



конструкций, работающих в специфических условиях многократного импульсного воздействия.

Выводы

Материал, находящийся в упругом состоянии, при многократных импульсных подгрузках способен к колебательным структурным перестройкам, в результате чего происходит самоорганизация структурного превращения и образуется диссипативная структура, прочность которой ниже исходной.

Экспериментально подтвержден факт перехода материала в сверхпластичное состояние при многократных импульсных подгрузках материала.

Образовавшаяся в результате многократных импульсных подгрузок пространственная диссипативная структура способствует пластическому течению материалов при резком падении напряжений. Следовательно, такие режимы нагружения материалов перспективны для технологических операций ударной штамповки 002E.

1. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение / Пер. с англ. — Изд. 2-е, стереот. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 344 с.
3. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках / Пер. с англ. — Изд. 2-е доп. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 288 с.
4. Установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н. Г. Чаусов, Д. Г. Войтюк, А. П. Пилипенко, А. М. Кузьменко // Пробл. прочности. — 2004. — № 5. — С. 117–123.
5. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, Е. Э. Засимчук, Л. И. Маркашова и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 54–62.
6. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Е. Э. Засимчук, Л. И. Маркашова, Т. В. Турчак и др. // Физическая мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 2. — С. 77–82.
7. Коперативные деформационные процессы и локализация деформации / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук и др. — Киев: Наук. думка, 1989. — 320 с.
8. Zasimchuk E. E., Markashova L. I. Microbands in Rolling-deformed Nickel Single Crystals // Materials Sci. and Eng. — 1990. — A127. — P. 33–39.

Нац. ун-т биоресурсов и природопользования Украины,
Киев

Поступила в редакцию
09.06.2009

УДК 621.19.14

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ

Успехи цифровой обработки визуальной информации, создание многофункциональных ПЗС-матриц, а также полупроводниковых пластин, способных сохранять скрытое радиографическое изображение и другие научные достижения убеждают в скором изменении объемов применения традиционных технических средств для неразрушающего контроля. Приводятся конкретные примеры принципиально новых технологических решений, которые в ближайшее время найдут широкое применение.

Advances in digital processing of visual information, development of multifunctional CCD-matrices, and semi-conductor wafers, capable of retaining the latent radiographic image and other most recent scientific achievements are a convincing proof of the forthcoming change of the scope of application of the traditional technical means of NDT. Specific examples of fundamentally new technological solutions are given, which will become widely applied in the near future.

Интенсивное развитие цифровой, компьютерной, полупроводниковой техники оказало существенное влияние на развитие технологии и техники неразрушающего контроля (НК), выдвинуло решения, альтернативные традиционным.

В последние несколько лет началось массовое использование термографии как альтернативного метода многим традиционным видам НК. Основным преимуществом этого метода является его дистанционность, высокая чувствительность (различаются десятки доли градуса), возможность наложения оптического и термографического изображений,

решения задач, которые другими методами неразрешимы.

На рис. 1 показана часть американского спутника Шаттл [2], между секциями которого была несплошность, пропущенная при строгом визуальном контроле и обнаруженная на термограмме.

Современные инфракрасные системы контроля позволяют определять подповерхностные несплошности композитов, металлов и керамик, толщину образца, термическую диффузность, контролировать одновременно большие поверхности, а также криволинейные.

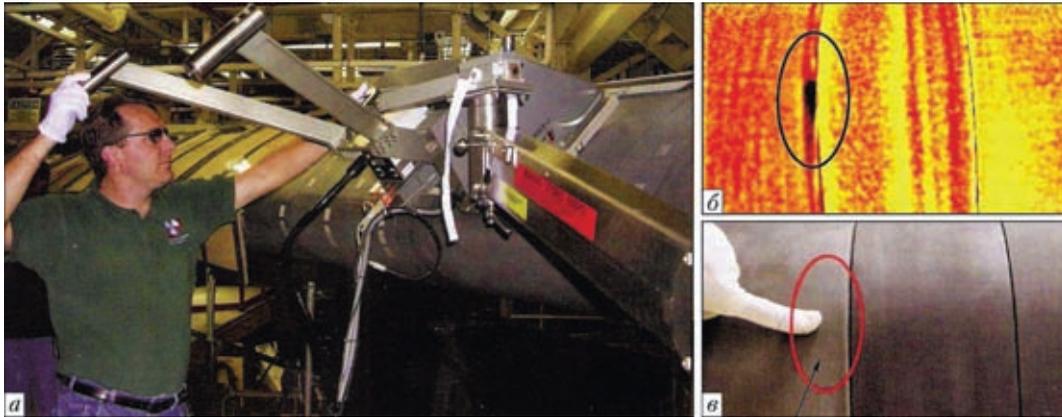


Рис. 1. Несплошность в обшивке Шаттла, пропущенная при визуальном и обнаруженная при термографическом контроле

Современная термография высокочувствительна, дает количественную оценку и воспроизводима, а для многих применений является альтернативой традиционным решениям в области НК.

На рис. 2 приведены три изображения одной и той же сотовой панели, выполненной из алюминия, графита и нескольких слоев эпоксидной смолы. Внутри панелей имеются посторонние включения. На рис. 2, *а* приведена термограмма, на рис. 2, *б, в* — соответственно радиографический снимок и УЗК-томограмма. Очевидно, что термограмма (рис. 2, *а*) более информативна. Не менее убедительны поиски с помощью термографии отслоений и деградации изоляции на теплотрассах.

Портативные тепловизоры уже широко применяются для поиска утечек тепла в зданиях, для дистанционного диагностирования электрооборудования и металлургических объектов. На очереди разработка методик обследования теплотрасс, магистральных трубопроводов, в том числе и на предмет обнаружения несанкционированных врезок в трубопроводы для отбора транспортируемого продукта. Различают пассивную и активную термометрию.

Суть метода «активной термографии» поясняется на рис. 3. Объект обследуется с помощью тепловизора, который перемещается одновременно с периодически включаемой лазерной вспыш-

кой, излучающей приблизительно 10 кДж в импульсе.

Появилась вибротермография, дающая возможность обнаружить малые скрытые трещины, которые невозможно определить с помощью других активных методов термографии. Здесь образец прозвучивается с частотой 15...30 кГц. Мощный акустический сигнал порядка 0,5...3 кВт приводит к фрикционному нагреву трущихся стенок закрытой трещины. Тепло избирательно указывает на наличие трещины в горячих точках. Обнаружение трещин с помощью вибротермографии сравнимо для некоторых материалов с капиллярной дефектоскопией.

Широко применяется термография для дистанционного определения состояния объектов в процессе их интенсивной нагрузки — вращающиеся турбины, электрические машины, элементы металлургического комплекса. В качестве примера приведем результаты, полученные техническим экспертом АЦНК им. Е. О. Патона НАН Украины А. Г. Бобошко при обследовании части оборудования Днепродзержинского цементного завода, в частности, двух вращающихся печей. Длина каждой печи составляет $L = 117,6$ м, диаметр $D = 3,5...4,0$ м. Остановка и пуск таких больших объектов — сложное и дорогостоящее мероприятие.

В ходе обследования было обнаружено значительное количество дефектов (гофры, выпучины,

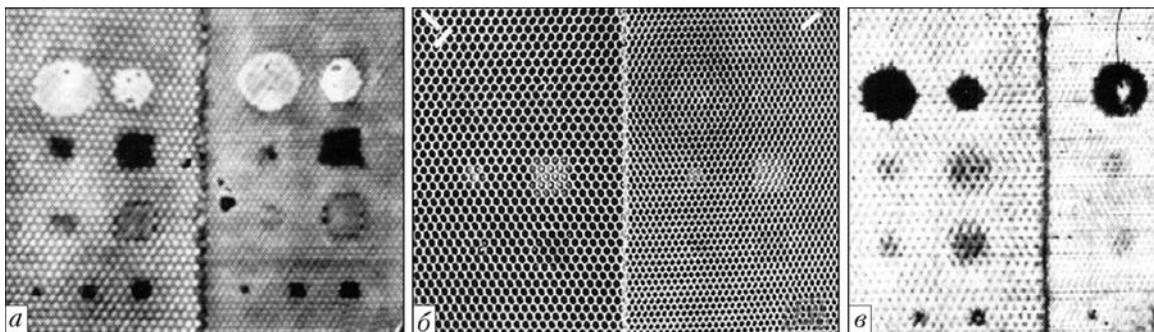


Рис. 2. Сравнение результатов обнаружения инородных включений, полученных различными методами, в пятислойном графитоэпоксидном ламинате, расположенном на сотовых алюминиевых панелях: *а* — термография; *б* — радиография; *в* — УЗК-томография



трещины сварных соединений и т. д.), которые возникли в процессе неправильной эксплуатации и некачественного ремонта, что привело к разрушению футеровки и деформации корпуса.

На работающей печи без ее остановки была проведена тепловизионная съемка камерой модели ТН 5100 фирмы «NEC» (Япония) с разрешением 0,1 °С.

Тепловизионная съемка позволила:

определить состояние футеровки по всей длине печи;

обнаружить участки основного металла и сварных швов, которые подверглись воздействию температур, превышающих допустимые значения (рис. 4, а);

определить зоны повышенной температуры в местах концентрации дефектов сварных соединений (рис. 4, в–е).

В дальнейшем при обследовании указанных выше участков после остановки печей другими методами НК в указанных технологических зонах были обнаружены трещины, непровары, различные несплошности.

Много новых технологических возможностей в последнее время появилось в области радиационного контроля сварных соединений.

В последние годы в качестве альтернативы рентгенографическим пленкам стали применяться кремниевые, фосфорные пластины многократного использования, имеющие большой динамический радиографический диапазон. Там, где ранее из-за разнотолщинности детали надо было делать 5...10 снимков, теперь это можно выполнить в одну экспозицию и при меньших энергиях. Фосфорные детекторы не требуют традиционных для рентгеновских пленок процедур и специализированных помещений. После экспозиции пластина помещается в сканер для считывания и цифровой обработки изображения. Часто этот метод называют цифровой радиографией. Он сочетает достоинства радиографии и рентгенотелевидения. Это, с одной стороны, присущие рентгенотелевидению оперативность контроля, электронная обработка и архивирование изображений, исключение расходных материалов и процессов химической обработки, с другой — возможности исследования объектов любой конфигурации, а также приближения приемника излучения вплотную к объекту как при съемке на пленку.

По своему динамическому диапазону этот метод превосходит не только рентгенотелевизионный, но и радиографию. С его помощью возможна регистрация изобра-

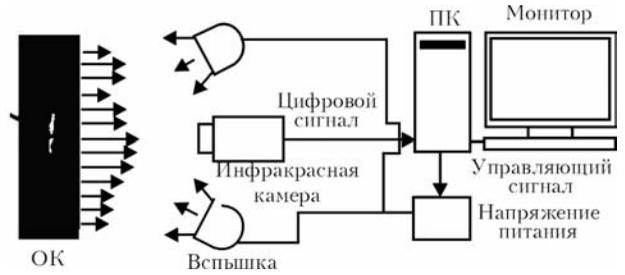


Рис. 3. Схема выполнения активной термографии

жения объекта с большим перепадом толщин за одну экспозицию с последующим просмотром участков различной оптической плотности с помощью регулировок яркости и контраста изображения. Это открывает новые технологические возможности в радиографии. Так появилась возможность реализовывать тангенциальное просвечивание [5] тел вращения (сосудов, трубопроводов и т. п.), что практически нереализуемо при традиционной пленочной радиографии. Из-за большой разнотолщинности тел вращения в прямом (по оси пучка) и тангенциальном (косом) направлении

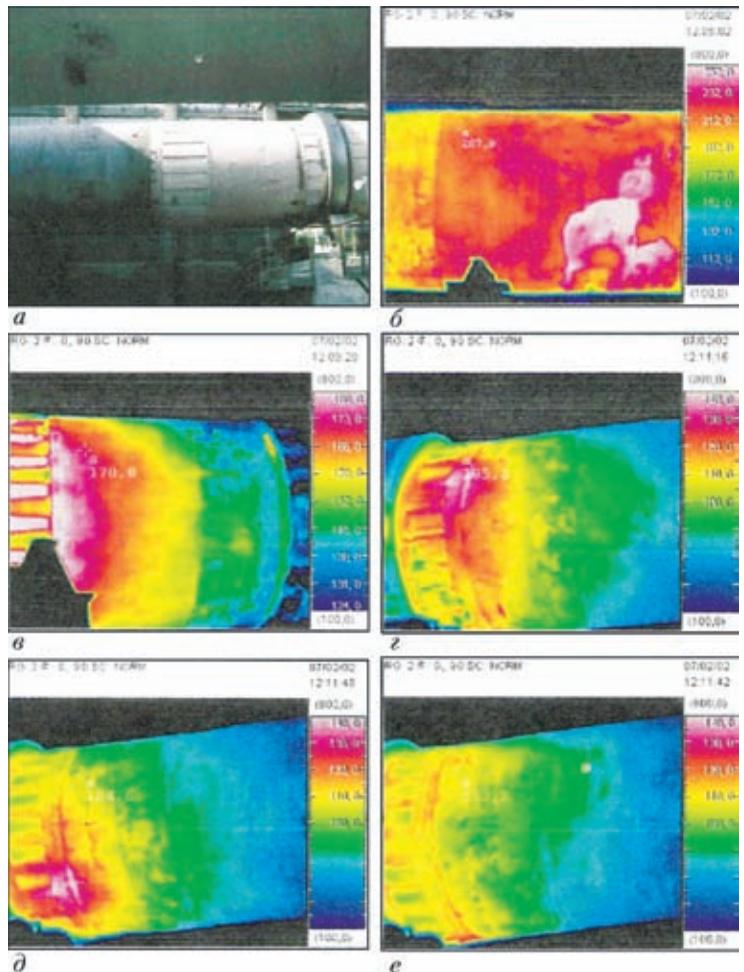


Рис. 4. Цементная печь (а) и термограммы участков с разрушающейся футеровкой (б), зон повышенной температуры в местах концентрации дефектов сварных соединений (в–е)

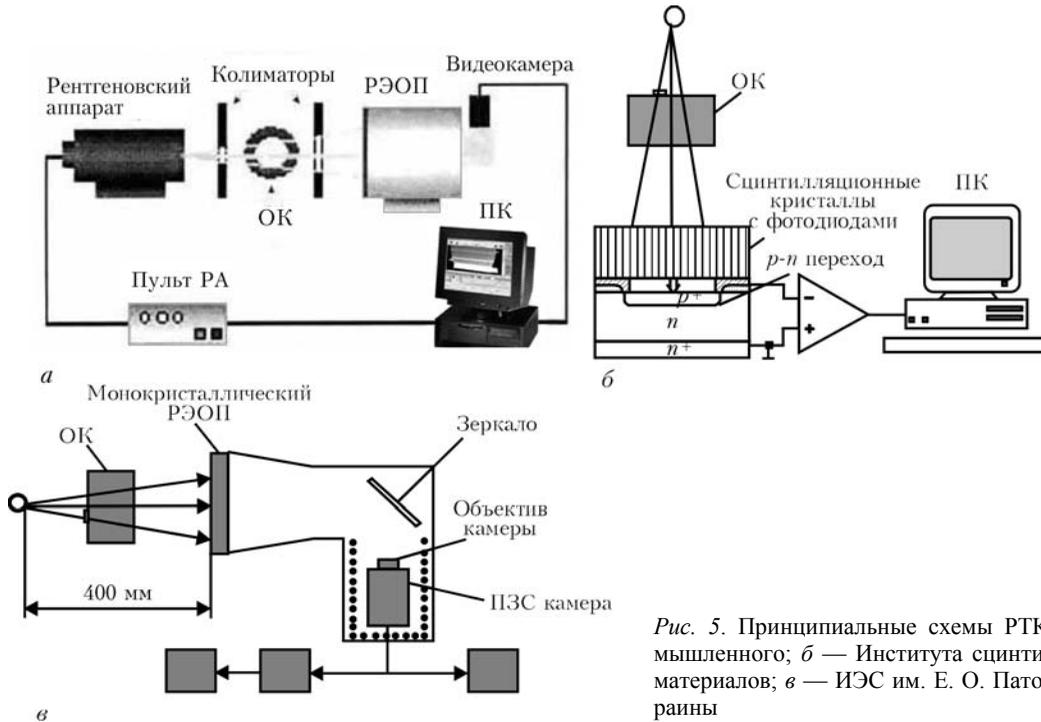


Рис. 5. Принципиальные схемы РТК: а — промышленного; б — Института сцинтилляционных материалов; в — ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

этот метод [5] практически до сегодня не применяется, хотя он очень интересен в информационном отношении. Тангенциальное просвечивание может дать информацию о расслоении металла, его утонении, наличии инородных сред малой плотности внутри объекта и т. д.

Быстрое развитие цифровой фотографии, технологий выращивания флуоресцирующих монокристаллов дают основание полагать, что в ближайшее десятилетие будет сильно потеснена традиционная радиография в любом ее проявлении.

Альтернативой радиографии станет радиоскопия. Радиографические задачи будут решаться радиоскопическими методами. В настоящее время уже реально создавать портативную радиоскопическую, рентгенотелевизионную аппаратуру на порядок более компактную, чем эксплуатируемые в настоящее время установки.

На рис. 5 приведены три принципиальные схемы рентгенотелевизионного контроля (РТК). На рис. 5, а представлена схема аппаратуры, которой укомплектованы все заводы, производящие мас-

совые металлоконструкции (трубы, баллоны и т. п.). Здесь основным элементом является вакуумная электронная техника РЭОП, преобразующая прошедшее радиационное излучение в видимое изображение, которое далее передается оператору. Более прогрессивная система РТК (рис. 5, б) воспринимает прошедшее излучение с помощью полупроводниковых преобразователей, электронных коммутаторов, формирующих изображение просвечиваемого объекта. Устройство по рис. 5, б, преобразующее прошедшее излучение в видимое изображение, содержит большое количество миниатюрных детекторов на основе сцинтилляционных кристаллов, контактирующих с фотодиодами.

Структурная схема одного из каналов детектора представлена на рис. 6. Сцинтилляционные кристаллы 1 обычно выполняют из иодида цезия и натрия (CsI, NaI). Контактующие с ними полупроводниковые фотодиоды, например, из кремния *n*-типа с имплантатом *p*-типа, компактны и имеют высокий квантовый выход в широком спектральном диапазоне.

Такие системы РТК разрабатываются в Институте сцинтилляционных материалов НАН Украины под руководством проф. В. А. Рыжикова. Они нашли применение в медицине и в таможенном деле.

Более прогрессивным принципом РТК является схема (рис. 5, в) с использованием цифровой фотографии и монокристаллических сцинтилляционных кристаллов без их дробления на мелкие элементы. На рис. 5, в изображена принципиальная схема устройства РТК, состоящая из монокристаллического сцинтилляционного кристалла диаметром 5...10 см,

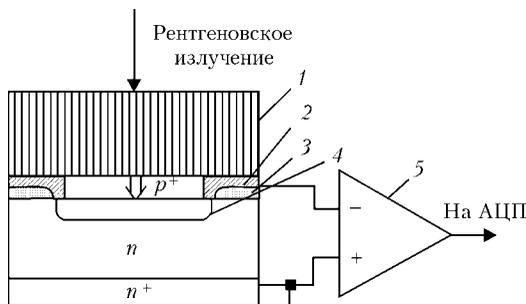


Рис. 6. Структурная схема детектора сцинтиллятор-фотодиод: 1 — сцинтиллятор; 2 — металлический контакт; 3 — SiO₂; 4 — *p-n*-переход; 5 — предварительный усилитель



зеркала, оптики и ПЗС-матрицы. После оптики, перед прибором с зарядной связью — ПЗС-матрицей — располагается диафрагма. ПЗС-матрица состоит из светочувствительных кремниевых диодов. Когда свет, отражаемый зеркалом, достигает ПЗС-матрицы, он заряжает каждый из ее элементов — пикселей. ПЗС-матрица имеет размеры порядка 1 см^2 , поэтому изображение на обратной стороне сцинтилляционного кристалла, имеющего размеры порядка 100 см^2 , концентрируется с помощью оптического объектива. ПЗС-матрица имеет порядка нескольких миллионов пикселей, поэтому и достигнутая разрешающая способность значительно выше, чем в схемах на рис. 5 и 6. Уже сегодня разрешающая способность схемы РТК по рис. 5, в приближается к возможностям рентгеновской пленки. Цифровая фотография интенсивно развивается, появляются все более совершенные ПЗС-матрицы, алгоритмы обработки информации, карты памяти и т. д. Поэтому можно ожидать, что по своим радиографическим возможностям РТК по схеме рис. 5, в может превзойти рентгеновские пленки. Отсутствие промежуточных носителей и малые размеры устройства при равных возможностям программного продукта, который используется для обработки изображения, дает существенные преимущества РТК по рис. 5, в перед современными фосфоматическими преобразователями.

Условно габаритные размеры упомянутых систем радиационного контроля представлены на рис. 7.

Наименьшими размерами характеризуется система РТК (рис. 5, в), основанная на монолитном кристалле, ПЗС-матрице и технике цифровой фотографии. Существует еще одно важное обстоятельство, которое свидетельствует о возможности замены радиографии в любом ее варианте на РТК по предлагаемой компактной схеме (рис. 5, в). Если на радиографическом снимке подобно фотопленке можно различить 30 пар черно-белых линий на 1 мм, то использование программного обеспечения True Pic и ПЗС-матриц в современных цифровых аппаратах позволяет различить до 150 аналогичных пар линий на 1 мм. Таким образом, потенциально разрешающая способность РТК-технологий на описанной основе ПЗС-матриц может быть выше, чем при пленочной радиографии.

Кроме исключения промежуточного носителя (детектора) в виде пленки или фосфоматической пластины в случае РТК (рис. 5, в), а также высокой разрешающей способности, можно будет значительно экономить время контроля за счет того, что документироваться теперь будут только те участки сварного соединения, где есть недопустимые дефекты. Изображения участков шва с безопасными несплошностями после просмотра записывать не будут, так как в этом нет необходи-

мости. При промежуточных носителях информации (пленках, пластинах) это сделать невозможно. Информация, записанная на промежуточном носителе, должна быть изучена и стерта, промежуточный носитель должен быть подготовлен к следующей экспозиции. Поэтому предлагаемая портативная рентгентелевизионная техника (рис. 5, в) будет вытеснять радиографию прежде всего там, где большие объемы радиационного контроля. Это заводы, производящие металлоконструкции, судостроение, магистральные и распределительные трубопроводы.

Имеется большое количество второстепенных трубопроводов, свай, тросов, прибрежных металлоконструкций, которые в настоящее время практически не контролируются. Для таких объектов весьма перспективна низкочастотная (НЧ) ультразвуковая дефектоскопия [5–9].

При низкочастотном УЗК не требуется очищать всю поверхность объекта. Достаточно только небольшого участка, чтобы установить низкочастотную УЗ-антенну. Так можно диагностировать участки протяженностью до 200 м.

Производительность низкочастотного метода на несколько порядков выше высокочастотного УЗК, а стоимость контроля на порядок ниже. В ближайшие годы низкочастотный УЗК должен найти широкое применение [8, 9].

Практика предупреждения серьезных аварий на нефте- и газопроводах показала, что традиционных средств и методов УЗК недостаточно. Покажем это на примере двух серьезных аварий, произошедших на нефтепроводах Аляски.

Данные аварии побудили правительство США к поиску нетрадиционных методов диагностики трубопроводов. Аналогичные исследования проводятся в отделе № 4 ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, по электромагнитоакустическим (ЭМА) и низкочастотным ультразвуковым технологиям. Сочетание ЭМА и НЧ открывает новые возможности для УЗК.

В августе 2006 г. крупная нефтяная компания США пережила второй инцидент, связанный с аварией на нефтепроводе, что нарушило экологи-

Вакуумная техника (рис. 5, а)	Многоэлементные полупроводниковые преобразователи (рис. 5, б)
	Кремниевые и фосфоматические пластины
	Преобразователи на ПЗС-матрицах (рис. 5, в)

Рис. 7. Условные габаритные размеры устройств, обеспечивающих получение радиационных изображений с использованием разных электронно-оптических преобразователей (РЭОП)



чески хрупкую природу Аляски. Обе аварии были результатом внутренней питтинговой коррозии на нефтепроводах в четыре нитки диаметром 0,85 м. По этим линиям транспортируется 400 000 баррелей нефти в день. После первой аварии четыре нитки нефтепровода были проверены традиционным ручным и автоматизированным УЗК. Обнаруженные зоны повреждений были отремонтированы.

Вторая авария немедленно закрыла поставки нефти в 48 штатов на продолжительное время, пока не был выполнен полный повторный НК нефтепровода.

После отключения четырехниточного нефтепровода Министерство транспорта США выдало предписание о срочном УЗК всех четырех ниток нефтепроводов в зоне секторов от 4 до 8 ч, т. е. для ускорения процесса НК отказалось от исследований верхней части нефтепровода. Контроль с помощью традиционного УЗК потребовал удаления полиуретановой изоляции и подготовки под контроль поверхности труб. Для выполнения этого задания потребовалось большое количество специалистов по УЗК и рабочих, занимающихся изоляцией. Только для работы по УЗК необходимо было 108 рабочих. Поэтому необходимо было изучить альтернативные методы сплошного НК, которые будут по точности не ниже традиционных. Требуемые экспресс-методы сплошного НК должны были позволить выявить внутренние поверхностные коррозионные язвы с 50 % утонением стенки при соотношении геометрических размеров в плане 3:1. После того, как произошла вторая авария, требования к НК еще более ужесточились. Теперь требовали обеспечения 100%-го выявления любой несплошности. Для выполнения традиционного УЗК каждая нитка трубопровода была разделена на контролируемые участки по 0,3 м, что привело к созданию 52 000 отдельных участков. Участки проверяли с помощью ультразвука в нижней полости нефтепровода, где постоянно находится нефть с агрессивными примесями. Группа из 108 специалистов традиционным УЗК проверяла в среднем 283 сегмента в день. Были применены традиционные ручной и автоматизированный УЗ контроль.

Скорость автоматизированного УЗК была равна от 4,5 до 6,0 м на команду в смену — неожиданно низкая, так как требовались дополнительные уточнения и ручное сканирование. Если бы не был найден успешный альтернативный низкочастотный метод УЗК, то контроль 52 000 участков занял бы 184 дня.

Кроме традиционного УЗК с использованием пьезоизлучателей по зачищенной поверхности были проведены испытания с применением электромагнитоакустических преобразователей (ЭМАП), которые не требовали такой зачистки. Было опреде-

лено, что ЭМА-технология позволяет выявлять утонение стенки более чем на 30 % на расстоянии 0,5 м от опоры. С применением ЭМАП позже было приостановлено снятие изоляции. Далее выполнялся уже автоматизированный УЗК на основе ЭМАП через антикоррозионное покрытие толщиной 4 и 8 мм. Было установлено, что испытания с помощью ЭМАП по изолированной трубе полностью эквиваленты контролю обнаженной трубы, что существенно ускорило процесс диагностирования. Удалось таким образом ускорить диагностирование, но этого было недостаточно. Проблему решил только метод низкочастотного ультразвука. Низкочастотный УЗК позволил сохранить пороги выявления несплошностей при десятикратном увеличении производительности.

Если ЭМАП-технология широко распространена в США и признана в документе ASTM E1816, то технология низкочастотного УЗК не имеет пока в США стандартов и тем не менее была использована для диагностики этого нефтепровода.

Предварительно работоспособность ЭМАП и оборудования для низкочастотного электромагнитоакустического контроля (НЧЭМК) оценивали в реальных полевых условиях. Для предварительных испытаний был выбран трубопровод диаметром 0,75 м, который сначала подвергался испытаниям с помощью внутритрубного снаряда с тем, чтобы найти участки с питтинговой коррозией. Далее проводили компьютерную радиографию, с помощью которой получили изображения питтинговой коррозии. После этого ручные УЗ испытания позволили получить точные данные о питтинге и его геометрических размерах. Для установления пределов выявляемых отношений геометрических размеров несплошностей для каждого метода использовали широкий диапазон размеров, глубин и морфологий коррозионных язв.

В результате полевых испытаний получили следующие результаты:

ЭМАП обеспечил 100 % выявления питтинга при 25%-м утонении стенки и отношении размеров дефектов в плане 3:1 на стенке толщиной 9 мм трубы без изоляции;

ЭМАП выявил 30 %-ное утонение стенки при отношении размеров дефектов в плане 4:1 на стенке толщиной 9 мм изолированной трубы;

10 % сигналов ЭМАП были ложными положительными (такие избыточные результаты не ухудшают выявление дефектов при контроле ЭМАП, но требуют уточнения с помощью других методов НК); возможность команды из двух человек с помощью ЭМАП проверить 300 м трубы в день без изоляции и 150 м в день трубы, покрытой изоляцией;

технология низкочастотного ЭМАП дает изображение всего контролируемого сегмента 4...8 ч большей протяженности;



после окончания работ с ЭМАП необходимо было выполнять уточняющие УЗ измерения толщины обычным методом;

НЧЭМК продемонстрировал 100%-ю выявляемость изолированного питтинга при потере 25 % толщины стенки при отношении размеров дефекта в плане 3:1;

результаты НЧЭМК, полученные на зачищенной поверхности, не изменились на трубе, покрытой антикоррозионной изоляцией.

НЧЭМК дает результаты лучше, чем автоматизированный УЗК или ЭМАП при изоляции из фторполимера. При этом длина объекта, проконтролированного командой из двух человек, использующей ручной прибор для НЧЭМК из-за вспомогательных операций не превышает 60 м в день. При автоматизации и улучшенных креплениях для датчиков НЧЭМК производительность сканирования повысилась до 3 м/мин, т. е. за рабочий день удалось контролировать более 1 км трубы.

До появления ЭМАП и НЧЭМК, альтернативного традиционным технологиям НК, сотни съемщиков изоляции, очистителей изоляции и техников УЗК работали одновременно 24 ч в сутки. Новые альтернативные методы ЭМАП и НЧЭМК были приняты Министерством транспорта США. Через три недели было изменено предписание правительства США по диагностике аварийного нефтепровода в заливе Прудхое в пользу низкочастотных методов.

После одобрения Министерством транспорта США лаборатория НК в Хьюстоне срочно начала работать над многоканальными датчиками, электронной для НЧЭМК и автоматизированного УЗК на этой основе.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с другими отечественными организациями ведутся работы по применению ЭМАП и НЧЭМК. Технология низкочастотного УЗК протяженных объектов должна найти применение в Украине и России в ближайшие годы, особенно для труднодоступных металлоконструкций.

Альтернативным для многочисленных магнитных методов (магнитографический, магнитопорошковый, феррозондовый и т. п.) является магнитооптическая визуализация (МОВ), основанная на использовании магнитооптического эффекта Фарадея [10]. На рис. 8 показан технологический процесс МОВ магнитограмм (МГ).

В данном случае на поверхность детали накладывается как при магнитографии (рис. 8) магнитная лента. Она является промежуточным носителем информации, содержит следы магнитного поля поверхности детали, которое далее считывается магнитооптическим преобразователем. Промежуточного носителя информации может и не быть, т. е. магнитооптический преобразователь сканирует поверхность объекта контроля. Без промежуточного носителя чувствительность данного метода к трещинам может достигать долей микрона. Пример такой визуализации поверхностных дефектов показан на рис. 9 при использовании в качестве промежуточного носителя информации ленту из никелевого сплава.

На рис. 9 показано визуально-оптическое изображение образца (а), а также его фотографии после капиллярного (б) и магнитопорошкового (в) и МОВ МГ (г).

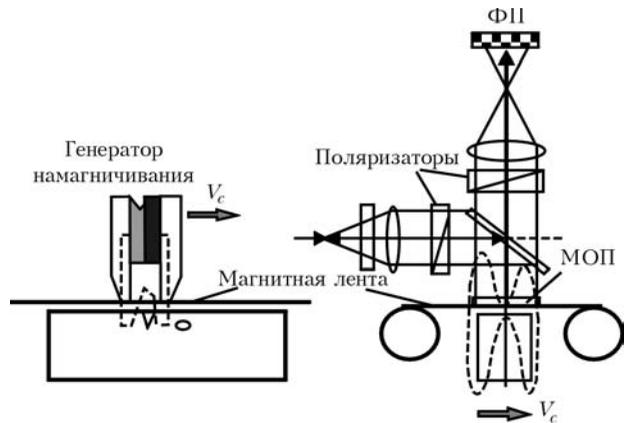


Рис. 8. Схема технологического процесса МОВ МГ

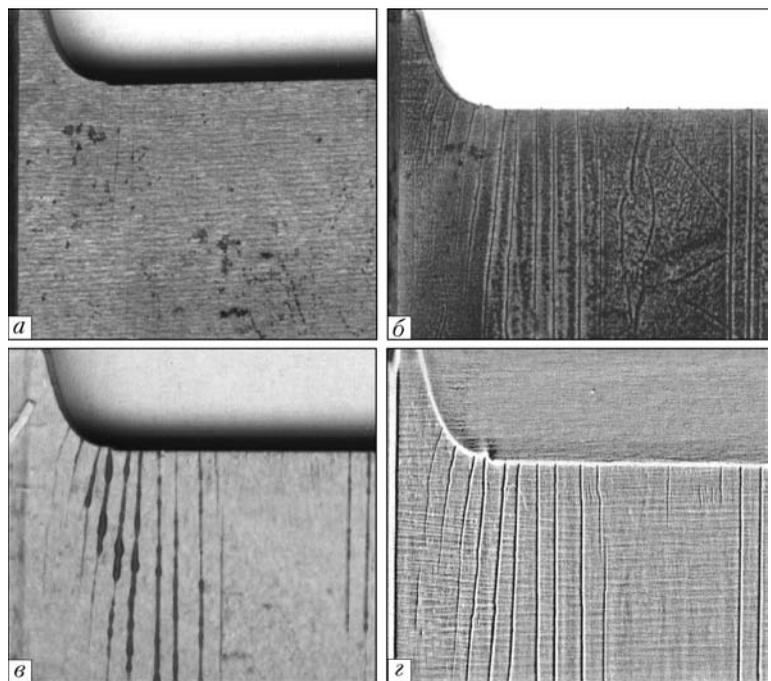


Рис. 9. Поверхностные трещины, выявленные различными методами: а — визуально-оптическим; б — капиллярным; в — магнитопорошковым; г — МОВ МГ



контроля. Как видно из рис. 9, 2, наиболее интересные результаты получены с помощью магнитооптического метода. В этом случае при высокочастотном намагничивании обнаружены дефекты, недоступные магнитопорошковому и капиллярному методам. Кроме того, что этот метод более чувствителен, чем другие методы обнаружения и оценки поверхностных дефектов, он предполагает цифровую обработку изображений [10] со всеми известными ее возможностями.

Таким образом, в области НК непрерывно появляются новые решения. Так, низкочастотный УЗК, теряя информацию о мелких дефектах, позволяет на порядок быстрее и дешевле находить коррозионные поражения глубиной, превышающей более 10 % толщины металла. Для многих протяженных, труднодоступных объектов этого достаточно.

Традиционные методы для исследования качества поверхности (магнитные, вихретоковые, капиллярные, визуальные и т. п.) вытесняются активной термографией, техника которой бурно развивается. Хорошо известны применения термографии для диагностики зданий, сооружений, электротехнических объектов. Практика последних лет показала, что активная термография может существенно дополнить информацию, получаемую традиционными методами контроля качества металлических поверхностей.

Появление высокочувствительных ПЗС-матриц и других совершенных элементов цифровой фотографии позволяет надеяться, что в ближайшие годы аппаратура для рентгенотелевизионного контроля по размерам и стоимости приблизится к аналогичным показателями УЗК. Это обстоятельство увеличит объемы применения НК, а также должно изменить организацию НК. Записываться и архивироваться будут только зоны сварных швов с опасными дефектами, подлежащими ремонту. Остальная часть сварных соеди-

нений будет только просматриваться на наличие внутренних дефектов.

Для оценки качества поверхности ответственных деталей должен найти применение магнитооптический метод, который более нагляден и более чувствителен, чем все другие методы для контроля качества ферромагнитных поверхностей. Пока этот метод НК используется только в криминалистике, например, для восстановления номерных знаков. Сравнительные испытания разными методами одних и тех же поверхностей подтвердили, что наиболее чувствительным является магнитооптический метод.

1. *Троицкий В. А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.
2. *Shepard M. S.* Developments in Thermographic NDT // NDT Marketplac. — 2008. — № 26.
3. *Review and comparison of shearography and thermography for nondestructive testing / Y. S. Chen, Y. Y. Hung, L. Long, Y. H. Huang // Materials Evaluation. — 2008. — 66, № 10. — С. 1138.*
4. *Рыжиков В. Д., Ополонин О. Д.* Разработка и исследование системы цифрового радиоскопического контроля сварных соединений и металлоконструкций // 36. науч. ст. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». — Киев, Изд-ние Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2006. — С. 90–95.
5. *Troitskij V. A.* Non-destructive testing of multilayer welded structures // Insight. — 1997. — 39, № 9. — С. 646–650.
6. *Троицкий В. А., Бондаренко А. И., Горбик В. М.* Особенности создания и применения намагничивающих устройств на постоянных магнитах для магнитной дефектоскопии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 3.
7. *Nyholt I. I.* Alternative NDT techniques for prudhoe bay pipeline failures // TNT ASNT. — 2007. — 6, № 3.
8. *Троицкий В. А., Бондаренко А. И., Лазебный В. С.* Применение метода низкочастотного УЗК теплообменников // Там же. — 2008. — № 4. — С. 63–70.
9. *Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И.* Метод низкочастотного УЗК протяженных объектов направленными волнами // Там же. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
10. *Магнитооптическая дефектоскопия приповерхностных слоев ферромагнитных изделий / Ю. С. Агалиди, С. В. Левый, В. А. Троицкий, Ю. Н. Посыпайко // Там же. — 2007. — № 4. — С. 16–20.*