

Макаренко Р.Ю., Стульба М.А., Гурвич Ю.А.

Белорусский Национальный Технический Университет

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Огромное число экспериментальных работ связанных нейтронным облучением показали заметные изменения как химических, так и механических свойств материалов, которые являются трудно восстанавливаемыми и сохраняются в течение длительного времени. Это обстоятельство послужило основополагающим фактором в разработке новых методов расчета элементов конструкций и сооружений, подвергающихся нейтронному облучению (атомные реакторы, искусственные спутники, космические корабли и станции).

Анализ достижений в области радиационного нагружения

Наиболее полный перечень работ, касающихся изменения свойств материалов под действием радиоактивного облучения, с описанием некоторых физических механизмов этого явления содержится в обзорах Ф.Бовии и В.С.Ленского. В работе В.С.Ленского предложено обобщение теории малых упругопластических деформаций на случай неоднородности среды, обусловленной неравномерностью радиационного облучения.

Ю.И.Ремнев рассмотрел связь между напряжениями и малыми деформациями в кристаллическом твердом теле при объемном расширении, вызванном облучением тяжелыми частицами, и предложил ряд гипотез, позволяющих определить это расширение. А.А.Ильюшин и П.М.Огибалов предложили методы расчета прочности оболочек толстостенного цилиндра и полого шара. Как и в работах Ю.И.Ремнева, здесь принималось, что падение потока нейтронов пропорционально энергии и толщине слоя, а свойства тела в данной точке зависят от дозы облучения в этой точке. А.Г.Журавлев в своих работах, связанных с определением напряженно-деформированного состояния легких металлов при облучении, пренебрегал возникающей в теле неоднородностью упругих свойств. Особенности поведения нержавеющей сталей в условиях терморadiационного воздействия посвящены работы В.С.Ленского, Ш.Ш.Ибрагимова, А.А.Ильюшина, С.Т.Конобеевского, И.С.Куликова, Г.С.Писаренко, В.А.Цыканова, А.М.Шалаева и др. Различные аспекты теоретических и экспериментальных методов оценки прочности конструкций, подверженных терморadiационному воздействию, рассмотрены в работах В.Д.Балдина, В.Л.Решетина, О.К.Чугунова и др.

Численному моделированию изменения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях посвящены работы В.Н.Маневского, В.С.Рубцова, В.В.Сараева, Е.Н.Синицына, А.А.Тутнова и др. В недавнее время большой вклад в развитие методов и моделей оценки прочности конструкций находящихся под действием нейтронного облучения внесли С.А.Капустин и В.А.Горохов.

Эмпирическая зависимость приращения радиационного распухания материалов

Приращение распухания материала находится по известным эмпирическим зависимостям:

где $\Phi = \int \varphi \cdot dt$ - интегральный поток нейтронов с $E > 0,1 \text{ МэВ}$ (или число смещений на атом). В работе В.Н.Быкова и др. соотношение между приращением объема материала в результате развития пористости, температурой и дозой облучения предлагает выразить уравнением:

$S = g(T)f(Kt)$,
где $g(T)$ и $f(Kt)$ - функции, описывающие зависимости распухания от температуры и дозы облучения. При обработке экспериментальных данных полученных для выражения (3) было установлено, что распухание стали ОХ16Н15МЗБ в исследованных интервалах температур (от 430 до 580 °С) и доз облучения (от $0,7 \cdot 10^{22}$ до $3,5 \cdot 10^{22}$ нейтр/см²) может быть достаточно надежно описано уравнением:

$$S(T, \Phi) = 5.33 \cdot 10^{-7} \cdot (вкт)^{0.19 + 1.63 \cdot 10^{-5} T} \cdot \exp\left(0.0235 \cdot T - \frac{8.35}{T - 630} - \frac{17.82 \cdot 10^2}{980 - T}\right) \quad (3)$$

При рассмотрении тел цилиндрической геометрии изготовленных из ураносодержащих материалов, существует иная форма записи зависимости радиационного распухания материала от температуры и флюенса нейтронов:

$$S = \frac{4.6 b_U \varphi_1 (1 - e_0)}{p} \cdot \text{вф}(r) \cdot \frac{T}{273} - e_0 + (1 - e_0) 0.03 b_U \cdot \text{вф}(r) \quad (4)$$

где e_0 - объемные доли полости; $(1 - e_0)$ - объемные доли материала; p (кг/см²) - давление газообразных продуктов в полости, уравновешенное сопротивлением материала матрицы и внешним давлением $p_{вн}$ (силами поверхностного натяжения и поправкой на не идеальность пренебрегаем в силу их незначительности для развитой стадии распухания); T - температура рассматриваемой ячейки, °К; вф - глубина выгорания, %; v - скорость выгорания, %/ч; b_U - доля делящихся ядер в решетке ураносодержащего материала; φ_1 - количество полостей от всего количества образовавшихся газообразных продуктов.

Рядом авторов на основе обработки экспериментальных результатов предложены эмпирические зависимости для определения радиационного распухания конструкционных сталей:

$$S(T, \Phi) = A_0 \cdot (\Phi t)^m \cdot 10^{\left(\frac{a - b}{T - T_0}\right)} \quad (5)$$

где A_0 , m , a , b - некоторые константы, определяемые экспериментально.

$$S(T, \Phi) = 4.9 \cdot 10^{-51} (\Phi \cdot t)^{1.71} \cdot 10^{\frac{15490}{r} - \frac{5.98 \cdot 10^6}{r^2}}$$

Тогда было сделано предположение, что для практических расчетов целесообразно применять следующую зависимость для распухания стали ОХ16Н15МЗБ:

где Φt - число смещений атомов, соответствующих данному флюенсу нейтронов.

Из проблем, связанных с радиационным распуханием стали, знание которых в значительной мере определяет правильность прогнозирования и оценки работоспособности тел цилиндрической геометрии, стоит выделить:

- 1) экстраполяция распухания на большие интегральные потоки быстрых нейтронов до $3 \cdot 10^{23}$ нейтр/см² (с $E > 0,1$ МэВ) и возможные эффекты насыщения распухания;
- 2) влияние холодной деформации и напряжений;
- 3) влияние переходных режимов работы - внезапное изменение температуры облучения или интенсивности потока нейтронов.