

УСКОРЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Важнейшей проблемой проектирования изделий машиностроения является прогнозирование долговечности, которое базируется на усталостных характеристиках материалов, чаще всего в виде кривой Веллера (в графической или аналитической форме). Для ее построения при неизвестном виде кривой усталости необходимо провести испытания сотен образцов. Постоянно и быстро расширяющаяся номенклатура применяемых материалов (особенно композитов), физико-механические характеристики которых зависят от структуры (количества слоев, их толщины и угла армирования), существенно затрудняют использование традиционных методов определения усталостных характеристик. Вместе с тем в связи с отсутствием более-менее достоверных методик прогнозирования несущей способности в условиях циклического нагружения по статическим прочностным свойствам исключительно актуальна проблема оперативного прогнозирования усталостных характеристик.

В работах [1 – 3] описан установленный факт характера изменения температуры саморазогрева пластмасс и композитов при циклическом нагружении (рис. 1). Показано, что наиболее продолжительным является участок равномерного роста температуры и составляет 60...90 % усталостной долговечности.

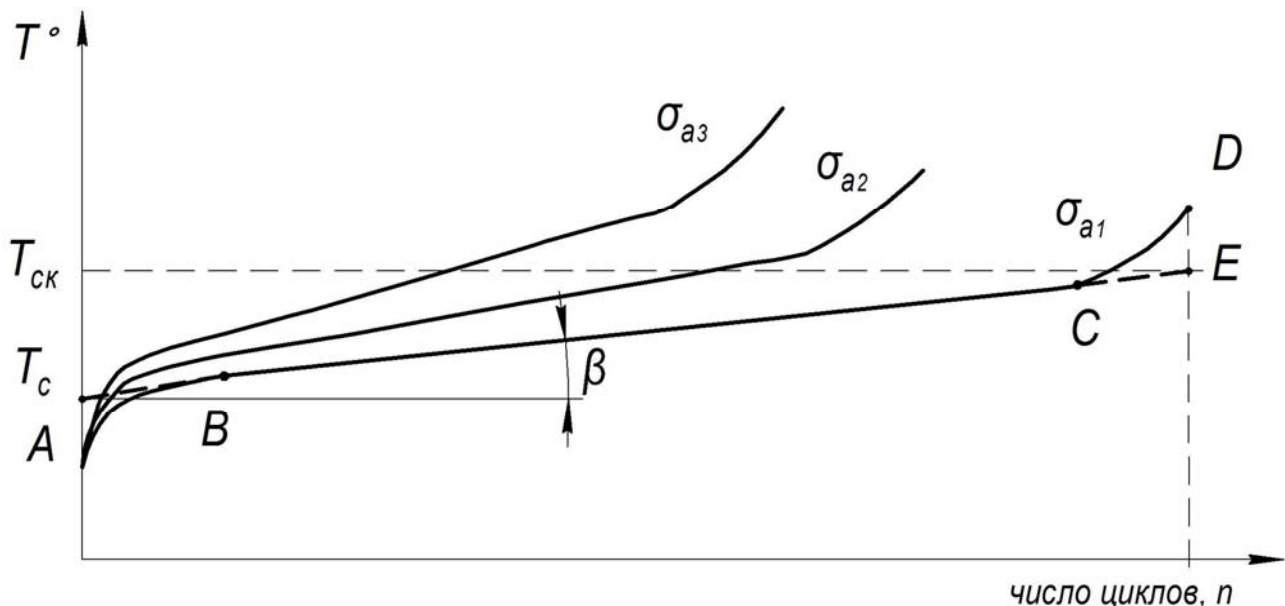


Рисунок 1 – Зависимость температуры саморазогрева от количества циклов и амплитуды напряжений

На основе этого факта в [2] предложено прогнозировать несущую способность путем линеаризации кривой $T(n)$ в виде прямой AE (см. рис. 1) и установления величины $tg\beta$ и температуры $T_{СК}$, которая, как указывает автор, не зависит от условий испытаний. Таким образом, количество испытаний ограничивается надежным определением угла β и температуры $T_{СК}$ для различных амплитудных напряжений.

В статье [4] указано, что площадь под кривой $T(n)$ (см. рис. 1) постоянна и не зависит от амплитуды напряжений, и на основе этого предложена методика ускоренного построения кривой Веллера.

Усталостное разрушение связано с появлением и ростом трещин, поэтому механике разрушения посвящено большое количество исследований, выполненных как на основе изучения напряженно-деформированного состояния в окрестности конца трещины, так и на базе феноменологических моделей, чаще всего энергетических, например [5 – 9].

Наиболее существенные результаты в механике материалов и конструкций получены на основе закона сохранения количества энергии – работа внешних сил равна энергии, накопленной в материале. В книге [7] удельная работа разрушения трактуется как остаток полной работы над системой после ее расхода на диссипацию, увеличение кинетической энергии и энергии упругих деформаций. Для статического и квазистатического нагружения изменение кинетической энергии не происходит и тогда диссипация энергии, что равносильно (соответствует) площади петли гистерезиса, согласно [10] идет на нагрев (выделяется в виде тепла), а часть (~10%) накапливается кристаллом и за ее счет увеличивается плотность дислокаций и точечных дефектов. Эту часть энергии не всегда ассоциируют с петлей гистерезиса, например, в словаре [11] площадь петли гистерезиса пропорциональна доле энергии упругости, перешедшей в тепло.

Хотя большинство авторов и исследований говорят о нагреве при циклическом нагружении и реально существующая петля гистерезиса отождествляется с диссипацией энергии в основном в виде тепла, имеются работы, в которых утверждается, что в некоторых условиях (например, при адиабатическом нагружении) упругая деформация вызывает нарушение теплового равновесия твердого тела – растянутые волокна охлаждаются, сжатые – нагреваются [12, 13]. Это явление описывается формулой Кельвина [13]

$$\frac{\Delta T}{T} = -\sigma \frac{\alpha}{c}, \quad (1)$$

где T , ΔT - температура тела и ее приращение;

σ – напряжение;

α – коэффициент линейного температурного расширения;

C – удельная (на единицу объема) теплоемкость.

В статье [13] указан интересный факт, состоящий в том, что при сжатии тела малыми нагрузками увеличение тепловой энергии на порядки больше измеряемой работы деформации.

Эти утверждения входят в кажущееся противоречие с безусловно установленным фактом наличия примерно равных петель гистерезиса как при растяжении, так и при сжатии. Разрешение этого противоречия, вероятно, состоит в том, что на уровне кристалла (зерна) нагрев или охлаждение зависят от знака напряжений, а на уровне образца, состоящего из множества кристаллов (зерен), преобладают явления внутреннего трения [10, 11, 13 – 15], а также нелинейный характер взаимодействия атомов в кристалле при изменении расстояния между ними при растяжении или сжатии.

Тип циклического нагружения (мягкий или жесткий) влияет на характер нагрева материала [3]. В режиме $\varepsilon = const$ происходит уменьшение амплитуды напряжений, а значит, и падение теплообразования. При $\sigma = const$ (мягкое нагружение) растет амплитуда деформации и, следовательно, увеличивается тепловыделение. Отсюда следует, что петли гистерезиса имеют различные площади.

О взаимосвязи нагрева и долговечности свидетельствуют исследования [1], результаты которых состоят в следующем:

- “при одном и том же напряжении скорости нагрева разных образцов существенно отличаются, причем большей скорости соответствует меньшая долговечность” (с. 264);
- чем больше напряжения цикла, тем больше интенсивность поглощения энергии;
- при наличии асимметрии цикла нагрев образцов значительно уменьшается, что приводит к существенному росту долговечности (для стеклопластиков).

Несмотря на крайне ограниченную информацию о механизме преобразования механической энергии в тепловую [16], краткий анализ показывает, что применение энергетических принципов для прогнозирования усталостных характеристик может быть весьма продуктивным. Как отмечено в работе [6], “один из самых ранних методов исследования усталости (до 1928 г.) заключался в измерении внутреннего трения или демпфирующей способности образца при испытаниях на усталость. Поглощающая или демпфирующая способность является мерой удельной энергии, диссипирующей за один цикл нагружения материала; она может быть определена или по петле гистерезиса (напряжение – деформация), или по изменению температуры образца во время усталостных испытаний”. Это утверждение является не совсем корректным, потому что часть работы внешних сил затрачивается на развитие трещины, т.е. на разрушение, на что косвенно указано в [10].

В монографии В.Т. Трощенко [16] проведен подробный анализ энергетических критериев усталостного разрушения металлов. Указывается, что часть энергии, рассеянной в материале (площадь петли гистерезиса), накапливается в нем в виде скрытой энергии деформации, а с увеличением числа циклов до разрушения возрастает доля “неопасной” энергии, не связанной с усталостным повреждением. Там же описаны некоторые критерии усталостного разрушения, в том числе основанные на постоянстве полного количества необратимо рассеянной энергии в материале, на равенстве полной необратимо рассеянной энергии и предельной работы деформации при статическом нагружении, на постоянстве разности полной рассеянной энергии и рассеянной энергии при напряжениях, равных пределу выносливости, и др. Приведены результаты количественных расчетов и экспериментальных исследований и указаны пределы применимости известных энергетических критериев [16].

Известно, что даже при обычных статических испытаниях материал нагревается [17, 18], т.е. часть работы внешних сил превращается в тепловую энергию образца, а другая часть затрачивается на собственно разрушение. Графически это проиллюстрировано на рис. 2, на котором сплошной линией показана диаграмма $\sigma - \varepsilon$ с учетом затрат работы внешних сил на нагрев, а пунктиром – условная диаграмма $\sigma - \varepsilon$ без нагрева.

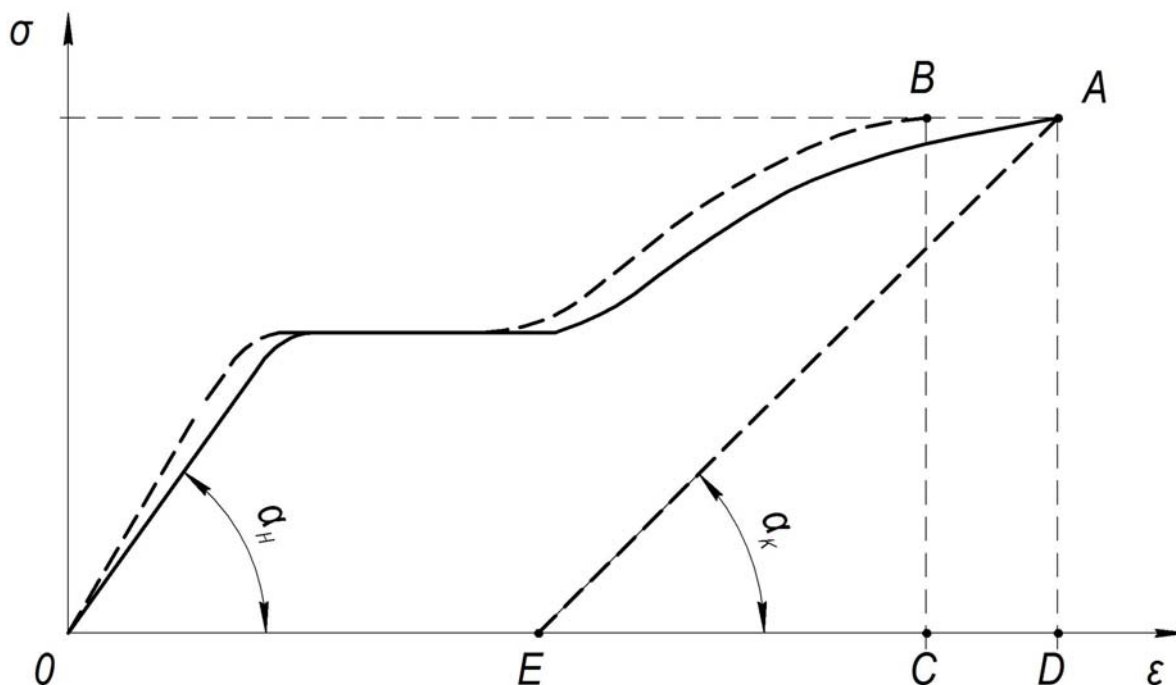


Рисунок 2 – Диаграммы $\sigma - \varepsilon$ с учетом теплового рассеивания энергии (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия)

Площадь под кривой OBC равнозначна удельной энергии разрушения, а площадь OAD – это полная работа внешних сил, которая одно-

значно и достоверно может быть определена и характеризуется достаточно малым коэффициентом вариации (разбросом). Так как энергия, затрачиваемая на нагрев, связана с внутренним трением, то ее абсолютная величина мало или почти не зависит от скорости нагружения, от которой зависит темп нагрева (интенсивность, мощность тепловыделения). Отсюда следует правомочность гипотезы о том, что работа внешних сил, затрачиваемая на инициацию и развитие трещин, является постоянной величиной для данного материала и равна разности между полной работой внешних сил (площадь OAD) и энергии, обуславливающей нагрев при статическом нагружении, и энергии упругого деформирования (площадь ADE на рис. 2):

$$U_P = U_\Sigma - U_T - U_D, \quad (2)$$

где U_P – энергия, необходимая для разрушения образца;

U_Σ – полная энергия внешних сил;

U_T – тепловая энергия;

U_D – энергия упругого деформирования, которая высвобождается почти мгновенно, при разрушении, но уже не может влиять на остальные составляющие.

Зарождение и развитие трещин являются следствием превышения напряжений у кончика трещины допустимых и, если нет динамических и волновых эффектов, то вид поверхности разрушения при циклическом нагружении не может сильно отличаться от статического. Имеющее место заглаживание берегов трещины есть не что иное, как переход работы внешних сил в тепло.

Принятие выдвинутой гипотезы позволяет обосновать новый метод оперативного прогнозирования усталостной долговечности материалов, для чего проводится циклическое нагружение до момента стабилизации ширины петли гистерезиса, а это – не более 20 % общего числа циклов [2]. Затем в течение определенного времени устанавливается темп нагрева и вычисляется приращение температуры за один цикл (или за несколько)). Зная площадь петли гистерезиса, равную сумме тепловой энергии и энергии роста трещины, определяем приведенную энергию разрушения за один цикл (или за несколько). Тогда усталостная долговечность находится по формуле

$$nU_p^* = U_p, \quad (3)$$

где U_p^* – энергия, затрачиваемая на разрушение за один цикл (или за блок циклов).

Входящая в уравнение баланса (2) энергия упругого деформирования U_D может быть определена однозначно в том случае, когда $\alpha_H = \alpha_K$ (рис. 2), а это связано с тем, имеет ли место диссипация энер-

гии (нагрев) при разгрузке. Диссипация энергии является следствием внутреннего трения [19] и при нагружении она происходит под действием внешних, а при разгрузке - внутренних сил, поэтому можно утверждать, что нагрев имеет место как на ветви нагружения диаграммы $\sigma - \varepsilon$, так и разгрузки (рис. 3). При прокачке насосом жидкости по трубе вверх имеются потери на трение за счет вязкости, но такое же явление имеет место и при свободном течении жидкости вниз. На рис. 3 прямая OA соответствует деформированию с диссипацией энергии (реально фиксируемой испытательной машиной), OB - деформация без потери энергии, AC - разгрузка без диссипации и тогда $\angle BOC = \angle ACD$, AD - разгрузка с внутренним трением. Соотношения углов α_H , α_{K1} , α_{K2} необходимо и можно исследовать дополнительно статическими испытаниями.

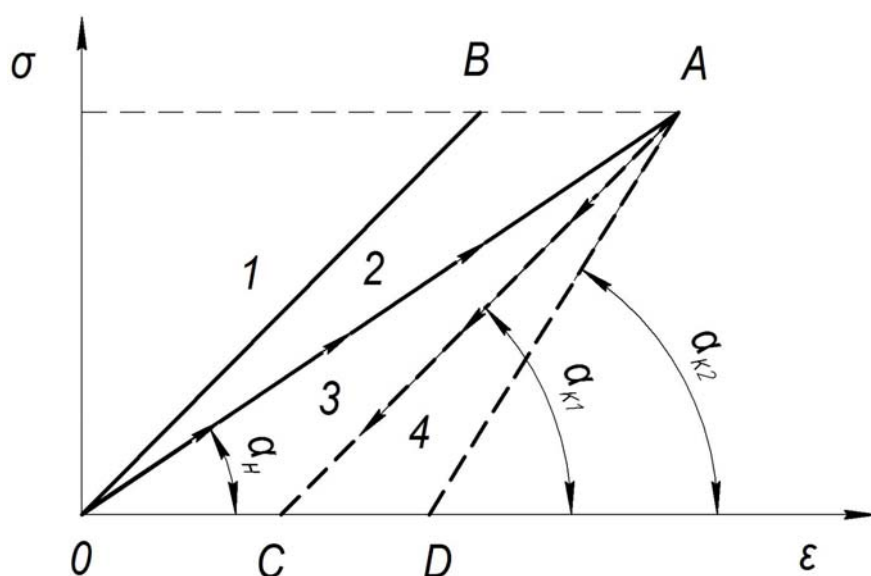


Рисунок 3 – Зависимость $\sigma - \varepsilon$ при нагрузке-разгрузке с учетом диссипации энергии

В связи с этим заметим, что вариационные принципы механики, основанные на равенстве работы внешних сил и энергии упругого деформирования, оперируют прямой OA , а корректно было бы - OB .

Предлагаемый метод прогнозирования долговечности особенно может быть эффективным для полимерных композитных материалов, для которых при постоянном размахе деформаций размах напряжений практически постоянный [8], т.е. процесс быстро стабилизируется и остается таким практически до разрушения. Это вполне объяснимо, потому что природа внутреннего трения в композитах иная, чем в металлах.

Целесообразность разработки методов оперативного определения долговечности композитов обусловлена тем, что, во-первых, исследовать необходимо материал данной конкретной структуры, найденной на

этапе проектирования конструкции, и внесение изменений вызывает повторение испытаний, во-вторых, для сложноармированных композитов не разработана пока методика прогнозирования усталостной долговечности по известным свойствам монослоев вдоль и поперек волокон на растяжение и сжатие и на сдвиг (по аналогии с методикой определения предела прочности), и, в-третьих, структурные параметры, а значит, и физико-механические характеристики определяются технологическим процессом получения изделий, а эта область в последние годы претерпевает существенные изменения, связанные с разработкой новых связующих и волокон.

Для обоснования реализуемости предлагаемого метода прогнозирования усталостной долговечности оценим порядок величин составляющих баланса энергии на примере испытаний алюминиевого сплава с амплитудой напряжений 100 МПа. Пусть объем материала равен 1 см^3 , теплоемкость составляет $0,89 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, плотность – $2,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, модуль упругости – $7,2 \cdot 10^4$ МПа. Энергия упругого деформирования вычисляется по известной формуле

$$U_D = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon V = \frac{100 \cdot 100}{7,2 \cdot 10^4} = 6,94 \text{ Дж}.$$

Для определенности примем, что ширина петли гистерезиса равна $\Delta \varepsilon = 10^{-4}$. Тогда полная энергия диссипации за один цикл составит

$$U_{\text{ГИСТ}} = \frac{1}{2} \sigma \Delta \varepsilon V = 0,005 \text{ Дж}.$$

Эта энергия эквивалентна нагреву материала на

$$\Delta T = \frac{U_{\text{ГИСТ}}}{c_p V} = \frac{0,005}{0,89 \cdot 2,8 \cdot 1} = 0,016 \text{ К}.$$

Разрешающая способность используемых для этих целей тепловизоров равна $0,1 \text{ К}$ [17] и тогда для надежной фиксации температуры необходимо выполнить измерения для количества более 70 циклов, что вполне реально и оправдано.

Для изменения температуры 1 см^3 алюминиевого сплава на один градус необходима энергия 2,49 Дж, которая вполне сопоставима с работой упругой деформации, а в [1] изменение температуры стеклопластиков исчисляется десятками градусов. Отсюда следует, что современная испытательная техника и регистрирующая аппаратура вполне могут обеспечить применение предлагаемого энергетического метода прогнозирования усталостной долговечности композитов, металлов и пластмасс.

В процессе испытаний образца имеет место его теплообмен с окружающей средой, интенсивность которого пропорциональна разности температур образца и окружающей среды [3], и она может быть вычислена при наличии величины коэффициента теплообмена. Определение параметров теплообмена – это задача дополнительного исследования, над решением которой автор работает.

Выводы

На основе анализа литературных источников, посвященных применению уравнения энергетического баланса при циклическом нагружении, предложен новый метод прогнозирования усталостной долговечности по начальной части циклических испытаний (не более 20% общей долговечности). Метод базируется на обоснованной гипотезе о том, что работа внешних сил по зарождению и развитию трещины до разрушения как доли общей необратимо рассеянной энергии является постоянной величиной для данного материала и не зависит от характера нагружения – статического или циклического. Показано, что необходимые измерения сил, деформаций и температуры реализуемы современным оборудованием.

Список использованных источников

1. Немец, Я. Прочность пластмасс [Текст] / Я. Немец, С.В. Серенсен, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
2. Олдырев, П.П. Определение усталостной долговечности пластмасс по температуре саморазогрева [Текст] / П.П. Олдырев // Механика полимеров. – № 1, 1967. – С. 111–117.
3. Ратнер, С.Б. Саморазогрев пластмасс при циклическом деформировании [Текст] / С.Б. Ратнер, В.И. Коробов // Механика полимеров. – № 3, 1965. – С. 93–100.
4. Горбачев, Л.Л. Прогнозирование долговечности металлов под действием циклических нагрузок [Текст] / j:WORK / Библиотека / МУ НТБ / Авиация / Усталость / ft_gorac.htm. – С. 1–8.
5. Ву, Э. Прочность и разрушение композитов / Композиционные материалы [Текст] / Э. Ву. Под ред. Л. Браутмана и Р. Крок / Т.5. Разрушение и усталость. М.: Мир. 1978. – С. 206–266.
6. Роней, М. Усталость высокопрочных материалов / Разрушение. Ред. Г. Либовиц. Т.3. Инженерные основы и воздействие внешней среды. Под ред. Е.М. Морозова. – М.: Мир. 1976. – С. 473–527.
7. Хеллан, К. Введение в механику разрушения [Текст] / К. Хеллан: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.

8. Хэнкок, Дж.Р. Усталость композитов с металлической матрицей [Текст] / Композиционные материалы: под ред. Л. Браутмана и Р. Крок / Т.5. Разрушение и усталость. М.: Мир. 1978. С. 394–475.
9. Черепанов, Г.П. Механика разрушения композиционных материалов [Текст] / Г.П. Черепанов. – М.: Наука. 1983. – 296 с.
10. Дяченко, С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів [Текст]: навч. посіб. – Х.: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
11. Физический энциклопедический словарь: В 5 т. Гос. науч. изд-во «Советская энциклопедия».
12. Карпенко, Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов [Текст] / Г.В. Карпенко. – К.: Наук. думка, 1976. – 128 с.
13. Энергетика термоупругого эффекта в твердых телах / Гиляров В.Л., Слуцкер А.И., Володин В.П., Лайдс А.И. // Физика твердого тела, 1998, том 40, № 8. – С. 1548–1551.
14. Материаловеденье [Текст]: под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 383 с.
15. Шульце, Г. Металлофизика [Текст] / Г. Шульце: пер. с немец. – М.: Мир, 1971. – 503 с.
16. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
17. Исследование неразрушающих методов комплексного контроля сетчатых конструкций из полимерных материалов [Текст] / О.Н. Буданин, А.А. Филипенко, М.Н. Слишков и др. // Композиционные материалы в промышленности: Междунар. научн.-практ. конф., 06-10 июня. – Ялта, 2011. – С. 348–350.
18. Есауленко, Г.Б. Полимерные нанокompозитные материалы и перспективные методы соединения изделий из них [Текст] / Г.Б. Есауленко, О.П. Червинко, Н.П. Нестеренко // Композиционные материалы в промышленности: Междунар. научн.-практ. конф., 06 – 10 июня. – Ялта, 2011. – С. 131–133.
19. Постников, В.С. Внутреннее трение в металлах [Текст] / В.С. Постников. – М.: Metallургия, 1969. – 332 с.

Поступила в редакцию 15.11.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*