

увеличением F значение $\rho_s^{(1)}$ увеличивается, а $\rho_s^{(2)}$ — уменьшается; с ростом δ меняется тип стационарных состояний (отмечено различными символами на кривых рис. 2).

Расчеты фазовых траекторий показали, что в зависимости от исходного дефектного состояния при данном воздействии возможна существенно различная эволюция дислокационной подсистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Л.Е., Кобычев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М.: Металлургия, 1984. 182 с.
2. Попов Л.Е., Пудан Л.Я., Колупаева С.Н. и др. Математическое моделирование пластической деформации. Томск: Изд-во ТГУ, 1990. 185 с.
3. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивость пластической деформации кристаллов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 300 с.
4. Ashby M.F. Work hardening of dispersion hardened crystals // *Phil. Mag.* 1966. V. 14. P. 1157-1178.
5. Хири П.Б., Хэмфри Ф. Дж. Пластическая деформация двухфазных сплавов, содержащих малые недеформируемые частицы / Справочник прочности и пластичности. М.: Металлургия, 1978. С. 158-186.
6. Коротаев А.Д., Чумляков Ю.И., Бушнев Л.С. Механизмы деформации и природа упрочнения гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983. С. 135-162.
7. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. 168 с.

УДК 621.38.019.3

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

© Е.В. Семакин, С.Ф. Подборонников, В.Е. Громов, Д.С. Поварник

Россия, Новокузнецк, СибГИУ

Semakin E.V., Podboronnikov S.F., Gromov V.E., Povarnik D.S. Principles of the reliability theory of materials and goods. The theoretical approaches to the design of refusals distribution and the definition of reliability characteristics of materials and products have been made in this paper. The energetic conception of materials fracture has been put in the base of the developed ideas. The properties of the phase plane are used for the definition of average period of exploitation.

Обеспечение качества и надежности изделий имеет решающее значение для создания продукции, конкурентноспособной на внутреннем и внешнем рынках. Традиционные подходы к описанию надежности статистическими методами, имевшие место ранее, практически полностью себя исчерпали. Конечно, полностью отбрасывать статистические методы нельзя, поскольку всегда есть случайные отклонения в технологии изготовления изделий, и процессы нагружения в эксплуатации имеют стохастическую компоненту. Однако же главную роль должны играть обобщенные представления о сущности протекающих в материалах процессов, изменения их свойств, статистике же отводится роль инструмента для обработки наблюдений, прогнозирования и расчета традиционных параметров надежности. Многие реальные физические и физико-химические процессы, изменяющие исходное качество материала изделия, можно представить следующим образом.

Существует некоторая область в материале изделия, где накапливаются элементарные повреждения структуры (микрповреждения); такую область в целом будем отождествлять с растущими дефектами материала. Рост дефекта может состоять в изменении размеров дефектной области, или в изменении плотности микрповреждений (отношения накопленного числа к объему), или в том и другом сразу. На образование каждого микрповреждения затрачивается некоторое количество энергии. Если микрповреждение необратимо, «не залечивается», это означает, что соответствующие атомы, активированные затрачиваемой энергией, попали в потенциальную яму, а количество энергии, соответст-

вующее элементарному акту повреждения материала, рассеяно в том или ином виде.

Результат действия всей затрачиваемой на образование микрповреждений энергии можно выразить числом образующихся микрповреждений или же количеством затраченной энергии, а в ряде случаев — количеством диссипированной энергии. Принимая модель возникновения микрповреждения в виде преодоления некоторого энергетического барьера E_a , будем считать высоту этого барьера тем элементарным количеством энергии, которое необходимо для возникновения одного микрповреждения. Тогда произведение энергии E_a на количество возникших микрповреждений n представляет собой энергию, затраченную на изменение исходного качества материала изделия:

$$W = E_a \cdot n. \quad (1)$$

Число микрповреждений n меняется во времени. Можно задаваться различными предположениями относительно кинетики образования и накопления микрповреждений, но в любом случае

$$\dot{W} = \int_0^t E_a \cdot n_t' \cdot dt, \quad (2)$$

где $n_t' = \frac{dn}{dt}$ — скорость (интенсивность) накопления микрповреждений.

Подынтегральное выражение в (2) по своему физическому смыслу представляет собой мощность процесса разрушения материала, а результат интегрирования $\dot{W}$ - накопленную к текущему моменту времени работу разрушения, численно равную энергии, затраченной на разрушение материала изделия. На интенсивность n_i^I и величину энергетического барьера E_a оказывают влияние параметры внешних воздействий $\bar{X}$.

$$E_a \cdot n_i^I = \dot{P} \equiv \dot{P}(\bar{X}, t).$$

Параметры воздействий $\bar{X}$ влияют на интенсивность возникновения микроповреждений не непосредственно, а через изменение распределения атомов вещества по энергиям, следовательно, изменяется интенсивность случайного процесса активации атомов материала.

К моменту отказа τ накапливается предельное значение работы разрушения:

$$\dot{W}_n = \int_0^{\tau} \dot{P}(\bar{X}, t) dt, \quad (3)$$

но практика показывает, что и $\tau = \tau(\bar{x})$. Поскольку нашей задачей является именно определение (или прогнозирование) значений τ , то исходные для этого физические зависимости не должны содержать времени t в явном виде. Пусть в исходном состоянии ($t = 0$) физические свойства материала изделия описываются набором параметров $\bar{F}_0$. По мере старения и/или изнашивания материала в нем накапливаются микроповреждения, и физические свойства изменяются: $\bar{F} = \bar{F}_0 + \Delta \bar{F}(\bar{W}, \bar{X})$, то есть изменение

физических свойств материала определяется расходом ресурса (накоплением работы разрушения) и уровнем воздействий. Интенсивность накопления микроповреждений, в свою очередь, является функцией свойств материалов и уровня воздействий:

$$n_i^I = \xi(\bar{F}, \bar{X}), \text{ или, умножая на } E_a:$$

$$\dot{P} \equiv \frac{\partial \dot{W}}{\partial t} = \Phi(\bar{F}_0, \bar{W}, \bar{X}). \quad (4)$$

Если к этому добавить требование единственности траектории, проходящей через любую точку $\bar{F}$ пространства физических параметров материала, то набор $\bar{F}$ будет соответствовать понятию «полного набора» [1], и будет выполняться принцип наследственности. Теперь $\dot{W}_n = \dot{W}(\bar{F}, \bar{X})$. Можно рассматривать (4) как дифференциальное уравнение первого порядка, причем

функция Φ нелинейна относительно $\dot{W}$. Поэтому вместо аналитического решения (4) перенесем рассмотрение на фазовую плоскость с координатами $(\dot{W}, 0, \dot{P} = \frac{\partial \dot{W}}{\partial t})$. Срок службы τ в этом случае отыщется как время перемещения изображающей точки из исходного состояния $(\dot{W} = 0)$ в состояние отказа $\dot{P}(\dot{W})$:

$$\tau = \int_{\dot{W}_0}^{\dot{W}_n} \frac{\partial \dot{W}}{\dot{P}} \equiv \int_{\dot{W}_0}^{\dot{W}_n} \left(\bar{F}, \bar{X} \right) \frac{\partial \dot{W}}{\dot{P}(\bar{F}, \bar{W}, \bar{X})}. \quad (5)$$

Для идеального изделия в (5) имеем $\dot{W} = 0$; в стабильных условиях $X_i = \text{const}$; получаемый из (5) результат можно рассматривать как некоторое «индивидуализированное» значение срока службы. Реальные же изделия получают случайные отклонения от средних значений параметров $\bar{F}$; обозначим эти отклонения $\bar{F}_0$. Аналогичным образом используем знак $\sim$ для указания случайных составляющих других величин

$$\dot{W}_n(\bar{F}_0 + \bar{F}_0, \bar{X} + \bar{X}).$$

Тогда

$$\tau + \tau = \int_{\dot{W}_0 + \dot{W}_0}^{\dot{W}_n} \frac{\partial \dot{W}}{\dot{P}(\bar{F}_0 + \bar{F}_0, \bar{W}, \bar{X} + \bar{X})}, \quad (6)$$

где τ - случайное отклонение значения срока службы от среднего значения; $\dot{W}_0$ - случайное отклонение исходного значения израсходованного ресурса; $\bar{X}$ - случайные возмущения параметров внешних воздействий.

С применением современных вычислительных средств моделирование (6) не представляет затруднений. В результате получается распределение значений τ (распределение отказов), а значит могут быть найдены показатели надежности [3].

Для конкретных процессов расходования ресурса приведенные соотношения являются обобщающими. Например, для случая термомеханического разрушения из (5) в предположении Больцмановского распределения атомов по энергиям получается известная формула С.Н. Журкова [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Перротс А.И., Карташов Г.Д., Цветаев К.Н. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974. 560 с.
3. Исследование возможностей использования энергетической концепции расходования ресурса для оценки надежности изделий приборной техники: Отчет о НИР. Новокузнецк, 1983. 102 с. Гос. пер. № 01830051642.