

На правах рукописи

Адеянов Игорь Евгеньевич

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ
РАЗУПРОЧНЕНИИ МАТЕРИАЛА**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Механика»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Клебанов Яков Мордухович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Радченко Владимир Павлович

доктор технических наук, профессор
Фалалеев Сергей Викторович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова»

Защита состоится «25» декабря 2009 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, ауд. 209

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Автореферат разослан «23» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.215.02
доктор технических наук, профессор

Д.Л. Скуратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке методики решения задач прочности в условиях связанных процессов пластического деформирования и повреждаемости при разупрочнении материала.

Актуальность темы

Основные направления технического прогресса в энергетике, машиностроении, авиационной и космической технике, добыче, транспортировке и переработке нефти и газа связаны с постоянным повышением уровня рабочих нагрузок и более полным использованием ресурса несущей способности материалов и конструкций, который во многих случаях определяется процессами, связанными с накоплением повреждаемости и разупрочнением материала.

Большой вклад в становление теории связанных процессов деформирования и повреждаемости и развитие методов их использования при решении прикладных задач обеспечения надежности и безопасности машин внесли работы российских и зарубежных ученых А.А. Ильюшина, Л.М. Качанова, Б.Е. Победри, Ю.А. Работнова, В.В. Стружанова, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, Р. Энгелена, М. Джирса, П.М.А. Ареяса и других.

За последние годы получены важные теоретические результаты в области создания определяющих уравнений пластичности материалов с разупрочнением. На основе моделей нелокальной пластичности интегрального вида были разработаны градиентные методы, обобщающие локальную теорию пластичности путем включения в уравнения производных перемещений высокого порядка.

Вместе с тем, можно отметить, что введение теории пластического разупрочнения в практику проектирования новой техники происходит медленно. Это связано, в частности, с отсутствием эффективных алгоритмов решения соответствующих прочностных задач.

Таким образом, актуальность создания новой методики решения задач прочности конструкций при пластическом разупрочнении материала обуславливается как достигнутыми существенными теоретическими результатами в создании моделей поведения таких материалов, так и важностью решения соответствующих прикладных задач в инженерной практике.

Перечисленные научные и прикладные аспекты решения связанных краевых задач деформирования и повреждаемости отражены в содержании данной диссертационной работы.

Диссертация выполнена в соответствии с тематическими планами НИР Самарского государственного технического университета, поддержана грантом РФФИ № 04-01-96506 и конкурсом грантов для студентов, аспирантов и молодых ученых Самарской области 2004 года.

Цель работы – уточнение определения прочности конструкций за счет создания новой методики решения задач прочности при пластическом разупрочнении материала на основе концепции эквивалентной неповрежденной среды, метода декомпозиции и численных обобщенных моделей нелинейного деформирования.

Задачи исследования

1) Формулирование системы уравнений задач прочности элементов конструкций при пластическом разупрочнении материала.

2) Разработка и реализация алгоритмов численного решения задач прочности элементов конструкций при пластическом разупрочнении. Распараллеливание решения.

3) Решение тестовых и прикладных задач прочности элементов конструкций с использованием предложенного метода.

Методы исследований

Работа выполнена на основе методов нелокальной теории пластичности и теории прочности, учитывающей процессы накопления повреждаемости в конструкции. Использовались методы численного решения связанных задач деформирования и повреждаемости при разупрочнении материала. При составлении уравнений задач прочности использовался принцип эквивалентности деформаций в реальной и условно неповрежденной конструкциях. Для проверки полученных теоретических результатов использовались традиционные экспериментальные методы механических испытаний.

Научная новизна состоит в следующем:

1) разработана новая, основанная на введении концепции эквивалентной неповрежденной среды, методика решения задач прочности конструкций из материалов, поведение которых описывается теорией нелокальной пластичности и повреждаемости при разупрочнении;

2) построены аппроксимирующие обобщенные модели пластичности элементов конструкций при разупрочнении и повреждаемости материала;

3) разработана методика решения связанных задач нелокальной пластичности и повреждаемости, реализующая концепцию эквивалентной неповрежденной среды и допускающая эффективное распараллеливание решений.

Достоверность результатов обеспечивается строгостью математической постановки при построении системы уравнений краевых задач, условий прочности и нелинейных обобщенных моделей, разработанной системой оценки погрешностей численной реализации.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1) разработаны и реализованы алгоритмы итерационного решения задач прочности элементов конструкций при пластическом разупрочнении материала; разработанные алгоритмы являются универсальными, пригодными для конструкций любой формы, с различными свойствами материала (степень нелинейности, неоднородность, анизотропия) в условиях принятых допущений;

2) предложенная методика может быть реализована с использованием существующих программных средств метода конечных элементов, метода граничных элементов, метода сеток или других хорошо разработанных методов конечномерной аппроксимации;

3) используемые программные средства могут работать в среде различных операционных систем, в том числе, и на компьютерах с параллельной архитектурой;

4) выполнен анализ механического поведения и прочности ряда относительно простых конструктивных элементов, а также проведен анализ новой конструкции опоры шарошки бурового долота в условиях разупрочнения материала втулки;

5) результаты работы использованы в ОАО «Волгабурмаш» для оценки прочности нового варианта конструкции опоры шарошки бурового долота с вращающейся втулкой-сеператором в условиях разупрочнения ее материала.

Публикации и апробация работы

Материалы диссертации опубликованы в 6-ти работах, в том числе в двух статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников (106 наименований). Объем диссертации – 131 страница, в ней содержится 100 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и методы работы, отмечена новизна и практическое значение работы, даны сведения о публикациях.

В первой главе дана оценка современного состояния проблемы расчетных методов исследования задач прочности конструкций в условиях пластического разупрочнения, проведен анализ литературы по данной теме и на его основе сформулированы задачи исследования.

Корректное описание эффектов разупрочнения материалов при решении краевых задач механики деформирования с использованием классических определяющих уравнений оказалось невозможным. Было показано, что эта проблема не является следствием неправильных численных процедур, а возникает из-за некорректной постановки задач. Среди подходов, обеспечивающих корректную постановку краевых задач, наиболее перспективным и физически обоснованным представляется подход, который опирается на применение нелокальной, или интегральной регуляризации.

В обзоре анализируется введение эффективных переменных состояния, основанных на принципах эквивалентности, среди которых наиболее известны принципы эквивалентности деформаций, эквивалентности напряжений, эквивалентности упругой энергии и эквивалентности полной энергии.

Рассматриваются модели сплошной среды с производными перемещений высокого порядка, которые многими авторами отмечаются как более обоснованные с физической точки зрения и более удобные с позиции численной реализации по сравнению с интегральными зависимостями. В обзоре приводятся примеры экспериментальной проверки таких моделей, взятых из литературных источников.

Приводится также обзор работ в области распараллеливания решений краевых задач нелинейной пластичности. Одними из наиболее перспективных методов параллельных вычислений являются методы, основанные на концепции декомпозиции.

Во второй главе представлены определяющие зависимости связанного пластического деформирования и повреждаемости материалов и конструктивных элементов.

Представлена система уравнений краевой задачи пластического разупрочнения. Для ее составления используются следующие основные предпосылки: 1) рассматривается случай малых деформаций; 2) используется деформационная теория пластичности с разупрочнением; 3) поведение материала определяется диаграммой, связывающей деформации и приведенные напряжения, а также законом, описывающим повреждаемость материала.

С помощью принципа эквивалентности деформаций реальной деформируемой среде ставится в соответствие некоторая эквивалентная среда без поврежденности. Приведенное напряжение s_{ij} связывается с обычным напряжением σ_{ij} зависимостью

$$s_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - \omega}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений; s_{ij} – тензор приведенных напряжений; ω – скалярный параметр повреждаемости, $\omega \in [0,1)$. С учетом (1) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,i} - X_j = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где X_j – объемные силы, может быть преобразовано к виду

$$s_{ij,i} - Y_j = 0, \quad (3)$$

здесь Y_j – приведенные объемные силы, имеющие вид

$$Y_j = \frac{1}{1-\omega} s_{ij} \omega_{,i} + \frac{X_j}{1-\omega}. \quad (4)$$

Уравнение (3) является уравнением равновесия для эквивалентной среды без повреждаемости.

Для регуляризации задачи пластического разупрочнения вводится нелокальная пластическая деформация $\bar{\varepsilon}_p$. Зависимость между нелокальной и локальной величинами записывается в неявной градиентной форме

$$\bar{\varepsilon}_p - l^2 \bar{\varepsilon}_{p,ii} = \varepsilon_p, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Полученная система определяющих уравнений задачи прочности градиентной упругопластичности кроме уравнений (3) – (5) включает следующие зависимости:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} [u_{i,j} + u_{j,i}], \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij} = \partial \Phi(s_{kl}) / \partial s_{ij}, \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_{p,i} n_i = 0 \text{ на } \Gamma, \quad (8)$$

$$\omega = \omega(\bar{\varepsilon}_p), \quad (9)$$

$$\omega < \omega_{кр}, \quad (10)$$

где u_i – вектор перемещений, Φ – дополнительная работа приведенных напряжений, n_i – единичная внешняя нормаль к внешней границе Γ области, охватываемой телом, $i, j, k, l = 1, 2, 3$.

Уравнение (7) – общий вид зависимости между компонентами напряжений и деформаций градиентального типа; уравнение (8) – однородное граничное условие Нэймана для уравнения (5). Соотношение (9) – феноменологическая зависимость параметра повреждаемости ω от величины нелокальной эффективной пластической деформации $\bar{\varepsilon}_p$. Условие прочности (10) содержит критическое значение повреждаемости $\omega_{кр}$, при котором материал считается разрушенным, $\omega_{кр} < 1$.

Далее рассматривается нелинейная аппроксимирующая обобщенная модель пластичности конструктивных элементов при разупрочнении материала, основанная на использовании метода конечных элементов.

В данной работе метод обобщенных моделей и метод конечных элементов объединены в рамках одной модели. Целью этого является создание новой методики параллельной реализации задач пластического разупрочнения, эффективно использующей постоянно возрастающие возможности современных ЭВМ с параллельной архитектурой.

Для случая степенной зависимости между деформацией и приведенным напряжением определяющие уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \partial \Phi_{\alpha}(x_k, s_{lm}(x_k)) / \partial s_{ij}(x_k), \quad \Phi_{\alpha}(x_k, s_{ij}) = B_{\alpha}(x_k) s_{e\alpha}^{\nu_{\alpha}+1} / (\nu_{\alpha} + 1), \\ s_{e\alpha}^2 &= \Phi_{ijkl}^{(\alpha)} s_{ij} s_{kl}, \quad i, j, k, l, m = 1, 2, 3, \quad \alpha = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (11)$$

где Φ_{α} – дополнительная работа для подконструкции с номером α ; x_k – пространственные координаты точек конструкции; $s_{e\alpha}$ – эквивалентное напряжение; B_{α} – функция координат; $\Phi_{ijkl}^{(\alpha)}$ – тензор коэффициентов податливости анизотропного материала; ν_{α} – константа подконструкции ($\nu_{\alpha} > 1$).

Связь эквивалентной приведенной обобщенной силы и эквивалентного обобщенного перемещения имеет вид

$$u_{\alpha} = B_{0\alpha} Q_{\alpha}^{\nu_{\alpha}}, \quad \alpha = 1, \dots, N, \quad (12)$$

где $B_{0\alpha}$ – константа подконструкции, u_{α} – эквивалентное обобщенное перемещение подконструкции α , Q_{α} – эквивалентная приведенная обобщенная сила, действующая на подконструкцию α .

Особенностью приведенных обобщенных сил является то, что их работа на обобщенных перемещениях равна работе приведенных напряжений на деформациях в подконструкции.

Линейной зависимости между обобщенными перемещениями и обобщенными силами ($\nu_{\alpha} = 1$) в пространстве обобщенных сил и в пространстве обобщенных перемещений соответствуют поверхности равной работы в форме гиперэллипсоидов. При $\nu_{\alpha} > 1$ эти поверхности не являются гиперэллипсоидами.

Использование в качестве аппроксимирующей поверхности гиперэллипсоида объясняется стремлением получить векторно-линейную связь между приведенными силами и перемещениями. Обобщенное перемещение в соответствии с такой аппроксимацией может быть представлено в виде

$$u_{\alpha} = (c_{rs\alpha} u_r u_s)^{1/2}; \quad r, s = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где коэффициенты $c_{rs\alpha}$ являются функционалами поля деформаций, соответствующими точке аппроксимации в пространстве обобщенных перемещений подконструкции α .

Таким образом, аппроксимирующее обобщенное определяющее уравнение записывается как

$$Q_s = c_{rs\alpha} u_{\alpha}^{\mu_{\alpha}-1} u_r, \quad 0 < \mu_{\alpha} \leq 1. \quad (14)$$

Его особенность состоит в том, что здесь обобщенная сила является приведенной, т.е. записана для тела с условно неповрежденным материалом.

Для случая произвольной зависимости между эквивалентной деформацией и приведенным напряжением определяющая зависимость принимается в виде

$$s_{ij} = \partial\Psi(x_k, \varepsilon_{lm}) / \partial\varepsilon_{ij}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где Ψ – работа диссипации приведенных напряжений.

В результате получена аппроксимирующая обобщенная модель

$$Q_s = d_{rs\alpha} u_r \frac{1}{u'_\alpha} \frac{\partial\tilde{\Psi}_\alpha}{\partial u'_\alpha}, \quad (16)$$

где $d_{rs\alpha} = \lambda_\alpha c_{rs\alpha}$, $u'_\alpha = (d_{rs\alpha} u_r u_s)^{\frac{1}{2}}$, λ_α – скалярный параметр, величина которого корректируется на каждой итерации, $\tilde{\Psi}_\alpha$ – работа диссипации всей подконструкции α .

При степенной диаграмме неизвестными параметрами обобщенной зависимости (13–14) являются входящие в нее коэффициенты $c_{rs\alpha}$. При произвольной диаграмме деформирования материала неизвестной является также и форма обобщенной диаграммы.

В третьей главе выполняются построение и анализ численных процедур решения задач прочности конструкций при разупрочнении материала. Разработаны три алгоритма решения. С помощью первого алгоритма решение выполняется полностью последовательно. Два других алгоритма допускают параллельное решение задачи, ориентированное на число процессоров, равное числу подконструкций. Первый из алгоритмов параллельного решения предполагает наличие степенной диаграммы «приведенное напряжение – деформация». Вторым, более общим алгоритмом параллельного решения предназначен для случая с произвольной диаграммой деформирования. Он включает в себя следующие основные этапы:

Этап 0. Создается твердотельная модель. Задаются типы конечных элементов, их размер, тип сетки (свободная или регулярная), создается конечноэлементная модель конструкции. Задаются свойства материала – упругие константы и диаграмма «приведенные напряжения – деформации». Задаются граничные условия.

Этап 1. В качестве нулевого приближения методом суперэлементов для рассматриваемого тела при заданных внешних условиях решается краевая задача в предположении линейных свойств материала. Решение на стадиях приведения подконструкций и локального анализа для каждой подконструкции выполняется в параллель. На стадии решения глобальной задачи решение осуществляется последовательно. В качестве результата получают перемещения u_s узлов глобальной модели, то есть узлов на границах подконструкций. Определяется первая точка нелинейной части диаграммы $Q_\alpha - u_\alpha$, отвечающая достижению в наиболее нагруженном конечном элементе предела текучести.

Этап 2. По результатам предшествующих вычислений для каждой подконструкции формируются векторы заданных перемещений внешних узлов $u_s^{(p-1)}$, где p – номер итерации. Проводится нелинейный локальный анализ подконструкций при заданных перемещениях $u_s^{(p-1)}$. Решение нелинейной задачи (3), (6), (7) выполняется для эквивалентной неповрежденной среды.

Этап 3. Выполняется решение дополнительной линейной краевой задачи (5), (8) для всей конструкции методом суперэлементов и определяются повреждаемость и дополнительные приведенные объемные силы в соответствии с (9) и (4).

Этап 4. Производится проверка сходимости по условию

$$\left| \omega_k^{\max} - \omega_{k-1}^{\max} \right| < \delta', \quad (17)$$

где ω_k^{\max} – максимальное значение повреждаемости в подконструкции на k -ой итерации, δ' – допустимая величина погрешности. Если данный критерий не выполняется, то происходит возврат к этапу 2.

Этап 5. Находятся коэффициенты $c_{rs\alpha}^{(p-1)}$ и формируются аппроксимирующие обобщенные модели подконструкций в соответствии с (16). Параметр λ_α для каждой из них определяется из условия нормирования

$$\lambda_\alpha c_{rs\alpha}^{(p-1)} u_r^{(p-1)} u_s^{(p-1)} = d_{rs\alpha}^{(p-2)} u_r^{(p-1)} u_s^{(p-1)}, \quad (18)$$

которое обеспечивает непрерывность изменения эквивалентного обобщенного перемещения при изменении матриц $c_{rs\alpha}$.

Этап 6. Итерациями решается нелинейная глобальная задача для всей конструкции, составленной из подконструкций. Сходимость итерационного процесса оценивается по относительному изменению эквивалентных приведенных обобщенных сил во всех подконструкциях. Это изменение на очередной итерации не должно превышать заданной величины. Для каждой подконструкции используется своя диаграмма «эквивалентная приведенная обобщенная сила – эквивалентное перемещение». Результатом являются перемещения u_s^p во внешних узлах.

Этап 7. Оценивается достигнутая точность решения глобальной задачи по следующей формуле

$$\sqrt{\sum_s (u_s^m - u_s^{m-1})^2 / \sum_s (u_s^m)^2} < \delta'', \quad (19)$$

где s – номер внешнего узла, m – номер глобальной итерации, δ'' – допустимая величина погрешности. При необходимости повторяются этапы 2-7.

Этап 8. Выполняется локальный анализ подконструкций, проверяется выполнение условия прочности (10). В качестве исходных данных здесь выступают полученные при глобальном анализе (этап 6) перемещения внешних узлов.

Приведённое выше итерационное решение включает последовательную аппроксимацию диаграмм подконструкций $Q_\alpha - u_\alpha$. Одна внешняя итерация включает этапы 2-7. На каждой итерации на диаграммах определяется одна новая точка. Эти точки соединяются прямыми линиями. Итерациями решается и нелинейная глобальная задача для всей конструкции в главной сети на этапе 6. Анализ каждой из подконструкций на этапах 2, 5, 8 выполняется полностью в параллель без какого-либо обмена информацией между подконструкциями. Значения критериев выхода из итерационных циклов: δ' , δ'' и другие принимались в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-10}$. Рациональный выбор соотношения значений этих критериев позволяет значительно ускорить процесс решения.

В случае степенной зависимости между деформациями и приведёнными напряжениями в процессе итераций при решении каждой конкретной задачи определяются неизвестные константы $c_{rs\alpha}$, а вид обобщённой диаграммы (12) известен заранее. Поэтому алгоритм итерационного решения задачи прочности в этом случае оказывается проще и на его реализацию при прочих равных условиях требуется меньше машинного времени.

При решении задачи с помощью полностью последовательного алгоритма метод подконструкций не используется. Соответствующий алгоритм включает в себя выполняемые итерациями для всей модели этапы, аналогичные этапам 0, 2-4 представленного выше алгоритма.

Предложенный подход был реализован с помощью метода конечных элементов. Была составлена и отлажена программа, использующая предложенные алгоритмы. В диссертационной работе эта программа используется для решения ряда простых задач: растяжения цилиндрического образца с прямоугольными выточками, неоднородного плоского стержня, полосы с односторонней выточкой, полосы с двумя выточками, пластины с острой выточкой, а так же для анализа конструкции опоры шарошки бурового долота в условиях разупрочнения материала втулки.

В качестве первой задачи рассмотрено растяжение цилиндрического образца с прямоугольными выточками (рис. 1). Материал – алюминиевый сплав 1201-T1. С целью определения свойств материала были получены диаграммы растяжения на стандартных гладких образцах. Испытания образцов проводились на машине Z 250 АВ-663726. Зависимость изменения параметра повреждаемости от нелокальной пластической деформации принята в линейном виде

$$\omega = \bar{\varepsilon}_p / \bar{\varepsilon}_p^0; \quad \omega < \omega_{кр} = 0,57, \quad (20)$$

где $\bar{\varepsilon}_p^0$ – константа.

В соответствии с (1) и (20) была построена диаграмма деформирования для приведенного напряжения. Истинная и приведенная диаграммы представлены на рис. 2. Результаты расчетов сопоставляли с данными испытаний. Фотография разрушенного образца представлена на рис. 1. С помощью большого инструментального микроскопа типа 1Ц были проведены замеры разрушенных выточек. Экспериментальные данные сопоставлены с расчетными на рис. 3.

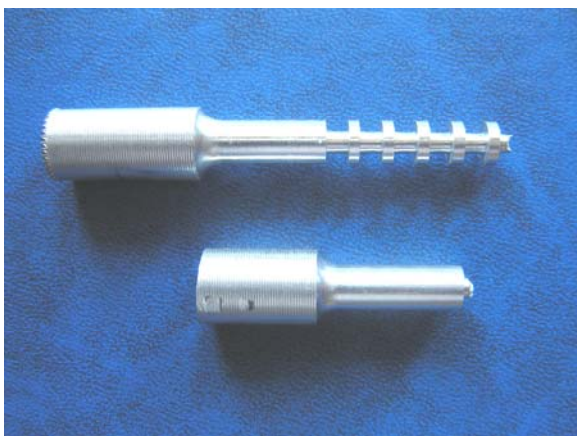


Рисунок 1 - Фотография разрушенного в ходе испытаний на растяжение образца из алюминиевого сплава 1201-T1 с прямоугольными выточками

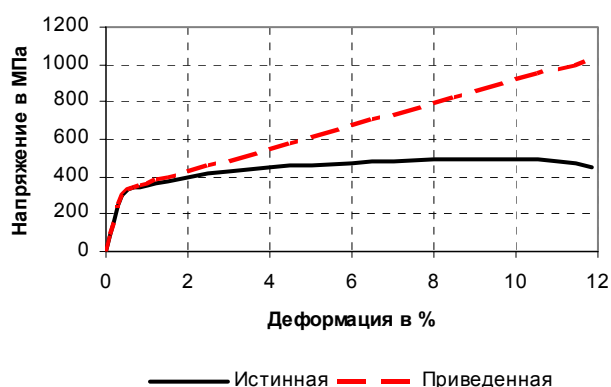


Рисунок 2 - Диаграммы деформирования гладкого цилиндрического образца из алюминиевого сплава 1201-T1

Тонкая полоса с односторонней выточкой рассматривалась в условиях плосконапряженного состояния (рис. 4). Была использована билинейная диаграмма «приведенные напряжения – деформации». Изменение распределения напряжений в сечении А-В по мере увеличения заданного перемещения показано на рис. 5. Ре-

шение данного примера было выполнено с использованием конечноэлементных сеток различного вида и размера. Установлено, что форма конечных элементов слабо влияет на результаты численного решения.

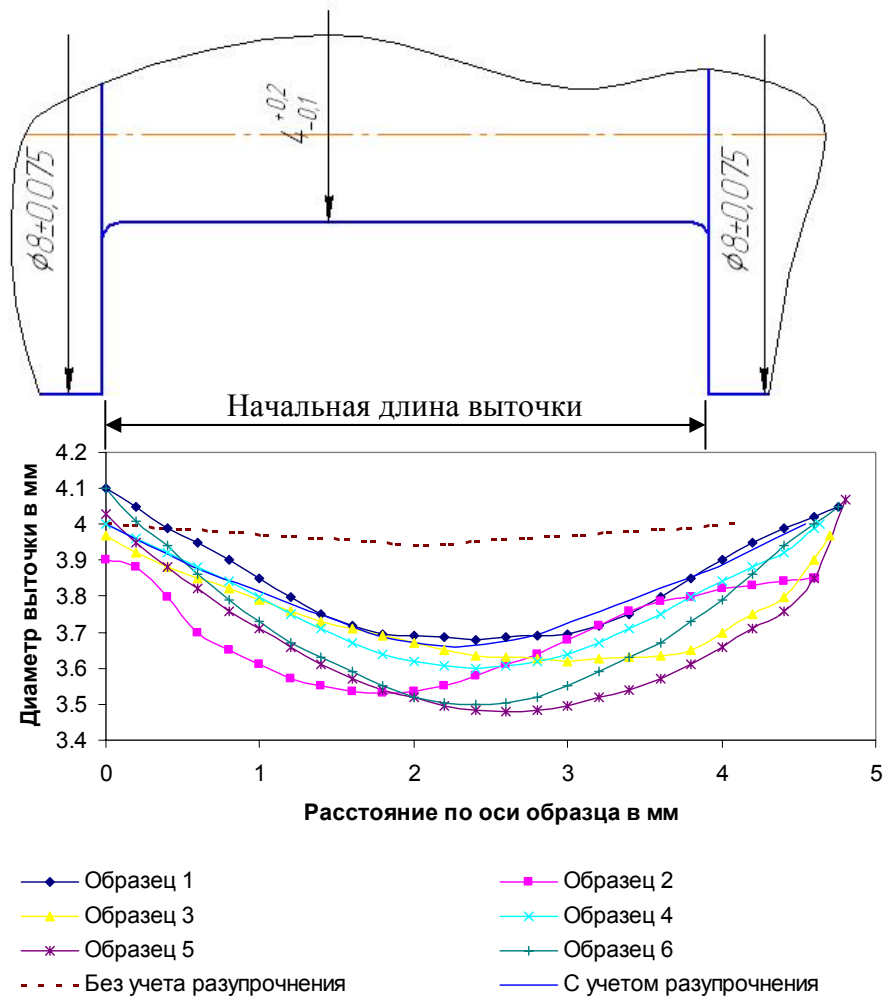


Рисунок 3 - Зависимость диаметра выточки от расстояния вдоль оси образца при разрыве

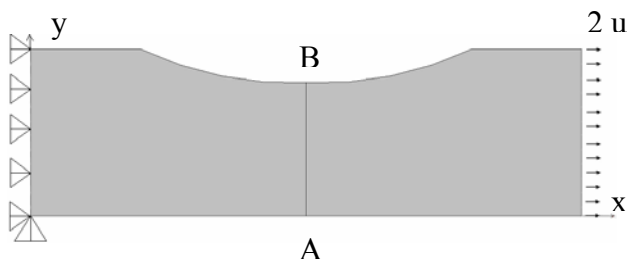


Рисунок 4 - Условия нагружения и закрепления полосы с односторонней выточкой

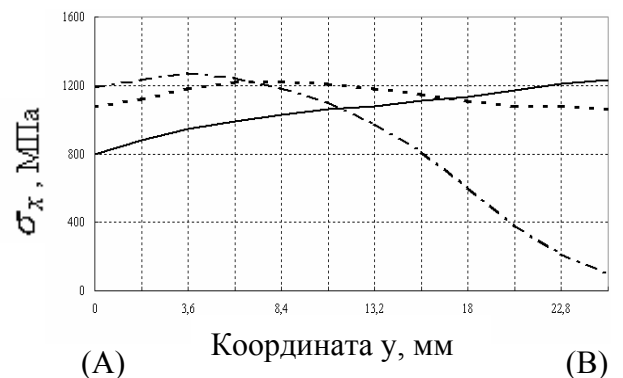


Рисунок 5 - Эпюра осевых напряжений σ_x в сечении А-В при разных значениях заданного перемещения:

— 0,6 мм; - - - 1 мм; - · - · 1,6 мм

Метод подконструкций использовался для анализа напряженно-деформированного состояния пластинки с острой несимметричной выточкой, конечноэлементная модель которой представлена на рис. 6. Она разбита на 2 подконструкции, граница между которыми выделена жирной линией. Упругие и пластические свойства материала приняты такими же, как в двух упомянутых выше примерах. На рис. 7 приведены полученные интенсивности реальных и приведенных напряжений при максимальном значении повреждаемости $\omega = 0,56$.

В диссертационной работе проводится анализ структуры затрат машинного времени и эффективности параллельной реализации. При решении задачи пластичности с разупрочнением на параллельной ЭВМ, когда число процессоров равно числу подконструкций, в соответствии с приведенным выше алгоритмом общее время складывается из трех компонент

$$T = T_{нар.} + T_{носл.} + T_{всп.} \quad (21)$$

где $T_{нар.}$ – время вычислений, выполняемых с максимальным распараллеливанием, $T_{носл.}$ – время вычислений, выполняемых последовательно на одном

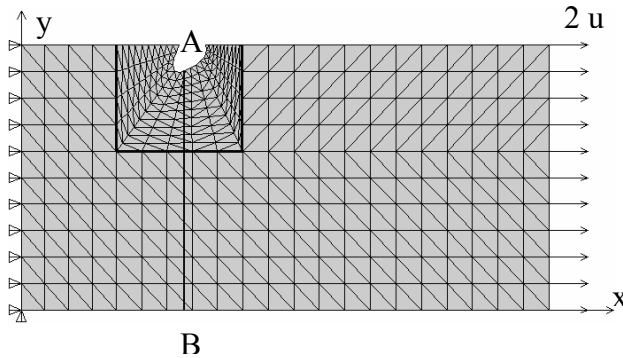


Рисунок 6 - Конечноэлементная модель и условия нагружения плоской пластинки с выточкой

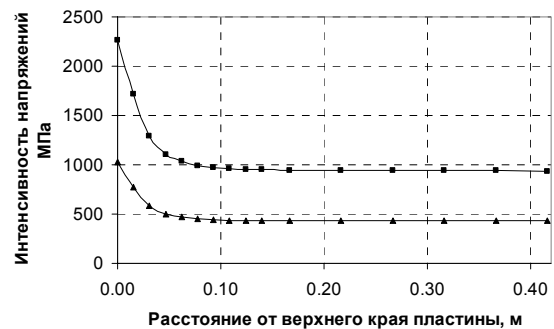


Рисунок 7 - Распределение интенсивности напряжений по сечению А-В пластинки:
 ▲▲▲ интенсивность напряжений;
 ■■■ интенсивность приведенных напряжений

процессоре, $T_{всп.}$ – время вспомогательных вычислений. В формуле (21) и далее размерность времени – секунды.

Структура временных затрат, образующих $T_{нар.}$, в соответствии с разработанным алгоритмом имеет вид:

$$T_{нар.} = \max_{\alpha} (t_1^{\alpha} + t_2^{\alpha}) + \sum_{p=1}^{k_1} \left\{ \max_{\alpha} [k_{2p}^{\alpha} (t_1^{\alpha} + t_3^{\alpha})] \right\} + \sum_{p=1}^{k_1} \left\{ \max_{\alpha} [k_{3p}^{\alpha} (t_1^{\alpha} + t_3^{\alpha})] \right\}, \quad (22)$$

где индекс α соответствует номеру подконструкции, а индекс p номеру итерации, включающей этапы 2 – 7; k_1 – число таких итераций; k_{2p}^{α} – число итераций при приведении подконструкции α (этап 2) на итерации p ; k_{3p}^{α} – число итераций при решении нелинейной задачи в главной сети (этап б) на итерации p , зависящее от условий деформирования, показателя степени нелинейности ν_{α} и задаваемой точности; t_1^{α} , t_2^{α} и t_3^{α} – времена основных операций.

В формулу (21) входят только времена наиболее длительных операций, какими являются: построение матрицы жесткости подконструкции t_1^α , «конденсация» матрицы жесткости подконструкции к внешним степеням свободы t_2^α и время решения системы линейных уравнений в подконструкции t_3^α . Время, затрачиваемое на все остальные операции, значительно меньше указанных времен и поэтому оно отнесено ко времени вспомогательных вычислений $T_{всп.}$.

Время вычислений, выполняемых последовательно в главной сети может быть подсчитано по формуле

$$T_{носл.} = t_4 + t_5 + \sum_{p=1}^{k_1} k_{2p} t_5 + \sum_{p=1}^{k_1} [k_{3p} (t_4 + t_5)], \quad (23)$$

где t_4 – время построения матрицы жесткости главной сети; t_5 – время решения системы линейных уравнений в главной сети.

При расчете пластинки на двухпроцессорной ЭВМ было получено ускорение решения в 1,52, что соответствует эффективности параллелизации 76%. Ускорение и эффективность по отношению к последовательному алгоритму составили 1,41 и 70,5% соответственно.

Далее приведено исследование прочности втулки-сепаратора опоры бурового долота 215,9 МЗ-ГАУ-R544. Введение в конструкцию этой втулки, по мнению разработчиков – конструкторов ОАО «Волгабурмаш», решило бы ряд задач, связанных с повышением долговечности опоры.

Материал втулки – сплав CuZn37. Его диаграмма деформирования содержит участок разупрочнения. Она показана на рис. 8. Расчет выполнялся для части конструкции долота, включающей лапу долота с цапфой, втулку и шарошку, к которой прикладывались усилия со стороны разрушаемой породы.

Разрушение образцов при однородном растяжении происходит при деформации 1,5%, что соответствует повреждаемости $\omega_{кр} = 0,64$. Полученное распределение параметра повреждаемости по втулке-сепаратору представлено на рис. 9.

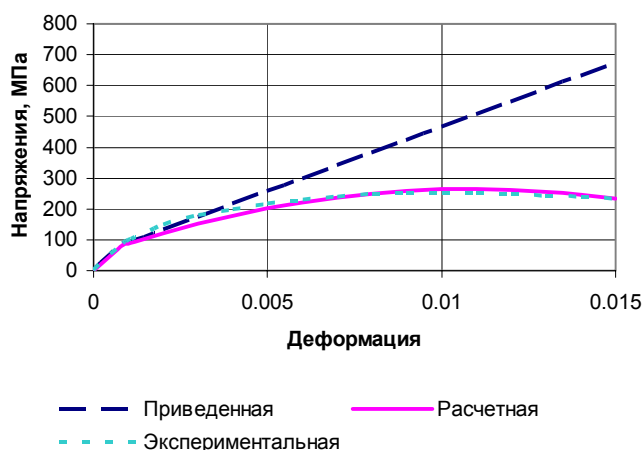


Рисунок 8 - Диаграммы деформирования материала втулки – сплава CuZn37

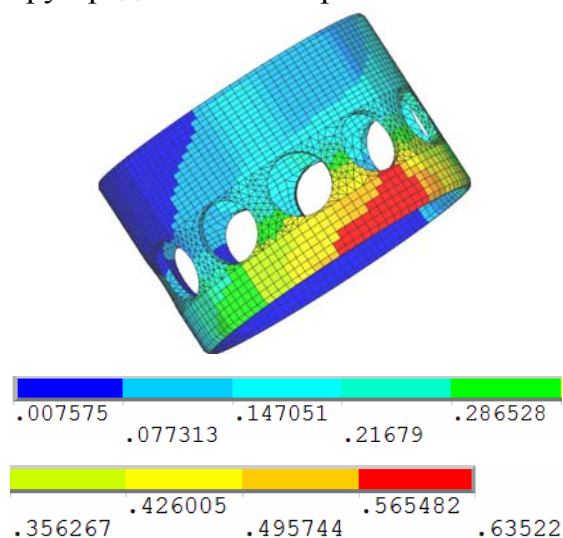


Рисунок 9 - Распределение параметра повреждаемости по втулке-сепаратору

Полученные результаты показывают, что повреждаемость во втулке-сепараторе при рабочей нагрузке достигает критического значения. Поэтому предлагаемое усовершенствование конструкции было признано нецелесообразным.

В работе содержится решение задачи повышения прочности конструкций при пластическом разупрочнении материала, имеющей существенное значение для прочности машин, приборов и аппаратуры.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана методика, уточняющая определение прочности конструкций при разупрочнении материала. Методика основана на концепции эквивалентной неповрежденной среды, методах декомпозиции, численных обобщенных моделях подконструкций и позволяет более точно определять деформационный ресурс конструкций.

2. Получена система уравнений задач прочности элементов конструкций при пластическом разупрочнении материала. Она опирается на теорию нелокальной пластичности, что обеспечивает корректную постановку связанных краевых задач пластичности и повреждаемости при разупрочнении. Использование при составлении системы уравнений принципа эквивалентной неповрежденной среды позволило эффективно использовать для решения задач пластического разупрочнения существующие методы и программные средства решения задач пластичности с упрочнением.

3. Показано, что при построении обобщенных зависимостей между приведенными обобщенными силами и обобщенными перемещениями в задаче прочности при пластическом разупрочнении материала могут быть использованы подходы, развитые ранее для построения обобщенных моделей пластичности конструкций при упрочнении материала. Введены процедуры, учитывающие особенности, связанные с учетом процессов разупрочнения материала, и позволяющие использовать подходы, разработанные для случая упрочнения материала. Использование обобщенных моделей позволяет эффективно распараллеливать решение задач прочности.

4. Разработаны алгоритмы решения задач прочности элементов конструкций при пластическом разупрочнении, опирающиеся на использование концепции эквивалентной неповрежденной среды. В них реализуются итерационные процедуры, позволяющие осуществить численную реализацию разработанных алгоритмов на практике без распараллеливания и с распараллеливанием процесса решения.

5. Выполнены расчеты для ряда относительно простых конструктивных элементов, а именно выполнен анализ процессов деформирования и прочности этих элементов в условиях разупрочнения материала. В качестве одного из примеров рассмотрено растяжение цилиндрических образцов с выточками из алюминиевого сплава 1201-T1, имеющего на диаграмме деформирования участок разупрочнения, и проведены их испытания. Сравнение данных показало их хорошее соответствие. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные процедуры для решения задач прочности при разупрочнении материала.

6. Проанализированы основные факторы, обеспечивающие достаточно высокую эффективность реализации предложенной методики решения задач прочности при пластическом разупрочнении, и намечены пути ее дальнейшего повышения.

7. Результаты работы успешно использовались в ОАО «Волгабурмаш» для оценки прочности нового варианта конструкции опоры шарошки бурового долота с

вращающейся втулкой-сеператором в условиях разупрочнения ее материала, что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Основное содержание работы опубликовано в работах:

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Клебанов, Я. М. Модель связанных процессов неустановившейся ползучести, теплопроводности и повреждаемости / Я. М. Клебанов, И. Е. Адеянов, А. Н. Давыдов // Вестник самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2003. – № 19. – С. 64-69.

2. Клебанов, Я. М. Численный анализ ползучести конструкций при сложном нагружении / Я. М. Клебанов, И. Е. Адеянов, Е. И. Ладыгина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2006. – № 42. – С. 75–81.

в других изданиях:

3. Клебанов, Я. М. Параллелизация нелинейных задач механики деформирования / Я. М. Клебанов, И. Е. Адеянов, А. Н. Давыдов // Труды тринадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара, 2003. – С. 76-79.

4. Адеянов, И. Е. Численный метод решения краевых задач для среды с разупрочнением / И. Е. Адеянов // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции 20 – 22 сентября 2004 года – «Состояние и перспективы развития сервиса: образование, управление, технологии». – Самара, 2004. – С. 106–115.

5. Адеянов, И. Е. Влияние параметров определяющих уравнений пластичности разупрочняющегося тела на характер напряженно-деформированного состояния конструкций / И. Е. Адеянов // Труды третьей Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2006. – С. 113–114.

6. Адеянов, И. Е. Влияние эффекта разупрочнения материала на условия разрушения. / И. Е. Адеянов, Я. М. Клебанов // Труды шестой Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара: СамГТУ, 2009. – С. 10–12.