

УДК 539.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

Белов А.В., Поливанов А.А.

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. Задача решается в квазистатической и геометрически линейной постановке на основе соотношений теории упругопластического деформирования элементов твердого тела по траекториям малой кривизны. Выполнен практический расчет напряженно-деформированного состояния плоской пластины. Задача решалась с учетом влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания. Пластина находилась под давлением 2,5 МПа при температуре 500°C. Толщина пластины равнялась 10 мм. Определены компоненты напряженно-деформированного состояния и время до разрушения оболочки. В статье показано, что в случае неучета влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания возможно получение неверного результата.

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

RESEARCH OF THE STATE OF STRESSED – STRAINED STATE KIND ON THE LONG-TERM STRENGTH OF FLAT PLATES UNDER CONDITIONS OF TEMPERATURE CREEP AND HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN CORROSION

Belov A.V., Polivanov A.A.

*Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University,
Kamyshin, e-mail: 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 problem of shell calculation is solved in quasistatic and geometrically linear statement on the relations basis of the theory of elasto – plastic deformation of rigid body elements on trajectories of a slight curvature. The practical calculation of the stressed – strained state accounts of the a flat plate is resolved. The problem was solved with the influence of the stressed state at the rate of decarbonization. The plate was under pressure at 6 MPa and the temperature was 500°C. The plate thickness was 10 mm. The components of stressed – strained state accounts and the time to failure of the shell of rotation were carried out. The article shows that in the case of neglect of the influence of the stressed state in the decarbonization rate the incorrect results may be receive.

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

В данной работе с использованием методики решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, разработанной авторами и изложенной в работах [2, 3, 6, 8], проведен расчет времени до разрушения плоской пластины с учетом всех вышеизложенных факторов, а также вида напряженного состояния и его влияния на скорость процесса деградации механических свойств материала пластины. Учет влияния повреждаемости материалов вследствие ползучести на процесс ее деформирования осуществляется путем введения скалярного параметра поврежда-

емости в соотношения термовязкопластичности, для определения которого используется хорошо зарекомендовавшее себя кинетическое уравнение повреждаемости в форме, предложенной Ю.Н. Работновым. Для учета коррозионного воздействия водорода используется несколько подходов, подробно изложенных авторами в монографии [5]. Для решения данной задачи будем использовать упрощенную модель химического взаимодействия.

В рамках этой модели предполагается, что влияние водорода на механические свойства малоуглеродистых сталей проявляется по истечении определенного времени, называемого инкубационным периодом $t_{инк}$. После его завершения 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 $t_{кр}$. Многочисленными исследованиями подтверждено, что при $t < t_{инк}$ изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при $t > t_{кр}$ уже не происходит [5], то есть процесс активных химических превращений идет определенное время, причем это время зависит от давления водорода, температуры, вида напряженного состояния и поврежденности материала. Установлено также, что изменение механических свойств малоуглеродистых сталей в процессе обезуглероживания начинается и заканчивается при определенных условиях, не зависящих от давления водорода и температуры. Повышение давления и температуры приводит только к тому, что эти условия наступают раньше, а конечное состояние механических свойств материала во всех случаях одинаково [5]. С учетом указанных допущений расчет коррозионного воздействия водорода значительно упрощается.

Таким образом, 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:

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

Длительность инкубационного периода, как показано в работе [5], определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{инк} = mp^{-u} \exp(B/T), \quad (2)$$

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 [1,5]:

$$t_{кр} = \lambda t_{инк}, \quad (3)$$

где λ – параметр, являющийся мерой скорости химического взаимодействия водорода с конструкцией, показывающий, во сколько раз время до завершения периода изменений механических свойств материала отли-

чается от продолжительности инкубационного периода, т.е. $\lambda = t_{кр}/t_{инк}$.

Распределение давления водорода по толщине для случая плоской пластины вычисляется по формуле [5]:

$$P_z = \left(\sqrt{P_B} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \sqrt{P_H} \cdot \frac{z}{h} \right)^2, \quad (4)$$

где z – плоская координата; h – толщина оболочки; P_B – внутреннее давление; P_H – наружное давление.

Результаты многочисленных исследований показывают, что процесс обезуглероживания в области упругих деформаций идет практически с той же скоростью, что и в недеформированных образцах, однако при переходе в область пластических деформаций скорость этого процесса резко возрастает [1, 5]. Это объясняется тем, что водород обычно сегментируется в тех областях конструкции, в которых преобладают большие растягивающие напряжения, вследствие которых образуются многочисленные микропоры и микродефекты. Вместе с тем преобладание сжимающих напряжений в конструкции приводит к уменьшению размеров микродефектов в материале, что должно способствовать уменьшению степени влияния водородной коррозии на длительную прочность конструкции в целом, то есть в нашем случае – увеличению времени инкубационного периода, на что обращали внимание многие исследователи. Однако распределение напряжений в данном случае носит весьма сложный характер, и нельзя однозначно определить, на какую количественную величину сократится площадь микродефектов в материале. Поэтому будем считать, что преобладание сжимающих напряжений не будет влиять на время инкубационного периода.

Таким образом, для учета влияния уровня напряжений на длительность инкубационного периода и скорость высокотемпературной коррозии будем использовать зависимость коэффициента m в уравнении (2) от σ в виде [1,5]:

$$m = m_0 \exp(G \cdot \sigma_3^g);$$

$$\sigma_3 = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{ср} > 0; \\ 0, & \text{при } \sigma_{ср} \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь m_0, G, g – константы материала; σ_3 – эквивалентное напряжение, σ_i – интенсивность нормальных напряжений, $\sigma_{ср}$ – среднее напряжение. В данном случае предполагается, что если в элементе оболочки преобладают растягивающие напряжения, то значение коэффициента m , входящего

в соотношении (2) для времени инкубационного периода, уменьшается. Это должно способствовать сокращению времени инкубационного периода.

В соответствии с результатами исследований, приведенных в работе [1] и с учетом рекомендаций, приведенных в работе [5], влияние вида напряженного состояния на скорость водородной коррозии малоуглеродистых сталей можно учесть следующим образом: при достижении растягивающих напряжений предела текучести время инкубационного периода сокращается примерно в 1,25 раз, а при достижении предела прочности – примерно вдвое. Тогда константы материала в уравнении (5) будут равны: $m_0 = 1,49 \cdot 10^{-5}$ (МПа) \cdot ч; $G = 4,5 \cdot 10^{-4}$; $g = 1,2$.

График зависимости отношения m_0/m (которое показывает, во сколько раз сократится время инкубационного периода) от величины эквивалентного напряжения, полученного таким образом для стали 20, приведен на рис. 1.

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 пара-

метров 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 качестве примера в данной работе была использована равномерно нагретая кольцевая пластина, находящаяся под воздействием давления водорода. Пластина имеет следующие геометрические размеры: $R = 110$ мм, $r = 65$ мм, $\delta = 10$ мм (рис. 2) и изготовлена из материала сталь 20.

Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины и постоянно во времени, при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно-неподвижное опирание. Давление водорода в данной задаче принималось равным 5 МПа. Константы материала в соотношениях (2) и (3) были взяты из [5], которые для стали 20 при данных условиях нагружения принимают следующие значения: $u = 1,73$; $B = 13500$; $\lambda = 5$.

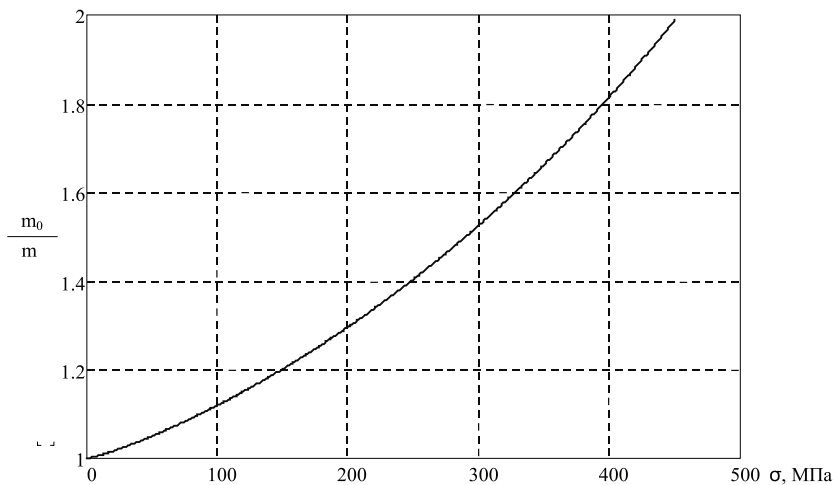


Рис. 1

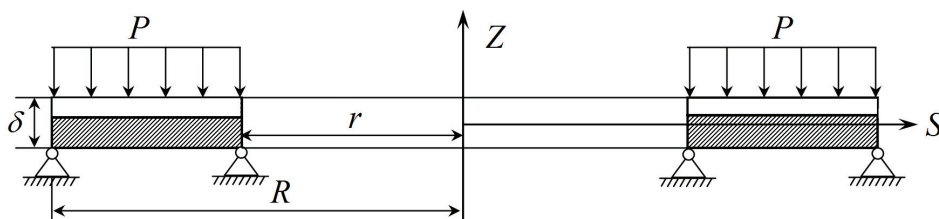


Рис. 2

В предыдущих работах авторов публикации проводились расчеты напряженно-деформированного состояния данной пластины с учетом температурной ползучести и водородной коррозии, но без учета влияния вида напряженного состояния на скорость процесса обезуглероживания. В отличие от этого, проведем расчет пластины с учетом данного параметра.

Для оценки влияния вида напряженного состояния на длительность инкубационного периода и время до начала разрушения конструкции в целом были проведены расчеты пластины с учетом и без учета вида уровня напряжений. В результате получились следующие значения времени до начала разрушения пластины: с учетом вида напряженного состояния – 930 часов, без учета – 1205 часов, то есть неучет влияния вида напряженного состояния на скорость процесса обезуглероживания в данном случае приводит к завышению расчетного времени до разрушения пластины почти на 30%. В случае, если значения растягивающих напряжений будут выше, эта величина, очевидно, увеличится.

На рис. 3 осевое сечение пластины, на котором в градациях серого показано положение фронта обезуглероживания (границы, разделяющей полностью обезуглероживанный и необезуглероживанный материалы) для различных моментов времени. В левой части рисунка показаны результаты, в которых не учитывалось влияние вида напряженного состояния (в этом случае фронт обезуглероживания движется параллельно поверхности пластины), в правой части это влияние учитывалось. Эти результаты показывают, что расчетное положение фронта обезуглероживания будет существенно зависеть от уровня

действующих растягивающих напряжений, и тем, особенно если они значительно выше предела текучести материала.

На рис. 4 приведены фрагменты осевого сечения пластины, на которых в градациях серого показано распределение зон повреждаемости в момент начала процесса разрушения. На левой части рисунка показаны результаты, в которых не учитывалось влияние вида напряженного состояния, на правой части – результаты, полученные с учетом влияния этого параметра. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что характер распределения зон повреждаемости при введении учета вида напряженного состояния выглядит почти также, как и в расчетах, где этот параметр не учитывался, изменяется только время до начала разрушения. Однако в многослойных оболочках сложной геометрической формы отличие в распределении зон повреждаемости при введении учета влияния вида напряженного состояния на процесс обезуглероживания может быть зафиксировано.

На рис. 5 приведены меридиональные (а) и окружные (б) напряжения на нижней поверхности пластины, полученные для момента времени 700 ч, а на рис. 6 – для момента времени 930 ч. Расчет 1 проведен без учета влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания, расчет 2 – с его учетом. Результат рис. 6 соответствует моменту времени, когда по результатам расчета 2 было зафиксировано разрушение. На этих рисунках можно увидеть существенное отличие в распределении напряжений по поверхности пластины, связанное с тем, что в расчете 2 процесс перераспределения напряжений и накопления повреждений в материале идет быстрее.

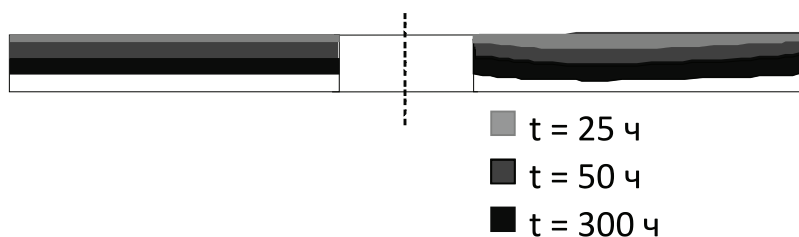


Рис. 3

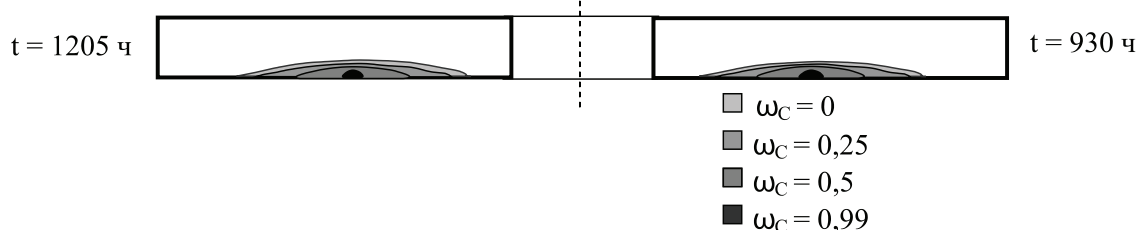


Рис. 4

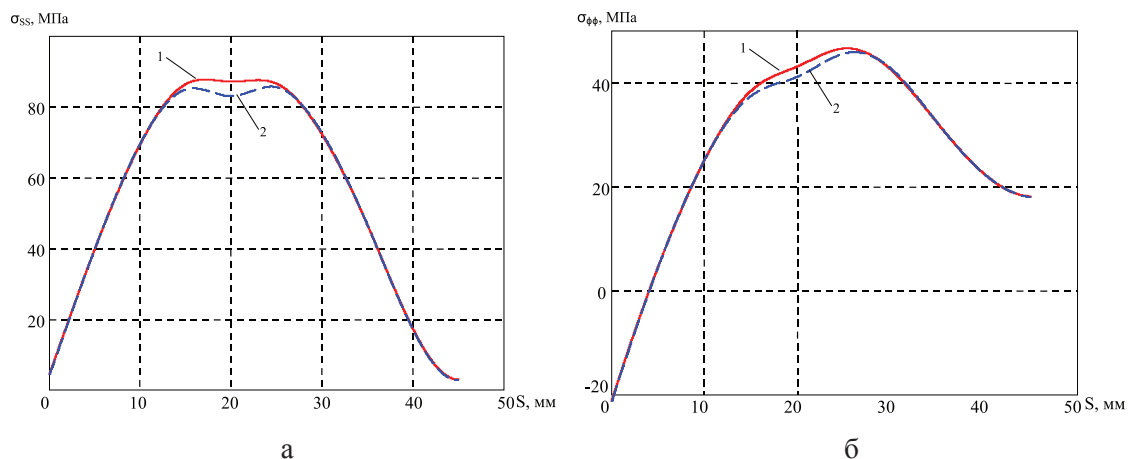


Рис. 5

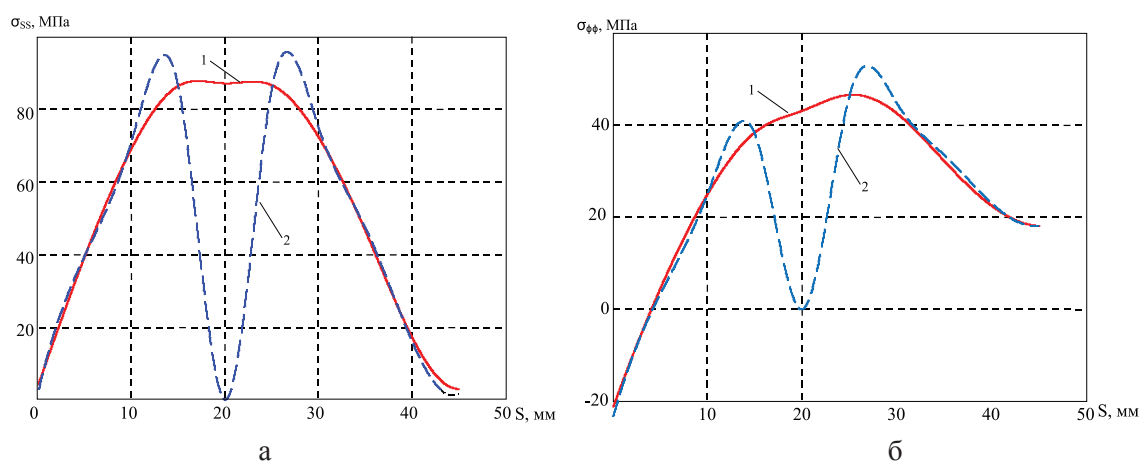


Рис. 6

Таким образом, изложенная в данной работе методика позволяет 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, водородной коррозии и вида напряженного состояния на напряженно-деформированное состояние конструкции в виде плоской кольцевой пластины с отверстием. Определено время до разрушения этой пластины. Показано, что при определенных условиях расчет конструкций на прочность и долговечность

без учета влияния вида напряженного состояния на длительную прочность конструкции в целом может привести к получению неверного результата.

Список литературы

1. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.
2. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.
3. 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.
4. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
5. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии. – Саратов, 2003. – 176 с.

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

7. 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.

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

References

1. Archakov Ju.I. Vodorodnaja korrozija stali. M.: Metallurgija, 1985. 192 p.

2. Belov A.V. Osесimmetrichnoe uprugoplasticheskoe naprjazhenno deformirovannoe sostojanie obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdajemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk. Kiev, 1989. 18 p.

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

4. Kachanov L.M. Osnovy mehaniki razrushenija. M.: Nauka, 1974. 311 p.

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

6. Polivanov A.A. Osесimmetrichnoe uprugoplasticheskoe deformirovanie mnogoslujnyh obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdajemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk. Volgograd, 2004. 19 p.

7. Shevchenko Ju.N., Mazur V.N. Reshenie ploskih i osесimmetrichnyh kraevyh zadach termovjazkoplastichnosti s uchetom povrezhdajemosti materiala pri polzuchesti // Prikl. mehanika. 1986. no. 8. pp. 3–14.

8. Bagmutov V., Belov A., Polivanov A. Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo Viscous Elasto Plastic Strain // МЕХАНИКА, 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.