

## Исследование накопления усталостных повреждений в сталях с применением Фурье-преобразования изображения структуры

А. В. Бялонович, Л. Е. Матохнюк

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

*Проведены исследования сопротивления усталости сталей 45 и X18H10T и изменений структуры в процессе циклического нагружения. Накопление усталостных повреждений оценивали путем статистической обработки изображений микроструктуры. В качестве параметра, характеризующего состояние материала, использовали значение эксцентриситета эллипса Фурье-преобразования микроструктуры, в качестве количественной характеристики изменений структуры материала при циклическом нагружении – коэффициент поврежденности, являющийся интегральным и инвариантным к амплитуде циклического нагружения и асимметрии циклов. В состоянии, предшествующем усталостному разрушению, коэффициент поврежденности материала принимает конкретное значение вне зависимости от амплитуды напряжений и асимметрии цикла и может служить критерием разрушения при циклическом нагружении.*

**Ключевые слова:** сопротивление усталости, циклы нагружения, асимметрия циклов, микроструктура, коэффициент поврежденности материала.

**Введение.** Прогнозирование остаточной долговечности металлических материалов, ответственных за сохранение прочности, работоспособности и безопасности большинства машин, является актуальной задачей. Поэтому диагностирование состояния материала, находящегося под воздействием циклической нагрузки, необходимо проводить в различных областях техники для решения вопросов продления ресурса работы изделия. Особенно это важно в случаях, когда выход из строя оборудования, как и его преждевременная замена, сопряжены с существенными затратами. Известно большое количество методов неразрушающего контроля, часть из которых основана на анализе физических свойств исключительно поверхностного слоя материала. Это связано с тем, что зарождение и развитие усталостной трещины, как правило, происходит в приповерхностном слое материала. Анализ структуры материала, находящегося под воздействием циклической нагрузки, посвящены многочисленные работы. Тем не менее полученные выводы носят, главным образом, описательно качественный характер. Возможность судить о механизмах накопления повреждений и разрушения материала свидетельствует о преимуществе такого подхода. Однако, чтобы оценить состояние материала после определенного числа циклов нагружения, необходимо располагать количественной характеристикой, которая однозначно отражала бы накопление усталостных повреждений.

Особенностью эволюции структурного состояния металлических материалов при воздействии циклических нагрузок является его длительный период и неомогенный характер. Вид материала и условия циклического нагружения существенно влияют на размер и локализацию зон структурных изменений [1]. Эти зоны расположены на фоне практически неизменной

структуры, а их размер в основном объеме материала не превышает нескольких десятков микрон [2, 3]. Поэтому вклад таких зон со значительными изменениями в картину структурного состояния материала невелик. Однако с увеличением мощностей вычислительной техники и развитием технологии цифровой фотографии анализ изображений все шире стал применяться в различных областях техники. Изучению процессов усталостного повреждения также уделяется должное внимание. Так, использование различных алгоритмов обработки цифровых снимков нашло отражение в области исследования дислокационной структуры [4], фрактографического анализа [5], исследования полос скольжения [6].

**Методика исследования.** Исследование структурных изменений при воздействии циклических нагрузок проводили на образцах из сталей 45 и X18H10T. Образцы из стали 45 точили из прутка и фрезеровали рабочую часть (рис. 1). Образцы из стали X18H10T вырезали из листа толщиной 3 мм. Поверхности рабочей части образцов полировали и травили до выявления микроструктуры. Перед началом усталостных испытаний на оптическом микроскопе выполняли снимки структуры рабочей части образцов, которые являлись исходными ее изображениями. Усталостные испытания проводили с частотой нагружения 120 Гц.

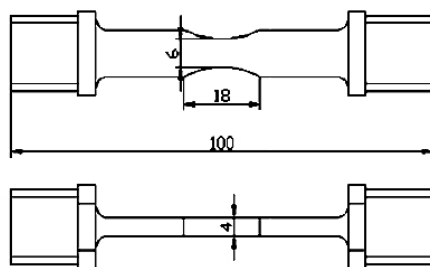


Рис. 1. Образец из стали 45 для испытаний на усталость.

Образцы из стали 45 испытывали при трех различных значениях коэффициента асимметрии цикла ( $R = -1$ ; 0 и 0,5) при комнатной температуре, образцы из стали X18H10T – при  $R = 0$  и 0,5 в условиях комнатной температуры и  $R = 0$  при температуре 300°C.

Результаты испытаний представлены на рис. 2 и 3. Для их аппроксимации использовали уравнение кривой усталости [1]:

$$\sigma_a = \sigma_0 + c/\sqrt{N}, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$  – амплитудное значение напряжений;  $\sigma_0$  – предел выносливости на неограниченной базе;  $N$  – число циклов до разрушения;  $c$  – параметр, зависящий от частоты нагружения. Из рис. 2, 3 видно, что это уравнение хорошо описывает результаты экспериментального определения долговечности образцов.

В процессе усталостных испытаний, после определенного числа циклов нагружения, образец снимали и фотографировали его микроструктуру.

Микроструктуру материала исследовали при увеличениях 50, 100, 200 и 500. На основании полученных изображений выбирали оптимальное увеличение, при котором объем информации наибольший. Для стали 45 оно равно 50, для стали X18H10T – 100. Далее структуру материала рассматривали при таких же увеличениях.

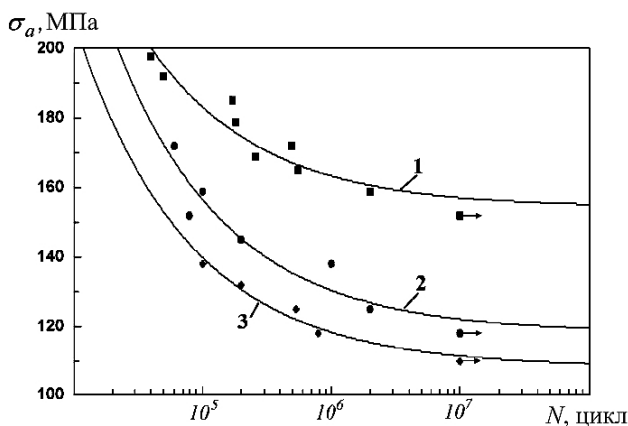


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний образцов из стали 45 при значениях  $R$ , равных  $-1$  (1),  $0$  (2) и  $0,5$  (3).

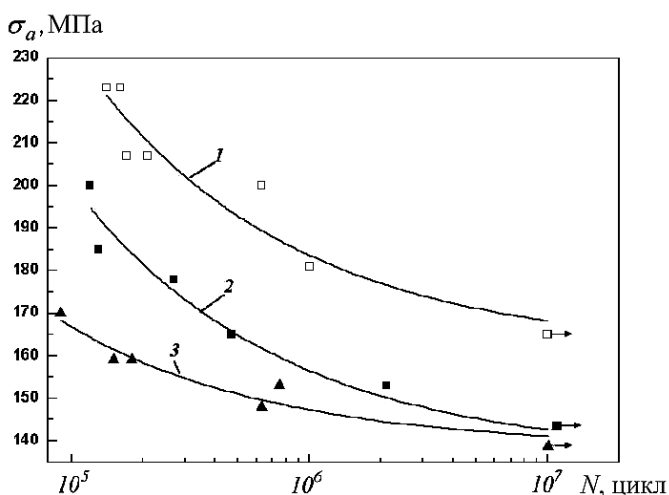


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний образцов из стали X18H10T при различных значениях  $R$  и  $T$ : 1 –  $R = 0, T = 20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $R = 0,5, T = 20^\circ\text{C}$ ; 3 –  $R = 0, T = 300^\circ\text{C}$ .

**Методика обработки изображения структуры.** Для количественной характеристики в теории обработки цифровых изображений применяют так называемые дескрипторы областей [7]. К ним относятся: статистические, характеризующие среднюю яркость, контраст, величину энтропии изображения и т.д.; инвариантные, величина которых не зависит от таких параметров, как изменение масштаба, поворот, трансляция изображения, и получаемые на основании двумерного Фурье-преобразования. Предварительно проведенные исследования показывают, что для изучения эволюции структуры наиболее подходят дескрипторы на основании двумерного Фурье-преобразования.

Применение Фурье-преобразования для описания текстуры изображения обусловлено тем, что оно идеально подходит для описания направленности присутствующих в изображении периодических или квазипериодических двумерных структур [8]. Эти глобальные текстурные образы легко различимы на спектре в виде импульсов с высокой энергией, однако их весьма непросто обнаружить с помощью пространственных методов обработки, которые являются локальными по своей природе.

При переходе к полярным координатам, в которых спектральную функцию представляют в виде  $S(r, \Theta)$ , где  $r$ ,  $\Theta$  – переменные этой системы координат, как правило, и выявляются спектральные признаки. Для каждого угла  $\Theta$  функцию  $S(r, \Theta)$  можно рассматривать как одномерную функцию  $S_{\Theta}(r)$ . Аналогично для каждого значения частоты  $r$  величина  $S_r(\Theta)$  является одномерной функцией. Анализ функции  $S_{\Theta}(r)$  при фиксированном  $\Theta$  позволяет получить характер поведения спектра по направлению радиуса из начала координат, а функции  $S_r(\Theta)$  при фиксированном  $r$  – вдоль окружности с центром в начале координат.

Для получения параметра, однозначно отражающего накопление усталостных повреждений, применяют метод формирования вектора количественных характеристик изображения. В качестве основного критерия используют монотонность роста характеристики изображения при накоплении усталостных повреждений. Проверка выбранного метода показывает монотонность роста только параметра, основанного на двумерном Фурье-преобразовании.

Для определения интегральной характеристики направленности периодической либо квазипериодической структуры на основании полученной двумерной матрицы коэффициентов Фурье-преобразования рассчитывают эксцентриситет эллипса, вторые моменты которого совпадают со вторыми моментами матрицы коэффициентов Фурье.

Для определения эксцентриситета в первую очередь вычисляют моменты первого порядка, которые являются координатами центра масс:

$$X_0 = \frac{\sum \sum f(x, y)x}{\sum \sum f(x, y)}; \quad Y_0 = \frac{\sum \sum f(x, y)y}{\sum \sum f(x, y)},$$

где  $f(x, y)$  – значение коэффициента Фурье в матрице ( $x$  – строка,  $y$  – столбец).

Суммирование проводят по всем строкам и столбцам матрицы. Затем вычисляют моменты второго порядка:

$$m_{20} = \sum \sum f(x, y)(x - X_0)^2;$$

$$m_{02} = \sum \sum f(x, y)(y - Y_0)^2;$$

$$m_{11} = \sum \sum f(x, y)(x - X_0)(y - Y_0).$$

На основании полученных данных находят эксцентриситет эллипса – отношение между меньшей и большей полуосями, который и свидетельствует о мере анизотропии структуры:

$$e = \frac{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}. \quad (2)$$

Если изображение не имеет направленных структур, значение эксцентриситета несущественно отличается от единицы. При увеличении количества периодических либо квазипериодических структур с совпадающим направлением значение эксцентриситета уменьшается и в пределе стремится к нулю. Одной из особенностей такой характеристики изображения является ее инвариантность к повороту [9]. Величину  $e$  можно рассматривать как параметр, характеризующий Фурье-образ цифрового изображения структуры материала. Учитывая, что вследствие накопления усталостных повреждений структура материала может изменяться, с его помощью можно количественно определить ее текущее состояние [10].

**Результаты исследования изменения структуры.** На рис. 4 и 5 приведена структура стали 45 соответственно в исходном состоянии и после наработки 90% долговечности. Изображения структуры материала в исходном состоянии, как правило, не имеют ярко выраженных по форме и упорядоченности элементов. Повышенное значение энергии спектра в направлениях 90 и 270° обусловлено некоторой упорядоченностью структуры после прокатки. На рис. 5,а визуально видно изменение структуры материала в результате циклического нагружения, однако однозначно ответить, какова мера поврежденности, не представляется возможным. Из рассмотрения диаграммы распределения коэффициентов Фурье (рис. 5,б) следует, что на фоне исходной направленности структуры появляется новая анизотропия, которая характеризует поврежденность материала в результате воздействия циклической нагрузки.

По соотношению (2) рассчитывали параметр  $e$ , характеризующий Фурье-образ цифрового изображения структуры материала. Об изменении структуры материала судили по разности между значениями коэффициента в исходном состоянии материала  $e_{исх}$  и в процессе циклического нагружения  $e$ . В качестве примера на рис. 6 приведено изменение  $e_{исх} - e$  в зависимости от числа циклов нагружения стали 45 при различных значениях амплитуды напряжений (отнулевой цикл). Видно, что при более низких амплитудах напряжений наблюдаемые изменения меньше, чем при высоких. Это объясняется тем, что при более низких амплитудах напряжений число локальных мест развивающейся микропластической деформации, где возможно появление начальной трещины, меньше [1], что отражается на степени изменения  $e_{исх} - e$ . Разрушение образцов происходит также при более низких значениях указанного параметра. Следует отметить, что изменение параметра  $e_{исх} - e$  происходит монотонно, т.е. накопление усталостных повреждений наблюдается постоянно в течение всего процесса нагружения образцов, без стабилизации структуры.

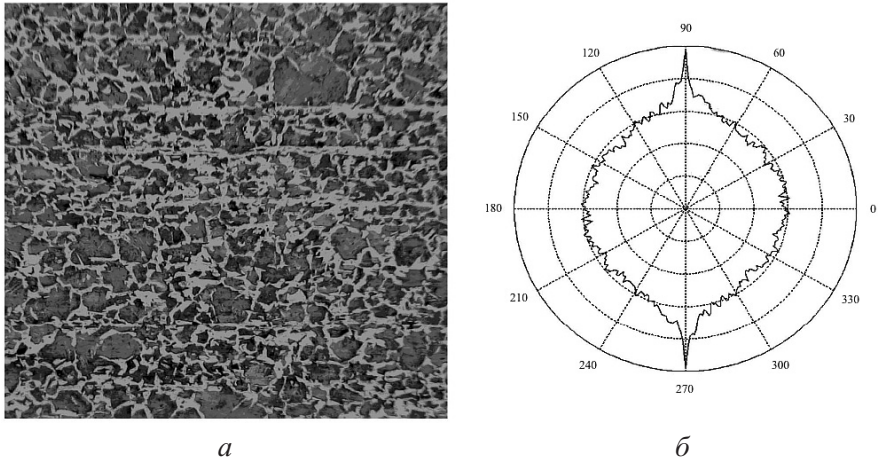


Рис. 4. Исходная структура стали 45 (а) и результаты обработки ее изображения – диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлениям (б).

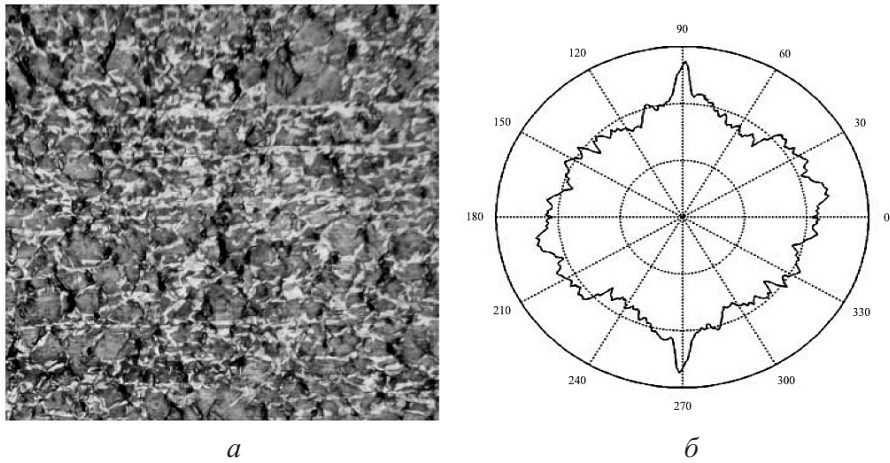


Рис. 5. Структура стали 45 после наработки 90% числа циклов до разрушения (а) и диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлениям (б).

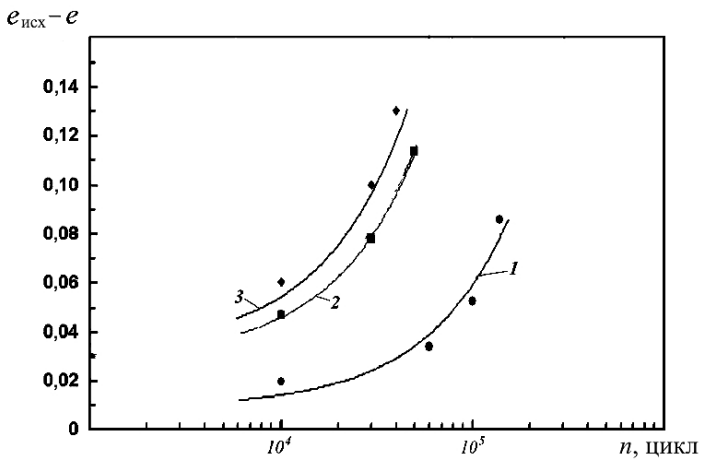


Рис. 6. Зависимость приращения параметра Фурье-преобразования структуры стали 45 от числа циклов нагружения ( $R = 0$ ): 1 –  $\sigma_a = 145$  МПа; 2 –  $\sigma_a = 159$  МПа; 3 –  $\sigma_a = 172$  МПа.

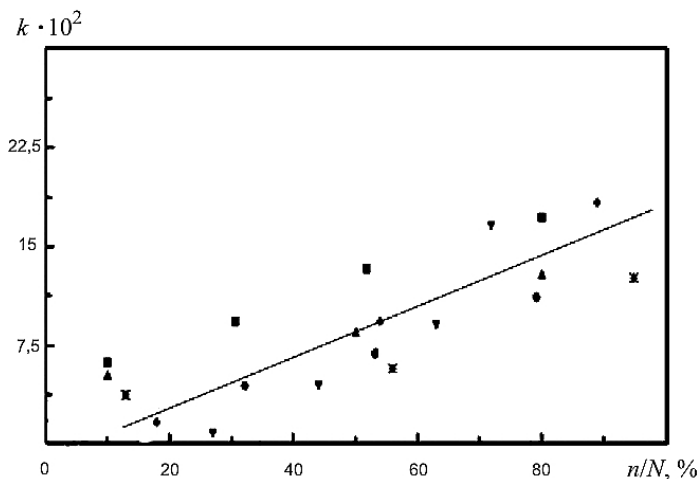


Рис. 7. Зависимость коэффициента поврежденности стали 45 от относительной долговечности:  $\blacklozenge$  –  $\sigma_a = 192$  МПа,  $R = -1$ ;  $\blacktriangledown$  –  $\sigma_a = 165$  МПа,  $R = -1$ ;  $\bullet$  –  $\sigma_a = 145$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacksquare$  –  $\sigma_a = 159$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacktriangle$  –  $\sigma_a = 172$  МПа,  $R = 0$ ;  $*$  –  $\sigma_a = 118$  МПа,  $R = 0,5$ .

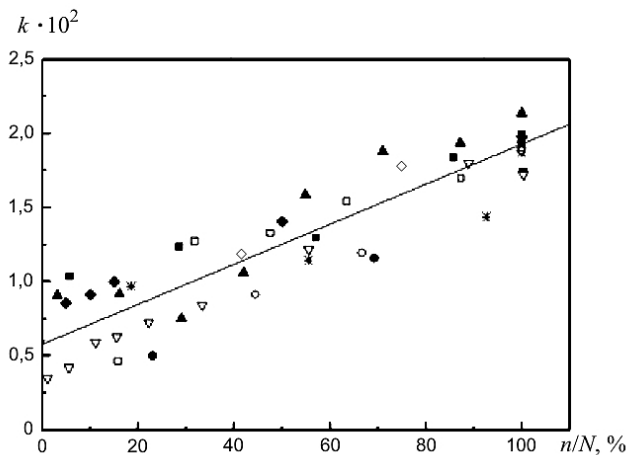


Рис. 8. Зависимость коэффициента поврежденности стали X18H10T от относительной долговечности ( $T = 20^\circ\text{C}$ ):  $\blacksquare$  –  $\sigma_a = 223$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacktriangle$  –  $\sigma_a = 210$  МПа,  $R = 0$ ;  $\square$  –  $\sigma_a = 200$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacktriangledown$  –  $\sigma_a = 180$  МПа,  $R = 0,5$ ;  $\blacklozenge$  –  $\sigma_a = 153$  МПа,  $R = 0,5$ ;  $*$  –  $\sigma_a = 178$  МПа,  $R = 0,5$ ;  $\bullet$  –  $\sigma_a = 185$  МПа,  $R = 0,5$ ;  $\circ$  –  $\sigma_a = 165$  МПа,  $R = 0,5$ ;  $\diamond$  –  $\sigma_a = 200$  МПа,  $R = 0,5$ .

Если в качестве характеристики поврежденности материала использовать величину

$$k = \frac{e_{\text{исх}} - e}{\sigma_{\text{max}}} \sigma_{0,2}, \tag{3}$$

где  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение цикла;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала, то картина существенно изменится.

На рис. 7–9 приведено изменение коэффициента  $k$  в зависимости от накопленного числа циклов нагружения  $n$ , отнесенного к числу циклов до разрушения образца  $N$ . Видно, что параметр  $k$  изменяется монотонно и

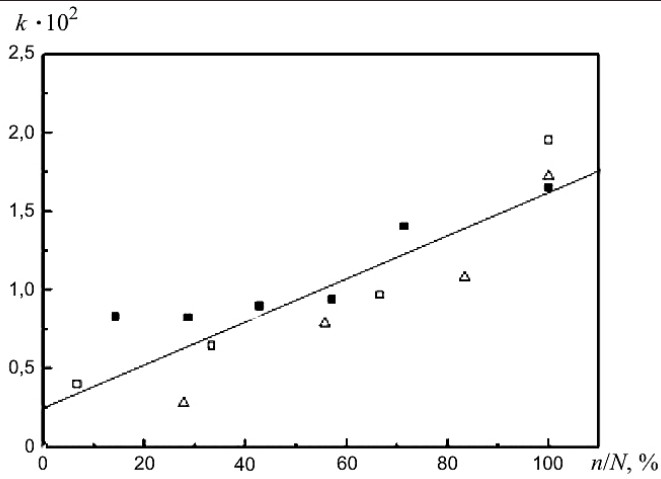
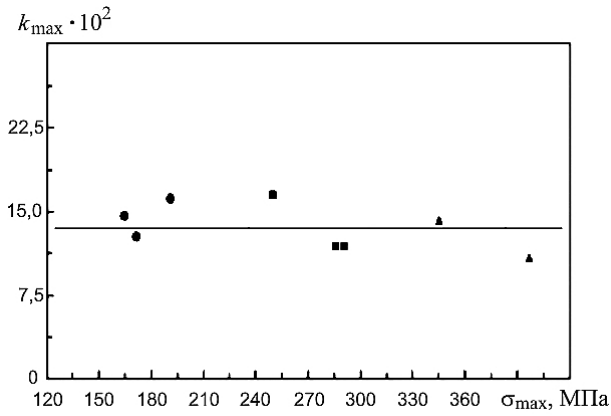
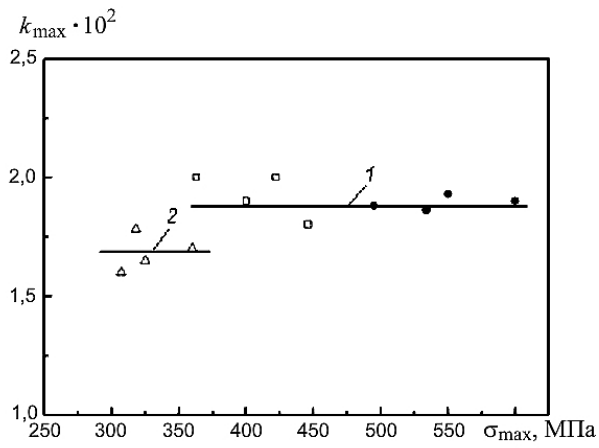


Рис. 9. Зависимость коэффициента поврежденности стали X18H10T от относительной долговечности ( $T = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 0$ ): ■ –  $\sigma_a = 154$  МПа; □ –  $\sigma_a = 160$  МПа; △ –  $\sigma_a = 170$  МПа.



a



б

Рис. 10. Зависимость граничного значения  $k_{\max}$  от максимального напряжения цикла для сталей 45 (a) и X18H10T (б): 1 –  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T = 300^{\circ}\text{C}$ .



достигает определенной величины к моменту появления усталостной трещины. Поскольку для каждого материала при данной температуре он подчиняется единой закономерности с некоторым разбросом экспериментальных значений, вне зависимости от амплитуды приложенной нагрузки и коэффициента асимметрии цикла, его можно считать коэффициентом, характеризующим поврежденность материала при циклическом нагружении (коэффициент поврежденности материала).

Зависимость коэффициента поврежденности исследуемых сталей от максимального напряжения цикла в момент, когда до появления макротрещины остается 10% долговечности ( $k_{\max}$ ) иллюстрирует рис. 10. Из приведенных данных следует, что значение коэффициента поврежденности  $k_{\max}$  характеризует состояние структуры материала непосредственно перед разрушением вне зависимости от вида нагружения. В связи с этим параметр  $k_{\max}$  можно рассматривать как структурный критерий разрушения материала при воздействии циклических нагрузок.

## Выводы

1. Предложена процедура исследования накопления усталостных повреждений в металлическом материале путем статистической обработки изображения микроструктуры материала в процессе циклического нагружения. В качестве характеристики состояния материала использовали значение эксцентриситета эллипса Фурье-преобразования изображения микроструктуры материала.

2. Показано, что интегральная интенсивность эволюции структуры снижается с уменьшением амплитуды напряжений. Это обусловлено уменьшением количества микрообластей с развивающимися микропластическими деформациями, приводящими к усталостному разрушению.

3. Получена характеристика структуры материала, названная коэффициентом поврежденности материала, которая однозначно характеризует эволюцию структуры в связи с накоплением усталостных повреждений. Эта характеристика является интегральной и инвариантной к асимметрии циклов и величине амплитуды напряжений при определенной температуре испытаний. В состоянии, предшествующем усталостному разрушению, коэффициент поврежденности материала принимает конкретное значение вне зависимости от амплитуды напряжений и асимметрии цикла и может служить критерием разрушения при циклическом нагружении.

## Резюме

Проведено дослідження опору втомі сталей 45 і X18H10T та зміни структури в процесі циклічного навантаження. Накопичення пошкоджень від утомленості оцінювали шляхом статистичної обробки зображень микроструктури. За параметр, що характеризує стан матеріалу, брали значення ексцентриситету еліпса Фур'є-перетворення, за кількісну характеристику зміни структури матеріалу за умови циклічного навантаження – коефіцієнт пошкоженості, який є інтегральним і інваріантним до амплітуди циклічного навантаження й

асиметрії циклів. У стані, що передує втомному руйнуванню, коефіцієнт пошкоженості матеріалу приймає конкретне значення поза залежності від амплітуди напружень й асиметрії циклу і може слугувати критерієм руйнування за циклічного навантаження.

1. Яковлева Т. Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 235 с.
2. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов / Под ред. С. Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
3. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
4. Mayata T., Sasaki K., and Kuroda M. Quantitative evaluations for strain amplitude dependent organization of dislocation structures due to cyclic plasticity in austenitic stainless steel 316L // *Acta Mater.* – 2008. – **56**, No. 12. – P. 2735 – 2743.
5. Sozanska M., Iacoviello F., Cwajna J., et al. Quantitative analysis of fatigue fracture surface in the duplex steel // *Image Anal. Stereol.* – 2002. – **21**, Issue 1. – P. 55 – 59.
6. Herasymchuk O. M. Nonlinear relationship between the fatigue limit and quantitative parameters of material microstructure // *Int. J. Fatigue.* – 2011. – **33**, Issue 4. – P. 649 – 659.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. Holota R. and Nemecek S. Recognition of oriented structures by 2D Fourier transform // J. Pinker (Ed.), *Applied Electronics.* – Pilsen: University of West Bohemia, 2002. – P. 88 – 92.
9. Zhang J. and Tan T. New texture signatures and their use in rotation invariant texture classification // *Proc. of Texture 2002 (The 2nd Int. Workshop on Texture Analysis and Synthesis with ECCV 2002).* – P. 157 – 162.
10. Бялонович А. В. Количественный анализ изменений структуры материала при воздействии циклической нагрузки // *Надежность и долговечность машин и сооружений.* – 2010. – Вып. 33. – С. 239 – 247.

Поступила 08. 04. 2011