

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СОСТАВНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Белов А.В.¹, Поливанов А.А.¹, Неумоина Н.Г.¹

¹ Камышинский технологический институт (филиал) Государственного образовательного учреждения «Волгоградский государственный технический университет», г. Камышин, Россия (403874, г. Камышин, ул. Ленина, 6А) 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 толщиной 5 мм изготовлен из хромоникелевого сплава и обращен к водородосодержащей среде, внешний слой толщиной 35 мм изготовлен из малоуглеродистой стали. Оболочка находилась под давлением 2,5 МПа при температуре 500°C. Определены компоненты напряженно-деформированного состояния и время до разрушения оболочки.

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

RESEARCH OF THE HYDROGEN EFFECTS ON THE BEARING CAPACITY OF MULTI-LAYER COMPOSITE SHELLS IN THE TEMPERATURE CREEP

Belov A.V.¹, Polivanov A.A.¹, Neumoina N.G.¹

¹ Reader of Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia (403874, Kamyshin, Lenina Street, 6A) polivanov@kti.ru

This work describes 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 5 mm chrome – nickel alloy, which is directed to the hydrogen-containing medium, an external layer is made of 35 mm low - carbon steel. The shell was under pressure at 2.5 MPa and the temperature was 500 C. The components of stressed – strained state accounts and the time to failure of the shell of rotation were carried out.

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, 5, 7]. Эта задача решалась в термовязкоупругопластической постановке с применением соотношений теории неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны, линеаризованным методом дополнительных деформаций. Учет влияния повреждаемости материалов вследствие ползучести на процесс ее деформирования осуществляется путем введения параметра повреждаемости в соотношение 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, 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 используется несколько подходов, подробно изложенных авторами в публикации [4]. 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 [4]:

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

с условиями:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad \mu &= \mu_0(p, T, \omega_c); \\ t = t_{инк}, \quad \mu &= \mu_{п}(p, T, \omega_c); \\ t = t_{кр}, \quad \mu &= \mu_{кр}(p, T, \omega_c). \end{aligned} \quad (2)$$

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 логистической кривой Ферхюльста [4] (кривая 1 на рис. 1):

$$\mu(t) = \frac{1}{1 + g_0 e^{-kt}}, \quad (3)$$

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

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

$$g_{\Pi} = (1 - \mu_{\Pi}) / \mu_{\Pi}, \quad (6)$$

где m , u , B , ζ – константы, экспериментально определяемые для различных марок стали. Значения μ_0 , μ_{Π} и μ_{KR} определяются по методике, изложенной в работе [4], и связаны с анализом кинетики выделения метана при взаимодействии водорода с углеродом, содержащемся в материале стенки.

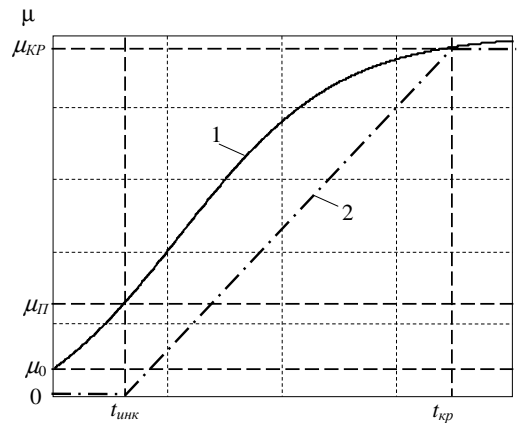


Рис. 1

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

$$m = m_0 \exp(G \cdot \sigma_{\text{Э}}^g); \quad \sigma_{\text{Э}} = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{cp} > 0 \\ 0, & \text{при } \sigma_{cp} \leq 0 \end{cases}. \quad (7)$$

Здесь: m_0 , G , g – константы материала; $\sigma_{\text{Э}}$ – эквивалентное напряжение, σ_i – интенсивность нормальных напряжений, σ_{cp} – среднее напряжение.

Распределение давления по толщине оболочки вычисляется [4]:

для плоской стенки:

$$P_z = \left(\sqrt{P_B} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \sqrt{P_H} \cdot \frac{z}{h} \right)^2, \quad (8)$$

для оболочки:

$$P_{\rho} = \left(\sqrt{P_B} + (\sqrt{P_H} - \sqrt{P_B}) \cdot \frac{\ln(\rho/r_B)}{\ln(r_H/r_B)} \right)^2, \quad (9)$$

где: z – плоская координата; ρ – сферическая координата; h – толщина оболочки; r_B – внутренний радиус оболочки; r_H – наружный радиус оболочки; P_B – внутреннее давление; P_H – наружное давление.

Упрощенная модель химического взаимодействия

Установлено, что при $t < t_{инк}$ изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при $t > t_{кр}$ уже не происходит [4]. В этом случае логистическую кривую Ферхюльста можно аппроксимировать трехзвенной линией (на рис. 1 линия 2), и влияние водорода на свойства материала будет описываться в виде кусочно-линейного закона для параметра химического взаимодействия водорода μ , изменяющегося от 0 до 1 и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{инк}; \\ (t - t_{инк}) / (t_{кр} - t_{инк}), & \text{при } t_{кр} < t < t_{инк}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_{кр}; \end{cases} \quad (10)$$

Длительность инкубационного периода, как показано в работе [4], определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{инк} = m p^{-u} \exp(B/T), \quad (11)$$

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 [4]:

$$t_{кр} = \lambda t_{инк}, \quad (12)$$

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. $\lambda = t_{кр}/t_{инк}$. Для стали 20 этот параметр принимает значения в пределах от 5 до 10 [4].

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.

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 [4]. Здесь же приведены только те модели, которые могут использоваться в составе разработанного авторами программного комплекса по расчету напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций [1, 2, 5, 7].

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.

В частности, с применением данной методики были проведены расчеты составной двухслойной конической оболочки, осевое сечение которой приведено на рисунке 2. 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 12X18H9T, а внешний — из материала сталь 20. Давление водорода принималось равным 2,5 МПа. При этом в материале оболочки возникают как упругие деформации и деформации ползучести, так и мгновенные пластические. Расчеты приведены для температуры 500°С. Константы материала в соотношениях были взяты из [4], которые для стали 20 при данных условиях нагружения принимают следующие значения: $k = 1,49 \cdot 10^{-5}$ (МПа)* μ , ч; $\nu = 1,73$; $B = 13500$; $\lambda = 1-10$. Согласно данным, приведенным в работе [4], механически сплав 12X18H9T под воздействием водорода практически не изменяется.

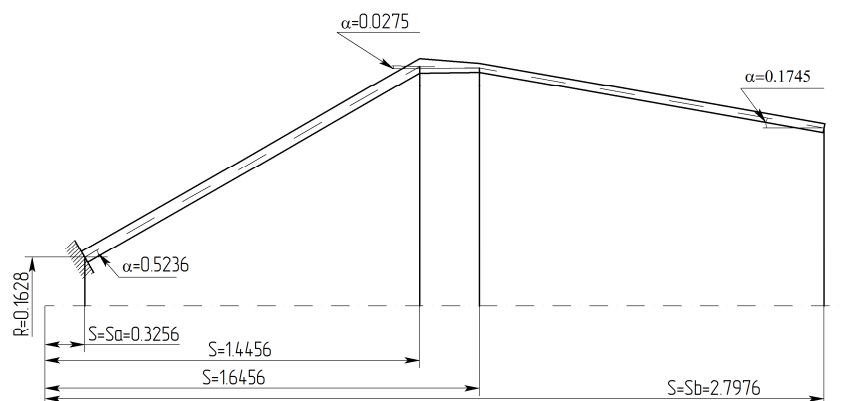


Рис. 2

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

В работе исследовалось влияние защитного слоя 12X18H9T фиксированной толщины 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 рисунках 3–6.

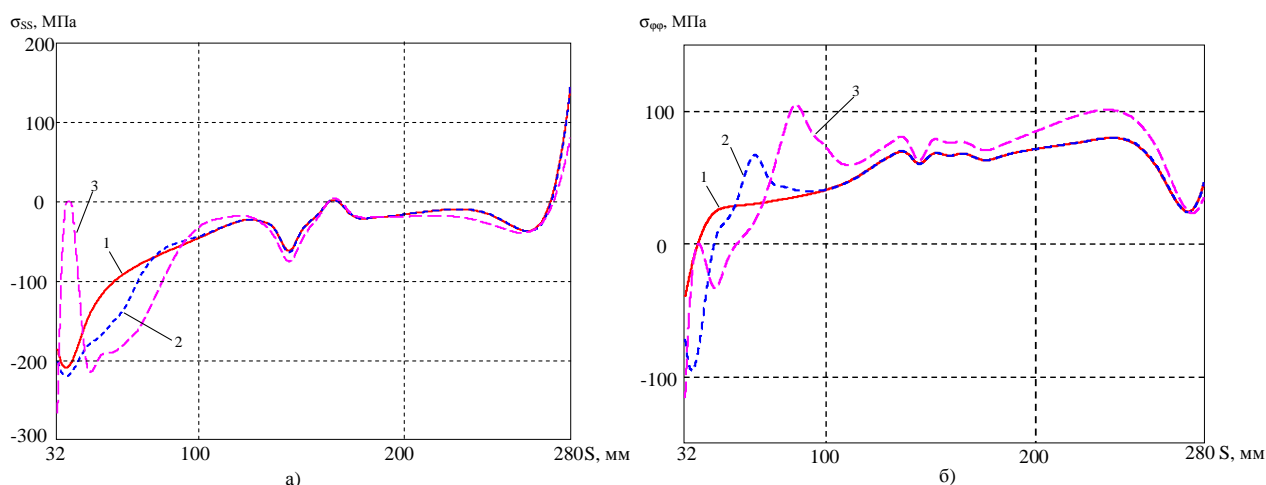


Рис. 3

На рисунке 3 приведены кривые, показывающие распределение меридиональных (а) и окружных (б) напряжений на внутренней поверхности. Кривая 1 соответствует началу процесса нагружения (упругое решение), кривая 2 – моменту времени $t = 1$ ч (упругопластическое решение), 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. При этом наиболее нагруженными точками оболочки являются точки внутренней поверхности.

На рисунке 4 показан фрагмент осевого сечения оболочки для начала нагружения (а) и непосредственно перед разрушением (б), в котором наиболее интенсивно происходит

накопление повреждений. В начале процесса нагружения на внутреннем слое появляется зона пластичности, размеры которой постепенно увеличиваются, и к моменту разрушения она составляет порядка 80% осевого сечения оболочки. Кроме того, во втором участке начиная с момента времени 260 ч также появляется небольшая зона пластичности. В третьем участке оболочки к моменту начала разрушения зоны пластичности не были выявлены. Начало процесса разрушения происходит в точке внутренней поверхности с меридиональной координатой $S = 0,457$ м (на рис. 4 место начала разрушения обозначено стрелкой).

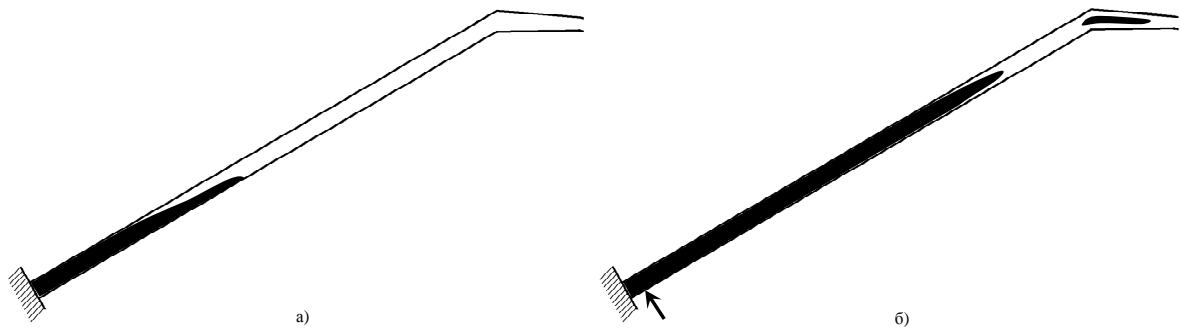


Рис. 4

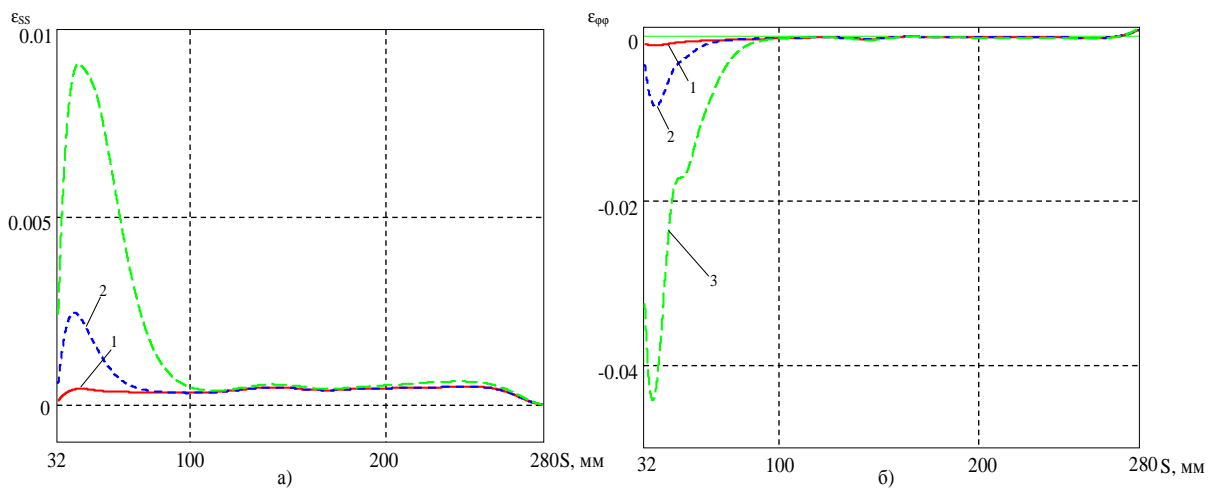


Рис. 5

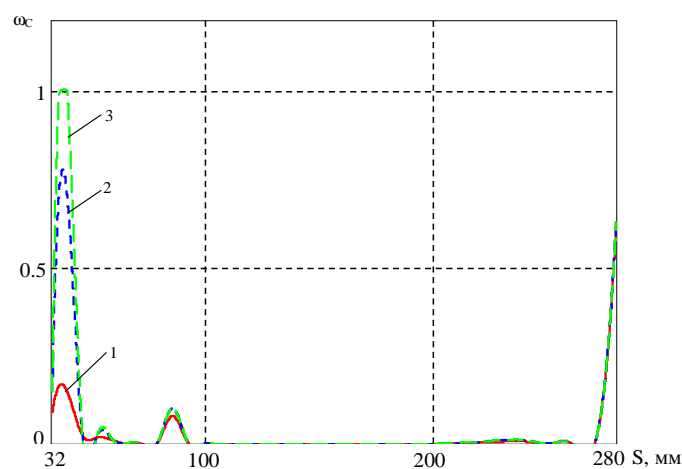


Рис. 6

На рисунке 5 показано распределение меридиональных (а) и окружных (б) деформаций во внутреннем слое оболочки, а на рисунке 6 – степень поврежденности материала внутреннего слоя. Видно, что наибольшие значения полных деформаций развиваются в точках внутренней поверхности, близких к координате $S = 0,457$ м, где также накапливаются самые большие повреждения и впоследствии возникает разрушение.

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: Автореферат дисс. 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. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. – 311 с.
4. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии: Саратов, 2003. 176 с.
5. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс. канд. техн. наук. — Волгоград, 2004. — 19 с.
6. Шевченко Ю.Н., Мазур В.Н. Решение плоских и осесимметричных краевых задач термовязкопластичности с учетом повреждаемости материала при ползучести // Прикл. механика. – 1986. – № 8. – С. 3–14.
7. 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.

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.