

Особенности исследования поведения многослойных оболочечных конструкций, находящихся в условиях воздействия стационарных температурных и силовых полей с учетом деградации физико – механических свойств материалов

Белов А.В., Поливанов А.А., Попов А.Г.
*Камышинский технологический институт
 (филиал) Волгоградского государственного
 технического университета*

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 определенного времени модуль упругости может уменьшиться на 20%, а такие механические характеристики, как пределы мгновенной, длительной прочности и текучести снижаются в еще большей степени. 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 стальных конструкций в виде тонких однослойных и многослойных оболочек вращения будем использовать методику расчета, разработанную авторами, которая 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, предложенную И.Г. Овчинниковым.

Разработанная методика решения комплексной задачи по оценке прочности, жесткости и долговечности многослойных оболочек вращения в зависимости от задаваемых значений соответствующих параметров позволяет выполнять расчет в различных постановках. Возможные варианты таких постановок задач, решаемых в рамках разработанной системы расчета оболочек вращения приведены ниже.

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

2. Термоупругопластическая постановка задачи. В этом случае закон поведения материала предполагается линейным только в пределах упругих деформаций, а для моделирования развития необратимых деформаций могут быть использованы:

- теория простых процессов деформирования (теория малых упругопластических деформаций) – в случае стационарного термосилового нагружения;
- 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.

Учет пластических деформаций производится путем непосредственного использования мгновенной термомеханической поверхности

$$s = f(\epsilon^*, T) \quad (1)$$

Здесь ϵ^* – мгновенная деформация, состоящая из упругой $\epsilon\epsilon$ и мгновенной пластической деформации ϵp .

В зависимости от условий нагружения и механических свойств материалов оболочки для оценки ее несущей способности возможно применение одного из двух критериев разрушения: Треска – Сен – Венана 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 деформации превышают 5%.

Учет деформаций ползучести производится путем использования диаграмм ползучести

$$e_c = e_c(t) \quad (2)$$

полученных при различных фиксированных значениях температуры для всех материалов, из которых изготовлена оболочка.

Здесь e_c – деформация ползучести.

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. При этом, за меру повреждаемости материала в процессе развития деформации ползучести принят скалярный параметр повреждаемости w_c .

Для описания процесса накопления повреждений в материале вследствие ползучести используется кинетическое уравнение повреждаемости Ю. Н. Работнова:

$$\frac{dw_c}{dt} = C \cdot \left(\frac{s_{\text{Э}}}{1 - w_c} \right)^Q \quad (3)$$

где t – время, $s_{\text{Э}}$ – эквивалентное напряжение, C и Q – коэффициенты, определяемые на основе кривых длительной прочности, полученных из опытов на одноосное растяжение цилиндрических образцов при различных фиксированных значениях напряжения и температуры.

В качестве эквивалентного напряжения может использоваться один из критериев длительной прочности: Джонсона, Каца, Сдобырева, Трунина или Лебедева – Писаренко. Выбор критерия длительной прочности, наиболее адекватно описывающего процесс повреждаемости материала при ползучести, зависит от вида напряженного состояния, уровня напряжений, наличия достаточного количества экспериментальных данных.

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 w_c^* заданного предельного значения, близкого к единице. Это является условием начала процесса разрушения оболочки.

5. Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при пол-

$$z = r_b \left[\left(1 + \frac{h}{r_b} \right)^f - 1 \right], \quad f = 1 - \left[\frac{k \cdot I \cdot \exp(B/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot p^u} \right]^{\frac{1}{2u}} \quad (6)$$

зучести 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). За время полного разрушения принимается момент времени, при котором скорость перемещения фронта резко возрастает или когда в отдельных, наиболее нагруженных точках накопятся недопустимо большие деформации, превышающие 5%. Скорость перемещения фронта разрушения определяется как отношение перемещения фронта разрушения, к промежутку времени, за которое это перемещение происходит.

6. Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии.

В данной постановке задачи, в дополнение к предыдущей, производится учет влияния высокотемпературной водородной коррозии на несущую способность оболочек. Он осуществляется с использованием модели воздействия на конструкцию водородосодержащей среды, предложенную И.Г. Овчинниковым. В соответствии с этой моделью влияние водорода на свойства материала представляется в виде кусочно – линейного закона для параметра химического взаимодействия водорода с материалом конструкции μ , изменяющегося от 0 до 1 и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

$$m = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{\text{инк}}; \\ (t - t_{\text{инк}}) / (t_{\text{кр}} - t_{\text{инк}}), & \text{при } t_{\text{кр}} < t < t_{\text{инк}}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_{\text{кр}}; \end{cases} \quad (4)$$

где $t_{\text{инк}} = k \cdot p \cdot u \cdot \exp(B/T)$ – продолжительность инкубационного периода, в течении которого не происходит изменения свойств материала; $t_{\text{кр}} = \lambda \cdot t_{\text{инк}}$ – момент времени, совпадающий с завершением химических превращений в материале и изменением (ухудшением) его механических характеристик; p – парциальное давление водорода; T – температура; k, u, B, λ – некоторые константы экспериментально определяемые для различных марок стали.

Кинетика перемещения фронта безуглероживания будет определяться следующим выражением: для пластины:

$$\frac{z}{h} = 1 - \left[\frac{k \cdot I \cdot \exp(B/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot p^u} \right]^{\frac{1}{2u}} \quad (5)$$

для оболочки:

где z – глубина обезуглероживания, отсчитываемая от поверхности контакта оболочки с водородом; h – толщина оболочки; $r_{в}$ – внутренний радиус оболочки; $t_{фронт}$ – время, для которого определяется глубина обезуглероживания.

Поскольку оболочечные конструкции, как правило, находятся под действием внутреннего давления, то воздействие водорода на их материал начинается с внутренней поверхности оболочки и по мере проникновения водорода в материал эти процессы также распространяются в глубь материала. Так после завершения процесса химического взаимодействия водорода с материалом оболочки в точках внутренней поверхности при $t = t_{кр}$ материал полностью обезуглероживается и затем фронт обезуглероживания будет перемещаться от внутренней поверхности оболочки к внешней. Но в течение периода времени $t \leq t_{кр}$ изменение механических характеристик материала практически не происходит, и в этом интервале времени нагружения оболочки ее расчет будем производить без учета водородной коррозии. Начиная с момента времени $t > t_{кр}$ при расчете оболочки влияние водородной коррозии будем учитывать путем выделения обезуглероженного слоя материала со стороны поверхности оболочки, контактирующей с водородом. Это фактически будет соответствовать введению нового слоя материала, толщина которого будет постоянно увеличиваться по мере развития процесса обезуглероживания и тем самым в оболочке возникнет подвижная граница между слоями исходного и обезуглероженного материалов. При определении напряженно – деформированного состояния материала в точках обезуглероженного слоя необходимо использовать его механические характеристики, соответствующие обезуглероженному состоянию. По мере развития процесса обезуглероживания материала происходит снижение прочности и жесткости оболочки, и в наиболее напряженных зонах могут возникать пластические деформации и интенсивно развиваться деформации ползучести, сопровождающиеся накоплением повреждений в материале. Этот процесс в конечном итоге, может привести к полной потере несущей способности конструкции.

С применением предложенной методики были проведены расчеты кинетики изменения напряженно – деформированного состояния и времени до разрушения для следующих конструкций:

1. Вращающейся однослойной и трехслойной конической оболочки переменной жесткости (покрывающий диск газовой турбины), с учетом повреждаемости материалов при ползучести. В рассматриваемой задаче исследовано распределение зон пластичности и повреждаемости по осевому сечению оболочек в процессе их нагружения и зависимость времени до разрушения трехслойной оболочки от скорости ее вращения.

2. Сферической оболочки, ослабленной неподкрепленным круговым отверстием и находящейся под действием постоянного давления и температуры, с учетом повреждаемости материалов при ползучести. Исследованы зависимости времени до начала разрушения от толщины стенки и величины внут-

реннего давления для однослойных и двухслойных вариантов конструкции оболочек.

3. Одно – и двухслойного сосуда давления сложной формы, находящегося под действием постоянного давления и температуры, с учетом повреждаемости материалов при ползучести. Исследовано распределение зон пластичности и повреждаемости по осевому сечению оболочки в процессе ее нагружения и определено время до разрушения обоих сосудов.

4. Двухслойной оболочки со сложной формой меридиана, представляющей собой линзовый компенсатор осевых перемещений. В этой задаче были определены: зависимость величины максимальной компенсирующей способности двухслойного компенсатора от внутреннего давления при различных температурах (без учета повреждаемости), зависимость времени до начала разрушения компенсатора от внутреннего давления, с учетом повреждаемости материалов при ползучести, при различных продольных перемещениях и распределение зон повреждаемости в элементе компенсатора. Для сравнения был также проведен расчет однослойного компенсатора.

5. Равномерно нагретой однослойной кольцевой пластины с отверстием, находящейся под воздействием давления водорода и имеющей шарнирно – неподвижное опирание по внутреннему и внешнему контурам. Расчеты производились без учета влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания. Рассчитана кинетика перемещения фронта обезуглероживания и определено время разрушения пластины. Показано, что расчеты напряженно – деформированного состояния конструкций без учета воздействия водорода могут привести к неверным результатам.

Выводы

1. На основе соотношений теории неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны, кинетического уравнения повреждаемости материала при ползучести Ю.Н. Работнова и модели воздействия на конструкцию водородосодержащей среды И.Г. Овчинникова разработана методика решения задач по оценке прочности, жесткости и долговечности элементов конструкций в виде тонких многослойных оболочек вращения со сложной формой меридиана, позволяющая определять упругопластическое напряженно – деформированное состояние таких оболочек с учетом деградации механических свойств материалов во времени, кинетику развития областей разрушения и время до разрушения.

2. Построен алгоритм решения задачи упругопластического деформирования многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, который реализован в виде программного комплекса на языке Visual Fortran.

Разработанный программный комплекс позволяет решать задачи в:

- термоупругой постановке;

- термоупругопластической постановке; – термовязкоупругопластической постановке без учета повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести и с исследованием стадии распространения разрушения;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии.

3. Решен ряд практических задач при дифференцированном и совместном учете факторов, определяющих прочность и долговечность тонких многослойных оболочек вращения с простой и сложной формами меридиана, подверженных различным видам воздействий (центробежные силы, внутреннее давление, осевое усилие, воздействие водорода) и показана эффективность применения многослойных материалов.

4. Выполненные исследования могут быть основой для их дальнейшего развития в следующих направлениях:

- учет влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания;
- учет неоднородности распределения температурного поля по объему конструкций и его влияние их долговечность.

Работа представлена на VII научную конференцию с международным участием «Успехи современного естествознания», Дагомыс (Сочи), 4-7 сентября 2006г. Поступила в редакцию 12.09.2006г.

Свойства подземных вод и технология их утилизации

Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю.,
Вершинина В.П.

*Иркутский государственный
технический университет*

Изучение гидрогеохимических свойств химических элементов, находящихся в подземных водах, является одним из важнейших вопросов, так как это предопределяет знание о состоянии и формах нахождения элементов, а следовательно их способность выделяться в технологических процессах в те или иные продукты.

Одним из перспективных методов извлечения металлов из растворов является ионный обмен. Рассолы, представляющие собой раствор нескольких солей, имеют достаточно сложный физико-химический состав и структуру (гл.3). Высокая минерализация и поликомпонентность обуславливают ряд особенностей поведения данных вод, как в процессе добычи, так и, в особенности, в процессе переработки. Применение ионообменного метода для извлечения микрокомпонентов из рассола возможно в связи с наличием в составе рассолов компонентов в ионной форме. Разница в процентном содержании ионных форм различных компонентов предопределяет вероятность их селективного выделения при использовании ионообменной технологии. Однако

высокая концентрация солей требует развития положений ионного обмена, разработанных в большинстве случаев для разбавленных растворов, в направлении применимости их к концентрированным системам.

На основании анализа теоретических закономерностей процесса ионного обмена, изучения условий извлечения щелочных и щелочно-земельных металлов и рассмотрения высокоминерализованных вод, как специфичной физико-химической системы, установлен ряд факторов, оказывающих значительное влияние на процесс ионообменного выделения металлов. Структура воды в таких системах изменена по сравнению с чистой водой, а, исходя из положений теории ионного обмена, гидратация обменивающихся ионов играет большую роль.

Факторы, влияющие на обмен металлов, по нашему мнению, разделяются на внутренние (свойства минерализованных вод) и внешние факторы системы (т.е. факторы процесса).

К важнейшим внутренним факторам системы относятся химический состав рассолов; общая минерализация; водородный показатель (рН); концентрация микро- и макрокомпонентов в рассоле; формы нахождения компонентов в рассоле; структурно-химические свойства рассолов; термодинамические свойства компонентов системы; зависимость сорбционного поведения ионов от их положения в Периодической системе.

К важнейшим внешним факторам системы относятся время процесса; тип и свойства катионитов; метод элюирования; тип и концентрация элюента.

В рамках данной работы, опираясь на значительный объем проведенных совместно с коллегами исследований по извлечению микрокомпонентов из природных рассолов и определению оптимальных условий ионного обмена, необходимо выявить наиболее важные закономерности ионного обмена из высококонцентрированных рассолов, обладающих специфическими физическими и структурно-химическими свойствами. Следует также определить границы применимости и эффективности ионообменного метода с учетом исходных характеристик природных рассолов. При этом основной задачей остается селективное выделение микрокомпонентов из рассолов, в частности стронция, с получением дополнительной продукции.

Объектами исследования ионообменных процессов являлись хлоридно-натриевые рассолы Коршуновского ГОКа и хлоридно-кальциевые рассолы, изливающиеся из эксплуатационной скважины №322 в районе Удачинского ГОКа, а также моделирующие их состав растворы.

Процесс ионного обмена складывается из ряда подпроцессов: извлечения ионов металлов из фазы рассола; их сорбции на смоле путем обмена с ионами смолы; извлечения ионов металлов из фазы ионита, т.е. десорбции. При ионообменном выделении металлов из поликомпонентных рассолов важным является выявить, на какой стадии возможно эффективное разделение макро- и микрокомпонентов, а также микрокомпонентов между собой

Равновесие является важным вопросом теории и практики ионного обмена. Обмен ионов представляет собой строго стехиометрическую реакцию. Рав-