

Оценка долговечности металлических сплавов при непропорциональном малоцикловом нагружении

С. Н. Шукаев, К. В. Панасовский, М. Н. Гладский

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

Предложена методика оценки долговечности различных металлических сплавов с разной структурой при непропорциональном малоцикловом нагружении, которая базируется на эквивалентной деформации типа Писаренко–Лебедева и корректирующей функции, учитывающей такие эффекты непропорционального нагружения, как дополнительное упрочнение и снижение долговечности при деформировании по непропорциональным траекториям. Расчетные результаты сравниваются с экспериментальными, которые получены разными исследователями на сталях, титановых, никелевых и алюминиевых сплавах. Отмечается хорошее совпадение результатов для всех исследуемых материалов и траекторий деформирования. Погрешность расчета при непропорциональном нагружении практически совпала с таковой при пропорциональном.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, непропорциональное нагружение, критерии предельного состояния, оценка долговечности.

Введение. Характерной особенностью эксплуатации многих ответственных элементов конструкций и деталей машин является их работа в условиях многоосного малоциклового нагружения. При этом конструкционный материал в зонах максимального напряжения работает за пределами упругости, где проявляются эффекты циклического деформирования. Как показывают экспериментальные исследования и опыт эксплуатации подобных конструкций, для такого типа нагружения характерной есть зависимость процессов деформирования и разрушения материалов от таких факторов, как вид напряженного состояния и форма траектории нагружения.

В последнее время изучению влияния этих факторов на малоцикловую прочность конструкционных материалов уделяли внимание многие исследователи, работающие в области механики твердого деформированного тела [1–11 и др.]. В большинстве случаев испытывали металлы и их сплавы. Результаты исследований свидетельствуют, что характер поведения материалов при малоцикловом нагружении по пропорциональным и непропорциональным траекториям разный. Так, установлен эффект “дополнительного упрочнения”, который проявляется в том, что при одинаковом размахе эквивалентной деформации материал больше упрочняется по непропорциональным траекториям циклического деформирования, чем по пропорциональным. Кроме того, показано существование прямой зависимости между уменьшением долговечности и увеличением величины дополнительного деформационного упрочнения металлических сплавов при непропорциональном малоцикловом нагружении. Для различных металлов с разной структурой имеет место расхождение в величине дополнительного циклического упрочнения при непропорциональном нагружении, т.е. металлы и их сплавы

в зависимости от структуры могут проявлять большую или меньшую чувствительность к такому фактору, как непропорциональность нагружения.

Большинство из известных авторам методов оценки долговечности в условиях многоосной малоциклового усталости не учитывают вышеуказанные особенности процессов деформирования и разрушения металлических материалов, поэтому использование их в условиях непропорционального нагружения является экспериментально необоснованным.

Ниже предложена методика оценки долговечности металлических сплавов при многоосном малоциклового нагружении, базовые уравнения которой учитывают эффекты непропорционального нагружения и могут использоваться для сплавов с различной чувствительностью к непропорциональности нагружения.

Традиционно для оценки сопротивления материалов в эксплуатационных условиях, когда система действующих напряжений может быть произвольной, используются условия эквивалентности (критерии прочности). Наибольшее распространение при оценке предельного состояния в условиях малоциклового нагружения получили критерии деформационного типа.

Вышеуказанные экспериментальные закономерности свидетельствуют, что эквивалентный размах деформации при непропорциональном нагружении $\Delta\varepsilon_{NP}$ может быть представлен как функция трех параметров:

$$\Delta\varepsilon_{NP} = f(\Delta\varepsilon_{eq}, \alpha, f_{NP}), \quad (1)$$

где $\Delta\varepsilon_{eq}$ – размах эквивалентной деформации, определяемый по выбранной теории прочности; α – коэффициент чувствительности материала к непропорциональности нагружения; f_{NP} – параметр непропорциональности нагружения, который зависит только от формы траектории деформирования.

Данный подход реализован в работе [6]. Основные его положения и дальнейшее развитие изложены ниже.

Критерий Ито–Сакане–Онами–Соси. Эквивалентный размах деформации при непропорциональном нагружении предлагается [6] рассчитывать следующим образом:

$$\Delta\varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta\varepsilon_I, \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_I$ – размах главной деформации,

$$\Delta\varepsilon_I = \max[\varepsilon_{I\max} - \varepsilon_I(t) \cos \xi(t)]. \quad (3)$$

Параметры уравнения (3) и их графическая интерпретация представлены на рис. 1.

Коэффициент α , учитывающий эффект “дополнительного упрочнения”, определяется как

$$\alpha = \frac{\sigma(1) - \sigma(0)}{\sigma(0)}, \quad (4)$$

где $\sigma(1)$ и $\sigma(0)$ – соответственно амплитуды эквивалентных напряжений в цикле при нагружении по круговой траектории в пространстве деформаций

типа Мизеса (максимальное напряжение) и при пропорциональном нагружении (минимальное напряжение) при одном и том же значении размаха эквивалентной деформации.

Параметр непропорциональности нагружения f_{NP} учитывает историю изменения главных деформаций за цикл и определяется так:

$$f_{NP} = \frac{\pi}{2T\varepsilon_{I\max}} \int_0^T (\varepsilon_I(t) |\sin \xi(t)|) dt, \quad (5)$$

где $\varepsilon_I(t)$ – абсолютная величина наибольшей главной деформации в момент времени t ; $\varepsilon_{I\max}$ – максимальное значение $\varepsilon_I(t)$; T – продолжительность цикла; $\xi(t)$ – угол между направлениями $\varepsilon_{I\max}$ и $\varepsilon_I(t)$ – рис. 1.

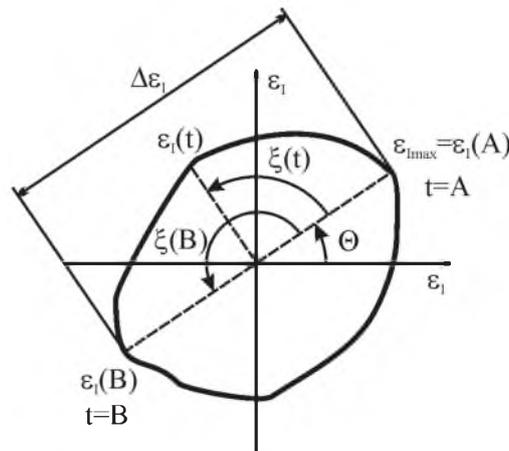


Рис. 1. Изменение максимальной абсолютной величины главной деформации ε_I за цикл.

Модификация критерия Ито–Сакане–Онами–Соси. При анализе параметра $\Delta\varepsilon_{NP}$ [6] выявлены его как положительные, так и отрицательные стороны. Например, в предельном случае (при пропорциональном нагружении) формула (2) принимает вид $\Delta\varepsilon_{NP} = \Delta\varepsilon_I$, т.е. данный подход вырождается в критерий наибольших линейных деформаций.

Ранее [12, 13] была проанализирована эффективность известных одно-, двух- и трехпараметрических критериев применительно к многоосному малоцикловому нагружению в деформационной трактовке. В результате установлено, что однопараметрические критерии, к которым относится и критерий наибольших линейных деформаций, значительно хуже коррелируют с экспериментальными данными при двухосном пропорциональном нагружении, чем критерии двухпараметрического типа, как, например критерии Писаренко–Лебедева или Кулона–Мора.

Кроме того, известно, что существуют расхождения между величинами дополнительного упрочнения металлов с разной структурой. Если для конструкционных сталей имеет место существенное дополнительное упрочнение, то для титановых сплавов оно слабо выражено или вообще отсутствует. При отсутствии дополнительного упрочнения коэффициент α равен нулю, в

результате имеем $\Delta\varepsilon_{NP} = \Delta\varepsilon_I$. Таким образом, непропорциональность нагружения не учитывается, в то время как экспериментальные исследования свидетельствуют о падении долговечности при непропорциональном нагружении и для титановых сплавов. Поэтому коэффициент α , предложенный в работе [6], можно применять только для материалов с заметным дополнительным упрочнением.

Ниже предлагается следующая модификация подхода к определению параметра $\Delta\varepsilon_{NP}$.

Эквивалентный размах деформации при непропорциональном нагружении $\Delta\varepsilon_{NP}$ определяется с использованием критерия Писаренко–Лебедева в деформационной трактовке:

$$\varepsilon_{PL} = \chi_\varepsilon \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}}{\sqrt{2}(1 + \nu^*)} + (1 - \chi_\varepsilon) \left[\frac{\varepsilon_1 + \frac{\nu^*}{1 - 2\nu^*}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{1 + \nu^*} \right] \leq \varepsilon_{пр} \quad (6)$$

где $\chi_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3} - 1} \left[2(1 + \nu^*) \left(\frac{\varepsilon_{пр}}{\gamma_{пр}} \right) - 1 \right]$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – величины главных деформаций; $\gamma_{пр}$ – предельная амплитуда деформации сдвига в условиях чистого кручения для заданной долговечности; $\varepsilon_{пр}$ – предельная амплитуда продольной деформации в условиях растяжения–сжатия для этой же долговечности.

Коэффициент поперечной деформации ν^* рассчитывается по формуле

$$\nu^* = 0,5 - 0,2 \frac{\sigma_{0,2}}{E\varepsilon_{PL}}$$

Выше отмечалось, что чувствительность материалов к непропорциональности нагружения связана с падением долговечности. Ранее [13] предлагалось определять коэффициент чувствительности к непропорциональности нагружения через эффект падения долговечности, который наблюдается при сопоставлении пропорциональных и непропорциональных режимов деформирования. Такой подход имеет очевидные преимущества при использовании материалов, для которых дополнительное упрочнение слабо проявляется либо отсутствует. В настоящей работе предлагается реализация данного подхода в виде

$$\eta = \frac{1}{f_{NP}} \left[\frac{B}{B'} (N)^{k'-k} - 1 \right], \quad (7)$$

где η – коэффициент чувствительности к непропорциональности нагружения; k – тангенс угла наклона кривой долговечности при растяжении–сжатии; k' – тангенс угла наклона кривой долговечности при непропорциональном нагружении; значения B и B' находятся по данным рис. 2.

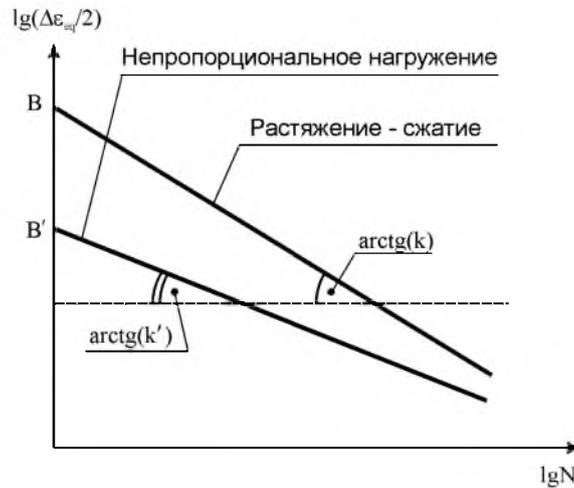


Рис. 2. Схема определения коэффициента η .

Предположив, что в двойных логарифмических координатах кривые долговечности имеют одинаковый угол наклона, т.е. $k = k'$, уравнение (7) можно преобразовать к виду

$$\eta = \frac{1}{f_{NP}} \left[\frac{B}{B'} - 1 \right]. \quad (8)$$

Если в качестве непропорционального нагружения выбрать круговые траектории циклического деформирования в пространстве Мизеса ($f_{NP} = 1$), то получим

$$\eta = \frac{B}{B'} - 1. \quad (9)$$

Таким образом, уравнение (1) можно представить в виде

$$\Delta \varepsilon_{NP} = (1 + \eta f_{NP}) \Delta \varepsilon_{PL}, \quad (10)$$

где $\Delta \varepsilon_{PL}$ – максимальный размах эквивалентной деформации по критерию Писаренко–Лебедева, $\Delta \varepsilon_{PL} = \max[\varepsilon_{PL}^{\max} - \varepsilon_{PL}(t) \cos \xi(t)]$.

Характеристики исследуемых материалов и траектории деформирования. С целью проверки предлагаемой модификации подхода [6] были обработаны экспериментальные данные металлических сплавов с разной структурой [9–14], характер поведения которых в условиях непропорционального циклического упругопластического деформирования разный.

В табл. 1 и 2 приведены физико-механические и усталостные характеристики исследуемых материалов.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические характеристики исследуемых материалов

Материал	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ν	Литературный источник
1Cr-18Ni-9Ti	193	310	605	0,3	[9]
08X18H10T	203	320	690	0,29	[2]
304 stainless steel	185	260	690	0,29	[7]
SUS 304	193	123	403	0,3	[10]
6061 Al alloy	80	320	350	0,33	[7]
BT1-0	112	490	565	0,33	[11]
BT9	118	865	970	0,32	[8]
Inconel 718	208,5	1160	1420	0,34	[3]

Т а б л и ц а 2

Характеристики циклической прочности исследуемых материалов

Материал	A	n	α	η
1Cr-18Ni-9Ti	1842,70	-2,1236	0,238	0,794
08X18H10T	616,74	-3,6062	0,950	0,732
304 stainless steel	2342,10	-4,6904	0,900	0,795
SUS 304	2630,20	-2,9744	0,300	0,947
6061 Al alloy	1396,20	-3,1576	0,200	0,500
BT1-0	4307,00	-3,8226	0	0,140
BT9	809,31	-2,0602	0,080	0,250
Inconel 718	13818,00	-3,4341	0	0,789

На рис. 3 представлены рассматриваемые траектории непропорционального циклического деформирования.

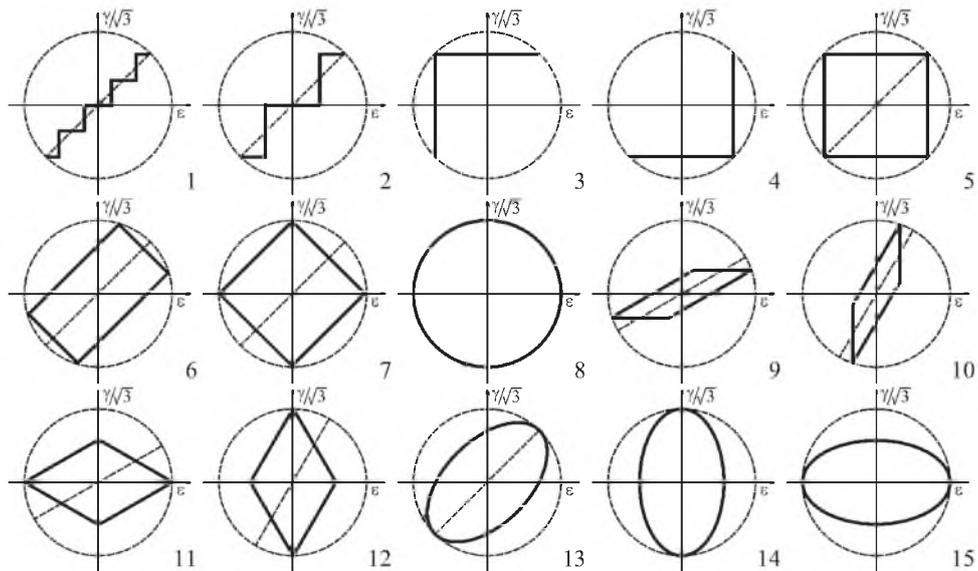


Рис. 3. Исследуемые траектории деформирования (1-15).

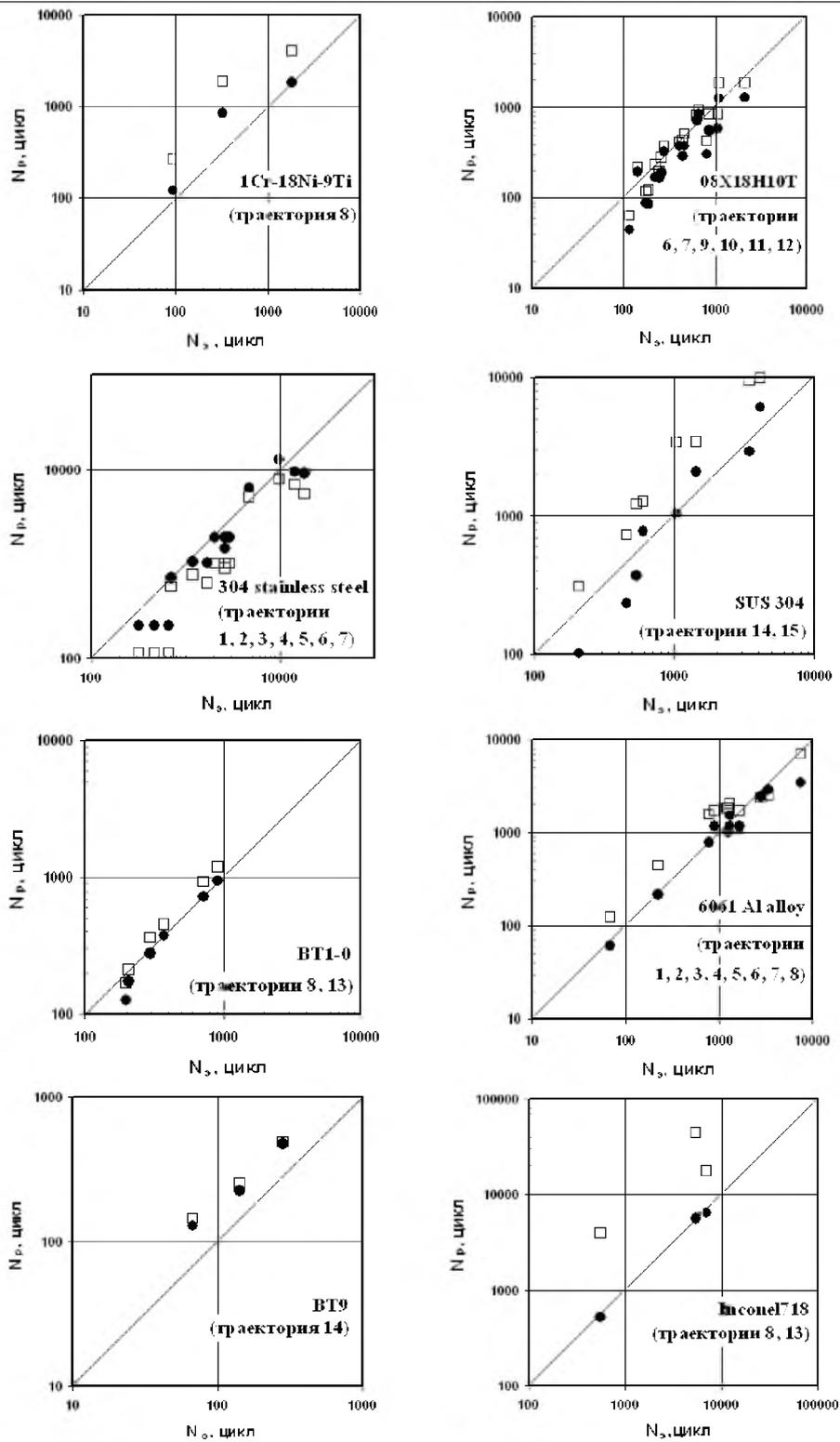


Рис. 4. Прогнозирование долговечности исследуемых материалов по критерию Ито–Сакане–Онами–Соси (□) и по модифицированному (●).

Отметим, что в работе не рассматривались траектории с асимметрией параметров цикла нагружения. Поэтому говорить о применении предложенной методики к таким траекториям пока не представляется возможным. Необходимы дальнейшие исследования.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета. В расчетах использовали степенную зависимость числа циклов до разрушения N_f от размаха эквивалентной деформации $\Delta\varepsilon_{eq}$:

$$N_f = A(\Delta\varepsilon_{eq})^n, \quad (11)$$

где A и n – константы уравнения долговечности, определяемые по результатам испытаний при растяжении–сжатии; величина $\Delta\varepsilon_{eq}$ принималась равной эквивалентному размаху деформации при непропорциональном нагружении $\Delta\varepsilon_{NP}$.

Расчеты выполняли как по модифицированному уравнению (10), так и по исходному уравнению Ито–Сакане–Онами–Соси (2). Сравнение полученных результатов и их корреляция с экспериментальными данными приведены на рис. 4.

Выводы

1. Предложена методика оценки долговечности металлических материалов в условиях сложного циклического упругопластического деформирования, которая базируется на модифицированном критерии Ито–Сакане–Онами–Соси.
2. Показано, что методика может использоваться для оценки долговечности металлических сплавов с разной структурой в условиях многоосного циклического упругопластического деформирования как при пропорциональном, так и при непропорциональном нагружении.

Резюме

Запропоновано методику оцінки довговічності різних металевих сплавів із різною структурою при непропорційному малоцикловому навантаженні, яка базується на еквівалентній деформації типу Писаренка–Лебедева і коригуючій функції, що враховує такі ефекти непропорційного навантаження, як додаткове зміцнення і зниження довговічності при деформуванні за непропорційними траєкторіями. Розрахункові результати зіставляються з експериментальними, що отримані різними дослідниками на сталях, титанових, нікелевих і алюмінієвих сплавах. Отримано хороший збіг результатів для всіх досліджуваних матеріалів і траєкторій деформування. Похибка розрахунку при непропорційному навантаженні практично збіглася з такою при пропорційному.

1. Kanazawa K., Miller K. J., and Brown M. W. Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions // Trans. ASME J. Eng. Mater. Techn. – 1977. – 99. – P. 222 – 228.

2. *Можаровский Н. С., Шукаев С. Н.* Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения // Пробл. прочности. – 1988. – № 10. – С. 47 – 54.
3. *Socie D. F., Kurath P., and Koch J.* A multiaxial fatigue damage parameter. Biaxial and multiaxial fatigue / M. W. Brown and K. J. Miller (Eds.). – London: Mechanical Engineering Publications, 1989. – P. 535 – 550.
4. *Doong S. H., Socie D. F., and Robertson I. M.* Dislocation substructures and nonproportional hardening // ASME J. Eng. Mater. Techn. – 1990. – **112**, No. 4. – P. 456 – 464.
5. *Апайчев М. В., Иванов И. А., Понькин А. П.* Моделирование эффектов изотропного упрочнения при непропорциональном циклическом нагружении // Пробл. прочности. – 1991. – № 7. – С. 47 – 51.
6. *Itoh T., Sakane M., Ohnami M., and Socie D. F.* Nonproportional low-cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel // ASME J. Eng. Mater. Techn. – 1995. – **117**, No. 3. – P. 285 – 292.
7. *Itoh T., Nakata T., Sakane M., and Ohnami M.* Nonproportional low-cycle fatigue of 6061 aluminium alloy under 14 strain paths: 5th Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture. – Cracow'97, Poland.
8. *Шукаев С. Н.* Деформирование и долговечность титанового сплава ВТ9 в условиях непропорционального малоциклового нагружения // Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 46 – 54.
9. *Chen X., An K., and Kim K. S.* Low-cycle fatigue of 1Cr–18Ni–9Ti stainless steel and related weld metal under axial, torsional and out-of-phase loading // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2004. – **27**. – P. 439 – 448.
10. *Nitta A., Ogata T., and Kuwabara K.* The effect of axial-torsional straining phase on elevated-temperature biaxial low-cycle fatigue life in SUS 304 stainless steel // J. Soc. Mater. Sci. – 1987. – **36**, No. 403. – P. 376 – 382.
11. *Шукаев С. М., Гладський М. М.* Малоциклова утома титанового сплаву ВТ1-0 в умовах пропорційного та непропорційного навантаження // Наук. вісті НТУУ “КПІ”. – 2005. – Вип. 6. – С. 86 – 92.
12. *Шукаев С.* Критерії малоциклової утоми при непропорційному навантаженні // машинознавство. – 1997. – № 3. – С. 6 – 9.
13. *Шукаев С. Н., Заховайко А. А., Гладский М. Н., Панасовский К. В.* Оценка критериев малоциклового усталости при многоосном нагружении // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2004. – № 2. – С. 127 – 135.
14. *Бородий М. В.* О разработке деформационного критерия малоциклового усталости // Пробл. прочности. – 2001. – № 3. – С. 28 – 37.

Поступила 15. 05. 2006