

УДК 539.3

О ВОЗМОЖНОМ РЕОЛОГИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ЗАЛЕЧИВАНИЯ МИКРОДЕФЕКТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ПО ТИПУ «НАГРУЗКА–РАЗГРУЗКА»

© 2011 г.

Е.В. Мурашкин, А.А. Бажин, Д.А. Камовский

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

murashkin@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Проведено обобщение теории больших упругопластических деформаций на случай учета реологических свойств материалов в процессах, предваряющих пластическое течение, и в процессах разгрузки. На основе решения одномерных краевых задач, связанных с пластическим течением материала у одиночного дефекта сплошности, получены закономерности движения границы дефекта и формирования поля остаточных напряжений, обусловленные учетом вязких свойств материала на стадии, предваряющей пластическое течение, и при разгрузке.

Ключевые слова: упругость, пластичность, вязкость, большие деформации, остаточные напряжения.

В реальном металлоизделии всегда содержатся микронеоднородности, в том числе и дефекты сплошности (микропоры и микротрещины). Наличие таких микронеоднородностей в материале во многом определяет длительную прочность изделий, так как подобные дефекты сплошности при эксплуатационных нагрузках по типу «нагрузка–разгрузка» могут развиваться. В этом случае говорят о росте поврежденности материала.

С другой стороны, возможен и обратный эффект [1], когда за счет интенсивных внешних воздействий дефекты сплошности «залечиваются». В данном случае речь идет о повышении усталостной прочности изделий. Несомненно, при таких силовых воздействиях возникают состояния продеформированного тела, когда деформации нельзя считать малыми, даже если осуществлялось только обратимое деформирование. Эволюция таких состояний связывается с реологическими эффектами ползучести и релаксации напряжений. В настоящем сообщении предпринимается попытка моделирования подобных процессов. Рассмотрение проведем в рамках модели больших упругопластических деформаций [2], основные кинематические соотношения которой в прямоугольной декартовой системе пространственных (эйлеровых) координат x_i могут быть записаны в виде

$$\frac{De_{ij}}{Dt} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{2}((\varepsilon_{ik} - \varepsilon_{ik}^p + z_{ik})e_{kj} + e_{ik}(\varepsilon_{kj} - \varepsilon_{kj}^p - z_{kj})),$$

$$\frac{Dp_{ij}}{Dt} = \varepsilon_{ij}^p - p_{ik}\varepsilon_{kj}^p - \varepsilon_{ik}^p p_{kj},$$

$$\frac{Dn_{ij}}{Dt} = \frac{dn_{ij}}{dt} - r_{ik}n_{kj} + n_{ik}r_{kj},$$

$$d_{ij} = e_{ij} + p_{ij} - \frac{1}{2}e_{ik}e_{kj} - e_{ik}p_{kj} - p_{ik}e_{kj} + e_{ik}p_{km}e_{mj},$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + v_m u_{i,m},$$

$$r_{ij} = w_{ij} + z_{ij}(e_{ij}, \varepsilon_{ij}), \quad w_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}). \quad (1)$$

В соотношениях (1) u_p , v_i – компоненты векторов перемещений и скоростей точек среды; e_{ij} и p_{ij} – обратимые (упругие) и необратимые (пластические) составляющие тензора полных деформаций Альманси d_{ij} ; D/Dt – объективная производная тензоров по времени; источник ε_{ij}^p в уравнении изменения тензора p_{ij} – тензор скоростей пластических деформаций; $z_{ij} = -z_{ij}$ – нелинейная часть тензора вращений r_{ij} , полностью выписанная в [2], определяющая его отличие от тензора жесткого вращения w_{ij} . Согласно уравнениям (1) при разгрузке компоненты тензора необратимых деформаций p_{ij} изменяются, как при жестком перемещении тела.

Для упрощения соотношений «напряжения–деформации» примем гипотезу о независимости свободной энергии от необратимых деформаций; тогда напряжения в среде полностью определяются обратимыми деформациями, и для рассмат-

риваемого случая несжимаемой среды данные зависимости записываются в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial d_{ik}}(\delta_{kj} - 2d_{kj}), \quad p_{ij} \equiv 0, \\ \sigma_{ij} &= -p_1\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial e_{ik}}(\delta_{kj} - e_{kj}), \quad p_{ij} \neq 0.\end{aligned}\quad (2)$$

В соотношениях (2) p, p_1 – добавочные гидростатические давления, W – упругий потенциал, который для изотропной среды принимается в форме

$$W = (a - \mu)J_1 + aJ_2 + bJ_1^2 - \kappa J_1 J_2 - \theta J_1^3 + \dots,$$

$$J_k = \begin{cases} L_k, & p_{ij} = 0, \\ I_k, & p_{ij} \neq 0, \end{cases}\quad (3)$$

$$L_1 = d_{kk}, \quad L_2 = d_{ik}d_{ki}, \quad I_1 = e_{kk} - \frac{1}{2}e_{sk}e_{ks},$$

$$I_2 = e_{st}e_{ts} - e_{sk}e_{kt}e_{ts} + \frac{1}{4}e_{sk}e_{kt}e_{tn}e_{ns}.$$

Здесь $a, \mu, b, \kappa, \theta$ – упругие модули среды.

Принимаем, что необратимые деформации в материале начинают накапливаться с выходом напряженного состояния на поверхность нагружения $f(\sigma_{ij}) = 0$, которая в условиях принимаемого принципа максимума Мизеса является пластическим потенциалом. Напряжения в этом случае связаны со скоростями необратимых деформаций ассоциированным законом пластического течения.

Очевидно, что для выявления механизма, ответственного за «залечивание» или развитие дефекта, необходимо учитывать реологические свойства материалов. Для этой цели задача о поведении границы микротрещины была решена при учете вязких свойств среды на стадии деформирования, предваряющей пластическое течение, или на стадии разгрузки [3]. В качестве основных модельных соотношений использовались зависимости

$$\begin{aligned}\tau_{ij} + \xi_1 \frac{D\tau_{ij}}{Dt} &= 2\mu q_{ij} + 2\xi_2 \varepsilon_{ij}, \\ \frac{D\tau_{ij}}{Dt} &= \frac{d\tau_{ij}}{dt} - w_{ik}\tau_{kj} + \tau_{ik}w_{kj},\end{aligned}\quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}, \quad q_{ij} = d_{ij} - \frac{1}{3}d_{kk}\delta_{ij}$$

на стадии, когда пластические свойства еще не проявляются. Для областей с накопленными необратимыми деформациями зависимости (4) переписываются в виде

$$\tau_{ij} + \xi_1 \frac{D\tau_{ij}}{Dt} = 2\mu l_{ij} + 2\xi_2 \varepsilon_{ij},$$

$$l_{ij} = e_{ij} - \frac{1}{2}e_{is}e_{sj} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij} + \frac{1}{6}e_{sk}e_{ks}\delta_{ij}.\quad (5)$$

Остановимся на некоторых результатах про-

веденных вычислений. В сравнении со случаем идеальной пластичности при нагрузке значительных отличий в размерах дефекта и в распределении напряжений не наблюдается. Заметим, что при выборе определяющих законов в форме простейших тензорно-линейных соотношений (4) и (5) релаксации напряжений не происходит ни в процессе разгрузки, ни после его завершения. Выбор таких соотношений был обусловлен возможностью сравнения со случаем идеальной пластичности.

Для изучения релаксации напряжений возникает необходимость использования более сильного степенного закона ползучести. Отнесем все необратимые деформации в модели больших упругопластических деформаций, основные кинематические соотношения которой заданы зависимостями (1), к деформациям ползучести.

Тогда во всем процессе деформирования напряжения связаны с обратимыми деформациями соотношениями (2) (вторая зависимость) и (3). Принимаем, что с тензором скоростей необратимых деформаций компоненты тензора напряжений связаны законом ползучести Нортон

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{\partial V}{\partial \sigma_{ij}}, \quad V(\Sigma) = B\Sigma^n,$$

$$\Sigma = \sqrt{\frac{3}{2}}((\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2)^{1/2},$$

$$\sigma = 1/3 \sigma_{ii}.$$

Здесь B и n – заданные постоянные, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные значения тензора напряжений.

В рамках предложенных выше моделей больших упругопластических деформаций были решены задачи о поведении границы сферического микродефекта (микропоры) в идеальной упругопластической среде в условиях эксплуатационных нагрузок по типу «нагрузка–разгрузка», получены закономерности формирования полей остаточных напряжений и их релаксации в условиях разгрузки.

Список литературы

1. Горелов В.И. Исследование влияний высоких давлений на механические характеристики алюминиевых сплавов // Прикл. механика и техн. физика. 1984. №5. С. 157–158.
2. Буренин А.А., Быковцев Г.И., Ковтанюк Л.В. Об одной простой модели для упругопластической среды при конечных деформациях // Докл. АН СССР. 1996. Т. 347, №2. С. 199–201.
3. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Об остаточных напряжениях в окрестности цилиндрического дефекта сплошности вязкоупругопластического материала // ПМТФ. 2006. Т. 47, №2. С. 110–119.

**ON THE POSSIBLE RHEOLOGICAL MECHANISM OF HEALING MICRODEFECTS
UNDER INTENSE OPERATING «LOADING–UNLOADING»**

Ye. V. Murashkin, A. A. Bagin, D. A. Kamovsky

A generalization of the theory of large elastoplastic strains for the case of accounting for rheological properties of material in the processes preceding plastic flow and unloading processes has been conducted. Based on the analysis of one-dimensional boundary-value problems concerned with plastic flow of media near a single continuity defect, laws of the motion of the microdefect boundary and the formation of a residual stresses field, conditioned by accounting for viscous properties of material at the stage preceding the plastic flow and unloading, are obtained.

Keywords: elasticity, plasticity, viscosity, large deformations, residual stresses.