

Модель эволюции дефектов в материалах при ползучести

М.В. Салыкина, А.А. Быков

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Работа направлена на изучение эволюции дефектов в материалах при ползучести под относительно небольшой нагрузкой. Ранее авторами было экспериментально показано в [1], что в медных цилиндрических образцах при одноосном растяжении в областях, подвергшихся наибольшему пластическим деформациям, крупные (порядка одного микрона) дефекты отсутствуют. В областях с наименьшими необратимыми деформациями наоборот, наблюдается наибольшая их концентрация. На основе флуктуационной теории Френкеля [2, 3], которая на данный момент является общепринятой, нами показано что при ползучести за счет возникновения диффузионных потоков вакансий около сферической поры при одноосном растяжении образца происходит её рост.

В кристалле из-за температурных флуктуаций всегда присутствует некоторое количество дефектов, называемых вакансиями [4]. Их равновесная концентрация зависит от напряжений и температуры следующим образом:

$$C = C_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a - \lambda a^3 U}{kT}\right) \quad (1)$$

где, λ – коэффициент локальных перенапряжений, a^3 – активационный объем, k – постоянная Больцмана, U – плотность упругой энергии деформации (энергии на единицу объема). Характерная скорость перемещения вакансии задается следующим выражением:

$$V = \frac{a}{\tau} = \frac{a}{\tau_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a - \lambda a^3 U}{kT}\right)}$$

где, τ_0 – время, близкое к среднему периоду колебаний атомов в твердых телах около своего положения равновесия, и изменяющееся от 10^{-13} до 10^{-12} с, а τ – среднее время между переходами атомов с одного положения равновесия на другое в кристаллической решетке [2].

Удельный диффузионный поток вакансий в зависимости от их концентрации и средней хаотической скорости перемещения определяется следующей формулой:

$$\vec{j} = -\nabla\left(\frac{1}{4}CV\right)$$

Общий поток вакансий, проходящих через какую-либо поверхность, можно найти путем интегрирования удельного диффузионного потока по данной поверхности:

$$J = \int_S (\vec{j}, d\vec{S}) \quad (2)$$

Если интеграл взят по замкнутой поверхности, и он положителен, то вакансии уходят из соответствующей области, и в ней растёт количество молекул. Применительно к эволюции поры это значит, что пора уменьшается. Верно и обратное.

В предположении, что в каждой точке концентрация вакансий быстро становится равновесной и соответствует формуле (1), было рассчитано поле напряжений у сферической поры в образце, подвергнутому одноосному растяжению. Материал образца задавался изотропным, линейно упругим с известным модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. В области возле заданного дефекта определялась плотность упругой энергии деформации U , и по формуле (2) вычислялся общий поток вакансий.

Расчет показал, что поток вакансий направлен к дефекту. Следовательно, с приложением растягивающей нагрузки дефект в упругом материале растёт, и флуктуационная теория позволяет объяснить процесс роста объема дефектов при ползучести.

На основе полученных результатов в дальнейшем можно определить кинетические параметры роста дефектов до критического размера при циклических и постоянных нагрузках, то есть описать процесс старения материала деталей машин и механизмов при эксплуатации.

Литература

1. Салыкина М.В., Быков А.А. Экспериментальное исследование распределения микродефектов в области шейки после разрушения // Труды 57-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. – М.: МФТИ, 2014. – 260 с. – С. 212-213.
2. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. – Ленинград: Наука, 1975. – 592 с.
3. Гиляров В. Л. Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – №. 5. – С. 808-811.
4. Слуцкер А. И. Характеристики элементарных актов в кинетике разрушения металлов // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46. – №. 9. – С. 1606-1613.