

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПОГЛИНАЮЧИХ СТРИЖНІВ СУЗ ВВЕР-1000

Олексій Махненко, Олексій Міленін

Інститут Електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, mahaon11@ukr.net

Поглинаючі стрижні (ПС) є робочим органом системи управління та захисту (СУЗ) для регулювання реактивності і входять до активної зони ядерного реактора ВВЕР-1000. Для дослідження взаємодії залишкових та експлуатаційних напружень в оболонках ПС нікелевого сплаву 42ХНМ та їхнього впливу на надійність проведено скінченно-елементне моделювання процесу зварювання кільцевого шва та експлуатаційного навантаження.

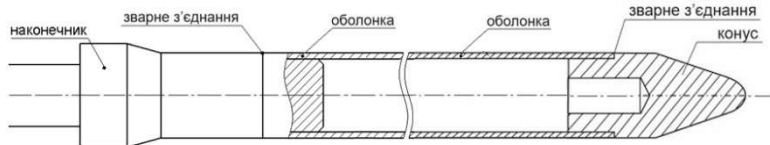


Рис.1 Вузли зварних з'єднань наконечника (а) і конуса (б) з оболонкою ПС

Розглядалась задача чисельного прогнозування кінетики температурного поля та розвитку пружно-пластичних деформацій в рамках постановки крайової задачі нестационарної термопластичності. Рівняння нестационарного теплопровідності [1]:

$$c\rho(r,\beta,z,T) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial \tau} = \nabla [\lambda(r,\beta,z,T) \cdot \nabla T(r,\beta,z)], \quad (1)$$

де λ , $c\rho$ – відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу.

Джерелом тепла є нормально розподілений поверхневий потік від зварювальної дуги в області монтажного з'єднання. Граничні умови, пов'язані з конвективно-тепловіддачею і інфрачервоним випромінюванням:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -q_l + \alpha_T \cdot (T - T_c) + \varepsilon \cdot \sigma_{sb} \cdot (T^4 - T_c^4). \quad (2)$$

Приріст тензора деформацій є сумою приростів тензора пружних деформацій, миттєвої пластичності та температурних, відповідно:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T. \quad (3)$$

Тензори механічних напружень σ_{ij} та пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані узагальненим законом Гука[2]:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma}{2 \cdot G} + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma + \varphi),$$

де σ – середнє значення нормальних компонент тензора напружень σ_{ij} .

Моделювання температурного та напружено-деформованого стану проводилося в осесиметричній двовимірній постановці. Фізична нелінійність, пов'язана з утворенням пластичних деформацій, визначалася за критерієм текучості фон Мізеса. Теплофізичні та механічні властивості хромонікелевого сплаву 42ХНМ враховувалися залежно від температури.

Розвиток термодформованого стану в процесі зварювання конусу з оболонкою призводить до формування НДС з превалюванням окружних та повздовжніх залишкових напружень (Рис.2, в). В режимі зупинки і охолодження реактора відбувається зниження зовнішнього тиску охолоджувача при зберіганні внутрішнього тиску наповнювача стрижня, що спричиняє зростання максимальних напружень вище 500 МПа (Рис.2, г). Така ситуація створює найбільш несприятливі умови для міцності зварних з'єднань оболонки, підвищуючи ризик розвитку дефектів при експлуатації.

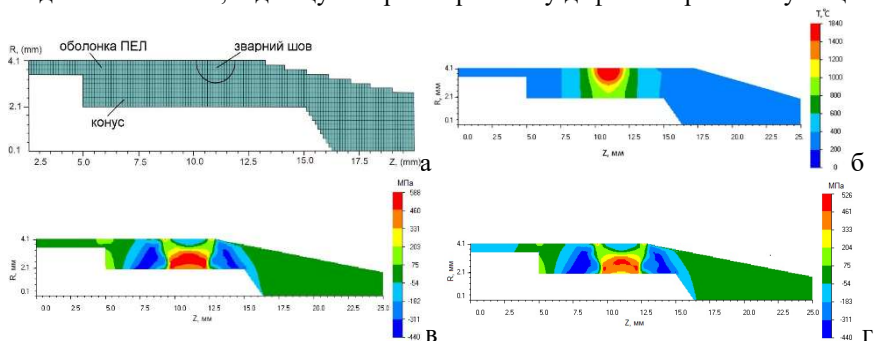


Рис.2 СЕ модель (а)зварного з'єднання, розподіли максимальних температур при зварюванні (б), залишкових (в) і колових напружень при експлуатації (г)

- [1] Karkhin V.A. Thermal Processes in Welding. SpringerSingapore, 2019 - 478p.
[2] Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наукова думка. – 2006. – 618 с.

THE STRESS STATE OF ABSORBING RODS IN VVER-1000 REACTOR

Absorbing rods are the actuating mechanism of the Control and Protection System used to regulate reactivity and are located within the active zone of a VVER-1000 nuclear reactor. To investigate the interaction of residual and operational stresses in the welds of therods and their influence on reliability, a FE modeling of the welding process and operational loading has been conducted.