

УДК 539.2

НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

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

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

На основе обобщенной модели предложен системный подход и разработана методика решения комплексной задачи по оценке напряженно – деформированного состояния тонких оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии при нестационарных условиях нагружения.

В химической промышленности и энергетике широко распространены элементы стальных конструкций, выполненные в виде тонких однослойных и многослойных оболочек вращения, круглых и кольцевых пластин. Такие конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию силовых и тепловых нагрузок, а также различных агрессивных сред, вызывающих коррозию материала.

Достаточно распространенным видом коррозии является высокотемпературная водородная коррозия сталей. Воздействие водорода на конструкции может приводить к обезуглероживанию материалов из которых они изготовлены, что проявляется в значительном снижении их механических характеристик - жесткости, мгновенной и длительной прочности, пластичности. С повышением температуры, давления водорода и уровня действующих напряжений интенсивность процесса значительно увеличивается. Например, для стали 20 при температуре 500°C и парциальном давлении водорода 5–10 МПа, через определенное время модуль упругости может уменьшиться на 20%, а пределы мгновенной, длитель-

ной прочности и текучести еще более значительно [4].

Ухудшение механических свойств материалов вследствие водородной коррозии ослабляет высоконагруженные конструкции и приводит к возникновению в зонах концентрации напряжений пластических деформаций, развитию деформаций ползучести и к нарушению несущей способности конструкции в целом.

Для достоверной оценки работоспособности конструкций, находящихся в условиях термосилового нагружения и воздействия водородосодержащей среды необходимо иметь возможность расчета изменения их напряженно – деформированного состояния, оценки остаточного ресурса с учетом всех действующих факторов. Наиболее эффективным методом решения таких задач является численное моделирование с поэтапным их решением. 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, постепенно усложняя задачу, выполняется расчет с

учетом всех действующих факторов и особенностей поведения материала. После каждого этапа решения задачи проводится анализ получаемых результатов и 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, в т.ч. пластин использована методика расчета, разработанная авторами. Эта 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. Для учета влияния высокотемпературной водородной коррозии в данную методику расчета добавлены модели воздействия на конструкцию водородосодержащей среды [4].

Рассмотрим тонкостенную оболочку, состоящую из нескольких слоев различных металлов, первоначально находящуюся в естественном ненапряженном состоянии при начальной температуре, а затем подвергающуюся медленному неравномерному нагреву и действию распределенных нагрузок, симметричных относительно оси вращения и не вызывающих деформации кручения. Механические характеристики материалов задаются в виде мгновенных диаграмм деформирования, кривых ползучести и длительной прочности, значений коэффициентов линейного теплового расширения и коэффициентов Пуассона для ряда фиксированных температур. Эти характеристики должны быть получены путем проведения соответствующих испытаний образцов, изготовленных из материалов, находящихся как в исходном,

так и в обезуглероженном состоянии. Статические и геометрические уравнения записываются в форме геометрической линейной теории тонких слоистых оболочек вращения. Задача решается в квазистатической постановке в рамках гипотез Кирхгофа – Лява для пакета слоев в целом. Вдоль меридиана и по толщине пластины разбивается на малые интервалы (элементы), напряженное состояние которых можно считать однородным.

Процесс нагружения разбивается на ряд малых по времени этапов. В качестве определяющих уравнений используются соотношения теории неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны, линеаризованные методом дополнительных деформаций. За меру повреждаемости в процессе развития деформации ползучести принят скалярный параметр повреждаемости w_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 на процесс ее деформирования осуществляется путем введения параметра повреждаемости в соотношения термовязкопластичности.

Для определения w_c используется кинетическое уравнение повреждаемости материалов вследствие ползучести, в форме предложенной Ю.Н. Работновым [5].

Учет влияния высокотемпературной водородной коррозии на несущую способность осуществляется использованием модели воздействия на конструкцию водородосодержащей среды [4]. В соответствии с этой моделью влияние водорода на свойства материала представляется в виде кусочно-линейного закона для параметра химического взаимодействия водорода с материалом конст-

рукции μ , изменяющегося от 0 до 1 и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

$$\mu = \begin{cases} 0, & \text{если } t < t_{\text{инк}}; \\ (t - t_{\text{инк}}) / (t_{\text{фронта}} - t_{\text{инк}}), & \text{если } t_{\text{фронта}} < t < t_{\text{инк}}; \\ 1, & \text{если } t \geq t_{\text{фронта}}; \end{cases} \quad (1)$$

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

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

для пластины:

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

для оболочки:

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

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

Поскольку конструкции в виде оболочек, 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 $t = t_{\text{фронта}}$ материал полностью обезуглероживается и затем фронт обезуглероживания будет

перемещаться от внутренней поверхности оболочки к внешней. Но в течение периода времени $t \leq t_{\text{фронта}}$ изменение механических характеристик материала практически не происходит, и в этом интервале времени нагружения оболочки ее расчет будем производить без учета водородной коррозии, непосредственно используя методику [1, 2, 3]. Начиная с момента времени $t > t_{\text{фронта}}$ 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.

Таким образом, исследуя историю изменения напряженно - деформированного состояния с учетом перемещения фронта

обезуглероживания и повреждаемости материалов при ползучести 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 напряжено – деформированное состояние равномерно нагретой кольцевой пластины, как частный случай оболочки, находящейся под воздействием давления водорода. Пластина изготовлена из материала сталь 20 и имеет следующие геометрические размеры: $R = 110$ мм, $r = 65$ мм, $d = 10$ мм (рис. 1). Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины по закону $P=0,002*t$ (где t – время процесса), при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно – неподвижное опирание.

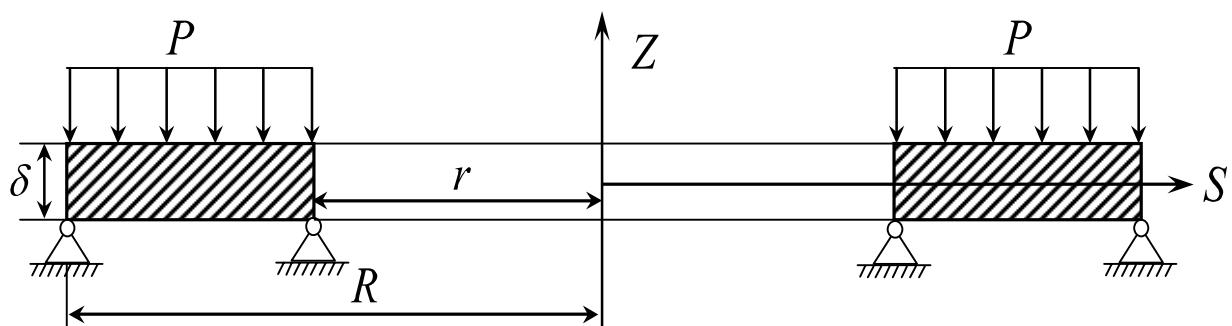


Рис. 1.

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

Рассматриваемая задача решалась в следующих постановках:

При постоянной температуре $T=300$ С°:

- 1.1. Термоупругопластическая деформация без учета водородной коррозии;
- 1.2. Термоупругопластическая деформация с учетом водородной коррозии;

При постоянной температуре $T=500$ С°:

2.1. Термовязкоупругопластическая деформация с учетом повреждаемости материала при ползучести и без учета водородной коррозии;

2.2. Термовязкоупругопластическая деформация с учетом повреждаемости материала при ползучести и водородной коррозии.

Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 2 - 5.

Как показали результаты расчетов, во всех случаях наибольшие растягивающие напряжения возникают на нижней поверхности пластины в точках, отстоящих от края отверстия на расстоянии 20 мм. На верхней поверхности пластины имеют

место преимущественно сжимающие напряжения. Разрушение материала во всех случаях происходит в наиболее напряженных точках пластины с координатами $S = 85$ мм, $Z = -0,5$ мм.

Таблица 1.

№	Вид постановки задачи	Температура оболочки (°C)	Время начала процесса разрушения (ч.)	Вид критерия прочности	Давление на момент разрушения, МПа	Глубина обезуглероживания на момент разрушения, мм
1	1.1.	300	1900	КМП	38	-
2	1.2.	300	1830	КДП	36,5	2
3	2.1.	500	630	КМП	12,5	-
4	2.2.	500	575	КДП	11,5	7

Примечание.

1. КМП - критерий мгновенной прочности [6];
2. КДП - критерий длительной прочности [2, 5].

3. За время начала процесса разрушения (момент разрушения) принимается время, за которое происходит нарушение одного из заданных критериев прочности.

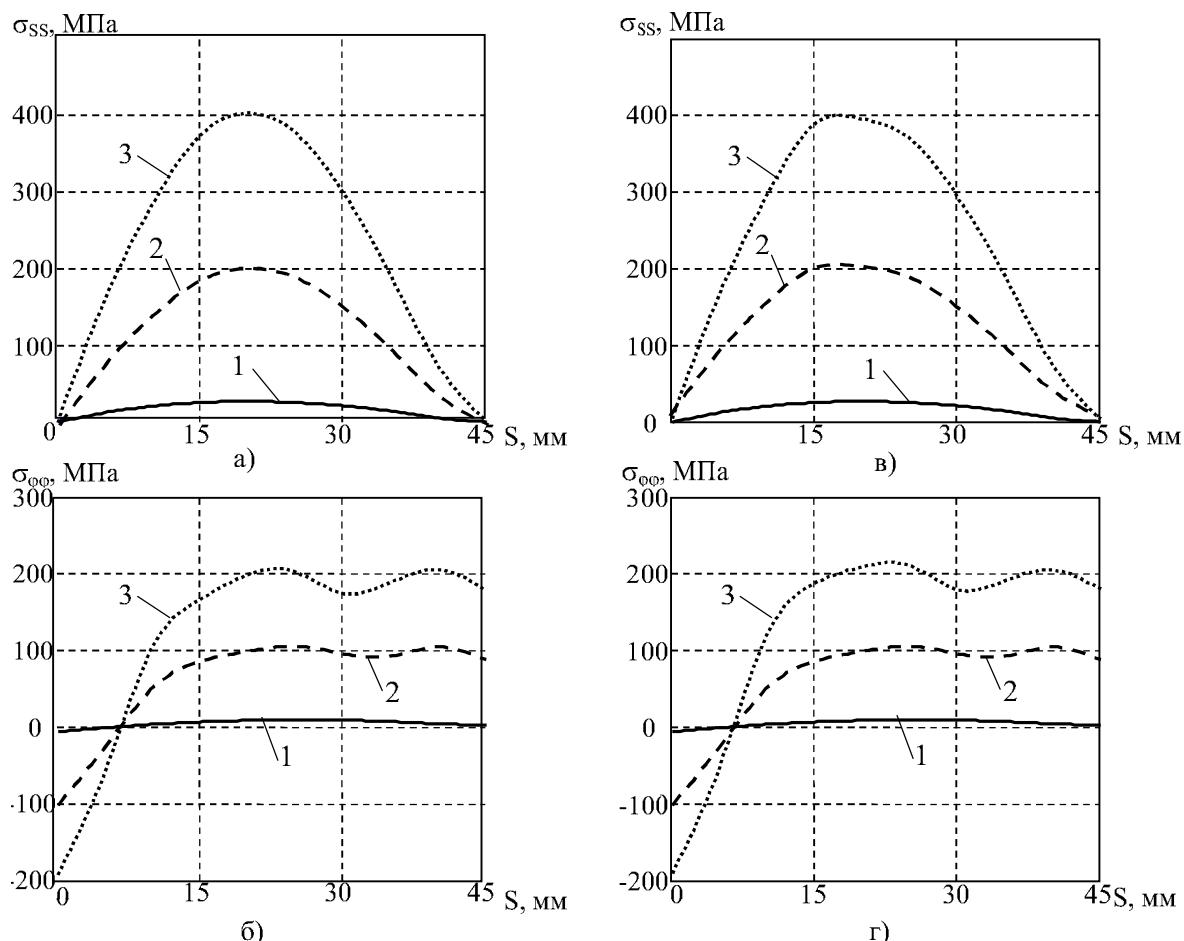


Рис. 2.

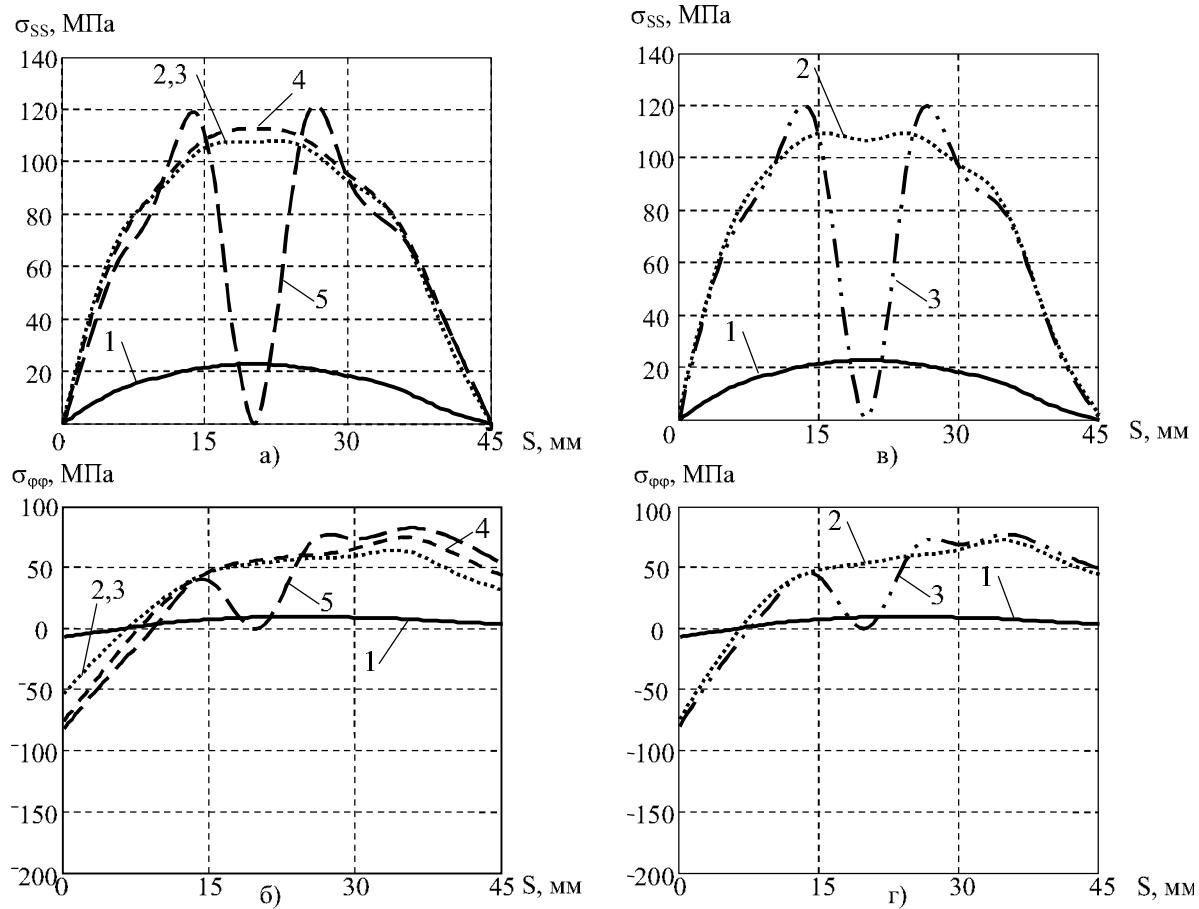


Рис. 3.

На рис. 2. приведены диаграммы меридиональных s_{ss} и окружных s_{jj} напряжений на нижней поверхности пластины для постановок задач 1.1 (а и б) и 1.2 (в и г) в моменты времени: 1 – 100 ч; 2 – 1000 ч.; 3 – 1800 ч. Поскольку при температуре 300° С деформация ползучести и соответствующая ей повреждаемость материала не развиваются, и интенсивность развития водородной коррозии незначительна (толщина обезуглероженного слоя при решении задачи в постановке 1.2 составляет на момент разрушения всего 2 мм), то значения напряжений, полученные при решении задачи в постановках 1.1 и 1.2 для одних и тех же моментов времени мало отличаются друг от друга.

В тоже время, при температуре пластины 500° С деформации ползучести и

соответствующая им повреждаемость материала развиваются достаточно интенсивно (вариант постановки задачи 2.1). Это приводит к более быстрому ее разрушению, по сравнению с постановкой задачи 1.1. А при интенсивном развитии процесса обезуглероживания материала в следствии высокотемпературной водородной коррозии (вариант постановки задачи 2.2), время разрушения пластины сокращается еще на 9%. Диаграммы меридиональных s_{ss} и окружных s_{jj} напряжений на нижней поверхности пластины для постановок задач 2.1 (а и б) и 2.2 (в и г) приведены на рис. 3. в моменты времени: 1 – 100 ч; 2 – 570 ч.; 3 – 575 ч.; 4 – 620 ч. 5 – 630 ч.

Кроме этого, для варианта постановки задачи 2.2 было определено положение зон развития пластичных деформаций

(рис. 4) и распределение зон повреждаемости материала (рис. 5) в пластине в

фиксированные моменты времени:
а) 500 ч., б) 560 ч., в) 575 ч.

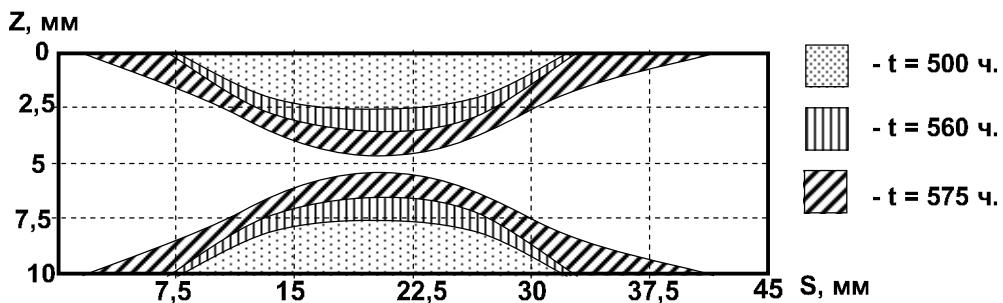


Рис. 4.

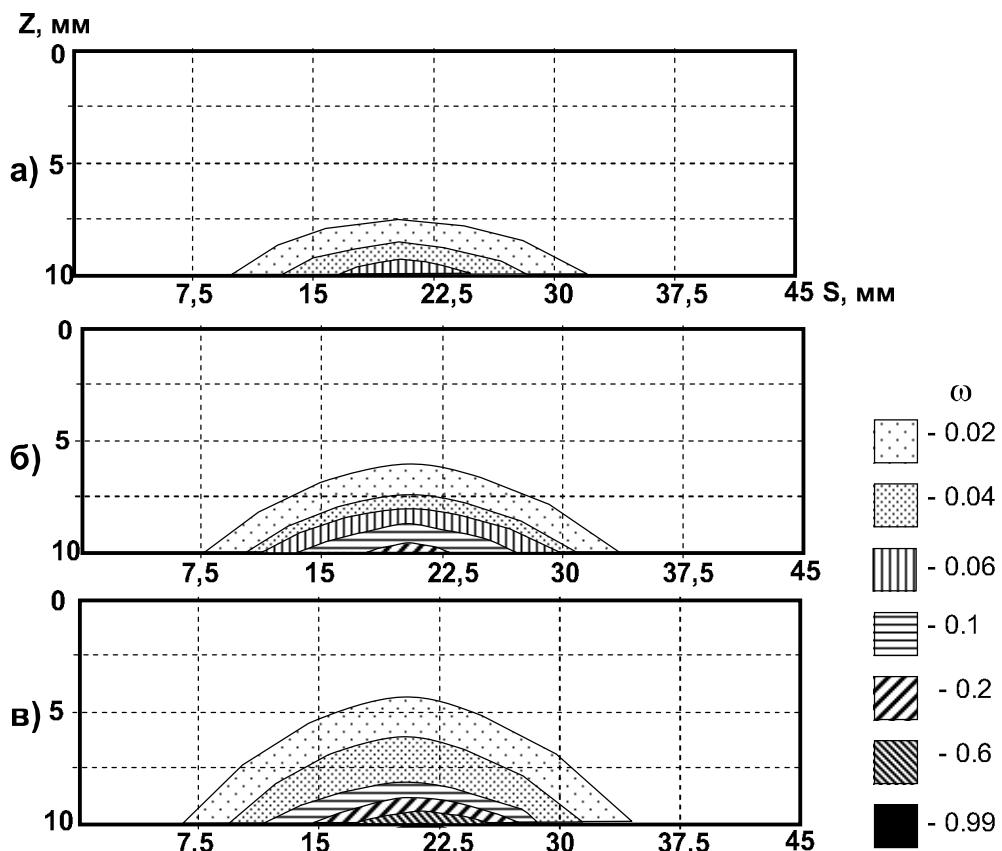


Рис. 5.

Выводы:

Авторами разработана методика, позволяющая исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно – деформированного состояния однослойных и многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, а

также оценивать их несущую способность и долговечность. В качестве примера проведено численное моделирование и исследовано влияние эффектов ползучести и водородной коррозии на напряженно – деформированное состояние конструкции в виде кольцевой пластины с отверстием. Определено время до разрушения этой конструкции в различных условиях нагруз-

жения. Показано, что при определенных условиях расчет конструкций на прочность и долговечность без учета воздействия водорода может привести к получению неверного результата.

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

- расчет конструкций более сложной формы;
- учет неоднородности распределения температурного поля по объему конструкций и его влияние на скорость обезуглероживания;
- учет влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно – деформированное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Авто-

реферат дисс. канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.

2. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автотефераат 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 // MECHANIKA, 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. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.

THE STRESSED – STRAINED STATE OF MULTILAYERED SHELLS WITH ALLOWANCE FOR DAMAGEABILITY OF MATERIALS AT CREEP AND HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN CORROSION UNDER NON-STATIONARY LOADING CONDITIONS

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

*Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University,
Kamyshin, Russia*

This work offers system approach on the basis of generalized model and describes research methods of complex problem solution stressed – strained state of multilayered shells with allowance for damageability of materials at creep and high-temperature hydrogen corrosion under non-stationary loading conditions.