

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ: ДВУХМЕРНАЯ БАЙЕСОВА РЕКОНСТРУКЦИЯ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, А. П. КУНЦЕВИЧ, Г.-Р. ТИЛЛАК

В теплоэнергетике, химической промышленности, трубопроводном транспорте всегда существует необходимость диагностики текущего состояния внутренней поверхности труб, ослабленных коррозией в процессе эксплуатации. Если доступ к наружной поверхности не затруднен, то используют контактные методы ультразвуковой и электромагнитной толщинометрии. Проблема возникает, если такой доступ невозможен, например, из-за наличия изоляции, высокой температуры и прочих ограничений. В этом случае широко используется метод радиометрии [1].

Сущность метода радиометрии иллюстрируется рис. 1. Исследуемая труба просвечивается рентгеновским излучением источника S , как правило, коллимированного. Прошедшее через трубу излучение регистрируется детектором D и преобразуется в цифровую форму. Это может быть сделано с помощью комплексной радиоскопической системы или пленочного детектора со сканером. Поглощение излучения интенсивностью I (рис. 1) максимально в области между касательными к наружной и внутренней поверхностям трубы. По ширине провалов можно судить о толщине стенки трубы в данном месте. Этот подход называют тангенциальной радиографией. Несмотря на широкое распространение, этот метод имеет ряд недостатков.

Во-первых, толщина стенки измеряется только в локальной области. Для полного восстановления толщины стенки необходимо провести множество рентгеновских съемок, поворачивая систему источник-детектор вокруг оси трубы в диапазоне 180° , так как коррозия может быть неоднородной. Использование столь широкого диапазона углов съемки и большого числа проекций практически невозможно.

Во-вторых, в результате рассеяния рентгеновского излучения и других эффектов провалы размываются, что приводит к значительной погрешности определения даже локальной толщины, особенно тонкостенных труб. Достигнутая в настоящее время точность измерения толщины стенки этим методом составляет 1 мм, что неприемлемо.

Кардинальным решением было бы получение изображения сечения трубы с помощью компьютерной томографии, однако это требует, кроме большого числа проекций (~ 700), кругового обзора, или, как минимум, 180° обзора.

В работах [2–4] изложены принципы и алгоритмы малоракурсной рентгеновской томографии (МРТ) с использованием байесовой реконструкции [5]. В настоящей статье сделана попытка применить МРТ для двухмерной реконструкции внутренней

поверхности трубы в поперечном сечении с использованием до пяти рентгеновских проекций и диапазоном углов поворота при рентгеновской съемке (углом обзора) до 90° . Цель такого подхода — заменить экспериментальные исследования математическим моделированием. Однако это связано с существенным недостатком информации (малое число проекций и малый угол обзора) и со значительной модельной неадекватностью, что будет пояснено ниже.

Вначале излагаются основные принципы МРТ и описывается реконструкция, проведенная на основании данных, полученных моделированием.

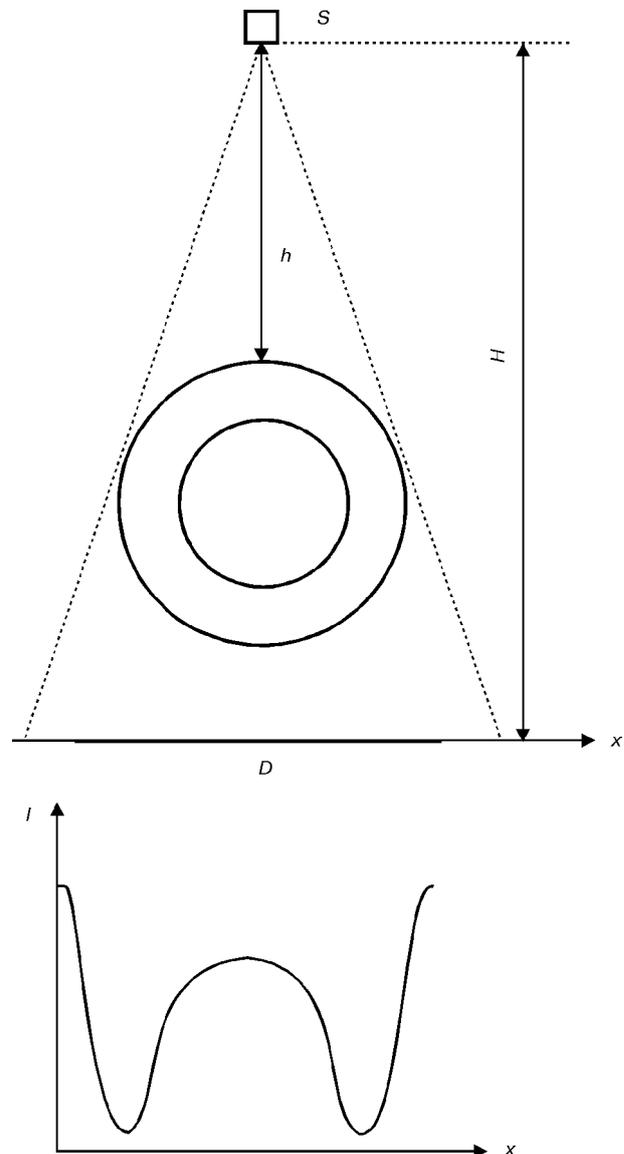


Рис. 1. Схема рентгеновской съемки и общий вид получаемого изображения.

Затем излагается нетривиальная проблема модельной неопределенности, т. е. существенной неточности физической модели рентгеновской съемки, проявляющаяся в этой практической задаче. После этого изложен метод решения, использованный в данной работе. Далее приведены результаты двухмерной реконструкции, полученные на реальных данных при известной внешней поверхности трубы.

Основные принципы МРТ. Назовем лучевой суммой $P_{n,i}$ линейный интеграл

$$P_{n,i} = \int \mu(r) dI \quad (1)$$

по отрезку, соединяющему источник рентгеновского излучения, который предполагается точечным, с центром i -го пиксела на n -й проекции (т. е. на рентгеновском снимке при n -м положении системы источник–труба–детектор). Здесь $\mu(r)$ — функция пространственного распределения коэффициента ослабления. Поскольку тип вещества однозначно связан с $\mu(r)$, то при известной $\mu(r)$ известны форма и внутренняя структура исследуемого объекта.

Уравнение (1) идеализированное и не учитывает ошибок измерения, в том числе и систематических, обусловленных неадекватностью модели. В общем виде процесс измерения выражается операторным уравнением

$$P_{n,i} = (T\mu(r))_{n,i} + \eta_{n,i}, \quad (2)$$

где $(T\mu(r))_{n,i} = \int \mu(r) dI$, т. е. T — оператор, выражающий формулу (1); $\eta_{n,i}$ — шум в i -м пикселе n -й проекции.

Из байесовой теории реконструкции известно, что если эти шумы носят несистематический характер, а их распределение близко к гауссовому, то наиболее физически вероятное решение уравнения (2) относительно $\mu(r)$ можно записать в виде

$$\mu_{\text{вер}}(r) = \arg \min \left\{ \left[\sum_{n,i} ((T\mu(r))_{n,i} - P_{n,i}^m)^2 \right] + \alpha B(\mu(r)) \right\}, \quad (3)$$

где $(T\mu(r))_{n,i}$ рассчитаны, а $P_{n,i}^m$ получены из измеренных данных на основании закона поглощения излучения в веществе

$$I = I_0 e^{-P}, \quad (4)$$

где I_0 — интенсивность рентгеновского излучения, не прошедшего через вещество; I — интенсивность, измеренная детектором; P — лучевая сумма.

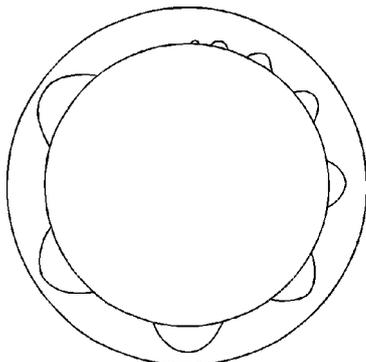


Рис. 2. Профиль трубы в модельном эксперименте.

Первое слагаемое в (3) отвечает за соответствие $\mu(r)$ измеренным данным. Во втором $B(\mu(r))$ — ограниченный снизу функционал, заключающий в себе наши априорные знания об искомом решении, т. е. значение функционала для данного $\mu(r)$ определяется априорной вероятностью этого $\mu(r)$; α — положительный параметр, зависящий от ошибок измерения: чем выше ошибка, тем большим нужно брать $\alpha(r)$, так как измеренным данным приходится меньше доверять. Выбор наиболее правдоподобной априорной информации, по существу, и составляет искусство байесовой реконструкции. Именно априорная информация противостоит недостатку и неполной достоверности входных данных.

Преимуществом МРТ является одновременная обработка всей доступной информации. В результате этого составляющая, связанная с шумом и другими ошибками, и, как правило, не подтвержденная на всех проекциях, или грубо противоречащая нашим априорным знаниям о характере решения, отбрасывается.

Реконструкция по моделированным данным.

Для проверки эффективности применения байесовой реконструкции к проблеме реконструкции профиля внутренней поверхности трубы проведены эксперименты по восстановлению из моделированных данных с наложенным на них знакопеременным гауссовым шумом. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. Источник рентгеновского излучения полагается точечным и имеющим однородное угловое распределение интенсивности излучения. Данные снимались при пяти углах поворота трубы (вокруг своей оси, которая оставалась неподвижной): 0, 25, 45, -25 и -45°. Были рассчитаны лучевые суммы $P_{n,i}$ для нескольких профилей внутренней поверхности трубы, в частности, изображенного на рис. 2, на которые наложен аддитивный гауссов шум. Затем эти данные использовались как входные для алгоритма реконструкции.

Алгоритм. Область интереса дискретизировалась на равномерной сетке в полярных координатах, разбиваясь в них на прямоугольные. Поскольку задача бинарная, т. е. в ней присутствуют только два вида вещества (воздух и металл), то каждой i -й ячейке сопоставлялась своя величина μ_i , имеющая одно из двух возможных значений. После дискретизации операторное уравнение (1) можно представить в виде

$$P_{n,i} = \sum_j \mu_j I_{n,ij}, \quad (5)$$

где $I_{n,ij}$ — эффективное расстояние, проходимое лучом, падающим на i -й пиксел детектора на n -й проекции, через j -ю ячейку дискретизации.

В качестве априорного функционала $B(\mu)$ использовался один из простейших априорных функционалов — сумма квадратов первых производных по базисным направлениям в центре каждой ячейки дискретизации. С точностью до постоянного множителя,

$$B(\mu) = \sum_j \sum_a (\mu_j - \mu_{j,a})^2, \quad (6)$$

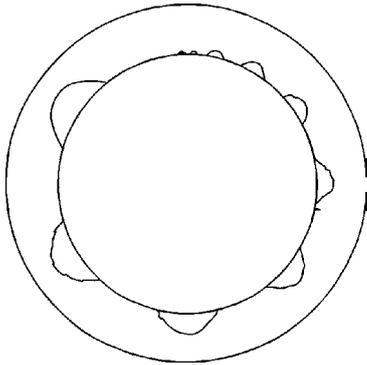


Рис. 3. Результаты восстановления в модельном эксперименте.

где индекс a обозначает ячейки, соседние с j -й; μ_j , a — коэффициент ослабления в ячейках дискретизации, соседних с j -й. Кроме того, в априорную информацию вводились дополнительные ограничения, направленные на формирование цельного профиля внутренней поверхности и исключение возможности появления внутренних полостей в стенке трубы в конечном решении.

После подстановки выражений (5) и (6) в уравнение (3) получаем для $\mu = \{\mu_r\}$

$$\mu = \arg \min \left\{ \sum_{n,i} \left(\sum_j \mu_j I_{n,ij} - P_{n,i}^m \right)^2 + \alpha \sum_j \sum_a (\mu_j - \mu_{j,a})^2 \right\}.$$

Минимизация проводилась с помощью оригинального алгоритма, основанного на идее градиентного спуска.

Результат восстановления профиля трубы показан на рис. 3. Как видно, с помощью байесового подхода удается подавлять несистематический шум и успешно противостоять недостатку информации, приводя к средней ошибке восстановления толщины стенки 80 мкм при шуме со стандартным отклонением, равным 5 % от толщины стенки трубы. Однако систематических ошибок входных данных не было, и физическая модель была полностью определена.

Реконструкция по реальным данным. Проблема реконструкции по реальным данным существенно отличается от описанной выше. Главное ее отличие состоит в неадекватности модели поглощения (4), обычно используемой в МРТ, реальному взаимодействию рентгеновского излучения с трубами промышленных размеров. Это связано с высоким вкладом рассеяния в изображение на проекции, что вносит недопустимо большие систематические ошибки во входные данные для алгоритмов МРТ, которые не рассчитаны на сильное рассеяние. Большую роль играет явление ужесточения излучения, вытекающее из того, что высокие частоты спектра излучения источника поглощаются меньше, чем низкие. Систематические ошибки обусловлены также следующим: конечными размерами источника, который рассматривается как точечный, ошибками в определении геометрических параметров, неучтенный неравномерностью углового распределения интенсивности излучения источника, наличием близости от трубы объектов, сильно рассеивающих излучение. Эти факторы, в частности, могут вести к асимметрии изображения.

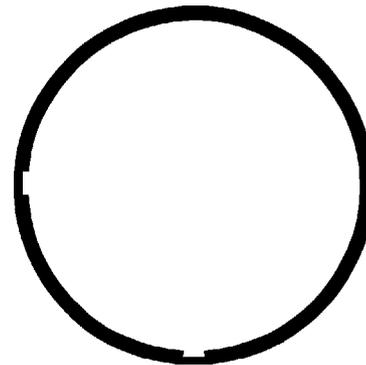


Рис. 4. Поперечное сечение реальной рентгеновской проекции.

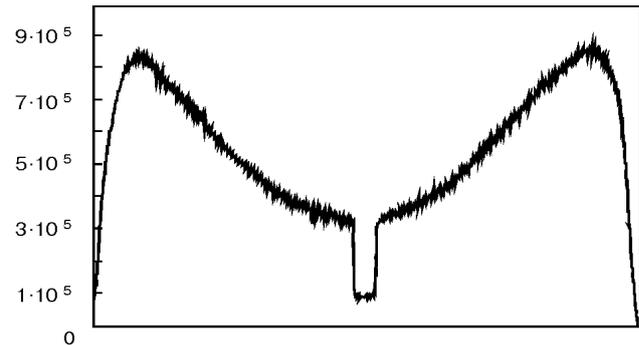


Рис. 5. Профиль трубы в реальном эксперименте.

Теоретически возможны несколько путей преодоления проблем, связанных с рассеянием.

1. Учет в модели рассеяние рентгеновского излучения. Однако сейчас не существует быстрых способов для его прямого расчета. Внушает определенные надежды проведение калибровки по специально подготовленным образцам труб.

2. Изменение процедуры рентгеновской съемки с тем, чтобы минимизировать те эффекты, которые нельзя учесть в модели. В частности, можно отнести детектор на большое расстояние от трубы, чтобы вклад рассеяния был однородным по всей проекции и с ним можно было обращаться как с постоянной составляющей. Однако это не всегда возможно в практических приложениях.

3. Выбор тех участков проекций, которые могут быть более успешно описаны уже существующей моделью (4), с дальнейшим использованием при реконструкции только их.

В данной работе в основном применялся третий подход.

Экспериментальные данные, использовавшиеся в данной работе, были получены по схеме, аналогичной описанной в предыдущей части (рис. 1) при следующих параметрах: источник 200 кВ; рентгеновская трубка с фокусным расстоянием 0,8 мм, расстояние от источника до трубы 50 см, а до детектора — 20 см, внешний диаметр трубы 11,4 см, толщина ее стенки 6 мм (в стенке вырезаны две прямоугольные продольные канавки определенных размеров — см. рис. 4), углы поворота 0, 25, 45, -25 и -45°. При 0° большой дефект расположен строго на перпендикуляре, опущенном из источника на детектор. На рис. 5 изображено типичное поперечное (относительно оси трубы) сечение проекции, полученной при сканировании экспонированной

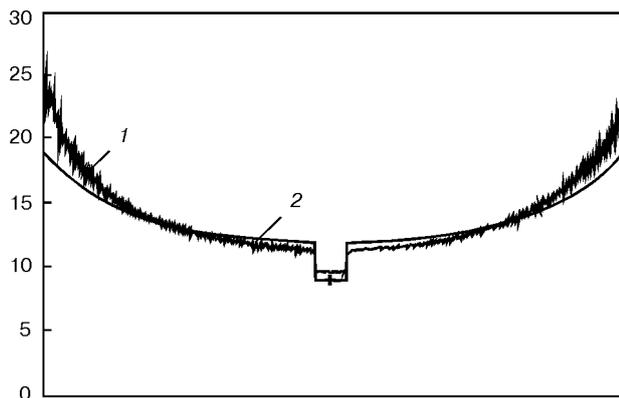


Рис. 6. Поперечное сечение реальной рентгеновской проекции в сравнении с данными, которые должны были получиться, если бы использованная модель (9) была полностью адекватна.

пленки (из тех, что использовались в описываемой работе). Здесь сканер инвертировал изображение и отсек большие интенсивности.

Входными данными для алгоритма реконструкции в МРТ являются лучевые суммы $P_{n,i}^m$. Именно они должны быть получены из цифровых данных $D_{n,i}^m$ при сканировании пленки. С физической точки зрения связь между D и P состоит из связи между D и интенсивностью падающего излучения I , а также между I и P .

Зависимость между D и I линейная:

$$D = A + CI. \quad (7)$$

Коэффициенты A и C не могут быть рассчитаны теоретически ввиду сложности физических процессов, происходящих при экспонировании и сканировании пленки. Один из коэффициентов можно исключить, если определить $D = D_0$, соответствующее лучам, не проходящим через вещество:

$$B = D_0 - AI_0. \quad (8)$$

Однако, если, как это было в использованных в данной работе экспериментах, весь диапазон оптической плотности на экспонированной пленке не помещается в диапазон сканера, то даже это невозможно. В этом случае данные, соответствующие большим интенсивностям, отбрасываются, и D_0 измерить невозможно. Поскольку связь между D и P для труб очень мало изучена, для начала пришлось ограничиться простейшей аппроксимацией этой связи

$$D_{n,i} = a + b \exp(-P_{n,i}) + c(X_{n,i} - X_c), \quad (9)$$

Среднеквадратичная ошибка восстановления толщины стенки в зависимости от размеров отсекаемой части проекции

Отсекаемая часть, %	Ошибка			
	общая, мм	для центрального дефекта, мм	для бокового дефекта, мм	для остальной части (артефакты), мм
24	0,16	0,81	0,24	0,12
25	0,16	0,82	0,29	0,12
30	0,16	0,79	0,31	0,12
35	0,20	0,98	0,45	0,15
40	0,19	0,80	0,89	0,11
45	0,19	0,80	не восстанавливается	0,11
60	0,22	1,0	—	0,13

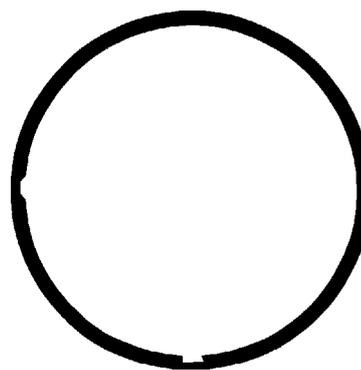


Рис. 7. Результаты восстановления по данным реального эксперимента.

где $X_{n,i}$ — координата i -го пиксела n -й проекции; X_c — координата проекции оси трубы на детектор; a, b, c — параметры, которые должны быть найдены.

При расчете лучевых сумм $P_{n,i}$ коэффициент μ , рассчитывался с учетом явления ужесточения излучения. Третье слагаемое в выражении (9) предназначено для компенсации асимметрии.

Коэффициенты a, b, c находились путем квадратичной оптимизации. Минимизировалась разница между измеренными значениями D и рассчитанными по формуле (9).

Установлено, что эти коэффициенты не могут быть оптимизированы так, чтобы формула (9) удовлетворительно описывала все сечение. Однако она относительно успешно работает, если отбросить края сечения (не менее 20 %). Это уменьшает количество входных данных и одновременно кардинально улучшает их качество. В качестве примера представлен рис. 6, где изображены теоретически рассчитанные 1 и полученные из измеренных данных 2 (при оптимальных a, b, c) лучевые суммы, нормированные на μ , материала трубы. Видны очень сильные расхождения систематического характера. Сильные систематические искажения присутствуют и на всех остальных проекциях. Однако они не подтверждают друг друга, и поэтому в основном отбрасываются алгоритмом МРТ. Результат восстановления сечения трубы показан на рис. 7. Следует отметить, что боковой (меньший) дефект фактически восстанавливался только по двум проекциям $\pm 45^\circ$. Иначе говоря, входные данные на остальных проекциях говорили не о том, что дефект не существует, а о том, что никакой информации о нем нет.

В таблице приведены интегральные характеристики качества восстановления каждого из дефектов, поверхности между ними, а также толщины стенки в целом в зависимости от размеров отсекаемой области.

ВЫВОДЫ

Проверена возможность применения малоразмерной рентгеновской томографии для определения толщины стенки трубы при известной внешней поверхности. Показано, что при наличии точной физической модели задача успешно решается даже при сильном шуме. Однако, как было найдено, реальная физическая модель взаимодействия излучения и вещества

трубы может сильно отличаться от простейшей модели поглощения. Поскольку систематической работы по уточнению модели пока не проведено, принята попытка ее аппроксимации. С целью улучшения качества входных данных, т. е. более успешной аппроксимации, предложено использовать проекции не полностью, а лишь их центральные части. Используемый метод реконструкции отличается принципиальной способностью извлекать правильную информацию из этих данных, с переменным успехом подавляя недостатки физической модели. Получение более точных результатов требует либо улучшения технологии съемки, чтобы модель поглощения больше соответствовала реальности, либо дальнейшего изучения закономерностей рассеяния рентгеновского излучения на трубах. Альтернативным путем является проведение экспериментальной калибровки для каждого конкретного типа источника и трубы.

Данная работа проводилась на оборудовании Федерального института материаловедения и испытаний

Германии при содействии доктора У. Эварта, К. Беллона и И. Онеля.

1. *Zscherpel U., Bellon C.* Wall thickness estimation from digitized radiographs // Proc. of 7-th ECNDT conference, Copenhagen 1998. — P. 2819–2825.
2. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu. B., Tillack G.-R.* Reconstruction of 3D binary structures from an extremely limited number of cone-beam X-ray projections // J. Phys., dev. appl. phys. — 1999. — № 32. — P. 2505–2514.
3. *Zolotarev S. A., Vengrinovich V. L., G.-R. Tillack.* 3D reconstruction of flaw images with Inter-Iterational suppression of shadow artefacts // Rev. of Prog. In QNDE / Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti. — New-York: Plenum Press, 1997. — Vol. 16.
4. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Limited projection 3D X-ray tomography using the maximum entropy method // Review of Progress in QNDE / Ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti. — Vol. 17. — New-York: Plenum Press. — 1998. — P. 403–410.
5. *Besag J.* Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems // J. R. Statist. Soc., 1974. — B36. P. 192–236.

*Ин-т прикладной физики НАН Беларуси,
Минск
Федеральный ин-т исследования материалов и контроля,
Берлин*

*Поступила в редакцию
19.09.2000*

Специалисты отдела №4 ИЭС им.Е.О.Патона предлагают Вам:

- ✓ **проведение** неразрушающего контроля сооружений, конструкций, материалов и изделий ультразвуковым, рентгеновским, магнитопорошковым, капиллярным, герметичности, и другими методами НК по различным нормам и стандартам;
 - ✓ **определение** типа, местоположения и реальных размеров дефектов с использованием компьютеризированных ультразвуковых дефектоскопов;
 - ✓ **проведение** сертификационных испытаний объектов повышенной опасности (котлы, сосуды, резервуары, трубопроводы, краны, трубы) методами НК;
 - ✓ **разработка** технологии, оформление и утверждение технологических инструкций на проведение НК объектов;
 - ✓ **оказание** консультативных услуг в выборе и применении средств и методов НК, а также содействие в приобретении средств НК отечественных и зарубежных фирм;
 - ✓ **аттестация** испытательных лабораторий (служб неразрушающего контроля) на техническую компетентность в области НК, в соответствии со стандартами ДСТУ EN45001 и ДСТУ EN45002;
 - ✓ **обучение** специалистов ультразвукового, радиационного, магнитопорошкового, капиллярного, визуального и контроля герметичности по программам начального обучения и подготовки к экзаменам на 1, 2 и 3 уровни квалификации;
 - ✓ **проведение** механических испытаний, металлографических исследований и химанализа основного металла и сварных соединений;
 - ✓ **изготовление** стандартных образцов предприятия для ультразвукового контроля; обеспечение нормативно-технической документацией по НК и соответствующей литературой.
- Наши специалисты сертифицированы на 2 и 3 уровни квалификации по всем методам НК, а техническая компетентность отдела подтверждена сертификатами Госстандарта Украины и Госназдорхрантруда Украины.

**Ин-т электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4.
Телефоны: (044) 227 26 66, 261 51 96. Факс: (044) 220 94 82.
E-mail: paton@i.kiev.ua**