

На правах рукописи

Мурашкин Евгений Валерьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ПОЛЕЙ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ
МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ С ВЯЗКИМИ
И ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Владивосток – 2007

Работа выполнена в Институте автоматике и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Буренин Анатолий Александрович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Олейников Александр Иванович;

кандидат физико-математических наук,
доцент Шаруда Владимир Алексеевич.

Ведущая организация: Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,
г. Комсомольск-на-Амуре.

Защита состоится «__» мая 2007 года в _____ часов _____ минут на заседании
диссертационного совета ДМ 005.007.02 в Институте автоматике и процессов
управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, аудито-
рия 510, тел./факс(8-4232) 310452, E-mail: dm00500702@iacp.dvo.ru, URL:
<http://www.iacp.dvo.ru>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике и
процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан «__» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Дудко О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современная технологическая практика сталкивается с необходимостью учета упругих свойств деформируемых материалов в процессах изготовления и упрочнения изделий. Это связано с недопустимым изменением геометрии в процессах изготовления изделий после разгрузки и недопустимым уровнем остаточных напряжений в готовых изделиях. Одной из причин возникновения остаточных напряжений в материале является наличие в нем микронеоднородностей, которые во многом определяют длительную прочность изделий, так как подобные дефекты сплошности могут как развиваться, так и «залечиваться». Малые размеры неоднородностей уже при умеренных внешних нагрузках приводят к пластическому течению материала в их окрестностях. Изучение такого течения возможно только в рамках модели больших упругопластических деформаций, так как хотя бы необратимые деформации в окрестности микронеоднородности считать малыми нельзя.

В работах А.А. Буренина, Л.В. Ковтанюк и М.В. Полоник было показано, что в рамках модели больших деформаций для идеальной упругопластической среды наблюдается эффект приспособляемости среды к циклическим эксплуатационным нагрузкам по типу «нагрузка-разгрузка», когда после каждой разгрузки размеры дефекта, уровень и распределение остаточных напряжений не изменяются. Очевидно, что для выявления механизма, ответственного за «залечивание» или развитие дефекта, необходимо учитывать реологические свойства материалов. Поэтому решение краевых задач теории больших деформаций о поведении границ микродефектов сплошности с учетом вязких и пластических свойств материалов является **актуальной задачей**, служащей целям повышения длительной прочности материалов.

Таким образом, **целью работы** является изучение процесса формирования полей остаточных напряжений в окрестностях микронеоднородностей при учете вязких свойств материалов, поведения границ микродефектов в процессах обработки металлов давлением, ползучести и релаксации напряжений в окрестностях микродефектов сплошности как при активном процессе деформирования, так и при разгрузке.

К **основным научным результатам** выполненной работы относятся:

- выявленные закономерности формирования полей остаточных напряжений в окрестностях сферических включений в упругопластический материал;
- рассчитанные параметры динамики границы микротрещины в вязкоупругопластическом материале и итогового распределения остаточных напряжений в ее окрестности;

- математическая модель процесса ползучести и релаксации напряжений в окрестности одиночного сферического дефекта сплошности и результаты проведенных в ее рамках расчетов;
- предложенные методы решения существенно нелинейных краевых задач интенсивного деформирования материалов, содержащих микронеоднородности, с последующей их разгрузкой.

Научная новизна результатов обусловлена постановками и решениями новых краевых задач теории больших упругопластических деформаций при учете вязких свойств материалов с предложениями методов их решения.

Достоверность результатов диссертации основана на использовании классических методов механики сплошных сред и математической физики, использовании известных численных методов, сравнении результатов с классическими теориями упругопластического деформирования при малых деформациях.

Практическая значимость результатов диссертации определяется предложениями в математическом моделировании процесса формирования остаточных напряжений. Остаточные напряжения могут являться нежелательным элементом в технологиях изготовления металлоизделий, существенно снижающим их эксплуатационные свойства. Указание реологического механизма развития или «залечивания» микродефектов сплошности является необходимым условием совершенствования технологий обработки металлов давлением, как для оптимизации самого процесса изготовления, так и для достижения необходимых эксплуатационных качеств готовых изделий, возможно, путем последующих технологических приемов снятия остаточных напряжений (отпуск, отжиг).

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2002 – 2004; Хабаровск, 2005, 2006);
- V и VII Дальневосточная конференция студентов и аспирантов по математическому моделированию (Владивосток, 2001, 2003);
- региональная научно-техническая конференция «Молодежь и научно-технический прогресс» (Владивосток, 2001 – 2004);
- научно-техническая конференция «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2003, 2005, 2006);
- IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006);

— Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы механики», посвященная 70-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова (Владивосток, 2006).

Диссертация в целом докладывалась на семинаре лаборатории механики деформируемого твердого тела ИАПУ ДВО РАН под руководством д.ф.-м.н., профессора А.А. Буренина.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (наименований). Общий объем работы – страниц, в том числе рисунков, включенных в текст.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ***введении***, отталкиваясь от краткого литературного обзора, формулируются цель и задачи предпринимаемого исследования. Обращается внимание на то, что теория больших упругопластических деформаций является одним из интенсивно развивающихся направлений современной механики. В своей менее чем полувековой истории это направление уже представлено не одной сотней публикаций, включая монографии. Отмечается значительный вклад в развитие теории отечественных и зарубежных исследователей: Буренина А.А., Быковцева Г.И., Горелова В.И., Ивлева Д.Д., Ковтанюк Л.В., Кондаурова В.Н., Коробейникова С.Н., Кукуджанова В.Н., Левитаса В.И., Lee Е.Н., Маркина А.А., Мясникова В.П., Новикова Н.В., Nemat-Nasser S., Няшина Ю.Н., Пальмова В.А., Поздеева А.А., Prager W., Ревуженко А.Ф., Рогового А.А., Седова Л.И., Спорыхина А.Н., Толоконникова Л.А., Трусова П.В., Чернышова А.Д., Шитикова А.В. и др.

В ***первой главе*** диссертации приведены основные соотношения используемой модели больших упругопластических деформаций несжимаемой среды и их обобщения на случай учета вязких свойств материалов. В качестве модели больших упругопластических деформаций используется модель, основы которой были предложены Г.И. Быковцевым, В.П. Мясниковым, А.А. Бурениным и А.В. Шитиковым.

В § 1.1 строится кинематика деформирования. В декартовой прямоугольной системе пространственных Эйлеровых координат x_i компоненты обратимой (упругой) e_{ij} и необратимой (пластической) p_{ij} опытно не измеримых

составляющих тензора деформаций Альманси d_{ij} определяются дифференциальными уравнениями изменения (переноса) в форме

$$\begin{aligned}\frac{De_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{2} \left((\varepsilon_{ik} - \varepsilon_{ik}^p + z_{ik}) e_{kj} + e_{ik} (\varepsilon_{kj} - \varepsilon_{kj}^p - z_{kj}) \right), \\ \frac{Dp_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij}^p - p_{ik} \varepsilon_{kj}^p - \varepsilon_{ik}^p p_{kj}, \quad \frac{Dn_{ij}}{Dt} = \frac{dn_{ij}}{dt} - r_{ik} n_{kj} + n_{ik} r_{kj}, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + v_m u_{i,m}, \\ w_{ij} &= \frac{1}{2} (v_{i,j} - v_{j,i}), \quad r_{ij} = w_{ij} + z_{ij} (e_{ij}, \varepsilon_{ij}).\end{aligned}\quad (1)$$

В соотношениях (1) u_i , v_i – компоненты векторов перемещений и скоростей точек среды, символом D/Dt обозначена объективная производная тензоров по времени, источник ε_{ij}^p в уравнении изменения тензора p_{ij} следует, как и в классической теории, называть компонентами тензора скоростей пластических деформаций, $z_{ij} = -z_{ji}$ – нелинейная часть тензора вращений r_{ij} (ее полная форма приведена в работе), определяющая отличие от тензора жесткого вращения w_{ij} . Согласно уравнениям (1) в условиях разгрузки ($\varepsilon_{ij}^p = 0$) компоненты тензора необратимых деформаций p_{ij} изменяются как при жестком перемещении тела. Компоненты тензора полных деформаций Альманси d_{ij} через его составляющие e_{ij} и p_{ij} представляются в виде

$$d_{ij} = e_{ij} + p_{ij} - \frac{1}{2} e_{ik} e_{kj} - e_{ik} p_{kj} - p_{ik} e_{kj} + e_{ik} p_{km} e_{mj}. \quad (2)$$

В § 1.2, следуя формализму неравновесной термодинамики, получены определяющие зависимости между тензором напряжений Эйлера-Коши σ_{ij} и деформациями в областях разгрузки и обратимого деформирования и в областях пластического течения. Наиболее простыми данные соотношения получаются в случае, если принять гипотезу о независимости свободной энергии (используемого термодинамического потенциала) от необратимых деформаций. Тогда напряжения в области обратимого деформирования связаны с полными деформациями известной в нелинейной теории упругости формулой Мурнагана, в областях с накопленными необратимыми деформациями – ее аналогом в виде

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial e_{ik}} (\delta_{kj} - e_{kj}). \quad (3)$$

В зависимости (3) p – добавочное гидростатическое давление, W – упругий потенциал, который для изотропной среды в областях необратимого деформирования принимается в форме

$$W = (a - \mu)I_1 + aI_2 + bI_1^2 - \kappa I_1 I_2 - \theta I_1^3 + \dots, \quad (4)$$

$$I_1 = e_{kk} - \frac{1}{2}e_{sk}e_{ks}, \quad I_2 = e_{st}e_{ts} - e_{sk}e_{kt}e_{ts} + \frac{1}{4}e_{sk}e_{kt}e_{tn}e_{ns}.$$

Здесь a , μ , b , κ , θ – упругие модули среды. В случае отсутствия в среде необратимых деформаций инварианты I_1 , I_2 тензора обратимых деформаций необходимо заменить инвариантами $L_1 = d_{kk}$ и $L_2 = d_{ik}d_{ki}$ тензора деформаций Альманси.

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

В § 1.3 построенные модельные соотношения обобщены на случай учета вязких свойств материалов, как на стадии обратимого деформирования, так и на стадиях пластического течения и разгрузки. На стадии пластического течения вязкость учитывается введением соответствующих слагаемых в выражения для пластического потенциала.

Для учета вязкости на стадии деформирования, предшествующей пластическому течению, принимается соотношение

$$\tau_{ij} + \xi_1 \frac{D\tau_{ij}}{Dt} = 2\mu q_{ij} + 2\xi_2 \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

в котором $\tau_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$, $q_{ij} = d_{ij} - \frac{1}{3}d_{kk}\delta_{ij}$, $\frac{D}{Dt}$ – оператор производной Яумана, ξ_1 , ξ_2 – постоянные материала. Для областей с накопленными необратимыми деформациями соотношение (5) переписывается в форме

$$\tau_{ij} + \xi_1 \frac{D\tau_{ij}}{Dt} = 2\mu l_{ij} + 2\xi_2 \varepsilon_{ij}, \quad (6)$$

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

Зависимости (5) являются предельными для соотношений (6) при стремлении необратимых деформаций к нулю.

Во *второй главе* диссертации решены одномерные задачи о формировании полей остаточных напряжений около одиночных сферических включений в упругопластический материал. В § 2.1 решение получено в случае, когда включение абсолютно жесткое, в § 2.2 – когда оно является упругим, но более прочным, чем основной материал. В обоих случаях считаем, что включение радиуса r_0 находится в центре упругопластического шара радиуса R_0 ($r_0 \ll R_0$), а процесс деформирования связан с краевым условием

$$\sigma_{rr} \Big|_{r=R_0} = -p(t). \quad (7)$$

Здесь $p(t)$ – нагружающее усилие, σ_{rr} – компонента тензора напряжений в сферической системе координат r, φ, θ .

Задачи решены в квазистатической постановке в рамках модели малых упругопластических деформаций Прандтля-Рейса.

Первоначально решены задачи об упругом равновесии шара с включением. Из условия выхода напряженного состояния на границе включения на поверхность нагружения (условие пластичности Мизеса), которое в рассматриваемом случае сферической симметрии принимает форму

$$\left(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} \right) \Big|_{r_0} = -2k, \quad (8)$$

определяется требуемый уровень нагружающего давления p_0 .

Дальнейший процесс пластического течения связан с увеличением внешнего давления. Требование непрерывности параметров упругопластического деформирования на границе $r = r_1(t)$ развивающейся области пластического течения $r_0 \leq r \leq r_1(t)$ приводит к необходимости определения перемещения $u = u_r$, не только в области обратимого деформирования $r_1(t) \leq r \leq R_0$, но и в области пластического течения. Перемещения в данной области находятся приемом, предложенным Д.Д. Ивлевым: интегрированием уравнения равновесия находятся напряжения σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$, а затем, следуя закону Гука, обратимые деформации e_{rr}^e и $e_{\varphi\varphi}^e$. Тогда из ассоциированного закона пластического

течения $\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$, при задании поверхности нагружения f в форме условия Мизеса (8), получаем

$$\varepsilon_{rr}^p + 2\varepsilon_{\varphi\varphi}^p = 0, \quad e_{rr}^p = -2e_{\varphi\varphi}^p, \quad \frac{\partial u}{\partial r} + 2\frac{u}{r} = e_{rr}^e + 2e_{\varphi\varphi}^e. \quad (9)$$

Из последнего уравнения (9) определяется поле перемещений в областях необратимого деформирования.

Задачи разгрузки связаны с уменьшением достигнутого со временем уровня давления p_1 до нуля и решены в двух случаях: $p_1 < p_1^*$, $p_1 \geq p_1^*$. Наличие порогового значения p_1^* связано с различием постановки задач. Оказывается, что при $p_1 \geq p_1^*$ напряженное состояние на границе включения в процессе разгрузки выходит на поверхность нагружения $\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} = 2k$ и возникает новая область пластического течения. Поэтому, если в первом случае для нахождения компонент напряжений уравнение равновесия необходимо проинтегрировать в двух областях: $r_0 \leq r \leq r_1$ и $r_1 \leq r \leq R_0$, то во втором случае – в трех: $r_0 \leq r \leq r_2(t)$, $r_2(t) \leq r \leq r_1$ и $r_1 \leq r \leq R_0$, где $r_2(t)$ – граница области пластического течения при разгрузке (области повторного пластического течения). Распределение остаточных напряжений $\left(\begin{array}{l} \sigma_{rr} \rightarrow \frac{\sigma_{rr}}{\mu} \text{ – сплошная,} \\ \sigma_{\varphi\varphi} \rightarrow \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\mu} \text{ – штриховая линия в зависимости от радиуса } r \rightarrow \frac{r}{R_0} \end{array} \right)$ в случае жесткого включения приведено на рис. 1.

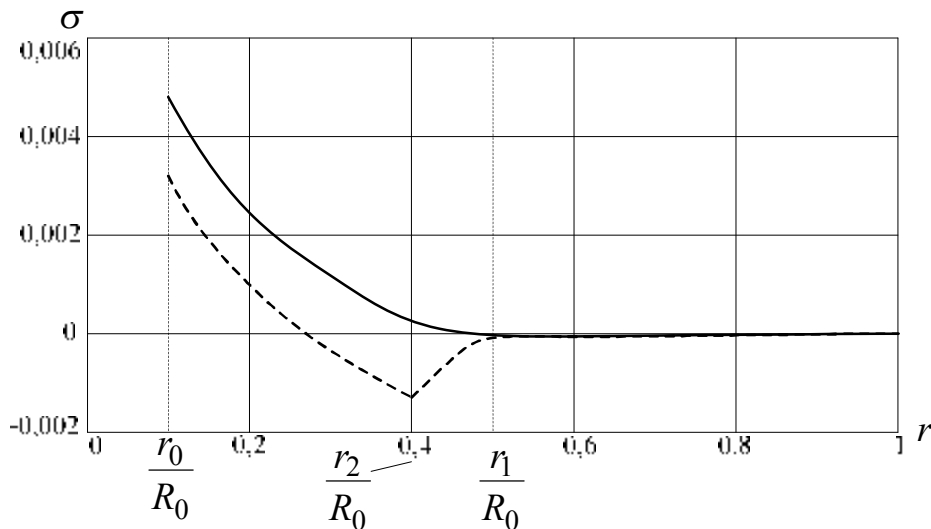


Рис. 1.

В *третьей главе* решена задача о поведении границы дефекта сплошности (микротрещины), когда вязкие свойства среды учитываются на стадии, предваряющей пластическое деформирование. Решение получено в рамках модели больших вязкоупругопластических деформаций (глава 1). Граничное воздействие задается на поверхности $R(t)$, значительно по сравнению с размерами микротрещины от нее удаленной, поэтому деформирование по всей длине микротрещины, исключая малые окрестности ее концов, считаем одномерным. Тогда границу дефекта сплошности полагаем круговой цилиндрической поверхностью начального радиуса r_0 . Процесс деформирования задан краевыми условиями

$$\sigma_{rr}\Big|_{r=R(t)} = -p(t), \quad \sigma_{rr}\Big|_{r=s(t)} = 0. \quad (10)$$

Здесь $s(t)$ – текущий радиус границы микротрещины, σ_{rr} – компонента тензора напряжений в цилиндрической системе координат r, θ, z .

Кинематика несжимаемой среды определяется с точностью до неизвестной функции $\varphi(t)$:

$$u_r = r - (r^2 + \varphi(t))^{1/2}, \quad \varphi(t) = R_0^2 - R^2(t) = r_0^2 - s^2(t), \quad (11)$$

где $u = u_r$ – единственная отличная от нуля компонента вектора перемещений.

Для определения компонент напряжений во всем процессе деформирования необходимо нахождение функции $\varphi(t)$ в задачах вязкоупругого деформирования до достижения функцией $p(t)$ значения $p_0 = p(t_0)$ (§ 3.1), о пластическом течении в окрестности дефекта при увеличении внешнего давления (§ 3.2) и о разгрузке (§ 3.3). Рассмотрен общий случай, когда при разгрузке возникает повторное пластическое течение.

Определяющие соотношения в областях обратимого деформирования (5) и в области с накопленными необратимыми деформациями (6) представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных относительно компонент девиатора напряжений $\tau_{rr}(r, t)$, $\tau_{\theta\theta}(r, t)$ и функции $\varphi(t)$. Для преобразования данных систем уравнений вводятся новые переменные

$$\tau_{rr} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n(t)}{n! r^{2n}}, \quad \tau_{\theta\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n(t)}{n! r^{2n}} \quad \text{при } p_{ij} = 0; \quad (12)$$

$$\tau_{rr} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z_n(t)}{n! r^{2n}}, \quad \tau_{\theta\theta} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{w_n(t)}{n! r^{2n}} \quad \text{при } p_{ij} \neq 0. \quad (13)$$

В рядах (12), (13) $a_n(t)$, $b_n(t)$, $z_n(t)$, $w_n(t)$ – неизвестные функции. Введение

новых переменных в виде (12), (13) связано с тем, что величину $(1 + \varphi r^{-2})^{-1}$ в правых частях зависимостей (5) и (6) можно рассматривать в качестве суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$(1 + \varphi r^{-2})^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (-\varphi r^{-2})^n.$$

Подстановка переменных (12), (13) в определяющие законы (5), (6) и равенство коэффициентов при одинаковых степенях r приводят к бесконечным рекуррентным системам обыкновенных дифференциальных уравнений относительно функций времени $a_n(t)$, $b_n(t)$, $z_n(t)$, $w_n(t)$ и $\varphi(t)$.

На каждом этапе решения задачи дифференциальное уравнение, следующее из уравнения движения среды и условий равенства компонент напряжений на упругопластической границе $m(t)$ и границе области повторного пластического течения $q(t)$, дополняется системой для коэффициентов $a_n(t)$, $b_n(t)$ в области обратимого деформирования и $z_n(t)$, $w_n(t)$ в области с накопленными необратимыми деформациями.

Заметим, что аналитически исследовать сходимость рядов (12), (13) в такой существенно нелинейной задаче не представляется возможным. Численные расчеты показывают, что разность между пятыми и шестыми членами рассматриваемых рядов составляет 10^{-7} . Поэтому в рядах при расчетах достаточно брать шесть слагаемых.

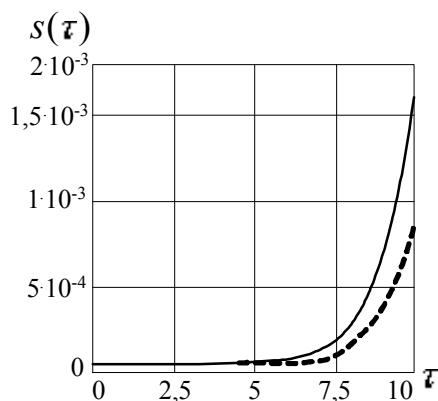


Рис. 2.

Остановимся на некоторых результатах проведенных вычислений. В сравнении со случаем идеальной пластичности при нагрузке значительных отличий в размерах дефекта и в распределении напряжений не наблюдается. Однако, в конечный момент разгрузки при одинаковых параметрах начала процесса разгрузки размер дефекта оказывается почти в два раза меньше для рассмотренного случая вязкоупругопластической

среды. На рис. 2 показаны закономерности изменения радиуса $s(\tau) \rightarrow s(t)/R_0$ дефекта в зависимости от безразмерного времени τ . Сплошная линия соответствует случаю идеальной упругопластической среды, штриховая – вязкоупругопластической.

Отличие в уровне и распределении остаточных напряжений иллюстрирует рис. 3. Заметим, что при выборе определяющих законов в форме простейших

тензорно-линейных соотношений (5) и (6) релаксации напряжений не происходит ни в процессе разгрузки, ни после его завершения. Выбор таких соотношений был обусловлен возможностью сравнения со случаем идеальной пластичности.

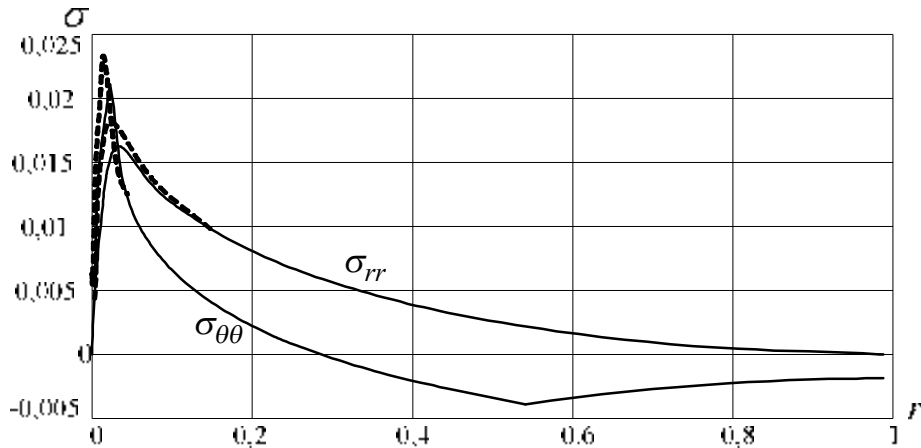


Рис. 3.

Для изучения релаксации напряжений возникает необходимость использования более сильного степенного закона ползучести. Такое решение задачи построено в *четвертой главе*. Решена задача о деформировании шара начального радиуса R_0 с одиночным сферическим дефектом сплошности (микропора) начального радиуса r_0 в центре шара. Процесс деформирования задается краевыми условиями (10), в которых σ_{rr} – компонента тензора напряжений в сферической системе координат r, φ, θ .

Так же, как в третьей главе, кинематика несжимаемой среды определяется с точностью до неизвестной функции $\varphi(t)$:

$$u_r = r - \sqrt[3]{r^3 + \varphi(t)}, \quad \varphi(t) = R_0^3 - R^3(t) = r_0^3 - s^3(t). \quad (11)$$

Напряжения в среде определяются соотношениями (3) и (4) и с тензором пластических деформаций связаны зависимостями

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

$$\Sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \left((\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2 \right)^{1/2}}, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}. \quad (15)$$

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

Алгоритм вычисления напряжений во всем процессе деформирования следующий. Задавая функцию $\varphi(t)$, тем самым задаем перемещения всех точек

среды, в том числе и граничных. Следствием соотношений (15) для сферической систем координат является зависимость

$$\varepsilon_{rr}^p = \frac{dp_{rr}}{dt} (1 - 2p_{rr})^{-1} = Bn(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^{n-1}, \quad p_{\theta\theta} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - p_{rr}}} \right),$$

которая в каждой точке среды $s(t) \leq r \leq R(t)$ представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение для вычисления компоненты пластических деформаций $p_{rr}(p_{\theta\theta})$. Затем из уравнения движения среды находится требуемый уровень нагружающего давления $p(t)$. По известным функциям $p(t)$ и $\varphi(t)$ строятся поля напряжений в любой момент времени. Изменение давления

$p(t)$ в зависимости от функции $\varphi(t) = \left(\frac{r_0}{R_0} \right)^3 (1 - \exp(-t^2 - t))$ показано на рис. 4, компонент напряжений – на рис. 5.

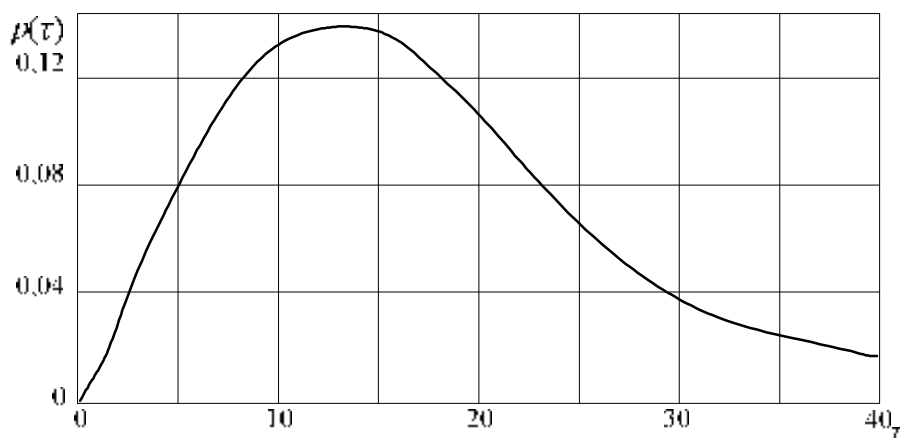


Рис. 4.

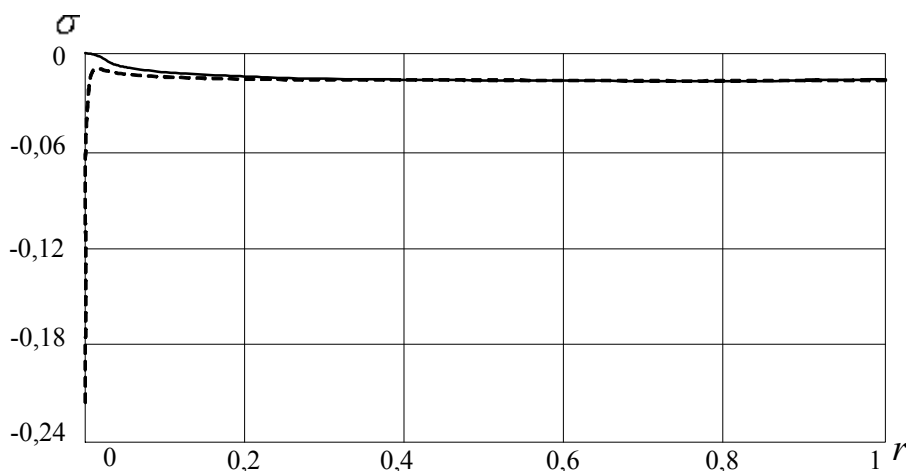


Рис. 5.

Если в дальнейшем ($\tau > 40$, рис. 4) положить неизменным поле перемещений, то напряжения продолжают уменьшаться со временем, т.е. происходит

процесс их релаксации.

В *заключении* приведены основные результаты диссертации, состоящие в следующем:

1. Решены задачи о формировании одномерных полей остаточных напряжений в окрестности сферических включений в упругопластический материал, жесткого и более прочного, чем основной материал. Исследовано влияние повторного пластического течения при разгрузке на уровень и характер остаточных напряжений.
2. В рамках модели больших деформаций получено решение задачи о поведении границы микротрещины в вязкоупругопластическом материале, изучены закономерности формирования поля остаточных напряжений. Сравнение полученных результатов со случаем идеальной пластичности позволило указать реологические механизмы, ответственные за «залечивание» микродефектов сплошности.
3. Решена задача о ползучести и релаксации напряжений в шаре с одиночным сферическим дефектом сплошности (микropора). Решение получено в рамках модели больших деформаций.
4. Предложены методы решения краевых задач теории больших деформаций вязкоупругопластических материалов с одиночными микронеоднородностями, включающих в себя процессы разгрузки и релаксации остаточных напряжений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Evgeniy V. Murashkin, Larisa V. Kovtanyuk. On considering complex rheological properties in evaluation of plastic flow and residual stress field nearby single spherical discontinuity // 5th International Student's Congress of the Asia-Pacific Region Countries. "Young People & Technical Progress". Russia. Vladivostok: FESTU, 2001. С. 148.
2. Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Остаточные напряжения при учете вязкоупругих свойств среды // Дальневосточная школа-семинар имени академика Е.В. Золотова: тезисы докладов. Владивосток: «Дальнаука», 2003. С. 116-117.
3. Мурашкин Е.В. Пластическое течение вязкоупругопластической среды у одиночного цилиндрического дефекта сплошности при конечных деформациях // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Вологдинские чтения». Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. С. 102-104.

4. Evgeniy V. Murashkin, Larisa V. Kovtanyuk. Plastic flow of viscous-elastoplastic environment // Fifth International Young Scholars' Forum of the Asia – Pacific Region Countries. Russia. Vladivostok: FESTU, 2003. P. 230-233.
5. Evgeniy V. Murashkin. The study of influence of viscous properties on microdefect dynamics // Materials of Sixth International Young Scholars' Forum of the Asia – Pacific Region Countries. Vladivostok, Russia, 27 – 30 September, 2005. Vladivostok: FESTU, 2005. Part 1. P. 135-136.
6. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Об остаточных напряжениях в окрестности цилиндрического дефекта сплошности вязкоупругопластического материала // Прикладная механика и техническая физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. Т. 47, № 2. С. 110-119.
7. Буренин А.А., Мурашкин Е.В. Динамика малой неоднородности в материале, подвергающемся эксплуатационным циклическим нагрузкам по типу «нагрузка – разгрузка» // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. Т.3, С. 47.
8. Бажин А.А., Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Остаточные напряжения при учете вязкоупругих свойств среды // Дальневосточная школа-семинар имени академика Е.В. Золотова: тезисы докладов. Владивосток: «Дальнаука», 2006. С. 134-135.
9. Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Остаточные напряжения в упругопластическом материале, вызываемые наличием более прочного включения // Материалы Всероссийской конференции «Фундаментальные вопросы и прикладные вопросы механики» посвященной 70-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова. Владивосток: Изд-во ИАПУ ДВО РАН, 2006. С. 73-74.
10. Ковтанюк Л.В., Мурашкин Е.В. Расчет поля остаточных напряжений в упругопластическом материале с одиночным сферическим включением // XV всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках»: Тезисы докладов. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2006. С. 73-74.
11. Бажин А.А., Мурашкин Е.В. Формирование поля напряжений в окрестности одиночного сферического дефекта сплошности в условиях неустановившейся ползучести // Материалы конференции «Вологдинские чтения». Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. С. 30-31.

Личный вклад автора. Работа [3] выполнена автором лично. В работах [1,2,4-11] автор участвовал в постановке задач, разработке алгоритмов решения и выполнял все необходимые вычисления.

Мурашкин Евгений Валерьевич

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ПОЛЕЙ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ
МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ С ВЯЗКИМИ
И ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Автореферат

Подписано к печати 12.04.2007 г. Усл.п.л. 0.8. Уч.-изд.л. 0.7.
Формат 60x84/16. Тираж 100. Заказ .

Издано ИАПУ ДВО РАН. Владивосток, Радио, 5.

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.

690041, Владивосток, Радио, 5.