

ОПТИКО-МЕХАНІЧНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ МЕТАЛУ ПОВЕРХНІ КОРПУСУ РЕАКТОРА ЕНЕРГОБЛОКА ВВЕР-1000

С.В. Гоженко, Л.С. Ожигов

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,
Харків, Україна

Представлено результати розробки оптико-механічного модуля для визначення залишкових напружень металу поверхні корпусу реактора енергоблока ВВЕР-1000. Приведено опис методики визначення залишкових напружень металу. Розроблене обладнання адаптовано для роботи на поверхні корпусу реактора.

ВСТУП

Дані про реальні залишкові напруження корпусу реактора та властивості металу, з якого він складається, лежать в основі розрахунків безпеки експлуатації атомних станцій. У процесі експлуатації залишкові напруження і властивості основного металу змінюються. Можливості одержання реальних даних під час експлуатації устаткування досить обмежені, як правило, при розрахунках використовуються результати модельних експериментів і непрямих вимірів. Прямі виміри покликані показати відповідність прийнятих допущень величинам, що існують на об'єктах, які перебувають в експлуатації.

Специфічною особливістю визначення залишкових напружень та властивостей металу зовнішньої поверхні корпусу реактора є виконання робіт в умовах підвищеного рівня радіаційного випромінювання та обмеженого доступу. Тільки біля отвору в біологічній захисній оболонці є вільний доступ до незначної донної частини поверхні корпусу реактора. Доставка модулів до решти зони контролю можлива тільки за допомогою маніпулятора СК-187, управління роботою модулів – дистанційне. Аналогічні вимоги пред'являються до допоміжного обладнання, що забезпечує підготовку поверхні корпусу реактора до обстеження. Слід зазначити, що ширина та вага використаного обладнання при контролі металу поверхні не може перевищувати 500 мм та 200 кг (вантажність маніпулятора установки СК-187) відповідно.

Обов'язковою умовою вибору методик для обстеження об'єктів, що знаходяться в експлуатації, є забезпечення якнайменшого впливу. При контролі неприпустимо зниження робочих характеристик об'єктів. Методика визначення характеристик механічних властивостей металу безразковими методами за характеристиками твердості повністю задовольняє цим вимогам та знаходить широке застосування при контролі обладнання атомних електростанцій [1]. Зокрема, при цьому використовується метод контролю властивостей матеріалів та конструкцій по зануренню кулькового індентора.

Всі механічні методи визначення залишкових напружень засновані на принципі перерозподілу поля напруг та виникнення нового деформованого стану при механічних впливах на об'єкт. Метою даної роботи є розробка модуля визначення залишкових напружень металу зовнішньої поверхні корпусу

реактора енергоблока ВВЕР-1000 по зануренню кулькового індентора.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛЯ

При силовому контакті недеформуючого кулькового індентора з поверхнею, що плоска та пружно-пластична, на початковому етапі занурення відбувається чисто пружна деформація. Зі зростанням навантаження на відстані від центра поверхні контакту, приблизно рівному половині радіуса площі контакту на осі занурення індентора, виникає пластична деформація, яка поступово розповсюджується як у глибину, так і до поверхні тіла. На поверхні утворюється спочатку кільцева, а згодом і суцільна ум'ятинна (відбиток) [2]. Після зняття навантаження відбувається пружне відновлення, причому діаметр відбитка практично не змінюється, а зменшується глибина ум'ятини. Навколо відбитка індентора формується зона випинання матеріалу [3] (рис. 1).

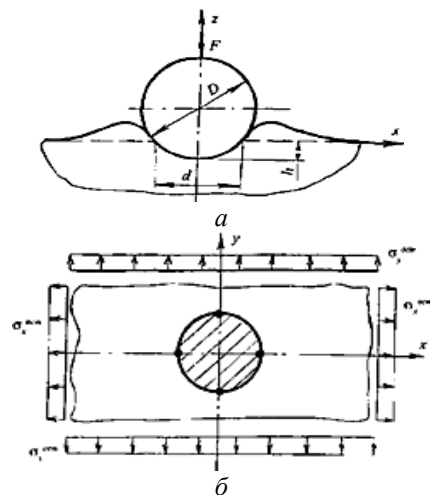


Рис. 1. Утворення відбитка індентора та випинання при пружно-пластичному вдавлюванні індентора: а – переріз вдавлювання індентора; б – залишковий напружено-деформований стан, що викликано зануренням індентора

Процес пружно-пластичного вдавлювання індентора описується емпіричним рівнянням Мейера, установлює зв'язок між параметрами вдавлювання (навантаженням F та діаметром відбитка d) при будь-яких F/D^2 (D – діаметр індентора):

$$F = aD^n.$$

Це рівняння справедливе, як показують численні дослідження, практично для всіх металів [4]. У цьому рівнянні параметр a характеризує пружні властивості та межу плинності матеріалу, n – опір пружно-пластичному деформуванню, схильність до зміцнення. Звичайно n знаходиться в межах 2...2,6 і часто незначно відрізняється від 2, так що допускається приймати n рівним 2 [5].

Характеристики механічних властивостей металу визначаються при контролі розмірів відбитка індентора за емпіричними залежностями, отриманих при попередніх експериментах на зразках металу [1]. Достатньо відомий метод контролю стану матеріалів та конструкцій з вдавлювання кулькового індентора з реєстрацією двох величин: зусилля інденування та осідання індентора [6]. Механічні властивості металів можуть бути визначені за залежністю максимального випинання від діаметра відбитка [7]. При цьому припускається, що в металі, що контролюється, відсутні залишкові напруження.

Метал реальних об'єктів контролю, як правило, має залишкові напруження. Вони викликають зміни як у процесі зародження пластичної деформації, так і в кінетиці розвитку та формуванні остаточного напружено-деформованого стану. Зокрема, при наявності в поверхневому шарі тіла плоского начального напруженого стану інтенсивність напружень у контактній задачі для точок контура контактної площадки описується рівнянням:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{i(0)}^2 \pm (\sigma_i^{\text{ост}})^2} \pm 3\sigma_r (\sigma_x^{\text{ост}} - \sigma_y^{\text{ост}}),$$

де $\sigma_{i(0)}$ – інтенсивність напруження в класичній задачі (без залишкових напружень); $\sigma_i^{\text{ост}}$ – інтенсивність залишкових напружень; σ_r – головні радіальні напруження в класичній задачі; $\sigma_x^{\text{ост}}$, $\sigma_y^{\text{ост}}$ – головні залишкові напруження.

Таким чином, пластичне деформування в різних точках контура площадки контакту починається неодноразово. Компонент $\sigma_i^{\text{ост}}$ рівняння визначає упередження (відставання) появи пластичної деформації інтегрально по контуру в порівнянні з класичною задачею. Компонент $\pm 3\sigma_r (\sigma_x^{\text{ост}} - \sigma_y^{\text{ост}})$ описує нерівномірність деформування по контуру площадки контакту. Ці ефекти використовують у методах визначення залишкових напружень за твердістю [8].

Інформативною частиною відносного впливу початкового напруженого стану є характер деформування поверхні в оточенні відбитка. Розподіл деформації та переміщень у цій зоні характеризується локальністю і високим градієнтом змін. При визначенні залишкових напружень виміряють відхилення максимальних перпендикулярних до площини переміщень від значень, що здобуті при попередніх випробуваннях з відсутності залишкових напружень. Кількісний зв'язок між величинами головних залишкових напружень та максимальних перпендикулярних до площини переміщень описується рівнянням:

$$\sigma_{1,2}^{\text{ост}} = \frac{3}{2} \sigma_T \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta W_{2,1}}{2W_{0d}} \right),$$

де σ_T – межа плинності матеріалу; $\Delta W_{2,1}$ – зміна величини максимального перпендикулярного переміщення на 2 і 1 відповідно до головної осі ($\Delta W_{2,1} = W_{2,1} - W_{0d}$, де W_{0d} – максимальне переміщення у випадку ненапруженого матеріалу, початкова умова).

Подане рівняння, що здобуто на основі аналізу масиву експериментальних даних, дозволяє незалежно визначати величини та знаки головних залишкових напружень у межах $\pm \sigma_T$ при наявності даних про початкові умови. При цьому під початковими умовами приймається значення максимальних переміщень W_{0d} , що здобуті при дослідженні металу без залишкових напружень. Це рівняння забезпечує зіставлення діаметра відбитка, здобутого при випробуваннях, з властивостями конкретного матеріалу.

Відсутність вільного доступу до зовнішньої поверхні корпусу реактора енергоблока ВВЕР-1000 та висока радіоактивність у зоні контролю пред'являють особливі вимоги до вибору методу контролю розміру випинання. Метод має бути достатньо чутливим при обстеженні поверхні корпусів та допускати автоматизацію вимірів та дистанційне керування.

Оптичні методи дозволяють дистанційно вимірювати деформацію поверхні контрольованого об'єкта з достатньою точністю. Голографічні методи потребують високої якості підготовки поверхні контролю, що, з огляду на труднощі високоякісної дистанційної обробки поверхні корпусу реактора в зоні контролю, унеможливує їх використання. З методів, що засновані на інтерференції світла, тільки спекл-інтерферометрія заснована на роботі з шерехатими поверхнями [9]. Лазерна спекл-інтерферометрія при порівнянні невисоких вимогах до якості підготовки поверхні забезпечує дослідження об'єктів, що дифузно відбивають (наприклад, поверхні корпусу реактора).

Шерехату поверхню висвітлюють лазерним когерентним світлом. Кожна точка поверхні, що дифузно відбиває, розсіює світло в напрямку спостерігача. Відбите від точки світло інтерферує між собою, створюючи хаотичну інтерференційну спекл-структуру. Поверхня здається покритою хаотично розташованими світлими й темними плямами. Слід зазначити, що спекл-структура утворюється за умови перевищення висоти мікронерівностей контрольованої поверхні над довжиною хвилі використовуваного джерела світла.

Спекли (плями) являють собою сигароподібні хаотично розташовані еліпсоїди обертання, причому поздовжній розмір значно більший поперечного. Розміри спеклів залежать від способу їхнього формування. При формуванні спеклів відповідно до пред'явленої на рис. 2 схеми розміри спеклів обчислюються за формулами: $S_r = \lambda Z/D$ і $S_n = \lambda Z^2/D^2$ (S_r – поперечний розмір спекла; S_n – поздовжній розмір спекла; λ – довжина хвилі світла; D – розмір освітленої поверхні тіла; Z – відстань від поверхні, що дифузно відбиває).

При використанні червоних напівпровідникових лазерів як джерел світла поперечний розмір спеклів варіюється в діапазоні значень 1...25 мкм.

Спекл-структура залежить від форми поверхні та добре відображає її зміни. Запис і з'ясування двох спекл-структур (кореляційна спекл-інтерферометрія) виявляють зміни в положенні чи геометрії тіла у вигляді такої ж системи ліній, як і в голографії, притому з тією ж чутливістю. У кореляційній спекл-інтерферометрії спостерігають смуги кореляції не поля, а просторовий розподіл інтенсивності, набутої при інтерференції спекл-модульованих хвиль.

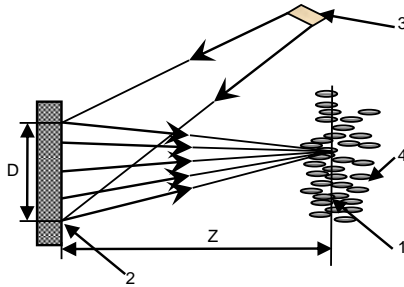


Рис. 2. Утворення інтерференційної спекл-структури: 1 – площина реєстрації спекл-структури; 2 – поверхня, що дифузно відбиває; 3 – джерело світла; 4 – спекли

В задачі для визначення залишкових напруг виснаженим методом основні розрахунки виконуються за результатами вимірювання параметрів випинання матеріалу. Достатньо при цьому дослідити одномірні інтерференційні сигнали, сформовані в характерних перерізах (на осях, що перпендикулярні діючим головним напругам). Розмір випинання визначають за кількістю смуг (автоматичним чи ручним ліченням) між зонами, де відсутня зміна профілю та має місце максимальне випинання. Точність визначення розмірів випинання відповідно залежить від довжини хвилі, що використовується. При використанні червоного напівпровідникового лазера як джерела світла точність дорівнює $\sim 0,3$ мкм.

Таким чином, при розробці модуля дистанційного визначення залишкових напружень та властивостей металу зовнішньої поверхні корпусу реактора енергоблоку ВВЕР-1000 доцільно механічне збудження реалізувати вдавлюванням кулькового індентора, а розміри перпендикулярного до поверхні випинання виміряти спекл-інтерферометричним методом.

Для реалізації методики дистанційного визначення залишкових напружень металу також необхідна розробка модуля дистанційної підготовки поверхні корпусу реактора в зоні контролю та обладнання для тарування.

МОДУЛЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Модуль включає механізм контрольованого вдавлювання індентора, оптичний вимірювач розмірів відбитка, спекл-інтерферометричний вимірювач висоти випинання та механізм жорсткої фіксації модуля на поверхні корпусу реактора.

Основною складністю практичної реалізації виснажених технічних рішень при розробці спеціалізованих приладів для контролю залишкових напружень устаткування є узгодження роботи вузлів створення механічних збуджень і реєстрації деформацій, що виникли внаслідок цього. Складність обумовлена необхідністю послідовно виконувати операції реєстрації вихідної спекл-структури, механічного впливу на метал поверхневого шару об'єкта, що контролюють, та реєстрації підсумкової спекл-структури на єдиній ділянці поверхні.

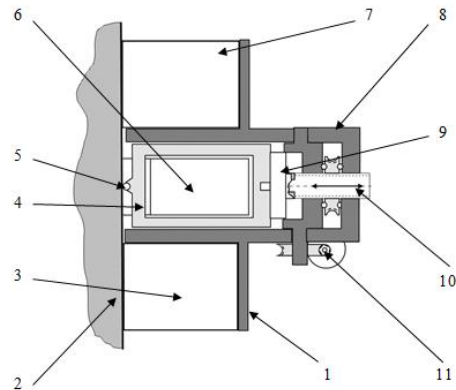


Рис. 3. Функціональна схема модуля для дистанційного контролю залишкових напружень корпусів реакторів ВВЕР-1000 (вид зверху):

- 1 – основа модуля; 2 – корпус реактора;
- 3, 7 – магнітні захвати; 4 – рама індентора;
- 5 – кульковий індентор; 6 – спекл-інтерферометр;
- 8 – основа інденторного вузла; 9 – датчик сили;
- 10 – привід подачі індентора;
- 11 – привід обертання інденторного вузла

У запропонованому проекті положення цифрового спекл-інтерферометра щодо ділянки контролю жорстко фіксується, вузол вдавнення індентора (джерела механічного збурювання) підводять до контрольованої ділянки тільки між циклами реєстрації спекл-структур. Жорстка фіксація положення елементів спекл-інтерферометра щодо поверхні контрольованого об'єкта нівелює вплив вібрацій на результати вимірів. Функціональну схему модуля представлено на рис. 3 (на етапі деформування поверхні корпусу кульковим індентором) та рис. 4 (на етапі реєстрації спекл-структури).

Модуль виконано в «жорсткому» різновиді, що налагоджується при початковому монтажі й не допускає проведення додаткового юстирування «на місці». Основою модуля служить жорсткий металевий каркас 1, на якому фіксуються інденторний вузол, спекл-інтерферометр 6. Інденторний вузол складається з кулькового індентора 5, рами індентора 4, датчика сили 9 і приводу подачі індентора 10. Елементи інденторного вузла змонтовані на основі 8. Привід обертання інденторного вузла подає індентор до контрольованої ділянки поверхні, привід подачі вдавлює індентор в основний метал корпусу реактора, рама індентора має порожнину, що вміщає елементи спекл-інтерферометра.

Під час контролю модуль жорстко зчеплений з корпусом реактора магнітними захватами 3 й 7.

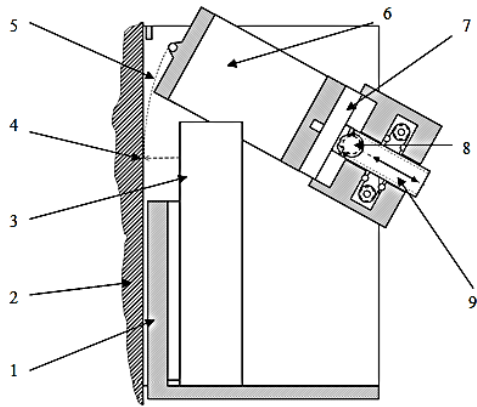


Рис. 4. Функціональна схема модуля для дистанційного контролю залишкових напружень корпусів реакторів ВВЕР-1000 (вид збоку): 1 – основа модуля; 2 – корпус реактора; 3 – спекул-інтерферометр; 4 – місце локального деформування поверхні корпусу кульковим індентором; 5 – траєкторія руху кулькового індентора; 6 – інденторний вузол; 7 – датчик сили; 8 – привід обертання інденторного вузла; 9 – привід подачі індентора

При контролі спекул-інтерферометр спочатку реєструє вихідну спекул-структуру. Потім кульковий індентор, обертаючи основу інденторного вузла, подають до поверхні корпусу реактора. Включають привід подачі індентора та вдавлюють кульку індентора в тіло корпусу із заданим зусиллям (зусилля контролюють датчиком сили). Після завершення циклу деформування індентор відводять від корпусу реактора й реєструють підсумкову спекул-структуру. Кореляція двох спекул-структур, зареєстрованих у вихідному й деформованому станах корпусу реактора, представляє на моніторі комп'ютера систему інтерференційних смуг, що є ізолініями відповідних переміщень. Використовуючи калібрування модуля на лабораторному устаткуванні, виконують остаточну обробку результатів контролю з визначенням вихідного залишкового напруження.

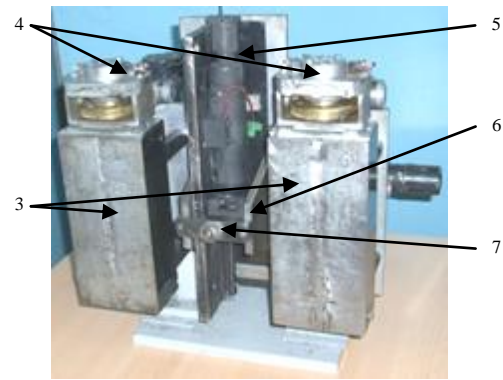
Діюча модель модуля контролю залишкових напружень представлена на рис. 5.

Всі елементи модуля змонтовано на основі 1, яка, в свою чергу, через рухоме з'єднання підпружинена до монтажного адаптера 9. Монтажник адаптер монтується на маніпулятор типу СК-187 системи контролю корпусів реакторів ВВЕР-1000. При контролі рухоме з'єднання модуля та монтажний адаптер дозволяє робочій поверхні магнітних захоплювачів 3 орієнтуватися вдовж поверхні корпусу реактора. Положення спекул-інтерферометра жорстко фіксується протягом усього циклу вимірювання залишкових напружень.

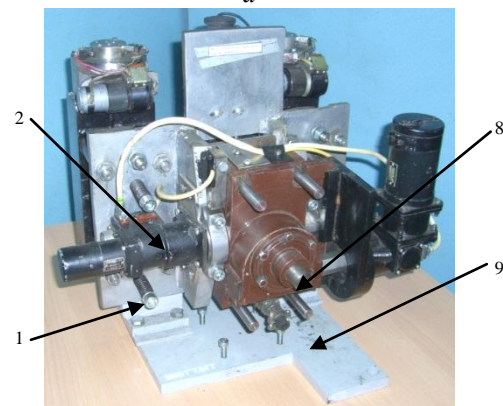
Спекул-інтерферометр показано на рис. 6.

Пучок світла лазера 3 подається на світлоділительний куб 2, відбивається від поверхні корпусу реактора та за допомогою дзеркала 7 подається на об'єктив 6. Спекул-структура фокусується об'єктивом на світлочутливу матрицю WEB-камери 5. Трансфокатор 4 забезпечує роботу спекул-інтерферометра в двох режимах: реєстрації спекул-структур або розмірів відбитка кулькового індентора. Відповідно це

забезпечує роботу модуля в режимах контролю залишкового напруження та властивостей металу.



а



б

Рис. 5. Модуль для дистанційного контролю залишкових напружень корпусів реакторів ВВЕР-1000: а – вид з боку розташування об'єкта контролю; б – вид з тильної сторони.

1 – основа модуля; 2 – привід обертання інденторного вузла; 3 – магнітні захопачи; 4 – приводи магнітних захопачів; 5 – спекул-інтерферометр; 6 – інденторний вузол; 7 – кульковий індентор; 8 – привід подачі індентора; 9 – монтажний адаптер

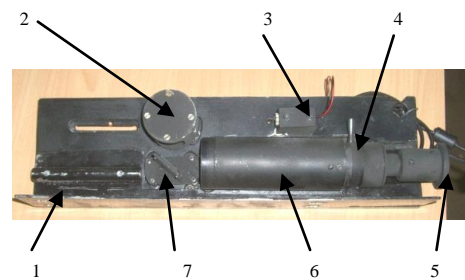


Рис. 6. Спекул-інтерферометр: 1 – основа модуля; 2 – світлоділительний куб; 3 – лазерний модуль; 4 – трансфокатор; 5 – WEB-камера; 6 – об'єктив; 7 – дзеркало

У спекул-інтерферометрі використано лазерний модуль потужністю 25 мВт (довжина хвилі 655 нм), 2-мегапіксельну USB WEB-камеру, кульковий індентор діаметром 5 мм, тензометричний датчик з номінальним зусиллям 1 тс. Об'єктив WEB-камери модифіковано, що дозволило послідовно проектувати зображення відбитка кулькового індентора та необ-

хідної частини інтерференційної спекл-структури на повну площину світлочутливої матриці. Первинна обробка сигналів датчиків виконується платами виробництва фірми ADDI-DATA, до комп'ютера (віддаленого від камери на ~ 50 м) сигнал подається активним USB-подовжувачем (по крученій парі). При роботі використовується широко поширене програмне забезпечення.

ДОПОМІЖНЕ ОБЛАДНАННЯ

Перед проведенням контролю поверхня корпусу реактора шліфується (вирівнюється поверхня в місці занурення кулькового індентора, видаляється краска та шар окисованого металу). Модуль для виконання цієї операції приведено на рис. 7.

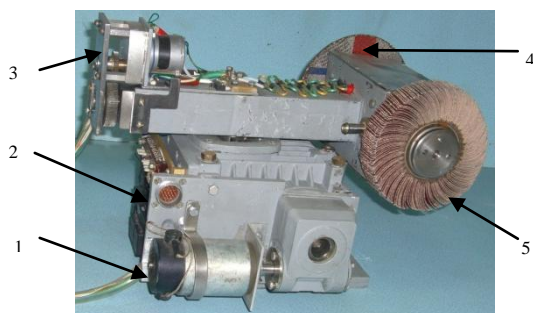


Рис. 7. Модуль шліфування поверхні корпусу реактора: 1 – привід сканування шліфувальних кругів; 2 – плата управління; 3 – привід поперечної подачі кругів; 4 – жорсткий абразивний круг; 5 – пелюстковий абразивний круг

На основі модуля змонтовані привод сканування шліфувальних кругів 1 та плата управління 2, які забезпечують поодинокую подачу абразивних кругів до зони шліфування. На осі привода сканування змонтовано телескопічний привід поперечної подачі кругів 3. Привід поперечної подачі, на якій змонтовано електродвигун обертання абразивних кругів 4 і 5, задає величину заглиблення кругів у тіло корпусу реактора. Електродвигун обертання має примусове повітряне охолодження, що унеможливує його внутрішнє забруднення радіоактивним пилом у процесі шліфовки корпусів.

Спочатку, у випадку потреби, жорстким абразивним кругом вирівнюють поверхню металу в зоні контролю, а потім пелюстковим кругом знижують шерехатість поверхні. Синхронізація поперечної подачі кругів модулем та паралельної подачі модуля в цілому забезпечує обробку поверхні до відповідного рівня.

Як вже було наведено, визначення залишкових напружень за даними замірів розмірів випинання при вдавлюванні кулькового індентора проводиться на підставі використання калібрувальної залежності. Визначення цієї калібрувальної залежності відбувається в ході попередніх випробувань з використанням матеріалів з відомим рівнем напружень. Для виконання цих випробувань (тарування методики) на силову раму машини для випробувань на розтяг типу ZD 10/90 змонтовано поперечну силову раму, на

якій знаходиться оптико-механічний модуль визначення залишкових напружень. Змонтовані елементи показано на рис. 8.

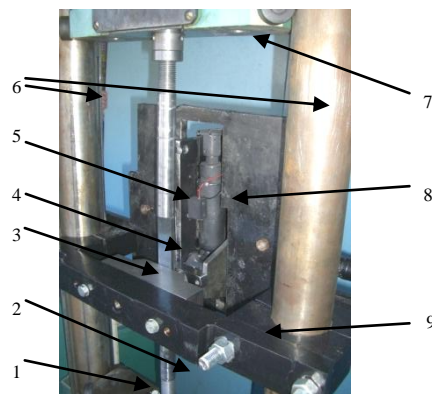


Рис. 8. Зона модернізації машини типу ZD 10/90 (калібрування методики визначення залишкових напружень): 1 – нижня траверса машини; 2, 5 – тяги траверс-машини; 3 – опора; 4 – зразок металу, що досліджується; 6 – силова рама; 7 – верхня траверса машини; 8 – оптико-механічний модуль визначення залишкових напружень; 9 – поперечна силова рама

Монтаж поперечної силової рами забезпечив можливість вдавлювання індентора модуля 8 у зразок металу 4, що знаходиться в заданому машиною напруженому стані. Незмінність відносно модуля положення зразка металу вдовж вимірів забезпечує опора 3, до якої зразок притиснуто. Можливий діапазон зусилля навантаження на зразок металу – до 10 тс. Слід зазначити, що зразок виготовляється з металу, з якого виготовлено об'єкт контролю, та за відсутністю залишкових напружень.

ВИПРОБУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НА СТЕНДІ ЮУ АЕС

При обстеженні корпусу реактора модулі монтуються на маніпулятор СК-187 системи контролю корпусів реакторів ВВЕР-1000. На стенді ЮУ АЕС налагодження модулів проводилося безпосередньо на маніпуляторі СК-187, а кріпильний фланець модулів відповідає за розмірами кріпильному фланцю маніпулятора СК-187.

Імітатором корпусу реактора є сталевая пластина завтовшки ~ 10 мм, зігнута з радіусом ~ 2 м. Положення пластини на стенді ЮУ АЕС відповідало розташуванню поверхні корпусу реактора ВВЕР-1000 відносно системи СК-187. Розташування модуля шліфування на стенді ЮУ АЕС представлено на рис. 9.

При налагоджувальних роботах були проведені порівняльні експерименти з якості та продуктивності зачистки штатного устаткування зачистки системи СК-187 з дротяним кругом та розробленого модуля. Використання розробленого модуля показало високу якість та продуктивність зачистки. При використанні штатного устаткування зачистки системи СК-187 необхідного рівня підготовки поверхні не було досягнуто.

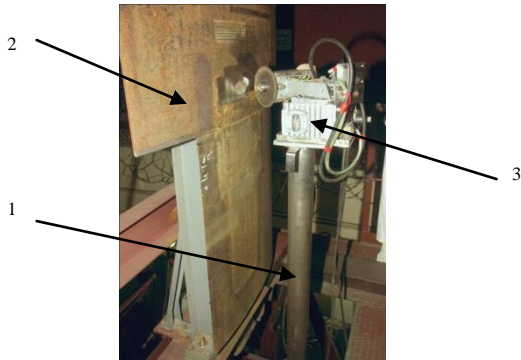


Рис. 9. Розташування модуля шліфування на стенді ЮУ АЕС: 1 – телескопічна штанга маніпулятора; 2 – імітатор корпусу реактора; 3 – модуль шліфування

Розташування модуля шліфування на стенді представлено на рис. 10.



Рис. 10. Діюча модель модуля: 1 – штанга стенда з кріпильним фланцем; 2 – модуль; 3 – зразкова металева плита

ВИСНОВКИ

Приведено методику визначення залишкових напружень металу зовнішньої поверхні корпусу реактора енергоблока ВВЕР-1000. Розроблено та виготовлено обладнання для підготовки поверхні корпусу до контролю, визначення залишкових напружень металу та калібрування методики.

Обладнання відпрацьовано на стенді ЮУ АЕС та адаптовано до роботи на поверхні корпусу реактора енергоблока ВВЕР-1000.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. *Определение характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости РД ЭО 0027-94.* Харьков: «Энергодар», 1999.
2. М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. *Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации.* М.: «Машиностроение», 1986, 224 с.
3. А.А. Гудков, Ю.И. Славский. *Методы измерения твердости металлов и сплавов.* М.: «Металлургия», 1982, 168 с.
4. К. Джонсон. *Механика контактного взаимодействия.* М.: «Мир», 1989, 510 с.
5. М.С. Дрозд. *Определение механических свойств металла без разрушения.* М.: «Металлургия», 1965, 171 с.
6. Л.Г. Одинцов. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием.* М.: «Машиностроение», 1987, 328 с.
7. М.Б. Бакиров. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М.Б. Бакиров, В.В. Потапов // *Заводская лаборатория.* 2000, №12, с. 35-43.
8. М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев, А.Г. Игнатъев, А.А. Зарезин. Исследование остаточных сварочных напряжений методом голографической интерферометрии // *Сварочное производство.* 1998, №5, с. 3-5.
9. А. с. 1370444 СССР, МКИ⁴ G 01 В 5/30. Способ определения напряжений в изделии / Ю.И. Рубенчик, Ю.И. Славский, А.В. Федоров // *Открытия. Изобретения.* 1988, №4.
10. Р. Джоунс, К. Уайкс. Голографическая и спекл-интерферометрия: Пер. с англ. М.: «Мир», 1986, 328 с.
11. ДСТУ ISO 6506-1:2007 «Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування».

Статья поступила в редакцию 16.03.2016 г.

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА РЕАКТОРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000

С.В. Гоженко, Л.С. Ожигов

Представлены результаты разработки оптико-механического модуля для определения остаточных напряжений металла поверхности корпуса реактора энергоблока ВВЭР-1000. Приведено описание методики определения остаточных напряжений металла. Разработанное оборудование адаптировано для работы на поверхности корпуса реактора.

OPTICAL-MECHANICAL MODULE FOR MEASURING THE RESIDUAL STRESS IN METAL OF THE SURFACE OF REACTOR OF POWER UNIT WWER-1000

S.V. Gozhenko, L.S. Ozhigov

Results of the development of optical-mechanical module for measuring the residual stress in metal of the surface of the reactor vessel WWER-1000 are described. The methodology for determining the residual stresses in metal is described. The developed equipment is adapted for use on the surface of the reactor vessel.