

УДК 539.3

Н. Г. Шульженко, д-р техн. наук
С. И. Панасенко

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua)

ОЦЕНКА РОСТА ТРЕЩИНЫ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ РАССЕЯННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Приводится расчетная методика оценки развития трещин в элементах конструкций при ползучести. Используются положения механики рассеянных повреждений и обобщенный метод Нейбера. Результаты расчета для элементов сравниваются с опубликованными экспериментальными данными. Предлагаемое приближенное решение упруго-пластической задачи в зоне трещины позволяет значительно уменьшить затраты на расчет и получить результаты, близкие к экспериментальным.

Наводиться розрахункова методика оцінки розвитку тріщин в елементах конструкцій при повзучості. Використовуються положення механіки розсіяних пошкоджень та узагальнений метод Нейбера. Результати розрахунку для елементів порівнюються з опублікованими експериментальними даними. Запропонований наближений розв'язок пружно-пластичної задачі у зоні тріщини дозволяє значно зменшити витрати на розрахунок та отримати результати, що є близькими до експериментальних.

Введение

Условия работы большинства современных конструкций в энергетике, двигателестроении, нефтехимической отрасли характеризуются высоким уровнем нагрузок и температур. Длительная работа элементов машин и установок в таких условиях сопровождается развитием ползучести, что приводит к накоплению поврежденности в конструкции. В дальнейшем происходит зарождение и рост трещин вплоть до разрушения конструкции, также возможно появление недопустимых перемещений или зазоров.

Расчет ресурса конструкций при наличии трещин основан на положениях механики разрушения [1, 2], при этом используется коэффициент интенсивности напряжений (КИН), в ряде случаев – J -интегралы и C -интегралы. Их применение предполагает использование большого количества постоянных, получаемых на основе трудоемких и дорогостоящих испытаний образцов с трещинными. Применение же характеристик рассеянных повреждений [3–5] позволяет описать зарождение и рост трещин на основе данных испытаний гладких образцов при различном напряженном состоянии.

В [6] предложена методика оценки развития трещины в высокотемпературных элементах машин при ползучести. Приведено решение задачи роста трещины в пластине с надрезом. Показано, что для описания напряженно-деформированного состояния в вершине трещины необходимо учитывать наличие пластических деформаций. Для решения упруго-пластической задачи использована теория типа течения с анизотропным упрочнением. Проведенные исследования показали, что при этом время счета даже для простых конструкций становится весьма значительным. Это связано с необходимостью выполнения большого числа итераций для решения задачи пластичности. Кроме того, оценка развития трещины требует специального конечноэлементного разбиения на большое число элементов. Указанные обстоятельства затрудняют выполнение расчетов сложных конструкций.

Для получения приближенной оценки роста трещины возможно введение некоторых упрощений, позволяющих снизить время выполнения расчетов и получить достоверные ре-

ультаты, отвечающие экспериментальным. Одним из них является замена упругопластического решения в вершине трещины на приближенное, основанное, например, на одном из энергетических методов (метод Глинки, ESED метод, обобщенный метод Нейбера). Наиболее простым, наглядным и удобным для алгоритмизации является обобщенный метод Нейбера, использующий диаграмму деформирования для перерасчета упругих напряжений и деформаций в вершине трещины в упругопластические [7–8].

В данной работе предлагается модифицированная методика расчета роста трещины при ползучести, основанная на использовании концепции рассеянных повреждений и использующая обобщенный метод Нейбера для описания полей напряжений и деформаций в области трещины. Показано применение методики на тестовых задачах и проводится сравнение полученных результатов с имеющимися расчетными и экспериментальными данными.

Основные положения методики расчета

Соотношения, описывающие все три стадии ползучести, и кинетические уравнения повреждаемости изотропного материала имеют следующий вид [9, 10]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda(s_i, \omega, T) s'_{ij},$$

$$\dot{\rho}'_{ij} = \frac{2}{3} H(\sigma_i) \dot{\varepsilon}_{ij} - \mu(\rho_i, \omega, T) \rho'_{ij}, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}{A_*(\sigma_i, T)}, \quad (0 \leq \omega \leq 1), \quad (2)$$

$$|\dot{\psi}_v| = \frac{Q(\sigma_e)}{(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(k\sigma_e) \exp(\delta T), \quad (0 \leq \psi_v \leq 1), \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{3a}{2s_i(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta s_i) \exp(\gamma T)$; $\mu = \frac{b}{\rho_i(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta \rho_i) \exp(\gamma T)$; ε_{ij} – тензор деформаций ползучести; σ_{ij} , s_{ij} , ρ_{ij} – тензоры полных, активных и добавочных напряжений, причем $\sigma_{ij} = s_{ij} + \rho_{ij}$; σ_i , s_i , ρ_i – интенсивности полных, активных и добавочных напряжений; ω , $\bar{\psi}$ – скалярный и векторный феноменологические структурные параметры, отвечающие соответственно за внутри- и межзеренное накопление повреждений и принимающие значения из интервала $[0, 1]$; A_* – удельная энергия вязкого разрушения; T – температура; σ_e – эквивалентное положительное напряжение, действующее на площадке с нормалью v , вычисляемое согласно выражению в форме Писаренко–Лебедева [11]

$$\sigma_e = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1,$$

где σ_1 – максимальное главное напряжение; σ_i – интенсивность напряжений; χ – параметр, $(0 \leq \chi \leq 1)$.

Параметр χ отражает вид напряженного состояния (жесткость нагружения). В [12] приведены рекомендации по выбору значения χ для различных материалов, в том числе жаропрочных сталей, применяемых в турбостроении. Для стали Р2МА рекомендации отсутствуют, поэтому на основании результатов экспериментов [11, 12] для материалов аналогичного назначения были выбраны значения в диапазоне $[0.2 \dots 0.4]$. Расчеты показывают, что наилучшее совпадение с данными экспериментов получается при $\chi = 0.2$.

Функции $H(\sigma_i)$, $Q(\sigma_e)$, $\alpha(\sigma_i)$ и константы a , b , β , γ , δ определяются по экспериментальным данным.

Точка над символом в уравнениях (1)–(3) означает дифференцирование по времени. Штрихами помечены девиаторы напряжений.

Скаляр ω является внутренним параметром состояния и отражает увеличение скорости ползучести на третьей стадии, вызванное ростом внутризеренных повреждений и заканчивающееся вязким разрушением. Кинетическое уравнение (2) основано

на предположении, что внутризеренная поврежденность пропорциональна удельной рассеянной работе ползучести. Векторный параметр $\bar{\psi}$ описывает межзеренную поврежденность, связанную с зарождением и ростом микротрещин по границам зерен металлов с ориентацией в основном в плоскостях, перпендикулярных к направлению растяжения. Считается, что растрескивание по границам зерен, описываемое уравнением (3), не влияет на процессы ползучести и внутризеренной повреждаемости [11].

Концентрация напряжений является частой причиной зарождения трещины и дальнейшего разрушения, особенно для конструкций, работающих при напряжениях, близких к пределу текучести. В таких конструкциях в концентраторах возникают зоны пластичности, что требует определения упругопластических напряжений и деформаций.

Нейбер [13] предложил теорию концентрации напряжений для призматического тела, где установил связь между номинальными напряжениями и деформациями и соответственно напряжениями и деформациями в вершине концентратора через упругие напряжения и коэффициенты концентрации. Обобщение метода Нейбера, предложенное Хофманом и Сигером [7–8], относится к задачам для сложного напряженного состояния при пропорциональном нагружении.

Метод Нейбера модифицируется заменой одноосных напряжений и деформаций эквивалентными напряжениями и деформациями

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^y \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^y = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)},$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}, \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}$ – эквивалентные упругопластические напряжения и деформации в зоне концентрации, $\sigma_{\text{ЭКВ}}^y, \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^y$ – те же напряжения и деформации в упругой постановке.

Изображающая точка для полученных упругопластических напряжений и деформаций должна лежать на диаграмме деформирования, имеющей вид

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} = f(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}).$$

Произведение $\sigma_{\text{ЭКВ}}^y \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^y$ равно значению $(\sigma_{\text{ЭКВ}}^y)^2/E$, где E – модуль упругости материала. При этом величина $\sigma_{\text{ЭКВ}}^y$ определяется из упругого решения для каждого конечного элемента.

Зависимость $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} = f(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)})$ отражает пластические свойства материала и известна из опытов на растяжение.

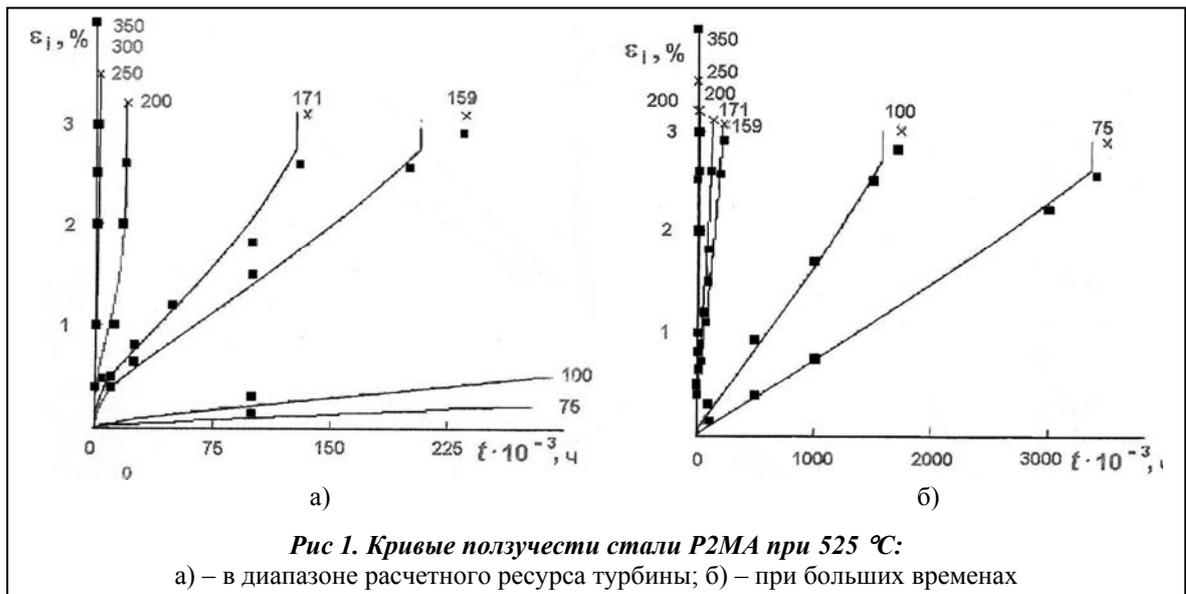
Разрешающая система уравнений содержит неизвестные $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}$ и $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}$ и имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{(\sigma_{\text{ЭКВ}}^y)^2}{E} &= \sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} \\ \sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)} &= f(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}) \end{aligned} \quad (4)$$

Величина упругопластических эквивалентных напряжений и деформаций находится из решения системы уравнений (4).

В данной работе обобщенный метод Нейбера применяется для перерасчета эквивалентных напряжений σ_e в выражении для межзеренной поврежденности (3). Межзеренная поврежденность, ответственная за хрупкое разрушение, вычисляется исходя из значения эквивалентного напряжения $\sigma_e = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{(y-n)}$.

Начальная задача решается методом Эйлера, краевая – методом конечных элементов. В случае достижения поврежденностью критического значения в одном или нескольких конечных элементах на некотором шаге считается, что происходит разрушение материала и макротрещина продвигается на размер этих конечных элементов. Конечные элементы, по которым произошло разрушение, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Чтобы порядок системы разрешающих уравнений не изменялся и не появлялись отдельные узлы, не связанные с остальными, исключение элементов осуществляется уменьшением их жестко-



стных характеристик до малой величины. Эта величина выбирается таким образом, чтобы конечные элементы, по которым «прошла» трещина, практически не оказывали влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Расчет роста трещины в пластине с надрезом и плоском фрагменте обода диска из стали P2MA

Описанная методика применяется для численного моделирования роста трещины в стальной пластине при растяжении, для материала которой имеются экспериментальные данные по ползучести образцов вплоть до разрушения и данные о зависимости скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений в условиях ползучести.



Кривые ползучести для стали P2MA [14, 15], полученные при 525 °C, приведены на рис. 1.

В связи с симметрией пластины относительно оси z при расчете рассматривается половина пластины, на нижнем краю задается соответствующее условие симметрии. В точке с координатами z = 150 мм, y = 0 задаются нулевые перемещения в направлении оси z, что позволяет избежать смещения пластины как жесткого целого. На верхнем краю приложена нагрузка интенсивностью σ.

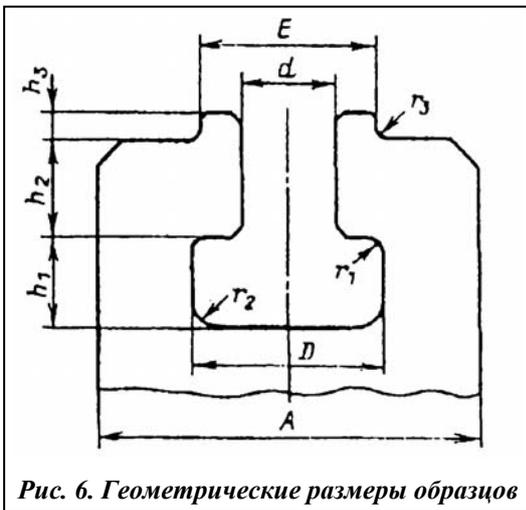
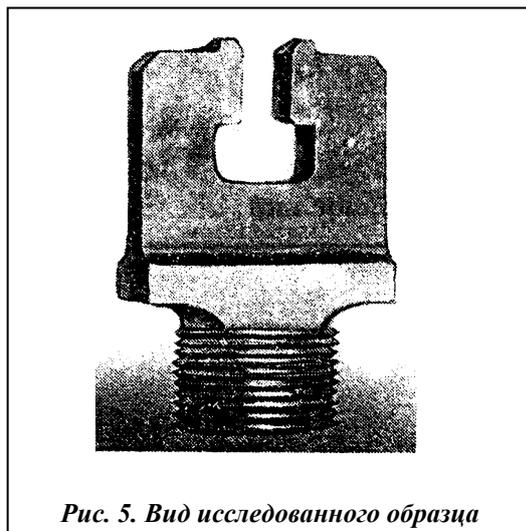
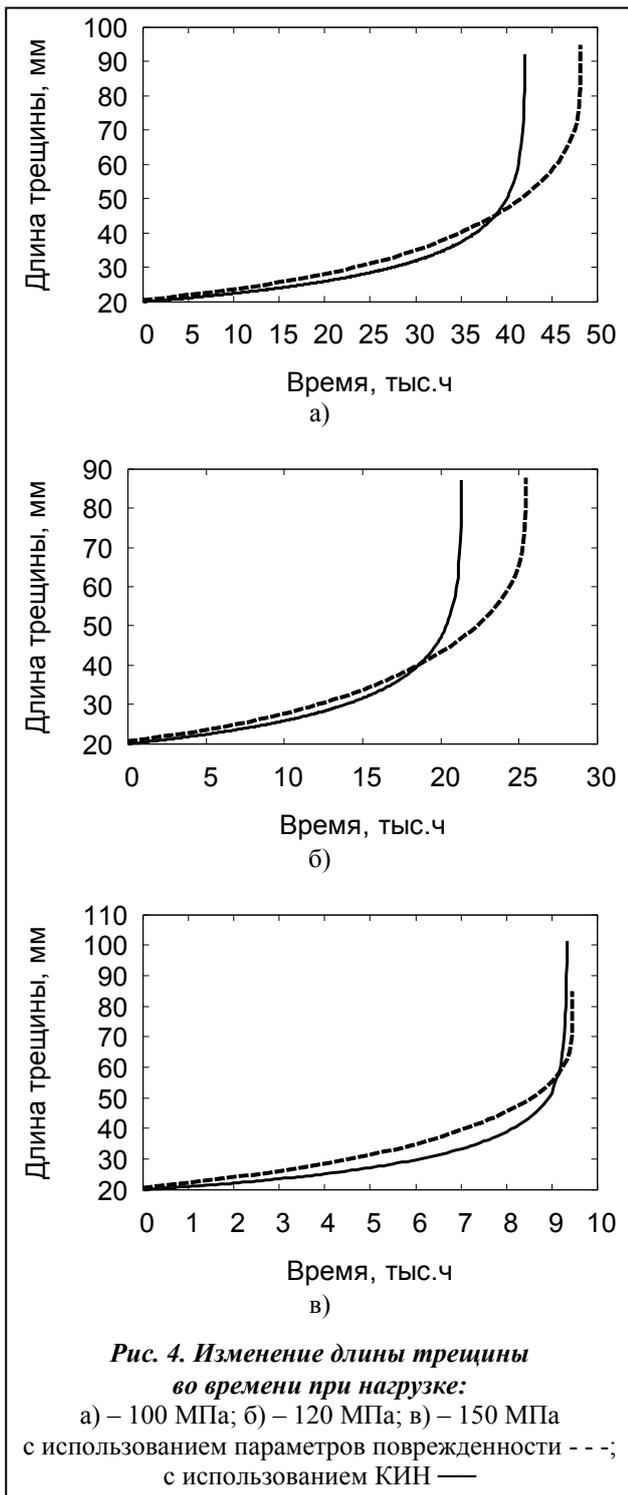
На рис. 2 приводится расчетная схема пластины с надрезом под действием растягивающей нагрузки.



Температура пластины 525 °C, материал – сталь 25X1M1Ф (P2M).

На рис. 3 приводится конечно-элементная сетка в зоне вершины надреза, где действуют максимальные растягивающие напряжения и где со временем зарождается трещина.

Выполняется численное моделирование роста трещины методом конечных элементов с перерасчетом σ_e (4) по формулам (5). Геометрические размеры образцов позволяют считать на-



пряженное состояние, отвечающее плоской деформации пластины [16]. Для сравнения выполнен альтернативный расчет по методике [17], основанной на уравнении типа Пэриса с использованием интерполяционного метода Овчинникова.

На рис. 4 приводятся результаты расчетов для трех уровней нагружения. Данные по росту трещины, полученные по предложенной методике, близки к численному решению по методике [17].

В [18] представлены результаты исследований по оценке длительной прочности плоских фрагментов ободов из стали 25Х1М1Ф при температуре испытаний 525°С (рис. 5). Время разрушения определялось на основании испытаний 30 образцов двух типоразмеров. Внешний вид образца и его геометрические параметры показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Численные значения геометрических параметров в миллиметрах приведены в таблице.

Основные геометрические параметры образцов (толщина $b = 20$ мм)

Типоразмер	A	D	d	E	h_1	h_2	h_3	r_1	r_2	r_3
1	120	54	30	56	26,5	25	7	3	7	2
2	92	38	19	36	22,5	27	5	2	8	1,2

На рис. 7 показана расчетная схема плоского фрагмента обода диска, величина растягивающей нагрузки равна Q . При этом значения номинальных разрушающих напряжений σ_H^P определялись как частное от деления растягивающей нагрузки Q на площадь поперечного сечения обеих щек образца

$$(A - D)b, \text{ т. е. } \sigma_H^P = Q / (A - D)b.$$

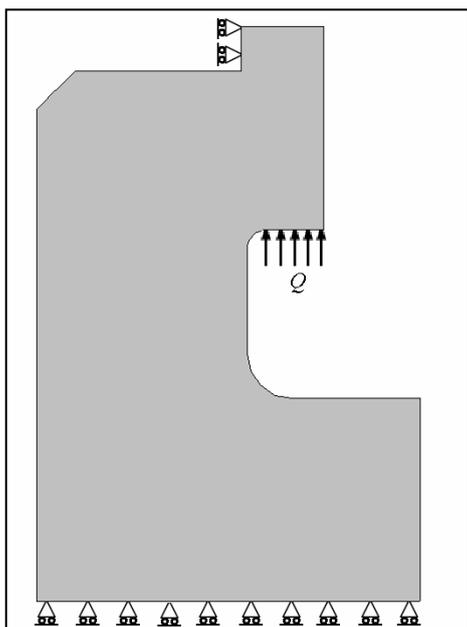


Рис. 7. Расчетная схема пластины

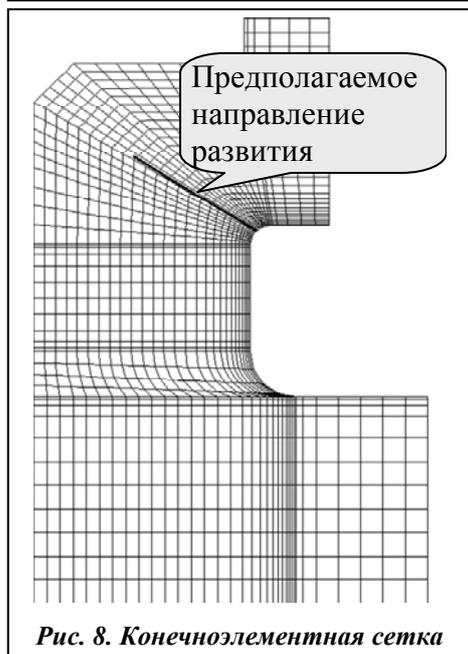


Рис. 8. Конечноэлементная сетка

Пример конечноэлементного разбиения и предполагаемое направление развития трещины исходя из направления максимальных растягивающих напряжений (утолщенная линия) приводятся на рис. 8. Экспериментально показано, что трещина появляется в зоне концентрации напряжений с появлением пластических деформаций в локальной области [18].

Моделирование роста трещины в плоском фрагменте обода диска выполняется методом конечных элементов на основе применения гипотезы плоских деформаций [16] исходя из геометрических параметров образцов обоих типоразмеров (таблица) (с перерасчетом σ_e (4) по формулам (5)). Расчеты показывают, что возникающие пластические деформации имеют место в области вершины трещины, последние появляются в зоне концентрации напряжений и проходят по границам зерен, что наблюдалось в экспериментах [18].

На рис. 9 приводятся результаты расчетной оценки роста трещины для фрагментов обода диска обоих типоразмеров. Затемненные точки на графиках соответствуют экспериментальным, а светлые (пунктирная линия) – расчетным значениям времен разрушения образцов для различных уровней нагружения. Лучшее соответствие расчетных результатов с опытными данными достигается при значении параметра χ , равном 0,2. Последнее соответствует полученному для пластины с надрезом.

Следует отметить, что при номинальных разрушающих напряжениях в образце, больших 110 МПа, с помощью предложенной методики получается завышенная оценка времени до разрушения. Это можно объяснить наличием значительных пластических деформаций, наблюдающихся в максимально нагруженном сечении [18] при высоких уровнях нагружения. Расчетная методика построена на получении эквивалентных пластических деформаций в области вершины трещины, а не всего сечения и не может быть распространена на случай, когда пластические деформации занимают большую часть рассматриваемой

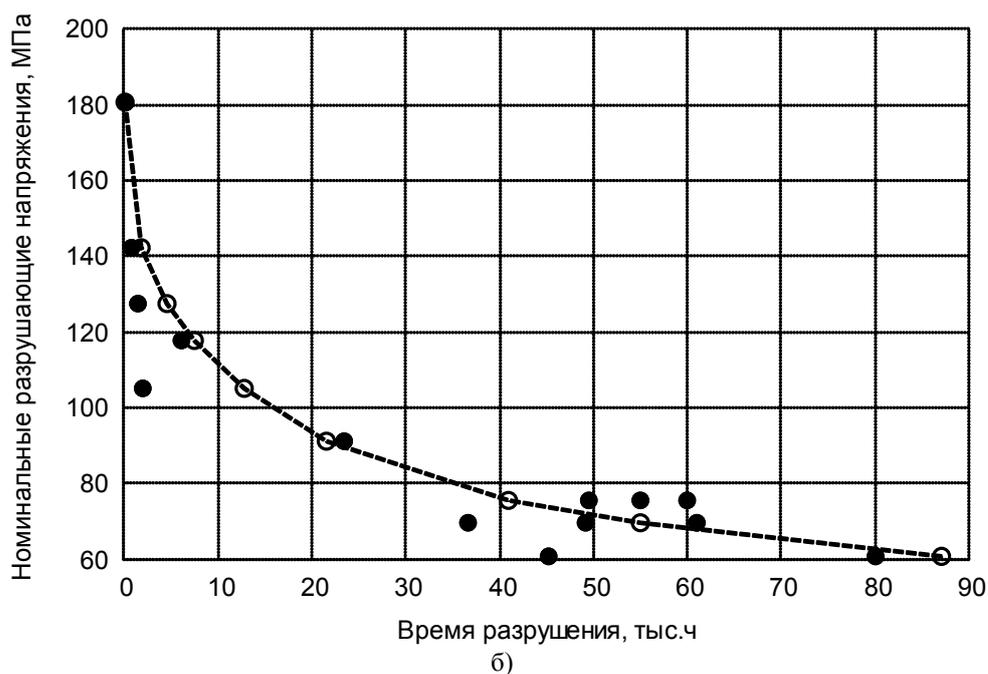
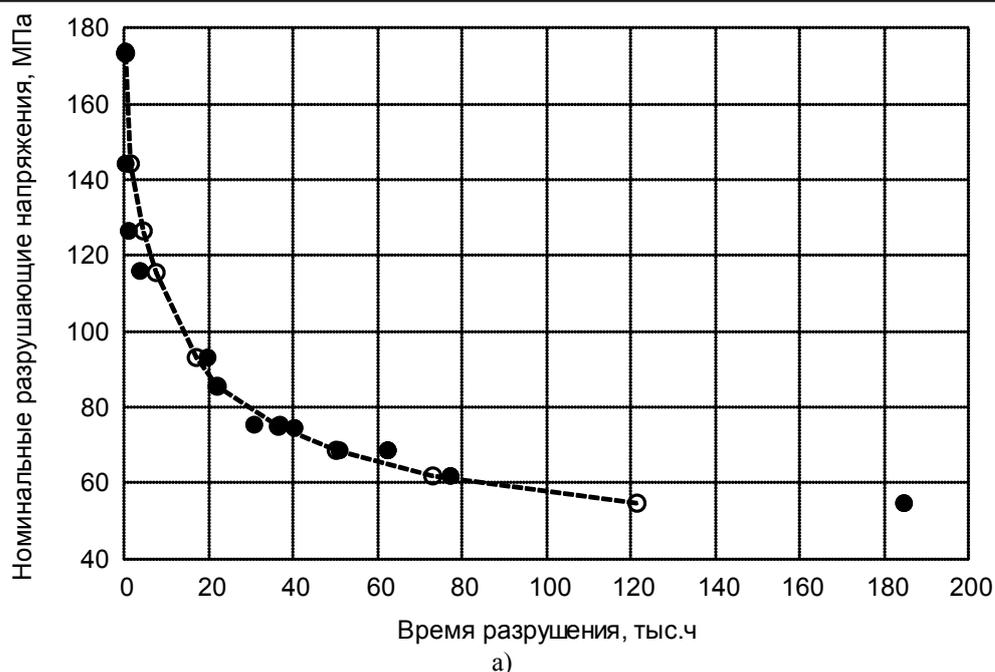


Рис. 9. Зависимость времени разрушения плоского фрагмента обода диска от величины номинальных разрушающих напряжений:
 а) – фрагмент типоразмера 1; б) – фрагмент типоразмера 2
 ---○--- – расчетное время разрушения, ● – экспериментальные значения

конструкции. Поэтому применение методики ограничивается уровнями напряжений, не вызывающими общих пластических деформаций.

Полученные данные расчетов соответствуют экспериментальным исследованиям [18], свидетельствующих, что при времени разрушения образцов больше 15 тыс. ч наблюдались только местные пластические деформации.

Выводы

В данной работе предложено решение задачи об оценке роста трещины в элементах конструкций при их ползучести на основе использования характеристик рассеянных повреждений. В отличие от решения упругопластической задачи для всего элемента предлагается использовать метод Нейбера для оценки пластических напряжений и деформаций в зоне трещины. Такой подход позволяет существенно сократить вычислительные затраты, что особенно важно для расчета сложных элементов или конструкций.

По предложенной методике выполнена оценка развития трещины при ползучести в пластине с надрезом и плоском фрагменте обода диска из стали P2MA. Сопоставление этих результатов с данными известных экспериментов, выполненных Ч. Г. Мустафиным, показало их соответствие для нагружения, не вызывающего общих пластических деформаций в элементе. Это позволяет применять предложенную упрощенную и более экономичную методику для решения подобных задач.

Применение методики для расчета развития трещины при ползучести сложных элементов требует дополнительных исследований.

Литература

1. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
2. *Сиратори М.* Вычислительная механика разрушения / М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
3. *Hayhurst D. R.* The use of continuum damage mechanics in creep analysis for design // *J. Strain Anal.* – 1994. – Vol. 29, № 3. – P. 233–240.
4. *Hall F. R.* Modelling of grain size effects in creep crack growth using a non-local continuum damage approach / F. R. Hall, D. R. Hayhurst // *Proc. R. Soc. Lond.* – 1991. – 433, A. – P. 405–421.
5. *Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе соотношений механики поврежденной среды* / С. А. Капустин, В. А. Горохов, В. Ю. Пантелеев, Ю. А. Чурилов // *Пробл. прочности и пластичности.* – 2009. – Вып. 71. – С. 36–44.
6. *Розрахункова оцінка живучості пластин при повзучості з використанням параметрів розсіяного пошкодження* / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, С. І. Панасенко // *Вісн. Тернопіль. нац. техн. ун-та.* – 2011. – Ч. 1. – С. 47–54.
7. *Hoffmann M.* A Generalized Method for Estimating Multiaxial Elastic–Plastic Notch Stresses and Strains. Part 1. Theory / M. Hoffmann, T. Seeger // *Trans. ASME. J. Eng. Mater. Technol.* – 1985. – Vol. 107. – P. 250–254.
8. *Hoffmann M.* A Generalized Method for Estimating Multiaxial Elastic–Plastic Notch Stresses and Strains. Part 2. Application and General Discussion / M. Hoffmann, T. Seeger // *Trans. ASME. J. Eng. Mater. Technol.* – 1985. – Vol. 107. – P. 255–260.
9. *Малинин Н. Н.* К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением / Н. Н. Малинин, Г. М. Хажинский // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела.* – 1969. – № 3. – С. 148–152.
10. *Шульженко Н. Г.* Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин // *Пробл. машиностроения.* – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 71–81.
11. *Писаренко Г. С.* Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев // Киев: Наук. думка, 1969. – 415 с.
12. *Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Справочник* / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский // Киев: Наук. думка, 1983. – 366 с.
13. *Neuber H.* Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Non-Linear Stress Strain Law / H. Neuber // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* – 1961. – Vol. 28. – P. 544–550.
14. *Костюк А. Г.* Прочность цельнокованных роторов турбин мощностью 200, 300 и 800 МВт производства ЛМЗ при длительном статическом нагружении / А. Г. Костюк, А. Д. Трухний // *Теплоэнергетика.* – 2004. – № 10. – С. 45–52.
15. *Котли, турбіни і трубопроводи теплових електростанцій. Властивості сталей теплоенергетичного устаткування: Проект стандарту.* – Київ: Мін-во палива та енергетики України, 2008. – 263 с.
16. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1986. – 512 с.

17. Шульженко Н. Г. Оценка живучести высокотемпературных элементов турбомашин с трещинами / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, И. И. Мележик // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2004. – № 19. – С. 153–160.
18. Мустафин Ч. Г. Оценка длительной прочности элементов роторов паровых турбин // Теплоэнергетика. – 1998. – № 3. – С. 56–60.

Поступила в редакцию
06.03.12

УДК 621.125

В. Л. Швецов
В. А. Литовка
И. А. Пальков
С. А. Пальков

ОАО «Турбоатом»,
(г. Харьков, e-mail: palkoff@inbox.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния соединения диска 2-й ступени цилиндра среднего давления паровой турбины в районе замковой лопатки методом конечных элементов. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану з'єднання диска 2-го ступеня циліндра середнього тиску парової турбіни в районі замкової лопатки методом скінченних елементів. Отримані результати порівнюються з експериментальними даними.

Введение

Эксплуатационная надежность турбоагрегата, особенно при нестационарных режимах работы, в значительной мере зависит от прочности элементов лопаточного аппарата, в частности замковых соединений.

Для оценки несущей способности замковых соединений рабочих лопаток необходимо знать действительные напряжения, возникающие при эксплуатации. Расчетное определение напряжений аналитическими методами теории упругости в соединениях подобного типа, имеющих сложную пространственную форму и работающих в условиях сложного силового и теплового нагружения, может дать результаты, значительно отличающиеся от действительных значений из-за несовершенства расчетной модели, неточного определения граничных условий и т.д. Эффективным методом исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов энергетического оборудования является натурная тензометрия, позволяющая получить действительные значения напряжений [1]. Однако применимость этого метода также ограничена, поскольку проведение натуральных испытаний требует достаточно больших денежных затрат и не все зоны исследуемой конструкции могут быть доступны для установки тензодатчиков. Например, практически невозможно установить тензодатчики на опорных поверхностях замкового соединения.

В связи с этим при исследованиях НДС сложных конструкций энергетического оборудования представляется оптимальным применение современных численных методов, основанных на методе конечных элементов (МКЭ) [2]. МКЭ позволяет учесть сложную геометрию объекта, произвольно изменяющиеся во времени граничные условия, неоднородность материала и зависимость его свойств от температуры, односторонние взаимодействия деталей и другие факторы.