

ПОВЕРХНОСТЬ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ И ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь.
hbg@list.ru

Разнообразие свойств, проявляемых материалами, и трудность проведения соответствующих экспериментов затрудняют прогнозирование долговечности материала при сложном напряженном состоянии даже в случае стационарного нагружения. Вопрос усложняется, если речь идет о переменных нагрузках. Один из подходов к решению подобных задач заключается в использовании понятия поврежденности материала и дифференциальных уравнений, описывающих ее развитие во времени.

Представив поврежденность (мера дефектности структуры материала в точке) $0 \leq \omega \leq 1$ как сумму гидростатической ω_g и девиаторной ω_d составляющих и пренебрегая мгновенно-обратимой и запаздывающее-обратимой компонентами, можно описать рост остаточной поврежденности уравнениями

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_g + \omega_d \\ \dot{\omega}_g &= v_g(1-\omega) \frac{\sigma_g}{\sigma_{g_0}} \exp(\Delta U_g(\alpha, \sigma, \omega)) \\ \dot{\omega}_d &= v_d(1-\omega) \frac{\sigma_d}{\sigma_{d_0}} \exp(\Delta U_d(\alpha, \sigma, \omega))\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_g – гидростатическое напряжение, $\sigma_i > 0$ – интенсивность напряжений, σ_b – предел прочности материала при заданном режиме нагружения, v и α – структурные параметры материала, связанные соответственно с частотой появления актов необратимого нарушения структуры и с влиянием напряженного состояния на энергию активации этих процессов (константы при фиксированной температуре).

Произведения вида $v \cdot \sigma / \sigma_b$ характеризуют средние скорости роста поврежденности на врожденных дефектах при относительно уровне упругих деформаций материала e/e_b и отсутствии активации процесса внешним полем. Последнее вызывает дополнительную концентрацию внутренних напряжений на дефектах структуры, чем способствует уменьшению энергетического порога, преодоление которого ведет к потере устойчивости решетки и разрушению межатомных связей. В качестве мер силового воздействия приняты средние нормальные напряжения и среднеквадратические касательные напряжения, которые характеризуют упругое изменение элементарного объема материала при внешнем нагружении. Обе меры упругого искажения решетки влияют на падение энергии активации:

$$\begin{aligned}\Delta U_g &= x_g / (1 - \omega) = (\alpha_g \sigma_g + \alpha_{dg} \sigma_d) / (1 - \omega) \\ \Delta U_{dev} &= x_{dev} / (1 - \omega) = (\alpha_{dv} \sigma_v + \alpha_d \sigma_d) / (1 - \omega).\end{aligned}\quad (2)$$

Поскольку поврежденность рассматривается как величина скалярная, ее влияние на внутренние напряжения в точке тела приближенно учитывается множителем $1/(1-\omega)$.

При монотонно увеличивающейся или постоянной нагрузке растут исходные дефекты. Если нагружение сопровождается разгрузками, то рассеяние энергии в материале вызывает появление дополнительных центров дефектности структуры, что влечет рост частотного параметра v . Это обстоятельство может быть учтено введением в (1) дополнительного множителя вида $1 + F(\sigma, \epsilon, t)$, который зависит от напряжений, деформаций и времени. При многоцикловых нагрузках одинакового вида функция F не равна нулю на интервале напряжений $\sigma_c \leq \sigma \leq \sigma_b$ (здесь σ_c – предел усталости), а зависимость от времени

линейна. Для случая одномерного растяжения-сжатия соответствующее уравнение рассмотрено и проанализировано в [1] для нескольких возможных форм функции $F(\sigma, t)$. Здесь для нее используется предельный случай в виде функции Хевисайда, что дает скачек на поверхности долговечности.

Для случая многоциклового усталости при гармонической форме нагрузки уравнения запишутся в виде:

$$\omega = \omega_g + \omega_d$$

$$\dot{\omega}_g = v_g(1-\omega) \frac{|\sigma_g(r+1)|}{\sigma_{bg}} (1 + K_g F_s f t) \exp((\alpha_{g1} \sigma_g (r + \sin(2\pi f t)) + \alpha_{g2} \sigma_g |r + \sin(2\pi f t)|) / (1-\omega)) \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_d = v_d(1-\omega) \frac{|\sigma_d|r+1|}{\sigma_{bd}} (1 + K_d F_s f t) \exp((\alpha_{d1} \sigma_d (r + \sin(2\pi f t)) + \alpha_{d2} \sigma_d |r + \sin(2\pi f t)|) / (1-\omega))$$

где σ_g, σ_d – амплитудная величина соответствующих напряжений, r – доля постоянной составляющей цикла сравнительно с вибрационной (при прямом нагружении), K_g и K_d – коэффициенты зарождения наведенных дефектов, функция $F_s = 1$ при $\sigma_s \leq \sigma \leq \sigma_b$ и $F_s = 0$ в других случаях, f – частота цикла, t – время ($N = f t$ – число циклов).

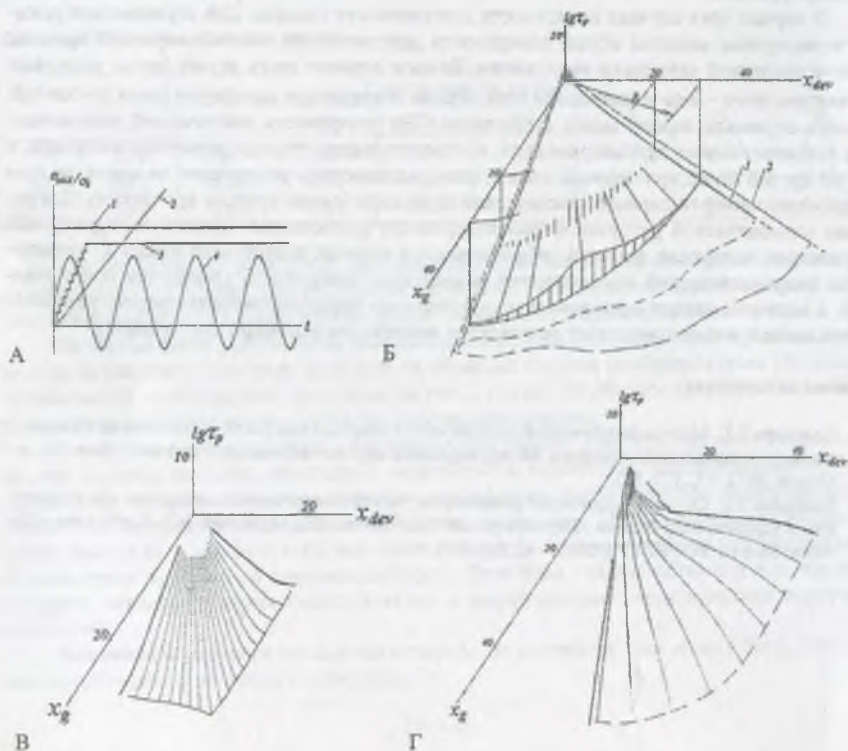


Рис. 1. Режимы нагружения (А) и поверхности долговечности для режимов 1 и 2 (Б), 3 (В) и 4 (Г)

Решение уравнений (1)–(3) позволяет построить поверхность долговечности, иллюстрирующую связь логарифма приведенного времени $\tau_p = v_d t_p$ достижения поврежденностью уровня $\omega = 1$ с аргументами функций снижения энергии активации x_g и x_{dev} . На рис.1 показаны рассмотренные режимы нагружения и соответствующие им фрагменты поверхностей для исходно-неповрежденного материала ($\omega(0) = 0$) при выполнении условий прямого нагружения. Для одномерного случая связь долговечности с формой воздействия прослеживается по кривым, расположенным на плоскости $\lg \tau_p - x_{dev}$.

Построения выполнены со следующими значениями числовых параметров:

$$\alpha_g = 2.8e-2, \alpha_d = 1.7e-2, \alpha_{gd} = 1.0e-2, \alpha_{dg} = 2.0e-2,$$

$$v_g = v_d = 1.0e-6.5, \sigma_1 = 300, \sigma_{bg} = \sigma_{bd} = 1000,$$

$$r = 0.5, f = 100, K_g = K_d = 10.$$

В расчетах предполагалась независимость свойств материала от времени, но подобные особенности поведения материалов могут быть учтены при совместном решении уравнений течения и поврежденности [2]. Роль реологических факторов при испытаниях на долговечность повышается при приближении напряжений к пределу прочности материала, так как при этом важную роль начинает играть время выхода напряжений на предельный уровень.

В первых трех случаях поверхности долговечности гладкие. Для ступенчатого режима характерным является обрыв поверхности долговечности, соответствующий времени начала последней ступеньки нагружения. Важное влияние здесь играет время выдержки на каждом шаге – с ее увеличением зона обрыва поверхности смещается вверх по оси $\lg t$. Высота ступеньки влияет менее существенно. На поверхности циклической долговечности возникает скачок при напряжениях, соответствующих пределу усталости материала, а также крутой изгиб при подходе к нагрузкам, вызывающим разрушение за время, не превышающее четверти периода цикла заданной частоты (около предела прочности). Для режима гармонической догрузки форма поверхности существенно зависит от структурных параметров материала, уровней вибрационных и средних напряжений цикла. С увеличением гидростатической составляющей воздействия поверхность становится более гладкой, а величина скачка долговечности при переходе через напряжения предела усталости уменьшается, что соответствует результатам анализа для одномерного случая [1].

Список литературы

1. Холодарь Б.Г. Модель циклической долговечности стержня при растяжении-сжатии / Теоретическая и прикладная механика. Международный научно-технический журнал. – Вып. 27 – Минск: 2012. – С.177-183.
2. Холодарь Б.Г. Описание поведения реономного упруго-пластического материала при скоростном и ударном нагружении. /Перспективные технологии. Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-во УО “ВГТУ”, 2011. – С. 567-595.