

УДК 620.179.13

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Куриленко Георгий Алексеевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов  
Новосибирского государственного технического университета,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: teormech@ngs.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности прогнозирования процесса накопления и развития повреждаемости при циклических нагрузках.

**Цель работы:** устранение некоторых противоречий известных энергетических методов исследования повреждаемости на основе разработанного термодинамического подхода, который позволил существенно повысить точность прогнозирования усталостного процесса.

Рассмотрена термодинамика макроупругого деформирования и предложен новый критерий накопления и развития повреждаемости – приращение удельной энтропии за цикл колебаний, которое разложено на функциональные части. Как известно, энтропия – это такой параметр, который в механике сплошной среды наиболее полным образом учитывает все необратимые процессы, происходящие в исследуемом объекте, т. е. диссипацию энергии. Важным является также то обстоятельство, что поскольку энтропия является функцией состояния, то ее изменение при переходе объекта в новое состояние (в отличие, скажем, от изменения энергии) характеризует диссипативные процессы независимо от того, каким конкретным образом этот переход совершился, т. е. этот параметр объективно и однозначно отражает необратимость процесса, в том числе и процесса накопления и развития повреждаемости. Следует также заметить, что физический смысл имеет не сама энтропия, поскольку она определяется с точностью до произвольной постоянной, а разность энтропий при переходе тела из состояния 1 в состояние 2.

**Результаты.** Такой подход позволил учесть на феноменологическом уровне буквально все, что происходит в очаге повреждаемости, разрешить противоречия традиционных энергетических методов и разработать практические способы прогнозирования основных характеристик циклической прочности деталей машин, повысившие точность прогнозирования и упростившие его технологию.

**Ключевые слова:**

Изменение температуры, приращение удельной энтропии, предел выносливости, долговечность, очаг повреждаемости.

Исследование повреждаемости металлов при циклических нагрузках является весьма актуальной задачей в инженерном деле [1–5]. Основная прикладная сторона этой проблемы – прогнозирование циклической прочности деталей машин [6–8]. Традиционный способ решения этого вопроса статистический, когда разрушается часть деталей из произведенной партии и по полученной информации делается вероятностный прогноз на всю партию деталей.

Но для особо ответственных деталей такой подход неприемлем. Поэтому в последние десятилетия появились различные способы неразрушающего прогнозирования циклического ресурса изделий [9–12]. В основе этих способов, как правило, лежит энергетический подход, согласно которому из всей рассеянной за цикл колебаний энергии  $\Delta W^{(1n)}$  выделяется та часть, которая идет на развитие повреждаемости  $\Delta W_n^{(1n)}$ , через которую затем и рассчитывается циклический ресурс детали.

Но существующие способы разложения диссипированной энергии являются неполными и требуют доработки. Так, у С.Е. Гуревича и А.П. Гаевого [13] рассеянная энергия  $\Delta W^{(1n)}$  разложена на тепловую  $\Delta W_T^{(1n)}$  и повреждающую  $\Delta W_n^{(1n)}$  части

$$\Delta W^{(1n)} = \Delta W_T^{(1n)} + \Delta W_n^{(1n)}.$$

При этом не выделена скрытая энергия деформации  $\Delta W_p^{(1n)}$ , вызывающая неопасное движение дислокаций, поэтому при расчете  $\Delta W_n^{(1n)}$  в области малых амплитудных напряжений, когда доля

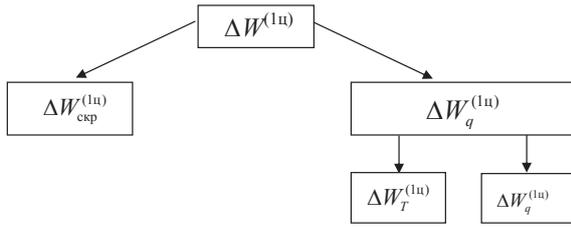
$\Delta W_p^{(1n)}$  особенно возрастает, получается большая погрешность, отмечаемая самими авторами.

В.В. Федоров [14] разложил диссипированную энергию  $\Delta W^{(1n)}$  по схеме, изображенной на рис. 1. Здесь приняты обозначения:  $\Delta W_q^{(1n)}$  – часть рассеянной энергии, перешедшей в тепло;  $\Delta W_{\text{скр}}^{(1n)}$  – изменение скрытой энергии деформации;  $\Delta W_T^{(1n)}$  – часть тепловой энергии, накопленной в теле;  $\Delta W_q^{(1n)}$  – энергия теплообмена.

Но при такой схеме выделить энергию  $\Delta W_n^{(1n)}$  довольно затруднительно, т. к. она входит и в  $\Delta W_{\text{скр}}^{(1n)}$  и в  $\Delta W_q^{(1n)}$ .

Кроме того, при энергетическом подходе  $\Delta W_n^{(1n)}$  всегда рассчитывается как разность между всей диссипированной энергией в очаге повреждаемости и отведенной из очага энергией, а это довольно близкие величины, поэтому получается большая погрешность расчета, что ведет к недостаточной точности прогнозирования циклического ресурса.

В соответствии с поставленной целью повышения точности исследования усталостного процесса макроупругое деформирование рассматривается в тесном единстве с термодинамикой микропластических деформаций, т. к. работа подавляющего большинства конструктивных элементов протекает номинально в пределах упругого деформирования. При этом пластические деформации в макрообъеме работающих деталей отсутствуют, но происходит микропластическое деформирование отдельных зерен металла, связанное с выделением тепла.



**Рис. 1.** Схема разложения диссипированной энергии по В.В. Федорову

**Fig. 1.** Decomposition scheme of heat of dissipation by V.V. Fedorov

Запишем уравнение энергии, которое для квазистатических необратимых процессов имеет вид:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \left( \frac{dq}{dt} + \sigma_{ij}^{(D)} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} \right). \quad (1)$$

Здесь  $\frac{dS}{dt}$  и  $\frac{dq}{dt}$  – соответственно скорости изменения удельной энтропии и количества тепла;  $T$  – температура в рассматриваемый момент времени;

$\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}$  – скорость изменения тензора деформаций;  $\sigma_{ij}^{(D)}$  – тензор диссипативных напряжений.

Представим выражение для подсчета энтропии системы в виде [15]:

$$S = S_0(T) + K\alpha_v \varepsilon_{ee}, \quad (2)$$

где  $S_0(T) = c_0 \ln(T/T_0)$  отражает чисто тепловую сторону задачи, а  $S' = K\alpha_v \varepsilon_{ee}$  связывает поле деформаций с температурным полем.

В формуле (2)  $\alpha_v = 3\alpha$ ,  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ , и с помощью этой формулы в [15] получена связь между изменением температуры нагружаемого тела и приложенной нагрузкой (эффект Томсона) – эффект снижения температуры при упругой деформации:

$$\Delta T = - \frac{T\alpha\sigma_{ee}}{c_p}. \quad (3)$$

Для адиабатических процессов  $dq=0$  и скорость производства энтропии, как это следует из (1), полностью определяется диссипативной функцией

$$dS = \frac{1}{T} \sigma_{ij}^{(D)} d\varepsilon_{ij}. \quad (4)$$

Следует заметить, что понятие энтропии, строго говоря, относится только к медленно протекающим равновесным процессам. Но такие процессы являются идеализированными и в действительности точно никогда не реализуются. Но к ним можно подойти сколь угодно близко. Очень многие реальные процессы, идущие с конечными скоростями, можно считать приблизительно квазистатическими (квазиравновесными). Именно такими являются процессы медленного накопления и развития повреждаемости при многоциклового усталости,

исследование которой является наиболее актуальной задачей.

Известно, что даже при весьма малых амплитудах колебаний зависимость между напряжениями  $\sigma$  и деформациями  $\varepsilon$  в металлах не остается линейной и при представлении ее в координатах  $\sigma$ – $\varepsilon$  наблюдается замкнутая петля механического гистерезиса, площадь которой представляет диссипированную за цикл колебаний энергию, через которую и рассчитывается приращение всей произведенной за цикл удельной энтропии  $\Delta S^{(1n)}$  по формуле (4).

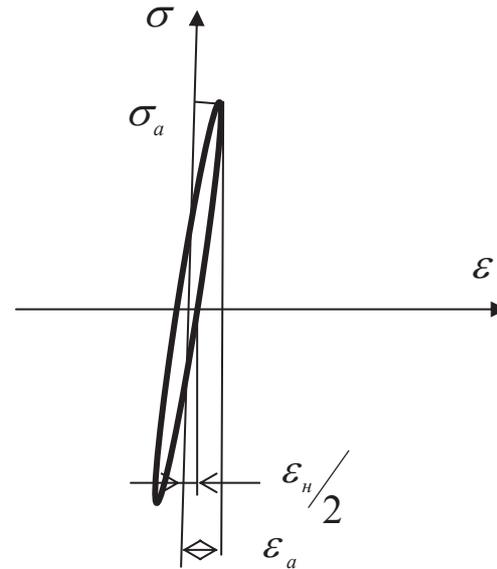
Рассмотрим колебательный процесс, связанный с реализацией одноосного напряженного состояния. Выражения, описывающие изменение напряжений и деформаций во времени, имеют вид

$$\sigma = \sigma_a \sin(\omega t), \quad \varepsilon = \varepsilon_a \sin(\omega t - \varphi). \quad (5)$$

Здесь  $\sigma_a$  и  $\varepsilon_a$  – амплитудные напряжения и деформации соответственно;  $\omega$  – угловая частота деформирования;  $\varphi$  – угол сдвига фазы.

Продифференцируем первое выражение (5)

$$d\sigma = \sigma_a \cos(\omega t) d(\omega t). \quad (6)$$



**Рис. 2.** Петля гистерезиса

**Fig. 2.** Hysteresis loop

Считая, что температура  $T$  практически не изменяется за цикл, определим  $\Delta S^{(1n)}$  по формуле (4) с учетом (5), (6) и закона Гука:

$$\Delta S^{(1n)} = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} \varepsilon d\sigma = - \frac{1}{T} \pi E \varepsilon_a^2 \sin \varphi. \quad (7)$$

Амплитудную деформацию можно представить в виде

$$\varepsilon_a = \varepsilon_y + \frac{\Delta \varepsilon_n}{2}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_y$  и  $\Delta \varepsilon_n$  – соответственно упругая и неупругая части деформации, как это видно на петле гистерезиса, показанной на рис. 2.

Учитывая связи  $\sin \varphi$  с неупругой деформацией  $\Delta \varepsilon_n$  и коэффициентом поглощения энергии  $\psi$ :

$$\sin \varphi = -\frac{\Delta \varepsilon_n}{2\varepsilon_a}, \quad \psi = 4K_\phi |\sin \varphi|, \quad (9)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы петли гистерезиса (для эллиптической петли, которой можно аппроксимировать наблюдавшуюся в нашем эксперименте петлю,  $K_\phi = \pi/2$ ), получим из формулы (7) с учетом (8) и (9):

$$\Delta S^{(1u)} = \frac{\pi \psi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}. \quad (10)$$

Разложим поток энтропии  $\Delta S^{(1u)}$ , производимый в очаге накопления и развития повреждаемости и рассчитанный по формуле (10), на функциональные части в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.

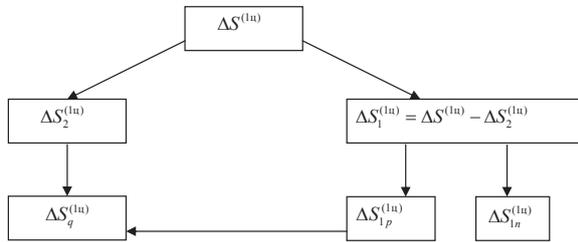


Рис. 3. Разложение потока энтропии на функциональные части

Fig. 3. Decomposition of entropy flow to functional parts

На схеме приняты обозначения:  $\Delta S_2^{(1u)}$  – приращение за цикл колебаний той части производимой энтропии, которая вызывает непосредственный нагрев очага повреждаемости;  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$  – поток энтропии, идущий на накопление повреждаемости, т. е. на зарождение и развитие микротрещины;  $\Delta S_{1p}^{(1u)}$  – часть производимой энтропии, связанная с неопасными деформациями в очаге;  $\Delta S_q^{(1u)}$  – поток энтропии, рассеиваемой в окружающую среду в виде тепла.

Формула для расчета  $\Delta S_2^{(1u)}$  известна в литературе [15]:

$$\Delta S_2^{(1u)} = c_v \ln(T_2 / T_1) \approx c_v \frac{T_2 - T_1}{T_1}. \quad (11)$$

Здесь  $c_v$  – удельная теплоемкость;  $T_1$  и  $T_2$  – температуры очага повреждаемости соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла колебаний.

Оставшаяся часть приращения энтропии

$$\Delta S_1^{(1u)} = \Delta S^{(1u)} - \Delta S_2^{(1u)} = \Delta S_{1p}^{(1u)} + \Delta S_{1n}^{(1u)}. \quad (12)$$

При разложении потока энтропии  $\Delta S_1^{(1u)}$  на  $\Delta S_{1p}^{(1u)}$  и  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$  будем опираться на идеи, заложенные в деформационных критериях усталостного разрушения [1, 16], а именно, исходить из того, что при работе до предела выносливости (т. е. при  $\Delta \varepsilon_n \leq \Delta \varepsilon_R$ , где  $\Delta \varepsilon_R$  – неупругая часть деформации, соответствующая нагружению с амплитудными напряжениями, находящимися на уровне предела выносливости) производится только «неопасная энтро-

пия». При работе за пределом выносливости ( $\Delta \varepsilon_n > \Delta \varepsilon_R$ ) часть энтропии, которая соответствует неупругой деформации  $\Delta \varepsilon_{un} = \Delta \varepsilon_n - \Delta \varepsilon_R$ , расходуется на необратимые процессы накопления усталостных повреждений, а оставшаяся часть, соответствующая неупругой деформации  $\Delta \varepsilon_R$ , является неопасной.

Так же как в формуле (10), выразим соответствующие потоки энтропии через коэффициент поглощения энергии очага повреждаемости  $\psi$ , который представим в виде

$$\psi = \psi_R + \Delta \psi, \quad (13)$$

где  $\psi_R$  – коэффициент поглощения энергии, соответствующий работе при амплитудных напряжениях  $\sigma_a$ , равных пределу выносливости  $\sigma_R$ .

В соответствии с (10) произведенная за цикл колебаний энтропия

$$\Delta S^{(1u)} = (\psi_R + \Delta \psi) \frac{\pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}. \quad (14)$$

С другой стороны,

$$\Delta S^{(1u)} = \Delta S_{1p}^{(1u)} + \Delta S_{1n}^{(1u)} + \eta \Delta S_2^{(1u)}. \quad (15)$$

Сопоставляя правые части (14) и (15), легко видеть, что слагаемое  $\psi_R \frac{\pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}$  включает в себя  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$

и часть  $\Delta S_2^{(1u)}$ , а слагаемое  $\Delta \psi \frac{\pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}$  включает  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$

и оставшуюся часть  $\Delta S_2^{(1u)}$ , т. к. нагрев очага происходит от обоих потоков энтропии:  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$  и  $\Delta S_{1p}^{(1u)}$ . Чтобы подчеркнуть разделение теплового слагаемого  $\Delta S_2^{(1u)}$  на две части, перед ним введен параметр

$$\eta = \frac{\Delta \psi + \psi_R}{\psi} = \frac{(\psi - \psi_R) + \psi_R}{\psi} = 1.$$

С учетом формул (12)–(15) выражения для подсчета соответствующих приращений удельной энтропии (выраженных через коэффициент поглощения энергии  $\psi$ ) будут иметь вид:

$$\Delta S_{1p}^{(1u)} = \frac{\pi \psi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}, \quad \Delta S_{1n}^{(1u)} = 0. \quad (\text{при } \sigma_a \leq \sigma_R)$$

$$\Delta S_{1p}^{(1u)} = \frac{\pi \psi_R E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi} - c_v \frac{\psi_R}{\psi} \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (16)$$

$$\Delta S_{1n}^{(1u)} = \frac{\pi(\psi - \psi_R) E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi} - c_v \frac{(\psi - \psi_R)}{\psi} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (\text{при } \sigma_a > \sigma_R)$$

В этих формулах  $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ . Формула (11) для подсчета  $\Delta S_2^{(1u)}$  остается без изменений.

### Обсуждение полученных формул

Энтропия как функция состояния является наиболее полной диссипативной функцией, поскольку она учитывает интегральным образом все факторы, влияющие на процесс накопления и разви-

тия повреждаемости в самом очаге повреждаемости, включая температуру. Поэтому использование приращения энтропии в качестве индикатора развития повреждаемости позволило повысить точность прогнозирования усталостной прочности.

Следует заметить также, что разложение потока энтропии на функциональные части, которые можно рассчитать по формулам (11) и (16), позволило устранить отмеченные выше недостатки энергетических теорий, а именно: выделить поток энтропии, идущий на развитие повреждаемости  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , и поток энтропии, связанный с неопасными деформациями  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ . И самое главное, получены удобные для практического применения формулы для расчета всех потоков энтропии.

Кроме того, теперь видна физическая корректность феноменологической формулы (3), показывающей снижение температуры при упругом деформировании (эффект Томсона) и приводящей, следовательно, к уменьшению энтропии объекта ( $\Delta S_2^{(1n)} < 0$ ), что вроде бы противоречит второму началу термодинамики. Теперь этому есть объяснение:  $\Delta S_2^{(1n)}$  компенсируется  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , и в итоге  $\Delta S^{(1n)} = \Delta S_{1n}^{(1n)} + \Delta S_{2n}^{(1n)} \geq 0$  ( $\Delta S_{1n}^{(1n)} = 0$  при упругом деформировании).

#### Практическое использование результатов работы

Результатом проведенных исследований явилось решение ряда актуальных задач прикладного характера в области прогнозирования усталостной прочности на основе предложенного энтропийного критерия накопления повреждаемости в очаге разрушения. При решении каждой конкретной задачи используется наиболее адекватная ей часть потока энтропии. Эти задачи можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан метод ускоренного прогнозирования индивидуального предела выносливости деталей по кинетике приращения удельной энтропии  $\Delta S_2^{(1n)}$  в очаге накопления повреждаемости [17]. Кривая  $\Delta S_2^{(1n)} = f(\sigma_n)$  в районе физического предела выносливости имеет резкий излом, абсцисса которого и соответствует индивидуальному пределу выносливости испытываемой детали.
2. Разработан метод прогнозирования циклической долговечности как «бездефектных» (без начальных трещин) деталей по кинетике  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , так и деталей, имеющих исходные надрезы [18, 19]. При расчете долговечности «бездефектной» детали предварительно определяется

ее истинный предел выносливости и коэффициент поглощения энергии на уровне предела выносливости. Эти параметры по разработанной методике определяются с высокой точностью и достоверностью. Затем рассчитывается удельная повреждающая энергия за цикл  $\Delta W_n^{(1n)}$  через поток удельной повреждающей энтропии  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , по которой и прогнозируется циклическая долговечность. Погрешность прогнозирования при этом не превышала 30 %, что в разы меньше погрешности прогнозирования по стандартной методике [1].

3. Предложен более точный термографический метод определения усилия  $P_q$ , при котором происходит страгивание трещины при вязком и упруго-вязком разрушении, по которому можно рассчитывать характеристики статической трещиностойкости металлов. График зависимости растягивающей образец силы  $P$  от  $\Delta S_2^{(1n)}$ , подсчитываемой в кончике развивающейся трещины, в районе усилия  $P_q$  имеет характерную площадку [20]. По предложенному методу разброс определяемых характеристик трещиностойкости уменьшается на 10...20 % и также уменьшается на 40...50 % время испытания.
4. Разработаны практические методы неразрушающего контроля циклической прочности серийно выпускаемых деталей в производственных условиях и испытательные стенды для их реализации [19]. Результаты работы внедрены на ряде крупных предприятий нашей страны в виде действующих испытательных стендов, вписанных в технологические цепочки контроля качества материалов и деталей машин (завод «Сибтекстильмаш» (Новосибирск), Московский машиностроительный завод «Опыт»).

#### Выводы

Разработан термодинамический способ исследования повреждаемости металлов. В качестве критерия используется приращение удельной энтропии за цикл колебаний в очаге повреждаемости. Энтропия – это функция состояния, которая наиболее полным образом учитывает все необратимые процессы, происходящие в исследуемом объекте.

На основе этого критерия разработаны практические методики определения основных характеристик усталости металлов и неразрушающего контроля циклической прочности деталей машин, при этом повышается точность и упрощается технология контроля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие: в 4 т. Т. 4 / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник. – Киев: Наукова думка, 1990. – 679 с.
2. Особенности разрушения малоуглеродистой стали в условиях сдвига, отрыва и смешанных мод нагружения / А.П. Солдатенков, Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, В.П. Левин, Н.А. Жарко-

ва // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 6. – С. 2–10.

3. Федотов В.П. Термодинамический подход к моделированию диаграммы нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 53–62.
4. Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 6. – С. 1–12.

5. Нажяр Ф., Сигард Ж., Дувал Р. Современные технологии на основе инфракрасной термографии для обнаружения дефектов в материалах // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды IV Междунар. конф. – Флоренция, 1997. – С. 287–296.
6. Гольцев В.Ю., Маркочев В.М. Методика исследования процесса роста усталостных трещин при постоянном размахе коэффициента интенсивности напряжений // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 43–47.
7. Булах П.А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. – 2011. – № 2. – С. 122–127.
8. Романов А.Н. Распространение трещин усталости и единая кривая циклической трещиностойкости конструкционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 5. – С. 47–57.
9. Вавилов В. Температурные неразрушающие испытания: краткая история и современное состояние // Количественная Инфракрасная Термография: Труды Европейского семинара № 27. – Чатени-Малабри, Франция, 1992. – С. 179–194.
10. Вибротермический контроль полимерных композитов / Г. Буссе, М. Бауэр, В. Риппел, Д. Ву // Количественная Инфракрасная Термография: Труды Европейского семинара № 27. – Чатени-Малабри, Франция, 1992. – С. 154–159.
11. Шмидт Ж. Изучение процесса трещинообразования в хрупких волокнистых композитах с использованием инфракрасной термографии и акустической эмиссии // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды Междунар. конф. – Флоренция, 1995. – С. 263–271.
12. Гончар А.В., Руденко А.Л., Мишакин В.И. Исследование микропластических деформаций конструкционной стали на начальном этапе усталостного нагружения методами неразрушающего контроля // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 37–42.
13. Гуревич С.Е., Гаевой А.П. Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. – 1973. – № 9. – С. 1110–1114.
14. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан, 1979. – 167 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
16. Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В. Исследование механизма и кинетики разрушения поверхностных разноориентированных полуэллиптических трещин при сложном напряженно-деформированном состоянии с помощью деформационных критериев нелинейной механики разрушения // Проблемы прочности. – 2013. – № 4. – С. 91–97.
17. Куриленко Г.А. Способ определения предела выносливости: а.с. СССР № 1499167, МКИ<sup>4</sup>G 01 N 3/32; заявл. 12.12.1985; опубл. 07.08.1989, Бюл. № 29. – 6 с.
18. Куриленко Г.А. Прогнозирование циклического ресурса деталей с макротрещинами термографическим методом // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 36–39.
19. Куриленко Г. Современное исследование усталости металлов с помощью инфракрасной техники // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды Междунар. конф. – Флоренция, 1995. – С. 253–262.
20. Куриленко Г.А. Исследование трещиностойкости металлов термографическим методом // Обработка металлов. – 2010. – № 3 (48). – С. 41–44.

Поступила 27.01.2014 г.

UDC 620.179.13

## INVESTIGATION OF METAL DAMAGE BY THERMODYNAMIC METHOD

Georgy A. Kurilenko,

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: teormech@ngs.ru

*The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase the accuracy of predicting accumulation and development of damage under cycling load.*

**The main aim of the study** is to resolve some contradictions of traditional energy-sensitive methods of studying damage on the basis of the developed thermodynamic approach which essentially increases the accuracy of predicting the fatigue process.

*The author has considered macroelastic deformation thermodynamics and proposed a new criterion of accumulation and development of damage. This criterion is divided into functional parts increment of specific entropy for one cycle of oscillation. Entropy is such parameter, which takes into account all nonreversed changes in testing object best of all. It is important as well, that as entropy is the state function, its change at object state transition characterizes all dissipative processes without regard for including accumulation and development of damage, independently of the detailed changes in the object. It should be noted as well that not the entropy itself has physical sense, but entropy difference at object transfer from state 1 to state 2.*

**The results.** Such approach allowed taking into account on formal level almost everything that happens in a damage domain, solving contradictions of traditional energy-sensitive methods and elaborating the practical methods to predict the main characteristics of cyclic durability of machine details. These characteristics improved the accuracy in prediction and simplified its technology.

### Key words:

*Change of temperature, increment of specific entropy, endurance limit, longevity, damage domain.*

REFERENCES

- Romaniv O.N., Yarema C.Ya., Nikiforchin G.N., Makhutov N.A., Stadnik M.M. *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov. Spravochnoe posobie* [Mechanics of destruction and strength of materials. Reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 679 p.
- Soldatenkov A.P., Botvina L.R., Tyutin M.R., Levin V.P., Zharkova N.A. Osobennosti razrusheniya malouglerodisty stali v usloviyakh sdviga, otryva i smeshannykh mod nagruzheniya [Peculiarities of low-carbon steel destruction under conditions of displacement, alienation and mixed modes of loading]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials*, 2012, no. 6, pp. 2–10.
- Fedotov V.P. Termodinamicheskiy podkhod k modelirovaniyu diagrammy nagruzheniya [Thermodynamic approach to model of loading diagram]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Problems of machine-building and reliability of machines*, 2013, no. 2, pp. 53–62.
- Shtremel M.A. O edinstve v mnogoobraznykh protsessakh ustalosti [On unity in various fatigue processes]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials*, 2011, no. 6, pp. 1–12.
- Najar F., Sigard J., Duval R. Sovremennye tekhnologii na osnove infrakrasnoy termografii dlya obnaruzheniya defektov v materialakh [Advanced technology to detect flaw in materials by Infrared thermography]. *Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilozheniya. Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop. Advanced Infrared technology and applications]. Firenze, 1997. pp. 287–296.
- Goltsev B.Yu., Markochev V.M. Metodika issledovaniya protsessov rosta ustalostnykh treshshchin pri postoyannom razmakhe koeffitsienta intensivnosti napryazheniy [Method for investigating the increase of fatigue flaw under constant amplitude KIN]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials*, 2012, no. 7, pp. 43–47.
- Bulakh P.A. Issledovanie razvitiya protsessa nakopleniya povrezhdeniy v metalle pri tsiklicheskom nagruzhenii v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya [Investigation of increasing damage development in metal under complex tension]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 2011, no. 2, pp. 122–127.
- Romanov A.N. Rasprostraneniye treshchin ustalosti i edinaya kriyaya tsiklicheskoy treshchinostoykosti konstruktivnykh materialov [Spreading of fatigue cracks and common curve of cyclic cracking]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Problems of machine-building and reliability of machines*, 2013, no. 5, pp. 47–57.
- Vavilov V. Temperaturnye nerazrushayushchie ispytaniya: kratkaya istoriya i sovremennoe sostoyanie [Thermal non destructive testing: short history and state-of-art]. *Kolichestvennaya Infrakrasnaya Termografiya QIRT 92. Trudy Evropeiskogo Seminara* [Proc. of the Eurotherm Seminar no. 27. Quantitative Infrared Thermography QIRT 92]. Chatenay-Malabry, France, 1992. pp. 179–194.
- Busse G., Bauer M., Rippel W., Wu D. Vibrometricheskii kontrol polimernykh kompozitov [Lockin vibrothermal inspection of polymer composites]. *Kolichestvennaya Infrakrasnaya Termografiya QIRT 92. Trudy Evropeiskogo Seminara* [Proc. of the Eurotherm Seminar no. 27. Quantitative Infrared Thermography QIRT 92]. Chatenay-Malabry, France, 1992. pp. 154–159.
- Schmidt J. Izuchenie protsessa treshchinoobrazovaniya v khrupkikh voloknistykh kompozitakh s ispolzovaniem infrakrasnoy termografii i akusticheskoy emissii [Infrared thermography and acoustic emission analysis study of the fracture process in short fibre composites materials]. *Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilozheniya. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the International Workshop. Advanced Infrared technology and applications]. Firenze, 1995. pp. 263–271.
- Gonchar A.V., Rudenko A.L., Mishakin V.V. Issledovanie mikroplasticheskikh deformatsiy konstruktivnoy stali na nachalnom etape ustalostnogo nagruzheniya metodami nerazrushayushchego kontrolya [Investigation of micro-plasticity deformations of constructional steel at the first fatigue stage by nondestructive check methods]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials*, 2012, no. 7, pp. 37–42.
- Gurevich S.E., Gaevoy A.P. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya razrushayushchey energii pri tsiklicheskom nagruzhenii [Method of experimental definition of destruction energy under cyclic loading]. *Zavodskaya laboratoriya – Plant laboratory*, 1973, no. 9, pp. 1110–1114.
- Fedorov V.V. Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrusheniya tverdykh tel [Thermodynamic aspects of durability and destruction of solid objects]. Tashkent, Fan Publ., 1979. 167 p.
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 246 p.
- Makhutov N.A., Makarenko I.V., Makarenko L.V. Issledovanie mekhanizma i kinetiki razrusheniya poverkhnostnykh raznoorientirovannykh poluellipticheskikh treshchin pri slozhnom napryazhenno-deformirovannom sostoyanii s pomoshchyu deformatsionnykh kriteriev nelineynoy mekhaniki razrusheniya [Investigation of mechanism and kinetics of destruction of surface different oriented semielliptical cracks under complex tension by deformation criterions of nonlinear destructive mechanics]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 2013, no. 4, pp. 91–97.
- Kurilenko G.A. *Sposob opredeleniya predela vynoslivosti* [The way of definition of endurance limit]. Author Certif. USSR, no. 1499167, 1989.
- Kurilenko G.A. Prognozirovaniye tsiklichekogo resursa detaley s makrotreshchinami termograficheskim metodom [Forecasting the cycle life of components with macrocracks by the thermographic method]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 36–39.
- Kurilenko G. Sovremennoe issledovanie ustalosti metallov s pomoshchyu infrakrasnoy tekhniki [Advanced Infrared examining of metal fatigue]. *Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilozheniya. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the International Workshop. Advanced Infrared technology and applications]. Firenze, 1995. pp. 253–262.
- Kurilenko G.A. Issledovanie treshchinostoykosti metallov termograficheskim metodom [Research of metal crack resistance by thermographic method]. *Obrabotka metallov – Work of metals*, 2010, no. 3 (48), pp. 41–44.

Received: 27 January 2014.