УДК 539.43

Анализ экспериментальных данных малоцикловой усталости при непропорциональном деформировании

М. В. Бородий

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Проанализированы экспериментальные данные малоцикловой усталости при двухосном непропорциональном деформировании различных типов материалов. Предложен деформационный параметр – приведенный размах деформаций для получения корреляционной зависимости с долговечностью. Для большинства рассматриваемых материалов эта зависимость может быть получена из экспериментов на малоцикловую усталость при одноосном деформировании и описана линейной функцией.

Введение. Проблема оценки долговечности материалов и конструкционных элементов современной техники – одна из самых важных прикладных задач механики сплошной среды. Повышенные требования прочности и экономичности, предъявляемые к таким конструкциям, обусловливают необходимость интенсивного изучения влияния на работоспособность материала всех повреждающих факторов. К таким факторам в первую очередь относятся цикличность нагружения, многоосность и нерегулярность изменения нагрузки. В области малоцикловой усталости при деформировании за пределом упругости циклически нестабильных материалов указанные режимы нагружения серьезно влияют на их долговечность, уменьшая ее.

В конце 80-х годов были проведены многочисленные экспериментальные исследования влияния многоосности (непропорциональности) деформирования на напряженное состояние металлов [1–3]. Выявлены основные эффекты и закономерности, обусловленные изменением дислокационной структуры и проявляющиеся в изменении процессов упрочнения при сложном нагружении [4]; предложены параметры, с помощью которых можно учитывать дополнительное упрочнение [5, 6], а также модели пластичности для описания напряженно-деформированного состояния с учетом влияния предыстории деформирования [3, 7]. Следующий важный этап исследований в этом направлении – экспериментальное и теоретическое изучение влияния непропорциональности траектории деформирования на предельное состояние материалов в случае усталостного нагружения, позволяющее оценить долговечность при режимах нагружения, близких к эксплуатационным, и построить более общие критерии малоцикловой усталости [8].

Для оценки предельного состояния материалов в теории малоцикловой усталости применяются критерии четырех групп: деформационные, силовые, энергетические и критерии, основанные на учете поврежденности материала. Наиболее широкое распространение в расчетной практике получили деформационные и энергетические критерии.

Деформационные критерии базируются на том, что при жестком режиме нагружения участок квазистатического разрушения на кривых малоцикловой усталости отсутствует, поэтому предельное состояние материала

© М. В. БОРОДИЙ, 2000

может оцениваться амплитудными (размаховыми) значениями полной деформации, ее упругой или пластической составляющими [9]. Однако если для одноосного или пропорционального деформирования данные критерии достаточно эффективны и просты, то при многоосном малоцикловом нагружении они не всегда дают приемлемые результаты.

В соответствии с энергетическими критериями, предельное состояние в материале наступает в том случае, когда суммарная энергия, связанная с его упрочнением, достигает критического значения. В связи с этим энергетический подход к оценке усталостного повреждения и разрушения металлов является более общим, поскольку использует в качестве меры повреждения материала удельную рассеянную энергию или удельную работу пластической деформации за цикл нагружения. Последнее обстоятельство немаловажно при рассмотрении двухосной или многоосной усталости, когда циклическим траекториям с одним и тем же размахом деформаций, но с разной формой цикла соответствуют различные уровни долговечности.

Практическое использование энергетических критериев применительно к непропорциональному деформированию, обусловливает особые требования к выбору той или иной теории пластичности для более точного прогнозирования петель упругопластического гистерезиса, а также сопряжено с некоторыми трудностями при расчете удельной работы пластической деформации.

Попытки преодоления недостатков деформационного и энергетических подходов привели к разработке модифицированных деформационных критериев, позволяющих учитывать как влияние амплитуды деформаций, так и дополнительное упрочнение, сильно выраженное при непропорциональном деформирования.

Настоящая работа посвящена анализу опубликованных в последнее время экспериментальных результатов исследования поведения различных металлических материалов при двухосной малоцикловой усталости и разработке на их основе подходов для создания эффективного модифицированного деформационного критерия.

Эксперимент. Для получения достоверных результатов используем экспериментальные данные разных авторов о малоцикловой усталости при двухосном деформировании различных по циклическим свойствам материалов. В работе [4] представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость по симметричному циклу трубчатых образцов из алюминия, меди и нержавеющей стали типа 310 с постоянной амплитудой деформирования при различных уровнях полных деформаций для пропорциональных (чистое кручение – на рис. 1 поз. *1* и кручение с растяжением–сжатием – *7*) и непропорциональной (круг – *15*) траекторий деформирования. Разрушение определялось как резкое снижение нагрузки на 10% по сравнению со стабилизированным состоянием. Другой экспериментальный материал, используемый для анализа, взят из работы [10] и охватывает 14 циклических траекторий (на рис. 1, *2–15*) для трех уровней размахов полных деформаций применительно к нержавеющей стали типа 304 и алюминиевого сплава 6061. В обоих случаях реализовывалось знакопеременное двухосное нагружение растяжением–сжатием и кручением с контролем по эквивалентным полным деформациям, определяемым критерием Мизеса.

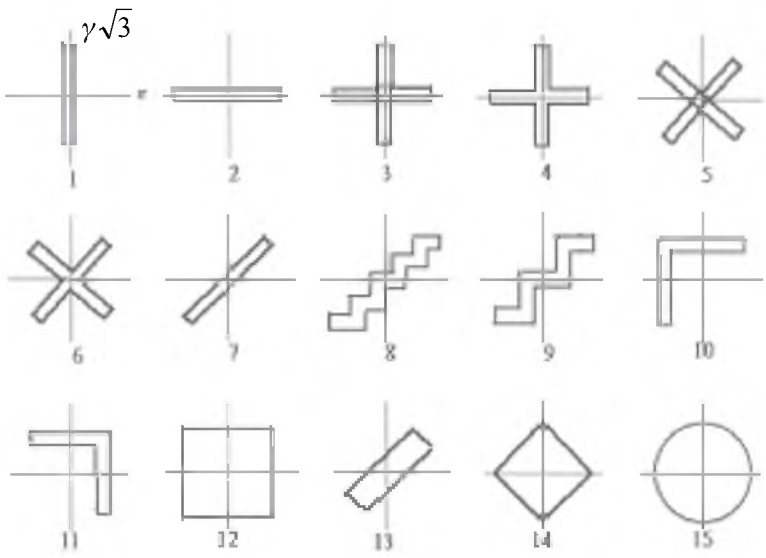

Рис. 1. Пропорциональные и непропорциональные траектории цикла.

Малоцикловая усталость при непропорциональном деформировании в рамках изотропной модели. В случае одноосного деформирования в теории малоцикловой усталости обычно используют зависимость долговечности от размаха (амплитуды) эквивалентных деформаций. При непропорциональном деформировании такую зависимость трудно получить без учета деформационного упрочнения. Известно, что при непропорциональном деформировании долговечность при малоцикловой усталости уменьшается с увеличением дополнительного упрочнения, вызванного влиянием как размаха деформаций, так и формы траектории цикла. Для учета влияния траектории деформирования предложено ряд параметров, которые получили название коэффициент (параметр, фактор) непропорциональности и должны устанавливать однозначную зависимость между траекторией цикла и деформационным упрочнением. Часть из них строится с помощью компонентов тензора напряжений [5], другие используют смешанную схему, где присутствуют как компоненты напряжений, так и компоненты деформаций [6], причем для их вычисления следует привлекать определяющие уравнения теории пластичности. При жестком режиме нагружения удобнее всего использовать коэффициенты непропорциональности, основанные лишь на деформационных характеристиках [3, 11]. Будем придерживаться этого положения, поскольку рассматривается именно такой случай.

Для анализа экспериментальных результатов за основу возьмем модифицированный деформационный подход [10], согласно которому экспериментальные данные малоцикловой усталости для различных непропорциональных траекторий представляются в виде зависимости приведенного размаха полных деформаций от долговечности. Приведенный размах определяется из следующего выражения:

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = (1 + \alpha f_N)\Delta\bar{\varepsilon}, \tag{1}$$

где α – константа материала, относящаяся к дополнительному упрочнению, которая определяет превышение амплитуды напряжений в стабилизированном состоянии для круговой траектории по отношению к пропорциональной траектории; f_N – коэффициент непропорциональности траектории цикла; $\Delta\bar{\varepsilon}$ – максимальный размах главных деформаций.

Предложенный деформационный параметр позволил получить удовлетворительные результаты при построении корреляционной зависимости долговечности от приведенного размаха. Однако использование величины $\Delta\bar{\varepsilon}$ представляется не совсем оправданным, поскольку в литературе принято стандартное определение размаха деформаций применительно к двухосному нагружению [12]:

$$\Delta\varepsilon = \max\left[\sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + \frac{1}{3}(\gamma_A - \gamma_B)^2}\right], \tag{2}$$

где $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ и γ_A, γ_B – соответственно осевые и сдвиговые деформации в течение времени A и B. По-видимому, необходимость введения параметра $\Delta\varepsilon$ обусловлена тем, что в выражении (1) [10] использован коэффициент непропорциональности вида

$$f_N = \frac{k}{T\varepsilon_{1\max}} \int_0^T \left|\sin\xi(t)\right| \varepsilon_1(t)\, dt, \tag{3}$$

который, по утверждению авторов, дает погрешность до 15% при определении дополнительного упрочнения.

Сохраняя общий вид выражения (1), используем стандартное определение размаха деформаций (2) и коэффициент непропорциональности цикла, предложенный ранее [11]. Отметим лишь, что последний позволяет определять дополнительное упрочнение с погрешностью до 7%. Тогда

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = (1 + \alpha\Phi)\Delta\varepsilon, \tag{4}$$

а коэффициент непропорциональности определяется выражением

$$\Phi = \left(\left|\oint_{L'} \mathbf{e} \times d\mathbf{e}\right| \Big/ \left|\oint_{L_0} \mathbf{e} \times d\mathbf{e}\right|\right)^r, \tag{5}$$

$$r = \frac{l}{4\Delta\varepsilon}\left(1 - \left|\oint_{L} \mathbf{e} \times d\mathbf{e}\right| \Big/ \left|\oint_{L_0} \mathbf{e} \times d\mathbf{e}\right|\right), \tag{6}$$

где l – длина траектории цикла.

Заметим, что соотношение (4) позволяет получить деформационный параметр, который зависит от двух определяющих факторов: размаха деформаций и коэффициента непропорциональности цикла. В случае пропорционального нагружения, когда $\Phi = 0$, приведенный размах сводится к обычному размаху деформаций. Поскольку данный подход ограничен изотропным критерием Мизеса, произвольному пропорциональному деформированию независимо от вида напряженного состояния будут соответствовать одни и те же уровни долговечностей.

Малоцикловая усталость при непропорциональном деформировании в рамках обобщенной модели. Чаще всего на практике реальные материалы проявляют анизотропию циклических свойств, причем даже при пропорциональном деформировании в зависимости от вида напряженного состояния долговечность может отличаться на порядок, о чем свидетельствуют также используемые нами экспериментальные данные. Так, для стали 304 долговечность при пропорциональном деформировании в случае растяжения–сжатия почти в два раза выше, чем при совместном действии растяжения–сжатия и кручения. Для стали 310 характерна противоположная тенденция: долговечность при чистом кручении на порядок выше долговечности при совместном действии растяжения–сжатия и кручения. Отметим также, что подобные тенденции сохраняются и для непропорциональных траекторий в случае поворота последних на те же углы, что и при пропорциональном деформировании.

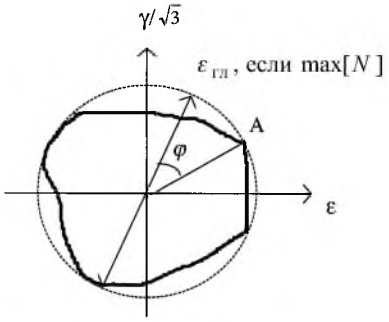

Рис. 2. Схема главного направления и произвольной траектории цикла.

Чтобы предложить деформационный параметр, аналогичный рассмотренному в предыдущем разделе, введем в уравнение (4) выражение, учитывающее ориентацию циклической траектории относительно главной оси, что при пропорциональном нагружении аналогично учету угла вида деформированного состояния. Определим главную ось по пропорциональной траектории, на которой реализуется максимальный размах эквивалентных деформаций и достигается максимальная долговечность. Для стали 304 – это направление растяжения–сжатия, для стали 310 – направление чистого кручения. Приведенный размах деформаций будет описываться выражением

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = (1 + k\sin\varphi)(1 + \alpha\Phi)\Delta\varepsilon, \qquad (7)$$

где k – константа материала, характеризующая анизотропию циклических свойств (по долговечности) для пропорциональных траекторий; φ – угол ориентации траектории цикла по отношению к главной оси (рис. 2). Тогда, например, для стали 304 траектории цикла *1* (рис. 1) соответствует угол $\varphi = 90^{\circ}$, траектории цикла *2* – $\varphi = 0$, а траектории цикла *7* – $\varphi = 45^{\circ}$. Аналогично для непропорциональных траекторий *3*, *4*, *14*, *15* – $\varphi = 0$, траекториям *5–12* соответствует $\varphi = 45^{\circ}$, а *13* – $\varphi = 30^{\circ}$.

Анализ экспериментальных результатов. Для представления экспериментальных данных двухосной малоцикловой усталости воспользуемся выражениями (4) и (7). Рис. 3–7 иллюстрируют корреляцию приведенного размаха деформаций с долговечностью для широкого класса непропорциональных траекторий в логарифмических координатах.

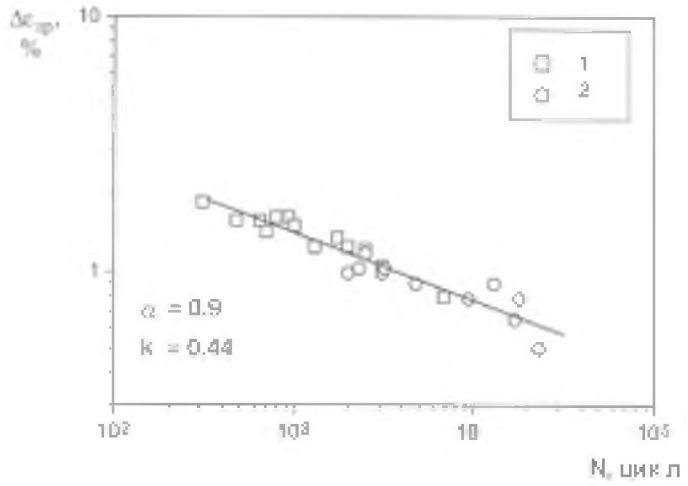

Рис. 3. Зависимость приведенного размаха деформаций от долговечности стали 304 для траекторий *2–15*: *1* – $\Delta\varepsilon = 0{,}8\%$; *2* – $\Delta\varepsilon = 0{,}5\%$.

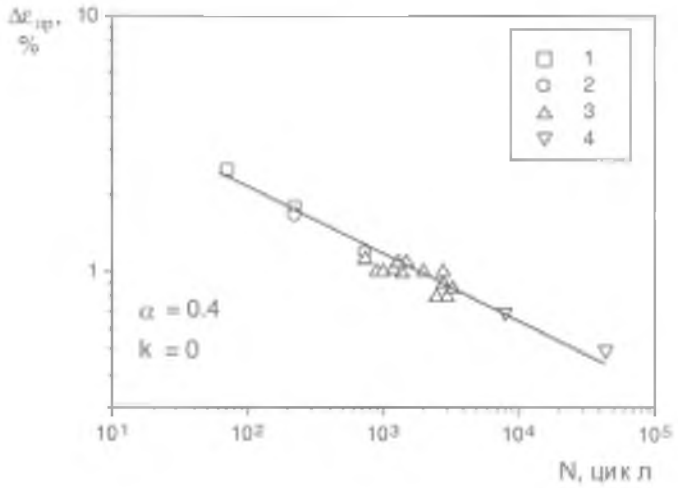

Рис. 4. Зависимость приведенного размаха деформаций от долговечности алюминиевого сплава 6061 для траекторий *2–15*: *1* – $\Delta\varepsilon = 1{,}8\%$; *2* – $\Delta\varepsilon = 1{,}2\%$; *3* – $\Delta\varepsilon = 0{,}8\%$; *4* – $\Delta\varepsilon = 0{,}5\%$.

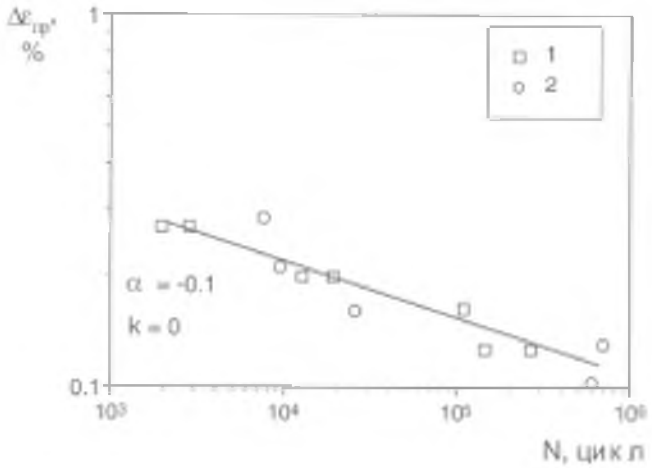

Рис. 5. Зависимость приведенного размаха деформаций от долговечности алюминия. (Здесь и на рис. 6: *1*, *2* – траектории цикла соответственно *15* и *1*.)

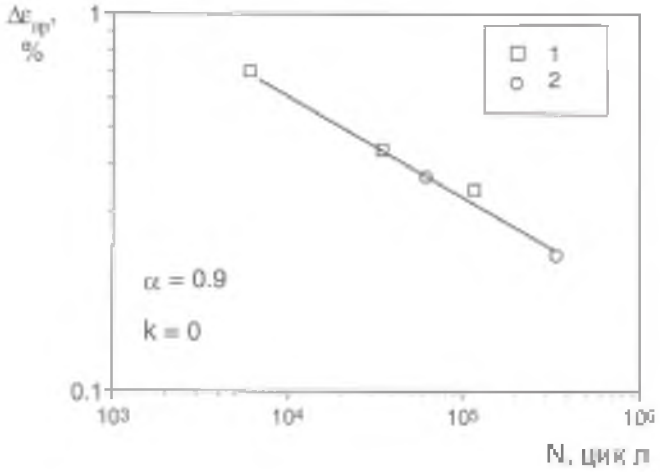

Рис. 6. Зависимость приведенного размаха деформаций от долговечности меди.

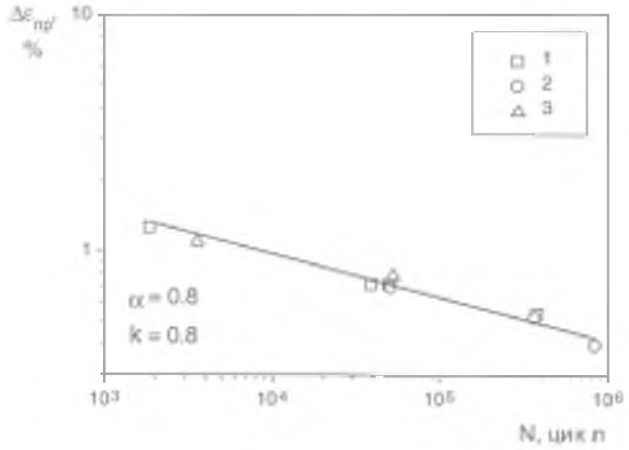

Рис. 7. Зависимость приведенного размаха деформаций от долговечности стали 310: *1*, *2*, *3* – соответственно траектории *15*, *1*, *7*.

Сталь 304 отличается значительным деформационным упрочнением (рис. 3), поэтому параметр $\alpha = 0{,}9$, а анизотропия свойств по отношению к главному направлению (траектория *2*) характеризуется максимальным значением $k = 0{,}44$. Алюминиевый сплав 6061 (рис. 4) обладает меньшей степенью упрочнения ($\alpha = 0{,}4$) и может рассматриваться как изотропный материал, поскольку значения его долговечности при растяжении–сжатии и кручении совпадают. Чистый алюминий (рис. 5) имеет низкую степень деформационного упрочнения как при пропорциональном, так и непропорциональном деформировании и считается изотропным циклически стабильным материалом. Медь, как и сталь 304, является сильно упрочняемым материалом, причем ограниченное количество экспериментальных данных (две траектории) – рис. 6 не позволяет судить о степени ее анизотропии. Поэтому принималось, что $k = 0$ и использовалась модель (4). Для стали 310 непропорциональное деформирование также приводит к значительному деформационному упрочнению (рис. 7) по сравнению с пропорциональным ($\alpha = 0{,}8$), кроме того, материал проявляет сильную анизотропию циклических свойств ($k = 0{,}8$), при этом в отличие от стали 304 главным направлением является траектория *1*.

Таким образом, параметр (7) позволяет "уложить" экспериментальные точки, соответствующие непропорциональному малоцикловому нагружению, на кривую, которая может быть получена по данным экспериментов на малоцикловую усталость при пропорциональном деформировании. Для многих конструкционных материалов такие экспериментальные зависимости давно получены и используются в нормативных документах. Следовательно, может оказаться, что с помощью модели (7) возможен прогноз долговечности для непропорционального деформирования по данным пропорционального малоциклового деформирования. Этой тематике, а также определению параметров α и k модели (7) будет посвящена следующая статья автора.

Заключение. Предложен простой деформационный параметр – приведенный размах деформаций, учитывающий деформационное упрочнение и анизотропию циклических свойств материала применительно к двухосному малоцикловому деформированию.

Для всех рассмотренных материалов (несколько в меньшей степени для чистого алюминия) удалось построить корреляционную зависимость приведенного размаха деформаций и долговечности, которая во многих случаях может быть описана линейной функцией.

Предложенный деформационный параметр позволяет использовать зависимости малоцикловой усталости, полученные из экспериментов на малоцикловую усталость при одноосном деформировании, применительно к двухосной усталости, поскольку в обоих случаях экспериментальные точки ложатся на одну кривую.

Резюме

Проаналізовано експериментальні дані малоциклової втоми під час двовісного непропорційного деформування різних типів матеріалів. Запропо-

новано деформаційний параметр – приведений розмах деформацій для отримання кореляційної залежності з довговічністю. Для більшості матеріалів, що розглянуті в роботі, ця залежність може бути отримана за результатами одновісних експериментів та описана лінійною функцією.

1. *Tanaka E., Murakami S., Ooka M.* Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity // J. Mech. Phys. Sol. – 1985. – **33**. – P. 559 – 575.
2. *Benallal A., Marquis D.* An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel under complex multi-axial loadings // Transaction 9th SMIRT. – 1987. – **L**. – P. 385 – 393.
3. *McDowell D. L.* Simple experimentally motivated cyclic plasticity model // J. Engng. Mech. – 1997. – **113**, N 3. – P. 387 – 397.
4. *Дунг, Соси, Робертсон.* Дислокационная субструктура и упрочнение при непропорциональном нагружении // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1991. – № 7. – С. 66 – 77.
5. *Беналалл, Марки.* Определяющие уравнения упруговязкопластичности для непропорционального циклического нагружения // Теорет. основы инж. расчетов. – 1988. – № 3. – С. 68 – 76.
6. *Дунг, Соси.* Разработка определяющей модели для описания поведения металлов в условиях непропорционального циклического нагружения // Современное машиностроение. – Сер. Б. – 1991. – № 5. – С. 17 – 27.
7. *Borodii M. V., Kucher N. K., Strizhalo V. A.* Development of a constitutive model for biaxial low-cycle fatigue // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 1996. – **19**, N 10. – P. 1169 – 1179.
8. *Iton T., Sakane M., Ohnami M., Socie D. F.* Nonproportional low cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel // ASME J. Engng. Mater. Tech. – 1995. – **117**, N 3. – P. 285 – 292.
9. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1994. – 701 с.
10. *Iton T., Nakata T., Sakane M., Ohnami M.* Nonproportional low cycle fatigue of 6061 aluminium alloy under 14 strain paths // 5th Int. Conf. Biaxial/Multiaxial Fatigue Fracture. – 1997. – Cracow, 8 – 12 Sept. – P. 173 – 187.
11. *Бородий М. В.* К вопросу об определении коэффициента непропорциональности цикла // Пробл. прочности. – 1995. – № 5-6. – С. 29 – 38.
12. *ASME Code Case* N-47. Case of ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47. Class 1, Section 3, Division 1, 1978.

Поступила 28. 09. 98