

УДК 539.2

**ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КОНИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С УЧЕТОМ
ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА
ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ
КОРРОЗИИ**

Белов А.В., Поливанов А.А., Попов А.Г.

*Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета,
Камышин*

Подробная информация об авторах размещена на сайте
«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

На основе системного подхода разработана методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности многослойных стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии.

В качестве примера определено напряженно-деформированное состояние конической оболочки с отверстием при совместном учете факторов, влияющих на ее прочность и долговечность: воздействие высокой температуры, возникновение пластических деформаций, развитие деформаций ползучести, накопление повреждений в материале при ползучести и деградации механических свойств материала вследствие высокотемпературной водородной коррозии.

В настоящее время в химической промышленности и энергетике широко применяются элементы стальных конструкций, выполненные в виде тонких однослойных и многослойных оболочек вращения. Такие конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию силовых и тепловых нагрузок, а также различных агрессивных сред, вызывающих коррозию материала. При этом достаточно распространенным видом коррозии является высокотемпературная водородная коррозия сталей. Воздействие водорода на стальные конструкции может приводить к обезуглероживанию материалов, из которых они изготовлены, что проявляется в существенном снижении их жесткости, мгновенной и длительной прочности и пластичности. Этот процесс идет тем интенсивнее, чем выше температура, давление водорода и уровень действующих напряжений. Так, например при температуре 500°C и парциальном давлении водорода 5 - 10 МПа для стали 20 по истечении опре-

деленного времени модуль упругости может уменьшиться на 20%, а такие механические характеристики, как пределы мгновенной, длительной прочности и текучести снижаются в еще большей степени [4]. Подобная деградация механических свойств материалов вследствие водородной коррозии существенно ослабляет конструкцию и может привести к возникновению в зонах концентрации напряжений пластических деформаций и развитию деформаций ползучести и в конечном итоге к нарушению несущей способности конструкции в целом.

Поэтому, для достоверной оценки работоспособности конструкций, находящихся в условиях термосилового нагружения и воздействия водородосодержащей среды необходимо иметь возможность численного моделирования изменения их напряженно - деформированного состояния с одновременным учетом всех действующих факторов.

Наиболее продуктивным подходом к решению таких задач с точки зрения эффективности и достоверности получаемых результатов является подход, заключающийся в поэтапном их решении. При этом на первом этапе задача решается в достаточно простой постановке (с учетом отдельных факторов воздействия) и после анализа полученных результатов осуществляется переход к ее решению в более сложной постановке. И таким образом, переходя от простой постановки к более сложной, в итоге выполняется расчет с учетом всех действующих факторов и особенностей поведения материала. В ходе поэтапного решения задачи на основе анализа получаемых результатов могут выбираться модели и гипотезы, наиболее адекватно описывающие закономерности поведения материала применительно к рассматриваемым условиям нагружения.

Для определения несущей способности и долговечности конструкций в виде тонких однослойных и многослойных оболочек вращения будем использовать методику расчета, разработанную авторами и изложенную в работах [1, 2, 3, 7]. Данная методика позволяет исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно - деформированного состояния однослойных и многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и оценивать их несущую способность и долговечность. А для учета влияния высокотемпературной водородной коррозии обобщим данную методику расчета путем использования модели воздействия на конструкцию водородосодержащей среды [4].

$$\frac{d\mu}{dt} = k \cdot \mu(1 - \mu) \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$t = 0, \mu = \mu_0(p, T, \omega_C). \quad (2)$$

Здесь $k(p, T, \omega_C)$ – коэффициент, учитывающий влияние давления p , температуры T и степени поврежденности ω на кинетику химических превращений, приводящих к деградации физико – механических свойств материала.

При этом решение поставленной задачи возможно в следующих постановках:

- термоупругая;
- термоупругопластическая;
- термовязкоупругопластическая без учета повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластическая с учетом повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластическая с учетом повреждаемости материалов при ползучести и водородной коррозии;
- термовязкоупругопластическая с учетом повреждаемости материалов при ползучести и водородной коррозии с исследованием кинетики развития областей повреждаемости.

Рассмотрим особенности решения задачи в различных постановках.

1. Термоупругая постановка задачи. Здесь предполагается линейная зависимость напряжений от деформаций, зависимость свойств материала от температуры учитывается путем задания механических свойств материала для различных фиксированных значений температур.

Учет влияния высокотемпературной водородной коррозии на механические свойства материалов осуществляется с использованием модели воздействия на оболочку водородосодержащей среды [4], в соответствии с которой влияние водорода на свойства материала представляется в виде дифференциального уравнения для параметра химического взаимодействия водорода с материалом конструкции μ , изменяющегося от μ_0 до μ_{CR} , принадлежащего интервалу $(0; 1)$ и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

</div

ции с образованием области обезуглероженного материала. Поверхность, разграничивающую области материалов в исходном и обезуглероженном состоянии, будем называть фронтом обезуглероживания.

$$\frac{z}{h} = 1 - \left[\frac{m \cdot \lambda \cdot \exp(B/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot P_b^u} \right]^{\frac{1}{2u}}, \quad (3)$$

для оболочки:

$$z = r_b \left[\left(1 + \frac{h}{r_b} \right)^f - 1 \right], \quad f = 1 - \left[\frac{m \cdot \lambda \cdot \exp(B/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot P_b^u} \right]^{\frac{1}{2u}}, \quad (4)$$

где z – глубина обезуглероживания, отсчитываемая от поверхности контакта оболочки с водородом; h – толщина оболочки; r_b – внутренний радиус оболочки; $t_{\text{фронта}}$ – время, для которого определяется глубина обезуглероживания, m – константа материала.

2. Термоупругопластическая постановка задачи. В этом случае закон поведения материала предполагается линейным только в пределах упругих деформаций, а для моделирования развития необратимых деформаций может быть использована теория неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны в случае нестационарного термосилового нагружения с возможностью исследования истории нагружения [6]. В зависимости от условий нагружения и механических свойств материалов оболочки для оценки ее несущей способности возможно применение одного из трех критериев мгновенного разрушения: Рэнкина, Треска - Геста, или Губера - Мизеса.

3. Термовязкоупругопластическая постановка задачи без учета повреждаемости материалов при ползучести. Здесь в дополнение к предыдущей постановке задачи предполагается возможность развития деформаций во времени вследствие ползучести материалов оболочки; это учитывается путем введения в определяющие уравнения деформаций ползучести. При

$$\frac{d\omega_c}{dt} = C_i \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{1 - \omega_c} \right)^{\vartheta_i}. \quad (5)$$

Здесь σ_ε – эквивалентное напряжение, с помощью которого учитывается

Кинетика перемещения фронта обезуглероживания будет определяться следующим выражением [4]:
для пластины:

этом в качестве критерия разрушения оболочки может использоваться либо один из критериев мгновенной прочности, рассмотренных в постановке 2, либо условие, при котором накопленные полные деформации превышают заданное предельно допустимое значение.

4. Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при ползучести. В данной постановке задачи предполагается, что развитие деформаций ползучести будет сопровождаться накоплением повреждений в материале оболочки, что в конечном итоге также может привести к ее разрушению.

За меру повреждаемости в процессе развития деформации ползучести принят скалярный параметр повреждаемости ω_c , характеризующий относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов и равный нулю, когда повреждений нет, и близкий к единице в момент разрушения. Учет влияния повреждаемости материалов оболочки на процесс ее деформирования осуществляется путем введения параметра повреждаемости в соотношения термовязкопластичности. Для определения ее используется кинетическое уравнение повреждаемости материалов вследствие ползучести, в форме предложенной Ю.Н. Работновым [5].

влияние вида напряженного состояния элемента оболочки на развитие процесса

накопления повреждений; C_i и Q_i – некоторые характеристики i -го материала, определяемые из условия наилучшей аппроксимации соответствующих участков диаграмм длительной прочности.

Процесс накопления повреждений в материале исследуемой оболочки рассчитывается путем последовательного решения на каждом этапе нагружения кинетического уравнения повреждаемости. Исследование процесса накопления повреждений в элементе оболочки продолжается до достижения параметром $a > c$ заданного предельного значения, близкого к единице. Это является условием локального разрушения оболочки (т.е. начала процесса разрушения).

5. Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при ползучести и с исследованием стадии распространения разрушения. Решение задачи в такой постановке предполагает исследование стадии распространения разрушения оболочки. Для этого в первом приближении используется метод, предложенный Л.М. Качановым,

основанный на изучении перемещения фронта разрушения (поверхности, разграничивающей разрушенную и неразрушенную области материала).

Таким образом, исследуя историю изменения напряженно-деформированного состояния оболочки с учетом перемещения фронта обезуглероживания и повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, и используя соответствующие критерии мгновенной и длительной прочности, можно оценить ее несущую способность и долговечность с учетом воздействия всех вышеперечисленных факторов.

В качестве примера рассмотрено напряженно-деформированное состояние равномерно нагретой до температуры 500° С конической оболочки, находящейся под воздействием давления водорода РН2=3,5 Мпа. Оболочка изготовлена из материала сталь 20 и имеет геометрические размеры, как показано на рисунке 1. Давление водорода осуществляется с наружной стороны. Оболочка вращается с угловой скоростью $\omega=20$ об/мин.

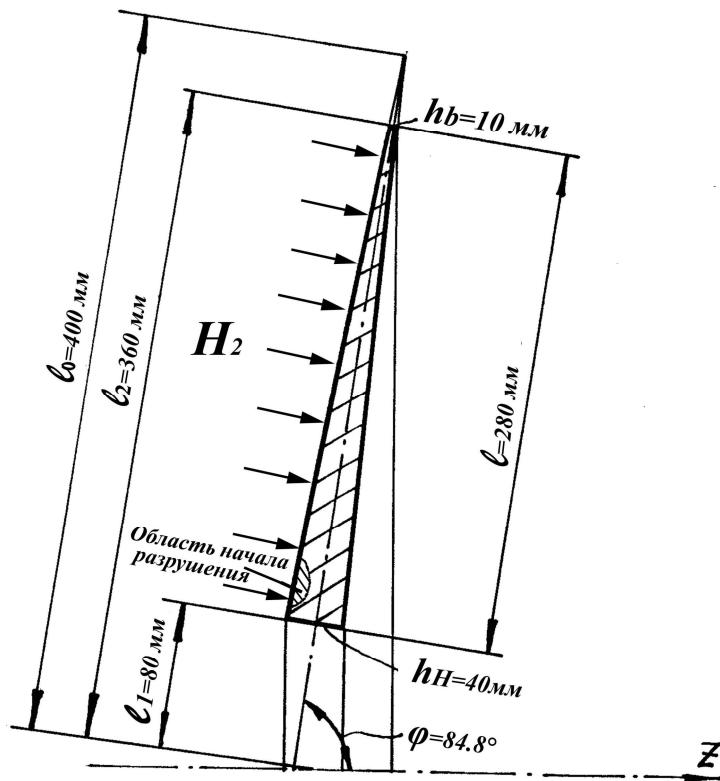


Рис. 1. Геометрические размеры конической оболочки

Константы материала в соотношениях были взяты из [1], которые для стали 20 при данных условиях нагружения принимают следующие значения: $k = 1,49 \cdot 10^{-5}$ (МПа)·ч; $u = 1,73$; $B = 13500$; $\lambda = 5$. Влияние уровня напряжений на скорость обезуглероживания в данном расчете не учитывалось.

Рассматриваемая задача решалась в следующих постановках:

- термовязкоупругопластической с учетом повреждаемости материала при ползучести, $P = 3,5$ МПа, $T = 500^\circ\text{C}$, $\omega=20$ об/мин;

- термовязкоупругопластической с учетом повреждаемости материала при ползучести и водородной коррозии, $P = 3,5$ МПа, $T = 500^\circ\text{C}$, $\omega=20$ об/мин.

Расчет без учета воздействия водорода на материал оболочки (нейтральный газ) показал, что при данных условиях нагружения оболочки, напряжения, возникающие в ее материале, оказываются ниже предела ползучести и длительной прочности.

Некоторые результаты расчета данной оболочки с учетом воздействия водорода приведены на рис. 2 и рис. 3.

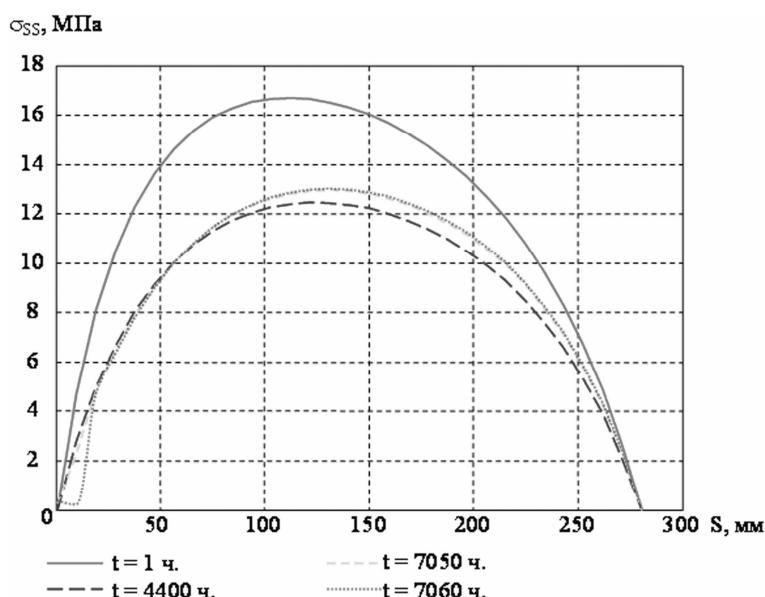


Рис. 2. Меридиональные напряжения

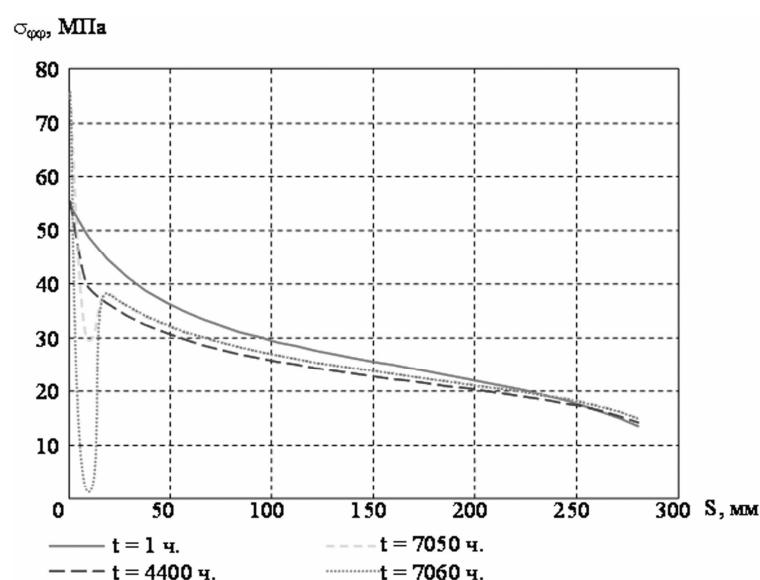


Рис. 3. Окружные напряжения

При этом на рисунке 2 показано распределение меридиональных нормальных напряжений в точках поверхности оболочки, непосредственно контактирующей с водородом для различных моментов времени. Та же самая информация приводится на рисунке 3 для окружных нормальных напряжений.

Анализ результатов расчета с учетом воздействия водорода показывает, что локальное разрушение конической оболочки происходит спустя 7060 часов в точках наружной поверхности у основания конуса.

Таким образом, разработанная методика позволяет исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно-деформированного состояния однослойных и многослойных стальных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, а также оценивать их несущую способность и долговечность. Показано, что при определенных условиях расчет конструкций на прочность и долговечность без учета воздействия водорода может привести к получению неверного результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформиро-

ванное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс. канд. техн. наук. - Киев, 1989. - 18 с.

2. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс. канд. техн. наук. - Волгоград, 2004. - 19 с.

3. V. Bagmutov, A. Belov, A. Polivanov Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo - Viscous - Elasto - Plastic Strain // МЕХАНИКА, 2004, No 3(47) - p. 19 - 23.

4. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии: Саратов, 2003. 176 с.

5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966. - 752 с.

6. Методы расчета оболочек. Т. 3. Теория упруго-пластических оболочек при неизотермических процессах нагружения/Шевченко Ю.Н., Прохоренко И.В. - Киев: Наук. думка, 1981. - 296 с.

7. Белов А.В., Поливанов А.А., Попов А.Г. Современные проблемы науки и образования №4 2007. - С. 80-85.

DURABLE STRENGTH OF A ROTATING CONICAL SHELL OF A VARIABLE RIGIDITY IN VIEW OF A MATERIAL DAMAGEABILITY AT CREEPING AND A HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN-TYPE CORROSION

Belov A.V., Polivanov A.A., Popov A.G.

Kamyshin institute of technology, branch of Volgograd state technical university

On the of the system approach a procedure of the solution to the complex problem designed and durability of multilayer steel shells in view of irreversible deformation, damageability of materials owing to creep and high-temperature hydrogen-type corrosion was developed.

Elasto-plastic stressed-strained state of a conical shell a hole is defined as an instance at the same time taking into account the factors affecting its strength and durability: the affect of high temperature, occurrence of plastic deformation, development of creep strains, accumulation of faults to the material when creeping and degradation mechanical characteristics of the material owing to high-temperature hydrogen-type corrosion.