УДК 539.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СОСТАВНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Белов А.В., Поливанов А.А., Неумоина Н.Г.

Камышинский технологический институт (филиал) ГОУ «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, e-mail: polivanov@kti.ru

В данной работе предложена методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности многослойных оболочек вращения с учетом процессов пластических деформаций, температурной ползучести, водородной коррозии и деградации свойств материалов во времени. Решена практическая задача по расчету напряженно-деформированного состояния составной двухслойной конической оболочки. Внутренний слой изготовлен из хром-никелевого сплава и обращен к водородосодержащей среде, внешний слой изготовлен из малоуглеродистой стали. Оболочка находилась при температуре 500 °С. Толщина защитного слоя изменялась от 0 до 25 мм, а давление – от 2 до 3 МПа. Определены компоненты напряженно-деформированного состояния и время до разрушения оболочки. В статье приведены рекомендации по выбору оптимальной толщины защитного слоя оболочки.

Ключевые слова: многослойные стальные пластины, высокотемпературная водородная коррозия, высокотемпературная ползучесть

HIGH PARAMETER HYDROGEN AFFECTS ON THE LONG-TERM STRENGTH OF THE MULTI-LAYER COMPOSITE SHELLS UNDER THE TEMPERATURE CREEP

Belov A.V., Polivanov A.A., Neumoina N.G.

Reader of Kamyshin Tecnological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: polivanov@kti.ru

This work discribes research methods of complex problem solution to estimate strength and durability of multiple layer shells of rotation with an account of plastic deformations, temperature creep, the hydrogen corrosion and degradation of material's properties in time. The practical calculation of the stressed – strained state accounts of the two-layer composite conical shell is resolved. An internal layer is made of chrome – nickel alloy, which is directed to the hydrogen-containing medium, an external layer is made of low – carbon steel. The shell was under the temperature at 500 °C. The protective layer thickness was varied from 0 to 25 mm, and the pressure was varied from 2 to 3 MPa. The components of stressed – strained state accounts and the time to failure of the shell of rotation were carried out. The article provides guidance for the selection of the protective layer's optimum thickness of the shell.

Keywords: multilayer steel plates, high temperature corrosion, high temperature creep

В данной работе изложена разработанная авторами методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии [1, 2, 4, 5]. Эта задача решалась в термовязкоупругопластической постановке, с применением соотношений теории неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны, линеаризованных методом дополнительных деформаций. Учет влияния повреждаемости материалов вследствие ползучести на процесс ее деформирования осуществляется путем введения параметра повреждаемости в соотношения термовязкопластичности, для определения которого используется хорошо зарекомендовавшее себя кинетическое уравнение повреждаемости в форме, предложенной Ю.Н. Работновым.

Коррозионное воздействие водорода на стали в настоящее время изучено достаточно хорошо, и на эту тему имеется множество публикаций, в которых показано, что влияние водорода существенным образом сказывается на изменении вида диаграммы деформирования углеродистых сталей, при этом снижаются прочностные и пластические свойства сталей и происходит их охрупчивание, ухудшаются длительные прочностные характеристики сталей. Вместе с тем возможность комплексного учета повреждаемости материалов вследствие температурной ползучести и водородной коррозии почти нигде не рассмотрена. Таким образом, основной и наиболее сложной задачей исследования является определение условий перехода механических характеристик сталей из исходного состояния в обезуглероженное. Для этого используются несколько подходов, подробно изложенных авторами в публикации [3]. Рассмотрим некоторые из них.

Обобщенная модель химического взаимодействия

Предполагается, что влияние водорода, контактирующего с материалом конструкций, проявляется по истечении определенного времени, называемого инкубационным периодом $t_{инк}$. После завершения инкубационного периода начинается интенсивное обезуглероживание материала конструкции, сопровождающееся ухудшением его механических свойств. При этом механические свойства материалов могут существенно изменяться. Этот период называется периодом активных химических превращений $t_{кр}$. По завершении указанного периода дальнейших изменений механических свойств сталей под воздействием водорода не происходит.

Влияние водорода на свойства материала в данной модели 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 [3]:

$$\frac{d\mu}{dt} = k \cdot \mu\left(1-\mu\right) \qquad (1)$$

с условиями:

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

$$t = t_{инк}, \quad \mu = \mu_п(p, T, \omega_C); \qquad (2)$$

$$t = t_{кр}, \quad \mu = \mu_{кр}(p, T, \omega_C).$$

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

Решение уравнения (1) имеет вид [3] (кривая 1 на рис. 1):

$$\mu\left(t\right) = \frac{1}{1+g_0 e^{-kt}}; \qquad (3)$$

$$g_0 = (1 - \mu_0)/\mu_0; \qquad (4)$$

$$k\left(p, T, \omega\right) = \frac{p^u}{m \cdot \left(1-\omega_C\right)^{\zeta}} \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \cdot \ln\frac{g_0}{g_п}; \qquad (5)$$

$$g_п = (1 - \mu_п)/\mu_п, \qquad (6)$$

где m, u, B, ζ – константы, экспериментально определяемые для различных марок стали. Значения μ_0, $\mu_п$ и $\mu_{кр}$ определяются по методике, изложенной в работе [3] и связаны с анализом кинетики выделения метана при взаимодействии водорода с углеродом, содержащимся в материале стенки.

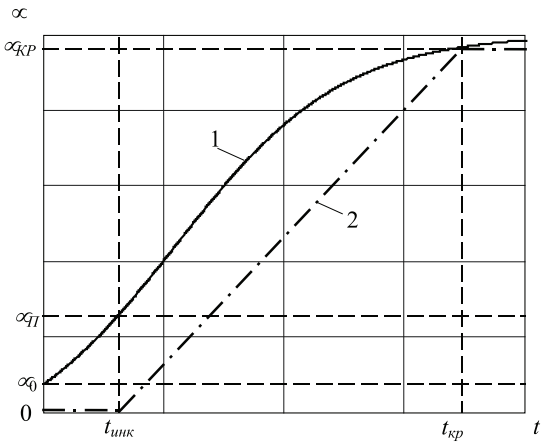


Рис. 1

При этом учет влияния уровня напряжений на длительность инкубационного периода и скорость высокотемпературной коррозии вводится зависимость коэффициента m от σ в виде

$$m = m_0 \exp\left(G \cdot \sigma_э^g\right);$$

$$\sigma_э = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{ср} > 0; \\ 0, & \text{при } \sigma_{ср} \le 0. \end{cases} \qquad (7)$$

Здесь: m_0, G, g – константы материала; $\sigma_э$ – эквивалентное напряжение; σ_i – интенсивность нормальных напряжений, $\sigma_{ср}$ – среднее напряжение.

Распределение давления по толщине оболочки вычисляется [3]:

для плоской стенки:

$$P_Z = \left(\sqrt{P_В} \cdot \left(1-\frac{z}{h}\right) + \sqrt{P_Н} \cdot \frac{z}{h}\right)^2; \qquad (8)$$

для оболочки:

$$P_ρ = \left(\sqrt{P_В} + \left(\sqrt{P_Н} - \sqrt{P_В}\right) \cdot \frac{\ln\left(ρ/r_В\right)}{\ln\left(r_Н/r_В\right)}\right)^2, \qquad (9)$$

где z – плоская координата; ρ – сферическая координата; h – толщина оболочки; $r_В$ – внутренний радиус оболочки; $r_Н$ – наружный радиус оболочки; $P_В$ – внутреннее давление; $P_Н$ – наружное давление.

Упрощенная модель химического взаимодействия

Так как $t < t_{инк}$ изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при $t > t_{кр}$ уже не происходит [3], то ло-

гистическую кривую Ферхюльста можно аппроксимировать трехзвенной линией (на рис. 1 линия 2) и конкретизировать в виде

$$\mu(t) = \alpha\, t + \mu_{\text{п}}, \qquad (10)$$

где

$$\alpha = \frac{\mu_{\text{кр}} - \mu_{\text{п}}}{t_{\text{кр}} - t_{\text{инк}}} = \frac{\mu_{\text{кр}} - \mu_{\text{п}}}{t_{\text{инк}}\left(1-\lambda\right)}; \qquad (11)$$

$$\mu_{\text{п}} \le \mu(t) \le \mu_{\text{кр}}. \qquad (12)$$

Длительность инкубационного периода, как показано в работе [3], определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{\text{инк}} = m\, p^{-u} \cdot \exp(B/T), \qquad (13)$$

где p – парциальное давление водорода, МПа; T – температура; m, u, B – некоторые константы, экспериментально определяемые для различных марок стали.

Длительность периода активных химических превращений определяем следующим образом [3]:

$$t_{\text{кр}} = \lambda\, t_{\text{инк}}, \qquad (14)$$

где λ – параметр, являющийся мерой скорости химического взаимодействия водорода с конструкцией, показывающий, во сколько раз время до завершения периода изменений механических свойств материала отличается от продолжительности инкубационного периода, т.е. $\lambda = t_{\text{кр}}/t_{\text{инк}}$. Для стали 20 этот параметр принимает значения в пределах от 5 до 10 [3].

В том случае, если известно, что процесс обезуглероживания конструкции значительно короче времени до начала разрушения, можно использовать еще более простые модели воздействия водородосодержащей среды. В частности, замену логистической кривой, описывающей плавное изменение механических характеристик, на ступенчатое их изменение от начального до конечного состояния, по прошествии либо инкубационного периода, либо периода активных химических превращений.

На рис. 2 схематически показан примерный характер изменения временного сопротивления стали 20 вследствие воздействия водорода. Здесь $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{*}$ – соответственно значения временного сопротивления материала в исходном и обезуглероженном состоянии. Другие механические характеристики материала (E, $\sigma_{\text{т}}$, δ, ψ) изменяются в процессе обезуглероживания аналогичным образом [3].

При использовании варианта 1 считается, что механические характеристики ступенчато изменяются по истечении периода времени, соответствующего $t_{\text{кр}}$, а в варианте 2 это изменение происходит сразу же после завершения инкубационного периода, то есть при $t_{\text{кр}} = t_{\text{инк}}$. При этом вариант 1 дает завышенную оценку времени обезуглероживания, а вариант 2 – заниженную. Кроме того, в варианте 2 не требуется нахождение параметра λ.

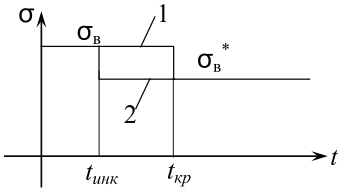


Рис. 2

Учет влияния напряжений на скорость коррозии и распределение давлений осуществляется так же, как и в обобщенной модели.

На основе упрощенной модели химического взаимодействия построена также модель оценки кинетики движения фронта обезуглероживания, целью разработки которой была возможность использования при аналитических расчетах, однако она может использоваться только для некоторых несложных моделей пластин и неспособна учитывать нестационарный характер изменения тепловых, силовых нагрузок и давления водорода, а также влияние уровня напряжений на скорость движения фронта обезуглероживания.

В действительности моделей воздействия водородосодержащей среды значительно больше, наиболее распространенные из них подробно рассмотрены в работе [3]. Здесь же приведены только те модели, которые могут использоваться в составе разработанного авторами программного комплекса по расчету напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций [1, 2, 4, 5].

Технически учет влияния водорода на прочностные свойства конструкции реализован следующим образом. Для каждого из материалов конструкции введены механические характеристики двух его состояний – исходного и обезуглероженного. Если процесс обезуглероживания отсутствует (инкубационный период не завершен), то для расчета параметров напряженно-деформированного состояния берутся исходные механические характеристики материала. Если в материале уже происходит процесс обезуглероживания, но он еще полностью не завершен, то значения механических характеристик материала на этой стадии расчета, вычисляются путем линейной интерполяции в зависимости от текущего значения $\mu(t)$ между исходным и обезуглероженным состояниями. Если процесс обезуглероживания завершен, то для расчета берутся характеристики обезуглероженного материала.

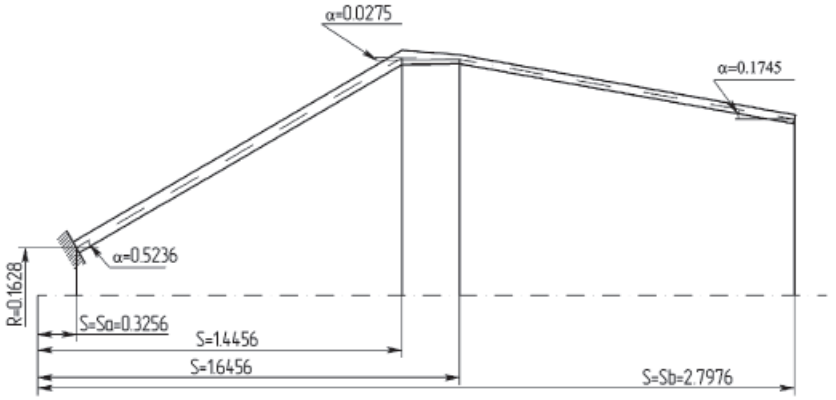


Рис. 3

С применением данной методики были проведены расчеты составной двухслойной конической оболочки, осевое сечение которой приведено на рис. 3. Исследуемая конструкция состоит из трех участков. По форме меридиана координатной поверхности все три участка оболочки являются коническими. Левый торец оболочки жестко заделан, правый свободен. Толщина первого участка 40 мм (конусность 30°), третьего – 30 мм (конусность 10°). Второй участок является переходным (конусность 1,575°). Давление водорода осуществляется с внутренней стороны и постоянно во времени.

Внутренний слой, обращенный к водородосодержащей среде, изготовлен из материала 12Х18Н9Т, а внешний – из материала сталь 20.

Давление водорода принималось равным 2, 2,5 и 3 МПа. Выбор значений обусловлен следующими соображениями: при 2 МПа в материале имеют место только мгновенные упругие деформации и деформации ползучести, а при 2,5 и 3 МПа – еще и мгновенные пластические. Все расчеты приведены для температуры 500 °С.

Константы материала в соотношениях были взяты из [3], которые для стали 20 при данных условиях нагружения принимают следующие значения: $k = 1{,}49 \cdot 10^{-5}$ (МПа)$\cdot u$, ч; $u = 1{,}73$; $B = 13500$; $\lambda = 1 \ldots 10$. Согласно данным, приведенным в работе [3], механические сплавы 12Х18Н9Т под воздействием водорода практически не изменяются.

Влияние уровня напряжений на скорость процесса обезуглероживания в данном расчете не учитывалось, поскольку для этого требуются дополнительные исследования.

В работе исследовалось влияние толщины защитного слоя 12Х18Н9Т на длительную прочность оболочки, а также распределение, меридиональных напряжений, деформаций зон пластичности и повреждаемости в моменты времени до разрушения, перед разрушением и непосредственно после него. Некоторые результаты приведены на рис. 4–6.

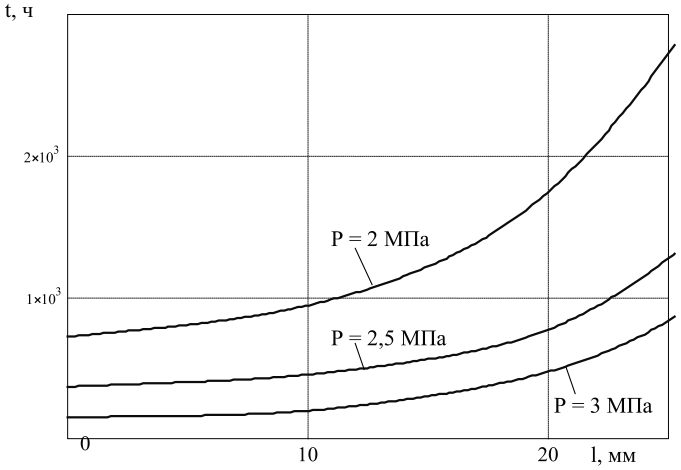
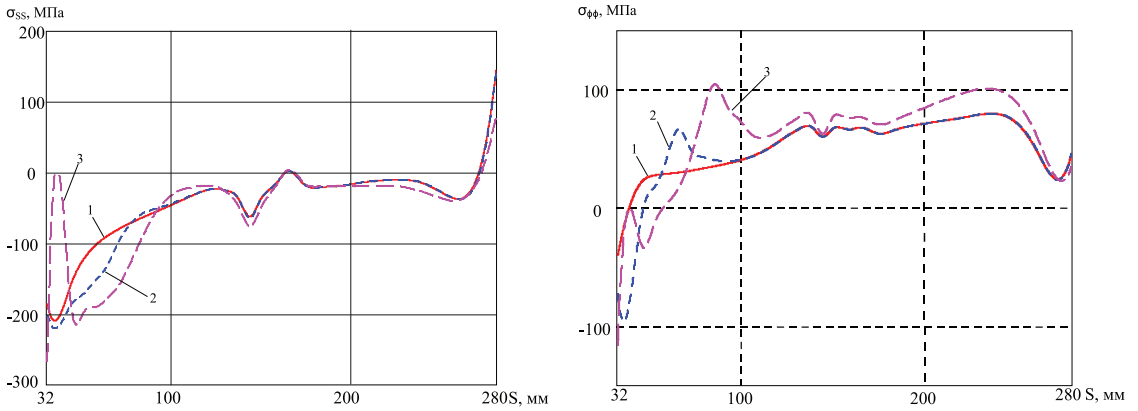
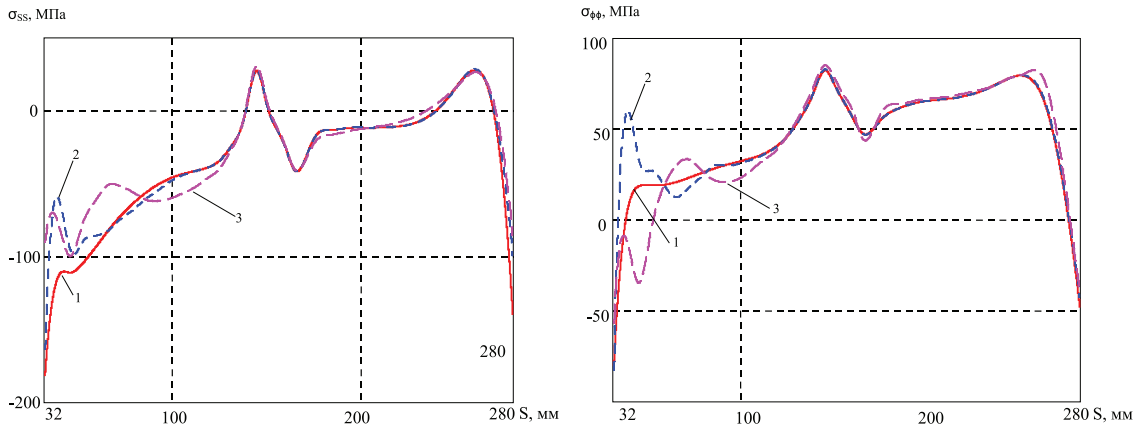


Рис. 4



а б

Рис. 5



а б

Рис. 6

На рис. 4 приведены графики, показывающие время до разрушения оболочки в зависимости от толщины защитного слоя при разных давлениях. Введение защитного слоя существенно увеличивает время до разрушения оболочки. Набор таких графиков, полученных при разных давлениях и температурах, позволяет подобрать требуемую толщину защитного слоя при заданном ресурсе изделия.

На рис. 5 приведены кривые, показывающие распределение меридиональных (а) и окружных (б) напряжений на внутренней поверхности, а на рис. 6 – на внешней поверхности для толщины защитного слоя 5 мм и давления 2,5 МПа. Кривая 1 соответствует началу процесса нагружения, кривая 2 – моменту времени $t = 379$ ч (непосредственно перед разрушением), кривая 3 – моменту времени $t = 380$ ч (сразу после начала разрушения). На этих графиках видно перераспределение напряжений по мере развития пластических деформаций и накопления повреждений от наружного слоя к более прочному внутреннему. Однако по мере накопления повреждений во внутреннем слое происходит вторичное перераспределение напряжений уже к наружному слою. При этом наиболее нагруженными точками оболочки являются точки внутренней поверхности. Начало процесса разрушения происходит в точке внутренней поверхности с меридиональной координатой $S = 0{,}457$ м.

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.

Список литературы

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.

2. Белов А.В., Поливанов А.А., Попов А.Г. Расчет пластин и оболочек с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 61–68.

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

4. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 19 с.

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

References

1. Belov A.V. Osesimmetrichnoe uprugoplasticheskoe naprjazhenno deformirovannoe sostojanie obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdaemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk. Kiev, 1989. 18 pp.

2. Belov A.V., Polivanov A.A., Popov A.G. Raschet plastin i obolochek s uchetom povrezhdaemosti materialov pri polzuchesti i vysokotemperaturnoj vodorodnoj korrozii // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2009. no. 5. pp. 61–68.

3. Ovchinnikov I.G., Hvalko T.A. Rabotosposobnost konstrukcij v uslovijah vysokotemperaturnoj vodorodnoj korrozii: Saratov, 2003. 176 p.

4. Polivanov A.A. Osesimmetrichnoe uprugoplasticheskoe deformirovanie mnogoslojnyh obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdaemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk. Volgograd, 2004. 19 p.

5. Bagmutov V, BelovA., Polivanov A. Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo Viscous Elasto Plastic Strain // MECHANIKA, 2004, no. 3(47) pp. 19 23.

Рецензенты:

Богомолов А.Н., д.т.н., профессор, проректор по научной работе, ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», г. Волгоград;

Богданов Е.П., д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет», г. Волгоград.