



# ТЕХНОЛОГИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, В. А. ЗНОВА<sup>2</sup>, В. А. ПИВТОРАК<sup>1</sup>, И. В. КИЯНЕЦ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «АНТОНОВ». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Приведена технология неразрушающего контроля качества авиационных конструкций на основе использования метода электронной широгрaфии. Рассмотрено выявление дефектов в виде трещин путем сравнения двух спекл-структур исследуемой поверхности, полученных в исходном и нагруженном состояниях объекта. Представлены результаты, полученные как на методических образцах, так и на элементах натуральных конструкций. Показано, что метод позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты, вызывающие при нагружении (механическом, термическом и т. п.) локальную концентрацию напряжений. Библиогр. 5, рис. 6.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль качества, диагностика авиационных конструкций, широгрaфия

В соответствии с современными Авиационными правилами, как действующими в СНГ (АП-25), так и в странах дальнего зарубежья (FAR-25, JAR-25), основным принципом обеспечения прочности конструкции гражданских самолетов является «допустимость повреждения». При этом предполагается, что возникшее в процессе эксплуатации или изготовления повреждение (дефект) будет своевременно выявлено и устранено до того, как состояние конструкции окажется ниже требуемой остаточной прочности. С этой целью еще на этапе проектирования и испытаний разрабатываются перечни мест конструкции, требующих контроля, в регламенте технического обслуживания определяются сроки, методы и средства неразрушающего контроля. При этом учитывается напряженно-деформированное состояние, свойства материалов и предполагаемые методы контроля.

В процессе эксплуатации уточняется нагруженность конструкции, в случае необходимости корректируются перечень мест и применяемые методы контроля.

Использование принципа «допустимости повреждения» приобрело особое значение для обеспечения прочности парка стареющих самолетов. Его применение позволило увеличить ресурсы ранее спроектированных самолетов при сохранении заданного уровня безопасности.

В этой связи возрастают требования к методам неразрушающего контроля: с одной стороны, необходимо повышение надежности и чувствительности методик обнаружения дефектов, что позволит реже проводить контроль, с другой – требуется уменьшение трудоемкости проведения контроля и вспомогательных работ.

В настоящее время разработаны и широко используются различные методы неразрушающего контроля качества конструкций. К ним относятся акустические, радиационные, магнитные, визуально-оптические и др. [1, 2]. Каждый имеет преимущества и недостатки, свою область применения, которая определяется чувствительностью и точностью обнаружения дефектов, но ни один из них не является универсальным. Передовые научно-исследовательские центры в различных странах ведут разработку и внедрение новых методов контроля качества различных объектов. Большие перспективы имеют комплексные методы контроля, сочетающие несколько способов. Новые возможности для диагностики конструкций заключены в использовании методов лазерной интерферометрии, в частности, электронной широгрaфии (ЭШ) [2, 3].

В последние годы ЭШ является наиболее интенсивно развивающимся когерентным оптическим методом исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и дает возможность бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Этот метод используется при исследовании различных материалов и конструкций и позволяет измерить деформацию объекта в условиях его нагружения. Этим обусловлена нечувствительность ЭШ к жестким смещениям объекта, вызванным влиянием окружающей среды, что и определяет ее универсальность и эффективность применения в производстве [2–5].

Важным преимуществом ЭШ для НК качества объектов является то, что в отличие от традиционных методов, которые только фиксируют наличие



или отсутствие дефектов, она позволяет выявлять концентрацию деформаций и напряжений, вызванную присутствием дефекта и конструктивными особенностями объекта.

Суть метода ЭШ заключается в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера когерентной световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговой элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры, разделяя апертуру на две половины. При этом в плоскости изображения CCD-камеры формируется два смещенных изображения контролируемого объекта. Интерференция световых волн образует интерференционную спекл-структуру, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-структуры, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционной картины полос (широграммы), которая содержит информацию о производных от компонент вектора перемещений точек поверхности. Компьютерная программа позволяет в автоматизированном режиме построить вдоль выбранных сечений контролируемой поверхности объекта кривые распределения производных от компонент вектора перемещений точек. На основе анализа полученных данных можно сделать вывод о дефектности исследуемой поверхности. Концентрация напряжений и деформаций в зоне дефектов под действием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос или на графике распределения производной от компоненты вектора перемещений в характерном сечении.

При выполнении неразрушающего контроля качества конструкций используется компактная широкографическая установка, в комплект которой входят полупроводниковый лазер, CCD-камера, широмодуль и портативный компьютер. Исследования осуществляются бесконтактно по отношению к поверхности объекта, изготовленного из металлических, полимерных и композиционных материалов [4].

Разработанная технология позволяет эффективно осуществлять широкографический неразрушающий контроль качества натуральных элементов и узлов конструкций сложной геометрической формы и значительных размеров [3–5]. Применение этого метода перспективно также для контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций.

Исследовали тестовые образцы подкрепляющих элементов обшивки фюзеляжа и крыла самолета. Образцы представляли собой две металлические пластины размерами 200×35×5 мм, которые скреплялись между собой одним или пятью болтовыми соединениями. В одной части образцов отверстия под болты выполняли с их раззенковкой. Для имитации трещин в образцах с цилиндрическими и раззенкованными отверстиями были выполнены надрезы длиной 3 мм и шириной раскрытия не более 0,1–0,2 мм.

При выполнении исследований вначале проводили эксперименты на тестовых образцах с одним центральным раззенкованным отверстием под болтовое соединение с имитированной трещиной (рис. 1). В качестве нагружения применяли обдув исследуемой поверхности образца воздухом, нагретым до  $T = 200\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 50 с. Запись ши-

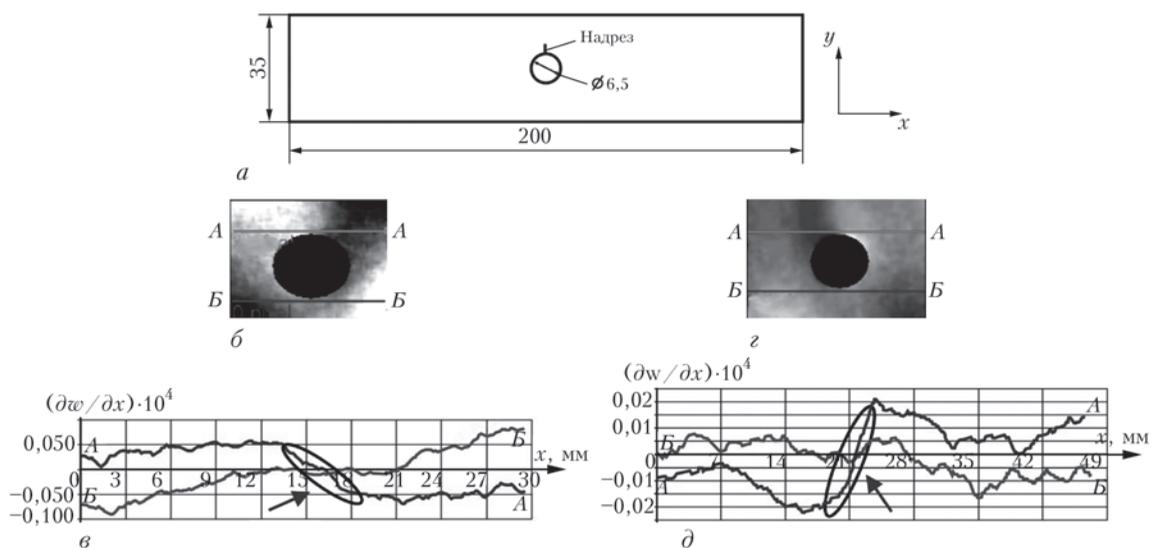


Рис. 1. Ширографический контроль тестового образца (а) с одним болтовым раззенкованным соединением и дефектом возле отверстия, выявляемым при термическом нагружении на стадии охлаждения (б, в) и при комбинированном нагружении на стадии нагрева (г, д): а – схема образца (200×35×5мм); б, г – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями А-А и Б-Б; в, д – кривые распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений А-А и Б-Б (зона дефекта показана стрелкой)



рограм выполняли с двукратным увеличением как на стадии нагрева, так и на стадии охлаждения. При этом величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси  $OX$ . Типичные результаты, полученные при термическом нагружении и характеризующие наличие дефекта в зоне болтового соединения приведены на рис. 1, б, в. Локальные изменения величины и знака производной характеризуют наличие дефектной зоны (отмечено стрелкой).

С целью выбора оптимального способа нагружения таких образцов (рис. 1, а), выполняли эксперименты с использованием комбинированного нагружения: предварительного механического подгружения образцов изгибом из плоскости образца и обдувом воздухом, подогретым до  $\sim 200^\circ\text{C}$  в течение  $\sim 20$  с. Величина широдвига составляла 5 мм в направлении оси  $OX$ . Фазовая картина и кривая распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений показаны на рис. 1, з, д. Резкие скачки в распределении производной свидетельствуют о дефектности контролируемого участка поверхности исследуемого образца (отмечено стрелкой).

Анализ результатов, представленных на рис. 1, показывает, что комбинированное нагружение вызывает более резкий локальный скачок в распределении производной и поэтому такой способ нагружения при контроле качества болтовых соединений является оптимальным.

Были выполнены исследования и эксперименты по выявлению имитированной трещины в окрестности цилиндрического отверстия болтового соединения, при этом головка болта выступает над лицевой поверхностью тестового образца. Для нагружения контролируемых тестовых образцов применяли механическое воздействие (изгиб) и обдув воздухом, нагретым до  $\sim 200^\circ\text{C}$  в течение 8 с. При выполнении эксперимента величина широдвига составляла 1 мм вдоль направления оси  $OX$ . Полученные результаты, характеризующие деформирование тестового образца вдоль выбранных сечений, приведены на рис. 2. Резкий локальный скачок в распределении производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений характеризует наличие дефектного участка (отмечено стрелкой). Другие пики на кривых распределения производной  $\partial w/\partial x$  связаны с шероховатостью контролируемой поверхности тестового образца.

Выполняли также эксперименты по выявлению имитированной трещины в окрестности отверстия, расположенной под головкой болта, который находится в массиве других болтовых соединений. Проводили экспериментальные исследования на тестовых образцах с пятью болтовыми соединениями и нанесенным надрезом (имитация трещины) под головкой центрального болта

(рис. 3). Для нагружения исследуемого тестового образца применяли термический способ, так как использование механического нагружения (изгиб) при наличии пяти болтовых соединений является неэффективным. Регистрацию широграмм контролируемого участка выполняли как на стадии его нагрева, так и на стадии охлаждения, величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси  $OX$ .

Результаты эксперимента, полученные на стадии нагрева поверхности образца обдувом воздухом с температурой  $\sim 150^\circ\text{C}$  в течение 15 с, показаны на рис. 3, б, в. Локальное изменение величины и знака производной  $\partial w/\partial x$  вдоль указанных исследуемых сечений  $A-A$  и  $B-B$  характеризует наличие дефектов в контролируемом участке поверхности тестового образца.

Разработанную технологию применяли для НК качества натуральных элементов обшивки фюзеляжа самолета с использованием ЭШ и термического нагружения. Исследуемый элемент обшивки раз-

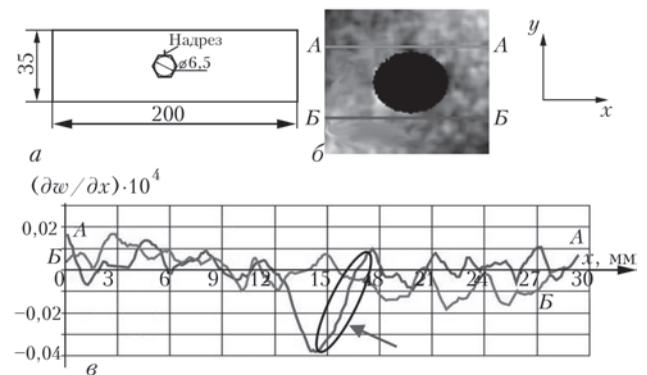


Рис. 2. Ширографический контроль тестового образца с одним болтовым соединением и дефектом возле отверстия, выявляемым при комбинированном нагружении на стадии охлаждения: а – схема образца (200×35×5мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями  $A-A$  и  $B-B$ ; в – кривые распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений  $A-A$  и  $B-B$  (зона дефекта показана стрелкой)

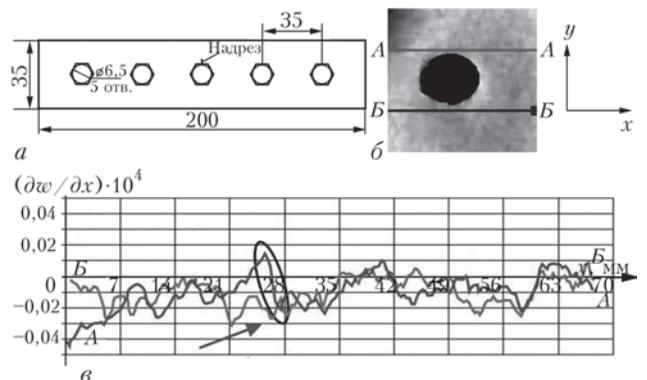


Рис. 3. Ширографический контроль тестового образца с пятью болтовыми соединениями и нанесенным надрезом под головкой центрального болта, выявляемым при термическом нагружении на стадии нагрева (описание а–в такие же, как на рис. 2)



мерами 1220×980×2 мм из алюминиевого сплава, усиленный с обратной стороны рядами стрингеров, которые с помощью заклепок соединялись с обшивкой, показан на рис. 4, а.

Имитированные трещины, которые необходимо выявить при проведении контроля качества, располагались в окрестности отверстий от заклепок и на полке стрингеров.

Выполнялась первая серия экспериментов, целью которой являлось выявление имитированной трещины в окрестности отверстия от заклепки (заклепка отсутствовала). В качестве нагружения применялся обдув лицевой стороны элемента обшивки воздухом, нагретым до ~ 100 °С в течение ~ 5 с на стадии охлаждения, показаны на рис. 5. Картина поверхности деформирования исследуемого участка, а также кривая распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль контролируемого сечения А-А, отображают две головки заклепок на лицевой поверхности элемента обшивки фюзеляжа самолета и деформирование из плоскости исследуемой поверхности в окрестности исследуемых от-

верстий, которые характеризуют наличие имитированной трещины, расположенной в окрестности отверстия, приведены на рис. 4, б, в. Локальное изменение величины производной в окрестности одного из отверстий характеризует присутствие дефектного участка.

Вторая серия выполненных экспериментов направлена на выявление имитированной трещины в окрестности отверстия под заклепкой, которая находится в массиве других точек. Типичные результаты, полученные при обдуве контролируемого участка поверхности обшивки воздухом, нагретым до ~ 100 °С в течение ~ 5 с на стадии охлаждения, показаны на рис. 5. Картина поверхности деформирования исследуемого участка, а также кривая распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль контролируемого сечения А-А, отображают две головки заклепок на лицевой поверхности элемента обшивки фюзеляжа самолета и деформирование из плоскости исследуемой поверхности в окрестности двух отверстий под заклепками.

С целью выявления имитированной трещины, которая располагается на полке стрингера, проводили эксперименты с использованием термического способа нагружения (нагрев воздухом до ~ 100 °С в течение ~ 5...10 с) контролируемого участка поверхности обшивки. При этом масштаб изображения изменялся таким образом, чтобы на исследуемом участке контролируемой поверхности разместилось два ряда по 5 заклепок в каждом (30 мм на исследуемом участке изображались как 25 мм на экране компьютера). Типичная картина поверхности деформирования исследуемого участка, а также кривая распределения производной  $dw/dx$  вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б

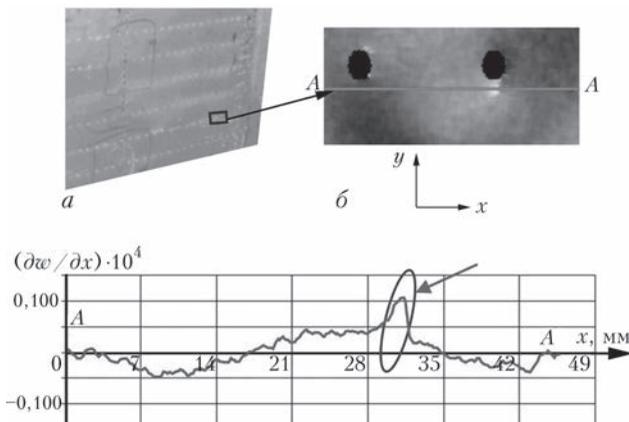


Рис. 4. Ширографический контроль участка с дефектом возле отверстия от заклепки, выявляемом при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии нагрева: а – общий вид элемента (1220×980×2 мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенным выбранным сечением А-А; в – кривая распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранного сечения А-А (зона дефекта показана стрелкой)

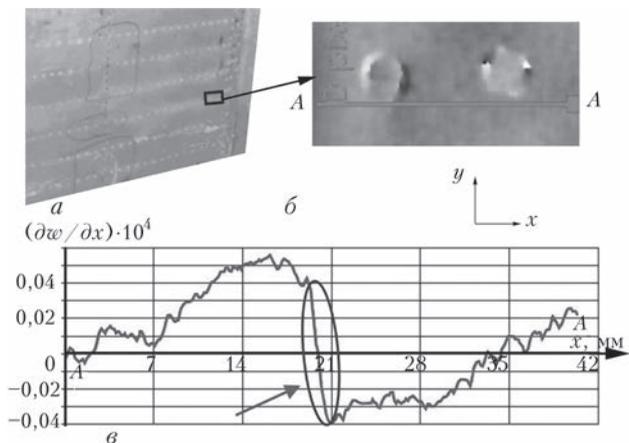


Рис. 5. Ширографический контроль участка с дефектом возле отверстия с заклепкой при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии охлаждения (описание а-в такие же, как на рис. 4)

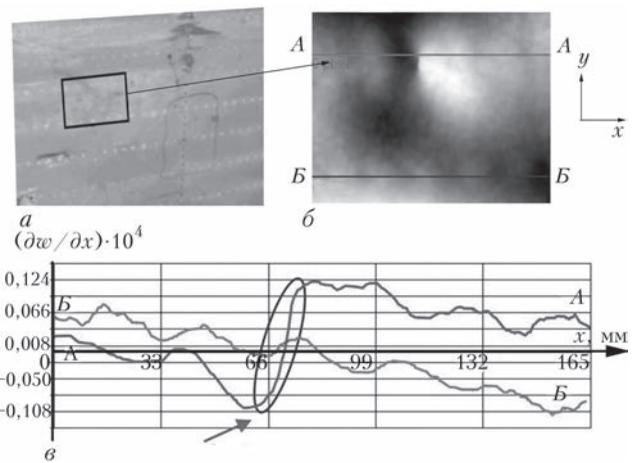


Рис. 6. Ширографический контроль участка поврежденного стрингера при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии охлаждения: а – общий вид элемента (1220×980×2 мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями А-А и Б-Б (дефектное и бездефектное соответственно); в – кривые распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений А-А и Б-Б (зона дефекта показана стрелкой)



показаны на рис. 6. Локальное изменение величины и знака производной в окрестности одной из заклепок характеризует дефектный участок (отмечено стрелкой).

### Выводы

Разработана технология широкографического неразрушающего контроля качества, которая при использовании оптимального способа нагружения (механического, температурного и т. п.) с учетом особенностей геометрии элементов авиационных конструкций и материалов контроля позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты, вызывающие при нагружении концентрацию напряжений.

Полученные результаты контроля длительное время могут сохраняться в памяти компьютера и при необходимости после эксплуатации объекта

контроля на протяжении определенного времени может быть проведена повторная диагностика конструкций с целью выявления дефектов, возникших в процессе эксплуатации.

1. *Rastorgy P. K.* Trends in nondestructive and inspection / Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.
2. *Hung Y. Y., Ho H. P.* Shearography: An optical measurement technique and applications // Materials Sci. and Eng. – 2005. –R49. – P. 61–87.
3. *Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 4. – С. 7–13.
4. *Оперативний контроль якості елементів авіаційних конструкцій методом електронної ширографії* / Л. М. Лобанов, В. А. Півторак, В. Я. Дереча та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, №3. – С. 37–42.
5. *Оперативний контроль качества сварных панелей из сплава VT-20 с использованием метода электронной ширографии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 28–33.

Поступила в редакцию  
08.07.2014

## ДНИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В БОЛГАРИИ

С 9 по 18 июня 2014 г. в древнем болгарском черноморском городе Созополь прошли Дни неразрушающего контроля – комплекс мероприятий по неразрушающему контролю, который включал: 29-ю Международную конференцию «Дефектоскопия», научный семинар по Европейскому проекту «INNOPIPES» и совещание представителей организаций, участвующих в проекте, болгарско-русский семинар «Диагностика электроэнергетических систем», национальный семинар «Задачи и проблемы НК элементов железнодорожного транспорта», круглые столы «Порошковая металлургия и композитные материалы», «Стандартизация, нормативная база и обучение по НК», «Аккредитация», «Неразрушающий контроль в Болгарии».

Ключевым мероприятием «Дней...» является традиционная конференция «Дефектоскопия», которая в этом году собрала вместе около 180 специалистов из Болгарии, Украины, России, Румынии, Польши, Германии, Италии, Латвии, Литвы, Хорватии, Боснии и Герцеговины, которые представили 125 пленарных, секционных и стендовых докладов.

Приятно отметить большое представительство Украины на конференции: 13 специалистов из Института электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины, НТТУ «Киевский политехнический институт», НТУ «Харьковский политехнический институт», Ивано-Франковского НТУ нефти и газа.

В выставке средств неразрушающего контроля участвовали компании Innovia, Namikon 2001, TROKUTTEST-Bulgaria, E-VIT, Omel NDT, Spectri, ET «Ст. Запryanov», Мултитест.

Открыл конференцию президент Болгарского общества по НК, член Международной академии по НК (ANDTI) профессор Митко Миховски. Далее с приветственным словом от имени национальных обществ по НК к участникам конференции обратились президент Российского общества НКТД, академик РАН, член ANDTI проф. Э. С. Горкунов, ученый секретарь Украинского общества НКТД А. Л. Шекеро.

Благодаря широкой известности и популярности болгарской конференции по НК, именно ее выбрали для проведения семинара и ежегодного рабочего совещания участники Европейского научного проекта «INNOPIPES», посвященного развитию современной технологии дальнедействующего ультразвукового контроля для обнаружения коррозионных повреждений трубопроводов и разработке новых композиционных материалов для их ремонта. Выполнение проекта предусмотрено в рамках Седьмой рамочной программы Европейского союза и предполагает взаимный обмен специалистами для их стажировки, а также обмена знаниями и опытом в области исследований.

В проекте участвуют восемь организаций из семи стран: Латвии (Рижский технический университет), Болгарии (Институт механики Болгарской академии наук), Польши (Военная техническая академия), Румынии (Институт нефти и газа), Украины (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и НТУ «Харьковский политехнический институт»), России (Южный федеральный университет) и Республики Беларусь (Институт металлополимеров Академии наук Беларуси).

Специалисты этих организаций в ходе своих презентаций поделились с участниками конференции достигнутыми в ходе совместных исследований по теме проекта результатами и обсудили направления дальнейших работ.

А. Л. Шекеро, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины