

УДК 620.192;620.178.3

**И.В. БИБЛИК, К.В. ВАКУЛЕНКО, И.Б. КАЗАК***Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина***ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ 40X  
В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

*На примере образцов из стали 40X рассмотрены два метода оценки степени усталостной поврежденности – экспериментальное исследование явления резкого изменения температуры поверхности образцов при высокочастотном циклическом нагружении и метод, основанный на применении компьютерного моделирования процесса усталостного разрушения. Проведено сопоставление полученных результатов. Показано, что совместное использование двух методов позволяет проводить оценку условий перехода от рассеянного к макроскопическому разрушению в условиях многоциклового усталости.*

**Ключевые слова:** *разогрев образца, высокочастотные циклические испытания, компьютерное моделирование, накопление повреждений.*

**1. Введение и постановка задачи**

Усталостное разрушение является результатом длительного накопления повреждений в металле под действием циклически изменяющихся напряжений [1]. Решение проблемы усталостного разрушения металлов и сплавов определяет прогресс в повышении надежности конструкций, машин и механизмов. В этом плане весьма актуальны исследования по разработке способов определения стадии усталостного разрушения и оценки степени усталостной поврежденности.

Последнее время активно развивается направление, связанное с исследованием начальной стадии усталостного разрушения в металлах. Многочисленные исследования позволили установить, что макротрещина формируется в результате необратимых структурных процессов, связанных с зарождением, развитием и накоплением малых трещин. В связи с этим возникает проблема интерпретации кривых усталости, определения параметров множественной поврежденности и прогнозирования долговечности.

Несмотря на многообразие существующих методов прогнозирования усталостной прочности, точное моделирование процесса усталостной поврежденности и разрушения является затруднительным.

В настоящее время при установлении расчетных зависимостей для прогнозирования усталостного разрушения и оценки долговечности элементов конструкций в условиях многоциклового усталости используется кинетический подход, который рассматривает усталостное разрушение как эволюци-

онный процесс, протекающий во времени. Этот процесс описывается с помощью некоторых определяющих уравнений (кинетических уравнений повреждений) [2], которые устанавливают зависимость скалярной меры повреждений от режима нагружения.

Мера повреждений отождествляется с относительным, нормированным к предельному значению, количеством рассеянных микродефектов, разрушенных структурных элементов, разорванных связей [3], либо представляется в виде относительной доли сечения образца с нарушенной сплошностью. Постоянные или функциональные параметры, входящие в кинетические уравнения повреждений, должны определяться по результатам экспериментов.

Экспериментальное же определение показателей сопротивления усталости в каждом конкретном случае – длительная и дорогостоящая процедура. Необходимость сокращения материальных и технических затрат требует разработки новых методов прогнозирования свойств материала, в том числе и на основе обобщения экспериментальных данных.

**2. Методики исследований**

В настоящей работе рассмотрены два метода оценки степени усталостной поврежденности: изучение эффекта разогрева образца при проведении высокочастотных циклических испытаний [4] и компьютерное моделирование усталостного разрушения – и проведено сопоставление полученных результатов.

Испытания проводились на круглых образцах из стали 40X после нормализации на вибростенде

ВЭДС-400, который обеспечивал симметричное растяжение – сжатие при резонансной частоте ~ 400 Гц. С помощью специальной предварительной тарировки стенда задавался конкретный уровень амплитуды нагружения  $\sigma_a$ . Температуру поверхности образца измеряли в течение всего времени испытаний с помощью инфракрасного пирометра MS6540B с погрешностью  $\pm 1,5\%$ .

Сначала образцы исследовали при различных значениях  $\sigma_a$  в течение  $10^4$  циклов и фиксировали достигнутую к этому моменту температуру. Затем испытания проводили при конкретном значении  $\sigma_a$  и наблюдали за изменением температуры поверхности образцов вплоть до разрушения.

Подход, основанный на применении компьютерного моделирования, предполагает использование разработанного в ИПМаш НАН Украины специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [5, 6].

РЭМ, основанный на компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций, позволяет воспроизводить поврежденность материала при любом исследуемом законе нагружения, а также учитывать как образование и развитие индивидуальных микротрещин, так и закономерности развития ансамбля трещин в целом. Кроме того, РЭМ позволяет учитывать влияние распределенности свойств отдельных мезообъемов материала на прочность и долговечность образцов и элементов конструкций.

Методологическими предпосылками при создании РЭМ послужили некоторые идеи системной динамики и структурно-имитационного моделирования. Кроме того, он базируется на экспериментальном определении механических характеристик материала элементов конструкций с учетом режима и условий эксплуатации.

Как и в традиционной модели прочностной надежности [7], в разработанном методе также используются четыре частные модели: модель материала, модель нагружения, модель формы и модель разрушения. Компьютерная модель материала представляет собой двумерную систему, состоящую из одинаковых по размеру структурных элементов с определенным распределением свойств мезообъемов. При этом каждый структурный элемент обладает конкретными прочностными и деформационными свойствами и имеет характерные размеры элемента структуры материала конкретного класса (например, размер зерна в стали, эффективная длина и диаметр волокна в композите).

В данной работе использовалась двумерная модель, состоящая из  $N = 10000$  ( $100 \times 100$ ) структурных элементов. За основную характеристику структурного элемента принималась его предельная

деформативность, т.е. деформация, при достижении которой этот структурный элемент разрушается. Распределенность значений предельных деформаций может быть определена экспериментально или из литературных данных.

Двумерная модель материала была выбрана для упрощения расчетов, поскольку как анализ литературных данных, так и специально проведенные исследования показали сопоставимость результатов, получаемых в моделях различной размерности. С этой точки зрения двумерную модель можно рассматривать как часть трехмерного объекта.

Модель разрушения в РЭМ представляет собой имитационное развитие процесса деформации и разрушения. Компьютерное «деформирование» в РЭМ рассматривается в обобщенном смысле: не как изменение размеров, а как исчерпание «внутреннего ресурса пластичности» и проводится следующим образом. В зависимости от решаемых задач (модели нагружения) определяется шаг по деформации. После этого на каждом шаге значения предельных деформаций, заданные структурным элементам массива, уменьшаются на соответствующее значение шага. Если при этом для какого-либо элемента массива значение предельной деформации оказывается меньше или равным нулю, то этот элемент считается разрушенным, соседние с ним элементы дополнительно «деформируются» на этом же шаге до тех пор, пока после очередного анализа массива число вновь разрушившихся элементов не будет равно нулю. Затем производится следующий шаг и так до полного разрушения образца, которому соответствует «прохождение трещины» (перколяция) через все структурные элементы в каком либо сечении.

Таким образом, модель разрушения в РЭМ представляет собой модель роста перколяционного кластера разрушения, которая описывает переход от дисперсного накопления повреждений к образованию магистральной трещины.

Механические характеристики исследованной стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики стали 40X

$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	E, МПа
408	677	18	214000

### 3. Результаты и их обсуждение

Перейдем к рассмотрению и сравнению результатов применения двух методов оценки степени усталостной поврежденности образцов из стали 40X.

На рис. 1 приведена диаграмма многоциклового усталости образцов из стали 40X, полученная с по-

мощью компьютерного моделирования. Значение предела выносливости ( $\sigma_{-1}$ ), полученное из этой диаграммы, составляет 280 МПа.

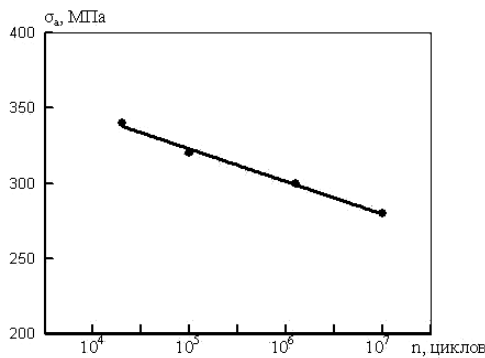


Рис. 1. Диаграмма многоциклового усталости стали 40X

Положения модели разрушения в рамках РЭМ основаны на закономерностях зарождения и накопления микротрещин: микротрещины зарождаются постепенно, в течение всей начальной стадии разрушения практически с постоянной скоростью зарождения. С момента зарождения микротрещин и до достижения условий, при которых начинается их взаимодействие и слияние, микротрещины развиваются независимо.

По аналогии со стадией макроразрушения, когда за основную характеристику повреждаемости принимают длину трещины, в качестве параметра множественной поврежденности начальной стадии разрушения можно рассмотреть интегральную характеристику системы микротрещин – среднюю суммарную длину микротрещин или их количество, как функцию времени (или числа циклов) и нагрузки [8].

В качестве такой интегральной характеристики, определяющей степень поврежденности, было выбрано количество структурных элементов модели материала в РЭМ, разрушившихся на определенном этапе циклического нагружения (за определенное время, за определенное число циклов нагружения). При этом подразумевается, что каждая микротрещина имеет размер характерного элемента структуры материала.

В результате компьютерного моделирования формируется файл данных, в котором записываются параметры разрушенных структурных элементов: координаты (строка, столбец массива) и время разрушения.

Вначале рассмотрим особенности процесса накопления повреждений при циклическом нагружении в течение  $10^4$  циклов. На рис. 2 представлены результаты сравнения экспериментальной зависимости максимальной температуры рабочей поверхности

образцов, испытанных циклически в течение  $10^4$  циклов при различных значениях амплитуды нагружения ( $\sigma_a$ ) для исследованной стали с результатами компьютерного моделирования ( $a_{отн}$  – число раз-рушенных структурных элементов, отнесенное к общему числу структурных элементов в модели материала).

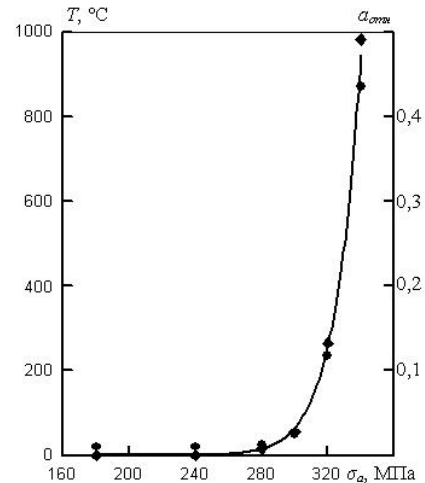


Рис. 2. Сравнение зависимостей максимальной температуры рабочей поверхности образцов из стали 40X (•, эксперимент) и относительного числа разрушенных структурных элементов (♦, компьютерное моделирование) от амплитуды нагружения

Из рис. 2 видно, что зависимости практически совпадают. Измеряемая температура поверхности образцов при малых значениях  $\sigma_a$  практически остается неизменной вплоть до некоторого  $\sigma_a^*$ , после которого она начинает резко возрастать. При этом значение  $\sigma_a^*$  совпадает с вычисленным пределом выносливости стали 40X (см. рис. 1).

Характер накопления повреждений в процессе циклического нагружения вплоть до разрушения исследовался при амплитуде напряжения 320 МПа.

На рис. 3 приведены результаты сравнения зависимостей максимальной температуры поверхности образца из стали 40X (эксперимент) и числа образовавшихся микротрещин,  $n$  (моделирование) от времени нагружения при  $\sigma_a = 320$  МПа. Видно, что наблюдается хорошее совпадение зависимостей. Примерно до 50 000 циклов нагружения ( $t \approx 2$  мин) температура поверхности образца практически не изменяется, после чего она начинает расти с увеличивающейся скоростью, однако к  $\sim 100$  000 циклов ( $t = 5$  мин), скорость роста температуры снижается и образец разрушается. Подобным же образом ведет себя и зависимость числа микротрещин, образовавшихся в процессе циклического нагружения.

В данном случае для сравнения указанных за-

висимостей при компьютерном моделировании использовалась другая характеристика поврежденности – число образовавшихся микротрещин. Под микротрещиной в РЭМ подразумевается совокупность расположенных рядом разрушенных структурных элементов. Число таких элементов определяет размер микротрещины, которая кроме этого характеризуется также временем образования и координатами.

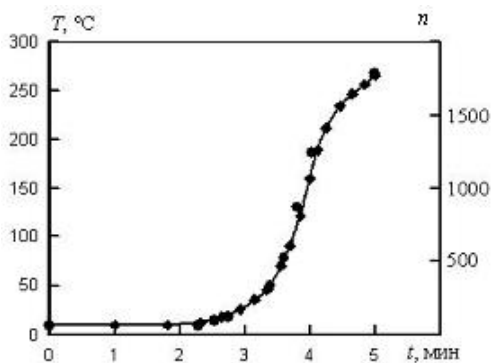


Рис. 3. Сравнение зависимостей максимальной температуры рабочей поверхности образца из стали 40X (•) и числа образовавшихся микротрещин (♦) от времени нагружения

На рис. 4 приведены результаты сравнения двух зависимостей, полученных в результате компьютерного моделирования: числа разрушившихся структурных элементов и числа образовавшихся микротрещин от времени циклического нагружения. Видно, что до  $t \approx 4$  мин эти зависимости совпадают. Однако на более поздних стадиях многоциклового нагружения скорость накопления микротрещин замедляется, в то время как скорость накопления разрушенных структурных элементов продолжает возрастать, что свидетельствует об увеличении длин образующихся микротрещин.

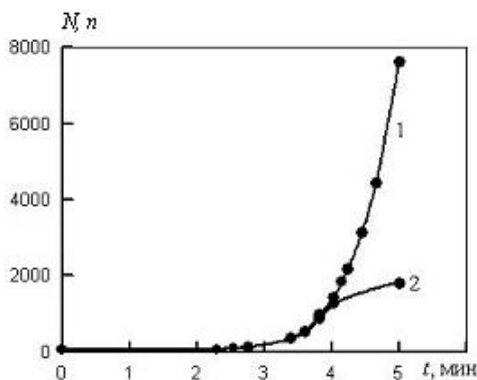


Рис. 4. Сравнение зависимостей общего числа разрушенных структурных элементов (1) и числа образовавшихся микротрещин (2) в образце из стали 40X от времени нагружения

Такой характер зависимостей может быть объяснен тем обстоятельством, что при переходе от множественного разрушения к локализованному происходит изменение законов роста и накопления микротрещин. Вследствие увеличения числа и размеров микротрещин уменьшается расстояние между ними, микротрещины начинают взаимодействовать друг с другом и сливаться.

Таким образом, из приведенных выше результатов можно сделать вывод об адекватности модели материала, создаваемой в рамках РЭМ, и применимости компьютерного моделирования для оценки степени усталостной поврежденности в процессе многоциклового нагружения.

## Выводы

В результате проведенного анализа разогрева образцов из нормализованной стали 40X в условиях высокочастотного циклического нагружения при различных амплитудах симметричного растяжения-сжатия установлен немонотонный характер нагрева. При этом обнаружено, что при малых амплитудах нагружения нагрев практически отсутствует, но, начиная с некоторого значения  $\sigma_a$ , соответствующего пределу выносливости для этой стали, нагрев идет с быстро увеличивающейся скоростью. Образец также немонотонно нагревается и при постоянном  $\sigma_a$  с увеличением времени испытаний.

Показано, что проводимое в рамках расчетно-экспериментального метода компьютерное моделирование процесса усталостного разрушения может быть применено для объяснения полученных экспериментальных результатов. Для оценки степени поврежденности материала в условиях многоциклового усталости в рамках РЭМ предложена модель накопления усталостных повреждений. Введена интегральная характеристика множественной поврежденности, которая может быть использована для оценки степени текущей поврежденности материала элемента конструкции в процессе эксплуатации.

Показано, что в условиях многоциклового усталости совместное использование экспериментальных исследований и компьютерного моделирования позволяет изучать процесс накопления дефектов различных масштабных уровней при оценке условий перехода от рассеянного к макроскопическому разрушению, учитывая при этом характерные стадии этого перехода – зарождение и развитие трещин.

## Литература

1. Троценко, В.Т. Усталость и неупругость металлов [Текст] / В.Т. Троценко. – К.: Наук. дум-

ка, 1971. – 268 с.

2. Павлов, П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность [Текст] / П.А. Павлов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 252 с.

3. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

4. Некоторые аспекты разогрева металла в условиях циклического нагружения [Текст] / В.М. Мацевитый, И.Б. Казак, К.В. Вакуленко, О.Ф. Полищук // Проблемы машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 74–80.

5. Милешкин, М.Б. Применение специального расчетно-экспериментального метода для исследования кинетики усталостного разрушения материалов и оценки ресурса элементов конструкций

[Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: тр. МНТК. – Х.: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 218–220.

6. Милешкин, М.Б. Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций [Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный науч.-техн. сб. – К., 2006. – Вып. 26. – С. 302–310.

7. Биргер, И.А. Сопротивление материалов [Текст] / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.

8. Петерсен, Т.Б. К вопросу о связи микро- и макропараметров усталостного разрушения [Текст] / Т.Б. Петерсен // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, Вып. 2. – С. 74–79.

Поступила в редакцию 1.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

## ОЦІНКА СТУПЕНЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ СТАЛІ 40X В УМОВАХ БАГАТОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ

*І.В. Біблік, К.В. Вакуленко, І.Б. Казак*

На прикладі зразків із сталі 40X розглянуті два методи оцінки міри втомної пошкоджуваності – експериментальне дослідження явища різкої зміни температури поверхні зразків при високочастотному циклічному навантаженні і метод, що ґрунтується на застосуванні комп'ютерного моделювання процесу втомного руйнування. Проведено зіставлення отриманих результатів. Показано, що спільне використання двох методів дозволяє проводити оцінку умов переходу від розсіяного до макроскопічного руйнування в умовах багаточислової втоми.

**Ключові слова:** розігрів зразків, високочастотні циклічні випробування, комп'ютерне моделювання, накопичення пошкоджень.

## ESTIMATION OF STEEL 40X DAMAGE DEGREE IN THE CONDITIONS OF MULTICYCLIC FATIGUE

*I.V. Biblik, K.V. Vakulenko, I.B. Kazak*

On the example of specimens of steel 40X two methods to estimation of fatigue damage are considered - experimental investigation of the phenomenon of dramatic change of specimen surface temperature during realization of high-frequency cyclic loading and method based on application of computer design of fatigue fracture process. Comparison of results is conducted. It is shown that sharing of two methods allows to conduct the estimation of conditions of transition from dissipated to macroscopic fracture under multicyclic fatigue.

**Key words:** warming-up of specimen, high-frequency cyclic tests, computer modeling, damage accumulation

**Библик Ирина Валентиновна** – главный инженер-исследователь отдела материаловедения Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.

**Вакуленко Карина Владимировна** – кандидат технических наук, и.о. зав. отделом материаловедения Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua.

**Казак Ирина Богдановна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua.