

УДК 539.2

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ

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

Камышинский технологический институт, филиал Волгоградского государственного технического университета, Камышин, e-mail: popov@kti.ru

Проведён расчётный анализ феноменологической модели воздействия водорода высоких параметров на тонкостенные многослойные стальные пластины, работающие в условиях силовых и тепловых нагрузок ($T = 500^\circ\text{C}$), а также при воздействии водорода давлением от 5 до 10 МПа. Исследовано влияние толщины защитного слоя на длительную прочность пластины, а также распределение зон пластичности и повреждаемости в моменты времени до разрушения, непосредственно перед разрушением и сразу после него. Определено время до разрушения пластины вследствие высокотемпературной ползучести и водородной коррозии. Исследовано перераспределение напряжений и появление новых зон пластичности по мере развития пластических деформаций и накопления повреждений от нижнего слоя к верхнему, более прочному и менее нагруженному. В конце статьи приведены рекомендации по использованию разработанной авторами методики расчёта.

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

THE PROTECTIVE LAYER THICKNESS EFFECT OF ON THE BEARING CAPACITY OF DOUBLE-LAYER STEEL PLATES UNDER TEMPERATURE CREEP AND HIGH IMPACT OF HYDROGEN PARAMETERS

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

Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: popov@kti.ru

The calculation analysis of phenomenological model of high parameter influence on the thin-walled multi-layer steel plates working in the conditions of a power and thermal loads ($T = 500^\circ\text{C}$) and also at hydrogen pressure of 5 to 10 MPa, has been done. The protective layer thickness influence on the protected durability of plate and also on the distribution of plasticity and defectiveness zones at the moments of time long before destruction, immediately before destruction and at once after it has been investigated. The time of plate due to high-temperature creep and hydrogen corrosion has been identified. The redistribution of tensions and appearance of new plasticity zones has been investigated as plastic deformation develop and the damage accumulates from the lower layer to the top, more durable and less loaded one. At the end of the article some recommendation are given on the use of calculation methods worked out by the authors.

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

На основе системного подхода авторами разработана методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии [1–3, 8].

Для моделирования развития необратимых деформаций использована теория неизотермических процессов упругопластического деформирования элементов твёрдого тела по траекториям малой кривизны в случае нестационарного термостатического нагружения с возможностью исследования истории нагружения [6, 7].

Цель исследования. Коррозионное воздействие водорода на различные 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. Таким образом, основной задачей исследователей является определение функции времени перехода механических характеристик сталей из исходного состояния в обезуглероженное. Практически используется несколько подходов, подробно изложенных авторами в публикациях [2, 8].

Материалы и методы исследования

Технически учёт влияния водорода на прочностные свойства конструкции реализован следующим образом. Для каждого из материалов конструкции введены механические характеристики двух его состояний – исходного и обезуглероженного.

Процесс нагружения оболочки будем разбивать на ряд малых по времени этапов Δt , в течение которых эти параметры можно принять постоянными, причем длительность этапов также может изменяться в зависимости от скорости изменения давления и температуры. Оболочку разбиваем на малые элементы, напряженно-деформированное состояние, а также степени поврежденности и обезуглероживания которых можно принять однородными. На каждом этапе нагружения и для каждого элемента оболочки будет вычисляться приращение параметра химического взаимодействия водорода с материалом конструкции $\Delta\mu(\Delta t)$. 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 обезуглероживанным состояниями. Если процесс обезуглероживания завершен, то для расчета берутся характеристики обезуглероживанного материала.

В случае использования упрощенной модели химического взаимодействия [2] со ступенчатым переходом к обезуглероживанному состоянию для каждого

элемента оболочки вычисляется значение $t_{кр}$ (периода активных химических превращений), при наступлении которого и осуществляется переход к обезуглероживанному состоянию.

С использованием этого подхода 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. Использование этой методики позволит решать целый ряд важных технических задач, таких как расчет на прочность, оценка несущей способности, долговечности и остаточного ресурса, а также задачи проектирования оптимальных конструкций, применяемых в энергетическом и химическом машиностроении.

Описание расчётного эксперимента

В качестве примера рассмотрим равномерно нагруженную двухслойную кольцевую пластину, находящуюся под воздействием давления водорода. Пластина имеет следующие геометрические размеры: $R = 110$ мм, $r = 65$ мм, $\delta = 10$ мм (рис. 1). Верхний слой (1), обращенный к водородосодержащей среде, изготовлен из материала 12X18H9T, а нижний (2) – из материала сталь 20.

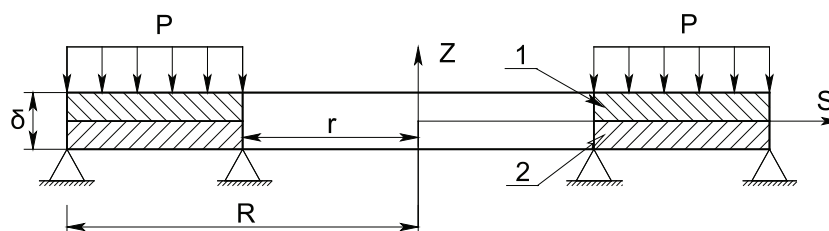


Рис. 1. Расчётная модель

Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины и постоянно во времени, при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно-неподвижное опирание. Давление водорода принималось равным 5, 7,5 и 10 МПа. Выбор значений обусловлен следующими соображениями: при 5 МПа в материале пластины имеют место только мгновенные упругие деформации и деформации ползучести, а при 7,5 и 10 МПа – еще и мгновенные пластические. Все 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)·ч; $u = 1,73$; $B = 13500$; $\lambda = 1 \dots 10$. Согласно данным, приведённым в работе [4], механический сплав 12X18H9T под воздействием водорода практически не изменяется.

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

В работе исследовалось влияние толщины защитного слоя 12X18H9T на длительную прочность оболочки, а также распределение зон пластичности и повреждаемости в моменты времени до разрушения, перед разрушением и непосредственно после него.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены графики, показывающие время до разрушения оболочки в зависимости от толщины защитного слоя при разных давлениях. Видно, что введение защитного слоя значительно увеличивает время до разрушения пластины. Используя такие графики, можно подобрать требуемую толщину защитного слоя при заданном ресурсе изделия.

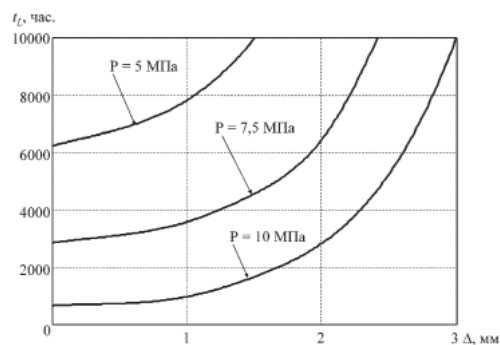


Рис. 2. Время до разрушения оболочки в зависимости от толщины защитного слоя при разных давлениях

На рис. 3 показано осевое сечение пластины для толщины защитного слоя 1 мм и давлении 7,5 МПа для разных моментов времени. В левой части рисунка черным цветом показаны зоны пластичности, в правой части – зоны повреждаемости

в градациях серого. На рисунке видно, что в начале процесса нагружения в нижней части пластины появляется небольшая зона пластичности, размеры которой практически не меняются вплоть до начала процесса разрушения.

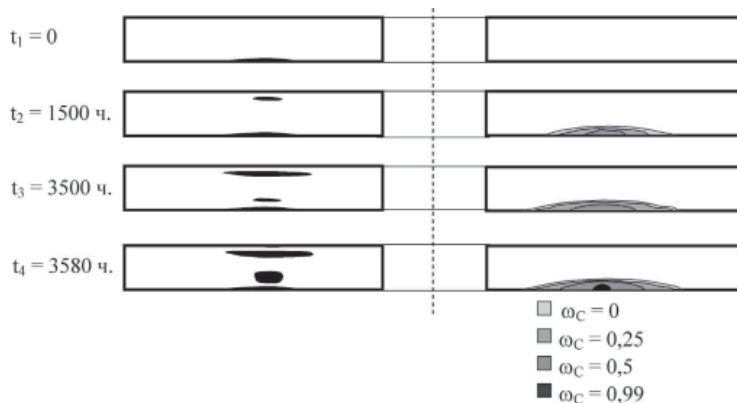


Рис. 3. Осевое сечение пластины для толщины защитного слоя 1 мм и давлении 7,5 МПа для разных моментов времени

По мере накопления повреждений в нижнем слое пластины происходит перераспределение напряжений и появление новых зон пластичности. Локальное разрушение происходит в нижней части пластины в точке, отстоящей от края от-

верстия на 20 мм к моменту времени 3579 часов.

На рис. 4 и 5 приведены кривые, показывающие распределение меридиональных и окружных напряжений для верхней и нижней поверхностей пластины соответственно.

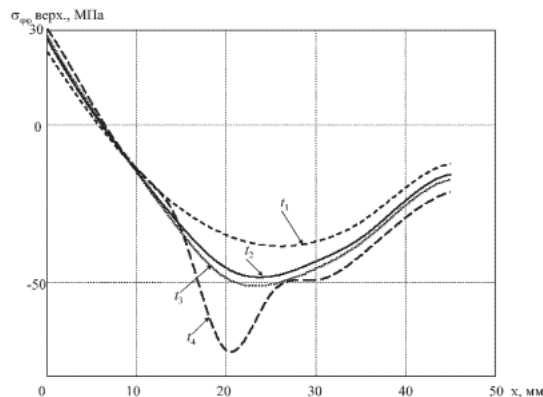
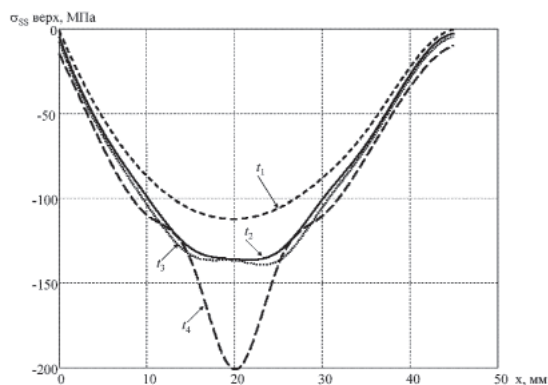


Рис. 4. Распределение меридиональных и окружных напряжений для верхней поверхности пластины

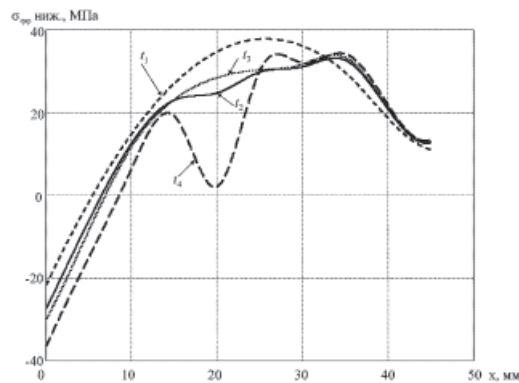
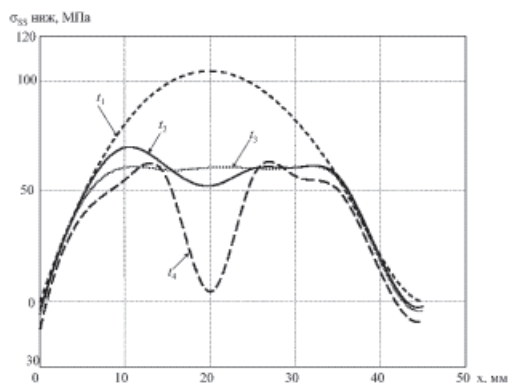


Рис. 5. Распределение меридиональных и окружных напряжений для нижней поверхности пластины

Значения времени такие же, как и на рис. 3. На этих графиках также видно перераспределение напряжений по мере развития пластических деформаций и накопления повреждений от нижнего слоя к верхнему, более прочному и менее нагруженному.

Заключение

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. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 19 с.
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. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Прохоренко И.В. Методика решения осесимметричной задачи термовязкопластичности для слоистых оболочек на ЕС ЭВМ. – Киев: Наук. думка, 1981. – 66 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 // *Mechanika*. – 2004. – № 3(47). – P. 19 – 23.

References

1. Belov A.V. Axisymmetrical elastic-plasticity tensely is the deformed state of shells of rotation taking into account damage of material at a creep: Abstract of thesis of dissertation of candidate of engineering sciences. Kiev, 1989. 18 p.
2. Belov A. V., Polivanov A. A., Popov A. G. Calculation of plastins and shells taking into account damage of materials at a creep and high temperature hydrogen corrosion. Modern problems of science and education. 2009. no. 5 pp. 61–68.
3. Polivanov A. A. Axisymmetrical elastic stress strain state deformation of multi-layered shells of rotation taking into account damage of material at a creep: Abstract of thesis of dissertation of candidate of engineering sciences. Volgograd, 2004. 19 p.
4. Kachanov L.M. Bases of mechanics of destruction. M.: Nauka, 1974. 311 p.
5. Ovchinnikov I. G., Khvalko T.A. Capacity of constructions in the conditions of high temperature hydrogen corrosion: Saratov, 2003. 176 p.
6. Shevchenko Y.N., Babeshko M.E., Prohorenko I. V. Methodology of decision of axisymmetrical task of thermo-visco-elastic-plasticity for the stratified shells on ES EVM: Kiev: Naukova Dumka, 1981. 66 p.
7. Shevchenko Y.N., Mazur V. N. Decision of flat and axisymmetrical regional tasks of thermo-visco-elastic-plasticity taking into account damage of material at a creep. *Applied Mechanics*. 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. *Mechanika*, 2004, no 3(47) pp. 19–23.

Рецензенты:

Богомолов А.Н. д.т.н., профессор, проректор по научной работе, ГОУ 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.
 Работа поступила в редакцию 01.08.2013.