

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ УПРОЧНЁННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. А. Смыслов

*ФГБОУ ВПО «Самарский Государственный Технический Университет»
smsvit@gmail.com*

Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильным механическому, тепловому и другим воздействиям. Исчерпание ресурса детали и её разрушение в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя, например, возникновение и развитие усталостной трещины, коррозия и др.

Одним из способов повышения долговечности многих изделий является наведение сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое (упрочнение). При этом повышение, например, сопротивления усталости обусловлено главным образом сжимающими остаточными напряжениями в поверхностном слое, которые препятствуют выходу различного рода дислокаций и вакансий. Однако в процессе эксплуатации при высоких температурах вследствие ползучести происходит процесс релаксации остаточных напряжений (уменьшение сжимающих напряжений по модулю) на фоне реологического деформирования самой конструкции.

Целью настоящей работы является разработка новых и совершенствование существующих методов решения краевых задач релаксации остаточных напряжений в упрочнённом различными технологиями слое элементов конструкций с концентраторами напряжений для широкого спектра теорий ползучести; изучение и систематизация на основе полученных решений влияния технологических (вид упрочнения, материал детали), конструктивных (размеры поперечного сечения детали, тип и размеры концентратора), эксплуатационных (вид напряжённого состояния, нестационарность нагружения, повышенная температура) факторов на кинетику остаточных напряжений вследствие ползучести; разработка критерия влияния ОН на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений.

Разработаны методики определения исходного (первоначального) напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое сплошного цилиндра, толстостенной трубы и концентратора напряжений после процедуры поверхностного пластического деформирования. Ввиду дискретности экспериментальных данных предложена их аналитическая аппроксимация. Разработана методика определения параметров аппроксимации, минимизирующая среднеквадратичное отклонение расчётных значений от экспериментальных. Рассмотрены случаи, когда максимум эпюр компонентов тензора остаточных напряжений находится не на поверхности образца, а на некоторой глубине.

Решена краевая задача ползучести для рассматриваемого элемента конструкции с заданными начальными полями остаточных напряжений и пластических деформаций.

В математическую модель введён феноменологический параметр анизотропии упрочнения, учитывающий анизотропность распределения полей остаточных пластических деформаций — рассматривается гипотеза о том, что касательными компонентами тензора напряжений и угловыми деформациями тензора пластических деформаций пренебрегаем в силу их малости по сравнению с нормальными компонентами. Разработана методика определения параметра анизотропии при наличии двух экспериментально определённых компонент тензора напряжений.

Численная реализация разработанных методов сталкивается с существенными трудностями, основными из которых являются:

1) большие градиенты напряжений (до двух-трёх порядков) в достаточно малой области, составляющей 100-200 мкм, что приводит к крайне неравномерной сетке и большому числу дискретных элементов;

2) решение задачи ползучести «шагами» по времени с малым шагом дискретизации временной координаты и использованием многократно итерационного алгоритма.

Эти факты, а также острая нелинейность определяющих уравнений ползучести являются источниками неустойчивости вычислительного процесса, что требует тщательного выбора шага интегрирования по пространственным и временным координатам.

Большой объём вычислений, необходимый для решения описанной задачи, требует разработки средств автоматизации расчётов и эффективного использования ресурсов ЭВМ.

Разработан программный комплекс Strelax, предназначенный для расчёта полной картины НДС в произвольный момент времени в процессе ползучести. Он состоит из двух подсистем: ядра программы и интерфейса пользователя.

Расчётное ядро анонсированного продукта написано на языке C++ и представляет собой кросс-платформенное консольное приложение. Входными данными являются экспериментальные зависимости компонент остаточных напряжений, геометрические характеристики образцов, а также упругие константы материала (модуль Юнга и коэффициент Пуассона). Расчётный блок состоит из нескольких модулей, каждый из которых выполняет определённую функцию. Так модуль анализа задачи по входным данным, определяет, какая компонента экспериментально известна, и передаёт управление соответствующему модулю расчёта, которых три, по числу рассмотренных вариантов. Подключены модули восстановления остаточных напряжений в цилиндрах, толстостенных трубах и концентраторах. Реализованы и подключены модули расчёта релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести для сплошных и полых цилиндров.

Интерфейс пользователя представлен Win32 – приложение, написанным на Delphi и использующим стандартные компоненты в составе библиотеки VCL. Он позволяет специалисту оцифровать и в дальнейшем использовать экспериментальные данные по эпюрам остаточных напряжений. Предусмотрен табличный либо ручной ввод исходных данных. Все результаты расчётов отображаются в табличном и графическом видах. Есть возможность выгрузки отчётов в MS Excel.

Обе подсистемы написаны с использованием объектно-ориентированного подхода; все процедуры и функции реализованы внутри классов. Обмен данными между подсистемами производится с помощью файлов XML. Интерфейс генерирует пакет данных, запаковывает его в файл и передаёт управление расчётному ядру. Расчётное ядро распаковывает и обрабатывает данные, и генерирует файл с результатами, после чего сообщает интерфейсу о завершении расчётов.

Используя разработанные вычислительные механизмы, исследованы процессы формирования и релаксации вследствие ползучести остаточных напряжений для полых и сплошных цилиндрических тел. Рассмотрены различные материалы, среди которых стали ЖС6КП, ВТ9, 30ХГСА, ЭИ691, ЭИ696, 40Х и другие. Обработаны эксперименты с различными технологиями упрочнения: обкатка роликом, гидродробеструйная обработка, алмазное выглаживание, обработка ультразвуком и др. Выполнен параметрический анализ влияния геометрических параметров, технологических факторов, силовых характеристик, реологических свойств материала на характер кинетики остаточных напряжений. Наблюдается хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных.