

Выводы

В данной работе рассмотрена теория учета резонансных частот колебаний механических систем, представляющих собой КС с одной степенью свободы с использованием метода качающейся частоты. На основе этой теории с учетом работ [5–8] созданы способы и устройства ускоренной оценки резонансных частот механических систем и метод их вибродиагностики.

Литература

1. *Испытательная техника*: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
2. Божко А. Е. О процессах при изменении частот колебаний в электромагнитных вибровозбудителях / А. Е. Божко // Доп. НАН України. – 2006. – № 4. – С. 82–91.
3. Кац А. М. Вынужденные колебания при прохождении через резонанс / А. М. Кац // Инж. сб. – 1947. – Т. III, вып. 2. – С. 100–125.
4. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1958. – 608 с.
5. А. с. 254310 А1 СССР, МПК G 01 H 1/00. Устройство для обнаружения резонансной частоты объекта / А. Е. Божко, Е. А. Личкатый, И. Д. Пузько, З. А. Иванова. – Оpubл. 30.06.86. Бюл. № 32.
6. А. с. 1603195 А1 СССР, МПК G 01H 13/00. Устройство для определения резонансной частоты объекта / А. Е. Божко, Е. А. Личкатый, З. А. Иванова. – Оpubл. 30.10.90. Бюл. № 40.
7. А. с. 1746226 А1 СССР, МПК G 01H 17/00. Способ определения характера механической системы и устройство для его осуществления / А. Е. Божко, Е. А. Личкатый. – Оpubл. 07.07.92. Бюл. № 25.
8. *Пат. України 17164 А*, МПК G 01H 1/00. Спосіб вібродіагностики турбомашин / А. Е. Божко, А. І. Федоров, В. І. Бєльх. – Оpubл. 31.10.97. Бюл. № 5.

Поступила в редакцию
01.02.13

УДК 539.3

І. Львов

К. Науменко

Х. Альтенбах

Університет Отто-фон-Герике

(Німеччина, Магдебург, e-mail: ivan.lvov@ovgu.de)

МІКРО- ТА МАКРОАНАЛІЗ ПОВЗУЧОСТІ ТА ПОШКОДЖУВАНОСТІ У БАГАТОПРОХІДНИХ ШВАХ

Розглянуто мікроструктуру багатопрохідного шва, яка складається зі стовпчастих, крупнозернистих і дрібнозернистих зон. Матеріали цих зон вважаються ізотропними. Властивості непружної поведінки металу шва мають загальний тип симетрії і описуються за допомогою анізотропної моделі повзучості. Проведені чисельні дослідження мінімального представницького об'єму за допомогою скінченноелементного комплексу ABAQUS.

Рассмотрена микроструктура многопроходного шва, которая состоит из столбчатых, крупнозернистых и мелкозернистых зон. Материалы этих зон считаются изотропными. Свойства неупругого поведения металла шва имеют общий вид симметрии и описываются с помощью анизотропной модели ползучести. Проведены численные исследования минимального представительского объема с помощью конечноэлементного комплекса ABAQUS.

Вступ

Досить часто зварні конструкції стають пошкодженими до передбачуваного ресурсу компонентів [1]. Однією з причин цього є різниця властивостей повзучості зварного шва та основного металу, несприятливі форми зварного шва, в результаті чого виникає концентрація напружень у зварному з'єднанні. Повзучість та пошкоджуваність у вигляді порожнеч і мікротріщин призводять до руйнування матеріалу. Типове зварне з'єднання складається з основного металу елемента конструкції, зони термічного впливу і металу шва. Елементи конструкції, що з'єднуються зварним швом, можуть бути виготовлені з однакового або різного матеріалу. Матеріали зварних з'єднань і основного матеріалу можуть також мати однакові або різні композиції. Але навіть для зварних швів, у яких відбувається зварювання металів з однаковим складом, поведінка при повзучості в основному металі, у зоні термічного впливу (ЗТВ) та у зварному матеріалі буде відрізнятися [2]. Таким чином, зварні конструкції є дуже складними гетерогенними структурами. Крім того, у разі багатопрхідного зварювання структура зварного металу також є неоднорідною. Вона складається зі зварних швів, що перекривають один одного, що призводить до створення ЗТВ в самому металі шва через процеси нагрівання й охолодження під час накладання наступного проходу на попередній. Однопрхідний зварний шов зазвичай складається зі стовпчастої структури, що виникає під час солідифікації. Однак у багатопрхідному зварюванні, коли в подальшому шар накладається поверх попереднього, частина його буде перекристалізовуватись і це створить крупно- та дрібнозернисту структуру [3]. Слід зазначити, що правила проектування зварних конструкцій під тиском ґрунтуються тільки на даних щодо часу до руйнування зварюваних матеріалів при одновісному навантаженні. Однак насправді такі конструкції працюють при багатовісних умовах напруженого стану. Всі ці фактори змушують брати до уваги анізотропію при моделюванні повзучості багатопрхідного зварювання.

Чисельні методи в аналізі конструктивних елементів, які працюють при підвищених температурах, широко використовуються в цей час тому, що вони показали себе як точні інструменти аналізу, особливо в тривимірному проектуванні. Метод скінченних елементів (МСЕ), серед інших, більш широко використовується в промисловості за рахунок наявності комерційних багатоцільових комплексів програмного забезпечення [4]. У цій статті комплекс Abaqus на основі МСЕ використаний для прогнозування поведінки зварних з'єднань на основі відомих параметрів матеріалу складових металу шва.

Математична модель анізотропної повзучості

Співвідношення швидкості деформації повзучості та напружень для анізотропних матеріалів ґрунтуються на припущенні існування потенціалу повзучості. Гіпотеза потенціалу повзучості широко використовується для моделювання механіки суцільних середовищ ізотропної і анізотропної повзучості [5]. У другій стадії повзучості швидкість деформації визначається через скалярний потенціал $W(\boldsymbol{\sigma})$ і закон течії

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{\sigma}}. \quad (1)$$

Для простого визначення потенціалу повзучості на основі одновісних випробувань на повзучість еквівалентне напруження σ_{eq} вводиться як скалярний аргумент $W(\sigma_{eq}(\boldsymbol{\sigma}))$. Закон Нортон–Бейлі використовується нижче для апроксимації співвідношень швидкості деформації та напружень

$$W = \frac{K}{n+1} \sigma_{eq}^{n+1}, \quad (2)$$

де матеріальні параметри K , n залежать від температури.

Значення еквівалентного напруження має бути незалежним від орієнтації системи координат. Форма еквівалентного напруження залежить від типу симетрії матеріалу. Матеріали стовпчастої, крупно- та дрібнозернистих зон вважаються ізотропними. У разі ізотропної повзучості еквівалентне напруження набуває форми за фон Мізесом

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{3}{2} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}, \quad (3)$$

де \mathbf{S} – девіатор тензора напружень

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \sigma_0 \mathbf{I} \quad (4)$$

та $\sigma_0 = \frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\sigma}$. Для потенціалу Нортон–Бейлі (2) закон течії набуває вигляду

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{3}{2} K \sigma_{eq}^{n-1} \mathbf{S}. \quad (5)$$

Макрохарактеристики повзучості еквівалентного континууму є анізотропними в загальному випадку. Тип симетрії еквівалентного середовища визначається геометричною структурою багатопрохідного зварювання та характеристиками повзучості компонентів. Для моделювання анізотропної повзучості еквівалентне напруження приймається в загальній квадратичній формі

$$\sigma_{eq}^2 = \boldsymbol{\sigma} \cdot {}^{(4)}\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (6)$$

де ${}^{(4)}\mathbf{B}$ – симетричний додатно визначений тензор четвертого рангу. Число незалежних компонент тензора залежить від класу симетрії еквівалентного континууму. Для більшості багатопрохідних швів геометрична структура мінімального представницького об'єму (МПО) дозволяє вважати еквівалентний континуум ортотропним тілом. У цьому випадку тензор ${}^{(4)}\mathbf{B}$ може бути поданий в базі ортонормованих векторів $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$, перпендикулярних площинам симетрії ортотропного твердого тіла

$${}^{(4)}\mathbf{B} = b_{ijkl} \mathbf{n}_i \otimes \mathbf{n}_j \otimes \mathbf{n}_k \otimes \mathbf{n}_l. \quad (7)$$

У цьому разі ${}^{(4)}\mathbf{B}$ містить в собі 9 ненульових незалежних компонентів b_{ijkl} (включаючи K у законі Нортон–Бейлі). З еквівалентним напруженням (6) рівняння сталої повзучості для ортотропних твердих тіл можна записати таким чином:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = K \sigma_{eq}^{n-1} {}^{(4)}\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma}. \quad (8)$$

Закон повзучості для всіх мікроструктурних зон зварного шва відображає нестисливість матеріалів. Тому передбачається, що деформація повзучості не приводить до зміни об'єму еквівалентного континууму. Сферична частина тензора швидкості повзучості

$$\text{tr} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = K \cdot \sigma_{eq}^{n-1} \text{tr} [{}^{(4)}\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma}] = 0. \quad (9)$$

Припущення про незмінність об'єму зменшує число незалежних компонент тензора ${}^{(4)}\mathbf{B}$ до 6. Визначення незалежних констант матеріалу в еквівалентному напруженні і потенціалі повзучості для однорідного твердого тіла проводиться експериментально. Тільки для сталої стадії повзучості 6 незалежних напружених станів необхідно відтворити в цілях визначення 6 констант еквівалентних напружень. Крім того, для визначення параметра n в законі (8) декілька одноосьових випробувань на повзучість для різних сталих значень напруження повинні бути виконані. Проблема ідентифікації параметрів ускладнюється високим розкидом результатів тестів. Для однорідних матеріалів швидкості повзучості у зразках, вирізаних з одного стрижня, можуть відрізнятись на десять відсотків. У цьому випадку важко визначити, що різниця швидкості повзучості для зразків, вирізаних з того ж матеріалу в ортогональних напрямках, є результатом анізотропії або розкидом даних. Більш виразно анізотропія повзучості проявляється в гетерогенних матеріалах. Наприклад, у полімерних композитах, посилені волокнами, результати експериментів показують зовсім різні швидкості повзучості в напрямку волокон та ортогональному напрямку. Анізотропія повзучості виникає також в металі шва [6] на зразках, вирізаних в напрямках зварювання і поперечному напрямку. Для періодичних гетерогенних структур теоретичний метод усереднення дозволяє визначити ефективні властивості повзучості на базі відомих властивостей повзучості складових компонентів. Теоретичні визначення ефективних властивостей періодичних багатофа-

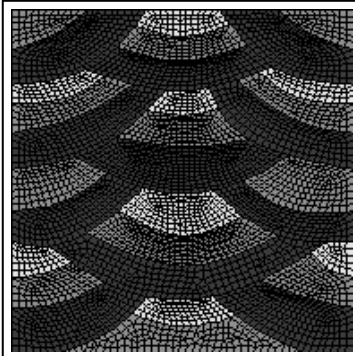


Рис. 1. Скінченноелементна модель МПО зварного шва

зних матеріалів має багато переваг у порівнянні з експериментальним дослідженням. Аналітичні або чисельні методи гомогенізації для періодичних середовищ дозволяють знаходити ефективні властивості повзучості для багатьох варіантів багатофазних структур. У цій статті МСЕ використовується для визначення усереднених параметрів закону повзучості багатофазного зварювання.

Чисельна процедура усереднення для багатофазних зварювань

Для моделювання мікроструктури багатофазного зварювання як еквівалентний континуум на макроскопічному рівні розглянуто МПО, створений як призматичне тіло з поперечним перерізом (рис. 1). Цей переріз розглядається як повторюваний елемент, періодично розташований в площині OXY . Вісь Z спрямована уздовж зварного шва. Властивості матеріалів зон металу шва вважаються ізотропними. Для опису повзучості у зонах металу зварного шва використовується закон повзучості Нортона (5).

Параметри матеріалів, використовуваних для (5), взято з [7] і наведено в табл. 1. Слід зазначити, що неможливо зробити зразки безпосередньо з дрібно- і крупно- зернистих зон незалежно один від одного, тому для цих зон термічного впливу властивості матеріалів приймаються рівними.

Таблиця 1. Параметри закону Нортона для зон зварного шва

Тип зони	$K, \text{МПа}^{-n}/\text{с}$	n
стовбчаста	$2,74 \cdot 10^{-21}$	7,86
крупнозерниста	$1,37 \cdot 10^{-20}$	7,86
дрібнозерниста	$1,37 \cdot 10^{-20}$	7,86

Закон повзучості для гомогенізованого континууму поданий через усереднені компоненти за представницьким об'ємом V

$$\langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle = K \langle \epsilon_{eq} \rangle^{n-1} b_{ijkl} \langle \sigma_{kl} \rangle; \quad (10)$$

$$\langle \sigma_{eq} \rangle = (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma})^{1/2}, \quad (11)$$

де $\langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle$ та $\langle \sigma_{kl} \rangle$ – усереднені швидкості деформацій повзучості і напружень, які відповідають одночасним макроскопічним швидкостям деформацій і напружень

$$\langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \dot{\epsilon}_{ij} dv; \quad \langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dv. \quad (12)$$

Для ідентифікації шести матеріальних констант в (10) повинні бути виконані 6 незалежних чисельних експериментів. Для цього 2D і 3D моделі МПО створено в скінченноелементному комплексі ABAQUS. Оскільки структура матеріалу зварного шва з досить великим числом проходів може вважатись періодичною, три типи представницького об'єму створено: еталонний (8 проходів); реалізація з в два рази більшим числом проходів і реалізація з вдвічі меншим числом проходів. У зв'язку з тим, що в різних зонах на мікрорівні поведінка при повзучості описується різними рівняннями, необхідно провести чисельні експерименти для визначення можливості апроксимації рівнянням (10) поведінки при повзучості на макрорівні.

Розглянемо чисельний експеримент, проведений над МПО по одновісному розтягуванню в напрямку 11. Середня швидкість повзучості $\langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle$ у разі одновісного розтягування пов'язана із середнім напруженням $\langle \sigma_{11} \rangle$ за такою формулою (якщо $b_{1111} = 1$):

$$\langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle = K \langle \sigma_{11} \rangle^n. \quad (13)$$

Усереднення за об'ємом напружень і деформацій може бути зведено до усереднення по поверхні поперечного перерізу МПО. Щоб знизити обчислювальні витрати при розрахунку усередненої деформації, можна використовувати рівняння Гріна

$$\langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle = \frac{1}{S} \iint_S \dot{\varepsilon}_{11} ds = \frac{1}{S} \iint_S \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} ds = \frac{1}{S} \oint_L \dot{u} dy = \frac{1}{ab} \int_0^b \dot{u} dy, \quad (14)$$

де S – площа поверхні МПО; L – периметр, x і y – координати в системі координат, яка збігається з 11 та 22 за напрямками, a й b – розміри МПО в Oxy системі координат. Аналогічні спрощення може бути зроблено для отримання напружень

$$\langle \sigma_{11} \rangle = \frac{1}{S} \iint_S \sigma_{11} ds = \frac{1}{ab} \int_0^a dx \int_0^b \sigma_{11} dy = \frac{1}{b} \int_0^b \sigma_{11} dy. \quad (15)$$

Спочатку необхідно визначити умови досягнення стану сталої повзучості для швидкості деформації. Серія аналізів повзучості над МПО проводилася під постійним рівномірним навантаженням у напрямку $\langle \sigma_{11} \rangle$ для різних рівнів часу. З результатів чисельного експерименту можна вибрати набір значень швидкостей деформації $\langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle$ для різних моментів часу t_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Значення швидкості деформації на макроскопічному рівні може бути отримано методом найменших квадратів

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{11i} \sqrt{t_i}}{\sum_{i=1}^N t_i^2}. \quad (16)$$

Для отримання ступеня в законі повзучості зроблено набір чисельних експериментів при різних рівнях напруження $\langle \sigma_{11} \rangle$. Результатом цієї серії M експериментів є набір $\langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle_i$ для різних значень напруження $\langle \sigma_{11} \rangle_i$, ($i = 1, 2, \dots, M$).

Для обробки результатів чисельного експерименту співвідношення (13) було інтерпретовано в логарифмічних координатах

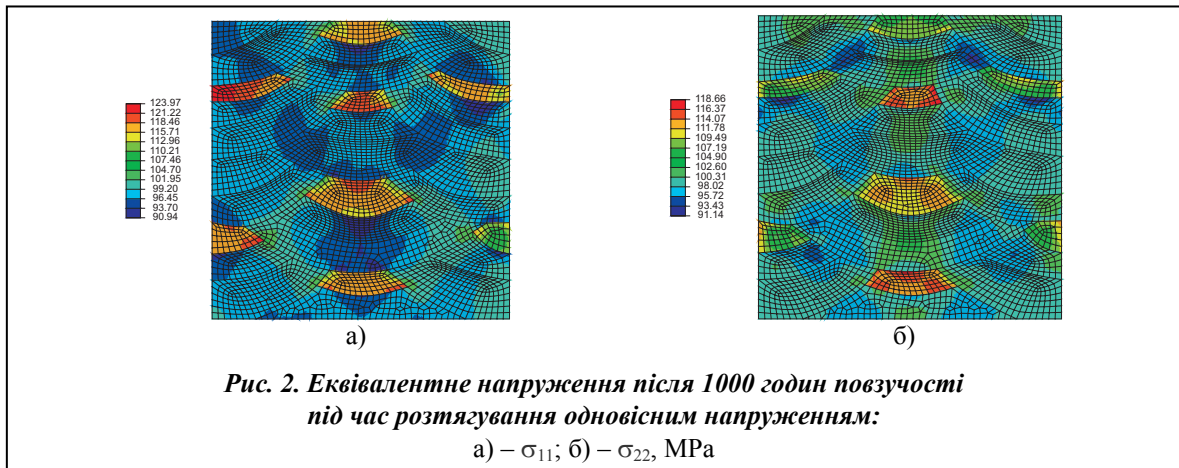
$$\ln \langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle = \ln K + n \ln \langle \sigma_{11} \rangle. \quad (17)$$

Параметри повзучості закону для гомогенних матеріалів визначаються шляхом обробки результатів чисельних експериментів з використанням методу найменших квадратів

$$n = \frac{\sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{11} \rangle_i \ln \langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle_i - N \sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{11} \rangle_i \ln \langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle_i}{\left(\sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{11} \rangle_i \right)^2 - N \left(\sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{11} \rangle_i \right)^2}, \quad (18)$$

$$\ln K = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^M \ln \langle \dot{\varepsilon}_{11} \rangle_i - n \sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{11} \rangle_i \right). \quad (19)$$

Решта параметрів тензора ⁽⁴⁾**B** може бути визначена шляхом обробки результатів чисельних експериментів з одновісно-напруженого стану інших типів. Наприклад, у одноосьовому аналізі розтягу уздовж осі OY напруженням σ_{22} закон повзучості еквівалентного матеріалу буде виглядати таким чином:



$$\langle \dot{\epsilon}_{22} \rangle = K b_{2222}^{\frac{n+1}{2}} \langle \sigma_{22} \rangle^n \quad (20)$$

Обробка результатів чисельного експерименту методом найменших квадратів дозволить отримати параметр b_{2222}

$$\ln \left(K \cdot b_{2222}^{\frac{n+1}{2}} \right) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^M \ln \langle \dot{\epsilon}_{22} \rangle_i - n \sum_{i=1}^M \ln \langle \sigma_{22} \rangle_i \right) \quad (21)$$

Аналогічно можуть бути визначені всі інші компоненти ⁽⁴⁾**В**. Результати розрахунку параметрів повзучості еквівалентного матеріалу подані в табл. 2.

Розподіли компонентів σ_{11} та σ_{22} на сталій стадії повзучості при чисельних експериментах по розтягуванню наведені на рис. 2 відповідно.

Таблиця 2. Параметри тензора В, помножені на К, МПа⁻ⁿ/с. n = 5,25

Параметри	8 проходів	16 проходів	4 проходи
b_{1111}	$1,64 \cdot 10^{-5,25}$	$1,61 \cdot 10^{-5,25}$	$1,66 \cdot 10^{-5,25}$
b_{2222}	$1,51 \cdot 10^{-5,25}$	$1,58 \cdot 10^{-5,25}$	$1,49 \cdot 10^{-5,25}$
b_{3333}	$1,16 \cdot 10^{-5,25}$	$1,18 \cdot 10^{-5,25}$	$1,20 \cdot 10^{-5,25}$
b_{1212}	$1,33 \cdot 10^{-5,25}$	$1,36 \cdot 10^{-5,25}$	$1,35 \cdot 10^{-5,2}$
b_{1313}	$1,26 \cdot 10^{-5,25}$	$1,27 \cdot 10^{-5,25}$	$1,27 \cdot 10^{-}$

Пошкоджуваність

Теплове навантаження і цикли плавлення-затвердіння – не єдина проблема, яка впливає на властивості матеріалу металу шва і ЗТВ у разі багатопрхідного шва. Зварювальний процес сам по собі створює структурні недосконалості і тріщини у металі шва. Це в поєднанні з порожнечами і мікротріщинами, які зароджуються в процесі повзучості, може призвести до відмови зварних компонентів раніше, ніж прогнозувалося в аналізі повзучості. Саме тому необхідно взяти пошкоджуваність до уваги при моделюванні поведінки зварного з'єднання.

Як припускалось раніше, складові металу шва ізотропні, тому для включення пошкоджуваності у моделювання поведінки металу шва при повзучості було використано модель повзучості з пошкоджуваністю для ізотропних матеріалів Качанова-Работнова. У цій моделі швидкість повзучості залежить від параметра пошкоджуваності, який може бути віднесений до площі пустот і мікротріщин в поперечному перерізі одновісного зразка в процесі пошкодження

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \dot{\epsilon}_{cr}(\sigma, \omega); \quad (22)$$

$$\omega = A_D/A_0, \quad (23)$$

де A_0 – початкова площа поперечного перерізу; A_D – область пустот і мікротріщин, викликаних пошкодженням. Процес пошкоджуваності в цьому випадку може бути сформульований еволюційним рівнянням

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}(\sigma, \omega). \quad (24)$$

Використовуючи степеневий закон для повзучості і пошкоджуваності, визначальні рівняння для ізотропних матеріалів можуть бути записані таким чином:

$$\dot{\epsilon}_{vM}^{cr} = C \frac{|\sigma_1|^n}{(1-\omega)^m}; \quad (25)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{|\sigma_1|^k}{(1-\omega)^l}; \quad (26)$$

$$\omega|_{t=0} = 0, \quad \omega|_{t=t^*} = \omega^* = 1, \quad (27)$$

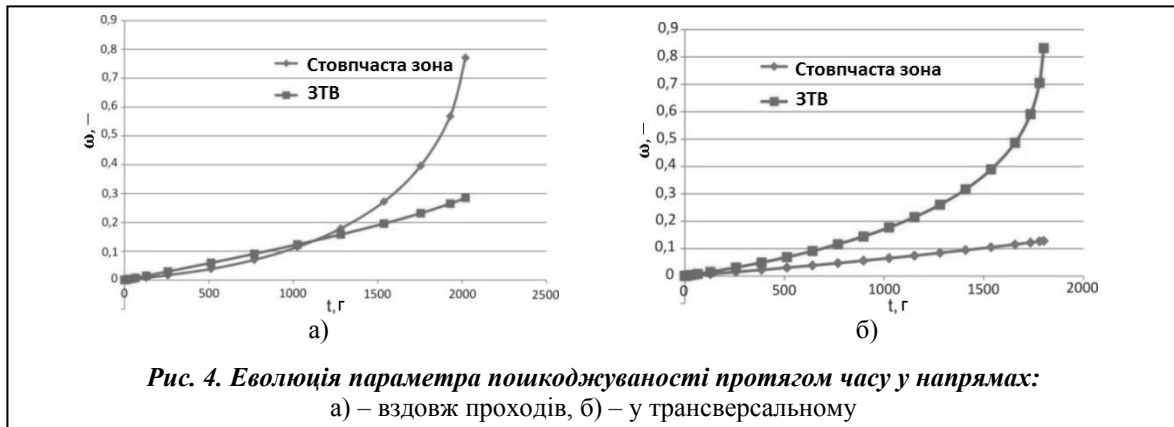
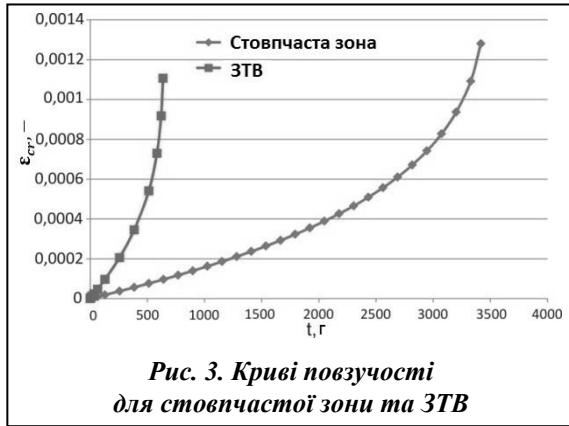
де t^* – час до руйнування; ω^* – критичне значення параметра пошкоджуваності.

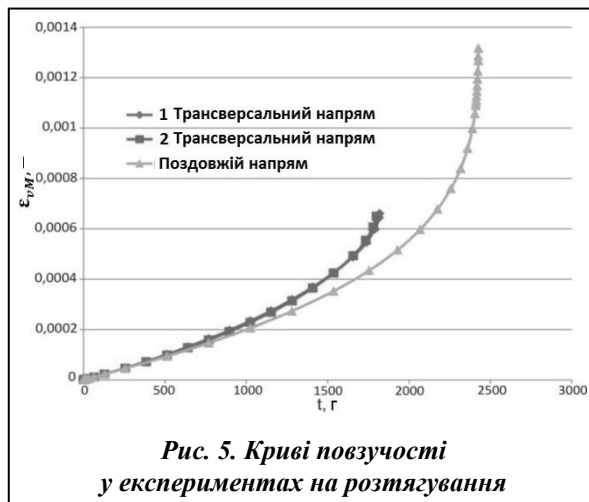
Як і в аналізі повзучості без пошкоджуваності, визначити параметри C, D, n, m, k та l для всіх зон металу шва неможливо. Однак для виконання якісної оцінки впливу неоднорідності металу шва використано криві повзучості (рис. 3) із стовпчастою і дрібнозернистою зонами термічного впливу основного металу від [8] і припущено, що співвідношення між часом до руйнування буде таким же, як і між стовпчастою зоною і ЗТВ зварного металу.

Обробкою даних з кривих повзучості і припущеннями, $n = m, k = l$ виявлено, що співвідношення між часом до розриву складових металу шва $t_h^*/t_c^* = 2,5$, де індекси h та c призначені для ЗТВ і стовпчастої зони відповідно. Показники степенів $n = 3, k = 4$ для обох матеріалів.

Для моделювання повзучості з пошкоджуваністю еквівалентного однорідного матеріалу для металу зварного шва використано МПО від попереднього аналізу і проведено той же набір чисельних експериментів. Як результат цих чисельних експериментів було отримано еволюцію параметра пошкоджуваності протягом часу.

На рис. 4 видно різницю у розвитку між параметром пошкоджуваності при а) – позовдвжньому розтягуванні; б) – тести у поперечному напрямку. У експерименті по позовдвжньому розтягуванні параметр пошкоджуваності зростає швидше у стовпчастій зоні, незважаючи на те, що ЗТВ більш схильні до пошкоджень відповідно до параметрів матеріалу. Це відбувається через перерозподіл напружень внаслідок повзучості в позовдвжньому розтягуванні. Отримані результати показують, що напруження під час цього чисельного експерименту





концентруються в стовпчастій зоні, і у деякий час еквівалентне напруження в стовпчастій зоні може досягати в два рази більшого значення у порівнянні з ЗТВ. З іншого боку, в чисельних експериментах на напруженість в одному з трансверсальних напрямків напруження перерозподіляється між зонами не так значно. Ось чому параметр пошкоджуваності в цих тестах відображає матеріальні параметри краще і зростає швидше у більш схильній до пошкодження зоні – термічного впливу.

На рис. 5 можна побачити перерозподіл усереднених еквівалентних деформацій повзучості протягом часу у чисельних

експериментах по одновісному розтягу в поздовжньому і двох напрямках у площі перерізу.

Як видно, криві, що відображають поведінку МПО в випробуваннях на розтяг у поперечних напрямках, майже збігаються, а крива при поздовжньому розтягуванні має більш низьку швидкість повзучості і більш високе значення часу до розриву. Спираючись на цей результат, можна вважати, що параметри повзучості з пошкоджуваністю еквівалентного матеріалу для багатопрхідного зварного шва мають трансверсально-ізотропну симетрію.

Висновки

Розглянуто багатопрхідний зварний шов як складну гетерогенну структуру. В результаті аналізу методом скінчених елементів по однокомпонентному навантаженню представницького об'єму отримано еквівалентні деформації і при обробці їх за допомогою процедури усереднення знайдені константи повзучості та пошкоджуваності матеріалу для визначальних рівнянь еквівалентного матеріалу. Досліджено вплив процесів пошкоджуваності на час до руйнування зварюваних елементів. Встановлено, що параметри повзучості з пошкоджуваністю еквівалентного матеріалу зварного шва відповідають поведінці трансверсально-ізотропного матеріалу.

Література

1. Segle P. Numerical simulation of weldment creep response / P. Segle – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. – 90 p.
2. Hyde T. H. Assessment of creep behaviour of a narrow gap / T. H. Hyde, W. Sun, J. A. Williams // Intern. J. Pressure Vessels and Piping. – 1999. – Vol. 76, № 8. – P. 515–525.
3. Some issues in life assessment of longitudinal seam welds based on creep tests with cross-weld specimens / P. Segle, S.-T. Tu, J. Storesund, L. A. Samuelson // J. Pressure Vessels and Piping. – 1996. – Vol. 66, № 1–3. – P. 199–222.
4. Yongkui L. Study on creep damage in thick welded joint of modified 9Cr1Mo steel alloy / L. Yongkui. – Kochi, Japan: Kochi University of Technology, 2009. – 172 p.
5. Naumenko K. Modeling of Creep for Structural Analysis / K. Naumenko, H. Altenbach. – Berlin: Springer, 2007. – 221 p.
6. Altenbach H. A phenomenological model for anisotropic creep in a multipass weld metal / H. Altenbach, K. Naumenko // Archive Appl. Mech. – 2005. – P. 808–819.
7. Hyde T. H. Creep analysis of pressurized circumferential pipe weldments / T. H. Hyde, W. Sun and J. A. Williams // J. Strain Analysis. – 2003. – Vol. 38. – P. 62–91.
8. Analysis of creep in a welded P91 pressure vessel / G. Eggeler, A. Ramteke, M. Coleman et al. // Intern. J. Pressure Vessels and Piping. – 1994. – Vol. 60. – P. 237–257.

Надійшла до редакції
02.04.13