

УДК 539.2

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

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

Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

Камышин, Россия

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 круглой пластины 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°С и парциальном давлении водорода 5 – 10 МПа для стали 20 по истечении определенного времени модуль упругости мо-

жет 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]. 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].

При этом решение поставленной задачи возможно в следующих постановках:

- термоупругая;
- термоупругопластическая;

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

с начальными условиями:

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

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

– 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.

Кроме того, каждая из постановок предполагает возможность учета высокотемпературной водородной коррозии.

Далее рассмотрим эти постановки задач более подробно.

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 $\mu_{кр}$, принадлежащего интервалу (0; 1) и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

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

для пластины:

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

для оболочки:

$$z = r_b \left[\left(1 + \frac{h}{r_b} \right)^f - 1 \right] \quad f = 1 - \left[\frac{k \cdot \lambda \cdot \exp(Q/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot P^u} \right]^{\frac{1}{2-u}}, \quad (3)$$

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.

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 (теория течения с изотропным упрочнением) – в случае нестационарного термосилового нагружения с возможностью исследования истории нагружения. 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 этом в качестве критерия разрушения оболочки может использоваться либо один из критериев мгновенной прочности, рассмотренных в постановке 2, либо условие, при котором накопленные полные дефор-

будем называть фронтом обезуглероживания.

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

мации 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 ω_C используется кинетическое уравнение повреждаемости материалов вследствие ползучести, в форме предложенной Ю.Н. Работновым [5].

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 ω_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 кор-

розии, и используя соответствующие критерии мгновенной и длительной прочности, можно оценить ее несущую способность и долговечность с учетом воздействия всех вышеназванных факторов.

В качестве примера рассмотрим напряженно – деформированное состояние равномерно нагретой до температуры 500°C кольцевой пластины, находящейся под воздействием давления водорода $P = 5$ МПа. Пластина изготовлена из материала сталь 20 и имеет следующие геометрические размеры: $R = 110$ мм, $r = 65$ мм, $\delta = 10$ мм (рис. 1). Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины, при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно – неподвижное опирание.

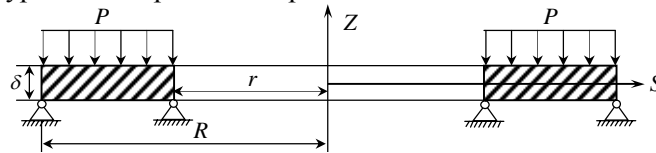


Рис. 1.

Константы материала в соотношениях (1) – (3) были взяты из работы [4]. Влияние уровня напряжений на скорость обезуглероживания в данном расчете не учитывалось.

Рассматриваемая задача решалась в следующих постановках:

- термовязкоупругопластической с учетом повреждаемости материала при ползучести;
- термовязкоупругопластической с учетом повреждаемости материала при ползучести и водородной коррозии.

Расчеты пластины без учета водородной коррозии показали, что максимальные значения интенсивности напряжений не превышают пределов текучести, ползучести и длительной прочности материала, то есть при этом в ее материале не

возникает пластических деформаций и не происходит накопление деформаций ползучести и повреждаемости. Таким образом, если не учитывать влияние высокотемпературной водородной коррозии, рассматриваемая пластина имеет практически неограниченный ресурс.

С целью получения более достоверного результата производился расчет несущей способности и длительной прочности данной пластины с учетом высокотемпературной водородной коррозии. Некоторые результаты такого расчета приведены на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 2. приведена зависимость, показывающая увеличение толщины обезуглероженного слоя с течением времени для заданных условий нагружения.

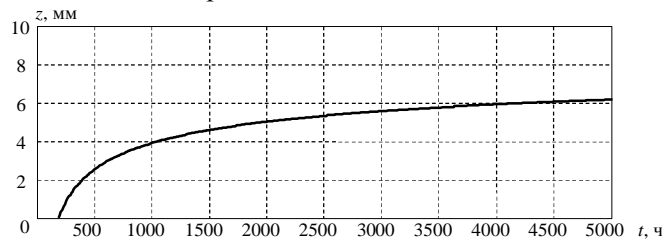


Рис. 2.

На рис. 3 приведены кривые, показывающие распределение меридиональных σ_{ss} (а) и окружных $\sigma_{\varphi\varphi}$ (б) напряжений на нижней поверхности пластины (S – координата, отсчитываемая от центральной оси Z). Кривые, показывающие распределение

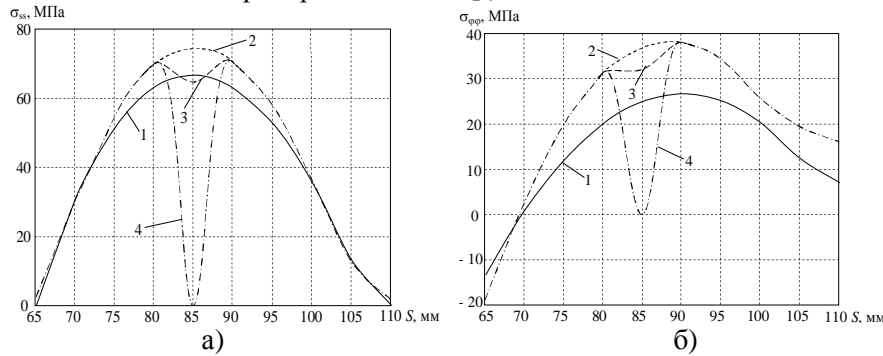


Рис. 3.

окружных напряжений, имеют аналогичный вид. Кривая «1» соответствует моменту времени 1 ч, кривая «2» – 3000 ч., кривая «3» – 4500 ч. (перед разрушением), кривая «4» – 4510 ч. (начало процесса разрушения).

Наиболее напряженными точками нижней поверхности пластины является точки, отстоящие от края отверстия на расстоянии 20 мм. При этом на верхней поверхности пластины, подверженной действию водорода, имеют место преимущественно сжимающие напряжения. По мере обезуглероживания материала пластины происходит снижение его прочностных свойств. Это приводит к перераспределению напряжений в тех зонах пластины, в которых материал обезуглерожен и возникают необратимые деформации. При этом в точках нижней поверхности пластины напряжения возрастают до значений, превышающих предел ползучести, что вызывает развитие деформаций ползучести и накопление повреждений в материале. В результате к моменту времени $t = 4510$ ч. в наиболее напряженных точках ($S = 85$ мм, $Z = -0,5$ мм) происходит разрушение материала вследствие ползучести и этот момент времени принят за время разрушения конструкции.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно – деформированное 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 Multilayered 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.

**THE ESTIMATING SERVICEABILITY OF MULTILAYERED PLATES AND SHELLS
WITH TAKING INTO ACCOUNT DAMAGEABILITY OF MATERIAL TO CREEPING
AND 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 round plate 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.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ