

ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ТА ПАРАМЕТРІВ РОСТУ ОСЬОВОЇ ТРІЩИНИ В КІЛЬЦЕВОМУ ЗВАРНОМУ ШВІ ТРУБОПРОВОДУ

В. В. КИРИЧОК, В. М. ТОРОП

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: torop@paton.kiev.ua

Розглянуто проблему оцінки коефіцієнтів інтенсивності напружень в області зони залишкових зварювальних напружень. Запропоновано спільне застосування програмних комплексів Ansys Workbench та Abaqus/CAE і компілятора Python для точного визначення параметрів тріщиностійкості трубопроводів та посудин тиску. На прикладі трубного зразка 133×13 мм проведено моделювання процесу зварювання та наступного розкриття напівеліптичної тріщини в зоні залишкових напружень. Проведено аналіз можливого підростання дефекту від дії циклічних навантажень в області зварного шва та виявлено найбільш небезпечні зони по розташуванню осьових тріщин. Бібліогр. 6, рис. 5.

Ключові слова: коефіцієнт інтенсивності напружень, метод скінченних елементів, залишкові напруження, тріщина, скрипт, зварний шов

В зварних швах трубопроводів та посудин тиску, що відпрацювали значну частину ресурсу, часто виявляють тріщиноподібні дефекти. Причиною їх утворення зазвичай є механічна, структурна та хімічна неоднорідність, корозія, статичні та циклічні навантаження. Для того, щоб визначити, чи може трубопровід експлуатуватися з виявленим дефектом, необхідно для наявної тріщини оцінити її коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), J -інтеграл чи критичне розкриття тріщини. Для зони, що розташована далеко від зварного шва, створені методики, що дають можливість досить точно оцінити ці параметри. Проте в області зварного шва утворюються пластичні деформації, які є причиною залишкових напружень і мають нерівномірний розподіл. Вони залежать від властивостей матеріалу, геометрії труби та режиму зварювання. Ці фактори не дають можливості оцінити КІН з мінімальними похибками. На даний момент існує стандартизована методика [1] по визначенню цього параметра. Вона передбачає визначення K_I шляхом суперпозиції робочої складової K_I та складової із залишкових напружень. Недоліком цього алгоритму є те, що він не передбачає особливості перерозподілу залишкових напружень після навантаження, не враховує параметри зварювання та не дає точної інформації щодо того, яку саме область слід розглядати як зварний шов.

В даній роботі викладена уточнена методика, з використанням якої КІН K_I можна оцінити методом скінченних елементів. Для цього необхідно провести моделювання термічного циклу зварю-

вання, та розв'язати на основі нього задачу залишково-напружено-деформованого стану. Після цього потрібно оцінити, яким чином пройде перерозподіл напружень після внесення тріщини. Аналітичне визначення залишкового напружено-деформованого стану після зварювання є складною проблемою, але сьогодні маємо вибір програмних інструментів, навіть готових підпрограм в відомих програмних комплексах скінченно-елементного аналізу, за допомогою яких його можна порахувати з високою точністю. Проте для моделювання тріщини, яка розкриється на зразку після вирішення тепломеханічної задачі, необхідно застосування особливих прийомів. Загалом це можливо зробити за допомогою програмних комплексів Ansys та Abaqus. На жаль, напряму реалізувати дану задачу в зручному для користувача інтерфейсі Ansys Workbench чи Abaqus/CAE неможливо, оскільки більшість команд, які потрібно при цьому транслювати до вирішувача, в них відсутня.

Пряме вивчення задачі з тріщиною, що з'являється на останньому кроці алгоритму, можна реалізувати з використанням параметричного моделювання в середовищі APDL (Ansys Parametric Design Language), робота в якому передбачає скриптування мовою, що подібна до FORTRAN. Інший шлях — це використання вирішувача Abaqus/Standard з паралельним параметричним моделюванням мовою FORTRAN. Обидва методи передбачають необхідність текстового програмування моделі і через це для більшості користувачів є занадто складними в реалізації. Тому створення особливої методики, яка б дала змогу

оцінити процес тріщиноутворення з високою точністю без параметричного моделювання, представляє значний практичний та науковий інтерес.

В роботі наведено результати вдалого поєднання можливостей Ansys Workbench та Abaqus/CAE для отримання необхідних параметрів тріщиностійкості. Задача вирішувалася на прикладі труби 133×13 мм, що виготовлена із сталі 20. Механічні та фізичні властивості матеріалу зразка, а також їх залежність від температури, моделювалися за допомогою програми «JMatPro» (цей модуль дозволяє отримати широкий спектр властивостей матеріалу в залежності від його хімічного складу та структури). Також бралася до уваги те, що характеристика тріщиностійкості (в'язкість руйнування) K_{Ic} для гарячекатаних трубних зразків зі сталі 20 складає близько $160 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, а порогове значення K_{th} приймали рівним $8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ [2].

Відповідно до роботи [3] сталеві трубопроводи з товщиною стінки до 16 мм і межею текучості до 600 МПа не схильні до крихкого руйнування. Проте, якщо коефіцієнт інтенсивності напружень перевищує значення K_{th} в області змінних навантажень, то слід очікувати підростання тріщини втоми. Процес росту тріщини втоми описується рівнянням Уолкера [2]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)^{n(1-\gamma)}} \quad (1)$$

де da/dN — це швидкість підростання тріщини за 1 цикл; ΔK — розмах КІН складової K_I ; R — коефіцієнт асиметрії циклу по КІН; n, C, γ — константи матеріалу.

Для моделювання термічного циклу зварювання застосовувався Abaqus/CAE спільно зі скриптом Python [4] (загалом підпрограми Python мають ті ж можливості, що й інтерфейс CAE, проте їх зручно застосовувати для автоматизації побудови моделі з великою кількістю операцій). Для зменшення часу розрахунку розглядалася одна восьма частина труби з прикладенням до неї симетричних граничних умов (рис. 1). Термічний цикл моделювався для двохпрохідного зварювання. Перший прохід умовно виконувався по внутрішньому радіусу труби, другий після охолод-

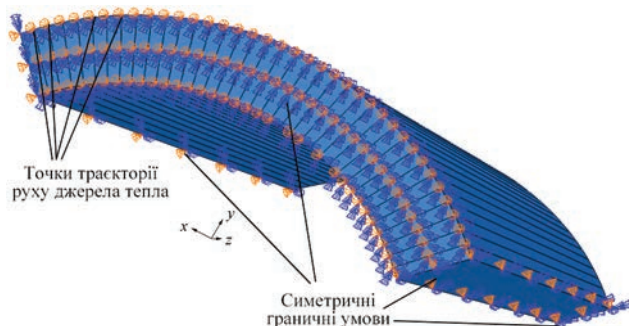


Рис. 1. Розрахункова модель тепломеханічної задачі

ження першого — по зовнішньому. Для імітації руху дуги та енерговиділення від дугового процесу по траєкторії зварювання в масивах точок почергово активувалися, деякий час діяли і деактивувалися точкові джерела тепла. Детально дана методика описана в роботі [5]. За допомогою скрипту Python вдалося створити густе автоматичне розбиття траєкторії руху дуги таким чином, щоб мінімізувати «ривкоподібність» цього процесу.

Результат тепломеханічної задачі по кільцевим напруженням показано на рис. 2. Після імітації процесу зварювання до труби було прикладено робочий тиск величиною 22,5 МПа.

При навантаженні звареної труби робочим внутрішнім тиском виявилось, що додаткова пластична деформація в околі зварного шва практично відсутня, що дає право на наступному етапі знаходження КІН застосувати для даного зразка пружну модель.

Внесення тріщини в модель реалізували за допомогою ANSYS Workbench. Для цього було використано процедуру мапінгу полів напружень з першого етапу. Додатково було побудовано частину труби в осьовому напрямку для можливості моделювати тріщину при несиметричному її розташуванні відносно шва. Якщо область, що розглядається, ніяк не закріпити, то внесені за допомогою мапінгу напруження перерозподіляться і ми не зможемо отримати адекватну картину. Тому до розглядуваних зразків було застосовано жорстке закріплення по торцях та циліндрична фіксація в радіальному напрямку. Це дало можливість залишити залишкові напруження та забезпечити можливість розкриття берегів тріщини при її внесенні. В даному випадку похибка перенесення компоненти кільцевих залишкових напружень S11 з Abaqus до Ansys після врівноваження напружень не перевищує 10 %.

В роботі розглядався постульований осьовий дефект напівеліптичної форми зовні труби довжиною 16 та глибиною 8 мм. Тріщина почергово розташовувалася в центрі шва і на різних відста-

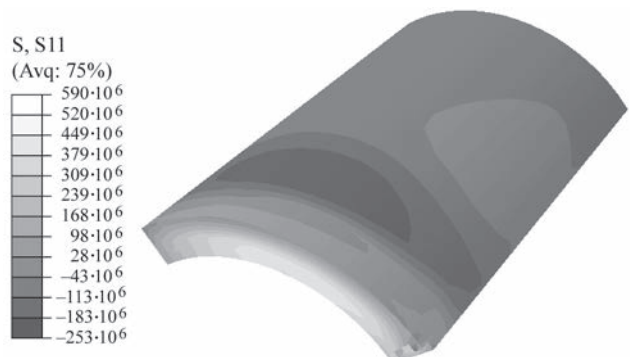


Рис. 2. Розподіл кільцевих залишкових напружень після зварювання (Па)

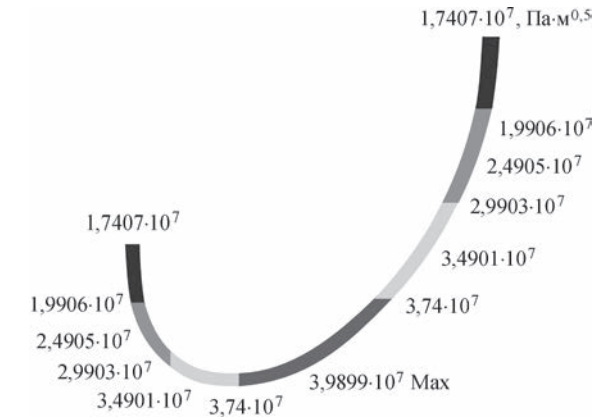


Рис. 3. Розподіл КІН тріщини від залишкових напружень

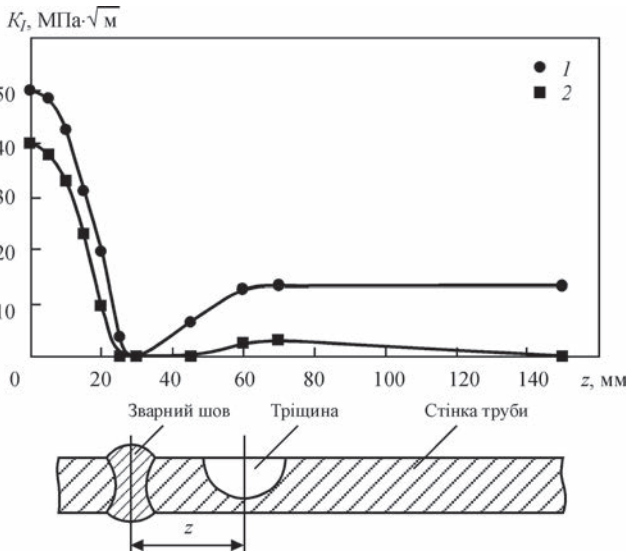


Рис. 4. Розподіл максимального КІН по осі труби в околі зварного шва (див. схему): 1 — зварювання+робочий тиск; 2 — зварювання

нях від нього в зоні дії залишкових напружень. Для прикладу, результати розподілу КІН від залишкових напружень в центрі шва представлено на рис. 3.

При віддаленні тріщини від зварного шва максимальний КІН спочатку зменшується до 0, а потім збільшується. Розподіл цієї величини в залежності від відстані до центру показано на рис. 4.

Наступним завданням стало оцінити, яким чином буде змінюватися КІН в зоні термічного впливу при прикладанні до труби робочого тиску. Для цього проводилося аналогічне моделювання з тою різницею, що на першому етапі в Abaqus після зварювального процесу прикладався внутрішній тиск. Розподіл КІН в залежності від відстані до центру шва при робочому навантаженні показано на рис. 4.

Для трубопроводу було проведено оцінку величини підростання дефекту за один цикл по формулі (1) в залежності від розташування тріщини щодо осі шва (рис. 5). При цьому величини n , c , γ отримано з графіків роботи [6]. Відповідно до роботи [6] ці константи для різних феритно-пер-

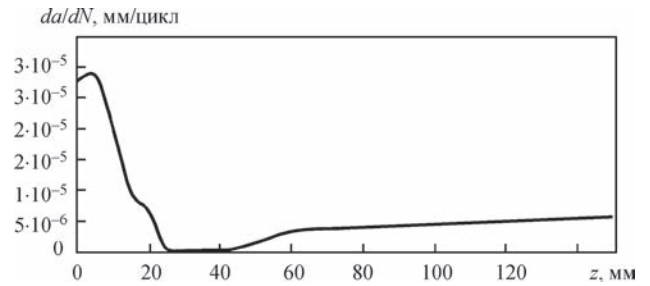


Рис. 5. Розподіл швидкості росту тріщини в залежності від її розташування в околі зварного шва

літних сталей практично не відрізняються. Для розглядуваного зразка при зварюванні мартенситна фаза майже не утворюється, тому для шва приймалися ті ж параметри тріщиностійкості, що і для основного металу. Результати розрахунків показали, що в зоні термічного впливу розмахи ΔK_I є меншими, ніж для безшовної області труби, але асиметричність циклу сприяє тому, що швидкість підростання дефекту в області зварного шва в декілька разів перевищує швидкість росту в області труби, віддаленій від зони розташувань пластичних деформацій.

Висновки

Приведено методику визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в зоні термічного впливу з використанням методу скінченних елементів. Представлені можливості різних програмних засобів щодо моделювання процесу зварювання та визначення полів напружень трубних зразків з дефектами. Наведені результати розподілу КІН та швидкостей підростання дефекту в залежності від відстані тріщини до кільцевого зварного шва. Аналітично показано, що у випадку припущення однорідності механічних властивостей основного металу, зони зварного шва і зони термічного впливу осьові дефекти в зоні зварних з'єднань трубопроводів та посудин тиску є більш небезпечними, ніж тріщини в довільній точці труби, особливо при циклічних видах навантажень.

Список літератури

1. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. *Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.*
2. Stephens R.I., Ali Fatemi, Stephens R.R., Fuchs H.O. (2001) *Metal fatigue in engineering (2-nd edition)*. New York, John Wiley & Sons.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. (1989) *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.* Москва, Энергоатомиздат.
4. (2010) *Abaqus Scripting Reference Manual*. USA, Providence, RI.
5. Яхно Б. О. (2013) *Розрахунок зварних з'єднань з використанням програмного комплексу Abaqus: методичні вказівки.* Київ, НТУУ «КПІ».
6. Suryanarayana C. (2003) *Experimental techniques in material and mechanics*. Boca Raton, USA, Taylor & Francis Group.

References

1. DSTU-N B.2.3-21:2008. Determination of residual strength of main pipelines with defects [in Ukrainian].
2. Stephens R.I., Ali Fatemi, Stephens R.R., Fuchs H.O. (2001) *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons.
3. PNAEG-7-002-86 (1989) *Codes of design on strength of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
4. (2010) *Abaqus Scripting Reference Manual*. USA, Providence, RI.
5. Yakhno B.O. (2013) *Calculation of welded joints using program complex Abaqus: Guidelines*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
6. Suryanarayana C. (2003) *Experimental techniques in material and mechanics*. Boca Raton, USA, Taylor & Francis Group.

В. В. Киричок, В. М. Тороп

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: torop@paton.kiev.ua

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ
КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ
И ПАРАМЕТРОВ РОСТА ОСЕВОЙ ТРЕЩИНЫ
В КОЛЬЦЕВОМ СВАРНОМ ШВЕ ТРУБОПРОВОДА

Рассмотрена проблема оценки коэффициентов интенсивности напряжений в области зоны остаточных сварочных напряжений. Предложено совместное применение программных комплексов Ansys Workbench и Abaqus/CAE и компилятора Python для точного определения параметров трещиностойкости трубопроводов и сосудов давления. На примере трубного образца 133×13 проведено моделирование процесса сварки

и последующего раскрытия полуэллиптической трещины в зоне остаточных напряжений. Проведен анализ возможного подрастания дефекта от действия циклических нагрузок в области сварного шва и выявлены наиболее опасные зоны по расположению осевых трещин. Библиогр. 6, рис. 5.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, метод конечных элементов, остаточные напряжения, трещина, скрипт, сварной шов

V.V. Kyrychok, V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ENGINEERING APPROACH TO DETERMINATION
OF STRESS INTENSITY FACTOR AND PARAMETERS
OF GROWTH OF AXIAL CRACK
IN CIRCUMFERENTIAL WELD OF PIPELINE

The problem of evaluation of stress intensity factors in the zone of residual welding stresses was considered. The joint application of the software packages Ansys Workbench and Abaqus/CAE and the compiler Python for accurate determination of parameters of crack resistance of pipelines and pressure vessels was proposed. On the example of the pipe specimen 133x13, the simulation of welding process and subsequent opening of semi-elliptic crack in the zone of residual stresses was carried out. The analysis of the possible increment of defect from the action of cyclic loads in the weld region was performed and the most dangerous zones were found according to the location of axial cracks. 6 Ref., 5 Fig.

Key words: stress intensity factor, finite elements method, residual stresses, crack, script, weld

Надійшла до редакції 25.04.2017

THE HELLENIC SOCIETY OF NDT (HSNT)
National Non Profit Society, Member of EFNDT and ICNDT
&
THE WELDING GREEK INSTITUTE (WGI)
National Non Profit Institute, Member of EWF and IIW

**1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018
1st ICWNDT-2018**



22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес:

HSNT, PO BOX 64066, Zographou 157 10, Athens, Greece.
Phone-Fax: (+30) 210-772 3759, Website: www.hsnt.gr. E-mail: hsnt@hsnt.gr
WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.
Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,
Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr