



# РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТУРИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Л.М. ЛОБАНОВ, В.А. ПІВТОРАК, В.В. САВИЦЬКИЙ, І.В. КИЯНЕЦЬ, О.В. ТХОР

*Проведені експерименти, за результатами яких встановлена залежність величини відстані між екстремумами кривої зміни похідної в околі зварної точки від діаметра її ядра. Характер кривих зміни похідної в околі зварної точки під дією механічного навантаження, що отримані методом електронної ширографії, підтверджені математичним моделюванням. Виконані дослідження довели, що метод ширографії можна застосовувати для неруйнівного визначення діаметра ядра зварної точки в з'єднанні, яке виконане контактним точковим зварюванням.*

*Experiments were conducted, the results of which were used to establish the dependence of the distance between extremums of the curve of derivative variation in the vicinity of spot weld on its nugget diameter. Nature of derivative variation curves in the weld nugget vicinity under the impact of mechanical load generated by the method of electron shearography, was confirmed by mathematical simulation. Performed research proved that the shearography method can be applied for non-destructive determination of weld nugget diameter in a joint made by resistance spot welding.*

Останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком неруйнівних методів контролю якості конструкцій, створюються нові та удосконалюються відомі методи, активно впроваджується комп'ютерна техніка, створено широку гаму приладів різноманітного цільового призначення. Новим методом, який інтенсивно розвивається, є електронна ширографія, яка із стадії лабораторних застосувань перейшла на етап практичного використання і зайняла надійне місце не тільки в дослідних лабораторіях, але і в ряді галузей промисловості [1, 2].

Суть методу ширографії полягає у наступному [3, 4]. Поверхня об'єкта дослідження частково або повністю освітлюється когерентним лазерним променем. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкта світло, що створює спекл-структуру, проходить крізь зсувний елемент і фокусується у площині зображення CCD-камери. На матриці камери формується пара поперечно зсунутих зображень об'єкта. Ці два зображення інтерферують одне з одним, створюючи картину, яка вводиться до комп'ютерного блоку. Порівняння двох широграм, які були записані до та після незначного навантаження об'єкта, дає можливість отримати інтерферограму, яка характеризує деформацію поверхні об'єкта, обумовлену його навантаженням.

Електронна ширографія є ефективною для неруйнівного контролю якості, коли присутність дефекту в контрольованій ділянці об'єкта викликає аномальну деформацію поверхні об'єкта при його навантаженні (нагріванні, розтягуванні, стисканні тощо). Ця аномалія виявляється внаслідок локальної зміни картини інтерференційних смуг і характеризується кривою розподілу похідної  $dw/dx$  або

$dw/du$  ( $w$  — переміщення із площини об'єкта по нормалі до контрольованої поверхні) уздовж обраних перерізів. При цьому екстремуми, які виникають в кривій зміни похідної, характеризують присутність дефектів на контрольованій ділянці. В залежності від оптичної схеми, що використовується під час експериментів, метод ширографії дозволяє окремо визначати як депланаційні деформації, так і площинні [5, 6].

В автомобіле-, машинобудуванні тощо при виготовленні тонкостінних конструкцій широко використовується точкове зварювання. Працездатність таких конструкцій залежить від якості зварних точок, які сприймають експлуатаційне, механічне та температурне навантаження. Безпека експлуатації та підвищення їх працездатності потребують розробки та впровадження високопродуктивних і достовірних методів неруйнівної діагностики конструкцій.

Важливим для забезпечення якісного зварного з'єднання є контроль розміру ядра зварної точки. Відомо, що при однакових параметрах точкового зварювання розмір ядра зварної точки може змінюватись, залишаючи практично без зміни відбиток електрода на поверхні листів, що зварюються. В зв'язку з цим актуальним є розробка неруйнівної методики контролю розміру ядра зварної точки.

З метою вибору ефективного способу навантаження зварного точкового з'єднання були виконані експерименти з використанням теплового та механічного навантаження. Для виконання експериментів з тепловим навантаженням був виготовлений пристрій закріплення зварного зраз-

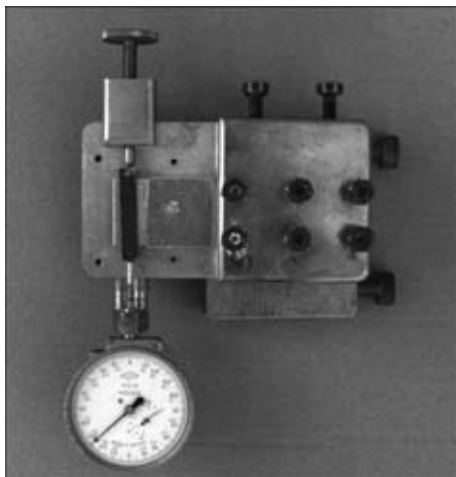


Рис. 1. Загальний вигляд навантажувального пристрою для визначення діаметра ядра зварної точки з використанням механічного навантаження

ка розмірами 125×37 мм, що виготовлений із сталі 14Г2 товщиною 1,2 мм, з затисненням його по контуру. Це дозволило обмежити його розширення при нагріванні та створити деформації в зоні зварної точки. В якості навантаження використовували обдув теплим повітрям за допомогою промислового фена, при цьому час обдуву складав від 20 до 30 с, а температура підігрітого повітря 60 °С.

Аналіз результатів проведених експериментів показав, що термічне навантаження може бути використане під час якісного контролю зварних точок. У випадку необхідності виконання кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки використання термічного навантаження стає неефективним, оскільки важко досягти дозованого теплового вкладу з високою повторюваністю під час виконання експериментів на різних зразках в умовах оточуючого середовища, що можуть змінюватися. Тому в якості метода навантаження під час проведення експериментів з кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки був обраний механічний спосіб.

Для проведення експериментів з використанням механічного способу навантаження було розроблено та виготовлено навантажувальний пристрій, що наведений на рис. 1. Пристрій являє собою корпус, що зібраний із двох пластин відповідної форми, в якому розміщені елементи кріплення зразка, вузол навантаження та вузол кріплення індикатора годинникового типу (точність вимірювання 0,001 мм).

В розробленому пристрої досліджуваний зразок фіксувався за допомогою жорсткого кріплення поперечної кромки, що дозволило отримати досить великі пружні переміщення елементів зварного з'єднання. Розроблений та створений пристрій для механічного навантаження дозволив виконати серію експериментів із навантаження зварних зразків з досить високою точністю та

повторністю. Визначені величини навантаження залишалися в області пружного деформування поверхні навколо зварної точки для всіх величин діаметра ядра.

Методика кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки полягає в наступному. Зразок являє собою дві металеві пластини розмірами 125×37 мм, які поєднані зварною точкою (рис. 2, а). Якщо поперечну кромку першої пластини жорстко закріпити (зона А), а навантаження прикласти на другу пластину (зона В), тоді на першу пластину деформування передається тільки через ядро зварної точки. Якщо навантаження дозоване, тоді чим більше діаметр ядра, тим більшою буде область деформування поверхні першої пластини в околі зварної точки. Таким чином, отримавши методом ширографії графік зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  в околі зварної точки на першій пластині, можемо визначити залежність величини діаметра ядра зварної точки від кривої розподілу цих похідних уздовж вибраного перерізу.

Виконані дослідження дозволили визначити залежність параметрів деформування від величини діаметра ядра при певному навантаженні  $P$ . Результати експериментів показали, що розмір діаметра ядра зварної точки корелює з величиною відстані поміж двома екстремумами графіка зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  від компонент вектора переміщення  $(u, w)$  уздовж обраних напрямків  $x$  або  $y$  під час тестового навантаження зварного точкового з'єднання.

У випадку прикладення навантаження  $P$  до зони В на зварну точку діє крутильний момент, який передається також на першу пластину. При цьому в околі точки превалює деформування пластини в площині  $XOY$ . Тому була обрана оптична схема експерименту (рис. 2, б), що дозволяє реєструвати площинні деформації уздовж вісі  $OY$ . Лазерне випромінювання освітлювало досліджувану ділянку зразка під кутом 60° від нормалі до поверхні зразка, а ширографічна камера розміщувалась уздовж нормалі до досліджуваної поверхні.

Дослідження проводили на зразках двох типів: зі сталі 08КП товщиною 1,0 мм (12 шт.) та сталі 14Г2 товщиною 1,2 мм (12 шт.). Початкове навантаження для всіх зразків було обране таким, аби контрольовані переміщення нижньої кромки складали 30 мкм, а величина робочого навантаження дозволяла отримати загальне переміщення 60 мкм. При таких величинах переміщень, у випадку діаметра ядра зварної точки 4 мм, значення початкового навантаження складало 20,4 Н, а робочого 40,8 Н. Загальний вигляд апаратури для визначення діаметра ядра зварної точки з

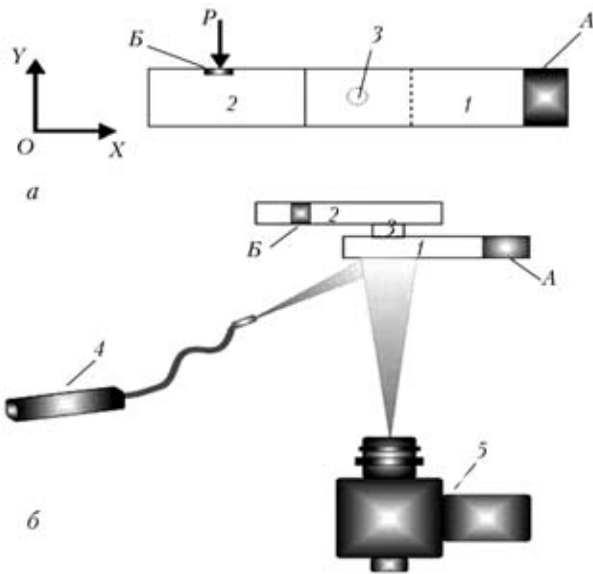


Рис. 2. Схема експерименту, який виконувався для кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки: а — схема навантаження зразка; б — оптична схема експерименту; 1, 2 — відповідно передня та задня металева смуга; 3 — зварна точка; 4 — лазер із світловодом; 5 — ширографічний модуль (А — зона кріплення зразка; Б — зона прикладення навантаження Р)

використанням механічного способу навантаження наведені на рис. 3.

При фіксованому переміщенні нижньої кромки пластини 2 відстань поміж екстремумами графіку змін похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  пластини 1 залежить від розміру ядра зварної точки: чим більший діаметр ядра, тим більша відстань поміж екстремумами. Результати, що отримані під час контролю зразків з використанням механічного навантаження, наведені на рис. 4.

Програмне забезпечення дозволяло отримувати трьохвимірну картину деформування поверхні в околі зварної точки на пластині 1, а також бу-

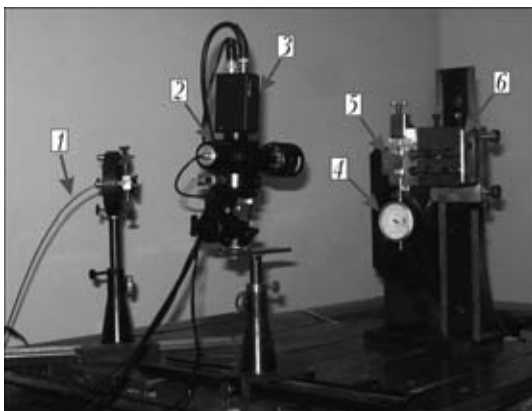


Рис. 3. Загальний вигляд апаратури для визначення діаметра ядра зварної точки з використанням механічного способу навантаження: 1 — світловод; 2 — широмодуль; 3 — CCD-камера; 4 — індикатор годинникового типу; 5 — досліджуваний зразок; 6 — навантажувальний пристрій

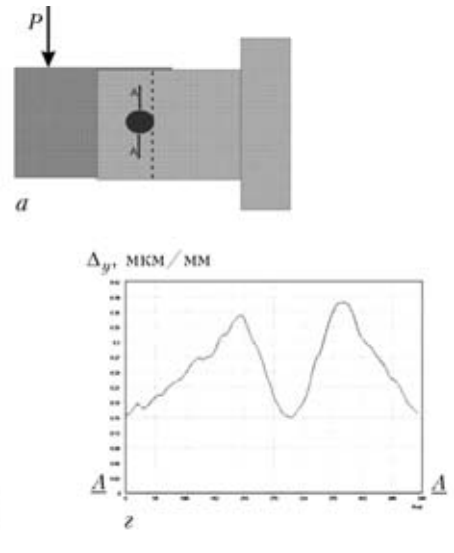


Рис. 4. Оцінка діаметра ядра зварної точки досліджуваного зразка із сталі 3 під дією механічного навантаження Р: а — схема навантаження зразка з позначеною досліджуваною ділянкою; б — широграма досліджуваної ділянки зразка; в — трьохвимірна картина деформування поверхні; г — графік зміни похідної  $\partial u/\partial y$  уздовж перерізу А-А

дувати криву розподілу похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  уздовж обраного напрямку (рис. 4). З наведених результатів можна бачити, що графік зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  має вигляд кривої з двома виразними екстремумами. Відстань між екстремумами є тією величиною, що характеризує розмір зварної точки, тобто діаметр ядра зварної точки.

Для визначення реальних розмірів ядра зварних точок зразки, що досліджуються, були зруйновані за допомогою скручування однієї пластини відносно іншої. На рис. 5 представлені фотографії зварних точок після руйнування. Чітко видно структуру зварної точки, ядро, зону термічного впливу, область вигорілого цинку та наявні раковини. Наведені фотографії зварних точок на зразках з різними величинами діаметрів ядра.

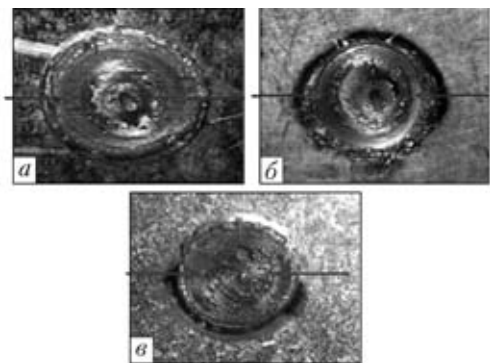


Рис. 5. Фотографії зварних точок після руйнування: а, б — відповідно зразки із сталі 3 товщиною 1, 2 мм; в — зразок із сталі 09Г2С товщиною 1 мм

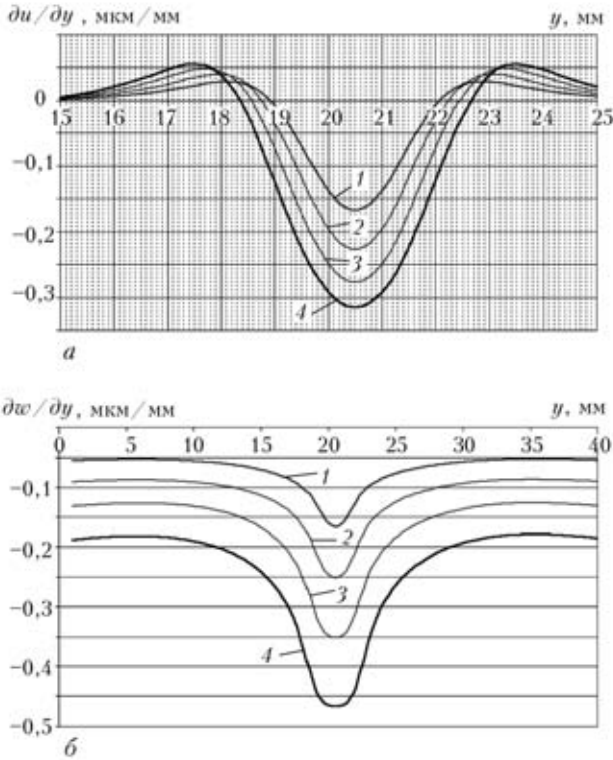


Рис. 6. Значення компонент  $du/dy$  (а) та  $dw/dy$  (б) вздовж центрального перерізу пластини 1 ( $l - D = 2,5$ ; 2 — 3,0; 3 — 3,5; 4 — 4,0 мм)

Для підтвердження правильності запропонованої методики та отриманих результатів було виконане математичне моделювання деформування досліджуваних зразків при їх механічному навантаженні. Оскільки для задачі чисельного моделювання потрібно було створити розбивку на елементи і області зварної точки, а після її вирішення обробити великий масив даних, для цього були розроблені та написані спеціальні програми, які дозволяють із необхідними параметрами проводити розбивку на елементи, задавати граничні умови, а також автоматизувати процес обробки результатів обчислень. Після обрахунків отримано такі залежності компонентів переміщень  $u$  та  $w$  від координати  $y$  (рис. 6), на яких чітко проявляються два максимуми, що розташовані симетрично щодо центра точкового з'єднання, а відстань між максимумами прямо пропорційна діаметру точкового з'єднання (рис. 7).

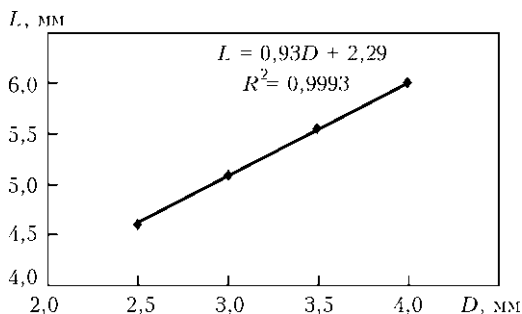


Рис. 7. Залежність відстані  $L$  між точками максимуму значень  $\Delta u$  від діаметра зварної точки  $D$

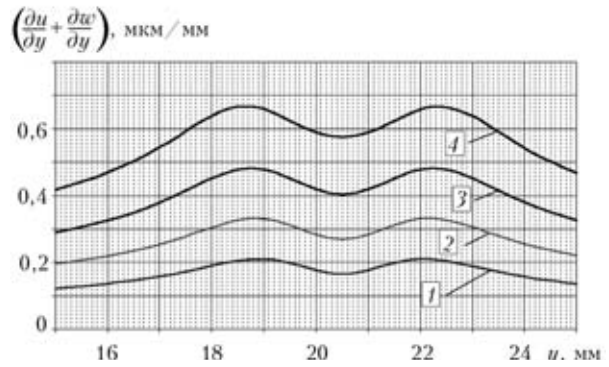


Рис. 8. Профіль деформування поверхні в околі точкового з'єднання уздовж центрального перерізу (1 —  $D = 2,5$ ; 2 — 3,0; 3 — 3,5; 4 — 4,0 мм)

Використовуючи розрахункові дані, можна обчислити значення різниці фаз  $\Delta$  за формулою:

$$\Delta_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left( C_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial y} + C_3 \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y,$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі лазерного випромінювання;  $C_1, C_2, C_3$  — коефіцієнти, які визначаються геометрією оптичної схеми;  $\delta y$  — ширографічний зсув у напрямку вісі  $OY$ .

На основі отриманого графіка (рис. 8) можна стверджувати, що існує кореляція діаметра точкового з'єднання з відстанню між максимумами на кривій зміни похідної, що реєструється методом електронної ширографії.

Таким чином, виконані експериментальні дослідження, які спрямовані на визначення оптимального способу навантаження елементів конструкцій, виготовлених точковим зварюванням. Аналіз результатів проведених експериментів показав, що термічне навантаження може бути використане під час якісного контролю зварних точок. У випадку необхідності виконання кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки використання термічного навантаження стає неефективним, оскільки важко досягти дозованого теплового вкладу з високою повторністю під час виконання експериментів на серії зразків в температурних умовах оточуючого середовища, що можуть змінюватись.

Розроблений та створений пристрій для механічного навантаження дозволив виконати серію експериментів із тестування зварних зразків з досить високою точністю та повторністю. Визначені величини навантаження залишалися в області пружного деформування поверхні навколо зварної точки для всіх величин діаметрів ядер. Аналіз даних, які отримані за допомогою математичного моделювання, показав, що використання кривої зміни похідних уздовж вибраного перерізу точкового з'єднання, отриманого за допомогою методу електронної ширографії, дозволяє однозначно визначити діаметр зварної точки.



1. Колдрен Й., Кнупка Р., Зиберт Т. Применение широгрaфии для контроля деталей в аэрокосмической промышленности // В мире неразруш. контроля. — 2007. — № 2. — С. 28–31.
2. Hung Y.Y., Ho H.P. Shearography: an optical measurement technique and applications // Materials Sci. and Eng. — 2005. — R49. — P. 61–87.
3. Методика, технология и аппаратура широгрaфического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, И.В. Киянец, Е.М. Олейник // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 29–33.
4. Оперативный контроль качества и определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной широгрaфии и спекл-интерферометрии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Г.И. Ткачук и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 8. — С. 14–19.
5. Неруйнівний контроль якості конструкцій, виготовлених із металевих і композиційних матеріалів, методом електронної широгрaфії / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.Д. Кротенко, І.В. Киянець // Тр. 8-й Міжнар. симпозиума українських інженерів-механіків, 23–25 травня 2007р., м. Львів
6. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широгрaфии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Е.М. Савицкая, И.В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 7–13.

Ін-т електросварювання ім. С.О.Патона НАН України,  
Київ

Надійшла до редакції  
20.09.2010



## Новости УО НКТД

Делегация УО НКТД приняла участие в 18-й Международной ежегодной конференции и выставке «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» состоявшейся в Ялте с 4 по 8 октября 2010 г.

Организаторы конференции: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (Киев), НПП «Машиностроение» (Днепропетровск), Украинское общество НКТД. Генеральный спонсор: МЧТПП «ОНИКО» (Киев).

В конференции приняли участие более 150 специалистов из всех регионов Украины, а также из России, Республики Беларусь, Узбекистана, Литвы, Великобритании, Германии, Болгарии и др. стран.



Участники представили свои доклады на двух секциях: «Современные методы и средства НК в промышленности», «Диагностика состояния промышленных объектов».

Особый интерес специалистов вызвал состоявшийся в рамках конференции Международный научно-технический семинар «Ультразвуковой контроль ответственных объектов с использованием современных технологий ультразвукового контроля TOFD, LRUT, УТРА». Данные технологии УЗ контроля широко используются за рубежом, однако в Украине еще недостаточно известны. Для ознакомления отечественных специалистов с особенностями применения методов низкочастотного УЗ контроля протяженных объектов направленными волнами, а также использования технологии фазированных решеток при УЗ контроле объектов с ограниченным доступом на семинар были приглашены руководители европейских научных проектов «Long-Range Ultrasonic Condition Monitoring» и «ShipInspector» Peter Mudge и Phil Catton из Британского института сварки TWI, а также президент Болгарского общества неразрушающего контроля проф. Митко Миховски, специалисты Института механики Болгарской академии наук Александр Алексиев и Йордан Мирчев. В выполнении обоих проектов участвует Украинское общество НКТД.

Состоялись также семинары «Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования АЭС, находящихся в эксплуатации», «Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов», «Диагностика и ремонт металлургического оборудования», в которых принимали участие представители УО НКТД.