



## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Ю. А. СМОГОЛЬ, А. А. КОЗАКОВ

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

Рассмотрены вопросы прогнозирования на основе метода акустической эмиссии (АЭ) разрушающей нагрузки в действующих при высокой температуре трубопроводах тепловых станций. Показано, что прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка с достаточной для практики точностью определяет также и предел длительной прочности материала независимо от времени наработки и рабочей температуры. Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным АЭ контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. Учитывая наличие и готовность к применению необходимых аппаратных и программных средств, можно говорить о том, что разработаны соответствующие методика и технология. Библиогр. 16, рис. 4, табл. 1.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, длительная прочность, разрушающая нагрузка, прогноз, ресурс, коэффициент запаса

Разрушение материалов энергетических установок, работающих в условиях ползучести при высоких температурах, характеризуется возникновением и развитием на границах зерен сначала микротрещин, затем постепенным превращением их в поры с последующим слиянием пор и образованием магистральной трещины, приводящей к разрушению материала [1–8].

На рис. 1 представлен график длительной прочности стали 15X1M1Ф, наиболее широко применяемой в системах трубопроводов тепловых станций, показывающий, что разрушающие нагрузки уменьшаются с увеличением рабочей температуры и количества отработанного времени.

Исследованиями [1–8] установлено, что при определенном количестве часов наработки возникает смена механизма разрушения материала, клиновидные трещины преобразуются в поры и дальнейшее разрушение происходит путем образования и слияния пор. Этот процесс постепенного накопления повреждений и развития разрушения, являясь в условиях высоких температур доминирующим, сопровождается возникновением АЭ. При испытании материалов в условиях высоких температур с применением метода АЭ было показано, что их деформирование и разрушение вызывает возникновение множественных источников АЭ (рис. 2). Это свидетельствует о том, что образование и слияние пор в процессе разрушения материала при высоких температурах происходит также дискретно, как и при нормальных. Следовательно, методика АЭ контроля может быть использована и при оценке состояния материалов, работающих при высоких температурах [8, 10–12].

На графиках рис. 2:  $P$  – растягивающая нагрузка (синяя кривая);  $A$  – амплитуда АЭ сигналов, возникающих при разрушении материала (зеленая) и  $Rt$  – райс тайм, характеризующий «жесткость» процесса разрушения (розовая). Из графика видно, что с ростом нагрузки интенсивность разрушения материала и его жесткость изменяются в широких пределах, что свидетельствует о явно выраженном дискретном характере разрушения и влиянии на него постоянно возникающего изменяющегося упрочнения материала [13].

На рис. 1 представлены точки перехода от разрушения клиновидными трещинами к разрушению возникающими и развивающимися порами (точки  $A$  и  $B$  на графике). С увеличением рабочей температуры (в данном случае 610 °С) положение точки  $A$  начала изменения механизма разрушения

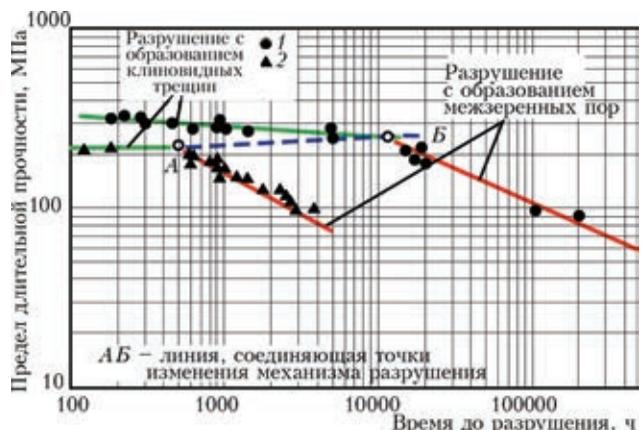


Рис. 1. Длительная прочность стали 15X1M1Ф при температурах 540 (1) и 610 °С (2) при различном времени наработки [2, 9]

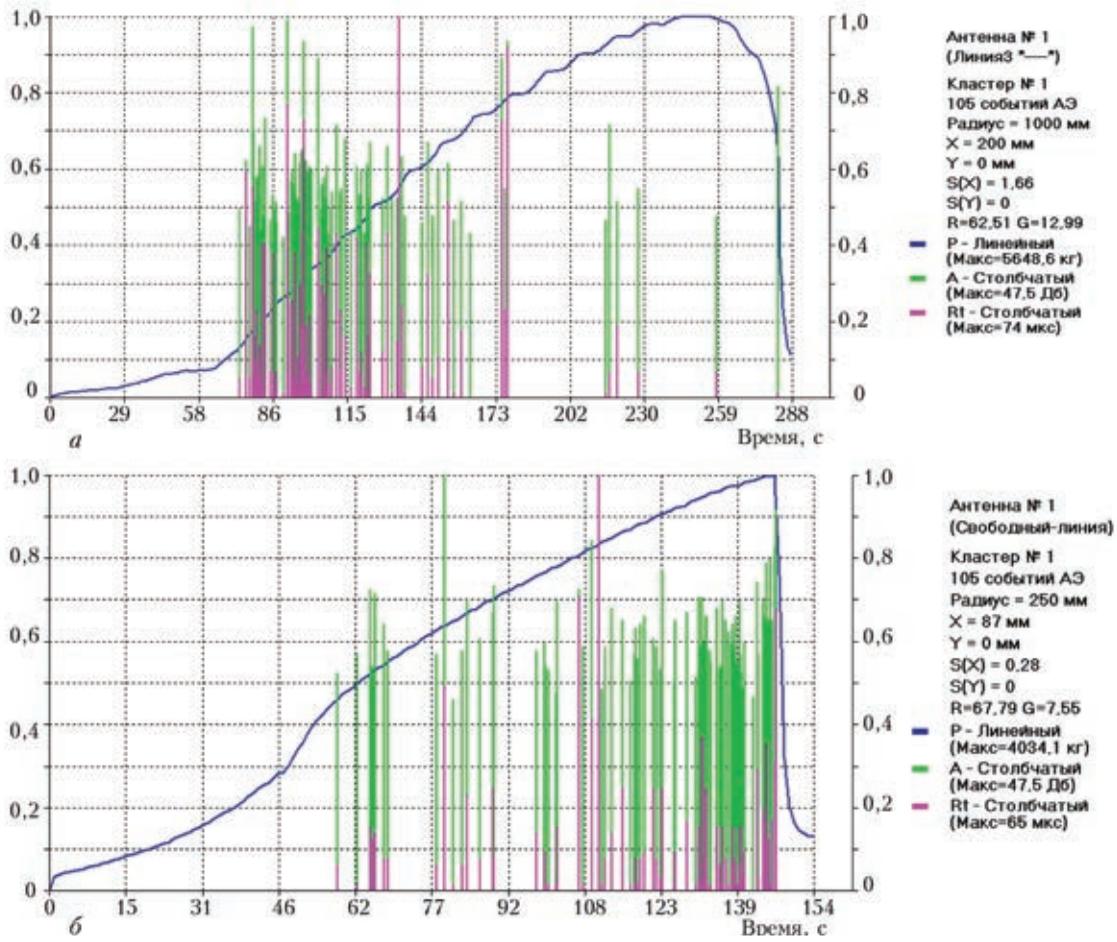


Рис. 2. Испытание на растяжение образца из стали 15X1M1Ф при температуре 560 (а) и 20 °С (б)

смещается в сторону меньшей наработки материала по времени. Эти данные хорошо коррелируют с результатами АЭ испытаний, приведенными на рис. 2. Так, на рис. 2, а график, полученный

при температуре 560 °С, отличается от графика на рис. 2, б более ранним началом появления АЭ по отношению к общему времени испытания, кроме того, большая часть зарегистрированных событий АЭ возникает на ранних стадиях нагружения. Еще одним важным фактором является то, что общее зарегистрированное число событий АЭ при переходе к высоким температурам не снижается, для приведенных результатов обоих испытаний оно равно 105.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что модель накопления повреждений, предложенная в работе [14], и практически реализованная в виде прогнозирующего разрушение материалов программного обеспечения, в частности, для систем АЭ диагностики ЕМА [10–12], может быть

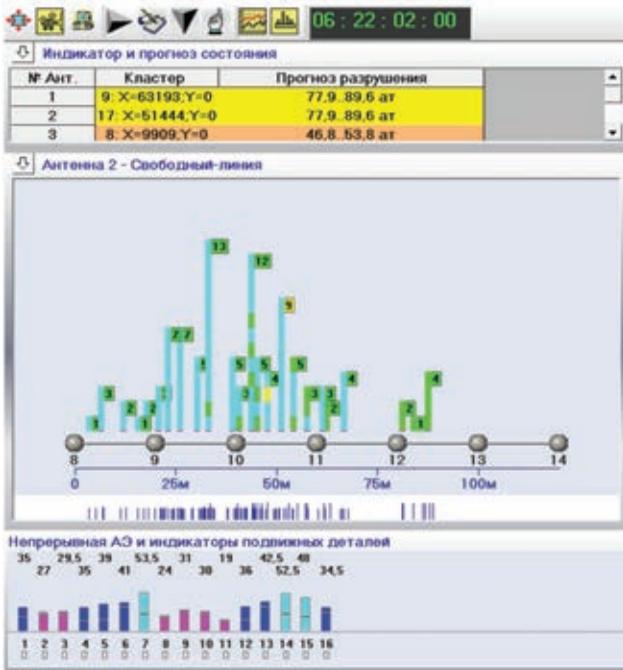


Рис. 3. Гистограмма состояния АЭ активности трубы через 6 ч 22 мин с момента начала контроля. (вверху в таблице представлены величины прогнозируемой разрушающей нагрузки)

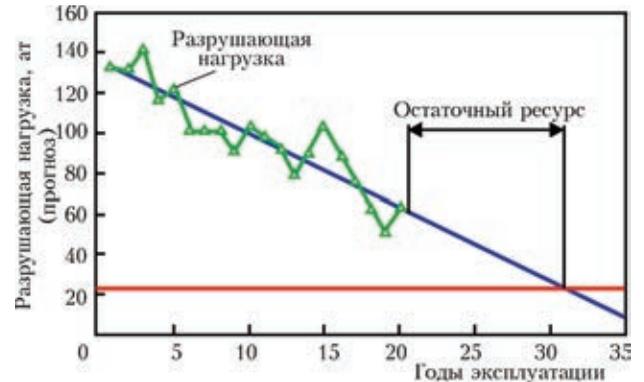


Рис. 4. Условная схема оценки остаточного ресурса



после определенной проверки использована для определения длительной прочности изделий, работающих в условиях высоких температур.

Исследование работоспособности предлагаемой методики определения длительной прочности проводили при контроле трубопроводов горячего промперегрева пара. Материалы трубопроводов – сталь 15X1M1Ф, диаметр трубы 630 мм, толщина стенки 25 мм, и сталь 12X1MФ, труба диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм. АЭ датчики устанавливали на трубе на расстоянии 20 м друг от друга. Контроль выполнялся при давлении пара в трубе, равном 22 ат, температура пара 542 °С. В процессе испытаний с использованием программы ЕМА-3.9 определяли места повышенной опасности и прогнозировалась разрушающая нагрузка [11, 15]. Испытания проводили в процессе непрерывного мониторинга трубопроводов при штатных режимах работы. Для трех контролируемых участков трубопровода из датчиков АЭ сформировали отдельные локационные антенны, обеспечивающие определение координат источников АЭ в линейном режиме локации. Для поступающей информации, идентифицируемой как события АЭ, предусмотрен кластерный анализ, позволяющий объединять события по координатному и ряду других признаков. При наличии существенного разброса в определенных координатах событий, с высокой вероятностью принадлежащих к одному и тому же процессу в материале, объединение их в кластер позволяет наиболее точно указать место возникновения их источника.

На рис. 3 представлены некоторые элементы окна программы, выполняющей мониторинг, приведена часть трубопровода, контролируемая антенной 2. Показаны датчики, начиная от 8 до 14. Ниже показана условная шкала расстояний от 0 до 100 м. Наибольшая АЭ активность наблюдается между 8 и 12 датчиками. Представленные на схеме столбики отражают места концентрации АЭ событий в каждом контролируемом кластере. Цифры на флажках показывают количество АЭ событий в кластере, цвет флажков указывает на степень опасности протекающего в кластере процесса разрушения. Над схемой кластеров в окне прогнозирования в специальной таблице для трех антенн, контролирующей всю систему трубопроводов, представлена цветом опасность ситуации на определенном участке трубопровода в данный момент времени. Показаны координаты наиболее опасных мест на всем трубопроводе по антеннам 1–3 и прогнозируемые разрушающие давления в этих местах трубопровода (антенна 3 контролирует участок трубопровода из стали 12X1MФ длиной 20 м диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм). В нижней части экрана приведены мгновенные значения непрерывной эмиссии, регистрируемой каждым кон-

тролирующим АЭ датчиком. Интенсивность эмиссии ранжирована высотой столбца и цветом.

Приведенные в таблице (вверху на рис. 3) значения прогнозируемого разрушающего давления, пересчитанные в напряжения, удовлетворительно соответствуют значениям предела длительной прочности сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, полученным для этих материалов при стандартных испытаниях образцов на длительную прочность [9].

В этой же таблице представлена цветом опасность ситуации в трубопроводе на данный момент времени. Для первой и второй антенн показаны координаты 63 и 51 м с наибольшей АЭ активностью. В то же время прогнозируемые разрушающие нагрузки в несколько раз превышают рабочие, что свидетельствует о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода этих ниток (цвет индикатора опасности – желтый). Антенна 3 контролирует участок трубопровода, находящийся в худших условиях по сравнению с 1 и 2 участками. В этом случае на участке трубы на расстоянии примерно 10 м от ее начала прогнозируемая разрушающая нагрузка примерно в два раза превышает рабочую (цвет индикатора для антенны 3 оранжевый), в то время как для участков 1 и 2 прогнозная разрушающая нагрузка превышает рабочую примерно в 4 раза.

Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным АЭ контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. При этом, чем большая разница между прогнозируемой и рабочей нагрузкой, тем меньший коэффициент запаса автоматически устанавливает система мониторинга. С уменьшением отношения  $P_{\text{раб}}/P_{\text{прог}}$  коэффициент запаса автоматически увеличивается.

Правильность используемого метода прогноза дополнительно подтверждается имеющимися данными по пределу прочности материалов, используемых в трубопроводах, в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах. Прогнозируемые разрушающие давления, пересчитанные в напряжения, с достаточной для практики точностью совпадают с величиной предела длительной прочности материала при аналогичных с контролируемым трубопроводом условиях по температуре и сроке наработки материала. Как показано в табл. 1, при 542 °С и наработке 207000 ч совпадение с нормативными значениями предела длительной прочности, особенно с учетом установленных коэффициентов запаса, является удовлетворительным.

Отметим, что данные АЭ, на основе которых выполнен прогноз, получены при штатных условиях эксплуатации. Проведенные исследования не требовали традиционных для кратковременных



Сравнение предела длительной прочности материалов испытанных трубопроводов по полученным результатам прогноза и данным ТУ 14-3-460:2009 ( $T = 542 \text{ }^\circ\text{C}$ , наработка 207000 ч)

Антенна	Предел длительной прочности	Источник	Коэффициент запаса (сталь)
1,2	113...141 МПа на базе $2 \cdot 10^5$	ТУ 14-3-460:2009	1,2 (15X1M1Ф)
1,2	98...113 МПа на базе $2,07 \cdot 10^5$	По данным прогноза	1,2 (15X1M1Ф)
3	52...60 МПа на базе $2,07 \cdot 10^5$	—"	1,5 (12X1MФ)
3	77...97 МПа на базе $2 \cdot 10^5$	ТУ 14-3-460:2009	1,5 (12X1MФ)

АЭ испытаний изменений рабочего давления, которые могут неблагоприятно сказаться на состоянии объекта контроля. Таким образом, на примере трубопроводов горячего промперегрева показана и экспериментально подтверждена принципиальная возможность прогнозирования длительной прочности материалов, работающих в условиях высоких температур, на основе данных АЭ, получаемых в процессе мониторинга. Учитывая наличие и готовность к применению необходимых аппаратных и программных средств, можно говорить о том, что разработаны соответствующие методика и технология.

Отметим, что, зная предел длительной прочности материалов и разрушающую нагрузку в каждый момент времени эксплуатации конструкции, можно оценить остаточный ресурс материала. На рис. 4 представлена условная схема определения ресурса по изменению во времени прогнозной разрушающей нагрузки материала конструкции, получаемой с помощью системы АЭ мониторинга ЕМА 3.9. График позволяет приблизительно оценить время до пересечения линии экстраполяции этих данных (синяя линия) с красной линией, представляющей рабочую нагрузку. Пересечение этих линий укажет на время разрушения материала. Назначив определенный запас по времени, можно определить допустимый остаточный ресурс материала, а, следовательно, и время вывода конструкции из эксплуатации.

### Выводы

Разработаны методика и технология определения предела длительной прочности материалов и разрушающих материал нагрузок промышленных конструкций, работающих при высоких температурах, на основе данных АЭ. Это позволяет в реальных условиях эксплуатации в любой момент времени и независимо от объема наработки и колебаний температуры определять разрушающую нагрузку и предел длительной прочности материала конструкций.

Разработанные методика и технология определения разрушающей нагрузки и предела длительной прочности реализованы в программном обеспечении для систем АЭ мониторинга ЕМА3.9, что, в частности, позволяет определять координаты мест с минимальным значением предела длительной прочности и разрушающей нагрузки, ука-

зывая, тем самым, наиболее проблемные области конструкций.

С целью обеспечения запаса по времени при принятии решения о состоянии контролируемого объекта, для прогнозируемых предела длительной прочности и разрушающей нагрузки установлены коэффициенты запаса, определяемые системой мониторинга автоматически в зависимости от степени опасности развивающихся в материале деструктивных процессов.

По изменению с течением времени прогнозных значений разрушающей нагрузки либо предела длительной прочности можно оценить остаточный ресурс материала конструкции, находящейся в эксплуатации.

1. Березина Т. Г. Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. – 1985. – № 8. – С. 48–52.
2. Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев: Техніка, 1991. – 120 с.
3. Исследование АЭ характеристик стали 12X18H10T при температуре  $560 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.
4. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. Лобанов, А. Недосека, С. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 1. – С. 5–10.
5. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2. / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 4. – С. 5–13.
6. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 202 с.
7. Минц И. И., Березина Т. Г., Ходыкина Л. Е. Исследование тонкой структуры и процесса образования пор в стали 12X1MФ при ползучести // Физ. металлов и металловедение. – 1974. – 37, вып. 4. – С. 823–876.
8. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 279 с.
9. ТУ 14-3-460: 2009/ ТУ 27.2-05757883-207: 2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.
10. Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики сплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1998. – № 1. – С.13–21.
11. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
12. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
13. Мортон К. Смит. Основы физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 456 с.
14. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев,



- Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31–40.
15. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев, Индпром, 2008. – 812с.
16. Структура, повреждаемость и свойства гибов паропроводов после длительной эксплуатации / П. И. Минц, Т. Г. Березина, Л. Е. Ходыкина и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 10. – С. 49–51.

Acoustic emission (AE) based prediction of breaking load in piping of thermal power stations operating at high temperature is considered. It is shown that the breaking load predicted by the system of continuous AE monitoring with accuracy sufficient for practical purposes, also determines material long-term strength, irrespective of operating time and working temperature. Safety factors by predicted breaking load were established to increase the reliability when taking a decision on the need for shutting down and taking a structure out of operation, based on AE monitoring data. Considering the availability and readiness for application of the required hardware and software, we can say that the respective procedure and technology have been developed. 16 References, 4 Figures, 1 Table.

*Keywords*: acoustic emission, long-term strength, breaking load, prediction, residual life, safety factor

Поступила в редакцию  
26.05.2014



Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) проводит Вторую ежегодную выставку средств и технологий неразрушающего контроля Территория NDT–2015, которая пройдет с 3 по 6 марта 2015 г. в Москве, в Павильоне №2 ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне.

В 2014 г. форум Территория NDT проводился впервые, тем не менее, он собрал более 100 ведущих российских и зарубежных компаний. Выставку посетили более 2500 человек из России, Украины, Германии, Чехии, Италии, Болгарии, Китая, Великобритании, Франции, Сербии. В круглых столах приняли участие более 400 специалистов. Обсуждения велись по актуальным вопросам применения НК в различных отраслях.

Свое участие в выставке Территория NDT-2015 подтвердили компании Helling GmbH, НУЦ Контроль и диагностика, АКА-контроль, Олимпрус, Алтек, ПромГруппПрибор, STARMANS, Просек-Рус, ИНТРОН ПЛЮС, ТЕККНОУ, НИКИМТ-Атомстрой, ТКС, Энергодиагностика, НПП Монотест, Юнитест, НПП ПРОМПРИБОР, НИИИН МНПО «Спектр», АКС, КОНСТАНТА, НУЦ «Качество».

В экспозиции Территории NDT-2015 будут представлены современные приборы НК и ТД, основанные практически на всех известных физических методах, от рентгеновских и акустических до капиллярных и течеискания.

Основные разделы выставки: неразрушающий контроль и техногенная диагностика, лабораторный и измерительный контроль, промышленная автоматизация измерений и испытания материалов.

[www.expo.ronktd.ru](http://www.expo.ronktd.ru)

## WCNDT 2016 – 19-я Международная выставка и конференция по неразрушающему контролю

13.06.2016 – 17.06.2016

Германия, Мюнхен

Эта крупнейшая в отрасли НК и ТД выставка проходит 1 раз в 4 года (в 2000 году – Рим, 2008 – Шанхай, 2012 – Дурбан).

### Отраслевая направленность конгресса WCNDT:

- Авиакосмическая, железнодорожная, автомобильная, судостроительная отрасли
- Нефтегазодобывающая, трубопроводная
- Архитектура и мостостроение
- Атомная промышленность, электроэнергетика
- Общая механика, материаловедение, производство и обработка
- Материалы (черные и цветные металлы, композиты, керамика, полимеры)
- Горное машиностроение
- Сертификация, тренинг
- Химия, нефтехимия, котлостроение
- Обработка данных, сенсоры
- Комплексные (безопасность, защита от радиации, оценка срока службы)
- Надежность систем контроля
- Стандартизация и др.

Методы тестирования: радиографическое (РТ), ультразвуковое (УТ), акустико-эмиссионные (АТ), инфракрасное термографическое (ТТ), капиллярное (ЛТ), магнитно-порошковое (МТ), проникающее (РТ), индукционное (ЕТ), визуальное (VT) и др.