

Поврежденность конструкционных материалов в условиях малоциклового нагружения

В.В. Коваль

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 25 August 2017 / Accepted: 22 September 2017

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса накопления повреждений в конструкционных материалах на примере сплава Д16Т и стали 15ХСНД при симметричном знакопеременном малоцикловом нагружении. Параметр повреждения в первом приближении был принят в виде скаляра и определялся путем анализа деградации модуля упругости материала в процессе его упруго-пластического деформирования.

На основании проведенных экспериментов были получены кривые накопления повреждений для различных амплитуд нагружения исследуемых материалов и определен параметр заживания для заданного режима нагружения. Экспериментально установлена нелинейность процесса накопления повреждений при циклическом нагружении. Предложено рассматривать экспериментальную кривую повреждаемости с точки зрения деления ее на три характерных участка. Определены аналитические зависимости для расчета предельной и начальной величины параметра повреждаемости. Указанные зависимости дают возможность приблизительно рассчитать количество циклов до разрушения материала.

В результате исследований проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений циклов до разрушения для материалов Д16Т и 15ХСНД. Установлены величины расчетных погрешностей.

Ключевые слова: поврежденность, малоцикловая усталость, параметр заживания, долговечность.

Введение

Большинство ответственных элементов конструкций подвергаются влиянию повторно-переменных нагрузок соответствующих диапазону малоциклового усталости. В результате в материале возникают процессы непрерывного накопления микроповреждений, которые в конечном результате приводят к образованию макротрещины и разрушению. Таким образом, оценка их долговечности напрямую связана с точностью определения соответствующих характеристик конструкционных материалов как в процессе статического, так и в диапазоне циклического нагружения. В настоящее время, большинство из существующих подходов к решению задачи малоциклового усталости элементов конструкций используют данные, полученные путем анализа механических характеристик, из условной или действительной диаграммы деформирования (циклической диаграммы деформирования) [1-6]. К сожалению, такие подходы не учитывают явления накопления повреждений в материале при его упруго-пластическом деформировании, что вносит некоторую погрешность в результирующие расчетные уравнения.

Влияние микроповреждений на поведение материала в процессе его нагружения (деформирования) может быть учтено в соответствии с подходом Качанова-Работнова [7, 8], в рамках которого вводится понятие эффективных напряжений и параметра поврежденности материала. Основная трактовка данного параметра заключается в учете влияния уменьшения эффективной площади поперечного сечения образца в следствии процесса возникновения, перераспределения и объединения микродефектов по всему объему исследуемого материала.

Сегодня не существует какого-либо однозначного подхода к определению параметра поврежденности, но имеется возможность выделить три наиболее основных направления его идентификации: 1) параметр поврежденности определяется в виде характеристики микроструктуры материала и определяется на микроуровне [8, 9], 2) конкретизация параметра поврежденности происходит на основании оценки величины выбранной макрохарактеристики материала, которая является чувствительной к изменениям на микроуровне [10-12], 3) параметр поврежденности вводится исходя из основных положений термодинамики необратимых

процессов [13-15]. В зависимости от типа и условий решаемой задачи параметр поврежденности может быть принят в виде скалярной, векторной или тензорной величины.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование кинетики накопления повреждений в образцах сплава Д16Т и стали 15ХСНД в условиях симметричного знакопеременного цикла при мягком нагружении.

Теоретическое обоснование

Рассмотрим упруго-пластическое деформирование материала в условиях знакопеременного симметричного цикла. Данный процесс характеризуется постепенной деградацией механических свойств вследствие непрерывного перераспределения микрповреждений в объеме материала, которое может быть учтено путем введения параметра поврежденности. Введем в рассмотрение скалярный параметр поврежденности, который может быть рассчитан через изменение модуля упругости материала в соответствии с зависимостью [13, 16]:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (1)$$

где E_0 – исходное значение модуля упругости материала, \tilde{E} – текущее значение модуля упругости при разгрузке. Выбор параметра поврежденности в виде (1) является обоснованным исходя из требований простоты его определения в инженерных расчетах.

Проанализируем кинетику накопления повреждений в материалах для условий мягкого режима нагружения при симметричном цикле, который изображен на рис.1

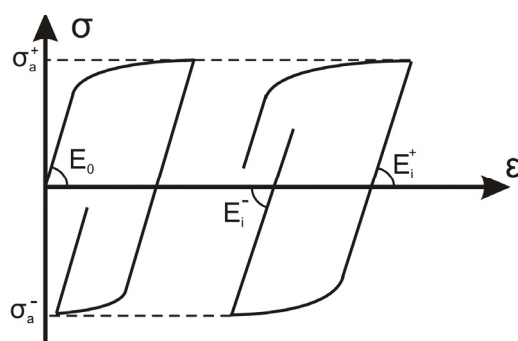


Рис. 1. Симметричный цикл нагружения

В соответствии с (1) величина поврежденности, которая возникает при положительном полцикле нагружения D^+ , может быть определена как [17, 18]:

$$D^+ = 1 - \frac{E_i^+}{E_0} \quad (2)$$

где E_0 – модуль упругости материала в нулевом полцикле нагружения, E_i^+ – модуль упругости при разгрузке для i -го полцикла нагружения.

Аналогично для отрицательного полцикла может быть введено понятие параметра поврежденности D^- [17, 18]:

$$D^- = 1 - \frac{E_i^-}{E_0} \quad (3)$$

где E_i^- – модуль упругости при разгрузке для i -го отрицательного полцикла нагружения.

Как было показано в работах [17, 18] при изменении знака нагрузки на отрицательный в материале возникает процесс «залечивания» микродефектов, который влияет на величину поврежденности в отрицательном полцикле и приводит к уменьшению ее величины. Этот процесс может быть описан с помощью параметра залечивания, который для заданного материала и режима нагружения является постоянной величиной и на основании зависимостей (2) и (3) может быть рассчитан следующим образом [17, 18]:

$$h = \frac{E_0 - E^+}{E_0 - E^-} \quad (4)$$

Тогда величина поврежденности за полный цикл нагружения может быть определена как [18]:

$$D_\Sigma = D^+ (1 + h) \quad (5)$$

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования кинетики накопления повреждений при малоцикловом нагружении проводились на гладких образцах из сплава Д16Т и стали 15ХСНД. Общий вид образца представлен на рис. 2.

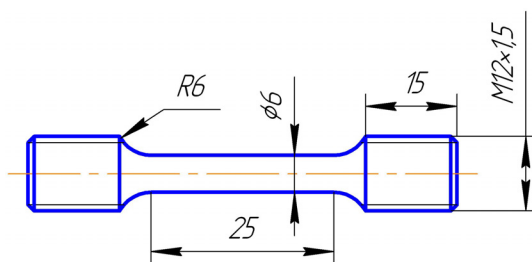
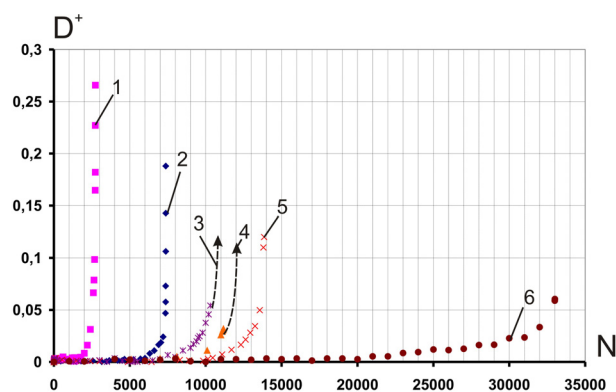
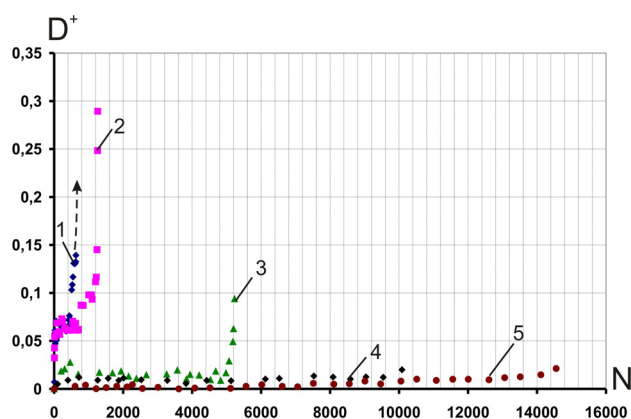


Рис.2. Образец для испытаний на малоцикловую усталость

Испытания проводились на универсальной испытательной установке В1-02-112, которая позволяет проводить измерения усилия и деформации с точностью до 1%. Рассматривался симметричный знакопеременный цикл при мягком режиме нагружения с частотой 3 Гц. Параметр поврежденности определялся в соответствии с зависимостями (2) и (3). Предельное значение параметра поврежденности D_{CR}^+ фиксировалось по последнему устойчивому циклу. Это связано с тем, что при испытаниях на последних циклах нагружения наблюдалось неустойчивое поведение петли циклического гистерезиса, связанное с процессами образования макротрещины и ее роста.

Кривые зависимости параметра D^+ от количества циклов нагружения для различных амплитуд напряжений приведены на рис. 3 и рис. 4

Рис. 3. Зависимость величины D^+ от количества циклов нагружения для сплава Д16Т (1 – $\sigma_a=395$ МПа, 2 – $\sigma_a=380$ МПа, 3 – $\sigma_a=359$ МПа, 4 – $\sigma_a=340$ МПа, 5 – $\sigma_a=303$ МПа, 6 – $\sigma_a=260$ МПа)Рис. 4. Зависимость величины D^+ от количества циклов нагружения для стали 15XCHD (1 – $\sigma_a=388$ МПа, 2 – $\sigma_a=360$ МПа, 3 – $\sigma_a=343$ МПа, 4 – $\sigma_a=323$ МПа, 5 – $\sigma_a=300$ МПа)

Из рис. 3 и 4 видно, что уменьшение величины амплитудного напряжения цикла приводит к уменьшению значения параметра поврежденности, которое соответствует предельному значению.

Экспериментальные значения параметра залечивания h для исследуемых материалов и их механические характеристики приведены в таблице 1.

Механические характеристики материалов и параметр залечивания

Материал	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	E, МПа	h
Д16Т	398	532	11,1	12,2	70006	0,32
15ХСНД	349	515	34,6	61,2	183857	0,70

Анализ результатов исследования

Исходя из полученных результатов экспериментального исследования представленных материалов можно сделать заключение, что в общем случае кривая накопления повреждений может быть представлена в виде следующих характерных участков (рис.5):

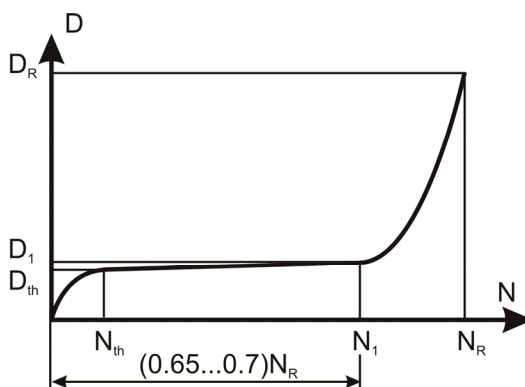


Рис.5. Общий вид кривой накопления повреждений

Начальный участок кривой характеризуется резким ростом величины параметра поврежденности до некоторого значения D_{th} , после чего происходит относительная стабилизация его величины. Для второго участка кривой ($N_{th} \dots N_1$) характерным является незначительное изменение величины параметра поврежденности и практически линейная (слабо нелинейная) его зависимость от количества циклов нагружения. Экспериментально установлено, что величина параметра поврежденности D_1 , соответствующая количеству циклов N_1 , отличается от значения D_{th} не более чем в два раза. При этом, количество циклов N_1 составляет величину порядка 0,65...0,7 от предельного значения циклов до разрушения N_R . Следовательно, при условии попадания текущего значения параметра поврежденности материала в диапазон (1...1,15) D_{th} количество наработанных им циклов будет находиться в интервале от 0 до $(0,65 \dots 0,7) N_R$.

Третий участок имеет в основном нелинейный характер и характеризуется резким увеличением скорости процесса накопления повреждений в материале с некоторой величины циклов N_1 и длится вплоть до момента разрушения образца.

Экспериментальная зависимость характерных значений параметра поврежденности для положительного полупериода нагружения D_{th}^+ и D_{CR}^+ от амплитуды и количества циклов нагружения приведена на рис. 6 и рис. 7.

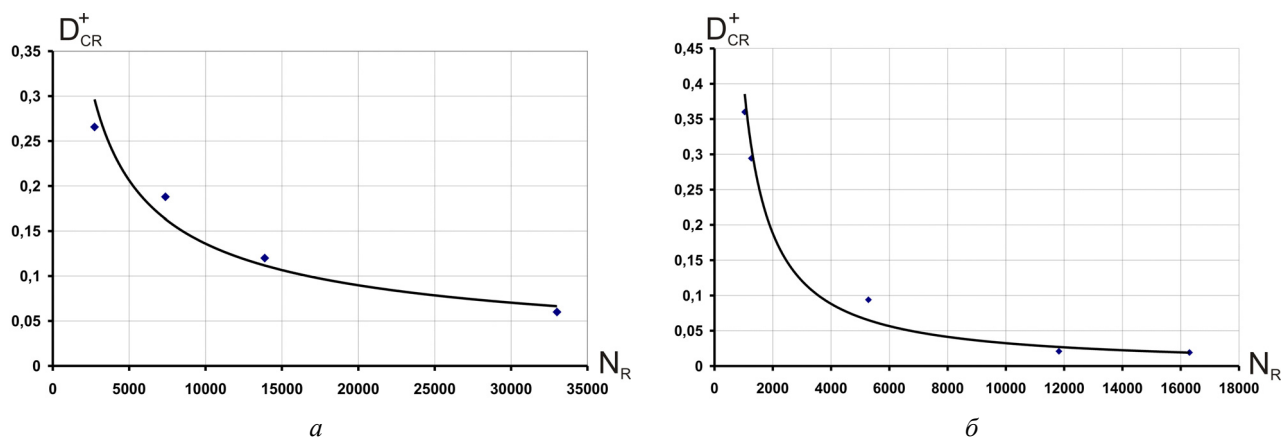


Рис. 6. Зависимость предельного значения поврежденности от количества циклов до разрушения для а) сплава Д16Т, б) стали 15ХСНД

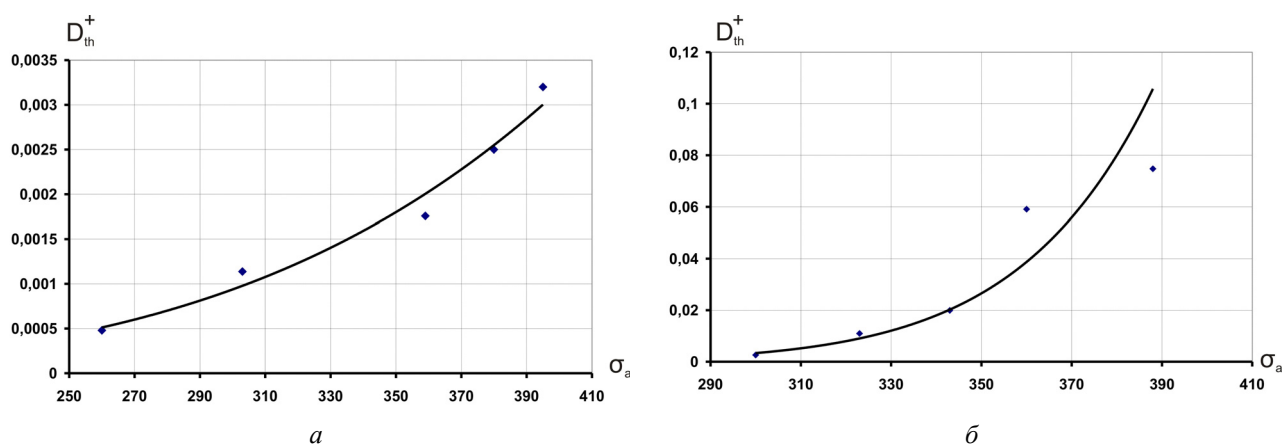


Рис. 7. Зависимость величины D_{th}^+ от величины амплитудного напряжения в цикле для а) сплава Д16Т, б) стали 15ХСНД

Результаты, представленные на рис. 6 и рис. 7. могут быть описаны с помощью следующих аналитических зависимостей:

$$D_{CR}^+ = A \cdot N_R^B \quad (6)$$

$$D_{th}^+ = a(\sigma_a)^b \text{ или } \ln(D_{th}^+) = \ln(a) + b \ln(\sigma_a) = C + b \ln(\sigma_a) \quad (7)$$

Рассмотрим зависимость между экспериментальными значениями D_{th} и D_{CR} (рис. 8):

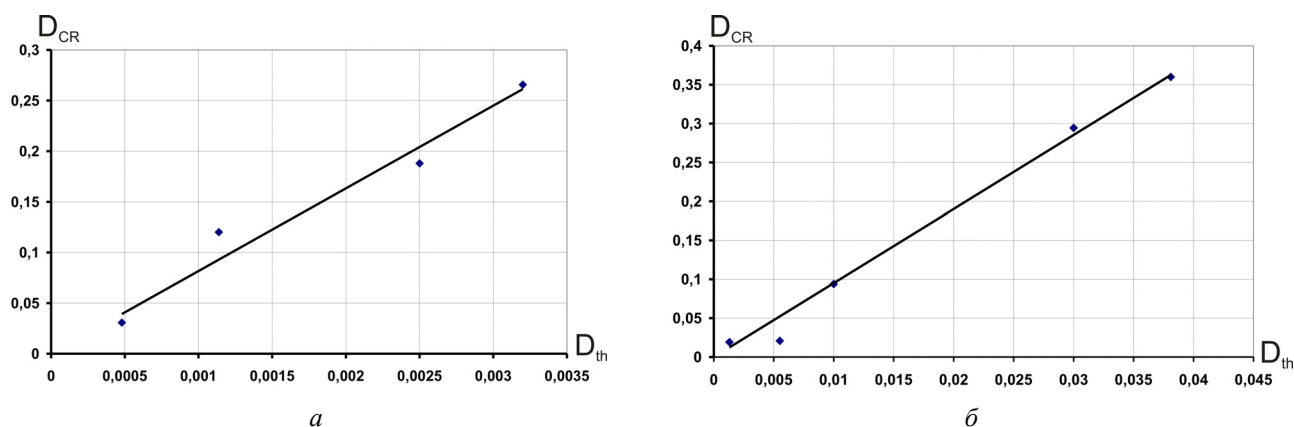


Рис. 8. Зависимость величины D_{th} от предельной величины поврежденности D_{CR} для а) сплава Д16Т, б) стали 15ХСНД

Анализ данных рис. 8 позволяет сделать допущение о существующей линейной зависимости рассматриваемых параметров, которую можно обозначить следующим образом:

$$D_{CR} = cD_{th} \quad (8)$$

Экспериментально определенные значения констант b , c , A , B , C уравнений (6) – (8) для исследуемых материалов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения параметрических констант

Материал	A	B	C	b	c
Д16Т	34,15	-0,60	-31,14	4,23	81,70
15ХСНД	762,40	-1,10	-82,20	13,42	9,51

Решая систему уравнений (6) – (8) можно получить количество циклов до разрушения. Сравнение расчетной кривой малоциклового усталости с экспериментальной представлено на рисунке 9.

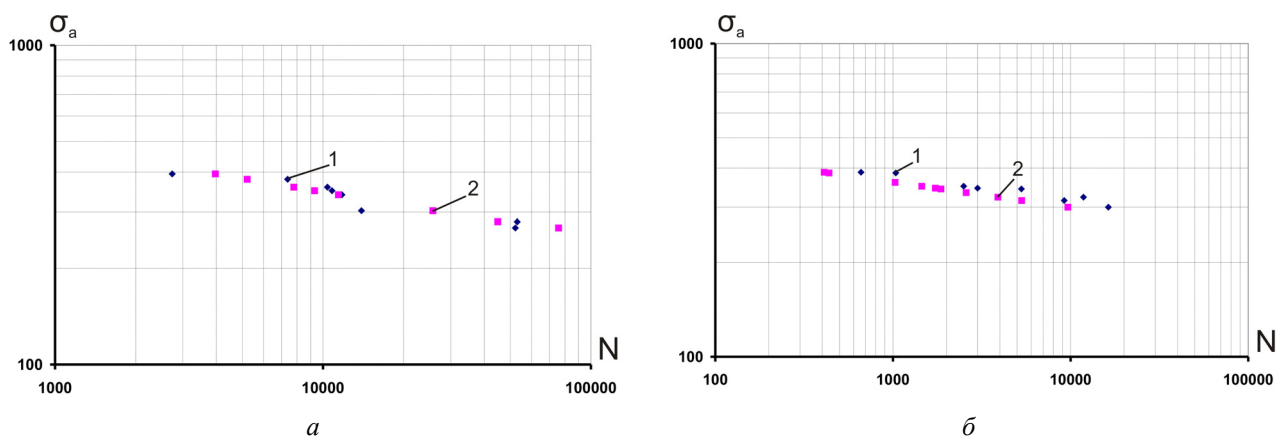


Рис. 9. Экспериментальные (1) и расчетные (2) данные малоциклового усталости: а) сплав Д16Т, б) сталь 15ХСНД

Максимальная относительная погрешность при определении количества циклов до разрушения (в рамках рассмотренного диапазона) при заданной амплитуде нагружения составила: для сплава Д16Т – 200%, а для стали 15ХСНД – 65%. Расчетные величины циклов до разрушения для стали 15ХСНД во всех случаях оказались меньше экспериментальных. Таким образом, для рассмотренных материалов оценка долговечности может производиться с применением коэффициента запаса по циклам, значение которого не превышает 3. В то же время стандартные подходы [5, 6] регламентируют величину данного коэффициента на уровне 10.

Выводы

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что процесс накопления повреждений в материале при циклическом нагружении носит сложный нелинейный характер. При этом количество циклов до разрушения может быть определено с помощью зависимостей, полученных на основании введения в рассмотрение параметра поврежденности

2. Значения параметрических констант уравнений (6) – (8) могут быть определены путем проведения двух экспериментов при различных амплитудах напряжений для мягкого режима нагружения.

3. Экспериментально установлено, что в диапазоне циклов $(0... 0,75) N_R$ величина параметра поврежденности изменяется не более чем на 15%.

4. Расчетные величины количества циклов до разрушения для сплава Д16Т и стали 15ХСНД, полученные в соответствии с предложенным аналитическим методом, позволяют сделать вывод о возможности уменьшения значения коэффициента запаса по циклам по сравнению с его стандартной величиной равной 10.

Пошкоджуваність конструкційних матеріалів в умовах малоциклового навантаження

В.В. Коваль

Анотація. У роботі наведено результати експериментальних досліджень процесу накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах на прикладі сплаву Д16Т та сталі 15ХСНД при симетричному знакозмінному мало цикловому навантаженні. Параметр пошкодження у першому наближенні був прийнятий у вигляді скаляра та визначався шляхом аналізу деградації модуля пружності матеріалу у процесі його пружно-пластичного деформування.

На основі проведених експериментів були отримані криві накопичення пошкоджень для різних амплітуд навантаження досліджуваних матеріалів та визначено параметр заліковування для заданого режиму навантаження. Експериментально встановлена нелінійність процесу накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні. Запропоновано розглядати експериментальну криву пошкоджуваності з точки зору поділу її на три характерні ділянки. Визначено аналітичні залежності для розрахунку граничної та початкової величини параметра пошкоджуваності. Вказані залежності дають можливість наближено розрахувати кількість циклів до руйнування матеріалу.

В результаті досліджень проведений порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних значень циклів до руйнування для матеріалів Д16Т та 15ХСНД. Встановлено величини розрахункових похибок.

Ключові слова: пошкоджуваність, малоциклова втома, параметр заліковування, довговічність.

Damage of structural materials at low cycle loading conditions

V.V. Koval

Abstract. The present work is focused on experimental study of the kinetics of damage accumulation in aircraft alloy D16T and steel 15HSND for symmetric cycle (stress-controlled test). The evaluation of the material damage on the basis of an analysis of the elasticity modulus variation for different values of the loading cycle amplitudes was carried out. Experimental damage accumulation curves were obtained. The "healing parameter" for given loading regime of the materials under study was determined. This parameter can be used for an approximate estimation of the total damage value for the full loading cycle. The concept of initial and critical damage parameter is considered and analytical dependencies for their determination were presented. A method for durability calculation, based on the results of the carried out studies, was proposed. The error of this method in relation to the experimental data was estimated.

Keywords: damage, low-cycle fatigue, healing parameter, durability.

References

- Gusenkov, A.P. (1979), *Prochnost' pri izotermicheskom i neizotermicheskom malotsiklovom nagruzhении*, Nauka, Moscow, Russia.
- Makhutov, N.A. (1981), *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksii na prochnost'*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Romanov, A.N. (1988), *Razrushenie pri malotsiklovom nagruzhении*, Nauka, Moscow, Russia.
- Gokhfel'd, D.A. and Sadakov, O.S. (1984), *Plastichnost' i polzuchest' elementov konstruksii pri povtornykh nagruzhениyakh*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Frolov, K.V. (ed) (1987), *Problemy prochnosti, dolgovechnosti i nadezhnosti produktsii mashinostroeniya. Raschety prochnosti elementov konstruksii pri malotsiklovom nagruzhении*. Moscow, Russia.
- Makhutov, N.A., Vorob'ev, A.Z. and Gadenin, M.M. (1983), *Prochnost' konstruksii pri malotsiklovom nagruzhении*, Nauka, Moscow, Russia.
- Rabotnov, Y.N. (1966), *Polzuchest' elementov konstruksii*, Nauka, Moscow, Russia.
- Kachanov, L.M. (1986), *Introduction to continuum damage mechanics*, Kluwer academic publishers, Bruukline, USA.
- Khan, S., Wilde, F., Beckmann, F. and Mosler, J. (2012), Low cycle fatigue damage mechanism of the lightweight alloy AL2024, *Int. J. of Fatigue*, vol. 38, pp. 92-99, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.11.009>
- Bonora, N. and Pironi, A. (2003), Modeling ductile damage under fully reversed cycling, *Computational Materials Science*, vol. 16, pp. 129-141.
- Mashayekhi, M., Ziaei-Rad, S., Parvizian, J., Niklewicz, J. and Hadavinia, H. (2007), Ductile crack growth based on damage criterion: experimental and numerical studies, *Mechanics of materials*, vol. 39, pp. 623-636.
- Tang, C.Y., Shen, W., Peng, L.H. and Lee, T.C. (2002), Characterization of isotropic damage using double scalar variables, *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 11, pp. 3-25.
- Bonora, N. and Newaz, G.M. (1998), Low cycle fatigue life estimation for ductile metals using a nonlinear continuum damage mechanics model, *Int J Solids Struct*, vol. 16, pp.1881-1894.
- Berezin, A.V. and Kozinkina, A.I. (2002), Fizicheskie modeli i metody otsenki nakopleniya povrezhdenii v tverdykh telakh, *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, vol. 3, pp. 115-121.
- Bonora, N., Ruggiero, A, Esposito, L., Gentile, D. (2006), CDM modeling of ductile failure in ferritic steels: assessment of the geometry transferability of model parameters, *Int. J. of Plasticity*, vol. 22, pp. 2015-2047.
- Tymoshenko, O.V., Koval, V.V. and Kravchuk, R.V. (2011), Vplyv vydu napruzhenoho stanu na krytychne znachennia poshkodzhuvanosti dlia konstruksiiynykh materialiv pry pruzhno-plastychnomu deformuvanni, "Vestnik Nacional'nogo tehnikeskogo universiteta "Kievskij politehnikeskij institute". Serija mashinostroenie", vol. 63, pp. 103-107.
- Grabovskii, A.P., Timoshenko, A.V., Khalimon, A.P. (2005), O kinetike deformatsionnogo nakopleniya povrezhdenii v konstruksionnykh materialakh pri peremennom deformirovanii, *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya. Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov.*, vol. 30, pp.75-80.
- Lemaitre, J., Desmorat, R., (2005), *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: <https://doi.org/10.1007/b138882>.