

О НЕЛИНЕЙНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА И ОБЛУЧЕНИЯ

Ширвель П.И., Чигарев А.В.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

По классификации, предложенной В.В. Новожиловым задачи, рассматриваемые в механике деформируемых тел можно условно разделить на четыре типа: 1) линейные физически и геометрически; 2) линейные физически, геометрически нелинейные; 3) нелинейные физически, геометрически линейные; 4) нелинейные и физически, и геометрически [1]. В настоящее время развитие МДТТ идет как по пути усиленной детализации простых вариантов (тип 1, 2), так и по пути решения сложных (тип 3) и очень сложных «дважды» и «трижды» нелинейных систем, когда в процессе деформирования значительно изменяется исходная расчетная схема.

В настоящей работе на основе классического термомеханического подхода предлагается постановка и методика численного решения задачи о физически и геометрически нелинейном (конечном) деформировании твердых тел под действием силовых и терморadiационных нагрузок с учетом их взаимного влияния (в рамках гипотезы сплошности). Учитывалось, что размерные изменения, могут быть обусловлены в основном двумя причинами: ползучестью нагруженного образца, возрастающей под действием облучения и радиационным набуханием, проявляющимся в изменении линейных размеров ненагруженного образца в потоке частиц с большой энергией ($E > 0.1$ МэВ). Отметим, что рост ползучести и набухание могут вывести из строя конструктивные элементы агрегатов, работающих при высоких температурах и интенсивном облучении, так как деформации такого рода с течением времени могут стать недопустимо большими. Таким образом, допускаемые напряжения в подобных деталях определяются не пределом текучести и прочности, а допускаемыми деформациями для заданного срока службы, которые зависят от условий нормальной эксплуатации. В этом состоит существенное отличие расчета конструктивных элементов, работающих при высокой и нормальной температурах в условиях радиационного облучения.

Поведение облученных тел существенно отличается от поведения необлученных. В некоторых случаях перемещения точек деформируемого твердого тела могут быть достаточно большими, например, при аварийных ситуациях в условиях ядерного реактора или при значительном радиационном набухании конструкционных материалов (15-23%). Конечные перемещения приводят к большим деформациям, при исследовании которых необходимо надлежащим образом учесть как ползучесть, так и радиационное набухание. Таким образом, в геометрических уравнениях нелинейные члены, содержащие квадраты и произведения производных:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad i, j, k = 1, 2, 3,$$

которые могут сыграть важную роль для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния и прогнозирования ресурса ответственных элементов конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения.

В литературе отсутствуют публикации, в которых были бы предложены варианты моделей конечного терморadiационноупругого деформирования. Исключение составляют лишь монографии Ю.В. Лихачева [2] и И.С. Куликова [3,4], в которых сделаны первые шаги в этом направлении. В [5] были рассмотрены модели «второго порядка точности» для цилиндрических тел, когда перемещения «умеренные», а деформации по-прежнему малы (данное предположение использовалось и для учета термического расширения, радиационного набухания, ползучести). Численными экспериментами установлено, что при воздействии на неоднородно нагретый и облученный материал даже под действием только гидростатического давления, возможно появление сдвиговых деформаций, причем в начально необлученных материалах при таком воздействии сдвиговые деформации не возникали. Расчеты показали, что поведение облученных и необлученных материалов под воздействием температурного поля различно: в однородном поле в нестесненном необлученном теле возникают только объемные деформации, а в облученном теле к объемным деформациям добавляются сдвиговые. В случае нагревания тел при отсутствии деформаций в них возникают термические напряжения, которые в изотропных телах являются гидростатическими, а при неравномерном облучении могут содержать шаровую и девиаторную составляющие. Механические свойства твердых тел также зависят от температуры и облучения, причем эта зависимость может быть и нелинейной. Проявление описанных нелинейных эффектов в изотропных цилиндрических телах усиливается с ростом деформаций, поэтому актуальной является дальнейшая разработка моделей конечного деформирования облучаемых твердых тел, позволяющих описать эти явления.

Проведенный анализ механико-математической модели в первом приближении (на примере осесимметричного терморadiационного деформирования изотропного полого цилиндра), показал, что до уровня деформаций 3,6% результаты расчетов по геометрически линейным и геометрически нелинейным соотношениям практически совпадают. При деформациях порядка 17% выявлены существенные (45-67%) различия между линейными и нелинейными решениями. Указанный подход позволил проследить за реальным изменением формы твердого тела в процессе квазистатического деформирования.

Планируется разработать двух- и трехмерные механико-математические модели, которые вместе с программными средствами их численной реализации могут быть использованы для исследования закономерностей конечного деформирования и разрушения материалов в терморadiационных потоках, а также для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния ответственных элементов конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения и уточнения прогнозирования ресурса всей конструкции в целом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новожилов, В.В. Основы нелинейной теории упругости / В.В. Новожилов: Едиториал УРСС, 2003. - Москва - 214 с.: ил. — ISBN 5-354-00302-4.
2. Лихачев, Ю. И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко. - М.: АТОМИЗДАТ, 1975. - 280 с.
3. Куликов, И. С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В. Б. Нестеренко. - Минск: Наука и техника, 1984. - 103с.
4. Куликов, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. - Минск: Навука і тэхніка, 1990. - 143с.
5. Ширвель, П.И. Прочность неравномерно нагретых цилиндрических тел в условиях ползучести и радиационного облучения / П.И. Ширвель, А.В. Чигарев, И.С. Куликов. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2014. – 252 с.: ил. — ISBN 978-985-550-661-5.

УДК 621.785.5

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ ОСАЖДЕНИЕМ ТВЕРДЫХ ПЛЕНОК TiAlN

Константинов В.М., Ковальчук А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Технологии получения термодиффузионных слоев на сталях и сплавах железа достигли значительного прогресса и позволяют проводить насыщение практически любыми элементами, а толщины получаемых диффузионных слоев охватывают не менее четырех порядков значений [1]. Традиционно применяемые методы химико-термической обработки (ХТО) являются эффективными, но зачастую малопродуктивными процессами поверхностного упрочнения. Большая длительность технологического цикла определяется относительно низкой диффузионной подвижностью атомов насыщающего элемента, особенно при низкотемпературных процессах (азотирование, карбонитрация). Вместе с этим уровень прочностных свойств диффузионных слоев в условиях повышающихся требований к эффективности поверхностного упрочнения, заключающейся в уровне получаемых свойств и ресурсоемкости применяемых технологий, а также тяжелые условия работы упрочняемых деталей, зачастую является недостаточным.

Однако потенциал практического использования диффузионных слоев не реализован полностью. Так, перспективным представляется совершенствование методов ХТО с привнесением операций вакуумной ионно-плазменной обработки для получения на поверхности твердых пленок, которые могут формировать с диффузионным слоем двухслойную систему, обладающую свойствами, не достижимыми в отдельности диффузионным слоем и твердой пленкой [2].

В данной работе были получены опытные образцы износостойких двухслойных систем типа «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN». Они представляли собой структуру модифицированной в результате карбонитрации, ИПА, однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде стальной