амплитуд являются случайным спектром. Для калибровки таких временных изменений $X(L)$ Херстом [10] предложено безразмерное отношение размаха ряда к стандартному отклонению наблюдений. Этот анализ (R/S) является методом нормированного размаха. Величина коэффициента H (параметр Херста) характеризует персистентность ряда, т.е. склонность к тренду.

Суть метода заключается в определении способом скользящего окна среднего выборочного значения высоты профиля амплитуд $X(L)$ спектра на исследуемой

* Результаты предоставлены В. Э. Филатовым.

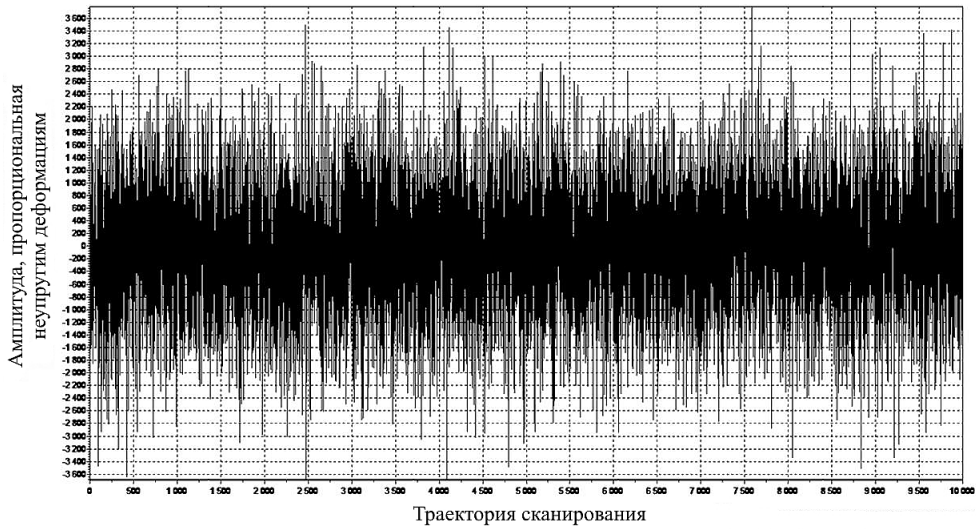


Рис. 2. Структура стохастического спектра амплитуд неупругих деформаций стали X18N10T.

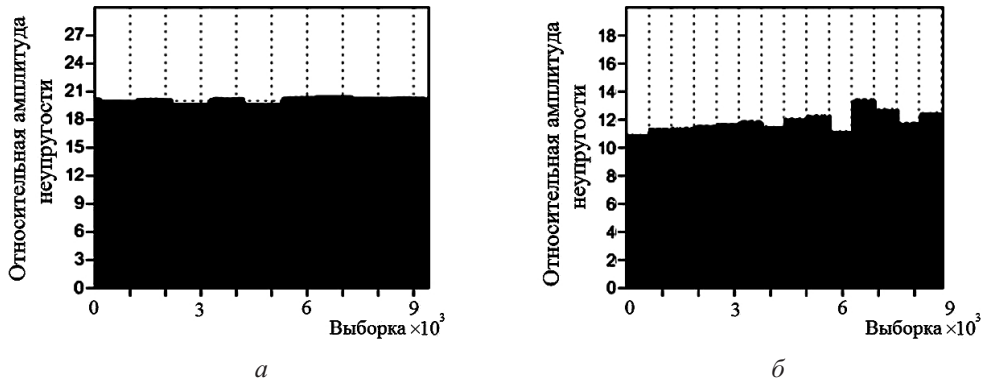


Рис. 3. Спектры амплитуд неупругих деформаций выборок генеральной совокупности: *a* – исходное состояние; *б* – после нагружения на базе 10^7 цикл.

длине участка l ряда наблюдений L генеральной совокупности, которой соответствует определенное число циклов нагружения между циклами измерений спектров амплитуд:

$$X(L) = \frac{1}{L} \sum X(l).$$

Размах накопленных сумм $R(L)$ высоты профиля $X(l)$ от его среднего значения имеет вид

$$R(L) = \max \sum X(l, L) - \min \sum X(l, X).$$

Накопленный нормированный размах ряда описывается степенной зависимостью

$$R/S = N^H,$$

где S – среднеквадратическое отклонение высот профиля; R/S – нормированный размах ряда; N – число циклов в пределах окна.

Параметр Херста H можно использовать как для классификации статистических распределений реальных процессов, так и для оценки тренда роста на временных интервалах ряда. Каждой точке на рис. 4 соответствует ордината с числовым значением параметра H , рассчитанным по методу, описанному в [11]. Ординаты точек (сплошная линия) отвечают средним значениям каждой выборки генеральной совокупности данных, по которым построена диаграмма распределения неупругих деформаций (рис. 5). Согласно критерию Пирсона, данные распределены по нормальному закону, описательная статистика которых представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Описательная статистика ряда амплитуд неупругих деформаций

Выборка	min	max	sum	mean	std.error	variance
143	0,012	0,803	22,6	0,158	0,01	0,01
	std.dev	median	skewness	kurtosis	geo.mean	coeff.var
	0,12	0,116	1,95	5,5	0,121	78,3

Примечание. std.dev – стандартное отклонение; std.error – стандартная ошибка; geo.mean – геометрическое среднее; coeff.var – коэффициент вариации.

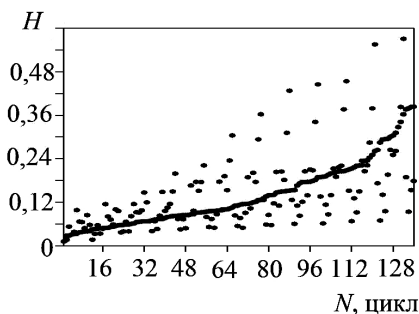


Рис. 4. Диаграмма текущих значений дискретных (точки) амплитуд спектров неупругости.

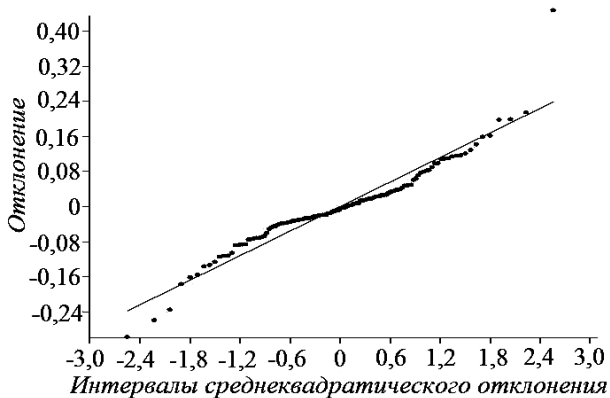


Рис. 5. Диаграмма неоднородности неупругих деформаций поверхности в исходном состоянии.

В табл. 2 приведена полная матрица распределения амплитуд неупругих деформаций поверхностного слоя образца стали X18H10T при усталостных испытаниях до разрушения на базе 10^7 цикл. В каждой ее строке содержится последовательность

Т а б л и ц а 2

Матрица распределения амплитуд неупругости

№ ряда	N, цикл										
	0	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
1	0,0288	0,0534	0,0316	0,039	0,0989	0,0674	0,0659	0,0493	0,0850	0,0413	0,0583
2	0,0335	0,0574	0,0341	0,0471	0,1153	0,0814	0,0728	0,0594	0,1009	0,0942	0,0964
3	0,0401	0,0668	0,0404	0,0822	0,1157	0,0932	0,0919	0,0983	0,1474	0,0967	0,1204
4	0,0411	0,0681	0,0469	0,0834	0,1489	0,0966	0,1059	0,1160	0,1500	0,1072	0,1995
5	0,0459	0,0736	0,0502	0,0850	0,1667	0,0972	0,1767	0,1519	0,1762	0,2048	0,2220
6	0,0524	0,0744	0,0502	0,0873	0,1772	0,1008	0,1923	0,1538	0,2356	0,2796	0,3044
7	0,0552	0,0772	0,0577	0,0914	0,1895	0,1036	0,2015	0,1763	0,2936	0,3374	0,3628
8	0,0590	0,0857	0,0833	0,1173	0,2040	0,1111	0,2052	0,1820	0,3117	0,4571	0,4275
9	0,0612	0,1112	0,0871	0,1218	0,2056	0,1396	0,2108	0,2085	0,3418	0,4613	0,4452
10	0,0622	0,1139	0,0927	0,1401	0,2132	0,1907	0,2167	0,2212	0,3764	0,5530	0,4539
11	0,0685	0,1314	0,0959	0,1504	0,2348	0,2059	0,2223	0,2849	0,3791	0,5925	0,5550
12	0,0704	0,1410	0,1762	0,1964	0,2647	0,2509	0,2618	0,3276	0,3831	0,5939	0,5705
13	0,0944	0,1541	0,1791	0,2434	0,2951	0,3009	0,2945	0,3837	0,4235	0,6219	0,8034

параметров накопленной неупругой деформации, возрастающих по амплитуде и задающих дискретные значения параметра H как амплитуд ряда, в столбцах – последовательность дискретного спектра амплитуд, задающих форму характеристики огибающей распределения значений параметра H , измеренных вдоль линии сканирования поверхности.

На рис. 6 показаны матрицы, представляющие характеристики распределения амплитуд неупругих деформаций, которые соответствуют физическому состоянию поверхностного слоя в зоне сканирования площадью $0,5 \text{ мм}^2$ для двух значений периодического нагружения. Тарировочные шкалы относительных значений неупругих деформаций соответствуют изменению неоднородности распределения неупругих деформаций под влиянием циклических напряжений. Контурные линии матриц отвечают равным значениям параметра H .

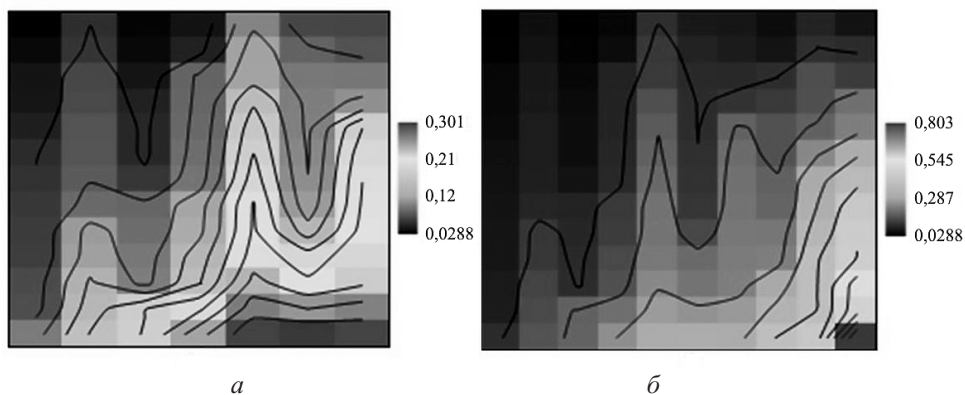


Рис. 6. Диаграмма неупругих деформаций поверхности в исходном состоянии (а) и при нагружении на базе 10^7 цикл (б).

На рис. 7 элементы матрицы представлены характеристиками распределения неупругих деформаций и соответствующими уравнениями регрессии. Кинетика параметра H в диапазоне значений малых амплитуд, характерных для начального состояния материала образца в начале циклического нагружения, аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции $R^2 > 0,9$. С увеличением параметра H до предельных значений, достигаемых при больших циклах нагружения, аппроксимирующая функция близка к экспоненциальной с $R^2 = 0,9$. Ряды № 12 и 13 в табл. 2 характеризуют пространственное распределение (огibaющие) спектров амплитуд неупругих деформаций (рис. 7,а,б), а число циклов $N = 6 \cdot 10^6$ и $7 \cdot 10^6$ – то же во времени (рис. 7,в,г).

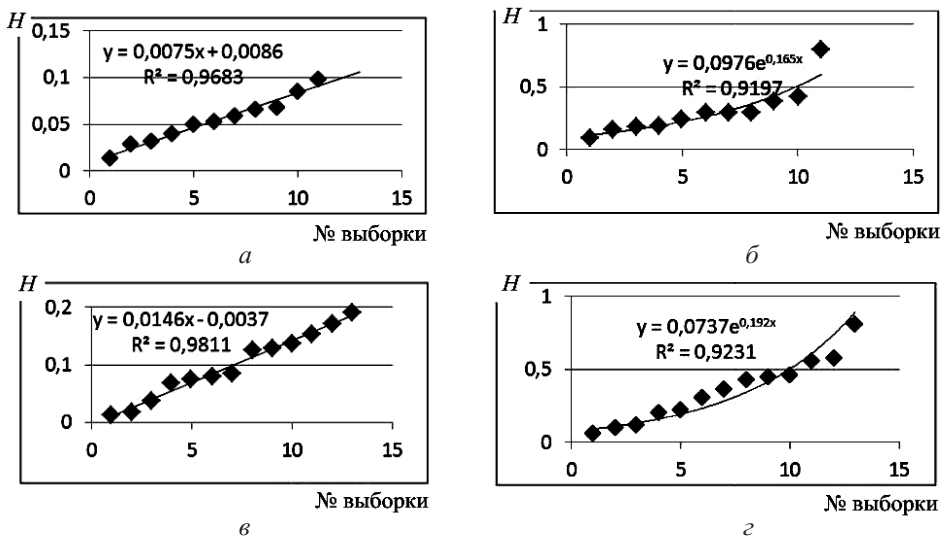


Рис. 7. Огибающие спектров неупругости.

Сравнение амплитудных характеристик, полученных для разного числа циклов нагружения N , позволило проанализировать закономерности влияния циклической нагрузки на неупругие свойства материала (рис. 8).

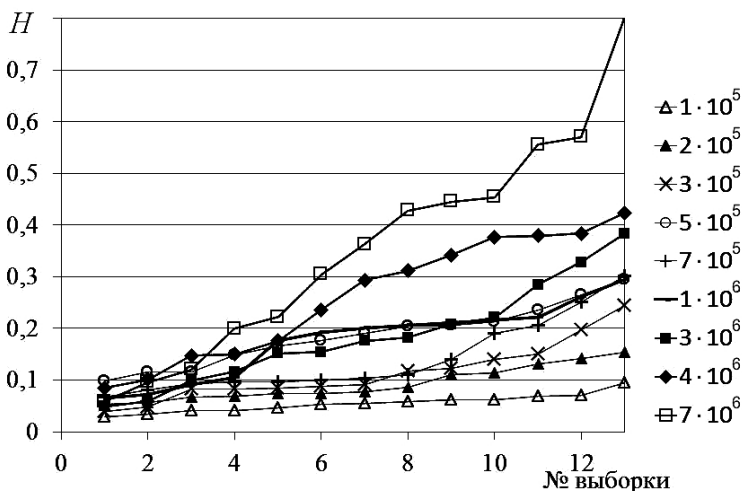


Рис. 8. Кинетические характеристики неупругости.

Характеристики параметра H расположены относительно начала координат под углом, возрастающим по мере увеличения порядкового номера выборки, соответствующего изменению числа циклов нагружения. Динамический диапазон изменения амплитуд ряда, образованного значениями $H = 0,08 \dots 0,8$, соответствует нагружению образца на базе $N = 7 \cdot 10^6$ цикл. Для характеристик с минимальным наклоном значения $H = 0,02 \dots 0,5$. Общим признаком кинетических характеристик на рис. 8 является положительная тенденция изменения угла наклона по мере увеличения числа циклов нагружения.

Для выявления особенностей кинетических закономерностей накопления неупругих деформаций при усталости на стадиях последовательного нагружения генеральная совокупность данных в табл. 2 систематизирована в виде последовательности дискретных спектров амплитуд накопленных деформаций (рис. 9). Каждой выборке соответствует распределение в спектре амплитуд параметра H , полученных за цикл измерений.

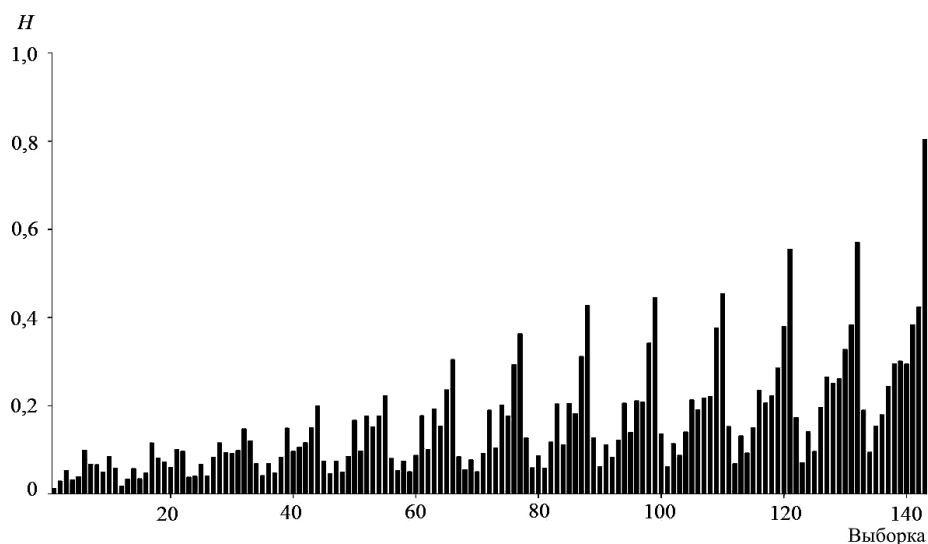


Рис. 9. Спектр генеральной совокупности параметра H .

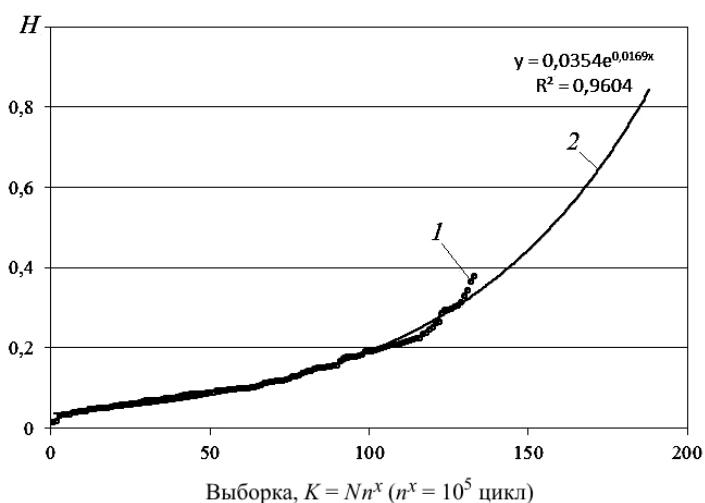


Рис. 10. Экспериментальная (1) и расчетная (2) кинетическая характеристика неупругости стали X18H10T.

На рис. 9 дискретный спектр состоит из 150 выборок, представленных спектральными линиями, амплитуды которых определены по методу нормированного размаха. Для определения закономерностей изменения параметров генеральной совокупности данных использован алгоритм суммирования отклонений от среднего значения амплитуды спектра. Амплитуда дискретного элемента спектра превышает значение предыдущего элемента на разность амплитуд среднего значения данной выборки и предыдущего. Генеральная совокупность данных на рис. 10 представлена в виде кинетической диаграммы неупругих изменений во времени. Диаграмма характеризует изменение параметра H поверхностного слоя образца при циклическом нагружении на базе 10^7 цикл.

В основу предложенного подхода к анализу локальных свойств неупругости конструкционных материалов положены преимущества прямых методов исследования поврежденности. Подход открывает новые возможности определения текущего состояния конструктивного элемента. Его реализация обеспечит контроль характеристик неупругости на площади поверхности размером, который соизмерим с размером зоны локализации разрушения при усталости.

Выводы

1. Получены амплитудные характеристики кинетики неупругости стали X18H10T на базе 10^7 цикл.

2. Выявлена монотонная зависимость параметра кинетической характеристики неупругих деформаций образцов стали X18H10T в исследованном диапазоне циклов нагружения.

3. Установлена (с достоверностью 96%) корреляционная зависимость параметра Херста от времени нагружения, которая на ранних стадиях нагружения (10...70%) имеет линейный вид, на стадии до 90% долговечности – экспоненциальный.

Резюме

Отримано амплітудні параметри статистичних характеристик непружності поверхневого шару сталі X18H10T, що описують кінетику накопичення непружних деформацій структури досліджуваного матеріалу за багатоциклової втоми. Визначено особливості зміни параметрів статистичних характеристик непружних деформацій поверхневого шару зразків матеріалу.

1. *Иванова В. С.* Междисциплинарный анализ диссипативного состояния физико-химических систем при их эволюции // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* – 2006. – № 9. – С. 12–19.
2. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: *Металлургия*, 1975. – 456 с.
3. *Богачев И. Н., Вайнштейн А. А., Волков С. Д.* Статистическое металловедение. – М.: *Металлургия*, 1984. – 176 с.
4. *Цыбанев Г. В., Новиков А. В.* Расчетная модель предельного упрочнения материалов при многоцикловой усталости и определение ее параметров. *Сообщ. 1. Описание модели // Пробл. прочности.* – 2010. – № 6. – С. 122–136.
5. *Троценко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: *Наук. думка*, 1981. – 343 с.
6. *Троценко В. Т., Хамаза Л. А.* Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. *Сообщ. 1. Размеры трещин при пределе выносливости // Пробл. прочности.* – 2014. – № 3. – С. 5–20.

7. *Бялонович А. В.* Накопление усталостных повреждений в структуре сплава X18H10T при комнатной и повышенной температурах // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2011. – Вип. 34. – С. 124–130.
8. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
9. *Писаренко Г., Войналович О., Майло А.* Амплітудні характеристики дискретної неупругості субмікросталічного титану VT1-0 за багатоциклового навантаження // Вісн. ТНТУ. – 2013. – № 3 (71). – С. 47–52.
10. *Писаренко Г. Г., Майло А. Н.* Определение закономерностей повреждаемости стали X18H10T при циклических нагрузках R/S методом: Тр. междунар. науч.-техн. конф. “Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні” (Киев, 27–30 мая 2014 г.). – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2014. – С. 201–202.
11. *Бутаков В., Граковский А.* Оценка уровня стохастичности временных рядов произвольного происхождения при помощи показателя Херста // *Comp. Model. New Technol.* – 2005. – 9, No. 2. – P. 27–32.

Поступила 22. 04. 2015