

## ЗАДАЧА ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАВОДОРОЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

**В. В. Яковлев,**

*аспирант*

**Д. А. Огорелков,**

*аспирант*

**В. И. Миронов,**

*доцент*

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург*

**Аннотация.** Оценка конструкционной прочности изделий, контактирующих с водородосодержащей средой, является одной из актуальных проблем механики, физики и металловедения. В статье обсуждается алгоритм решения данной комплексной физико-механической задачи. Приводятся общие уравнения задачи по расчету полей напряжений, температур и концентрации водорода в элементе конструкции и виды граничных условий. Отмечается сильная зависимость коэффициента диффузии от условий эксплуатации, температуры и растягивающих напряжений.

**Ключевые слова:** водород, теплопроводность, диффузия, упругость.

## THE PROBLEM OF ESTIMATING THE PERFORMANCE OF A HYDROGENATED CONSTRUCTION

**Abstract.** An assessment of the constitution strength of products in contact with the hydrogen-containing environment is one of the most actual problem of mechanics, physics and metal science. The algorithm for solving this complex physical and mathematical problems is discussed in the article. The general equations of the voltage field tasks, temperatures and hydrogen concentration in a structural element and types of boundary conditions are given. A strong dependence of the diffusion coefficient on operating conditions, temperature and tensile stresses is noted.

**Keywords:** hydrogen, thermal conductivity, diffusion, elasticity.

**Введение.** На каждом из этапов «жизненного цикла» водорода (производство, транспортировка, хранение, использование) возникают проблемы прочности элементов оборудования, контактирующих с водородом или водородосодержащей средой. Водород вызывает деградацию механических свойств материала конструкций: снижаются предел прочности, параметры пластичности, ударная вязкость, работа разрушения, показатели длительной статической и усталостной прочности [1]. В результате на газопроводном транспорте ежегодно происходит свыше 100 аварий с выходом продукта. Поэтому оценка конструкционной прочности изделий, контактирующих с водородосодержащей средой, остается актуальной проблемой.

Оценка прочности реальной конструкции при одновременном воздействии рабочих нагрузок, температуры и водорода связана с решением комплексной физико-механической задачи [2]. Диффузионные процессы распространения тепла и водорода в твердом теле описываются уравнениями

математической физики в частных производных. Методы получения аналитических и численных решений дифференциальных уравнений развиты достаточно хорошо, но проблема осложняется тем, что физико-механическая задача оказывается связанной. Температура и водород меняют свойства материала и, следовательно, напряженное состояние конструкции при неизменных нагрузках. В свою очередь, механические напряжения, особенно растягивающие, влияют на скорость диффузионных процессов. Для данных процессов не простую самостоятельную задачу представляет постановка начальных и граничных условий.

### **Общий алгоритм решения физико-механической задачи**

В строгой постановке задачи связь между одновременно идущими процессами устанавливается в рамках термодинамики необратимых процессов, с использованием линейных соотношений Онзагера между потоками различных субстанций

(тепла, массы, концентрации, импульса) и движущими силами (градиентами температур, концентраций и пр.).

В расчетной практике задачи переноса тепла, диффузии водорода и расчета напряженного состояния рассматривают, как правило, отдельно. Основанием служит значительная разница физических времен процессов или скорости их протекания и времени достижения стационарного состояния. Процесс перераспределения напряжений в твердом теле считают мгновенным. Процесс переноса тепла считают быстрым по сравнению с процессом диффузии водорода. Поэтому алгоритм решения комплексной физико-механической задачи строится следующим образом. Сначала решается краевая задача по определению поля напряжений в теле от внешней нагрузки без учета влияния температуры и водорода. При наличии экспериментальных данных уточняется значение коэффициента диффузии водорода в зависимости от величины растягивающих напряжений.

Затем решается задача теплопроводности и определяется стационарное поле температур  $T(t)$ , влияющее на коэффициент  $D$  диффузии в соответствии с законом Аррениуса. Далее, при установившейся температуре, решается диффузионная задача по распределению концентрации водорода в теле, влияющей на свойства материала конструкции. Экспериментально устанавливается зависимость механических свойств от температуры и концентрации водорода [2] и решается новая (линейная или нелинейная) краевая задача по определению поля напряжений и их инвариантов. Наконец, по тому или иному критерию предельного состояния оценивается работоспособность, несущая способность, конструкционная прочность.

Условия эксплуатации, способ наводороживания и геометрия тела определяют начальные и граничные условия для нахождения постоянных интегрирования при решении дифференциальных уравнений краевых задач.

### Математическая формализация задач

*Задача теории упругости.* Металлические конструкции рассчитывают на работу в области упругих деформаций. Напряженно-деформированное состояние отдельного элемента описывает система пятнадцати дифференциальных уравнений второго порядка эллиптического типа в частных производных. Компоненты деформаций и напряжений в точке тела могут быть выражены через

три компоненты перемещений, для нахождения которых имеется дифференциальное уравнение [3]

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + \mu \Delta u_j = 0,$$

где  $\lambda, \mu$  — постоянные Ляме,  $\theta$  — объемная деформация,  $\Delta = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ .

Граничные условия задаются в перемещениях. Далее находятся деформации и по закону Гука напряжения, их инварианты.

*Задача теплопроводности.* Изменение температуры в любой точке тела за счет теплопроводности описывается уравнением параболического типа [4]

$$\rho c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}(T)),$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c_t$  — теплоемкость Дж/(кг·К);  $\rho$  — плотность тела.

В зависимости от постановки задачи теплопроводности обычно используют три рода граничных условий. Условия первого рода заключаются в том, что в каждый момент времени на поверхности оболочки необходимо задать распределение температуры. Условия второго рода основаны на том, что задается тепловой поток через поверхность тела. Для условий третьего рода задаются температура окружающей среды  $T$  и закон теплообмена между поверхностью тела и средой.

*Задача диффузии водорода.* В общем случае трехмерной диффузии уравнение процесса, выражающее второй закон Фика, также является параболическим

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) = D \text{div}(\text{grad}c),$$

где  $D$  — коэффициент диффузии (найденный с необходимыми уточнениями в конкретном случае), который характеризует эффективность диффузионного перемещения исследуемого вещества и имеет размерность м<sup>2</sup>/с.

Начальное условие для решения дифференциального уравнения состоит в задании концентрации вещества в начальный момент времени (обычно при  $t = 0$ ) в виде функции координат  $c(x, y, z, 0) = f(x, y, z)$ . В частном случае:  $c(x, y, z, 0) = c(0) = \text{const}$ , или  $c(0) = 0$ . Граничные условия характеризуют значение заданной функции  $c(x, y, z)$  на границе тела для любого момента времени. В за-

задачах диффузии водорода различают четыре вида граничных условий [5].

**Заключение.** Интегрирование дифференциальных уравнений диффузии тепла и водорода при выбранных начальных и граничных условиях позволяет найти распределение температуры и концентрации водорода в теле в любой момент

времени, в том числе и в стационарном состоянии. Далее необходимо определить новые свойства материала, отвечающие найденным стационарным состояниям, решить задачу упругости с новыми свойствами материала и оценить работоспособность конструкции.

#### Список литературы

1. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М. : Metallurgy, 1985. 216 с.
2. *Emel'yanov I.G., Mironov V.I., Lukashuk O. A.* Phenomenon of embrittlement in titanium shells from hydrogen exposure // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. № 537. 022067IOP Publishing doi: 10.1088/1757-899X/537/2/0220671.
3. Амензаде Ю. А. Теория упругости : учебник для университетов. Изд. 3-е, доп. М. : Высш. школа, 1976. 272 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 599 с.
5. Бекман И. Н. Математика диффузии : учеб. пособие. М. : ОнтоПринт, 2016. 400 с.