

И. ЛЬВОВ, аспирант, Университет им. Отто фон Герике, Магдебург, Германия

АНИЗОТРОПНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ МНОГОПРОХОДНОГО ШВА

Запропонований метод оцінки повзучості багатопрохідного зварного з'єднання на основі мікро-макро підходу в механіці тіла, що деформується. Знайдені властивості повзучості матеріалу еквівалентного матеріалу зварного шва за відомими властивостями зон із різними типами зерен. Як приклад аналізу повзучості конструкції зі зварним з'єднанням виконаний розрахунок труби зі зварним з'єднанням, навантаженої внутрішнім рівномірним тиском.

A method of evaluating creep response of the multipass welding based on the micro-macro mechanics approach is introduced. Creep material properties for equivalent weld material by known properties of weld metal grain type zones are found. As an example of macro model analysis of the welding, the creep calculation of the tube with the welding under the uniform pressure on the inner bounds was performed.

Предложен метод оценки ползучести многопроходного сварного соединения на основе микро-макро подхода в механике деформируемого тела. Найдены свойства ползучести материала эквивалентного материалу сварного шва по известным свойствам зон с различными типами зерен. В качестве примера анализа ползучести конструкции со сварным соединением, выполнен расчет трубы со сварным соединением, нагруженной внутренним равномерным давлением.

Постановка задачи. Длительное наблюдение за оборудованием, работающим под высоким давлением при высокой температуре, показывает, что важно учитывать влияние ползучести и повреждаемости в сварных конструкциях. Нередко в сварных конструкциях обнаруживаются повреждения еще до достижения расчетного срока службы компонентов [1]. Также следует отметить, что нормы проектирования сварных конструкций под давлением основаны лишь на свойствах длительной прочности свариваемого материала при одноосном растяжении [2]. Но на самом деле такого рода конструкции находятся в условиях многоосного напряженного состояния. Кроме того, механические свойства в зоне сварного шва зависят от направлений [3]. Поэтому, чтобы предсказать поведение этих конструкций необходимо рассмотреть модели анизотропной ползучести.

Особенно актуальны эти проблемы для современного турбиностроения. Высокая температура пара и высокое давление в сверхкритических паровых турбинах требуют применения сталей с улучшенными характеристиками длительной прочности. Для выполнения этих требований было разработано семейство новых жаропрочных сталей (с 9-12 % Cr) Эти марки сталей широко используются в сверхкритических турбоагрегатах [4].

Эта статья посвящена численному моделированию анизотропной ползучести в сварных конструкциях из легированных сталей 9Cr1Mo.

Актуальность проблемы. Эффекты повреждаемости со временем в сварных соединениях, работающих при высоких силовых и температурных нагрузениях, обнаруживались на протяжении многих лет. Мониторинг в

процессе эксплуатации конструкций показал, что сварные конструкции склонны к ползучести и усталостному повреждению. Для того чтобы улучшить эту ситуацию были проведены исследования для более детального изучения поведения сварных соединений при ползучести.

В начале восьмидесятых годов эффект перераспределения напряжений в сварных соединениях из-за различия в свойствах ползучести в зонах материала сварного шва исследовался экспериментально и теоретически [5, 6]. Было обнаружено, что это различие и стало причиной ускоренного разрушения сварных конструкций. На основе численных расчетов полей напряжений и деформаций выявлены наиболее слабые зоны шва и оценивалось время до разрушения [7].

Для более детального исследования сварного шва при ползучести был использован подход механики сплошных сред с учетом повреждаемости и ползучести [8-10]. Эти исследования позволили повысить точность оценки времени до разрушения вследствие ползучести и повреждаемости в зоне сварного соединения. Тем не менее, оставшиеся проблемой является отсутствие достоверных данных о свойствах локальных зон сварного соединения.

На протяжении длительного времени механика разрушения является наиболее часто используемой концепцией в прогнозировании длительной прочности сварных конструкций [11]. Исследования в этой области продолжаются, и можно ожидать дальнейшие улучшения текущих норм проектирования и процедур оценки ресурса для сварных конструкций, работающих на высоких температурах. Несмотря на то, что огромный объем работы был проведен в области понимания механизмов поведения сварных соединений, значительные исследования необходимы для решения задач, которые поставит промышленность.

Математическая модель на микроуровне. Исследование сварных конструкций может быть разделено на три масштабных уровня: макроуровень – уровень исследования конструкций, мезоуровень – уровень сварного соединения, и микроуровень – уровень металла шва и его микроструктуры.

Рассмотрим микроуровень, где объектом является микроструктура материала сварного шва. Сварной шов – участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла. В случае многопроходного сварного шва, в результате циклов нагрева и охлаждения в процессе сварки, формируется сложная микроструктура металла шва, состоящая из трех типов зон с различным размером зерен – зона основного металла наплавки, и двух зон образованных под действием теплового влияния предыдущего прохода, крупнозернистой и мелкозернистой [12].

Чтобы определить свойства анизотропной ползучести многопроходных сварных швов необходимо воспользоваться процедурой гомогенизации, для чего используется метод осреднения. В этом методе, гетерогенный материал заменяется однородным эквивалентным материалом, и свойства этого эквивалентного материала определяются численными экспериментами на представительном элементе объема.

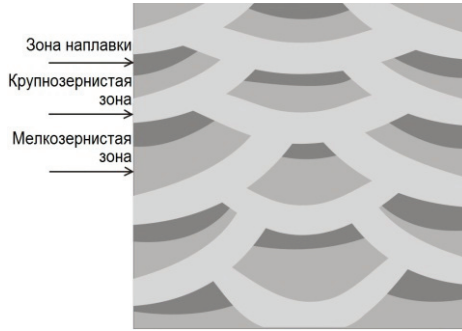


Рисунок 1 – Представительный объем многопроходного сварного шва

Поскольку заранее предсказать тип симметрии материала сварного шва невозможно, для моделирования поведения такого материала при ползучести необходимо воспользоваться анизотропной моделью ползучести [13].

$$\dot{\underline{c}} = \sigma_2^n [B] \underline{\sigma}, \quad (1)$$

где $\dot{\underline{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, \dot{c}_{33}, \dot{c}_{12}, \dot{c}_{23}, \dot{c}_{31})^T$ и $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, 2\sigma_{12}, 2\sigma_{23}, 2\sigma_{31})^T$ – вектора скоростей деформаций ползучести и напряжения, а $\sigma_2 = \sqrt{\underline{\sigma}^T [B] \underline{\sigma}}$ – эквивалентное напряжение. Матрица **B** в этом законе ползучести отвечает за анизотропию.

Метод осреднения. Для моделирования ползучести эквивалентного гомогенного материала воспользуемся уравнениями состояния, предложенными в [14] для осредненных характеристик композита:

$$\langle \dot{\underline{c}} \rangle = \langle \underline{\sigma} \rangle_2^n [B] \langle \underline{\sigma} \rangle, \quad (2)$$

где введены средние по объему представительской ячейки напряжения и скорости деформаций ползучести

$$\langle \underline{\sigma} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \underline{\sigma} dv; \quad \langle \underline{c} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \underline{c} dv,$$

а эквивалентное напряжение σ_2 найдено из осредненных компонент вектора напряжений.

Для нахождения материальных констант в уравнениях ползучести (2) воспользуемся методикой [14]. Скорости деформаций установившейся ползучести представительского объема в условиях одноосного растяжения растяжения по трем ортогональным направлениям связаны с осредненными напряжениями следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \langle \dot{c}_{11} \rangle &= b_{1111}^{\frac{n+1}{2}} \langle \sigma_{11}^n \rangle, \\ &\dots \\ \langle \dot{c}_{33} \rangle &= b_{3333}^{\frac{n+1}{2}} \langle \sigma_{33}^n \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрение ползучести при сдвиге касательными напряжениями, приложенными на граничных координатных плоскостях, дает следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \langle \dot{c}_{12} \rangle &= b_{1212}^{\frac{n+1}{2}} \langle \sigma_{12}^n \rangle; \\ &\dots \\ \langle \dot{c}_{31} \rangle &= b_{3131}^{\frac{n+1}{2}} \langle \sigma_{31}^n \rangle. \end{aligned} \tag{4}$$

Обработки участков кривых в зоне установившейся ползучести для двух уровней напряжений позволяет определить показатель степени в законе ползучести:

$$n = \frac{\lg \frac{\langle \dot{c}'_{11} \rangle}{\langle \dot{c}''_{11} \rangle}}{\lg \frac{\langle \sigma'_{11} \rangle}{\langle \sigma''_{11} \rangle}}.$$

После определения показателя степени можно определить параметры матрицы В:

$$\begin{aligned} b_{1111} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{11} \rangle}{\langle \sigma_{11}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}; & b_{2222} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{22} \rangle}{\langle \sigma_{22}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}; & b_{3333} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{33} \rangle}{\langle \sigma_{33}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}; \\ b_{1212} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{12} \rangle}{\langle \sigma_{12}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}; & b_{2323} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{23} \rangle}{\langle \sigma_{23}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}; & b_{3131} &= \left(\frac{\langle \dot{c}_{31} \rangle}{\langle \sigma_{31}^n \rangle} \right)^{\frac{2}{n+1}}. \end{aligned}$$

Конечно элементный анализ. Чтобы определить свойства эквивалентного материала с помощью метода усреднения, была создана конечно-элементная модель представительного элемента объема многопроходного сварного шва, для проведения численных экспериментов.

В настоящее время используется два подхода создания конечно-элементной модели представительного объема металла сварного шва. Первый подход состоит в том, что модель создается непосредственно в САД программе [15], а второй подход заключается в создании конечно элементной сетки с помощью оцифровки в объектно-ориентированной программе фотографии реальной микроструктуры, сделанной с использованием микрографа [16]. Преимуществом первого подхода является то, что можно варьировать размеры зон с различной плотностью зерен, для осуществления различных реализаций. В тоже время второго преимущества подхода – возможность исследования реальной структуры металла шва.

Для определения типа симметрии материала многопроходного сварного шва, была проведена серия численных экспериментов по однокомпонентно-

му нагружению представительного объема материала. Поскольку структура материала шва с достаточно большим количеством проходов можно принять периодической, было создано три реализации представительного объема – референсный (8 проходов), реализация с вдвое большим количеством проходов, и реализация с вдвое меньшим количеством проходов. При этом объемные доли материалов различных зон сохранялись постоянными: 23 % – основной металл наплавки, 36 % – зона крупнозернистого металла, 41 % зона мелкозернистого металла. Конечно-элементное моделирование представительного объема проводилось в программном комплексе Abaqus.

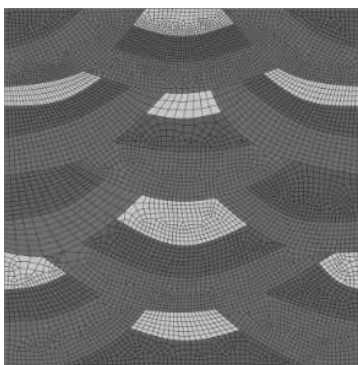


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель МСШ

Упругие свойства материала всех зон принимались одинаковыми: модуль упругости равен $2,1 \cdot 10^5$ МПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. В отношении свойств ползучести, материалы зон также принимались изотропными и для их моделирования использовался закон Нортон:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C \cdot \sigma^n .$$

А свойства материалов задавались согласно [17]:

Таблица 1 – Свойства материалов зон шва при ползучести

| | Основной металл наплавки | Крупнозернистая зона | Мелкозернистая зона |
|----------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>C</i> | $2,74 \cdot 10^{-21}$ | $1,37 \cdot 10^{-20}$ | $1,37 \cdot 10^{-20}$ |
| <i>n</i> | 7 | 7 | 7 |

Результаты на микроуровне. В результате конечно элементного анализа по однокомпонентному нагружению представительного объема получены средние деформации и материальные константы уравнения состояния эквивалентного материала. Поскольку экспериментально найдены лишь параметры зоны основного металла наплавки и зоны измененной зернистости в целом, моделировались только два материала с различными свойствами ползучести.

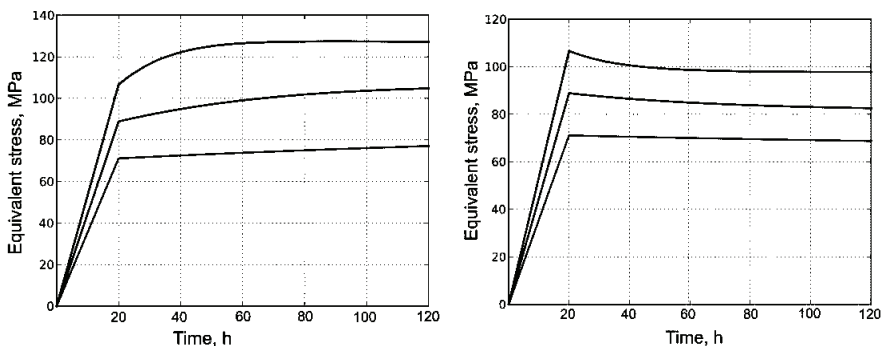


Рисунок 3 – Графики изменения эквивалентного напряжения со временем в зоне основного металла наплавки (слева) и в зоне измененной зернистости (справа), при различной нагрузке

На рис. 3 представлены графики, характеризующие перераспределение напряжений при ползучести в различных зонах металла шва при трех уровнях средних напряжений 80, 100 и 120 МПа. Так, зона основного металла наплавки (левый график) упрочняется, а зона подвергшаяся тепловому влиянию (справа) релаксирует.

Таблица 2 – Коэффициенты матрицы В для трех реализаций.

| Константы матрицы В | Реализация 1 (8 проходов) | Реализация 2 (16 проходов) | Реализация 3 (4 прохода) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| b_{1111} | $1,64 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,61 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,69 \cdot 10^{-5,25}$ |
| b_{2222} | $1,51 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,58 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,46 \cdot 10^{-5,25}$ |
| b_{3333} | $1,83 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,84 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,89 \cdot 10^{-5,25}$ |
| b_{1212} | $1,33 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,36 \cdot 10^{-5,25}$ | $1,35 \cdot 10^{-5,25}$ |
| n | 7 | 7 | 7 |

Принимая во внимание тот факт, что наиболее точные модели ползучести могут предсказать время до разрушения с ошибкой в не менее чем 15 %, то исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что симметрия материала многопроходного шва – ортотропия с двумя равноправными направлениями. В этом случае матрица В примет вид:

$$[B] = \begin{vmatrix} b_{1111} & b_{1122} & b_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ b_{1122} & b_{1111} & b_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ b_{1133} & b_{1133} & b_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{3131} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{3131} \end{vmatrix}$$

С использованием условия несжимаемости материала при ползучести можно найти коэффициенты: $b_{1122} = \frac{1}{2} b_{1111}$; $b_{1133} = \frac{1}{2} b_{3333}$.

Расчет элемента конструкции. В качестве примера расчета на ползучесть конструкции с многопроходным сварным соединением был проведен расчет сварного соединения трубы, нагруженной внутренним давлением. Создание конечно элементной модели конструкции и численный расчет проводился в программном комплексе Abaqus. Материал сварного шва принимался гомогенным и изотропным в отношении упругих свойств. При ползучести материал моделировался ортотропным с двумя равноправными направлениями. Поскольку встроенными возможностями ПК Ansys, такую модель материала задать невозможно, была создана подпрограмма для задания пользовательского материала.

Свойства материала основного металла в упругой зоне совпадали со свойствами металла шва: модуль упругости равен $2,1 \cdot 10^5$ МПа, а коэффициент Пуассона равен 0,3. Характеристики материала при ползучести соответствовали найденным в численных экспериментах для первой реализации. Соотношения диаметра трубы к его длине 1/5. Приложенное внутреннее давление – 10 МПа, время действия нагрузки – 100 часов. Результаты представлены на рис. 4 в виде распределения эквивалентных напряжений.

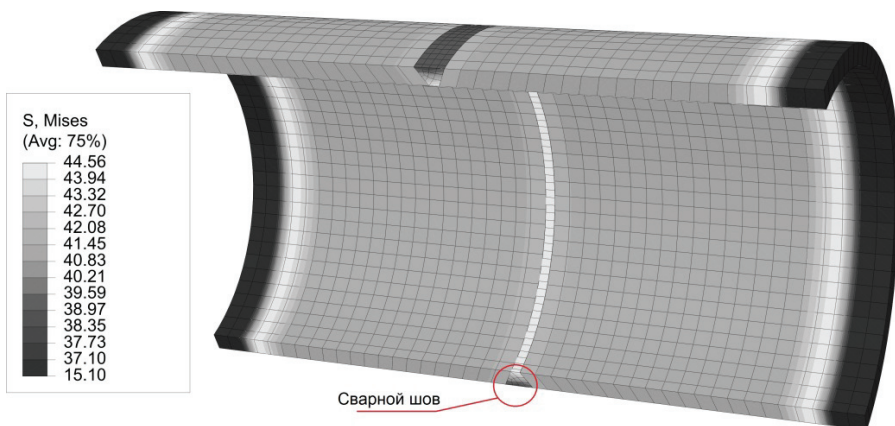


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений (по фон Мизесу) спустя 100 часов ползучести

Выводы: В работе предложен метод расчета сварных конструкций с учетом влияния неоднородности металла сварного шва. Разработана методика исследования микроструктуры металла многопроходного сварного шва как неоднородного материала и описания его неупругого поведения на основе уравнений состояния анизотропной ползучести.

Предложен метод расчета характеристик материала многопроходного

сварного шва на основе принципа эффективной гомогенизации. Определена степень симметрии свойств материала многопроходного шва для найденных характеристик ползучести материала при различном количестве проходов.

Проведен конечно-элементный расчет на ползучесть трубы со сварным соединением. Полученные результаты представлены в виде полей распределения напряжений в конструкции после 100 часов ползучести.

Список литературы: 1. *Chan, W., McQueen, R.L., Prince, J., Sidey, D.* Metallurgical Experience with High Temperature Piping in Ontario Hydro, Service Experience in Operation Plants // ASME, NY. – 1991. – P. 97-105. 2. *Nickel, H., Schubert, F., Penkalla, H.J., Breitbach, G.* Aspects of Design Codes for Metallic High Temperature Components // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1991. – Vol. 47. – P. 167-192. 3. *Wang, Z.P., Hayhurst, D.R.* Materials data for high-temperature design of ferritic steel pressure vessel weldments // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1993. – Vol. 55. – P. 461-479. 4. *Honghong Wang, Hanqian Zhang, Jinfu Li* Microstructural evolution of 9Cr-1Mo deposited metal subjected to weld heating // Journal of materials processing technology. – 2009. – 209. – P. 2803-2811. 5. *Ivarsson, B. Sandström, R.* Creep deformation and rupture of butt-welded tubes of cold-worked AISI 316 steel // Metals Technology. – 1980. – P.440-448. 6. *T. Wada* The Continuous Cooling Transformation Diagram and Tempering Response of 9Cr-1Mo-V-Nb Steels // Climax Molybdenum Company of Michigan, J-4672, Ann Arbor, MI, 1981. 7. *Hall, F.R., Hayhurst, D.R.* Continuum damage mechanics modelling of high temperature deformation and failure in a pipe weldment // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1991. – Vol. 433. – P. 383-403. 8. *Wang, Z.P., Hayhurst, D.R.* The use of supercomputer modelling of high-temperature failure in pipe weldments to optimize weld and heat affected zone materials property selection // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1994. – Vol. 446. – P. 127-148. 9. *Tu, S.-T., Wu, R., Sandström, R.* Design against creep failure for weldments in 0.5Cr0.5Mo0.25V pipe // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1994. – Vol. 58. – P. 345-354. 10. *Hyde, T.H., Sun, W., Williams, J.A.* Creep analysis of pressurized circumferential pipe weldments // J. Strain Analysis. – 2003. – Vol. 38, No. 1. 11. *Stevick, G.R.* Failure of welds at elevated temperatures // Welding Research Council Bulletin. – New York, 1994. – No. 390. 12. *Santella M. L., Swindeman, R. W.* Reed, Martensite transformation, microsegregation, and creep strength of 9 Cr-1 Mo-V steel weld metal // 2003. 13. *Морачковский О.К., Пасынок М.А.* Исследование влияния на ползучесть материалов приобретенной анизотропии вследствие предварительной ползучести // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 27. – С. 197-203. 14. *Морачковский О.К., Львов И.Г.* Метод определения гомогенных свойств анизотропной ползучести композитных материалов / Труды 14-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Х.: ХНПК «ФЕД», 2008. – С. 112-116. 15. *K. Naumenko, H. Altenbach* A phenomenological model for anisotropic creep in a multipass weld metal // Archive Applied Mechanics. – Springer-Verlag, 2005. – 74. – P. 808–819. 16. *Yongkui L.I.* Study on Creep Damage in Thick Welded Joint of Mod.9Cr-1 Mo Steel Plates // Kochi University of Technology Academic Resource Repository, Dissertation. – 2009. 17. *Hyde T.H., Sun W.* Creep failure behavior of a 9CrMoNbV weld metal with anisotropy under a biaxial loading state // J. Strain Analysis. – 2006. – Vol. 41. No. 5.

Поступила в редколлегию 03.10.2011