

PACS numbers: 05.65.+b, 46.50.+a, 62.20.F-, 62.20.M-, 81.40.Jj, 81.40.Np

## **Дискретные свойства неупругости аустенитной стали и сплавов на основе Al и Ti при периодическом деформировании**

Г. Г. Писаренко, А. В. Войналович\*, А. Н. Майло

*Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины,  
ул. Тимирязевская, 2,  
01014 Киев, Украина*

*\*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,  
ул. Героев Обороны, 15,  
03041 Киев, Украина*

В работе представлены характеристики диссипативных свойств стали и сплавов при разных условиях циклического деформирования лабораторных образцов, полученные методом нормированного размаха амплитуд дискретных деформаций. Амплитудные характеристики дискретных деформаций поверхности материала лабораторного образца сопоставлены в широком диапазоне деформаций. С использованием разработанного контактно-резонансного метода измерения дискретных неупругих деформаций поверхностного слоя металлических материалов получены кинетические характеристики их рассеянного повреждения, которое проявляется в нестабильности неупругих деформаций при периодическом нагружении в виде процессов упрочнения–разупрочнения. Выявленная повторяемость экстремумов кинетической характеристики неупругости показала стохастическую закономерность, исследованную в работе. Выполненная

---

Corresponding author: Andriy Mykolayovych Mailo  
E-mail: maylo@ipp.kiev.ua

*G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, N.A.S. of Ukraine,  
2 Timiryazevs'ka Str.,  
UA-01014 Kyiv, Ukraine*

*\*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
15 Heroiv Oborony Str.,  
UA-03041 Kyiv, Ukraine*

Citation: G. G. Pisarenko, O. V. Voynalovich, and A. M. Mailo, Discrete Properties of the Inelasticity of Steel and Alloys Based on Al and Ti under Periodic Deformation, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 2: 261–279 (2020) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.42.02.0261](https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0261).

систематизация результатов исследования позволила выявить корреляционную связь характеристик неупругих деформаций поверхности нагруженного металла с циклической долговечностью. На базе экспериментально-расчётных данных в пределах структурно-энергетической теории усталости обосновано применение рекуррентного ряда для определения долговечности по критерию упрочнения. При сканировании поверхности образцов материала предложенным методом получены амплитудные характеристики деформирования локальных объёмов материала в зоне сканирования. Амплитудный спектр сканирования, соответствующий состоянию деформационных дефектов поверхности, представляет генеральную совокупность результатов, определённых по методу нормированного размаха. Он объединяет результаты серии последовательных измерений неупругих деформаций, развившихся в поверхностном слое материала лабораторного образца с монотонным возрастанием интенсивности степени рассеянной повреждённости в процессе многоциклового нагружения.

**Ключевые слова:** усталость, неупругость, точка бифуркации, рассеянная повреждённость, параметр Херста.

В роботі представлені амплітудні характеристики дисипативних властивостей матеріалів лабораторних зразків за різних умов деформування, отримані за методом нормованого розмаху амплітуд дискретних деформацій. Амплітудні характеристики дискретних властивостей поверхні матеріалу лабораторного зразка зіставлені в широкому діапазоні циклічних деформацій. Метою роботи є виявлення закономірностей розсіяної пошкодженості поверхневого шару за дії змінного навантаження лабораторних зразків стадії та стопів, як модельних елементів поверхні конструкційного елемента. З застосуванням розробленого контактно-резонансного методу вимірювання дискретних непружніх деформацій поверхневого шару матеріалу отримано кінетичні характеристики розсіяного пошкодження легких стопів, для яких нестабільність непружніх деформацій проявляється за дії періодичного навантажування у вигляді процесів зміцнення–знеміцнення матеріалу. Виявлено повторюваність екстремумів кінетичної характеристики непружності показала стохастичну закономірність, дослідженню в роботі. Проведена систематизація результатів дослідження дозволила виявити кореляційний зв'язок характеристик непружніх деформацій поверхні навантаженого матеріалу з довговічністю під час втоми. На базі експериментально-розрахункових даних в межах структурно-енергетичної теорії втоми обґрунтовано застосування рекуррентного ряду для визначення довговічності за критерієм зміцнення. В результаті сканування поверхні зразків матеріалу отримано амплітудні характеристики деформування локальних об'ємів матеріалу в зоні сканування. Амплітудний спектр сканування, що відповідає стану деформаційних дефектів поверхні, представляє генеральну сукупність результатів, визначених за методом нормованого розмаху. Він об'єднує результати серії послідовних вимірювань непружніх деформацій, що розвиваються в підповерхневому шарі матеріалу лабораторного зразка з монотонним зростанням інтенсивності розсіяної пошкодженості під час багатоциклового навантажування.

**Ключові слова:** втома, непружність, точка біфуркації, розсіяне пошкодження, параметр Херста.

The paper presents the amplitude characteristics of the dissipative properties of steel and alloys under different conditions of deformation of laboratory samples obtained by the method of the normalized range of amplitudes of discrete deformations. Amplitude characteristics of the discrete properties of the surface of a laboratory sample material are compared in a wide range of strain amplitudes. Using the developed contact-resonance method for measuring discrete inelastic deformations of the surface layer of a material, the kinetic characteristics of scattered damage to light alloys are obtained, where the instability of inelastic deformations manifests itself during periodic loading in the form of material hardening–softening processes. The revealed repeatability of extrema of the kinetic characteristics of inelasticity shows a stochastic regularity studied in the work. The systematization of the results of the study allows us to reveal the correlation of the characteristics of the inelastic deformations of the surface of the loaded metal with cyclic durability. On the basis of experimental and calculated data within the framework of the structural-energetic theory of fatigue, the use of a recurrent series to determine the durability by the hardening criterion is substantiated. As a result of scanning the surface of samples of the material, the amplitude characteristics of the deformation of the local volumes of material in the scanning zone are obtained. The amplitude scan spectrum corresponding to the state of deformation defects of the surface represents the general totality of the results determined by the method of normalized magnitude. It combines the results of a series of consecutive measurements of inelastic deformations developed in the subsurface layer of the material of a laboratory sample with a monotonic increase in the intensity of the degree of scattered damage in the process of high-cycle loading.

**Key words:** fatigue, inelasticity, bifurcation point, scattered damage, Hurst index.

(Получено 13 мая 2019 г.; окончат. вариант — 8 октября 2019 г.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разрушение при циклическом деформировании представляет собой вероятностный, многостадийный и многомасштабный кинетический процесс эволюции структуры материала [1] и, как следствие, изменения его физико-механических свойств. Многомасштабность явления разрушения реального твердого тела — это комплекс взаимосвязанных процессов, протекающих самосогласованно на разных масштабно-структурных уровнях. Многостадийность процесса разрушения определяется последовательностью стадий, каждая из которых имеет механизм, определенный характерной энергией активации и статистическими закономерностями эволюции.

Независимо от исходного состояния структуры, эволюция струк-

турных параметров под действием механизма микропластических деформаций развивается в ограниченном количестве микрообъемов поликристаллической матрицы в виде неупругих деформаций. Характерной особенностью структурных превращений в металлах является проявление нестабильности их кинетических характеристик при нагружении до разрушения [2].

Широкое применение получил интегральный метод анализа прочности и долговечности по параметрам площади петли гистерезиса [3], характеризующей накопленную в материале энергию за цикл, что обеспечивает контроль в текущем времени состояния поврежденности, рассеянной в структуре материала, а также циклы упрочнения и разупрочнения. Такой подход обеспечивает учет влияния на долговечность текущего состояния материала.

Механические свойства сталей и сплавов при переменном нагружении проявляют циклическую нестабильность, что влияет на диссипативные свойства материалов и осложняет определение достоверного значения механических свойств материала из-за рассеяния результатов эксперимента. Для адаптации расчетных методов определения характеристик сопротивления усталости принято использовать усредненное значение диссипативной энергии. При этом общая долговечность определяется на основе учета длительности инкубационного развития трещины до заданного размера. С учетом того, что условия зарождения макротрещины характеризуются локальными структурными особенностями напряженно-деформированного состояния, причина разброса экспериментальных результатов усталостных испытаний, по-видимому, заключается в отличии расчетных значений напряжений и действующих в микроструктуре зон локализации в процессе зарождения малых трещин.

Периодичность процесса рассеянного разрушения проявляется и в смене микромеханизмов деформирования на стадии инкубационного процесса развития усталости, связанного с влиянием локальных механизмов рассеянного разрушения [4]. Эти представления согласуются с положениями о том, что структурно-неоднородный материал представляет собой энергетически нестабильную систему, что проявляется в нелинейности характеристики деформирования в координатах «напряжение–деформация».

При циклическом и статическом нагружении поликристаллический материал проявляет свойства динамически неустойчивой многоуровневой диссипативной системы. При нагружении такой системы происходят изменения в структуре поликристаллического материала, определяющие его предельное состояние. В момент достижения предельного состояния происходят скачкообразные изменения энергетического состояния при условии готовности материала к переходу в другое состояние, реализуемое фазовым переходом или бифуркацией. Состояние материала в точке бифуркации

характеризуется скачкообразным изменением механизма, которое может быть реализовано либо переходом на другой масштабный уровень рассеянной повреждаемости структуры, либо к локальному разрушению [5].

С позиций применения такого подхода представляется возможным оценить циклическую характеристику накопления повреждений, как результат совместной реакции разных масштабных уровней на деформирование. Такое взаимодействие разных процессов учитывается с помощью синергетической модели [6]. Модельные представления о механизме накопления повреждений учитывают общие положения механики деформируемого твердого тела и представляют процесс исчерпания ресурса пластичности, идентичный для всех стадий разрушения материала [7].

Характерной особенностью эволюции дислокационной структуры при циклическом нагружении является множественное проявление локальных изменений, аддитивный характер развития которых приводит к зарождению единичных макротрещин. С увеличением числа циклов нагружения происходит эволюция структурных параметров путем накопления микропластических деформаций в ограниченном количестве микрообъемов, размер которых растет с увеличением числа циклов нагружения, на фоне практически стабильного состояния остального материала и значительно большего количества возникающих, но не развивающихся областей структурных изменений [8]. Особенностью напряженно-деформированного состояния микрообъемов максимальных структурных изменений является повышенная чувствительность к внешним нагрузкам, обусловленная локальной концентрацией напряжений, развивающихся по механизму, предложенному в работе [8].

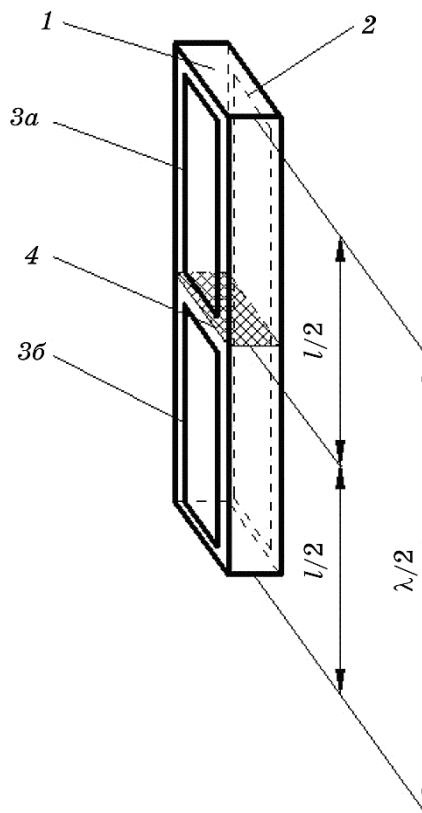
Целью работы является выявление общих закономерностей рассеянной повреждаемости поверхностного слоя при переменном нагружении лабораторных образцов некоторых марок сталей и сплавов, как модельных элементов поверхности конструктивного элемента, что позволит на ранних этапах нагружения с большей достоверностью контролировать кинетику накопления повреждений.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

В данной работе характерные особенности эволюции структуры при циклическом нагружении в процессе рассеянного разрушения проанализированы с помощью разработанного контактно-резонансного метода измерения дискретных неупругих деформаций [9]. В основе реализации метода лежит использование измерительной электромеханической колебательной системы, активным элементом которой является призматический пьезоэлектрический стержень (рис. 1). На противоположных боковых гранях стержня нанесены элек-

троды 2 и 3; электрод 2 является общим (соединенным с контуром заземления), электрод 3 разделен на две части в поперечном направлении симметрично относительно узлового сечения 4. К электроду 3б прикладывается переменное электрическое напряжение  $U_o$ .

В результате действия обратного пьезоэлектрического эффекта в стержне возникают упругие продольные деформации. Вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта на пассивном электроде 3а пьезоэлектрического стержня возникает электрическое напряжение  $U_e$ , величина которого пропорциональна циклическим деформациям пьезоэлектрического стержня и сдвинута по фазе относи-



**Рис. 1.** Пьезоэлектрический резонансный стержень: 1 — стержень, 2 — общий электрод (выделен штриховкой), 3а — пассивный электрод ( $U_e$ ), 3б — активный электрод ( $U_o$ ), 4 — узловое сечение (штрихованное),  $l$  — длина стержня,  $\lambda$  — длина продольной волны.

**Fig. 1.** Piezoelectric resonance rod: 1—rod, 2—common electrode (highlighted by hatching), 3a—passive electrode ( $U_e$ ), 3b—active electrode ( $U_o$ ), 4—nodal section (hatched),  $l$ —length of the rod,  $\lambda$ —longitudinal wavelength.

тельно вынуждающего напряжения  $U_\sigma$  на угол  $\Delta\varphi^0$ . Известно, что угол сдвига фаз  $\Delta\varphi^0$  между гармоническим сигналом возбуждения колебательной системы в области резонанса и сигналом собственных колебаний определяют по формуле:

$$\operatorname{tg}(\Delta\varphi^0) = \frac{\delta(v/\omega)}{\pi \left[ 1 - (v/\omega)^2 \right]}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — логарифмический декремент колебаний (относительная характеристика неупругости),  $v$  — частота вынуждающих колебаний,  $\omega$  — собственная частота колебательной системы.

Вследствие обратимости пьезоэффекта стержень 1 (рис. 1) является силовозбудителем (обратный пьезоэффект) и датчиком (прямой пьезоэффект).

Исследования статистических свойств параметра поврежденности материалов проводились при нагружении симметричными циклами растяжения–сжатия образцов [9] на резонансной магнитострикционной установке при мягком режиме нагружения с частотой 17 кГц и при статическом одноосном растяжении. Для исключения разогрева образцов, возникающего вследствие диссипативных потерь энергии в материале, испытания проводили при низком уровне напряжений и на больших базах испытаний.

Испытания проводили в резонансном режиме на образцах диаметром 7 мм, длина рабочей части которых была кратна половине длины волны его собственных колебаний на частоте основного продольного резонанса. Распределение напряжений по длине образца соответствует гармоническому закону, а максимальные напряжения цикла имеют однородное распределение в узловом сечении образца.

Измерения угла сдвига фаз проводились в локальных зонах на поверхности образца по периметру сечения рабочей части и по нормали к цилиндрической поверхности. Точность позиционирования зоны измерения в переделах контролируемого сечения составляет 0,1 мм. В этом случае диапазон изменения напряжений, определяющий погрешность позиционирования места измерений, находится в переделах одного процента, что не вносит значимой погрешности в результаты измерений.

Контроль угла сдвига фаз в условиях циклического нагружения проводили следующим образом: образец нагружали определенное число циклов, после чего нагружение прекращали и проводили измерения. Такие кратковременные прерывания нагружения, для измерения угла сдвига фаз, не влияют существенно на кинетику его повреждаемости, так как время разгрузки незначительно сравнимо со временем нагружения, а уровни напряжений близки к пределу выносливости материала.

Статистический анализ результатов измерений проводили с применением  $R/S$  метода. Накопленный размах амплитуд отклонений угла сдвига фаз —  $R/S$  определяли по данным среднего выборочного значения его амплитуды по ординате  $A$  на шкале  $L$ , определенного в виде

$$A(L) = \frac{1}{L} \sum A(l). \quad (2)$$

Накопленный размах амплитуды профиля  $A(l)$  ряда составит величину  $R$ :

$$R(L) = \max A(l, L) - \min A(l, L), \quad (3)$$

где  $A(l, L)$  — накопившееся отклонение высот профиля  $A(l)$  относительно среднего значения.

Накопившееся отклонение профиля, нормированное на величину среднеквадратического отклонения, описывается степенной зависимостью

$$R/S = cn^H, \quad (4)$$

где  $n$  — число наблюдений,  $H$  — показатель Херста,  $c$  — константа.

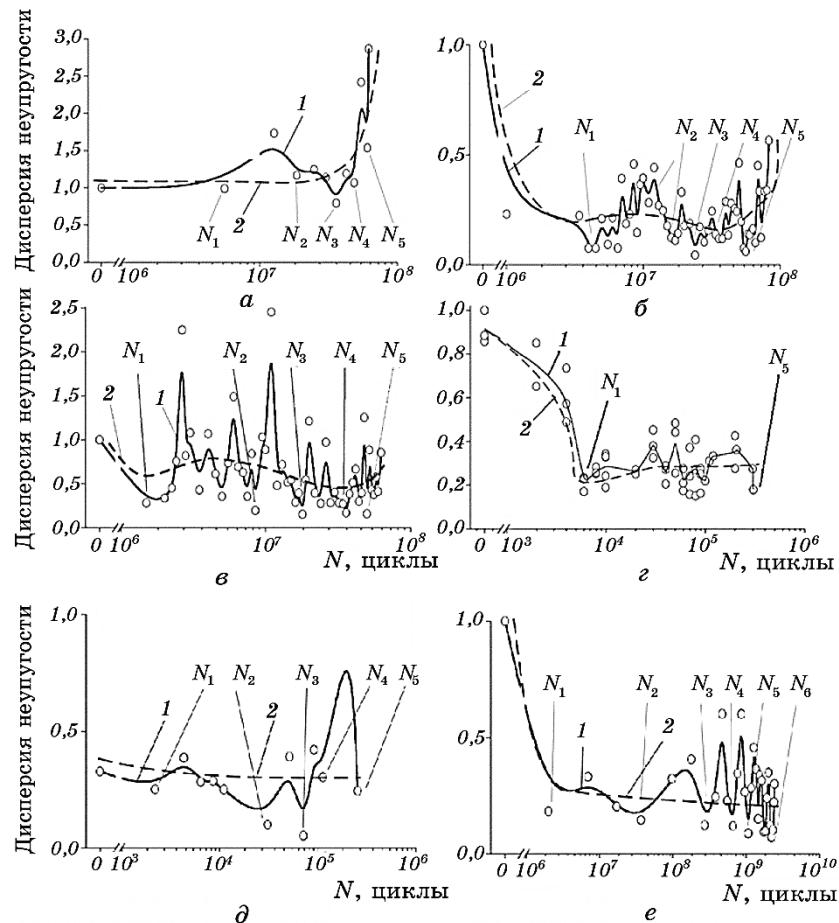
В двойных логарифмических координатах угловой коэффициент аппроксимирующей прямой функции  $R/S = f(n, t)$  определяет величину накопленной поврежденности. Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой соответствует значению нормированной величины накопленного отклонения (показатель Херста  $H$ ) случайного ряда амплитуд локальных деформаций. Показатель Херста  $H$  характеризирует размах амплитуд спектра неупругих деформаций и во времени определяет кинетику процесса накопления неупругих деформаций.

Количество значений измерений параметров поврежденности при изменении числа циклов напряжений в интервале одного порядка шкалы долговечности составляло около десяти раз. Следовательно, полученная характеристика неупругости в диапазоне циклов нагружения  $10^5$ – $10^9$  была аппроксимирована по 40 значениям измерений параметров неупругости. Нагружение образцов продолжали до изменения резонансной частоты магнитострикционной установки на определенное значение, что соответствует 90% относительного числа циклов  $N/N_p$ . Разрешающая способность примененного в работе метода измерений при дискретном анализе неупругих деформаций поверхностного слоя стали X18H10T (аналог ASE321) со средним размером зерна около 30 мкм составляла 20 точек/мм.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 показаны кинетические характеристики рассеянного повреждения легких сплавов, на которых нестабильность неупругих деформаций проявляется при периодическом нагружении в действии процессов упрочнения—разупрочнения материала (кривые 1), а также как усредненная характеристика (кривые 2).

Точка бифуркации процесса характеризует достижение критиче-



**Рис. 2.** Выделенные экстремумы упрочнения: *а* — АМг6Н,  $\sigma_a = 65$  МПа; *б* — АМг6Н,  $\sigma_a = 73$  МПа; *в* — АМг6Н,  $\sigma_a = 84$  МПа; *г* — Д16Т,  $\sigma_a = 120$  МПа; *д* — ПТ-5В,  $\sigma_a = 300$  МПа; *е* — ОТ4-1,  $\sigma_a = 122$  МПа.

**Fig. 2.** Selected hardening extremes: *a*—AMg6N,  $\sigma_a = 65$  MPa; *b*—AMg6N,  $\sigma_a = 73$  MPa; *c*—AMg6N,  $\sigma_a = 84$  MPa; *d*—D16T,  $\sigma_a = 120$  MPa; *e*—PT-5V,  $\sigma_a = 300$  MPa; *f*—OT4-1,  $\sigma_a = 122$  MPa.

ского уровня запасенной энергии в локальном объеме, при котором незначительные ее флуктуации способны под действием внутренней энергии инициировать самопроизвольный процесс самоорганизации диссипативной структуры. В условиях периодического нагружения точки бифуркаций располагаются на «шкале» долговечности в соответствии с рекуррентным соотношением, предложенным В. С. Ивановой [5], с использованием универсальной постоянной разрушения:

$$\frac{N_n}{N_{n+1}} = \Delta^{\frac{1}{2(n+1)}}, \quad (5)$$

где  $N_n$  — число циклов нагружения, соответствующее  $n$ -ному члену ряда,  $N_{n+1}$  — число циклов следующего члена ряда,  $n = 1, 2, 3, \dots, i$ ,  $\Delta$  — универсальная постоянная разрушения, характеризующая энергетическое состояние нагруженного локального объема поликристаллического материала.

Энергетическое состояние отдельных локальных объемов аналогично состоянию материала в процессе плавления при температуре  $T_s$ . Энергия, затраченная на плавление локального объема, эквивалентна энергии, затраченной на его пластическое деформирование.

Для исследованных материалов (алюминиевые и титановые сплавы) средние значения постоянных разрушения соответственно равны 0,22 и 0,12. Следовательно, зная значение постоянной универсальной разрушения для исследуемого материала, можно получить расчетные члены ряда:  $N_1/N_2 = 0,22$ ,  $N_2/N_3 = 0,47$ ,  $N_3/N_4 = 0,68$ ,  $N_4/N_5 = 0,82$ ,  $N_5/N_6 = 0,91$ , ... — для алюминиевых сплавов и  $N_1/N_2 = 0,12$ ,  $N_2/N_3 = 0,34$ ,  $N_3/N_4 = 0,59$ ,  $N_4/N_5 = 0,76$ ,  $N_5/N_6 = 0,87$ , ... — для титановых сплавов. Проанализировав рекуррентный ряд (5), можно заключить, что если известно число циклов  $N_1$ , соответствующее состоянию материала первой точки бифуркации, то можно рассчитать последующие значения ( $N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ ) числа циклов, соответствующие точкам бифуркации определенной выше серии.

Для характеристик, представленных на рис. 2, характерно убывание на начальном этапе нагружения. Характеристика убывает быстрее или медленнее в зависимости от уровня напряжений и от материала. Для алюминиевого сплава АМг6Н при снижении уровня циклических напряжений (рис. 2, a) имеется горизонтальный участок характеристики повреждаемости на начальном этапе нагружения (10%  $N/N_p$ ), что свидетельствует о снижении интенсивности повреждаемости с уменьшением амплитуды напряжений цикла.

Характеристика повреждаемости сплава ОТ4-1 (рис. 2, e) убывает быстрее на начальном участке нагружения, чем характеристики,

полученные для ПТ-5В (рис. 2,  $\delta$ ), при значительно большем уровне циклических напряжений, но при этом имеют более пологий вид. Такой характер их изменения может быть вызван неодинаковой интенсивностью накопления повреждений при разных амплитудах напряжений цикла.

Снижение характеристики повреждаемости свидетельствует об уменьшении неоднородности распределения микропластических деформаций по отношению к начальному состоянию. Учитывая рассеянный характер повреждений при усталости, можно сделать вывод, что большая дисперсия угла сдвига фаз соответствует большей поврежденности, а меньшая — меньшей. Следовательно, снижение характеристики поврежденности соответствует упрочнению конструкционного материала, а возрастание — разупрочнению.

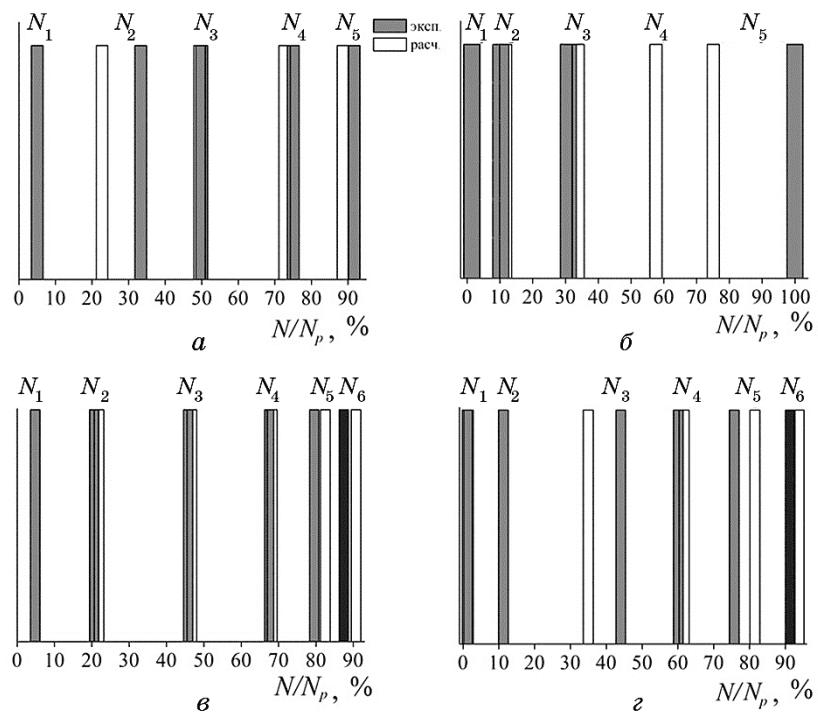
Снижение характеристики при нагружении происходит до определенного значения относительной долговечности на уровне около 10%  $N/N_p$ , что зафиксировано в каждом случае на рис. 2. Дальнейшая наработка сопровождается возрастанием характеристики. Таким образом, на кинетической характеристике существует экстремум (первый минимум упрочнения  $N_1$ ), соответствующий 10%  $N/N_p$ . Такая кинетика поврежденности на начальном этапе нагружения соответствует циклически упрочняющемуся материалу. Первой стадии усталости (инкубационной) на обобщенной диаграмме усталости соответствует период 10% наработки, следовательно, первый экстремум на характеристике поврежденности соответствует переходу от инкубационной к следующей стадии усталости (образование субмикроскопических трещин), а в материале отсутствуют необратимые повреждения. В диапазоне долговечности до разрушения наблюдается чередование таких экстремумов, периодичность которых не зависит от амплитуды напряжений цикла.

В соответствии с формулой рекуррентного ряда (5) было проведено сопоставление экстремумов каждой из полученных характеристик дискретной модели повреждаемости с членами расчетного ряда. В качестве первого члена рекуррентного ряда  $N_1$  выбрали число циклов, соответствующее первому минимуму на характеристике повреждаемости (первый экстремум упрочнения), и рассчитывали последующие значения ( $N_2, N_3, N_4, \dots$ ) по формуле (5). Если погрешность расхождения экспериментального и расчетного рядов находилась в пределах допустимой, то значение числа циклов первого экстремума упрочнения принимали за действительное  $N_1$ , в противном случае расчет продолжали по методу последовательных приближений.

В следующем приближении принимали, что число циклов первого экстремума соответствует второму члену расчетного ряда ( $N_2$ ), и повторно проводили расчет членов ряда ( $N_3, N_4, \dots$ ) с последующей

оценкой погрешности. Расчет продолжали до тех пор, пока погрешность между значениями расчетного ряда и экспериментального не оказывалась в пределах допустимой.

Таким образом, число циклов, соответствующих каждому выделенному экстремуму упрочнения ( $N_1, N_2, N_3, N_4, \dots$ ) на характеристиках повреждаемости, соответствует одной серии расчетного ряда. Максимальная амплитуда первого экстремума ряда снижается у последующих рядов с ростом накопленного количества циклов нагружения. Систематизация этих результатов представлена на рис. 3 в координатах порядковый номер экстремума упрочнения ( $N_1, N_2, \dots$ ) — относительное число циклов ( $N/N_p, \%$ ) для каждого материала по одному спектру. Из анализа статистических характеристик следует, что в диапазоне долговечности на стадии рассеянного повреждения укладывается фиксированное количество периодов упрочнения—разупрочнения, которое не зависит от амплитуды напряжений цикла и базы испытаний для исследуемых конструк-



**Рис. 3.** Выделенные экстремумы упрочнения: *a* — Д16Т,  $\sigma_a = 120$  МПа; *б* — ПТ-5В,  $\sigma_a = -300$  МПа; *в* — АМг6Н,  $\sigma_a = 73$  МПа; *г* — ОТ4-1,  $\sigma_a = 122$  МПа.

**Fig. 3.** Selected hardening extremes: *a*—D16T,  $\sigma_a = 120$  MPa; *б*—PT-5V,  $\sigma_a = -300$  MPa; *в*—AMg6N,  $\sigma_a = 73$  MPa; *г*—OT4-1,  $\sigma_a = 122$  MPa.

ционных материалов.

Первому номеру линии спектра упрочнения ( $N_1$ ) соответствует относительное число циклов в пределах 10%, а последнему ( $N_{5,6}$ ) — (90–95)%. Относительное число циклов первого экстремума упрочнения на характеристиках повреждаемости принимается в качестве первого члена  $N_1$  расчетного рекуррентного ряда, который используется в качестве базового. Таким образом, зная число циклов нагружения  $N_1$  экспериментального ряда, можно определить их число для каждого последующего экстремума упрочнения. Следовательно число циклов, соответствующее первому экстремуму упрочнения  $N_1$ , может применяться для определения циклической долговечности конструкционных материалов по критерию упрочнения.

Анализ дискретных особенностей диссипативных свойств, как результат кинетики накопления рассеянной поврежденности, показал, что периодическое деформирование инициирует эволюцию диссипативных свойств материала вследствие накопления энергии микропластических деформаций. Амплитуда спектра кинетической характеристики, означающей рассеяние энергии поврежденного материала, зависит от силовых параметров деформирования и длительности нагружения. Характеристика дискретного спектра рассеянного повреждения в диапазоне многоциклового нагружения проявляет свойство временного ряда сохранять знак приращения последующим членом ряда знака предыдущего. Это характеризует данный тип временного ряда как персистентный, соответствующий накоплению микропластических деформаций по мере нагружения материала.

Методы определения циклической долговечности элементов металлоконструкций, основанные на моделях сопротивления усталостному разрушению, используют интегральную оценку эволюции пластических свойств [1, 10]. Критерием состояния поврежденности является величина накопленной неупругой деформации, определяемая параметрами петли гистерезиса. Предельной величине этого параметра соответствует некоторая критическая плотность микропластических дефектов, возникших в результате циклического деформирования.

Для гетерогенных материалов процесс повреждаемости характеризуется направленной эволюцией дискретной структуры материала, которая имеет критическое развитие на стадии, предшествующей разрушению металлоконструкции. Состояние поврежденности может быть представлено как образовавшееся в процессе своего естественного формирования [11–13]. При этом структура последовательно проходит ряд стадий рассеянного повреждения, каждая из которых действует до исчерпания способности материала сопротивляться разрушению. Сформированная под действием длитель-

ного нагружения структура, на заключительной стадии рассеянного разрушения приобретает особенности предельного состояния, характерные для состояния, которое предшествует локальному разрушению материала. Представленные во времени закономерности изменения упругопластических свойств описываются временным рядом со случайным характером изменения параметра интенсивности персистентного процесса.

В работе [14] исследован процесс необратимого деформирования во времени и установлено, что фрактальная размерность накопленных дискретных деформаций металла характеризует кинетику процесса разрушения. В конечной стадии этого процесса максимальная размерность фрактального ряда соответствует накопленной поврежденности в предельном состоянии рассеянного разрушения. Выбор параметра накопленного размаха амплитуд, для построения диаграммы пространственного профиля распределения микропластических деформаций, обусловлен его высокой структурной чувствительностью к циклическим нагрузкам вследствие применения алгоритма аддитивного формирования структуры данной функции.

Предварительные исследования накопленного размаха амплитуд неупругих деформаций в области линейного участка диаграммы нагружения выявили корреляционную связь предельных значений фрактальной размерности характеристик микродеформаций поверхности квазистатически нагруженного образца с аналогичными при циклическом деформировании [15]. Сравнение проведено в результате количественной оценки параметра накопленного размаха  $R/S$ .

На базе экспериментальных результатов, полученных сканированием профиля поверхности образцов, найдены амплитудные характеристики деформирования локальных объемов материала в зоне сканирования. Амплитудный спектр сканирования, соответствующий состоянию деформационных дефектов поверхности, представлен на рис. 4. Диаграммы представляют временные ряды электрических аналогов амплитуд неупругих деформаций в локальных зонах поверхности образца материала при последовательном нагружении серией циклов растяжения–сжатия.

Спектр на рис. 4, б представляет генеральную совокупность результатов, определенных по методу нормированного размаха. Он объединяет результаты 150 последовательных измерений неупругих деформаций, развившихся в подповерхностном слое материала образца с монотонным возрастанием интенсивности степени рассеянной поврежденности в процессе многоциклового нагружения. Для систематизации данных, в виде генеральной совокупности ансамбля членов временного ряда персистентного типа, использован алгоритм суммирования отклонений от среднего значения ампли-

туды спектра, в соответствии с которым амплитуда каждого дискретного элемента спектра превышает амплитуду предыдущего элемента на разность амплитуд среднего значения данной выборки и предыдущего дискретного элемента. Генеральная совокупность данных на рис. 4, б представлена в виде кинетической диаграммы неупругих изменений во времени. Диаграмма характеризует изменение параметра Херста  $H$  поверхностного слоя образца при циклическом нагружении на базе  $10^7$  циклов.

При деформировании стержневого образца материала монотонным растяжением предельное состояние металла достигается за определенное время при возрастающем напряжении. При периодическом нагружении до разрушения ресурс образца определяется асимметрией цикла нагрузки, длительностью и скоростью нагружения, а также превышением максимальной амплитуды цикла предела микротекучести, вследствие чего рассеянная поврежденность материала в локальных зонах достигает необратимых изменений. Представленные в работе [16] данные позволили сопоставить параметры накопленной поврежденности при статическом и динамическом нагружении. Показано (рис. 5), что максимальные значения параметра накопленной поврежденности достигают идентичной для обоих видов нагружения величины, что соответствует предельному состоянию поврежденности, определенному по критерию неупругости.

Предложенный подход к анализу характеристик рассеянной поврежденности на основе локальных свойств неупругости конструкционных материалов сохраняет преимущества прямых методов исследования сопротивления усталости материала лабораторных образцов и создает новые возможности при определении текущего со-

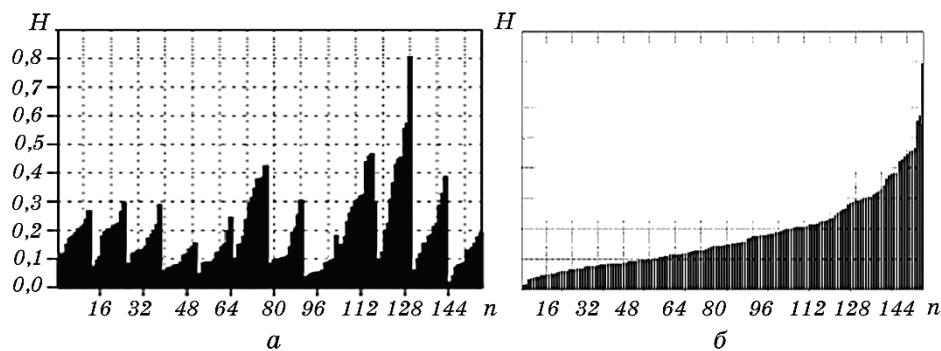


Рис. 4. Амплитудные спектры деформационных дефектов образца стали SAE321 до (а) и после (б) систематизации.

Fig. 4. Amplitude spectra of deformation defects of sample of steel SAE321 before (a) and after (b) systematization.

стояния элемента конструкции. Данный статистический подход обеспечивает достоверную реализацию локального определения экспериментальной характеристики неупругости с разрешением по площади поверхности, сопоставимой с размером зоны локализации усталостного разрушения при упруго-пластическом деформировании.

На основе вышеизложенного можно предположить, что свойства материала изменяются идентично, что может быть представлено характеристиками деформационных дефектов, интегрально определяющих меру рассеянного повреждения до зарождения макротрешины на границе необратимых повреждений обобщенной диаграммы усталости. Экспериментально показано, что характеристики дискретной неупругости достигают идентичных значений предельной величины, которая не зависит от истории нагружения. На рис. 6 показана схема соответствия шкал экспериментальных значений предельных параметров накопленного повреждения при разной интенсивности исходной поврежденности и уровнях амплитуд циклических напряжений характеристики усталости. Точки пересечения характеристик накопленной за время  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  нелокализованной поврежденности с горизонтальной линией предельных значений параметра  $H = 0,8$  перед разрушением соответствуют времени нагружения до разрушения, с учетом линии Френча (количества циклов на шкале диаграммы усталости).

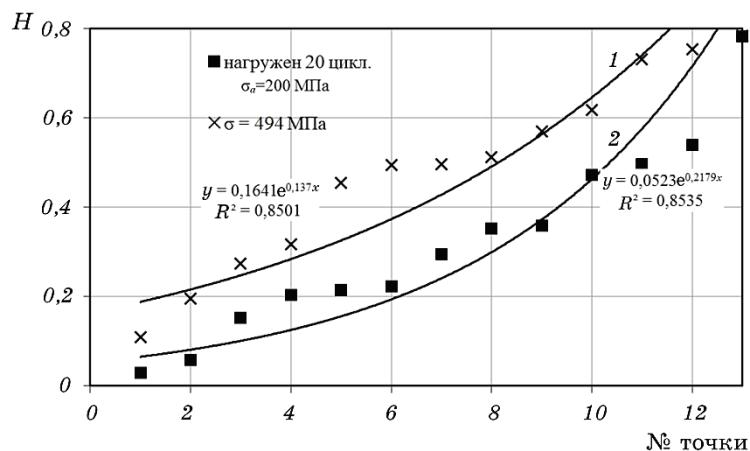
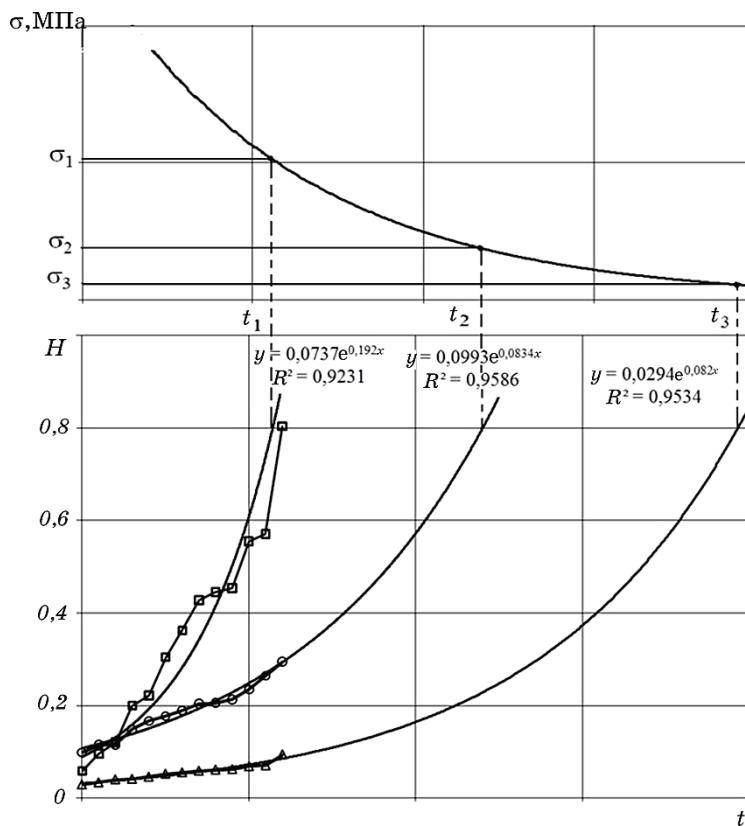


Рис. 5. Влияние монотонного растяжения и периодического растяжения–сжатия на параметр  $H$  ( $y$  — функция аппроксимации,  $R^2$  — коэффициент корреляции).

Fig. 5. The influence of monotonic stretching and periodic stretching-compression on the parameter  $H$  ( $y$ —approximation function,  $R^2$ —correlation coefficient).



**Рис. 6.** Схема соответствия шкалы циклических напряжений  $\sigma$  предельным значениям параметра рассеянного разрушения ( $1 - \sigma_1$ ,  $2 - \sigma_2$ ,  $3 - \sigma_3$ ) в диапазоне времени  $t$  циклического деформирования образцов из стали SAE321.

**Fig. 6.** Scheme of correspondence of the scale of cyclic stresses  $\sigma$  to the limiting values of the parameter of scattered fracture ( $1 - \sigma_1$ ,  $2 - \sigma_2$ ,  $3 - \sigma_3$ ) in the range  $t$  of cyclic deformation time of samples from steel SAE321.

#### 4. ВЫВОДЫ

Получены экспериментально-расчетные характеристики амплитудных значений рассеянной поврежденности конструкционных материалов разных типов по критерию дискретной неупругости материала поверхностного слоя.

Выявлено подобие закономерностей эволюции дискретной неупругости аустенитной стали X18H10T и легких сплавов в диапазоне многоциклового нагружения.

Определены закономерности влияния циклического деформиро-

вания на диссипативные свойства металлического поликристалла, которые проявляются в нелинейной зависимости роста параметра накопленной поврежденности, величина которого определяется параметром Херста, а предельное его значение характеризует исчерпание пластических свойств материала в локальной зоне при переходе к стадии разрушения.

Экспериментально определено, что значение параметра накопленной поврежденности, пороговое для стадии рассеянного разрушения, соответствует отношению амплитуд накопленной во времени поврежденности к амплитуде дисперсии распределения дискретной неупругости материала поверхностного слоя, которая определяется по величине сдвига фазы между деформацией и напряжением в локальной зоне.

Установлено, что пороговое значение параметра Херста, выраженное величиной с постоянным значением коэффициента  $H = 0,8$ , не зависит от истории, амплитуды и скорости нагружения, что может найти применение для оценки остаточного ресурса или прогнозирования долговечности при неоднородном распределении спектра нагрузки.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева, *Усталость металлов* (Москва: Наука: 2015).
2. А. И. Гневко, *MiTOM*, № 4: 3 (2008).
3. В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза, *Механика рассеянного усталостного повреждения металлов и сплавов* (Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины: 2016).
4. В. Г. Бурдуковский, И. С. Каманцев, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 75, № 7: 36 (2009).
5. В. С. Иванова, *Синергетика и фракталы в материаловедении* (Москва: Наука: 1994).
6. В. С. Иванова, *MiTOM*, № 9: 12 (2006).
7. В. Е. Панин, Т. Ф. Елсукова, А. В. Панин, О. Ю. Кузина, П. В. Кузнецов, *Физическая мезомеханика*, 7, № 2: 5 (2004).
8. Т. Ю. Яковleva, *Локальная пластическая деформация и усталость металлов* (Киев: Наукова думка: 2003).
9. А. Н. Майло, *Проблемы прочности*, № 3: 124 (2009).
10. В. Т. Трощенко, *Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии* (Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины: 2011).
11. Л. В. Кукса, А. В. Черепенников, *Известия ВолгГТУ*, 2, № 10: 118 (2008).
12. В. И. Данилов, Л. Б. Зуев, *Успехи физики металлов*, 9, № 4: 371 (2008).
13. E. A. Alfyorova and D. V. Lychagin, *Mechanics of Materials*, 117: 202 (2018).
14. В. П. Селяев, Т. А. Низина, А. С. Балыков, Д. Р. Низин, А. В. Балбалин, *Вестник ПНИПУ. Механика*, № 1: 129 (2018).
15. Г. Г. Писаренко, А. Н. Майло, *Пробл. прочности*, № 2: 167 (2016).

16. Г. Г. Писаренко, О. В. Войналович, А. Н. Майло, *Праці Міжнародної науково-технічної конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (19–22 вересня, 2017, Тернопіль)* (Тернопіль: 2017), с. 38.

## REFERENCES

1. V. F. Terentev and S. A. Koraleva, *Ustalost Metallov* [Fatigue Materials] (Moscow: Nauka: 2015) (in Russian).
2. A. Y. Hnevko, *MiTOM*, No. 4: 3 (2008) (in Russian).
3. V. T. Troshchenko and L. A. Khamaza, *Mekhanika Rasseiannoho Ustalostnoho Povrezhdeniya Metallov i Splavov* [Mechanics of Scattered Fatigue Damage to Metals and Alloys] (Kiev: G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength: 2016) (in Russian).
4. V. H. Burdukovskyi and Y. S. Kamantsev, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 75, No. 7: 36 (2009) (in Russian).
5. V. S. Ivanova, *Sinergetika i Fraktaly v Materialovedenii* [Synergetics and Fractals in Materials Science] (Moscow: Nauka: 1994) (in Russian).
6. V. S. Yvanova, *MiTOM*, No. 9: 12 (2006) (in Russian).
7. V. E. Panin, T. F. Elsukova, A. V. Panin, O. Yu. Kuzina, and P. V. Kuznetsov, *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 7, No. 2: 5 (2004) (in Russian).
8. T. Yu. Yakovleva, *Lokal'naya Plasticheskaya Deformatsiya i Ustalost Metallov* [Local Plastic Deformation and Metal Fatigue] (Kyiv: Naukova Dumka: 2003) (in Russian).
9. A. N. Mailo, *Problemy Prochnosti*, No. 3: 124 (2009) (in Russian).
10. V. T. Troshchenko, *Ustalost' Metallov pri Neodnorodnom Napryazhennom Sostoyanii* [Fatigue of Metals in Non-uniform Stress State] (Kyiv: G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength: 2011) (in Russian).
11. L. V. Kuksa and A. V. Cherepennykov, *Izvestiya VolhHTU*, 2, No. 10: 118 (2008) (in Russian).
12. V. I. Danilov and L. B. Zuev, *Usp. Fiz. Met.*, 9, No. 4: 371 (2008) (in Russian).
13. E. A. Alfyorova and D. V. Lychagin, *Mechanics of Materials*, 117: 202 (2018).
14. V. P. Seliaev, T. A. Nyzyna, A. S. Balykov, D. R. Nyzyn, and A. V. Balbalyn, *PNRPU Mechanics Bulletin*, No. 1: 129 (2016) (in Russian).
15. G. G. Pysarenko and A. N. Mailo, *Problemy Prochnosti*, No. 2: 167 (2016) (in Russian).
16. G. G. Pysarenko, O. V. Voinalovich, and A. N. Mailo, *Pratsi Mizhnarodnoyi Naukovo-Tekhnichnoyi Konferentsii ‘Poshkodzhennya Materialiv pid Chas Ekspluatatsii, Metody Yoho Dianostuvannya i Prohnozuvannya’ (September 19–22, 2017, Ternopil)* (Ternopil: 2017), p. 38.