

УДК 620.179

ДОСТИЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ И БЕЛОРУССКИХ УЧЕНЫХ В ОБЛАСТИ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

В. В. КЛЮЕВ, *Н. П. МИГУН, Б. В. АРТЕМЬЕВ, В. И. МАТВЕЕВ

ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр»
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Москва, Россия; Минск, Беларусь

Проблемы качества промышленной продукции и безопасности функционирования сложных технических объектов становятся с каждым годом все более актуальными, т.к. в условиях рыночных отношений сбыт продукции напрямую зависит от качества и конкурентоспособности, их надежности функционирования и остаточного ресурса. Необходимо исследовать процент изношенности основных средств, поскольку своевременное выявление нештатных рабочих режимов потенциально опасных, сложных технических объектов позволяет избежать не только колоссальных материальных потерь, но и гибели людей.

Россия и Беларусь обладают сравнительно высоким уровнем развития промышленности, развитой системой магистральных газо- и нефтепроводов, продуктопроводов, широкой железнодорожной сетью. Их промышленный потенциал характеризуется десятками крупнейших машиностроительных предприятий, современными нефтеперерабатывающими предприятиями, тысячами километров трубопроводов, десятками тысяч объектов газо- и нефте-распределительных систем, тысячами километров железных дорог и др. В то же время, например, в Беларуси по данным Госпромнадзора МЧС РБ, отработали сроки службы более 56 % котлов, около 60 % сосудов под давлением, более 80 % грузоподъемных кранов и 34 % лифтов, а с годами ситуация с этими процентами усугубляется.

Уровень развития передовых стран мира на современном этапе характеризуется, прежде всего, показателями качества, надежности и безопасности производимых изделий. Ведь, например, потери только от дефектов усталости металла в США составляют более 100 млрд долл., а от коррозии – более 200 млрд долл. в год [1].

Получение новых результатов фундаментальных и прикладных научных исследований и разработка на их основе современных высокоэффективных приборов и методик неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД) позволит решить проблему качества и конкурентоспособности выпускаемой национальной продукции и гарантировать безопасность промышленных, транспортных, энергетических, строительных объектов.

В Беларуси важнейшую роль в решении актуальных задач неразрушающего контроля и технической диагностики, стоящих перед предприятиями и организациями различных отраслей промышленности играет под-

программа научных исследований «Техническая диагностика» государственной программы научных исследований «Механика, техническая диагностика, металлургия» (2011–2015 гг.), которая направлена на решение конкретных практических задач в области неразрушающего контроля и технической диагностики. Цель подпрограммы – исследование взаимодействия различных физических полей с материалами, изделиями и элементами конструкций и разработка на основе полученных результатов новых методов, средств и информационных технологий неразрушающего контроля и технической диагностики, обеспечивающих повышение качества промышленной продукции и безопасности эксплуатации сложных технических объектов.

Это научное направление традиционно носит многоотраслевой характер – современные методы и средства НК и ТД востребованы предприятиями министерств промышленности, энергетики, архитектуры и строительства, транспорта и коммуникаций, Министерства по чрезвычайным ситуациям, концерна «Белнефтехим» и др. (этот факт является и определенной гарантией устойчивой востребованности разработок в области НК и ТД). При этом достаточно сильная в Беларуси научная школа в области физики неразрушающего контроля (только в Институте прикладной физики НАН Беларуси (ИПФ НАН Беларуси) 15 докторов и 20 кандидатов наук) позволяет эффективно решать возникающие на предприятиях специфические задачи. В России безусловными лидерами данного направления являются ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Институт неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ) и предприятия, входящие в состав ассоциации «СПЕКТР-ГРУПП».

Важнейшие прикладные задачи неразрушающего контроля и технической диагностики:

- диагностика и мониторинг технического состояния потенциально опасных объектов промышленности, энергетики, строительства, прогнозирование их остаточного ресурса;
- экологический мониторинг;
- техническое обеспечение антитеррористической безопасности.

Для их решения необходимо обеспечить:

- контроль дефектов сплошности материалов и элементов конструкций (трещины, раковины, включения и т.п.);
- контроль структуры и физико-механических свойств материалов (размер зерна, анизотропия структуры, твердость, прочность, влажность, магнитные свойства и др.);
- контроль толщин покрытий, упрочненных слоев, стенок сосудов и других геометрических параметров;
- контроль напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкций;
- томографическую визуализацию внутреннего строения объектов.

Внедрение современных методов и средств неразрушающего контроля обеспечивает:

- соответствие технических характеристик продукции проектным характеристикам, оговоренным в нормативно-технической документации (качество и конкурентоспособность продукции);
- уменьшение потерь материала и энергии на технологическую обработку благодаря своевременному выявлению дефектных заготовок, невыявлению толщин защитных покрытий и упроченных слоев заданным в документации и т.п. (материало- и энергосбережение);
- повышение показателей надежности и долговечности объектов, наработки на отказ посредством снижения количества невыявленных дефектов (надежность и безопасность).

Для анализа перспектив развития фундаментальных и прикладных исследований в области НК и ТД в наших странах можно привести ряд примеров.

Экспериментальные результаты исследования взаимодействия неоднородных упругих волн с поверхностями отражения при различных граничных условиях легли в основу разработанных в ИПФ НАН Беларуси принципиально новых методик и соответствующих измерительных средств для ультразвукового контроля дефектов поршней дизельных двигателей. Например, создана автоматизированная ультразвуковая установка для выявления дефектов соединения нирезистивной вставки с материалом поршня и оценки их протяженности, позволяющая осуществлять разбраковку в соответствии с введенными параметрами браковочного уровня (рис. 1).



Рис. 1. Установка для неразрушающего контроля качества сцепления нирезистивных вставок в поршнях дизельных двигателей

В результате впервые реализован стопроцентный ультразвуковой контроль заготовок поршней двигателей внутреннего сгорания в потоке производства. Модификации аппаратуры для контроля поршней разных типоразмеров (как готовых изделий, так и заготовок) применительно к условиям предприятий-заказчиков внедрены на ряде предприятий Беларуси и России

(Минский моторный завод, Ярославский моторный завод, Камский моторный завод и др.). В настоящее время завершается работа по разработке, изготовлению и поставке на Камский моторный завод новой универсальной установки для ультразвукового контроля качества сцепления элементов поршней дизельных двигателей для 18-и типоразмеров поршней и заготовок поршней.

На основе изучения характера перемагничивания структурно неоднородных стальных и чугуновых изделий, имеющих дефекты сплошности, в этом же институте предложены эффективная методика и вихретоковый прибор с 16-ю измерительными преобразователями, которые используются в составе автоматизированной установки для стопроцентного контроля металлургических дефектов гильз дизельных двигателей в потоке производства на Минском моторном заводе. Аппаратура позволяет осуществлять бесконтактный неразрушающий контроль в потоке производства гильз дизельных двигателей при высокой шероховатости поверхности, под слоем краски, покрытия, в бесконтактном варианте (зазор до 5 мм). Выявляются как продольные, так и кольцевые дефекты сплошности наружной и внутренней поверхностей гильз дизельных двигателей. Повышение достоверности контроля достигнуто за счет оригинальной методики отстройки от влияния мешающих факторов (структурных неоднородностей материала, грубой поверхности).

Поскольку в машиностроении все возрастают объемы применения чугуновых отливок со структурой высокопрочного чугуна, весьма перспективной и востребованной является разработка приборов для разбраковки чугуновых отливок в зависимости от структуры, определяемой формой графитовых включений. Разработанный в ИПФ НАН Беларуси ультразвуковой индикатор структуры чугуновых отливок (рис. 2) позволяет оперативно определять структуру чугуна (высокопрочный или серый) непосредственно в отливках.



Рис. 2. Индикатор высокопрочного чугуна ИЧ-21

В приборе использована взаимосвязь между параметрами распространения упругих волн (скорость, коэффициент затухания) со структурой и ме-

ханическими свойствами чугуна. В основе лежит сравнение истинного линейного размера отливки с расчетными показаниями, полученными из измерения прибором временного промежутка, необходимого акустическому сигналу для преодоления расстояния между преобразователями, установленными на противоположных поверхностях отливки. Результаты измерения индикатором не зависят от формы отливки, причем ее подготовка к контролю требует только дробеструйной очистки от окалины. Десятки этих приборов внедрены на предприятиях Беларуси. Перспективы совершенствования приборов связаны с повышением достоверности контроля, локальности зоны контроля, с обеспечением возможности контроля отливок при одностороннем доступе.

Крупным достижением последних лет является установление закономерностей распространения упругих волн, создаваемых ультразвуковым преобразователем с локальным акустическим контактом, в деталях и заготовках с поверхностно упрочненными слоями. Проведены исследования с целью разработки акустического метода неразрушающего контроля толщины поверхностного слоя в металлах, закаленных после цементации. До недавнего времени оценка этой величины производилась по результатам металлографических исследований. Однако результаты металлографической оценки имеют низкую точность, так как во многом зависят от субъективных факторов. Для решения поставленной задачи предложен способ измерения путем использования поверхностных акустических волн в заданном диапазоне частот. Частота определяет глубину проникновения упругой энергии в изделие. Изменение структуры в результате закалки приводит к перераспределению направления микросмещений в распространяющейся волне. Фиксируются эти изменения по скорости распространения волны. Разработана соответствующая методика исследований и первичные преобразователи, обеспечивающие ввод колебаний в заданном диапазоне частот, проведены исследования, позволившие получить корреляционные зависимости для определения толщины переходного слоя на стальных деталях при закалке после цементации по градиенту скорости распространения поверхностных упругих волн от низких (0,5 МГц) до высоких (5 МГц) частот. В результате в ИПФ НАН Беларуси разработана уникальная аппаратура для ультразвукового контроля толщины поверхностно упрочненных слоев, полученных закалкой ТВЧ и цементацией, внедренная на ряде предприятий (Минский автомобильный завод и др.).

Развивается импульсный магнитный метод неразрушающего контроля структуры и механических характеристик ферромагнитных материалов и изделий. Выполнен широкий комплекс исследований, позволивших установить взаимосвязи между механическими и магнитными характеристиками ферромагнитных сталей после различных видов механической и термической обработки. Установлены закономерности влияния температур закалки и отпуска коротких полых цилиндрических тел из конструкционных сталей, моделирующих широко используемые на практике детали машиностроения (гай-

ки, шайбы и др.), на параметры их петель гистерезиса при импульсном режиме намагничивания сериями импульсов с изменяющимися амплитудами. С использованием ряда измеренных магнитных параметров получено выражение, устанавливающее однозначную связь между ними и величиной твердости исследованных тел при различных условиях закалки и отпуска. Это обеспечивает возможность неразрушающего контроля твердости указанных машиностроительных деталей и заготовок после объемной термической обработки.

В результате проведенных исследований в ИПФ НАН Беларуси разработан и внедрен прибор ИМА-М для импульсного магнитного многопараметрового контроля твердости изделий машиностроения (стальных заготовок зубчатых колес и гаек), подвергаемых закалке и высокотемпературному отпуску. Другой прибор, импульсный магнитный анализатор ИМА-4М, предназначен для неразрушающего контроля механических свойств (твердость, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве) и микроструктуры (балл зерна) изделий из низкоуглеродистых сталей толщиной от 0,15 до 4 мм. С его помощью осуществляется и контроль ряда среднеуглеродистых и низколегированных холоднокатаных, а также некоторых горячекатаных сталей. Перспективы расширения внедрения этих приборов и установок связаны с получением новых результатов исследований взаимосвязи механических и магнитных свойств, которые позволят производить контроль с более высокой чувствительностью и производительностью.

В этом же институте ведутся работы по применению метода высших гармоник для контроля твердости поверхностного слоя стальных изделий после поверхностного упрочнения ТВЧ. Разработаны приборы типа НТ, принцип действия которых основан на том, что контролируемый участок перемагничивается переменным магнитным полем возбуждения синусоидальной формы, создаваемым накладным преобразователем, а о твердости судят на основе измерения амплитуды определенной высшей гармонической составляющей вторичной э.д.с. преобразователя. Установлена связь между твердостью и амплитудами высших гармоник. При указанном способе контроля отсутствует механическое воздействие на контролируемое изделие, причем преобразователь может иметь небольшие геометрические размеры, что позволяет проводить контроль твердости в местах, где затруднен контроль другими приборами, например, в отверстиях, узких пазах. Прибор НТ применяется на многих предприятиях Беларуси, в частности, с его помощью проводится контроль твердости коренных и шатунных шеек коленчатых валов на РУП «ММЗ».

Ультразвуковые дефектоскопы и томографы широко применяются для контроля сварных швов деталей и узлов авиатехники. Томограф A1550 IntroVisor (рис. 3) существенно упрощает и ускоряет процедуру контроля. Для контроля используется 16-ти элементная широкополосная АР поперечных волн, обеспечивающая обзор в широком секторе, начиная от середины

апертуры АР, и до эквивалентных углов ввода порядка 75° – 80° относительно нормали к краю апертуры.



Рис. 3. Ультразвуковой томограф A1550 IntroVisor

Проведенные совместно с ОКБ «Сухой» исследования позволили рекомендовать разработанные специалистами ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр» метод и ультразвуковой томограф A1550 IntroVisor с многоэлементной антенной решеткой и алгоритмы фокусировки к применению при контроле многослойных композитных изделий. УЗ томограф A1040 «Полигон» предназначен для обследования железобетонных конструкций (рис. 4).



Рис. 4. УЗ томограф A1040 «Полигон»

Системы вихретокового и магнитного контроля для контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, изготовленных из магнитных марок конструкционных сталей, например, магнитный структуромер МС-10 (рис. 5).



Рис. 5. Магнитный структуроскоп МС-10

Разработанные в НИИ интроскопии вихретоковые средства НК обеспечивают поиск дефектов через изоляционные покрытия значительной толщины и определение толщины гальванических электропроводящих покрытий.

Магнитный толщиномер покрытий МТ-23МП (рис. 6) предназначен для измерения толщины никелевых покрытий на немагнитном основании. Выгодно отличается от аналогов наличием блока температурной стабилизации. Высокая точность измерения достигается путем намагничивания объекта контроля под преобразователем до состояния насыщения. Толщиномер имеет следующие характеристики: диапазон измерений, мкм: от 30 до 600, предел допускаемой основной относительной погрешности $\delta_{\text{осн}}$ - +5мкм +5%.



Рис. 6. Магнитный толщиномер покрытий МТ-23МП

Многоканальный вихретоковый дефектоскоп ВД-91НМ (рис. 7) позволяет обнаружить стресс-коррозионные трещины на трубе под слоем изоляции, оценить их глубину и расположение, документировать результаты обследования и провести компьютерную обработку и выдать рекомендации о сроках безопасной эксплуатации труб. Прибор обладает высоким разрешением при обнаружении дефектов в сварных соединениях и обеспечивает сохранение результатов контроля и др.



Рис. 7. Многоканальный вихретоковый дефектоскоп ВД-91НМ и портативный ПК

Возможности магнитопорошкового контроля изделий из ферромагнитных материалов при их производстве и эксплуатации показаны на примере автоматизированной системы (компания ЮНИТЕСТ) для контроля объектов авиационной, автомобильной, нефтегазовой промышленности, железнодорожного транспорта и трубопрокатного производства. Метод весьма эффективен при контроле изменений структуры ответственных деталей из ферромагнитных материалов. В частности, Магнитоскоп-К для магнитопорошкового контроля цельнокатаных колес железнодорожных вагонов обладает следующими параметрами: электропитание от сети напряжением 220 В, 50 Гц, масса дефектоскопа с максимальным током 4000 А – 27 кг, а с максимальным током 1000 А – 12 кг.

Другая компания, ДНТЦ «Дефектоскопия», разработала модульный магнитопорошковый дефектоскоп МД-М для контроля деталей в условиях эксплуатации военных и гражданских летательных аппаратов. Дефектоскоп состоит из 3-х модулей: импульсного, соленоида и электромагнита. В каждом модуле имеется по 10 ячеек памяти для записи режимов намагничивания и размагничивания. Максимальный импульсный ток через намагничивающий кабель сечением 10 мм^2 – 5000 А.

В ИПФ НАН Беларуси предложен новый магнитодинамический метод измерений применительно к магнитной толщинометрии защитных покрытий. Разработан и внедрен ряд уникальных приборов для магнитного контроля толщин толстослойных никелевых, двухслойных (хромовых и никелевых) и слабомагнитных металлокерамических покрытий. Магнитные толщинометры защитных покрытий МТЦ-2М и МТЦ-3 (рис. 8, а) внедрены на ряде промышленных предприятий Беларуси (МТЗ, МАЗ, БелАЗ и др.). Созданы методики, приборы и осуществлено их метрологическое обеспечение применительно к контролю специальных покрытий ракетных двигателей. Разработанные приборы и меры толщин покрытий внесены в Госреестр средств из-

мерений Российской Федерации. Магнитный толщиномер МТНП (рис. 8, б) позволяет осуществлять контроль защитных толстослойных никелевых покрытий (0 – 1000 мкм) на немагнитных и слабомагнитных сталях и сплавах. Магнитный толщиномер МТДП-1 предназначен для отдельного контроля слоев в двухслойных (хром (0 – 300 мкм) + никель (0 – 1000 мкм)) защитных покрытиях на немагнитных и слабомагнитных сталях и сплавах. Магнитный толщиномер МТКП-1 позволяет осуществлять контроль слабомагнитных металлокерамических защитных покрытий (0 – 300 мкм) на немагнитных и слабомагнитных сталях и сплавах. Толщиномеры специальных защитных покрытий и меры внедрены на Воронежском механическом заводе и ОАО «Металлист-Самара». Прорабатываются варианты разработки и поставки новых толщиномеров, имеющих более высокую чувствительность и более широкий диапазон измеряемых толщин покрытий. Ближайшие перспективы более широкого внедрения магнитных толщиномеров защитных покрытий связаны с планируемой разработкой нового типа прибора, объединяющего функции двух методов: магнитодинамического и вихретокового.

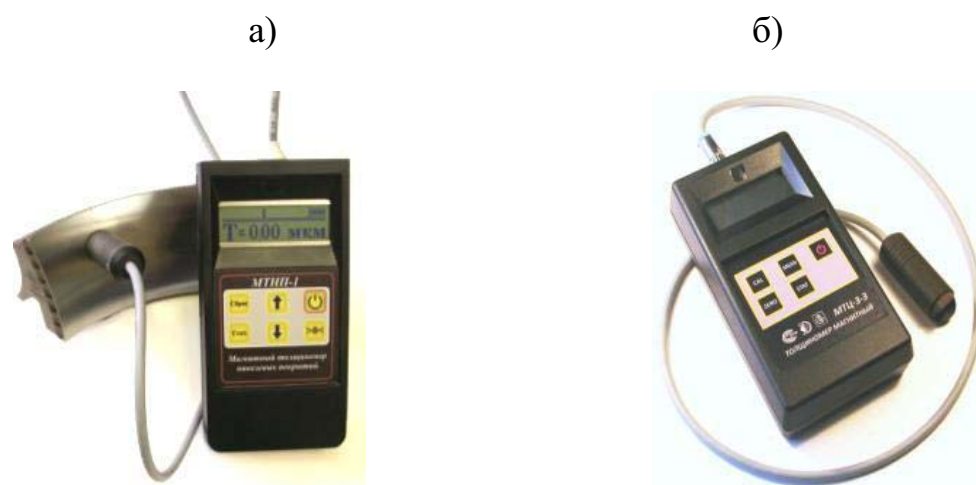


Рис. 8. Магнитные толщиномеры защитных покрытий МТЦ-3 (а) и МТНП-1 (б)

Последние годы активно развивается метод динамического индентирования для контроля физико-механических свойств материалов. В ИПФ НАН Беларуси установлены новые закономерности, характеризующие взаимосвязь между шероховатостью и жесткостью контролируемого объекта и параметрами ударного взаимодействия с ним жесткого индентора, позволившие предложить эффективную методику отстройки показаний динамических твердомеров от влияния шероховатости и жесткости объектов и, тем самым, значительно расширить диапазон применимости динамических твердомеров. Разработана соответствующая аппаратура для контроля нежестких тонкостенных металлоконструкций. Прибор ИМПУЛЬС-2М для контроля механических свойств стальных деталей предназначен для контроля твердости и

предела прочности деталей и элементов конструкций с толщиной стенки не менее 6 мм в любом пространственном положении преобразователя. Установка ИМПУЛЬС-1Р для контроля комплекса физико-механических характеристик полимеров (резин, пластиков) позволяет определять твердость по Шору (в единицах IRHD), эластичность по отскоку, вязкость, модуль упругости и др. Разработаны также контактно-динамические приборы для измерения прочности бетонов и асфальтобетонов (рис. 9).



Рис. 9. Прибор для определения физико-механических свойств строительных материалов ИММ-1А

Метод динамического индентирования для контроля физико-механических свойств материалов и реализующая его аппаратура внедрены на ряде промышленных предприятий Беларуси и России. Впервые метод динамического индентирования предложен в качестве нового направления для изучения и контроля трещиностойкости неметаллических материалов.

Большое внимание уделяется вопросам энергосбережения, в том числе технической диагностике электроэнергетического оборудования (силовых трансформаторов, генераторов, электродвигателей и др.). В ИПФ НАН Беларуси выполнены исследования характера электромагнитных процессов в электрических машинах, изучено влияние дефектов изоляции на переходные процессы в обмотках, установлены закономерности неоднородного перемагничивания электротехнических сталей и магнитопроводов электрических машин. Разработан комплекс приборов для диагностики электрических машин: для бесконтактного контроля токов утечки высоковольтного оборудования (рис. 10, а); для диагностики силовых трансформаторов в условиях эксплуатации и ремонта (рис. 10, б); для диагностики параметров электрических машин постоянного тока; для наладки и диагностики установок фильтрации реактивной мощности электрических сетей и силового оборудования; для контроля витковых замыканий обмоток электрических машин (рис. 10, в); для измерения магнитных характеристик и электромагнитных потерь электротехнической стали, для измерения магнитных полей. Партии приборов переданы по договорам на предприятия и в службы Белорусской

железной дороги, на Минский электротехнический завод им. В.И.Козлова и др. В настоящее время завершаются работы по созданию магнитоизмерительной целолитовой установки для технологического контроля магнитных характеристик и электромагнитных потерь электротехнической стали.

а)

б)

в)



Рис. 10. Приборы для диагностики электроэнергетического оборудования ИМТБ (а); ДСТ (б) и ДО-1 (в)

Разработана теория и методология реконструкции динамических изображений внутренней структуры объектов в рентгеновской томографии, эффективные информационные технологии реконструкции изображений применительно к дефектометрии и дефектоскопии, основанные на решении некорректных задач, возникающих при ограничении угла обзора, недостаточной мощности источника излучения и при малом числе проекций. Эти разработки прошли успешную апробацию в рамках договора ИПФ НАН Беларуси с Минским тракторным заводом при дефектоскопии и размеромерии ответственных узлов и деталей. В частности, осуществлена трехмерная томографическая реконструкция и получены томограммы ряда бескорпусных игольчатых подшипников. Скорейшее доведение этих работ до широкого коммерческого использования, разработки соответствующей томографической аппаратуры, требует инвестиций заинтересованных предприятий машиностроительного комплекса. В ИНК ТПУ и ИПФ НАН Беларуси проводятся исследования с целью разработки нового метода прогнозирования остаточного ресурса ответственных деталей машиностроения с применением мониторинга структурной деградации металла неразрушающим микромагнитным методом, рентгенографии и других видов исследований, основанных на вероятностном подходе.

Все большее внимание уделяется разработке систем диагностики и мониторинга технического состояния потенциально опасных объектов промышленности, строительства, энергетики. В ИПФ НАН Беларуси разработаны принципы, математические алгоритмы, программное обеспечение, датчики, средства передачи, обработки и отображения многосенсорной информации для систем мониторинга технического состояния несущих строительных конструкций уникальных и высотных зданий и сооружений. Разработана и внедрена система мониторинга напряженно-деформированного состояния вантового кольца культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена».

Система включает комплект из 32 разработанных датчиков деформаций с соответствующим программным обеспечением и позволяет осуществлять непрерывный мониторинг деформаций и напряжений в металлоконструкции в процессе эксплуатации комплекса "Минск-Арена", оповещать о появлении критических деформаций и напряжений, предотвращая возможные аварийные ситуации на объекте. В настоящее время разрабатываются и внедряются новые системы мониторинга технического состояния несущих конструкций высотных и большепролетных строительных сооружений (строящихся в Минске высотного здания «Парус» Бизнес-Центра, спортивного комплекса Фристайл-Центр и культурно-спортивного комплекса «Чижовка-Арена»).

Разработан ряд методик технического диагностирования и определения остаточного ресурса потенциально опасных промышленных объектов и технологического оборудования для предприятий нефтехимии (для ОАО «Гродно-Азот», ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» и др.). Созданы и широко внедрены приборы для мониторинга состояния двустенных резервуаров для хранения нефтепродуктов на предмет появления течи.

Исследования продолжаются в направлении разработки научно обоснованных методик и технологий технической диагностики, мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса потенциально опасных промышленных объектов на основе вероятностных оценок.

Вибродиагностика в качестве средства обслуживания машин и механизмов стала важнейшей составной частью общего мониторинга оборудования по фактическому состоянию. Измерительные системы диагностики, мониторинга и балансировки агрегатов используются в энергетике, добывающих и перерабатывающих отраслях, машиностроении и транспорте. Портативные виброанализаторы позволяют оперативно и регулярно получать информацию о состоянии напряжённых узлов механизмов путём анализа спектра вибраций и его изменения со временем. Стационарные комплексы осуществляют непрерывный виброконтроль, обеспечивая всей полнотой информации, измеряя виброускорение, виброскорость, вибросмещение, частоту вращения и т.д. Программное обеспечение даёт возможность прогнозирования состояния и продления ресурса объектов. В связи с этим следует подчеркнуть, что применение наноразмерных сверхвысокочувствительных мембран для виброакустических преобразователей позволит существенно повысить потребительские характеристики и эффективность виброконтроля.

Российская «Ассоциация ВАСТ» специализируется на вибрационной диагностике в качестве средства обслуживания машин и механизмов по фактическому состоянию. Измерительные системы диагностики, мониторинга и балансировки компании используются в энергетике, добывающих и перерабатывающих отраслях, машиностроении и транспорте. Специалисты компании разработали новые подходы в диагностике оборудования на основе организации службы вибродиагностики на предприятиях.



Рис. 11. Комплекс вибродиагностики и мониторинга технического состояния механических приводов

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработаны и внедрены средства вибромониторинга (рис. 11) и методика разбраковки редукторов приводов ленточных конвейеров. Перспективы расширения внедрения полученных результатов связаны с созданием в ближайшее время программно-инструментальных средств и методологии вибромониторинга технического состояния и остаточного ресурса редукторов мотор-колес самосвала БелАЗ, технического состояния коробок передач МЗКТ.

На ряде предприятий Министерства энергетики РБ внедрена разработка Института технической акустики НАН Беларуси – автоматизированная система контроля утечек нефтепродуктов из резервуарных парков для сбора и обработки в автоматическом режиме информации о хранящихся, потребленных и отпущенных нефтепродуктах. Эта система обеспечивает автоматизированный учет нефтепродуктов, а также оперативный контроль режимов работы оборудования в резервуарных парках.

Последние разработки в области НК и ТД Белорусского национального технического университета – методика и пакет прикладных программ для оценки остаточного ресурса оборудования и металлоконструкций, основанные на определении комплекса механических свойств металла неразрушающими методами. Эти разработки успешно внедряются при обследовании технического состояния металла башенных кранов и резервуаров, при определении несущей способности строительных конструкций. Планируется расширение масштабов внедрения после адаптации разработки применительно к техногенным объектам.

Масштабные объекты, с которыми имеет дело промышленность (магистрали тепло- и электростанций, путепроводы, газо- и нефтепроводы, стены зданий и сооружений), неизбежно подвержены износу. Одна из важнейших проблем эксплуатации оборудования на предприятиях химической промышленности и ТЭК – ранняя диагностика и прогнозирование разрушений металлоконструкций, работающих в жёстких термических и химических условиях. Существующие сегодня методы ранней диагностики способны регистрировать начало разрушений металлоконструкций только на таких стадиях, когда их эксплуатация уже потенциально опасна. Такая диагностика не по-

звolyет снизить эксплуатационные риски до безаварийного уровня.

Классические методы металлографии, основанные на обработке оптических изображений подготовленных участков поверхности конструкций, дают необходимую информацию о структуре материала, её изменениях, позволяя прогнозировать надёжность и остаточный ресурс всего объекта.

Развитие зондовых методов в направлении силового нанотестинга поверхности даёт возможность исследовать механические свойства тонких приповерхностных слоёв в нанобъёмах, атомные механизмы наноконтактной деформации при сухом трении, абразивном износе, механическом сплавлении и т.п. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) предоставляет в этом направлении возможность упреждающего контроля оборудования и имеет существенные преимущества перед диагностическими средствами, используемыми в настоящее время, важнейшим из которых является следующее: по сравнению с оптической микроскопией, ультразвуковыми и рентгеновскими методами диагностики металлоконструкций АСМ позволяет регистрировать опасные изменения в структуре металла (изменение межзёрненных границ, образование поверхностных дефектов, трещин и т.п.), когда их характерные размеры не превосходят десятков нанометров, что необходимо для оценки остаточного ресурса изделия задолго до наступления аварийно-опасной ситуации.

Новинкой является комплекс для диагностики состояния конструкционных материалов промышленного оборудования, разработанный NTI (входящей в группу компаний NT-MDT, г. Зеленоград, Россия). В основе комплекса – атомно-силовой микроскоп, позволяющий на ранних стадиях выявлять дефекты материалов с нанометровым разрешением. На фотографии показан комплекс СОЛВЕР ПАЙП (рис.12), который, по мнению разработчиков, позволяет перейти на практически безаварийный режим работы при использовании во время проведения регламентных испытаний и плановой замены оборудования.



Рис. 12. Труба нефтеперерабатывающей станции и ротор турбины

Отечественная разработка СОЛВЕР ПАЙП прошла «боевое крещение» на нефтеперерабатывающей станции Raffineria di Roma (Италия) и в настоящее время уже используется при диагностике сложных конструкций в России, Польше и Франции.

В ИПФ и ИТМО НАН Беларуси совместно с КБТМ-ИТЦ и УП «Белмикросистемы» завершаются работы с целью создания сканирующего микроволнового микроскопа для локального контроля электрофизических свойств полупроводниковых материалов интегральных микросхем, совмещающего функции как атомно-силовой, так и СВЧ-микроскопии (совместно с ИТМО НАН Беларуси, КБТМ-ИТЦ, УП «Белмикросистемы»).

Создание систем мониторинга сложных механических конструкций с определением их срока службы сдерживалось, в частности, отсутствием надёжных полифункциональных сенсоров. Применение единых технологических методов формирования сенсоров с использованием микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволило разработать наноразмерные сегнетоэлектрические плёнки на металлических и диэлектрических подложках, обладающие рядом особенностей сегнетоэлектрических состояний и чрезвычайно высокой температурной стабильностью. Использование таких сенсоров позволяет создать тактильные матричные датчики динамической деформации. Чувствительность сенсоров на основе сегнетоэлектрических плёнок увеличивается на два порядка ($\Delta I/I \sim 10^{-9}$) по сравнению с существующими. Кроме того, они обладают долговременной стабильностью, им не требуются источники стабилизированного напряжения, т.к. это сенсоры генераторного типа. Использование двух линеек таких сенсоров, расположенных, например, в разных частях силовой переборки самолёта, позволит зафиксировать начало образования микротрещины и координаты её развития.

Рост использования композитных материалов в элементах конструкций определяет необходимость разработки новых систем контроля их целостности. Для обнаружения дефектов в современных композитных материалах предложены сети нанотрубок (нанопроводников), когда дефект будет обнаруживаться по изменению электропроводности сети. В этой связи перспективным направлением считается использование таких сетей для мониторинга состояния, как самолётов, так и космических аппаратов.

При диагностике важнейших узлов конструкций, особенно в авиастроении и при эксплуатации самолётов и вертолётов, широко используются магнитные и магнитопорошковые методы, сопровождаемые магнитными измерениями. В лаборатории магнитометрии ГОИ им. С.И. Вавилова разработаны квантовые сверхчувствительные магнитометры, способные работать в диапазоне полей от 15 000 до 100 000 нТ с точностью 0,1 нТ и ориентационными ошибками, не превосходящими 0,03 нТ.

Начало производства сверхбольших интегральных схем (СБИС) с топологией 90 нм, а в последующем 65 нм, рассчитанного на создание российских чипов для навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, цифрового телеви-

дения, смарт-карт, радиочастотных идентификационных меток и т.п., потребовало разработки соответствующих средств контроля нанотехнологий и нанодиагностики продукции. Для этого в отделе нанодиагностики материалов и изделий микроэлектроники, входящем в структуру Наноцентра при Московском государственном техническом университете радиотехники, электроники и автоматики (рис. 13), оборудованы автоматизированные рабочие места, включающие средства оптической микроскопии, цифрового рентгеновского контроля и микротомографии, информационного и электрического тестирования микросхем с гибкой специализированной системой контактирования, электронно-микроскопического контроля, инфракрасного контроля, наноразмерного препарирования и зондового контроля.

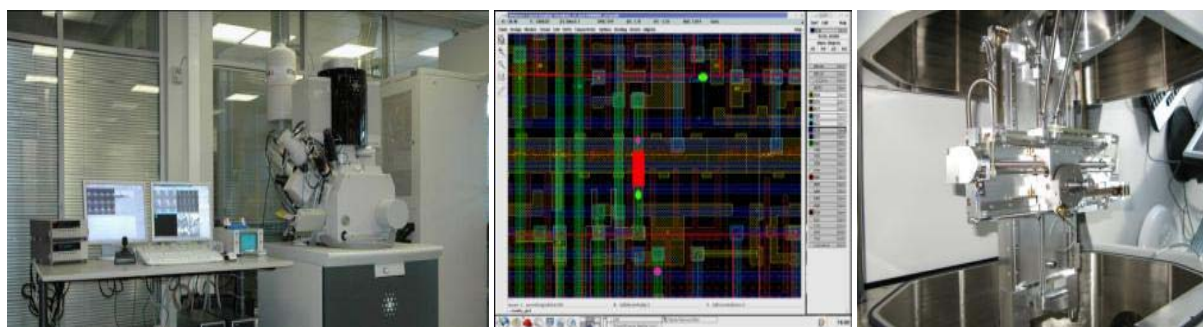


Рис. 13. Наноцентр МИРЭА

Качество технологий и продукции современной микроэлектроники достигается с помощью комплексного неразрушающего контроля и диагностики. Кроме того, проводится анализ отказов изделий микроэлектроники, локализация и исследование дефектов с помощью наноразмерного препарирования и остросфокусированного ионного пучка, коррекция топологии сверхбольших интегральных схем и формирование контрольных точек для анализа сигналов внутри СБИС. Таким образом, использование самых современных приборов и технологий даёт возможность оценить техническое состояние технологического оборудования и производимой электронной продукции.

В ИПФ и ИТМО НАН Беларуси совместно с КБТМ-ИТЦ и УП «Белмикросистемы» завершаются работы с целью создания сканирующего микроволнового микроскопа для локального контроля электрофизических свойств полупроводниковых материалов интегральных микросхем, совмещающего функции как атомно-силовой, так и СВЧ-микроскопии (совместно с ИТМО НАН Беларуси, КБТМ-ИТЦ, УП «Белмикросистемы»).

Применяемое рентгеновское оборудование отечественных разработок может быть адаптировано для различных задач контроля. Микрофокусные рентгеновские аппараты нашли широкое применение в электронной, аэрокосмической, атомной и автомобильной отраслях промышленности для контроля печатных плат, электронных компонентов, структуры композитов и решения других задач неразрушающего контроля. Мультифокусные рентге-

новские трубки имеют три режима работы: мощный – для распознавания элементов менее 3 мкм, микрофокусный – для выделения элементов менее 1 мкм и нанофокусный – для распознавания элементов менее 300 нм. Промышленные нанофокусные системы рентгеновского контроля позволяют выявлять субмикронные дефекты и отлично подходят для контроля полупроводниковых компонентов. Дополнительно системы могут быть оборудованы модулем аксиальной компьютерной томографии. Следует добавить, что повышать разрешение рентгеновской микроскопии можно почти до 0.1 нм (размер атома средних величин) и это связано с граничным размером длины волны рентгеновского излучения.

На основе современных технологий синтеза нанокристаллических материалов разработаны новые виды сцинтилляционных детекторов рентгеновского излучения с улучшенными техническими параметрами: энергетической эффективностью, быстродействием, пространственным разрешением, радиационной прочностью. Размер сцинтилляционных наночастиц может регулироваться параметрами синтеза в пределах 10–100 нм. Малые размеры наносцинтилляторов позволяют изготавливать из них рентгеновские детекторы с субмикронным пространственным разрешением. Детекторные матрицы, изготовленные из новых сцинтилляционных элементов, позволяют сократить время рентгеновского просвечивания и уменьшить получаемые объектом дозы облучения, а также значительно улучшить чувствительность и информативность инспекционной техники.

Таким образом, разработка и развитие средств НК и ТД нового поколения неразрывно связаны с достижениями нанотехнологий и создаваемых на их основе наносенсоров, нанодатчиков, нанопреобразователей, наноэлементов электронных узлов и систем наглядного отображения информации. Многие нанотехнологии и нанопреобразователи используют наноэффекты: размерные эффекты, туннельный эффект, эффекты сверхпроводимости и гигантского магнитосопротивления, эффекты квантовых точек и резкого изменения свойств композиционных наноструктур, эффекты материалов с отрицательным показателем преломления (метаматериалы) и т.д.

Значительное развитие при экспертизе промышленной безопасности получил метод акустической эмиссии. Этот метод применяют при обследовании сосудов высокого давления и трубопроводов, корпусов самолётов, объектов из металлов и композиционных материалов, куполообразных сооружений, наземных хранилищ, мостов, исследовании усталостных характеристик материалов и т.п. Системы комплексного диагностического мониторинга, в том числе новое семейство акустико-эмиссионной аппаратуры с имитаторами сигналов разработала российская компания ИНТЕРЮНИС, являющаяся одной из ведущих компаний в данном направлении. В частности, известна новая система «Лель /A-Line 32D (DDM)/», являющаяся многоканальной модульной системой сбора и обработки акустико-эмиссионной информации с последовательным высокоскоростным цифровым каналом пере-

дачи данных. Аппаратура разработана с использованием передовых технологий в области микроэлектроники и цифровой передачи данных. Уникальность системы подтверждена патентом RU 44390.

Рентгеновская диагностическая техника выпускаемая фирмой Флэшэлектроникс (рис. 14): сканер скрытых полостей "Ватсон" (односторонний доступ к объекту контроля и высокая производительность), переносные рентгенотелевизионные комплексы "Колибри 150 ТВ" и "Шмель 240 ТВ" используются на обеих сторонах Российско-Белорусской границы.



Рис. 14. Рентгеновский сканер скрытых полостей «Ватсон», переносные рентгенотелевизионные комплексы "Колибри 150 ТВ" и "Шмель 240 ТВ"

Институт неразрушающего контроля при ТПУ разработал уникальный пакет компьютерных программ для моделирования и обработки данных в тепловом контроле: программу ThermoCalc-6L для решения трёхмерной задачи теплового контроля многослойных тел при разнообразных граничных условиях и программу ThermoFit для обработки экспериментальных данных, включая тепловую томографию, Фурье-анализ, вейвлет-анализ, метод анализа главных компонент и дефектometriю, а ЗАО НИИИН МНПО «СПЕКТР» предлагает новые тепловизионные приборы на неохлаждаемых матрицах (рис. 15).



Рис. 15. Тепловизоры

В наших странах ведется активная работа по гармонизации национальных стандартов с международными, в частности, по внедрению принятого этой весной ISO 9712:2012.

Наиболее интересные материалы по неразрушающему контролю и технической диагностике публикуются в российских периодических изданиях «Контроль. Диагностика», «Территория NDT», «Дефектоскопия», «В мире НК», а также белорусском журнале «Неразрушающий контроль и диагностика».

Следует особо отметить выпуск под эгидой Российского общества по НК и ТД серии книг «ДИАГНОСТИКА БЕЗОПАСНОСТИ». В состав серии вошли 20 книг по всем методам неразрушающего контроля и технической диагностики получившие гриф Учебно-методического объединения как учебные пособия для обучения студентов и подготовки специалистов по НК и ТД. Все книги серии рекомендованы научным советом РАН по диагностике и испытаниям в качестве базового материала для дистанционного обучения специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серия «Диагностика безопасности» / Под общей редакцией В.В. Клюева. – М. : Изд. дом «Спектр», 2011.