

УДК 539.3

Г.Степанов, докт.техн.наук; А.Бабуцький, канд.техн.наук
Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАНУ (Київ)

ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОГО ОСЕСИМЕТРИЧНОГО НАГРІВАННЯ ТРУБИ НА РІВЕНЬ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Наведено результати розрахункової оцінки напружено-деформованого стану товстостінної циліндричної труби при операціях нагрівання, витримки та охолодження її локальної кільцевої області, які використовуються при термообробці з метою зняття залишкових зварювальних напружень. Показано, що в результаті такої термообробки в трубі наводяться додаткові залишкові напруження.

Врахування реального процесу непружного деформування матеріалу в конструкції, що супроводжує процес її нагрівання, витримки та охолодження, забезпечує підвищення точності оцінки напружено-деформованого стану та залишкових напружень в конструкції.

Вступ. В елементах конструкцій для зняття небажаних залишкових напружень, викликаних попередньою обробкою, наприклад, зварюванням, у більшості випадків використовується термообробка, яка полягає в нагріванні і витримці при температурі, яка забезпечує релаксацію цих напружень, та наступному охолодженні [1]. Таке нагрівання, зокрема, використовується для зняття залишкових напружень, викликаних стиковим зварюванням труб кільцевими швами.

Оцінка залишкових напружень в конструкціях є однією з найбільш складних проблем механіки деформованого твердого тіла, особливо за необхідності врахування процесів пластичного деформування (релаксації) в умовах дії поля температур, яке змінюється в часі. Ця проблема ще не вивчена повною мірою, що визначає актуальність розвитку досліджень у цьому напрямку.

Однорідне нагрівання всього елемента конструкції і витримка при високій температурі знімає початкові залишкові напруження і не наводить будь-яких додаткових напружень в процесі наступного охолодження. Ситуація змінюється при локальному нагріванні елемента конструкції.

Як приклад розглянемо дію локального осесиметричного нагрівання ділянки циліндричної труби на її напружено-деформований стан (НДС). При нагріванні локальної ділянки труби її теплове розширення стримується впливом прилягаючих менш прогрітих зон труби. При певних співвідношеннях довжини області нагрівання, діаметра і товщини труби на її внутрішній поверхні виникають стискаючі напруження, що релаксують в процесі витримки і наступного охолодження. В результаті такого процесу непружного деформування після охолодження в термообробленій ділянці труби виникають залишкові розтягуючі напруження, причому їх величина може досягати межі плинності.

У даному повідомленні наведено результати дослідження кінетики пружно-пластичного деформування ділянки труби при локальному нагріванні кільцевої області, її витримці при постійній температурі та наступному охолодженні. Розглядається

ділянка товстостінної труби, розміри якої близькі до розмірів патрубка, що використовується для приварки колектора до корпуса парогенератора ПГВ-1000 реактора ВВЭР АЕС [2]. Зварювальний шов з'єднання колектора з патрубком піддається високому відпуску для зняття залишкових зварювальних напружень. В приведених нижче розрахунках не оцінюється реальний НДС у такому досить складному вузлі. Основна їхня задача – дати якісну оцінку механізму можливого впливу термічної обробки на рівень результуючих залишкових напружень, викликаних зварюванням і наступною термообробкою. У зв'язку з цим на даному етапі розрахунки виконували для труби без зварювального шва.

Схема кінетики НДС при термообробці. Зміна тангенціальних деформацій і напружень в локальній кільцевій області труби при нагріванні, витримці для релаксації напружень та наступному охолодженні схематично подана на рис.1.

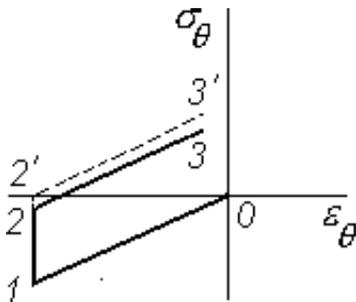


Рис. 1 Зміна НДС в кільцевій області нагрівання труби при проведенні термообробки

Термічне розширення кільцевої області труби при нагріванні стримується прилягаючими ділянками труби, що викликає появу в нагрітій області тангенціальних напружень стиснення (точка 1 на рис.1). Релаксація напружень стиснення в процесі витримки при підвищеній температурі та за умови збереження загальної деформації, що визначається постійною температурою при витримці, призводить до розвитку пластичної деформації стиснення в тангенціальному напрямку (зміна НДС по лінії 1-2). Наступне охолодження викликає відновлення розмірів труби і призводить до формування в кільцевій області, що нагрівалась, залишкових напружень розтягування (зміна НДС

по лінії 2 - 3) з тієї причини, що прилягаючі до цієї пластично деформованої стисненням (зміна НДС по лінії 1 -2) кільцевої області ділянки труби, прагнуть відновити її розміри до вихідного (до нагрівання) рівня.

На рис.1 лінією 1 – 2' - 3' схематично показана кінетика НДС в кільцевій області труби, що нагрівалася, у випадку повної релаксації напружень при витримці. Видно, що в цьому випадку напруження, які залишилися після термообробки будуть мати найбільше з можливих значення. Однак на практиці повної релаксації напружень, як правило, не відбувається [1]. Тому такий сценарій кінетики НДС можна розглядати тільки для консервативних оцінок.

Розрахункова схема. Розрахунок НДС на ділянці циліндричної труби при заданій зміні температури в її локальній області виконували з використанням методу скінченних елементів [3, 4], за допомогою якого вирішували нестационарну зв'язану термо-пружно-пластичну задачу для осесиметричного тіла (труби).

НДС в трубі (зовнішній діаметр 1000 мм, товщина стінки 50 мм, довжина 2000 мм, довжина кільцевої ділянки, що нагрівається, - 200 мм, вона розташованої посередині довжини труби) розраховано для нульових початкових умов та за умов відсутності обмежень на поздовжнє переміщення її торців. З огляду на симетрію навантаження, розглядали половинну по довжині ділянку труби. Відкинуту частину труби враховували введенням нульових граничних умов (нульові переміщення в осьовому напрямку). Навантаження - лінійне підвищення температури ділянки труби, від 0 до 650 °С за час 10000 с, витримка при максимальній температурі протягом 10000 с і наступне охолодження за 20000 с. Конвекційний теплообмін через бічні поверхні стінки і торці труби в розрахунках характеризується коефіцієнтом конвекції $k = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, температура навколишнього середовища 0 °С.

Розрахунки виконані для труби із сталі, приймаючи, що непружне деформування матеріалу визначається рівнянням ізотропного деформаційного зміцнення з врахуванням впливу температури у вигляді:

$$\sigma = \sigma_Y (1 + \varepsilon) \left(1 - \frac{T}{T^*}\right),$$

де σ_Y – границя плинності; T – температура нагрівання; T^* – параметр матеріалу.

В розрахунках приймали модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5}$ 1/0С, впливом температури на ці характеристики нехтували. Відзначимо, що параметри використаного рівняння забезпечують зниження рівня напружень зі значення $\sigma_Y = 440$ МПа до $\sigma = 100$ МПа при підвищенні температури до $T = 650$ °С, що забезпечується при $T^* = 840$ °С. В розрахунках прийнято також, що теплоємність $C_V = 3,2 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), теплопровідність $\eta = 40$ Дж/(м·с·К).

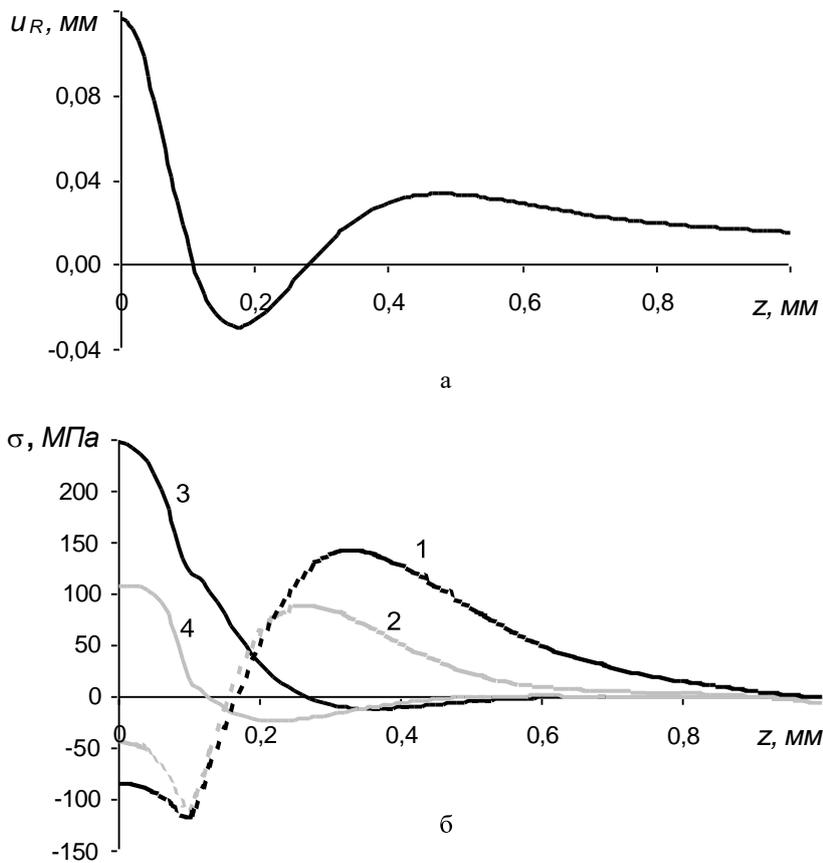


Рис.2 Розподіл зміщення стінки труби в радіальному напрямку u_R при витримці (а) та напружень σ_z (залежності 1, 3) і σ_θ (залежності 2, 4) на внутрішній поверхні труби (б): під час витримки при високій температурі (1, 2) та після повного охолодження (3, 4)

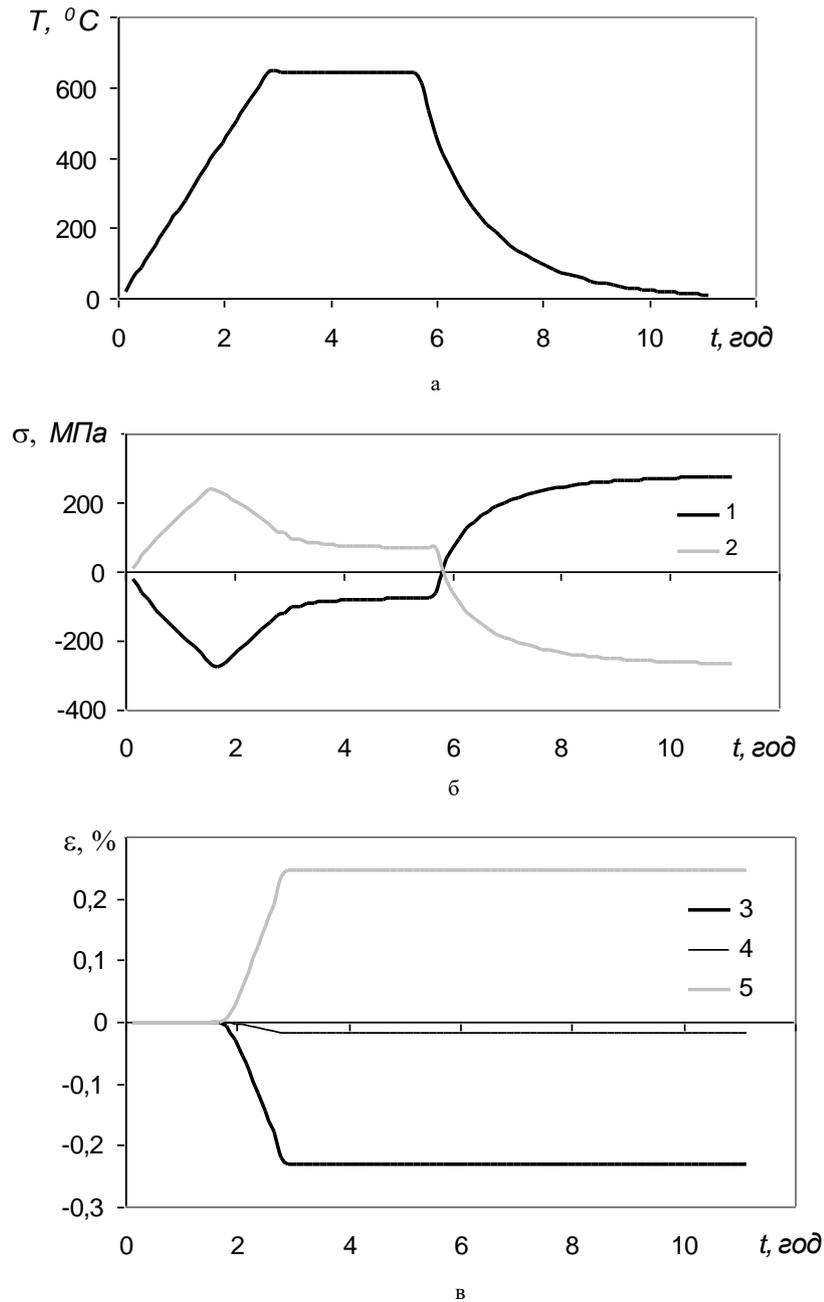


Рис.3 Зміна в часі температури (а), напружень (б) та деформації (в) в центрі області, що нагрівалась:

1 - σ_z на внутрішній поверхні, 2 - σ_z на зовнішній поверхні, 3 - ε_z на внутрішній поверхні,
4 - ε_{θ} на внутрішній поверхні, 5 - ε_R по товщині стінки.

Результати розрахунків. Деякі результати чисельного моделювання наведено на рис.2-3. Як впливає з результатів розрахунків при обраних розмірах труби, ділянки нагрівання, параметрах деформаційного зміцнення і термічного зменшення локальне нагрівання труби викликає місцеве розширення нагрітої ділянки труби і розвиток на її внутрішній поверхні пластичних деформацій стиснення в осьовому і тангенціальному напрямку. При подальшому охолодженні в трубі виникають залишкові напруження розтягування. Рівень максимальних напружень (в центрі області нагрівання) незначно знижується з часом витримки внаслідок вирівнювання температури уздовж осі труби за рахунок теплопровідності по стінці. Результируючий НДС ділянки, яка перебувала в умовах нагрівання, витримки і наступного охолодження, характеризується значним рівнем напружень розтягу, в прилеглих до неї зонах створюється залишкові напруження стиснення меншої величини.

Висновки. У результаті термічної обробки труби, що включає локальне нагрівання кільцевої області, витримку для релаксації напружень і наступне охолодження, в ній формується залишковий НДС, який характеризується виникненням напружень розтягу значної амплітуди в осьовому і тангенціальному напрямках на ділянці труби, яка включає область нагрівання та прилягаючі зони.

Рівень залишкових напружень розтягу, що виникають внаслідок термообробки, залежить від геометричних розмірів труби і ділянки нагрівання, а для конструктивного елемента також і від його геометрії. Він може досягати межі плинності, що потрібно враховувати при виборі режимів термічної обробки, оцінці залишкової напруженості конструкцій та розрахунку її довговічності.

Задачею подальших досліджень формування полів залишкових напружень в елементах конструкцій і, зокрема, у вузлі приварки колектора до патрубку парогенератора ПГВ-1000 реактора ВВЕР АЕС після термообробки є врахування геометричних особливостей конструкції, а також розробка методики врахування вихідних полів залишкових зварювальних напружень.

The results of computational estimation of stress-strain state in thick-wall tube at heating, sustain the temperature and cooling of its local ring belt, which are used under thermal treatment for residual welding stresses reduction, are presented. It is shown, that additional residual stresses in the tube appear as a result of the thermal treatment.

Taking into account of real processes of non-elastic material deformation in the structure which accompanies its heating, sustain the temperature and cooling we provide an increase of calculations accuracy of stress-strain state and residual stresses in the structure.

Література

1. Напряжения и деформации при сварке / Б.С.Касаткин, В.М.Прохоренко, И.М.Чертов.- Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1987.- С.221-225.
2. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения «горячего» колектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС// Пробл. прочности.- 2003, №5. – С. 142-153.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975.- 541 с.
4. Сахаров А.С., Альтенбах И. Метод конечных элементов в механике твердых тел.- Киев: Вища шк., 1982.- 478 с.

Одержано 08.10.2004 р.