

## ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 45 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

*Проведены исследования сопротивления усталости стали 45 при симметричных и асимметричных циклах нагружения 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 его микроструктуры.*

*Для количественной характеристики изменений структуры материала при циклическом нагружении предложен коэффициент поврежденности. Эта характеристика является интегральной и инвариантной к амплитуде циклической нагрузки и асимметрии циклов. В состоянии, предшествующем усталостному разрушению, коэффициент поврежденности принимает определенное значение вне зависимости от параметров нагрузки и может являться критерием усталостного разрушения.*

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

Диагностирование состояния материала, находящегося под воздействием циклической нагрузки, является одной из актуальных задач в различных областях техники. Особенно важно решение данного вопроса в случаях, когда выход из строя оборудования, как и его преждевременная замена, сопряжены с существенными затратами. В связи с этим применяется большое количество методов неразрушающего контроля, часть которых основана на анализе физических свойств исключительно поверхностного слоя материала. Это связано с тем фактом, что зарождение и развитие усталостной трещины, как правило, происходит в приповерхностном слое материала. Одним из методов оценки состояния поверхности является анализ цифровых снимков структуры материала [1]. Анализ эволюции структуры материала, вызванной циклической нагрузкой, связан с решением противоречивой задачи. С одной стороны эволюция структуры материала во время инкубационного периода осуществляется на дислокационном уровне, с другой – отдельно взятая микрообласть не характеризует состояние всего материала. Размер и локализация областей существенных структурных изменений зависит от вида материала и условий циклического нагружения. Однако в любом случае эти области расположены на фоне практически неизменной структуры, а их размер в основном объеме материала на стадии, предшествующей появлению макротрещины, не превышает нескольких десятков микрон [2]. Тем не менее, локальные изменения, вызванные накоплением усталостных повреждений, настолько существенны, что

приводят к изменению интегральных характеристик микроструктуры и могут быть определены методами количественного анализа.

В данной работе предложен метод анализа эволюции структуры материала в условиях циклического нагружения. Задача решается путем распознавания образов цифровых изображений. Решение этой задачи заключается в отыскании таких характеристик изображения, которые дают возможность отнести тот или иной снимок к определенной группе [3]. В связи с этим первостепенной задачей является выявление характеристики изображения структуры материала, чувствительной к увеличению числа циклов нагружения, т.е. однозначно отражающей накопление усталостных повреждений. Также необходимо, чтобы указанная характеристика, являлась интегральной, т.е. характеризовала изображение в целом.

**Методика обработки изображений.** Одним из важных подходов к описанию изображений является количественное представление их текстурных признаков. В цифровой обработке изображений для описания текстуры области применяют три основных подхода: статистический, структурный и спектральный [4]. Статистические методы позволяют охарактеризовать текстуру области как гладкую, грубую, зернистую и т.д. Структурные методы занимаются изучением взаимного положения простейших составляющих изображения. Спектральные методы, основанные на свойствах Фурье-спектра, используются, прежде всего, для обнаружения глобальной периодичности в изображении.

Статистический метод заключается в определении статистических характеристик изображения, которые основаны на гистограмме яркости всего изображения или его области. Для определения статистических характеристик рассчитывают моменты различного порядка  $\mu_n(z)$  по формуле

$$\mu_n(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^n p(z_i), \quad (1)$$

где  $z$  – случайная величина, соответствующая яркости элементов изображения,  $p(z_i)$  – гистограмма случайной величины  $z$ ;  $L$  – число различных уровней яркости;  $n$  – порядок момента;  $m$  – среднее значение  $z$ ,

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i). \quad (2)$$

Моменты различного порядка отражают следующие характеристики изображения:

- момент 1-го порядка, или среднее значение  $z$ , характеризует среднюю яркость изображения;
- момент 2-го порядка, или дисперсия  $z$ , характеризует средний яркостной контраст изображения;
- момент 3-го порядка является характеристикой асимметрии гистограммы;
- момент 4-го порядка характеризует эксцесс, или остроту распределения.

Текстурные характеристики, которые вычисляют только на основании гистограммы, страдают определенной ограниченностью, поскольку не несут никакой информации о взаимном расположении элементов изображения.

Основная идея структурного подхода состоит в том, что из относительно простых базовых элементов текстуры можно формировать более сложные текстурные образы с помощью некоторых правил, ограничивающих возможное взаимное расположение этих базовых элементов.

Применение спектра Фурье для описания текстуры изображения обусловлено тем, что спектр Фурье идеально подходит для описания направленности присутствующих в изображении периодических или квазипериодических двумерных структур [5]. Эти глобальные текстурные образы легко различаются на спектре в виде импульсов с высокой энергией, однако их весьма непросто обнаружить с помощью пространственных методов обработки, которые являются локальными по своей природе.

Обнаружение и интерпретацию спектральных признаков, как правило, производят при переходе к полярным координатам, в которых спектральная функция выражается в виде  $S(r, \Theta)$ , где  $r$  и  $\Theta$  – переменные этой системы координат. Для каждого угла  $\Theta$  функцию  $S(r, \Theta)$  можно рассматривать как одномерную функцию  $S_{\Theta}(r)$ . Аналогично для каждого значения частоты  $r$ ,  $S_r(\Theta)$  является одномерной функцией. Анализ функции  $S_{\Theta}(r)$  при фиксированном  $\Theta$  дает картину поведения спектра по направлению радиуса из начала координат, а исследуя  $S_r(\Theta)$  при фиксированном  $r$ , получаем поведение спектральной функции вдоль окружности с центром в начале координат.

Для определения интегральной характеристики направленности периодичной либо квазипериодичной 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 рассчитывают моменты первого порядка, которые также 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 ведут по всем строкам и столбцам матрицы. Далее находят моменты второго порядка

$$\begin{aligned} m_{20} &= \sum \sum f(x, y)(x - X_0)^2, \\ m_{02} &= \sum \sum f(x, y)(y - Y_0)^2, \\ m_{11} &= \sum \sum f(x, y)(x - X_0)(y - Y_0). \end{aligned}$$

На основании полученных данных находят эксцентриситет эллипса, который отражает отношение между меньшей и большей диагональю и является мерой анизотропии структуры,

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

В случае, когда 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 [6].

Предложены постановки, модели и методы оценки напряженного состояния и ресурса работы для трех различных машиностроительных конструкций, таких как корпус диффузионного аппарата, стальной канат и тигель. Ресурс работы этих конструкций определяется различными деградационными процессами, протекающими в материале в наиболее нагруженных точках конструкций.

**Методика исследований.** Рабочую часть плоских образцов для усталостных испытаний из стали 45 (рис. 1), полировали и травили 2 % раствором азотной кислоты в спирте. Границы контролируемой области рабочей части маркировали со стороны торцевой поверхности специальной краской. До проведения испытаний на оптическом микроскопе делали снимки этой области, которые являлись исходными изображениями структуры. Затем проводили усталостные испытания с частотой 120 Гц. После достижения определенного количества циклов образец снимали и фотографировали контролируемую область. Эту процедуру повторяли до появления магистральной трещины или достижения базы испытаний  $10^7$  циклов. Испытания проводили при трех различных значениях коэффициента асимметрии цикла ( $R = -1; 0$  и  $0.5$ ). Микроструктуру исследовали при увеличениях 50, 100, 200 и 500. На основании полученных изображений рассчитывали статистические показатели (1) и эксцентриситет (2).

**Результаты и обсуждение.** Результаты усталостных испытаний представлены на рис. 2. Для аппроксимации экспериментальных данных использовали уравнение кривой усталости [7]

$$\sigma_a = \sigma_0 + \frac{C}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – предел выносливости на неограниченной базе,  $N$  - число циклов до разрушения,  $C$  – параметр, зависящий от частоты нагружения. Как видно из рисунка, данное уравнение хорошо описывает результаты экспериментального определения долговечности образцов.

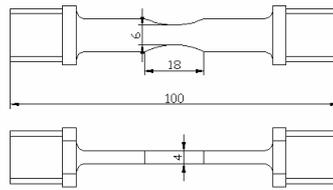


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний.

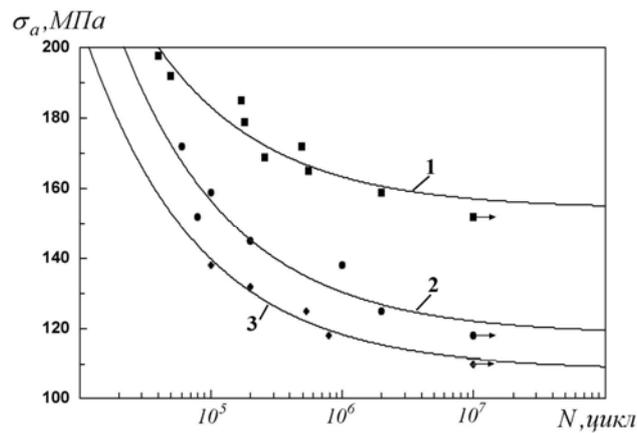


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний с различными значениями коэффициента асимметрии циклов: 1 –  $R = -1$ ; 2 –  $R = 0$ ; 3 –  $R = 0,5$ .

Исходные изображения структуры материала, как правило, не имеют ярко выраженных по форме и упорядоченности элементов. В связи с этим спектральное изображение представляет собой пятно круглой формы, яркость которого экспоненциально падает к периферии (рис. 3). Повышенное значение энергии спектра в направлении  $90^\circ$  и  $270^\circ$  связано с наличием некоторой упорядоченности в структуре, которая вызвана прокаткой.

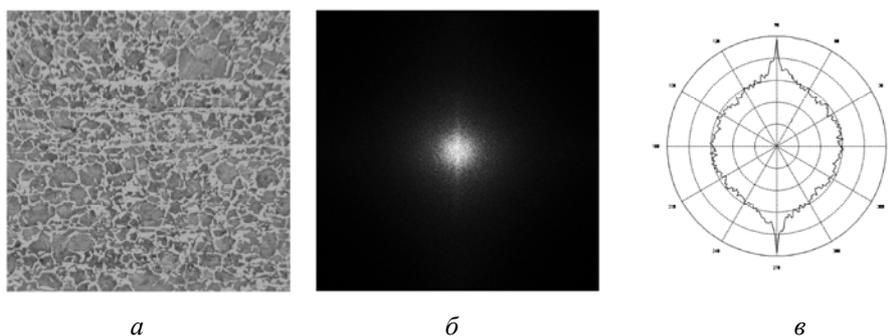


Рис. 3. Исходная структура материала (а) и результаты обработки ее изображения: дифракционная картина (б), диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлениям (в).

Значение коэффициента асимметрии, рассчитанное по формуле (2), оказалось чувствительным к высокочастотным шумам в изображении. Чтобы исключить влияние вышеуказанного фактора, перед расчетом  $e$  матрица коэффициентов Фурье почленно перемножалась с матрицей идеального низкочастотного фильтра.

На рис. 4 изображена структура материала, наработка которой составляет 90% долговечности. На рис. 4, *а* визуально видно некоторое изменение структуры материала в результате циклического нагружения, однако дать однозначный ответ о мере поврежденности не представляется возможным. При рассмотрении диаграммы распределения коэффициентов Фурье (рис. 4, *в*) видно, что на фоне исходной направленности структуры появляется новая анизотропия, которая характеризует циклическую поврежденность материала.

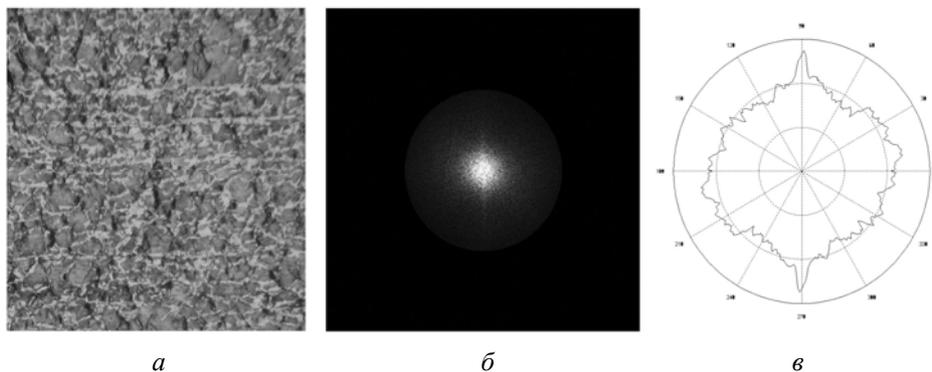


Рис. 4. Структура материала после наработки 90 % циклов до разрушения: *а* – структура материала, *б* – дифракционная картина, *в* – диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлению.

Используя формулы (1) и (2), были рассчитаны коэффициенты асимметрии для различных условий испытаний. При анализе результатов оказалось, что изменение коэффициента асимметрии зависит от величины приложенной нагрузки. В связи с этим было предложено в качестве характеристики поврежденности материала использовать величину отношения изменения коэффициента асимметрии к максимальному напряжению цикла

$$k = \frac{e_{ucx} - e}{\sigma_{max}}, \quad (4)$$

где  $e_{ucx}$  – значение коэффициента асимметрии (2), характеризующего состояние структуры до начала нагружения;  $e$  – значение коэффициента асимметрии (2) после определенного количества циклов нагружения;  $\sigma_{max}$  – максимальное напряжение цикла.

На рис. 5 приведены графики изменения коэффициента асимметрии  $e_{исх} - e$  от числа циклов нагружения при различных значениях амплитуды напряжений, отнулевой цикл. Из приведенных данных следует, что при более низких амплитудах нагрузки такие изменения меньше, чем при высоких. Это объясняется тем, что при более низких амплитудах циклической нагрузки число локальных мест развивающейся микропластической деформации, где возможно появление начальной трещины, меньше [ 7 ], и это отражается на величине изменения коэффициента асимметрии структуры. Разрушение образцов происходит также при более низких значениях указанного параметра.

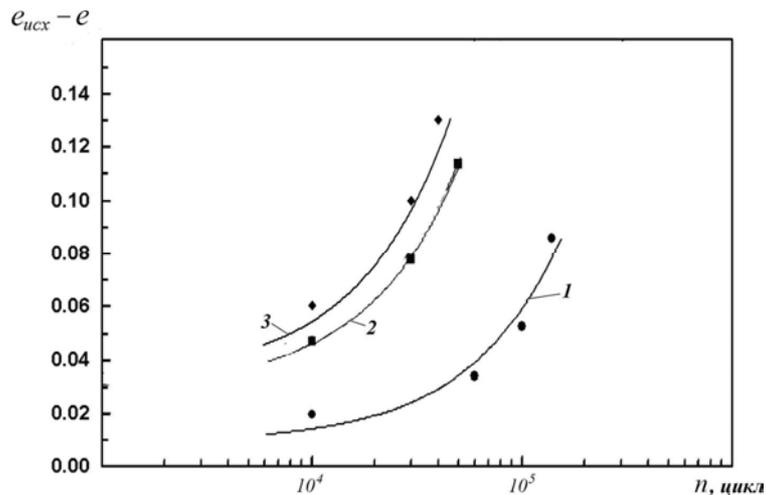


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента асимметрии структуры от количества циклов. ( $R = 0$ ; 1 -  $\sigma_a = 145$  МПа, 2 -  $\sigma_a = 159$  МПа, 3 -  $\sigma_a = 172$  МПа).

На рис. 6 показана зависимость коэффициента поврежденности материала от пройденного числа циклов  $n$ , отнесенного к числу циклов до разрушения образца  $N$ . Видно, что данный параметр меняется монотонно и достигает определенной величины к моменту появления усталостной трещины. Изменение коэффициента поврежденности материала подчиняется единой закономерности, конечно, с учетом разброса экспериментальных значений, вне зависимости от приложенной нагрузки, а также коэффициента асимметрии цикла. На рис. 7 изображена зависимость коэффициента  $k$  от максимального напряжения цикла в момент, когда до появления макротрещины остается 10% долговечности ( $k_{max}$ ).

Из приведенных данных следует, что значение коэффициента поврежденности, соответствующее величине  $k_{max} = 3,7 \pm 0,6$  МПа<sup>-1</sup>, характеризует состояние структуры материала непосредственно перед разрушением независимо от вида нагружения. В связи с этим параметр  $k_{max}$  можно рассматривать как структурный критерий разрушения материала при воздействии циклических нагрузок.

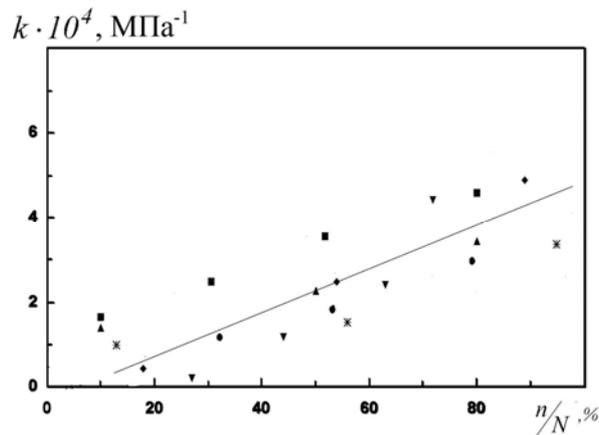


Рис. 6. Изменение коэффициента поврежденности материала при различной относительной долго-вечности ( $\blacklozenge$  –  $\sigma_{\max} = 192$  МПа,  $R = -1$ ;  $\blacktriangledown$  –  $\sigma_{\max} = 165$  МПа,  $R = -1$ ;  $\bullet$  –  $\sigma_{\max} = 145$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacksquare$  –  $\sigma_{\max} = 159$  МПа,  $R = 0$ ;  $\blacktriangle$  –  $\sigma_{\max} = 172$  МПа,  $R = 0$ ;  $*$  –  $\sigma_{\max} = 118$  МПа,  $R = 0,5$ ).

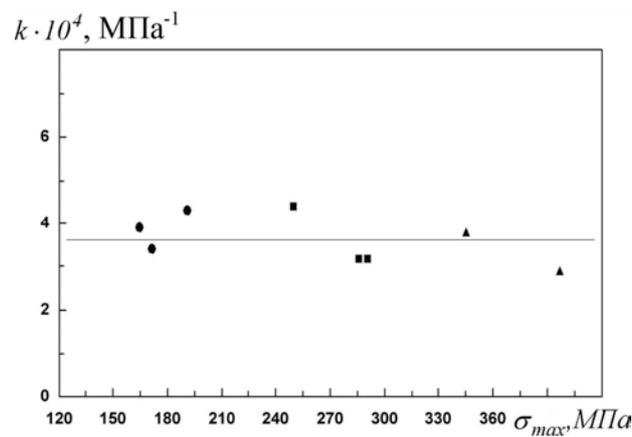


Рис. 7. Изменение коэффициента поврежденности материала при различных максимальных напряжениях цикла ( $\bullet$  –  $R = -1$ ;  $\blacksquare$  –  $R = 0$ ;  $\blacktriangle$  –  $R = 0,5$ ).

**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 микроструктуры материала.

2. Показано, что интегральная интенсивность эволюции структуры снижается с уменьшением амплитуды циклической нагрузки, что связано с 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 материала в связи с накоплением усталостных повреждений. Эта характеристика является интегральной и инвариантной к асимметрии циклов и величине амплитуды нагрузки. В состоянии, предшествующем усталостному разрушению, коэффициент поврежденности материала приобретает определенное значение, вне зависимости от приложенной нагрузки и асимметрии цикла, и может служить критерием разрушения.

### **Summary**

The investigation of the fatigue strength of steel 45 under symmetric and asymmetric cycles of loading and the structural changes during cyclic loading has been carried out. Evaluation of the fatigue damage accumulation has been made by a statistical treatment of the microstructure images. The value of the eccentricity of ellipse in the Fourier transform of the material microstructure is used as a parameter characterizing the material state.

A characteristic named as the material damage coefficient has been obtained that uniquely describes the material structure evolution due to the fatigue damage accumulation. This characteristic is integral and invariant to the cycle asymmetry and the load amplitude value. In the state preceding to the fatigue damage, the material damage coefficient takes a certain value irrespective of the applied load and the cycle asymmetry and can serve as the fatigue damage criterion.

**Keywords:** fatigue strength, cycles of loading, cycle asymmetry, microstructure, material damage coefficient.

### **Резюме**

Виконано дослідження міцності сталі 45 за дією циклічного навантаження при симетричних і асиметричних циклах і змін в структурі в процесі циклічного навантаження. Накопичення втомних пошкоджень оцінювали шляхом статистичної обробки зображень мікроструктури. В якості параметра, який характеризує стан матеріалу, використовували значення ексцентриситету еліпса Фур'є – перетворення його мікроструктури.

Для кількісного оцінювання змін структури матеріалу за дією циклічного навантаження запропоновано коефіцієнт пошкодження. Ця характеристика є інтегральною та інваріантною до амплітуди циклічного навантаження і асиметрії циклів. В стані, близькому до втомного руйнування, коефіцієнт пошкодження приймає певне значення незалежно від параметрів навантаження і може бути критерієм втомного руйнування.

**Ключові слова:** опір втомі, цикли навантаження, асиметрія циклів, мікроструктура, коефіцієнт пошкодження матеріалу.

1. *El Bartali A., Aubin V., Degallaix S.* Fatigue damage analysis in a duplex stainless steel by digital image correlation technique // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2008 – 31, No. 2. – P. 137 – 151.
2. *Яковлева Т. Ю.* Использование методов Фурье-оптики для количественного анализа эволюции структурного состояния металлов в условиях циклического нагружения // *Пробл. прочности*. – 2000. – № 2. – С.81 – 89.
3. *Фукунага К.* Введение в статистическую теорию распознавания образов: Пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 368 с.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. *Holota R., Němeček S.* Recognition of oriented structures by 2D Fourier transform // *Applied Electronics*. Plzeň, Západočeská univerzita. – 2002. – P. 88 – 92.
6. *Zhang J., Tan T.* New texture signatures and their use in rotation invariant texture classification // *Proc. of Texture 2002 (The 2nd International workshop on texture analysis and synthesis with ECCV 2002)*. – P. 157 – 162.
7. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 235 с.

Поступила 02.10.2009