

Г. И. ЛЬВОВ, д-р техн. наук; профессор, зав. каф., НТУ «ХПИ»;
С. В. ЛЫСЕНКО, канд. техн. наук; вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Р. П. ПЕРИН, студент, НТУ «ХПИ»

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА ШИБЕРНОГО ТИПА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для урахування неоднорідного розподілу температури запропоновано за допомогою функцій Арреніуса розширити класичну модель механіки руйнування Качанова-Работнова-Хейхерста. Запропонована неізотермічна теорія повзучості з урахуванням пошкоджуваності була вбудована у скінчено-елементний код ПК ANSYS за допомогою розробленої підпрограми. Для тривимірної моделі корпусу шиберного клапана було проведено чисельний розрахунок тривалої міцності.

Ключові слова: механіка руйнування, неізотермічна теорія повзучості, чисельний розрахунок, тривала міцність.

Для учета неоднородного распределения температуры предложено посредством функций Аррениуса расширить классическую модель механики разрушения Качанова-Работнова-Хейхерста. Предложена неизо термическая теория ползучести с учетом повреждаемости была встроена в конечно-элементный код ПК ANSYS с помощью разработанной подпрограммы. Для трехмерной модели корпуса шиберного клапана был проведен численный расчет длительной прочности.

Ключевые слова: механика разрушения, неизо термическая теория ползучести, численный расчет, длительная прочность.

The conventional continuum damage mechanics model Kachanov-Rabotnov-Hayhurst is extended to the case of variable temperature using Arrhenius functions. The proposed non-isothermal creep-damage constitutive theory have been implemented in FE-code of the universal CAE ANSYS. The numeral calculation of long-term strength of three-dimensional model of vane valve body is executed.

Keywords: damage mechanics model, non-isothermal theory of creep, numeral calculation, long-term strength.

Введение. Решение вопросов надежности и прочности в условиях ползучести существенно отличается от аналогичных задач для упругих и упругопластических материалов в силу наличия фактора времени. При оценке прочности энергетического оборудования, работающего в условиях высоких температур и сложных нагрузках, приходится считаться, с одной стороны, с возможностью недопустимо больших деформаций, с другой стороны, с возможностью физического разрушения материала.

Прогнозирование времени до разрушения основывается на опытных данных, либо на основании феноменологических теорий ползучести и длительной прочности. Идея этих теорий состоит в том, что выделяется два основных типа разрушения – вязкое и хрупкое [1]. В первом случае разрушение имеет внутризеренный характер и реализуется для некоторых чистых метал-

лов при относительно высоких температурах и относительно больших скоростях деформации (при непродолжительном сроке службы). Куда больший интерес имеет второй случай, когда разрушение носит межзеренный характер [2], при наблюдается многочисленные трещины внутри материала, а срок службы велик. Для него представлен общий вид взаимосвязи накопления микроповрежденности и процесса ползучести на рис. 1.

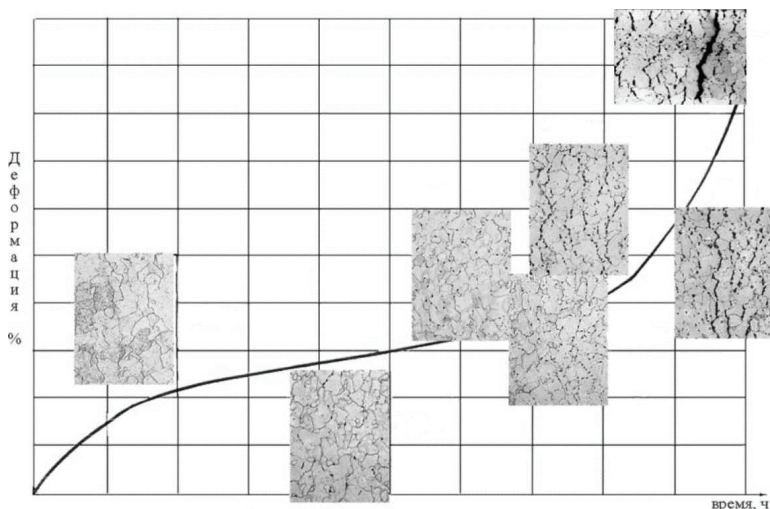


Рисунок 1 – Характер накопления поврежденности по мере истощения ресурса эксплуатации

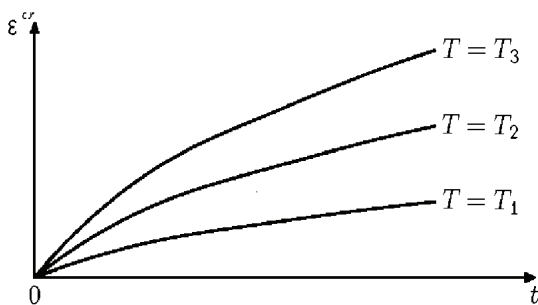


Рисунок 2 – Схематические кривые ползучести при постоянном напряжении ($T_3 > T_2 > T_1$)

Кроме разделения на два типа разрушения экспериментальные данные показывают, что при повышении температуры T скорость процесса ползучести при одном и том же уровне напряжения увеличивается [1]. Типичная картина ползучести металлов при фиксированном напряжении $\sigma = \text{const}$ и раз-

личных температурах T_i представлена на рис. 2. Этот факт важен для толсто-стенных элементов энергетического оборудования, где имеет место неоднородное распределение температуры. В таких случаях оправдано использование неизотермической теории ползучести.

Регулирующий клапан шибберного типа. Регулирующие клапаны D_y 100 (серия 675) применяются в качестве регуляторов расхода рабочей среды и устанавливаются на основных и вспомогательных трубопроводах пара высоких и сверхвысоких параметров [3]. Из технической характеристики клапана известны следующие рабочие параметры: температура пара $T_{раб} = 545$ °С, рабочее давление пара $P_{раб} = 30$ МПа. Ввиду того что стенки корпуса клапана относительно толстые, а условия работы сопряжены с высокими температурами и интенсивными нагрузками, для оценки длительной прочности актуально использовать неизотермическую теорию ползучести.

По приведенному в [3] изображению конструкции клапана была построена геометрическая модель (см. рис. 3, *а*). Кроме того симметрия конструкции позволяет не рассматривать полностью трехмерную конечно-элементную модель корпуса изучаемого объекта, а смоделировать только одну его четверть (см. рис. 3, *б*). При этом конечно-элементная модель содержит 25145 элементов.

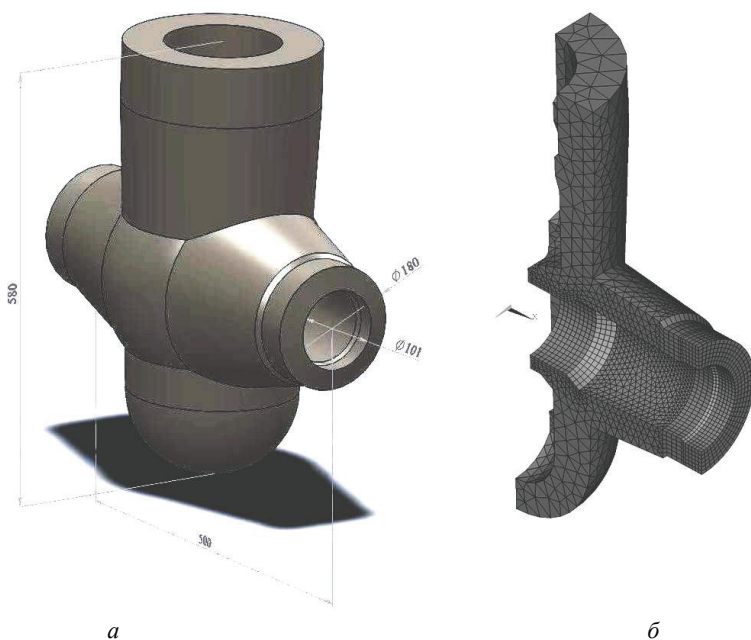


Рисунок 3 – Регулирующий клапан шибберного типа:
а – общий вид корпуса клапана; *б* – конечно-элементная модель

Неизотермическая теория ползучести с учетом повреждаемости. В настоящее время существует относительно немного надежных экспериментальных данных по длительной прочности в условиях сложного напряженного состояния. При определении времени до разрушения $t_{разр}$ обычно пользуются тем или иным критерием длительной прочности. Наиболее перспективным подходом здесь является установление некоторых эквивалентных напряженных состояний, приходящих к одному и тому же времени разрушения $t_{разр}$. Этот подход достаточно хорошо описан в литературе и существует много источников с различными предложениями выбора эквивалентного напряжения. Как будет показано далее, для решения поставленной задачи было выбрано эквивалентное напряжение в форме представленной в [4].

В данной работе используется классическая концепция Качанова-Работнова-Хейхерста [5], расширенная до варианта учитывающего изменение температуры как показано в [6], используя функцию Аррениуса [7]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \alpha(T) \cdot \left(\frac{\sigma_{vM}}{1 - \omega} \right)^{n-1} \frac{S_{ij}}{1 - \omega}; \quad (1)$$

$$\dot{\omega}^{cr} = \beta(T) \cdot \left(\frac{\langle \sigma_{eq}^{\omega} \rangle}{(1 - \omega)} \right)^m, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^{cr}$ – тензор скорости деформации ползучести; $\dot{\omega}^{cr}$ – скорость повреждаемости; $\sigma_{vM} = \left[\frac{3}{2} \mathbf{s} \cdot \mathbf{s} \right]^{1/2}$ – интенсивность напряжений; \mathbf{S} – девиатор тензора напряжений; σ_{eq}^{ω} – эквивалентное напряжение, предложенное в [4] в форме:

$$\sigma_{eq}^{\omega} = \lambda \sigma_1 + (1 - \lambda) \sigma_{vM}, \quad (3)$$

где λ – весовой коэффициент или коэффициент влияния главных механизмов повреждаемости; σ_1 – максимальное главное напряжение.

Функция Аррениуса в уравнениях расширенной модели Качанова-Работнова-Хейхерста (1), (2) имеет следующую форму:

$$\alpha(T) = A \cdot \exp(-h/T); \quad \beta \cdot (T) = B \cdot \exp(-p/T), \quad (4)$$

где T – абсолютная температура; A – константа материала, характеризующая участок установившейся ползучести; B – константа материала, характеризующая участок ускоренной ползучести, предшествующий разрушению конструкции; h, p – константы ползучести, имеющие такой вид:

$$h = Q_{\alpha} / R; \quad p = Q_{\beta} / R, \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная; Q_{α} – энергия активации диффузионной ползучести; Q_{β} – энергия активации процессов поперечного скольжения дислокаций, которая влияет на скорость повреждаемости.

При таком подходе естественным образом записывается критерий разрушения в виде:

$$\omega(t^*) = 1, \quad (6)$$

где t^* – время разрушения.

Расчет длительной прочности регулирующего клапана шиберного типа. Для решения поставленной задачи в конечно-элементный код ПК ANSYS была встроена подпрограмма на основе неизотермической модели ползучести с учетом повреждаемости, написанная на языке FORTRAN. Особенностью подпрограммы является введение дополнительной переменной состояния, в которой накапливается значение параметра повреждаемости в процессе интегрирования системы дифференциальных уравнений (1), (2) по времени. Так как новая переменная не является независимой величиной, и выражается через величины, являющиеся стандартными в программном комплексе, то необходимость создания нового конечного элемента не возникает.

Для расширенной модели Качанова–Работнова–Хейхерста необходимо шесть констант ползучести. Для некоторой жаропрочной стали, как показано в [6], они уже были определены:

$$A = 1,33 \cdot 10^{-5} \left[\text{МПа}^{-n} / \text{час} \right]; \quad n = 5,6; \quad h = 1,6 \cdot 10^4;$$

$$B = 1,87 \cdot 10^{-8} \left[\text{МПа}^{-m} / \text{час} \right]; \quad m = 8; \quad p = 1,86 \cdot 10^4.$$

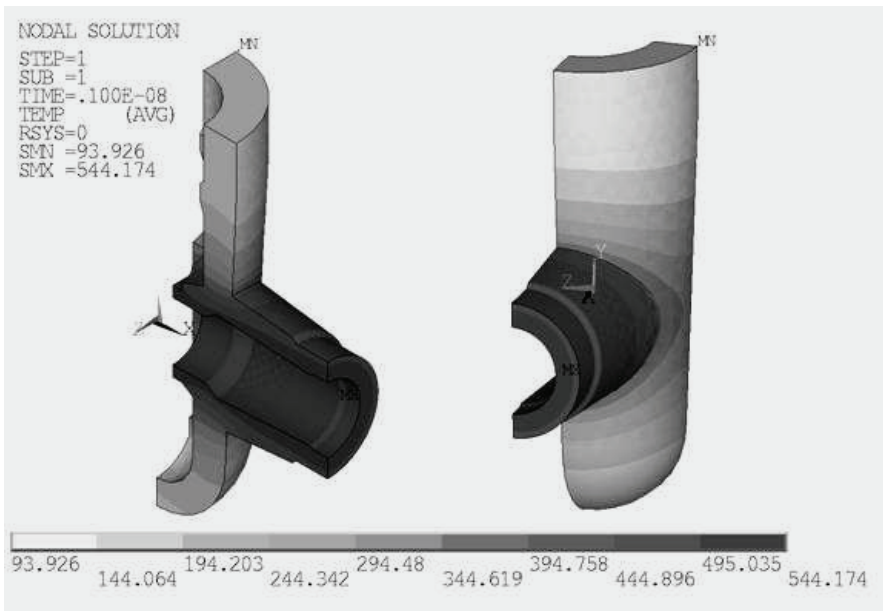


Рисунок 4 – Распределение температуры по объему конструкции

Выполнен расчет длительной прочности трехмерной модели корпуса регулирующего клапана (см. рис. 3, б). Клапан нагруженным внутренним давлением $P = 30$ МПа, а так же заданы граничные условия для температуры. На внутренней поверхности корпуса клапана происходит передача энергии от пара, а на внешней от потока воздуха за счет движения молекул (конвективный теплообмен). В результате решения на первом шаге задачи теплопроводности получено распределение температуры в корпусе клапана, как показано на рис. 4.

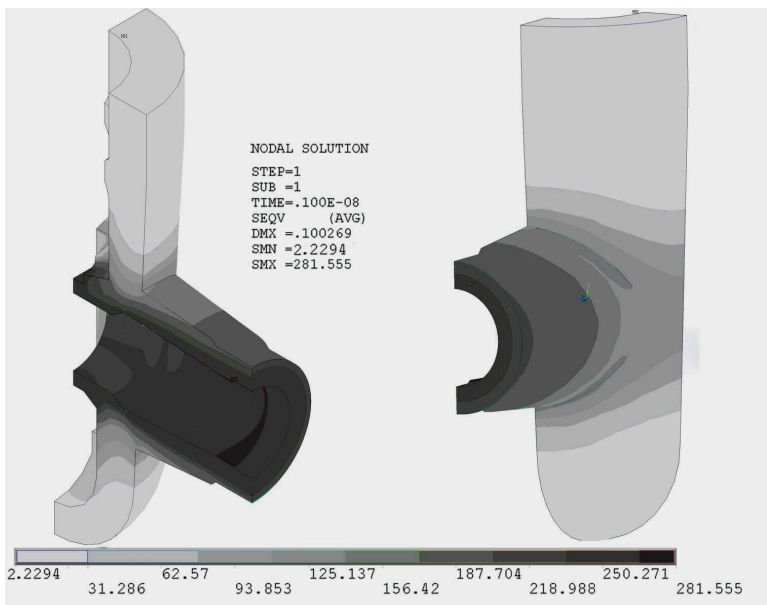
После нахождения поля температур была решена задача неизоэтермической ползучести с повреждаемостью. Найдено время разрушения корпуса клапана, которое составило $t_* = 121469$ часа. При этом параметр повреждаемости достиг своего критического значения $\omega(t_*) = 0,9$ в 191-ом элементе, который находится на внешней стороне патрубка.

В процессе ползучести происходит перераспределение характеристик НДС. В начальный момент времени распределение эквивалентных напряжений по Мизесу показано на рис. 5, а. Для сравнения приведены результаты расчета аналогичных эквивалентных напряжений в момент разрушения (см. рис. 6, а). Из сравнения видно, что характер распределения полей напряжений по объему корпуса клапана изменился. В частности, в критическом 191-ом элементе в процессе ползучести эквивалентные напряжения снижаются в 2,3 раза (см. рис. 6, а). Параметр повреждаемости сначала накапливается на внутренней поверхности корпуса, но с течением времени максимальные значения смещаются на внешнюю поверхность клапана. Накопление параметра повреждаемости в процессе ползучести в 191-ом элементе, грань которого находится на внешней поверхности корпуса, показано на рис. 6, б. Конечное накопление повреждаемости к моменту разрушения по объему клапана и в укрупненном масштабе в области критического элемента представлено на рис. 7.

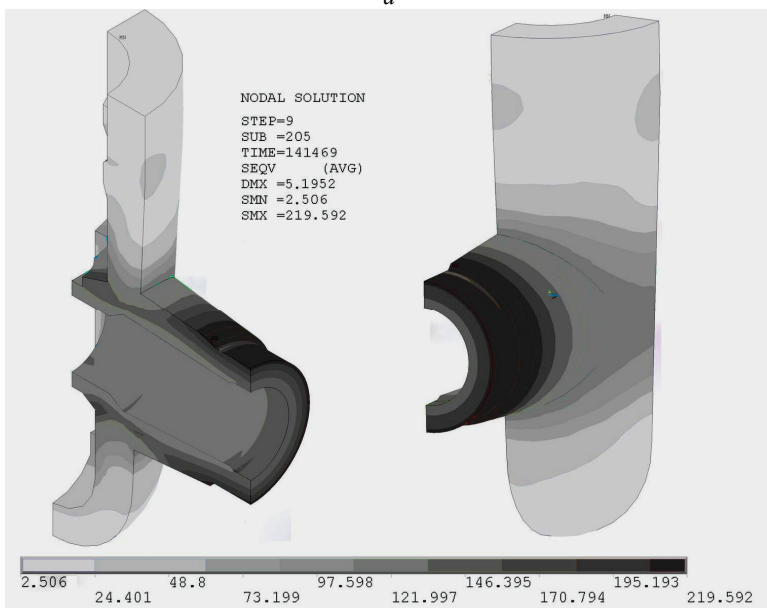
Выводы. Для изучения прочности корпуса клапана использовалась модель неизоэтермической ползучести и повреждаемости, которая описывает все три стадии ползучести. Данная модель была встроена в ПК ANSYS с помощью подпрограммы, написанной на языке FORTRAN.

Был проведен расчет на длительную прочность корпуса регулирующего клапана шиберного типа. Результатом расчета стало получение конечного значения времени разрушения, которое составило приблизительно 16 лет. Данный результат подтверждает необходимость определения параметров длительной прочности для такой конструкции. При этом местом зарождения и развития первых трещин, которые в дальнейшем могут привести к разрыву корпуса клапана, является область резкого изменения толщины патрубка.

Проведенный расчет неизоэтермической ползучести-повреждаемости клапана также показал необходимость учета неравномерного распределения температуры по объему конструкции.

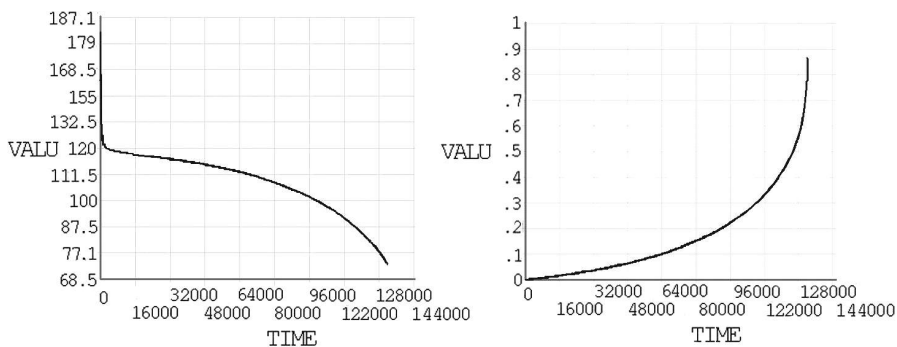


a



б

Рисунок 5 – Перераспределения эквивалентных напряжений по Мизесу [МПа]:
a – в начальный момент времени; *б* – в момент разрушения



a

б

Рисунок 6 – Изменение характеристик в 191-ом элементе:
a – эквивалентного напряжения по Мизесу [МПа]; *б* – параметра повреждаемости

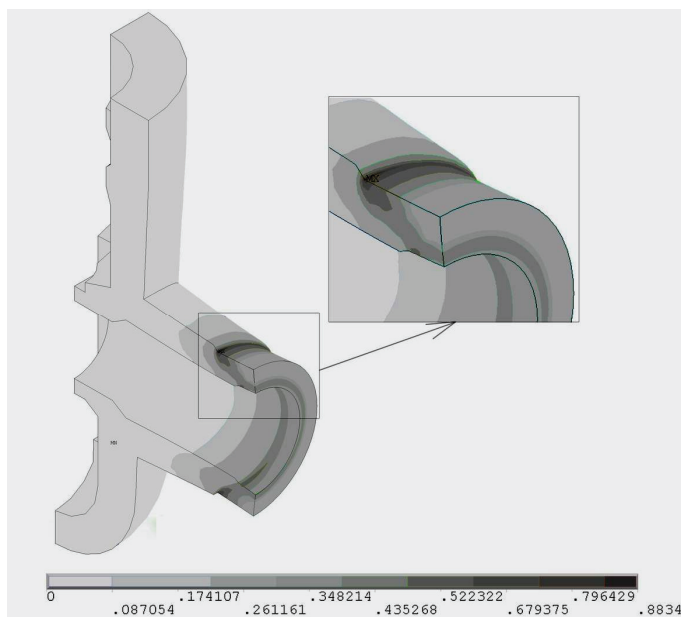


Рисунок 7 – Распределения параметра повреждаемости в момент разрушения

Список литературы: 1. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение, 2005. – 226 с. 2. Крейцер К.К., Швецова Т.А. Восстановительная термическая обработка как метод увеличения ресурса паропроводов // Сб. докладов III Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2011». – 2011. – С. 28-30. 3. Васильченко Е. Г. Арматура Энергетическая для АЭС и ТЭС. – М.: Научно-исследовательский институт экономики в энергетическом машиностроении, 1986. – 547. 4. Leckie F.A., Hayhurst D.R. Constitutive equations for creep rupture // Acta Metallurgica, 25. – Pergamon Press, 1977. – P. 1059-1070. 5. Hayhurst D.R. Computational continuum damage mechanics: its use in

the prediction of creep in structures: past, present and future // Creep in Structures. – Dordrecht, Kluwer, 2001. - P. 175-188. 6 Львов Г.И., Лысенко С.В., Гораш Е.Н. Длительная прочность клапана высокого давления с учетом неоднородного распределения температуры // Вісник НТУ «ХПІ»: Сб. науч. работ темат. выпуск «Динаміка і міцність машин». - 2007. – Вип. 22. - С. 98-107. 7. Perrin I.J., Hayhurst D.R. Creep constitutive equations for a 0.5Cr-0.5Mo-0.25V ferritic steel in the temperature range 600-675 °C // Journal of Strain Analysis. - 1996. – Vol. 31, no. 4, ImechE. - PP. 299-314.

Поступила в редколлегию 15.10.2012