

Об одном методе определения долговечности при непропорциональном малоцикловом нагружении

С. Н. Шукаев, С. В. Окснюк

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

Рассматривается метод оценки долговечности при многоосном непропорциональном малоцикловом нагружении, основанный на концепции эквивалентных деформаций. Размах эквивалентной деформации является функцией только траектории деформаций и имеет постоянную, которая зависит от дополнительного упрочнения материала при непропорциональном нагружении. Предложен новый параметр материала, который универсален в случае применения к материалам как с малым, так и с большим дополнительным упрочнением. В его основу положена работа пластических деформаций за цикл. Параметр материала хорошо согласуется с результатами испытаний нержавеющей стали 08X18H10T и титанового сплава ВТ9 при непропорциональном малоцикловом нагружении.

Введение. Оценка циклической прочности материала в условиях многоосного напряженного состояния производится, как правило, в соответствии с принципом эквивалентности. Согласно последнему, мера повреждения двух элементов конструкций – равная, если для моментов нагружения, которые сравниваются, они имеют одинаковый запас по долговечности или прочности. Тогда, при наличии соответствующего условия эквивалентности, можно произвольное сложное напряженное состояние привести к эквивалентному (обычно линейному) напряженному состоянию.

Оценка долговечности осуществляется по следующей схеме. Сначала, на основании принятой теории предельных состояний, определяют размах эквивалентного напряжения либо эквивалентной деформации (в некоторых случаях используют параметры смешанного типа, например работа на пластических деформациях за цикл), затем данный параметр подставляют в соответствующее уравнение кривой усталости для одноосного напряженного состояния. Как правило, используют условия эквивалентности, являющиеся результатом обобщения классических теорий статической прочности, которые не учитывают истории нагружения. Ранее [1, 2] показано, что оценка долговечности по вышеприведенной схеме хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований малоцикловой усталости различных металлических сплавов только для режимов пропорционального нагружения, в то время как для непропорционального малоциклового нагружения подобные эквивалентные параметры неприменимы.

Исследования последних десятилетий в области малоциклового непропорционального нагружения позволили авторам работы [3] предложить достаточно простой метод определения эквивалентных деформаций при непропорциональном малоцикловом нагружении. Они пришли к заключению, что эквивалентную деформацию, соответствующую стабилизированному циклу непропорционального нагружения, можно представить как функцию двух параметров: параметра непропорциональности, зависящего только от

формы траектории деформирования, и постоянной материала, характеризующей чувствительность материала к такому фактору, как непропорциональность нагружения.

Цель настоящей работы состояла в выяснении применимости данного подхода к оценке долговечности металлических сплавов, обладающих различной чувствительностью к непропорциональности нагружения.

Анализ результатов некоторых экспериментальных исследований.

Интенсивные экспериментальные исследования, проведенные в последние 20 лет, позволили обнаружить существенные отличия в поведении материалов, подвергаемых пропорциональному и непропорциональному повторно-переменному нагружению. Так, установлено, что при сложном циклическом деформировании некоторые металлические сплавы и чистые металлы (например, нержавеющие стали и медь) упрочняются значительно больше, чем при простом (эффект дополнительного упрочнения). При этом упрочнение тем больше, чем больше процесс нагружения отличается от простого. В условиях одинаковой амплитуды эквивалентной деформации различие между максимальными напряжениями в цикле может достигать 1,5...3 раза. Увеличение напряжений в цикле приводит к уменьшению долговечности, в некоторых случаях на порядок и выше [4, 5], что для ответственных конструкций может иметь катастрофические последствия.

В связи с этим активизировались работы по изучению влияния геометрии цикла на деформационное упрочнение материалов. Один из предложенных подходов предусматривает использование так называемого параметра непропорциональности процесса нагружения. Впервые такой параметр предложил Макдауэлл сначала относительно тензора скоростей деформаций [6], а затем относительно тензора пластических деформаций [7]. После его работ идея об определении меры, отражающей влияние непропорциональности нагружения на процессы деформационного упрочнения материалов, разрабатывалась многими исследователями. Предложено ряд иных подходов к построению параметра непропорциональности. Однако, как свидетельствует анализ [8] работ, посвященных этому вопросу, в настоящее время не существует единого мнения о наиболее оптимальной структуре данного параметра.

Известные исследования свидетельствуют о том, что степень дополнительного упрочнения зависит не только от геометрии траектории нагружения, но и от типа материала. Так, в [9] показано, что в образцах из алюминиевого сплава 6061-T6 как пропорциональное, так и непропорциональное циклическое нагружение вызывает одинаковое деформационное упрочнение. Авторы работы [10] изучали вопрос о существовании зависимости между микроструктурой материала и процессом дополнительного циклического упрочнения. Объектом исследования служили алюминиевый сплав Al 1100, чистая медь, нержавеющие стали 304 и 310, т.е. материалы, у которых под действием пропорционального нагружения развиваются разные типы дислокационного скольжения. Эксперименты показали, что в алюминиевом сплаве дополнительное упрочнение практически отсутствует, для меди оно составляет 30%, а для нержавеющих сталей – 50%. Аналогичные результаты получены и в других работах.

Общая структура расчетных зависимостей. Основываясь на том, что небольшое дополнительное упрочнение не оказывает почти никакого влияния на долговечность при непропорциональной малоцикловой усталости, а значительное дополнительное упрочнение приводит к существенному уменьшению усталостной долговечности, авторы работы [3] предложили включить в выражение для эквивалентного размаха деформации $\Delta\varepsilon_{NP}$ при непропорциональном малоцикловом нагружении постоянную материала, характеризующую величину дополнительного упрочнения:

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

где α – постоянная материала, зависящая от величины дополнительного упрочнения; f_{NP} – параметр непропорциональности процесса нагружения, отражающий сложность траектории деформирования; $\Delta\varepsilon_I$ – максимальный размах главной деформации.

Отличительной особенностью предложенного [3] параметра непропорциональности является то, что он основывается только на истории изменения главных деформаций:

$$f_{NP} = \frac{k}{T\varepsilon_{I\max}} \int_0^T (|\sin \xi(t)| \varepsilon_1(t)) dt, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1(t)$ – максимальная абсолютная величина главной деформации в момент времени t , которая определяется из уравнения

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} |\varepsilon_1(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| \geq |\varepsilon_3(t)|; \\ |\varepsilon_3(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| < |\varepsilon_3(t)|; \end{cases} \quad (3)$$

$\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_3(t)$ – максимальное и минимальное значения главных деформаций в момент времени t ; $\varepsilon_{I\max}$ – максимальное значение $\varepsilon_1(t)$; T – продолжительность цикла; $\xi(t)$ – угол между направлениями $\varepsilon_{I\max}$ и $\varepsilon_1(t)$; $k = \pi/2$ – постоянная, необходимая для приведения значения f_{NP} к единице при деформировании по круговой траектории. В условиях пропорционального нагружения $f_{NP} = 0$.

Постоянная материала α определяется из соотношения

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

где $\sigma_s(1)$ и $\sigma_s(0)$ – соответственно амплитуды эквивалентных напряжений в цикле при нагружении с параметром непропорциональности $f_{NP} = 1$ (круговая траектория в пространстве деформаций $\gamma/\sqrt{3} - \varepsilon$) и пропорционального нагружения ($f_{NP} = 0$) при одном и том же значении размаха эквивалентной деформации. Выбор круговой траектории в качестве предельной

обусловлен тем экспериментальным фактом, что именно для этой траектории, реализованной в пространстве полных либо пластических деформаций типа Мизеса, наблюдается максимальное дополнительное упрочнение.

Максимальный размах главной деформации определяется как

$$\Delta \varepsilon_1 = \max [\varepsilon_{1\max} - \cos \xi(t) \varepsilon_1(t)]. \quad (5)$$

На рис. 1 схематично изображена связь между $\varepsilon_1(t)$ и $\xi(t)$. Размах главной деформации $\Delta \varepsilon_1$ определяется по двум значениям деформаций $\varepsilon_1(A) = \varepsilon_{1\max}$ и $\varepsilon_1(B)$ и углу между ними, где A и B – моменты времени, соответствующие максимуму размаха главной деформации за цикл.

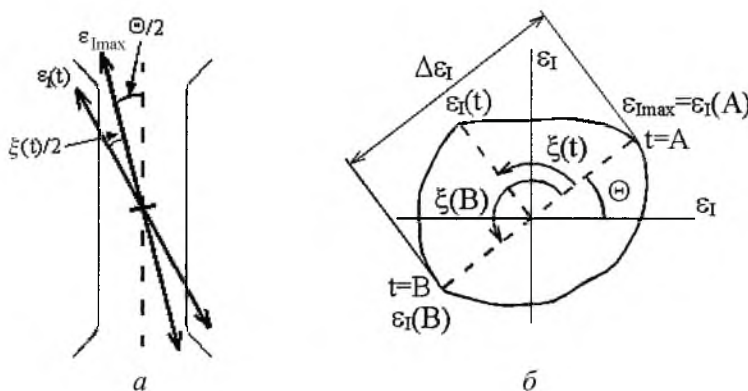


Рис. 1. Геометрическая интерпретация параметров $\varepsilon_1(t)$, $\xi(t)$ и $\Delta \varepsilon_1$: a – трубчатый образец; b – изменение максимальной абсолютной величины главной деформации ε_1 за цикл в полярных координатах.

Таким образом, вышеприведенные зависимости дают полное представление о процедуре вычисления размаха эквивалентной деформации при непропорциональном нагружении.

Сопоставление расчетных результатов с экспериментальными.

Апробация данного подхода проводилась на различных материалах как с большим дополнительным упрочнением (сталь 304 [3]), так и не очень (алюминиевый сплав 6061 [11]). В обоих случаях получены удовлетворительные результаты. Однако экспериментальные данные свидетельствуют, что для ряда материалов (например, сплав Inconel 718 [12] или титановый сплав ВТ9 [2]) при непропорциональном циклическом нагружении наблюдается падение долговечности в случае отсутствия дополнительного упрочнения. Очевидно, что для таких материалов постоянная $\alpha = 0$ и соответственно уравнение (1) приводится к случаю пропорционального нагружения, т.е. падение долговечности вследствие непропорциональности нагружения не учитывается.

Обработка результатов испытаний образцов из титанового сплава ВТ9 на малоцикловую усталость при двухосном (растяжение–сжатие с кручением) непропорциональном нагружении с контролем по полным деформациям показала следующее [2]. Во-первых, зафиксировано снижение долго-

вечности при непропорциональных режимах нагружения в сопоставлении с растяжением–сжатием, которое при одной и той же амплитуде эквивалентной деформации типа Мизеса достигало двух раз. Во-вторых, установлено, что отсутствует эффект дополнительного упрочнения. В-третьих, при переходе от пропорциональных режимов нагружения к непропорциональным имело место существенное изменение амплитуд пластических деформаций, что приводило к увеличению суммарной площади диаграмм деформирования.

Падение долговечности, видимо, связано с увеличением работы на пластических деформациях за цикл, которая в определенном масштабе соответствует суммарной площади циклических диаграмм деформирования. Площади петель упругопластического гистерезиса при непропорциональном нагружении заметно (в 1,4...2,6 раза) превышали соответствующие величины при пропорциональном нагружении. Это несколько меньше, чем, например, у нержавеющей стали 08X18H10T [5], где увеличение суммарной работы на пластических деформациях при нагружении по траектории в виде квадрата относительно растяжения–сжатия достигало 3,6 раза.

Из приведенных данных следует, что в условиях нагружения с контролем по полным деформациям постоянная α должна наряду с дополнительным упрочнением учитывать и изменение пластической деформации в цикле. В качестве интегральной характеристики, учитывающей изменения в цикле как деформаций, так и напряжений, можно выбрать работу на пластических деформациях за цикл W . Для рассматриваемого случая нагружения работа на пластических деформациях за цикл вычисляется как суммарная площадь петель гистерезиса растяжения–сжатия и кручения:

$$W = \int_{\text{цикл}} \sigma d\varepsilon_p + \int_{\text{цикл}} \tau d\gamma_p, \quad (6)$$

где σ и τ – текущие компоненты тензора напряжений; ε_p и γ_p – текущие компоненты тензора пластических деформаций.

Таким образом, чтобы применить данный подход к оценке долговечности материалов, аналогичных сплаву ВТ9, необходимо постоянную α в уравнении (1) заменить другой характеристикой материала, например β , которую определяем через энергетические параметры:

$$\beta = \frac{W(1) - W(0)}{W(0)}, \quad (7)$$

где $W(1)$ и $W(0)$ – соответственно значения суммарной работы на пластических деформациях за цикл в условиях непропорционального (по круговой траектории, $f_{NP} = 1$) и пропорционального ($f_{NP} = 0$) нагружения при одном и том же значении размаха эквивалентной деформации. Тогда уравнение (1) можно записать так:

$$\Delta e_{NP} = (1 + \beta f_{NP}) \Delta \varepsilon_I. \quad (8)$$

Сопоставление экспериментальных данных, полученных на образцах из титанового сплава ВТ9 и нержавеющей стали 08Х18Н10Т, с расчетными, выполненными по уравнению (8), показало хорошее соответствие между ними.

В экспериментах на трубчатых образцах из титанового сплава ВТ9 [1] нагружение осуществлялось со сдвигом по фазе ($\theta = \pi / 2$) между деформациями ε и γ при постоянном соотношении размахов деформаций $\lambda = \Delta\gamma / \Delta\varepsilon = 2,4$ на трех уровнях размаха эквивалентной деформации в цикле по критерию Мизеса

$$\Delta e = \max \left[\sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + \frac{1}{3}(\gamma_A - \gamma_B)^2} \right] = \text{const.} \quad (9)$$

Испытания на образцах из стали 08Х18Н10Т проводили по замкнутым ломаным траекториям в пространстве полных деформаций $\varepsilon \sim \gamma / \sqrt{3}$. При этом осевая ε и сдвиговая γ деформации изменялись по пилообразным симметричным циклам. При испытаниях поддерживали постоянными параметры, которые определяли форму траектории деформирования, а именно: соотношение $\lambda = \Delta\gamma / \Delta\varepsilon$, угол сдвига фаз θ и размах эквивалентной деформации Δe .

В таблице представлены результаты расчета характеристик чувствительности материала α и β к непропорциональности нагружения. Величину $W(1)$ определяли согласно данным испытаний по круговой траектории деформирования в пространстве полных деформаций $\varepsilon \sim \gamma / \sqrt{3}$. Для сплава ВТ9 приведено выборочное среднее значение $W(1)$, полученное экспериментально, в то время как для стали 08Х18Н10Т – расчетное значение, определенное из следующего уравнения линейной аппроксимации:

$$W(f_{NP}) = [W(1) - W(0)]f_{NP} + W(0), \quad (10)$$

где $W(f_{NP})$ – работа на пластических деформациях за цикл при заданном параметре непропорциональности f_{NP} . При этом использовали значения $f_{NP} = 0,772$, полученное из уравнения (2), и $W(0,772) = 8,8$ МДж/м³, определенное экспериментально.

Результаты расчета характеристик чувствительности материалов к непропорциональности нагружения

Материал	$\Delta e, \%$	$W(0),$ МДж/м ³	$W(1),$ МДж/м ³	β	α
Сплав ВТ9	2,0	9,1	13,10	0,44	0
Сталь 08Х18Н10Т	1,0	4,6	10,03	1,18	0,95

Аналогично при определении постоянной α вычислена величина $\sigma_s(1)$ из предложенного в [8] уравнения:

$$\sigma_s(f_{NP}) = [\sigma_s(1) - \sigma_s(0)]f_{NP} + \sigma_s(0). \quad (11)$$

Работу $W(0)$ на пластических деформациях за цикл при пропорциональном нагружении определяли из эксперимента на чистое знакопеременное кручение. Следует отметить, что для рассматриваемых сплавов она зависит от вида напряженного состояния и существенно отличается при таких режимах нагружения, как растяжение–сжатие и знакопеременное кручение. Выбор знакопеременного кручения в качестве базового основан на лучшем соответствии расчетных данных результатам эксперимента, которое при этом получено.

Как видно из данных таблицы, постоянные α и β для стали 08X18H10T не равны между собой, хотя и достаточно близки. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений долговечности показало, что для стали 08X18H10T лучшие результаты достигаются при использовании постоянной α . Однако уравнение (8), где использована постоянная β , при оценке долговечности образцов из указанной стали также дало неплохие результаты. В этом можно убедиться, если проанализировать рис. 2 и 4,а. Что же касается сплава ВТ9, то в этом случае уравнению (8) нет альтернативы.

Рис. 2 и 3 иллюстрируют результаты изменения долговечности стали 08X18H10T и сплава ВТ9 в зависимости от амплитуд эквивалентных деформаций $\Delta e/2$ и $e_{NP} = \Delta e_{NP}/2$. Видно, что для обоих сплавов данные, представленные в координатах $e_{NP} - N$, укладываются в узкую полосу разброса, что свидетельствует о применимости рассматриваемого подхода.

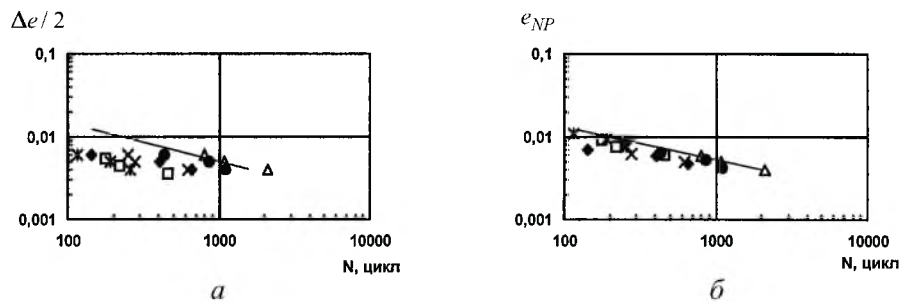


Рис. 2. Изменение долговечности стали 08X18H10T в зависимости от эквивалентных деформаций $\Delta e/2$ и e_{NP} (♦ – $\theta = 45^\circ, \lambda = 1/4$; □ – $\theta = 45^\circ, \lambda = 1$; △ – $\theta = 45^\circ, \lambda = 4$; × – $\theta = 90^\circ, \lambda = 1/4$; * – $\theta = 90^\circ, \lambda = 1$; ● – $\theta = 90^\circ, \lambda = 4$). (Здесь и на рис. 3: сплошные линии соответствуют кривой усталости при одноосном растяжении–сжатии.)

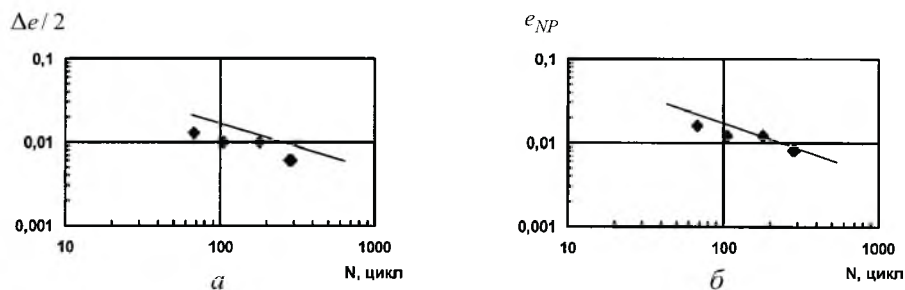


Рис. 3. Изменение долговечности сплава ВТ9 в зависимости от эквивалентных деформаций $\Delta e/2$ и e_{NP} (♦ – $\theta = 90^\circ, \lambda = 2,42$).

Расчет числа циклов до разрушения N_p выполняли путем подстановки амплитуды эквивалентной деформации e_{NP} в уравнения кривой малоциклового усталости, полученные по методу наименьших квадратов при обработке данных испытаний на растяжение–сжатие. Для сплава ВТ9 уравнение долговечности записывается так:

$$\lg N_p = 2,445 - 2,019(\lg e_{NP} + 2,075); \quad (12)$$

для нержавеющей стали 08X18H10T –

$$\lg N_p = 2,838 - 3,461(\lg e_{NP} + 2,313). \quad (13)$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений долговечности показано на рис. 4, из которого следует, что рассмотренная методика оценки долговечности оказалась достаточно эффективной для исследуемых сплавов, хотя они являются контрастными по чувствительности к непропорциональности нагружения.

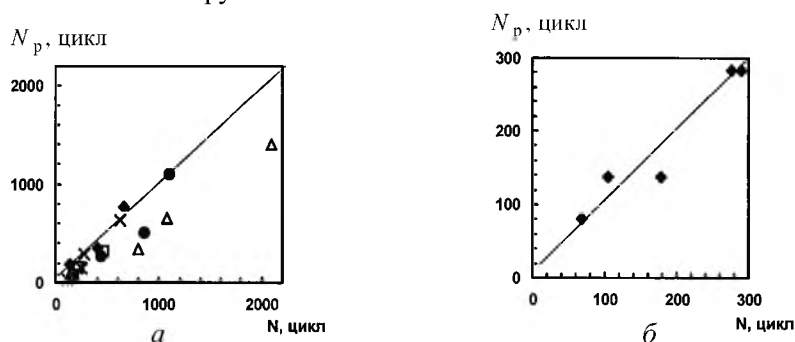


Рис. 4. Корреляция опытных N и расчетных N_p значений долговечности стали 08X18H10T (а) и сплава ВТ9 (б).

Заключение. Анализ приведенных результатов свидетельствует о том, что предложение авторов работы [3] о представлении эквивалентной деформации при непропорциональном нагружении в виде функции параметра непропорциональности и постоянной материала, связанной с величиной дополнительного упрочнения, является весьма эффективным при оценке долговечности в условиях непропорционального малоциклового нагружения. Сделанное в настоящей работе предложение об определении постоянной материала через величину работы на пластических деформациях за цикл позволяет распространить данный подход на материалы, у которых эффект дополнительного упрочнения слабо выражен или отсутствует.

Резюме

Розглянуто метод оцінки довговічності при багатовісному непропорційному малоцикловому навантаженні. Метод ґрунтується на концепції еквівалентних деформацій. Розмах еквівалентної деформації є функцією тільки траєкторії деформації і має сталу, яка залежить від додаткового зміцнення мате-

ріалу при непропорційному навантаженні. Запропоновано новий параметр матеріалу, який є універсальним при застосуванні до матеріалів як із малим, так і з великим додатковим зміцненням. В його основу покладено роботу пластичних деформацій за цикл. Параметр матеріалу добре корелює з результатами випробувань нержавіючої сталі 08X18H10T та титанового сплаву ВТ9 при непропорційному малоцикловому навантаженні.

1. *Шукаєв С. М.* Визначення довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного малоциклового навантаження // *Машинознавство*. – 1999. – № 6. – С. 7 – 13.
2. *Шукаєв С. М.* Критерії граничного стану металевих сплавів при дво-вісному малоцикловому навантаженні: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Київ, 1996. – 32 с.
3. *Itoh T., Sakane M., Ohnami M., and Socie D. F.* Nonproportional low-cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel // *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.* – 1995. – **117**, No. 3. – P. 285 – 292.
4. *Kanazawa K., Miller K. J., and Brown M. W.* Low-cycle fatigue under out-phase loading conditions // *Ibid.* – 1977. – **99**. – P. 222 – 228.
5. *Можаровский Н. С., Шукаев С. Н.* Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения // *Пробл. прочности*. – 1988. – № 10. – С. 47 – 54.
6. *McDowell D. L.* A two surface model for transient nonproportional cyclic plasticity. Pt. 1. Development of appropriate equations // *J. Appl. Mech.* – 1985. – **52**. – P. 298 – 302.
7. *McDowell D. L.* Simple experimentally motivated cyclic plasticity model // *J. Eng. Mech.* – 1987. – **113**, No. 3. – P. 387 – 397.
8. *Бородий М. В.* К вопросу об определении коэффициента непропорциональности цикла // *Пробл. прочности*. – 1995. – № 5-6. – С. 29 – 38.
9. *Krempl E. and Lu H.* Comparison of the stress responses of an aluminum alloy tube to proportional and alternate axial and shear strain paths at room temperature // *Mech. Mater.* – 1983. – No. 2. – P. 183 – 192.
10. *Doong S. H., Socie D. F., and Robertson I. M.* Dislocation substructures and nonproportional hardening // *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.* – 1990. – **112**, No. 4. – P. 456 – 464.
11. *Itoh T., Nakata T., Sakane M., and Ohnami M.* Nonproportional low-cycle fatigue of 6061 aluminum alloy under 14 strain paths // *Proc. 5th Int. Conf. Biaxial-Multiaxial Fatigue and Fracture, Cracow*. – 1997. – Vol. 1. – P. 173 – 187.
12. *Socie D. F., Kurath P., and Koch J.* A multiaxial fatigue damage parameter // *Biaxial and multiaxial fatigue. EGF 3 / Eds. M. W. Brown and K. J. Miller*. – London: Mech. Engng. Publ., 1989. – P. 535 – 550.

Поступила 18. 05. 2000