

УДК 620.172.24:534.6

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИИ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ НА ОСНОВЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*Савельев А.Н., к.т.н., доцент кафедры «Механика
и машиностроение» (savelyev2000@mail.ru)*

*Савельева Е.А., соискатель степени к.т.н. кафедры «Механика
и машиностроение» (elizavetown@rambler.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрены результаты оценки рациональной частоты воздействия на образец при реализации метода определения усталостных характеристик материалов на основе синергетически организованной эмиссии волн напряжений. Суть этого процесса заключается в том, что при мелкоступенчатом нагружении испытываемого образца на каждой ступени нагружения формируется поток эмиссионного сигнала. Одновременно подготавливается очередная серия дислокаций, способных в следующий момент нагружения выйти на поверхность кристалла и излучить волну напряжений. Величина этого сигнала характеризует процессы, происходящие в материале при той или иной нагрузке, и позволяет зафиксировать силовые параметры, соответствующие такой величине, как предел выносливости. Цель настоящей работы сводится к определению частоты мелкоступенчатого нагружения, обеспечивающей максимальный волновой сигнал при реализации метода определения усталостных характеристик материалов на основе синергетически организованной эмиссии волн напряжений. Проведен анализ процесса движения элементов материала. Опираясь на ранее опубликованные материалы по использованию синергетически организованной акустической эмиссии, проанализирован процесс поведения структурных составляющих металла, выделен и описан процесс поведения его зерна под воздействием дислокационных движений. Сила каждого такого воздействия представлена δ -функцией. Поведение зерна металла описано дифференциальным уравнением второго порядка. Вероятность перемещения зерна от импульсного воздействия со стороны близлежащих кристаллов и от собственных импульсов описана плотностью вероятности движения этого зерна. Рассматривая совместно динамическое и вероятностное описание поведения зерна, было получено уравнение Колмогорова – Фокера – Планка. В силу того, что в настоящей работе интерес представлял прежде всего колебательный характер движения зерна металла, вышеотмеченное уравнение было преобразовано в волномеханическую функцию процесса поведения зерна. Решением волномеханической функции является волновое уравнение. В результате рассмотрения волнового уравнения выявлена собственная частота колебаний зерна материала. Эта частота попадает в диапазон частот, который может быть воспроизведен при ступенчатом нагружении испытываемого образца. Это позволяет применительно к поведению кристаллической структуры металла реализовать резонансный эффект. Таким образом, определена частота, на которой колебания структуры материала на уровне зерна будут резонировать с внешним воздействием на образец. Резонансное взаимодействие структуры материала и внешнего ступенчатого нагружения образца позволит обеспечить более мощный эмиссионный сигнал при одной и той же величине ступенек при мелкоступенчатом нагружении.

Ключевые слова: эмиссия волн напряжений, синергетически организованный сигнал акустической эмиссии, частота собственных колебаний зерен металла, резонансная частота, мелкоступенчатое нагружение, предел выносливости материала.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-467-474

ВВЕДЕНИЕ

Метод испытания материала на усталостную прочность на основе синергетически организованной акустической эмиссии предполагает, что образец нагружается ступенчато [1, 2]. При мелкоступенчатом растяжении металлического образца (рис. 1, а) во время каждого импульсного прироста напряжения в образце активируется до максимального уровня очередная серия дислокаций (рис. 1, б). Одновременно формируется и упругая волна напряжений, которая распространяется вдоль испытываемого образца (рис. 1, в). Взаимодействие этой волны с дислокациями, которые были активи-

рованы во время предшествующего шага нагружения и которые находились к этому моменту в крайне возбужденном состоянии, обеспечивает их коллективное движение с коллективной эмиссией волн напряжений (рис. 1, г). Таким образом, внутренние процессы в металле, соответствующие данному уровню напряжений, устойчиво фиксируются при помощи регистрации амплитуд колебаний волн напряжений. Для рациональной организации такого процесса необходимо правильно выбрать параметры режима нагружения: частоту и амплитуду ступенчатой нагрузки (рис. 1, а). При выборе ступенчатого режима нагружения образца металла необходимо на обоснованных закономерностях опреде-

литься с частотой ω (или величиной Δt , см. рис. 1, *a*) и амплитудой ступени $\Delta\sigma$ нагружения. В настоящей работе анализируется частота ступенчатого нагружения ω с точки зрения получения мощного акустического сигнала при $\Delta\sigma = \text{const}$.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

МАТЕРИАЛА

Исходим из того, что акустический, синергетически организованный сигнал будет самым большим, если колебательный процесс того или иного элемента кристаллической структуры металла будет резонировать с частотой ступенчатого нагружения. Для выделе-

ния такой структуры, собственные колебания которой могут быть близки частоте ступенчатого нагружения, воспользуемся теорией движения [3, 4] и выделим возможные формы движения элементов в материале. Кристаллический конструкционный материал представляет собой сложную разномасштабную композицию, поведение которой при нагружении выглядит как многоуровневый структурированный процесс. Разномасштабность элементов, составляющих металл, определяет и различный вид, и степень реакции его элементов на то или иное внешнее воздействие [5 – 7].

Рассмотрим более детально процесс движения элементов металла в образце (рис. 2, *a*). Участок *B* образца подвергается внешнему воздействию соседнего участка *A*, вынуждая его двигаться. Действие элементов участка *A* на элементы участка *B*, обозначенное D_1 , отразившись элементами участка *B* в виде O_2 , выражается в самодвижении C_2 всего участка *B*. Эта часть движения в виде действия D_2 передается следующему участку *B* образца, чем, собственно, и завершается одна ветвь процесса превращения внешнего этапа движения D_1 во внутренний C_2 и обратно во внешний D_2 . В момент отражения воздействия D_1 на элемент участка *B* происходят изменения не только всего этого участка, скажем, в виде его деформации, но и изменения элементов его внутренней структуры. Зерна металла также сдеформируются и переместятся, отразив воздействие D_1 в виде O'_2 . Таким образом, зародится вторая ветвь движения на уровне зерен металла: $O'_2 \rightarrow C'_2 \rightarrow D'_2 \rightarrow \dots \rightarrow$. Это движение выразится в межзеренных деформациях и закончится ростом межзеренных трещин. В свою очередь при деформации зерен в момент отражения ими внешнего воздействия начинается движение составных элементов зерна – дислокации. Отражение дислокациями воздействия D'_2 в виде O''_2 перейдет в самодвижение C''_2 и выйдет на поверхность зерна в виде акустической эмиссии. Отражение воздействия на зерно металла сопровождается также и самодвижением C''_2 ионов его кристаллической решетки, которое завершается в виде излучения в окружающую среду квантов тепла, указывая, таким образом, на наличие движения на ионном уровне. Эту последовательность ветвей движения можно продолжить, рассматривая все более тонкие структуры материала. В данном случае виды движения представляют интерес как механизм формирования дислокационных структур, а значит механизм движения элементов, связанных с движением дислокаций.

При передаче движения интенсивность вовлеченных в этот процесс составляющих передающего звена элементов различная. Соотношение между движениями с выделением доминирующего в этом движении элемента на разных уровнях структуры материала полностью зависит от характера внешней нагрузки. Как известно [8], при высокочастотном воздействии в силу резонансного эффекта наиболее интенсивно передают движение ионы кристаллической решетки. Это опре-

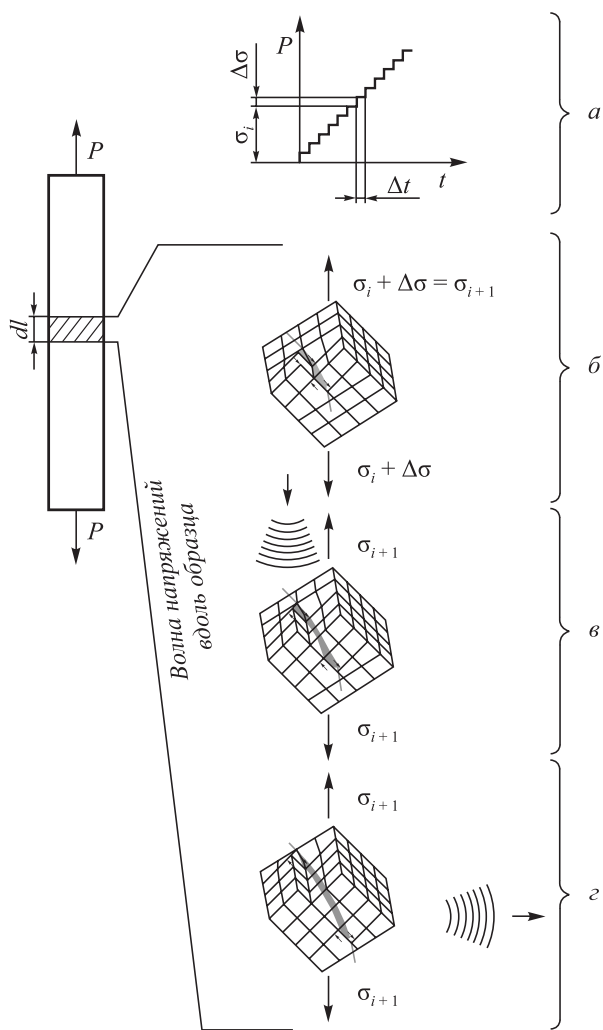


Рис. 1. Синергетический механизм организации сигнала эмиссии волн напряжений:

- a* – мелкоступенчатое растяжение металлического образца;
- b* – увеличение энергии дислокации; *в* – воздействие на дислокации упругой волны; *г* – вынужденный процесс движения дислокации с формированием эмиссии волн напряжений

Fig. 1. Synergistic mechanism of the signal organization of stress waves emission :

- a* – fine stretching of metal sample; *b* – increase in dislocation energy;
- в* – impact of elastic wave on dislocations; *г* – forced process of dislocation movement with stress wave emission

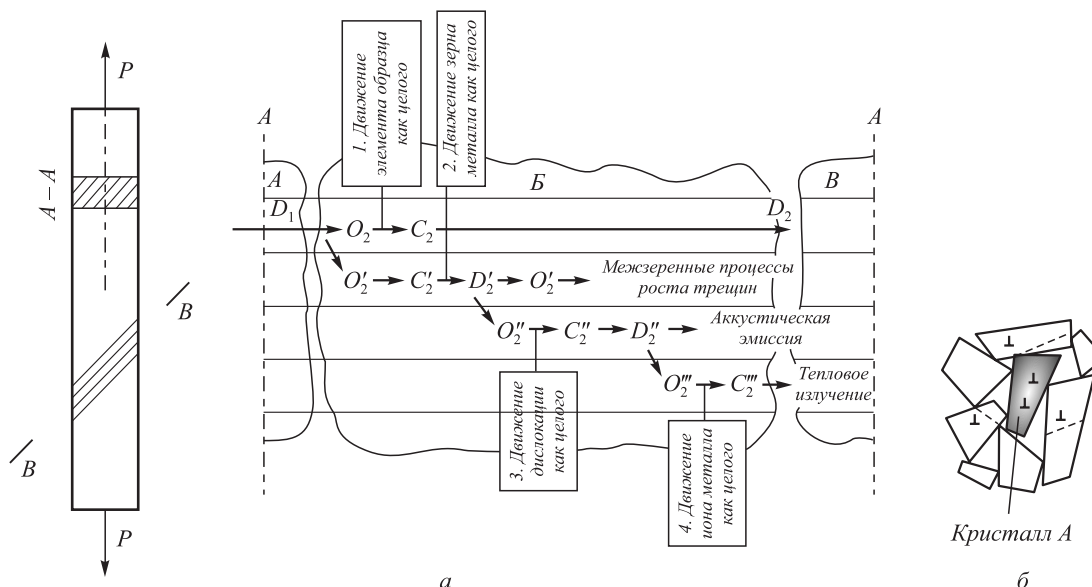


Рис. 2. Структура движения элементов материала при внешнем воздействии на него

Fig. 2. Movement structure of material elements under external influence

деляет заниженную в 1,2 – 1,6 раза чувствительность дислокаций к такого рода нагрузкам на материал. Воздействие, близкое к квазистатическому, напротив, способствует возникновению в материале наиболее заметных форм движения, связанных с формированием в нем дислокационных субструктур, ведущих к усталостному его повреждению [9 – 11]. В связи с этим наибольший интерес проявляется к результатам поведения дислокаций и их скоплений при низкочастотном воздействии на материал. Как показано в работах [12 – 14], минимальное силовое усилие, соответствующее пределу выносливости материалов, ниже 50 Гц. Известно также, что при приближении к квазистатическим нагрузкам порог чувствительности дислокаций к деформационным процессам в металлах возрастает и стремится к деформации, соответствующей пределу текучести. Можно предположить, что диапазон частот нагружения, в котором чувствительность дислокаций к передаваемому материалом движению максимальна, лежит в пределах 0,1 – 50 Гц.

Высокая чувствительность дислокаций к движению может быть объяснена тем, что частота движения одного из элементов материала совпадает с частотой движения всего передаточного звена испытываемого образца. Таким элементом при частотах нагружения 0,1 – 50 Гц может быть только зерно или область локализованной деформации, так как ионы металла имеют значительно более высокую частоту колебаний.

Дислокации также движутся с более высокими скоростями, нежели это возможно при частотах ниже 50 Гц. В этом случае очень важно составить картину движения дислокаций при низкочастотном воздействии на материал [15]. В процессе эволюции дислокационной структуры и выхода дислокаций на поверхность

зерен материала возможно дискретное движение областей локализованной деформации. В результате такого процесса на границе сопряжения элементов структуры формируются упруго-пластические зоны [9, 16, 17, 18], которые, собственно, способствуют интенсивному накоплению в них повреждений и зарождению дефектов. Зерно в этом случае, как отмечается в работах [19, 20], совершает как сдвиговые, так и ротационные перемещения. Эта совокупность деформаций получила название дисторсии. Линейная часть деформации в области упругой зоны реализуется в большей своей части путем деформации растяжения-сжатия решетки кристалла. Что касается ротационных смещений, то в этом случае доминирующую роль играют смещения объемов кристалла относительно друг друга, которые становятся значимыми при больших деформациях металла [19].

Будем считать, что в области упругой деформации определяющая роль в движении зерен металла принадлежит дислокациям, выходящим на межзеренные границы. В этом случае под действием импульсов выходящих из соседних зерен металла дислокаций кристалл (A) (рис. 2, б) совершает колебательные движения. Частота этих колебаний представляет в этом случае особый интерес в связи с тем, что по ее величине будет выбираться частота ступенчатого нагружения испытываемого образца при реализации синергетически организованной эмиссии. Силу каждого такого воздействия на кристалл можно представить δ -функцией вида

$$\Phi_j = \varphi \delta(t - t_j),$$

где t_j – момент действия j -го импульса на кристалл; φ – константа.

Полная сила в этом случае запишется как сумма всех единичных сил, действующих на кристалл (A):

$$\Phi(t) = \varphi \sum_j \delta(t - t_j) (\pm 1)_j,$$

где $(\pm 1)_j$ – случайное направление действия силы Φ_j .

Далее будем исходить из того, что деформация металла ограничивается упругой зоной. Этот факт обеспечивает возвращение системы в исходное положение после снятия нагрузки за счет упругой силы и всегда при отсутствии внешней нагрузки $\sigma(t)$ на металл и, соответственно, силы $\Phi(t)$ взаимодействия кристалла, величина его смещения составит $q = 0$. Тогда динамическое движение кристалла (A) запишется в общем виде как

$$mq + h\dot{q} + c\ddot{q} = \Phi(t),$$

где m , q , \dot{q} и \ddot{q} – масса, перемещение, скорость и ускорение кристалла; c – жесткость взаимодействия зерен материала; h – постоянная затухания.

Рассматриваемый кристалл в металле плотно зажат между соседними кристаллами. В силу этого процесс его движения происходит в стесненных условиях, жестко ограничивающих его перемещения, т.е. рассматриваемый кристалл как динамическая система является «передемпфированным». Это дает основание предполагать, что ускорение движения кристалла – величина малая, которой в данном случае можно пренебречь. После упрощения с учетом вышеизложенного динамическое уравнение поведения кристалла (A) примет вид

$$\dot{q} = -\gamma q + F(t), \tag{1}$$

где $\gamma = \frac{c}{h}$; $F(t) = \frac{\varphi}{h} \Phi(t)$.

Поведение произвольно выбранного блока, состоящего из n кристаллов, в процессе доминирующей упругой деформации материала определяется действующей на него силовой ситуацией. На каждый кристалл воздействуют близлежащие кристаллы, непосредственно или опосредствованно передавая импульсы от выходящих на поверхность дислокаций и, тем самым, изменяют их положение. Вероятность перемещения кристалла (A) в рассматриваемом блоке кристаллов в точку $q_i(t)$ за счет импульсов как от близлежащих кристаллов, так и от собственных импульсов определится так:

$$p_i(q, t) = \delta[q - q_i(t)]. \tag{2}$$

Если вероятность появления траектории i равна p_i , то плотность распределения вероятностей может быть записана в виде

$$f(q, t) = \sum p_i \delta[q - q_i(t)],$$

или с учетом уравнения (2) – в виде

$$f(q, t) = \langle \delta[q - q_i(t)] \rangle; \tag{3}$$

здесь через скобки $\langle \rangle$ обозначена операция усреднения. Рассмотрим изменение параметра f за время Δt :

$$\Delta f(q, t) = f(q, t + \Delta t) - f(q, t). \tag{4}$$

С использованием уравнения (3) приведем выражение (4) к виду

$$\Delta f(q, t) = \langle \delta[q - q(t + \Delta t)] \rangle - \langle \delta[q - q(t)] \rangle. \tag{5}$$

Далее положим, что

$$q(t + \Delta t) = q(t) + \Delta q(t), \tag{6}$$

и разложим δ -функцию по степеням $\Delta q(t)$, включая и квадратичные члены. Такое разложение имеет вид [21]:

$$\Delta f(q, t) = \left\langle -\frac{d}{dq} \delta[q - q(t)] \Delta q(t) \right\rangle + \frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2}{dq^2} [q - q(t)] [\Delta q(t)]^2 \right\rangle. \tag{7}$$

Используя полученное ранее динамическое уравнение движения кристалла (1), найдем Δq . Для этого проинтегрируем уравнение (7) по временному интервалу Δt , принимая во внимание то, что положение q кристалла изменяется очень мало, но число толчков, которое он испытывает, очень велико:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \dot{q}(t') dt' &= q(t + \Delta t) - q(t) \equiv \Delta q = \\ &= - \int_t^{t+\Delta t} \gamma q(t') dt' + \int_t^{t+\Delta t} F(t') dt' = \gamma q(t) \Delta t + \Delta F(t); \end{aligned} \tag{8}$$

здесь t и t' – моменты времени.

Вычислим первый член в правой части уравнения (7). Для этого подставим в него правую часть выражения (8), после чего получим

$$\frac{d}{dq} \left\{ \langle \delta[q - q(t)] [-\gamma q(t) \Delta t] \rangle + \langle \delta[q - q(t)] \rangle \langle \Delta F \rangle \right\}. \tag{9}$$

Разбиение среднего (содержащего величину ΔF) в выражении (9) на произведение двух средних связано со следующим обстоятельством. Величина ΔF содержит все толчки, которые произошли после момента t , в то время как $q(t)$ определяется всеми толчками, произошедшими до этого момента. В силу того, что толчки происходят независимо друг от друга, полное среднее можно разбить на произведение средних и, поскольку $\langle F \rangle = 0$ и $\langle \Delta F \rangle = 0$, то уравнение (9) сведется к виду

$$-\gamma\Delta t \frac{d}{dq} \left\{ \langle \delta[q - q(t)]q \rangle \right\}. \quad (10)$$

Вычислим теперь второй член уравнения (7). При использовании тех же аргументов, что и выше, вторую составляющую уравнения (7) можно представить в виде

$$\frac{d^2}{dq^2} \langle \delta[q - q(t)] \rangle \langle \Delta q(t)^2 \rangle. \quad (11)$$

Если в выражение (11) подставить Δq из уравнения (8), то найдем члены, содержащие Δt^2 , $\Delta t \Delta F$ и $(\Delta F)^2$. Величина $(\Delta F)^2$ при этом пропорциональна Δt в силу того, что среднее от ΔF равно нулю, а следовательно, вклад в выражение (11) вносит только член $\langle (\Delta F)^2 \rangle$, являющийся линейным по Δt . Тогда вычисляем

$$\langle \Delta F^2 \rangle = \langle \Delta F(t) \Delta F(t') \rangle = \int_t^{t+\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} dt' dt'' \langle F(t') F(t'') \rangle, \quad (12)$$

где t, t', t'' – моменты времени.

Импульсные воздействия на кристалл (A) позволяют представить корреляционную функцию силы $F(t)$ пропорциональной δ -функции вида

$$\langle \Delta F(t) \Delta F(t') \rangle = D \delta(t - t'), \quad (13)$$

где D – коэффициент диффузии.

Это дает возможность сразу вычислить выражение (12). В результате получим

$$\langle \Delta F^2 \rangle = D \Delta t. \quad (14)$$

Таким образом, окончательный вид второго слагаемого уравнения (7) будет следующим:

$$\frac{d^2}{dq^2} = \frac{d}{dq} \langle \delta[q - q(t)] \rangle D \Delta t. \quad (15)$$

Тогда, разделив исходное уравнение (7) на Δt , воспользовавшись результатами (10) и (15) и перейдя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, получим обобщенное уравнение Колмогорова – Фокера – Планка:

$$\frac{df}{dt} = \frac{d}{dq} (\gamma q f) + \frac{1}{2} D \frac{d^2}{dq^2} f. \quad (16)$$

Поскольку интерес вызывает только колебательный характер движения кристалла (A) материала, перейдем к волномеханической функции процесса [22]. Рассматривая случай, когда коэффициент дрейфа $K = \gamma q$ имеет потенциал S , т.е. $K = \frac{\partial S}{m \partial q}$, запишем полный потенциал Σ -процесса:

$$\Sigma = S + H,$$

где H – потенциал импульсной силы.

Тогда волномеханическая функция запишется так:

$$\Psi = \alpha \exp\left(-\frac{i\Sigma}{2mD}\right) \exp\left(-\frac{H}{2mD}\right), \quad (17)$$

где m – масса кристалла.

Если в формуле (16) плотность вероятности положения рассматриваемого кристалла f записать через Ψ , получим волномеханическое уравнение

$$\frac{\partial \Psi \Psi^*}{\partial t} = \frac{D}{i} \operatorname{div}(\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) = 0. \quad (18)$$

Затем берем лагранжиан системы в виде

$$L = \int \left\{ f \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + f \frac{(\nabla \Sigma)^2}{2m} + U(f) + \Pi(f) \right\} dy,$$

где U – плотность потенциальной энергии; Π – энергия диффузионного давления.

Варьируя этот лагранжиан, приходим к волномеханическому уравнению

$$\Delta \Psi - \frac{1}{2mD^2} \frac{\partial U}{\partial t} \Psi - \frac{i}{D} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0. \quad (19)$$

Будем исходить из того, что колебательный процесс кристалла металла протекает в области линейной взаимосвязи напряжений и деформаций, тогда плотность потенциальной энергии может быть выражена линейной ее зависимостью с потенциальной энергией: $U = fP$, где P – потенциальная энергия. Уравнение (19) запишется так:

$$\Delta \Psi - \frac{P\Psi}{2mD^2} - \frac{i}{D} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0. \quad (20)$$

Предположим, что в случае стандартных испытаний процесс деформации протекает стационарно, тогда волномеханическое уравнение движения кристалла (A) материала запишется в виде

$$\Delta \Psi + \frac{E - P}{2mD^2} \Psi = 0. \quad (21)$$

Решением этого уравнения является волновая функция вида

$$\Psi = \Psi_0 \exp\left(\frac{i}{2mD^2}\right) (pq - Et). \quad (22)$$

В этом уравнении p – количество движения кристалла (A), E – энергия перемещения.

Длина волны колебаний кристалла, соответствующая волновой функции (22), определится так: $\lambda = \frac{4\pi D}{p}$.

В случае, когда кристалл (A) передемпфирован, дли-

ну волны его колебаний можно записать как $\lambda = \frac{4\pi D}{\sqrt{2U}}$, а скорость перемещения принять равной скорости выхода из него дислокаций.

Далее исходим из того, что выход дислокаций из кристалла возможен только в том случае, когда $D \geq \sqrt{2U}$. В этом случае $\lambda = 4\pi$. Для определения частоты колебаний кристалла (A), а значит и частоты внешних воздействий, при которой он резонирует и предел выносливости становится минимальным, необходимо знать скорость выхода дислокаций из этого и соседних кристаллов. Воспользуемся экспериментальными данными, приведенными в литературе. Из работ [23 – 26] известно, что при воздействии на материал нагрузкой, близкой к пределу выносливости, импульсы акустической эмиссии при дискретном движении блоков локализованной деформации с выходом дислокаций на поверхность их зерен становятся максимальными. При дальнейшем увеличении нагрузки на материал сигналы акустической эмиссии, а значит и скорость выхода дислокаций из зерен больше не возрастают и остаются максимальными до наступления предела текучести. Скорость движения дислокаций, оцененная по данным работы [10], для различных материалов может достигать величины порядка $v = 10 \div 100$ м/с. Тогда частота колебаний кристалла будет равна 0,8 – 8 Гц.

Выводы

Оценена частота нагружения конструкционных материалов, с которой совершают собственные колебания кристаллы (зерна) металлов при их нагружении. Это дает возможность учитывать данный факт в выборе частоты ступенчатого нагружения образцов металла при испытании его на выносливость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 443 – 450.
2. Пат. № 2555506 РФ. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии / Е.А. Савельева, А.Н. Савельев. Заявл. 26.03.2014. Бюл. № 19.
3. Кандыбо Г.В., Страшников В.М. Материя, движение, техника. – Минск: Наука и техника. 1977. – 200 с.
4. Савельев А.Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 12. С. 53 – 58.
5. Савельев А.Н. Виды движений в материалах и невелеровские кривые усталостной их оценки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1992. № 2. С. 78 – 81.
6. Charsley P., Bangert U., Appleby L.J. The effect of temperature and amplitude on dislocation structures in cyclically deformed pure aluminum // Mat. Sci. and Eng. 1989. No. 113. P. 231 – 236.

7. Crinberg N.M. etc. Cyclic hardening and substructure of Al-Mg alloys // Mat. Sci. and Eng. 1991. A 138. P. 49 – 61.
8. Коттрелл А.Х. Прерывистая текучесть. – В кн.: Структура и механические свойства материалов. – М.: Металлургия, 1967. С. 210 – 224.
9. Конрад Г. Модель деформированного упрочнения для объяснения влияния величины зерна для напряжения течения металла. – В кн.: Сверхмелкое зерно в металлах. – М.: Металлургия, 1973. С. 206 – 219.
10. Glasov M., Llanes L.M., Laird C. Self-organized dislocation structures (SODS) in fatigue metals // Phys. Stat. Sol. (a). 1995. Vol. 149. P. 297.
11. Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer I. R. Dislocation distribution and prediction of fatigue damage // Metallurgical Transactions A. 1981. Vol. 12 (1). P. 109 – 120.
12. Кульбашный П.Ф. Влияние частоты нагружения и направленности анизотропии на усталостную прочность листового алюминиевого сплава АМг65М // Проблемы прочности. 1972. № 6. С. 38 – 41.
13. Кузьменко В.А., Матохнюк Л.Е., Писаренко Г.Г. и др. Влияние частоты нагружения на усталостную прочность металлов. – В сб. докл. Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. – Киев: Наукова думка, 1976. С. 23 – 32.
14. Писаренко Г.Г. Влияние частоты циклического растяжения-сжатия на выносливость сплава Д16Т // Проблемы прочности. 1972. № 12. С. 2 – 23.
15. Савельев А.Н., Громов В.Е. Влияние частоты нагружения на характер распределения движений в материалах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 62 – 66.
16. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформаций / В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Засимчук и др. – Киев: Наукова думка, 1989. – 320 с.
17. Mecke K., Blochwitz G., Kremling U. The development of the dislocation structures during the fatigue process of F.C.C. single crystals // Cryst. Res. And Technol. 1982. Vol. 17. No. 12. P. 1557 – 1570.
18. Ackermann F. etc. The dependence of dislocation microstructure on plastic strain amplitude in cyclically strained copper single crystals // Acta. met. 1984. Vol. 32. No. 5. P. 715 – 725.
19. Структурные уровни пластической деформации и разрушение / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
20. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. – In.: Acoustic emission, ASTM STP-505. 1972. P. 20 – 29.
21. Хакен Г. Синергетика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
22. Кузьменко Г.И. Значение теории простых марковских процессов в физической химии // Журнал физической химии. 1977. № 10. С. 2607 – 2610.
23. Носкова Н.И. Прямое наблюдение расщепления дислокаций в твердых растворах с ОЦК решеткой // Физика металлов и металловедение. 1985. Т. 60. Вып. 2. С. 387 – 394.
24. Jon M.C., Mason W.P., Besuers D.N. Observation of acoustic harmonics generated by long-range motion of dislocations // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. No. 12. P. 5871 – 5879.
25. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. – In.: Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991, Fruid Publ. – Company LTD. London, 1991. P. 157 – 164.
26. James D.R., Carpenter S.H. Relation between acoustic emission and dislocation kinetics in crystalline solids // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. No. 12. P. 4685 – 4697.

Поступила в редакцию 28 декабря 2018 г.
После доработки 17 февраля 2019 г.
Принята к публикации 19 февраля 2019 г.

DETECTION OF RATIONAL FREQUENCY OF THE SAMPLE INCREMENTAL LOADING DURING ITS TESTS FOR ENDURANCE ON THE BASIS OF A SYNERGETICALLY ORGANIZED ACOUSTIC EMISSION

A.N. Savel'ev, E.A. Savel'eva

Siberian State Industrial University, Russia, Kemerovo Region, Novokuznetsk

Abstract. The article considers results of the evaluation of rational frequency effecting the sample when implementing the method of determining the fatigue characteristics of materials based on synergistically organized emission of stress waves. The essence of this process lies in the fact that a flow of the emission signal is formed with a small-scale loading of the tested sample at each step of loading. At the same time, another series of dislocations is being generated, capable of reaching the crystal surface at the next moment of loading and emitting a stress wave. The magnitude of this signal characterizes the processes occurring in the material at a particular load, and allows the power parameters corresponding to such value as endurance limit to be recorded. The purpose of this work is to determine the frequency of small-scale loading, providing the maximum wave signal when implementing the method for determining the fatigue characteristics of materials based on synergistically organized emission of stress waves. The analysis of the movement of material elements was made. Based on previously published materials on the use of synergistically organized acoustic emission, the process of behavior of the metal structural components was analyzed; the process of the behavior of its grain under the influence of dislocation movements is identified and described. The strength of each such impact was represented by the delta function. The behavior of metal grains was described by the second order differential equation. The probability of a grain moving from impulse action from the side of lying crystals and from its own impulses is described by the density of movement probability of this grain. Considering jointly the dynamic and probabilistic description of the grain behavior, the Kolmogorov – Focker – Planck equation was obtained. Due to the fact that in the present work, the oscillatory nature of the metal grain movement was of interest, the above-mentioned equation was transformed into a wave-mechanical function of the process of grain behavior. The solution of wave-mechanical function is wave equation. As a result of consideration of the wave equation, natural frequency of material grain oscillations was revealed. This frequency falls in the range of frequencies that can be reproduced under stepwise loading of the test sample. This makes it possible to realize a resonance effect as applied to behavior of the metal crystal structure. Thus, frequency at which fluctuations in the material structure at the grain level will resonate with an external effect on the sample is determined. Resonant interaction of the material structure and external incremental loading of the sample will ensure a more powerful value of the emission signal at the same value of the steps under small-scale loading.

Keywords: emission of stress waves, synergistically organized acoustic emission signal, natural vibration frequency of metal grains, resonant frequency, small-scale loading, material endurance limit.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-467-474

REFERENCES

1. Savel'ev A.N., Savel'eva E.A., Lokteva N.A. Strength properties evaluation of materials of technological machines elements based on the synergetically organized signals of acoustic emission. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 443–450. (In Russ.).
2. Savel'eva E.A., Savel'ev A.N. *Sposob registratsii signalov akusticheskoi emissii* [The method of acoustic emission signals registration]. Patent RF no. 2555506. *Bulleten' izobretenii*. 2014, no. 19. (In Russ.).
3. Kandybo G.V., Strashnikov V.M. *Materiya, dvizhenie, tekhnika* [Matter, movement, technology]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1977, 200 p. (In Russ.).
4. Savel'ev A.N. Structural features of a stably functioning complex technical system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 12, pp. 53–58. (In Russ.).
5. Savel'ev A.N. Types of movements in materials and nevelier fatigue curves for their evaluation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1992, no. 2, pp. 78–81. (In Russ.).
6. Charsley P., Bangert U., Appleby L.J. The effect of temperature and amplitude on dislocation structures in cyclically deformed pure aluminum. *Mat. Sci. and Eng.* 1989, no. 113, pp. 231–236.
7. Crinberg N.M. etc. Cyclic hardening and substructure of Al-Mg alloys. *Mat. Sci. and Eng.* 1991, A 138, pp. 49–61.
8. Cottrell A.H. Discontinuous flow. In.: *Struktura i mekhanicheskie svoystva materialov* [Structure and mechanical properties of materials]. Moscow: Metallurgiya, 1967, pp. 210–224. (In Russ.).
9. Conrad H. Model of deformed hardening used to explain the effect of grain size for metal flow stress. In.: *Sverkhmelkoe zerno v metal-lakh* [Ultrafine-grain metals]. Trans. from Eng. Moscow: Metallurgiya, 1973, pp. 206–219. (In Russ.).
10. Glasov M., Llanes L.M., Laird C. Self-organized dislocation structures (SODS) in fatigue metals. *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1995, vol. 149, pp. 297.
11. Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer I. R. Dislocation distribution and prediction of fatigue damage. *Metallurgical Transactions A*. 1981, vol. 12, no. 1, pp. 109–120.
12. Kul'bashnii P.F. Influence of loading frequency and directivity of anisotropy on the fatigue strength of sheet aluminum alloy AMg65M. *Problemy prochnosti*. 1972, no. 6, pp. 38–41. (In Russ.).
13. Kuz'menko V.A., Matokhnyuk L.E., Pisarenko G.G. etc. Effect of loading frequency on fatigue strength of metals. In: *Ustalostnaya prochnost' materialov i elementov konstruksii pri zvukovykh i ul'trozvukovykh chastotakh nagruzheniya: Sb. dokl.* [Fatigue strength of materials and structural elements at sound and ultrasonic loading frequencies: Coll. of papers]. Kiev: Naukova dumka, 1976, pp. 23–32. (In Russ.).
14. Pisarenko G.G. Effect of the frequency of cyclic stretching – compression on endurance of D16T alloy. *Problemy prochnosti*. 1972, no. 12, pp. 2–23. (In Russ.).
15. Savel'ev A.N., Gromov V.E. Effect of loading frequency on movements distribution in materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1999, no. 6, pp. 62–66. (In Russ.).
16. Likhachev V.A., Panin V.E., Zasimchuk E.E. etc. *Kooperativnye deformatsionnye protsessy i lokalizatsiya deformatsii* [Cooperative deformation processes and localization of deformations]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 320 p. (In Russ.).
17. Mecke K., Blochwitz G., Kremling U. The development of the dislocation structures during the fatigue process of F.C.C. single crystals. *Cryst. Res. And Technol.* 1982, vol. 17, no. 12, pp. 1557–1570.
18. Ackermann F. etc. The dependence of dislocation microstructure on plastic strain amplitude in cyclically strained copper single crystals. *Acta. Met.* 1984, vol. 32, no. 5, pp. 715–725.
19. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Danilov V.I. etc. *Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrushenie* [Structural levels of plastic

- deformation and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 255 p. (In Russ.).
20. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. In: *Acoustic emission, ASTM STP-505*. 1972, pp. 20–29.
 21. Haken H. *Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in Physics, Chemistry and Biology*. 2nd Ed. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1978. (Russ.ed.: Haken H. *Sinergetika*. Moscow: Mir, 1980, 404 p.).
 22. Kuz'menko G.I. Value of the theory of simple Markov processes in physical chemistry. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1977, no. 10, pp. 2607–2610. (In Russ.).
 23. Noskova N.I. Direct observation of the dissociation of dislocations in solid solutions with b. c. lattice. *Physics of Metals and Metallography*. 1985, vol. 60, no. 2, pp. 165–172.
 24. Jon M.C., Mason W.P., Besuers D.N. Observation of acoustic harmonics generated by long-range motion of dislocations. *Journal of Applied Physics*. 1978, vol. 49, no. 12, pp. 5871–5879.
 25. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. In: *Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991*. Fruid Publ. Company LTD, London, 1991, pp. 157–164.
 26. James D.R., Carpenter S.H. Relation between acoustic emission and dislocation kinetics in crystalline solids. *J. Appl. Phys.* 1971, vol. 42, no. 12, pp. 4685–4697.

Information about the authors:

A.N. Savel'ev, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (savel'yev2000@mail.ru)

E.A. Savel'eva, *Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Mechanics and Machine Engineering* (elizavettown@rambler.ru)

Received December 28, 2019

Revised February 17, 2019

Accepted February 19, 2019