

УДК 539.376;539.4.014.13

**РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ**

© 2011 г.

В.П. Радченко, М.Н. Саушкин

Самарский государственный технический университет

msaushkin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приведена методика решения краевых задач ползучести и релаксации остаточных напряжений в упрочненных конструкциях на основе метода декомпозиции при анизотропном упрочнении. Рассмотрены краевые задачи для ряда модельных и промышленных элементов конструкций, изложена методология их решения, представлены результаты расчетов и выполнена проверка адекватности решений экспериментальным данным.

Ключевые слова: поверхностно-пластическое упрочнение, остаточные напряжения, ползучесть, релаксация, метод декомпозиции.

Постановка задачи

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 при повышенных температурах вследствие ползучести остаточные напряжения релаксируют, и их положительное влияние снижается. По сохранившимся остаточным напряжениям можно судить об эффективности упрочненного слоя у элементов конструкций, работающих при повышенных температурах и, в конечном итоге, о степени исчерпания его ресурса.

**Основные краевые задачи
и методология их решения**

При оценке кинетики остаточных напряжений возникают следующие основные краевые задачи: 1) определение исходного (первоначально) напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое изделия, возникающего после процедуры поверхностного пластического деформирования; 2) решение краевой задачи ползучести для рассматриваемого элемента конструкции с заданными начальными полями остаточных напряжений и пластических деформаций, определяемыми из первой задачи.

Специфика решаемых задач заключается в том, что необходимо учитывать физически нелинейные соотношения для материала, начальное напряженно-деформированное состояние в упрочненном слое, а также реологические деформации (деформации ползучести), которые развиваются во времени даже при постоянных напряжениях.

Для решения первой основной задачи в [1] на основании уравнений равновесия, совместности деформаций и гипотезы пластической несжимаемости материала разработан расчетно-феноменологический метод определения компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое элементов конструкций по одной из экспериментально измеренных компонент напряжений. Для решения поставленной задачи вводился ряд гипотез, одна из которых, например для цилиндрического образца после дробеструйной обработки, сводится к следующему: характер распределения пластических деформаций в упрочненном слое цилиндрического изделия такой же, как и в полуплоскости, то есть для компонент тензора пластической деформации выполняется условие $q_z = q_\theta$ (в стандартной цилиндрической системе координат). Как показывают расчеты, в этом случае эпюры распределения осевой σ_z и окружной σ_θ компонент остаточных напряжений по глубине слоя практически совпадают. Данный эффект наблюдается, например, для цилиндрических образцов, подвергнутых как дробеструйной обработке, так и ряду аналогичных обрабатывающих методик упрочнения. Однако

построенная на основании этой гипотезы математическая модель не удовлетворяет ряду экспериментальных данных для некоторых упрочняющих обработок (технологий), например таких, как обкатка роликом, алмазное выглаживание и др., для которых величины экспериментальных осевых и окружных компонент остаточных напряжений существенно различаются.

Проведено обобщение и уточнение разработанного ранее метода расчета полей остаточных напряжений и деформаций в зависимости от вида упрочняющей технологии. В математическую модель введен соответствующий феноменологический параметр анизотропности упрочнения α , учитывающий анизотропность распределения полей остаточных пластических деформаций. В частности, для цилиндрически образцов рассматривается гипотеза вида $q_z = \alpha q_\theta$, где $0 < \alpha < \infty$ (касательными компонентами тензора напряжений и угловыми деформациями тензора пластических деформаций пренебрегаем в силу их малости по сравнению с нормальными компонентами). Однако в этом случае необходимо иметь две экспериментальные компоненты тензора остаточных напряжений.

Для решения второй основной задачи (релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии) предлагается использовать метод [1], основанный на декомпозиции конструкции на тонкий упрочненный слой, который практически не влияет на жесткость всей конструкции, и «тело» конструкции. Тонкий упрочненный слой (с толщиной 100–200 мкм) считается «наклеенным» на поверхность конструкции. При этом он деформируется (вместе с конструкцией) в режиме «жесткого» нагружения при заданных значениях компонент деформаций на поверхности конструкции. Другими словами, вторая основная задача разбивается на две самостоятельные краевые подзадачи.

При решении первой краевой подзадачи определяется напряженно-деформированное состояние всей конструкции при ползучести вплоть до разрушения без учета поверхностного упрочненного слоя. Она решается классическими методами с использованием численных методов дискретизации конструкции (метод конечных элементов или метод сеток) шагами по времени. При решении этой задачи может использоваться любая теория ползучести, которая адекватно описывает кривые ползучести материала.

Во второй краевой подзадаче исследуется релаксация остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое, при этом слой считается единым целым, деформирующимся в режиме

«жесткого» нагружения при заданных значениях компонент тензоров деформаций на поверхности конструктивного элемента (граничные условия), которые определяются из решения первой краевой подзадачи. В качестве начальных условий для этой подзадачи используются компоненты тензора деформаций, определяемые при решении первой основной задачи.

Полученные результаты

В рамках предложенного подхода решены следующие задачи: 1) разработан универсальный расчетно-феноменологический метод восстановления в поверхностно упрочненном слое элементов конструкции после процедуры наведения ориентированных остаточных напряжений с учетом анизотропии процесса упрочнения; 2) разработан метод оценки кинетики тензора остаточных напряжений в тонком поверхностно упрочненном слое вследствие ползучести на основе идей декомпозиции и склейки решений краевых задач ползучести для объемного неоднородного напряженного состояния; 3) разработано математическое и программное обеспечение для реализации методов оценки кинетики остаточных напряжений при ползучести.

Достоверность расчетов по предложенным методикам обеспечивается сравнением расчетных данных с экспериментальными данными для упрочненных цилиндрических образцов и образцов с концентраторами из различных сплавов и сталей (ЖС6КП, ВТ9, 30ХГСА, ЭИ691, ЭИ696 и др.) и различных режимов обработки (обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка ультразвуком, дробеструйная обработка и др.)

Решен ряд задач оценки кинетики остаточных напряжений в упрочненном слое для модельных и промышленных конструктивных элементов (цилиндрический образец, круговой концентратор, толстостенная труба, прямолинейные и закрученные лопасти переменного сечения). Показано, что при термоэкспозиции (ползучести при нулевой растягивающей нагрузке) концентрация напряжений слабо влияет на процесс релаксации. Влияние же растягивающей нагрузки является значительным, и интенсивность релаксации напряжений существенно зависит от величины концентрации напряжений, при этом, чем выше коэффициент концентрации, тем сильнее расслоение диаграмм остаточных напряжений от времени выдержки.

На основе полученных результатов разработаны теоретическая база и критерий для оценки влияния остаточных напряжений на сопротивле-

ние усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений при нормальных и, в отличие от существующих методик, повышенных температурах с учетом фактора ползучести.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие на-

учного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Список литературы

1. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.

**SOLUTION OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS OF CREEP AND RESIDUAL STRESS RELAXATION
IN HARDENED STRUCTURES BASED ON THE DECOMPOSITION METHOD**

V.P. Radchenko, M.N. Saushkin

A method of solving boundary value problems of creep and residual stresses relaxation in hardened structures on the basis of the decomposition method for anisotropic hardening is presented. A boundary value problem for a number of model and industrial design elements is considered, the methodology of their solution is reviewed, the results of calculations are presented, and the adequacy of the solutions to the experimental data is verified.

Keywords: plastic surface hardening, residual stresses, creep, relaxation, decomposition method.