

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ (ОБЗОР)

Е. В. ШАПОВАЛОВ, Р. М. ГАЛАГАН, Ф. С. КЛИЩАР, В. И. ЗАПАРА

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

Представлен обзор современных методов и средств неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой: капиллярных, оптических, вихретоковых, магнитных, электрических, тепловых, радиационных и акустических. Кратко рассмотрены преимущества и недостатки используемых методов, а также тенденции их развития. Особое внимание уделено анализу возможностей УЗ метода с использованием различных методик контроля, схем прозвучивания и типов преобразователей. Показано, что актуальным вопросом является повышение достоверности контроля самого опасного дефекта сварного соединения, полученного контактной точечной сваркой — непровара. Для этих целей можно использовать большинство описанных в статье методов, однако отдельные недостатки каждого метода не позволяют гарантировать надежное выявление данного дефекта. Поэтому перспективным является использование одновременно нескольких бесконтактных методов и разработка оптимальных способов анализа данных для каждого отдельного метода. Недостатком такого подхода является увеличение времени контроля, однако его можно минимизировать с помощью правильной стратегии проведения всего комплекса контрольно-измерительных мероприятий. Соответственно даны рекомендации по выбору методов контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, и предложен подход к созданию автоматизированной системы контроля с использованием одновременно нескольких методов. Библиогр. 70 назв., рис. 8.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, контактная точечная сварка, ультразвук, надежность

Широкое применение контактной точечной сварки (КТС) в различных областях промышленности обусловлено высокой степенью ее механизации, роботизации, автоматизации и, как следствие, высокой производительностью. В сварном точечном соединении возможно возникновение различных дефектов, причинами которых являются несовершенство оборудования для КТС, сборочные, подготовительные операции и др. Необходимым условием формирования качественного сварного соединения, выполненного КТС, является образование общей зоны расплавления заданных размеров, что обеспечивает важнейшее эксплуатационное свойство — прочность соединения [1]. Размер этой зоны при точечной сварке определяется диаметром литого ядра и регламентируется ГОСТ 15878–79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры».

Основными дефектами КТС можно назвать непровар, выплеск, трещины, раковины и отклонение геометрических параметров сварного соединения [2]. Непровар является одним из самых опасных дефектов и может проявляться в виде полного отсутствия или уменьшения литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или плакирующего слоя в контакте деталь–деталь. Количество дефектов, допускаемых без исправления и подлежащих исправлению, зависит от ответственности сварного узла и регламентируется соответствующими техничес-

кими условиями. Значительно снизить количество дефектов и вероятность их появления позволяет контроль режимов работы оборудования (электрических и механических) и управление процессом КТС [3].

Контролируют качество точечной сварки чаще всего внешним осмотром деталей и разрушением опытных образцов. Преобладание разрушающих методов контроля обусловлено простотой и наглядностью результатов. Однако разрушающие методы имеют существенный недостаток (кроме, естественно, самого процесса разрушения) — позволяют проводить только выборочный контроль. Подобного недостатка лишены методы НК.

Данная работа посвящена обзору методов НК сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, анализу достоинств и недостатков каждого из них и определению основных тенденций их дальнейшего развития.

**Капиллярные методы контроля.** Данные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей контролируемых изделий и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью специальных преобразователей. Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на люминесцентный, цветной, люминесцентно-цветной, яркостный [4].



К недостаткам метода можно отнести то, что он выявляет только поверхностные или сквозные несплошности; требует значительных временных затрат на подготовку поверхности изделий, а также на обработку результатов контроля; невозможность автоматизации. Значительная трудоемкость капиллярных методов препятствует их использованию для контроля КТС, так как в некоторых конструкциях количество сварных точек может достигать нескольких тысяч и более.

**Оптические методы контроля.** Наиболее дешевым и оперативным методом НК является внешний осмотр. Обычно внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Внешний осмотр соединений проводят невооруженным глазом или через увеличительную лупу. При осмотре проверяют расположение сварных точек, форму и размеры вмятины от электродов, наличие наружных дефектов, зазоры между деталями [5]. Отпечатки сварных точек должны иметь круглую форму (допускается некоторая овальность). Нормальная глубина вмятины составляет 10...15 % толщины деталей, а при сварке деталей неравной толщины может увеличиваться до 25 % [2]. На поверхности точек не должно быть выплесков металла.

Применение оптико-электронных средств обработки изображений увеличивает эффективность оптического контроля, позволяя автоматизировать контроль КТС. Например, лазерные сканирующие сенсоры и цифровые видеокамеры используются для измерения контура отпечатков сварочных электродов, определения наружных дефектов и трещин [6]. В новых разработках оптических сканеров применяется динамический порог и алгоритмы морфологии для сегментирования дефектов [7]. Размеры отпечатков от электродов не могут служить объективным показателем качества сварного соединения. Однако изменение размеров отпечатков при неизменной настройке машины свидетельствует о том, что был нарушен процесс сварки, а это могло привести к изменению качества соединения.

Приборы оптической интерферометрии позволяют с большой точностью измерять перемещения и деформации элементов сварных конструкций как в процессе их изготовления, так и эксплуатации. Оценку качества КТС также проводят по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния сварных соединений [8].

В последние годы для НК качества точечных соединений используется метод электронной широгрaфии (Digital Shearography), который является бесконтактным оптическим интерференционным методом контроля деталей и конструкций, изготовленных из различных материалов [9]. Суть метода электронной широгрaфии состоит в следующем. Объект контроля (ОК) частично или пол-

ностью освещается с помощью лазера когерентной волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговый элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры (рис. 1). В плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения ОК. Интерференция световых волн образует хаотическую микроинтерференционную спекл-структуру, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-структуры, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос (широграммы), которые несут информацию о производных от компонента вектора перемещений точек поверхности. Концентрация напряжений и деформаций в зоне дефектов под воздействием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос. На основе полученных данных можно судить о наличии дефектов в контролируемом объекте [10, 11]. Метод также позволяет определить размер ядра сварной точки. Результаты применения электронной широгрaфии для диагностики сварных точечных соединений приведены в работе [12].

К недостаткам электронной широгрaфии можно отнести необходимость нагружения ОК, что может потребовать дополнительных приспособлений и времени на проведение контроля КТС. К тому же по полученным картинам интерференционных полос трудно судить о параметрах дефекта.

**Вихретоковые методы контроля.** Вихретоковый (электромагнитный) метод контроля основан на регистрации изменения поля вихревых токов, наводимых в приповерхностном слое изделия. Вихретоковый метод применительно к КТС ис-

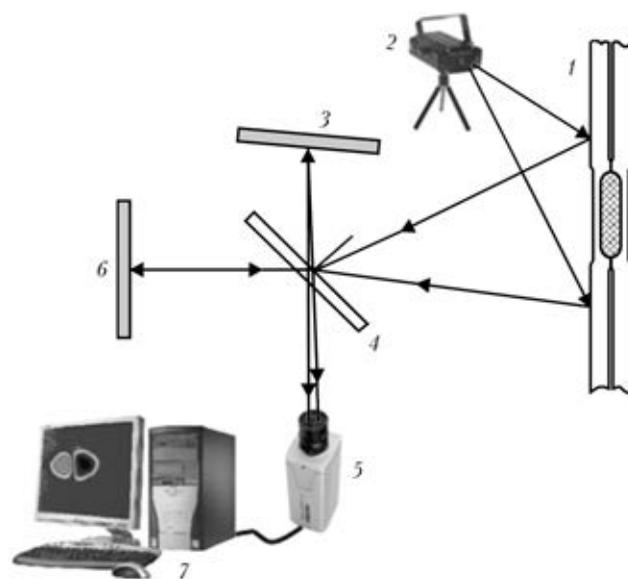


Рис. 1. Схема контроля с применением электронной широгрaфии: 1 — сварная конструкция; 2 — источник лазерного излучения; 3 — подвижное зеркало; 4 — светоделитель; 5 — CCD-камера; 6 — неподвижное зеркало; 7 — компьютер



пользуют для контроля размеров литого ядра. При отсутствии литого ядра локальная электропроводность максимальна и соответствует полному непровару. С увеличением литого ядра до номинального значения она снижается до некоторой экспериментально установленной величины. Изменение электропроводности вызывает изменение электрических параметров преобразователя — активного и реактивного сопротивления катушки индуктивности, которое регистрируется дефектоскопом [2, 13].

На чувствительность электромагнитного метода значительно влияет зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия (обусловленный глубиной вмятины), а также их взаимное расположение, форма и размеры [14]. Так как в настоящее время не существует теоретических методов установления зависимости удельной электрической проводимости от дефектности сварного соединения, то задача решается экспериментальным путем [15], что можно отнести к недостаткам данного метода.

**Магнитные методы контроля.** Магнитные методы НК применяют главным образом для контроля изделий из ферромагнитных материалов. В зависимости от используемого способа получения информации магнитные методы делятся на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, индукционный, эффект Холла, пьезомоторный, магниторезисторный [4]. С помощью магнитных методов контролируют размеры сварной точки, сплошность и механические свойства. При использовании магнитных методов в области сварного соединения создается сильное магнитное поле. Любой дефект, попадающий в это поле, будет создавать локальное поле утечки (рассеяния). По распределению магнитного поля вокруг места сварного соединения определяют качество КТС. Например, в магнитопорошковом способе характер распределения магнитного поля определяется по расположению частиц, специально помещенных на поверхности изделия. Очевидным недостатком данного способа является его трудоемкость и невозможность автоматизации (в отличие от других способов магнитного НК). К общим недостаткам традиционных магнитных методов можно отнести то, что распределение магнитного поля на поверхности ОК может зависеть не только от дефектов, но и от локальной структурной или магнитной неоднородности металла. Это требует создания специализированных методов обработки первичной информации, чтобы избежать ложной расшифровки полученных в процессе контроля данных.

В работе [16] предложен способ магнитного контроля точечных сварных соединений, при котором сварное соединение после сварки размагничивают, а затем намагничивают в слабых диа-

пазонах полей 2...40 А/см. Над сварной точкой устанавливают феррозонд-градиентометр перпендикулярно плоскости соединения. С помощью устройства сканирования датчик перемещают над сварной точкой с постоянной скоростью. С шагом  $h = 0,1$  мм проводят запись величины нормальной составляющей поля рассеяния, выделяют ее экстремальные значения, а о качестве сварного соединения судят по диаметру сварной точки, который определяется выражением  $d = hn$  (где  $n$  — количество измерений между двумя экстремумами).

Для повышения пространственного разрешения и чувствительности магнитного метода используют специальные миниатюрные датчики в виде решеток на базе магниторезисторов (giant magnetoresistor, GMR) или датчиков SDT (spin dependent tunneling) [17, 18].

Заслуживает внимания возможность применения для контроля КТС метода магнитной памяти металла (МПМ) [19]. Это метод НК, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности изделий для определения зон концентрации напряжений, дефектов и неоднородности структур металла и сварных соединений [20]. Путем считывания СМПР, формирующегося естественным образом в процессе сварки и отображающего остаточную намагниченность, можно выполнять интегральную оценку состояния сварного соединения. Качество соединения оценивают по характеру распределения нормальной составляющей магнитного поля и его градиента. Бесспорным преимуществом метода является то, что не используется процедура намагничивания изделия. Однако в некоторых случаях использование метода МПМ для КТС может потребовать предварительных экспериментальных исследований для разработки методики контроля и способов обработки информации, так как согласно некоторым исследованиям результаты, полученные с использованием данного метода, не позволяют достоверно прогнозировать место разрушения образцов [21].

Для контроля КТС разработан метод, получивший название магнитно-тепловой [22]. Суть метода заключается в том, что участок конструкции, подлежащий сварке, предварительно намагничивают постоянным магнитным полем определенной величины и направления, а затем сваривают. Под действием теплового поля от источника сварочного нагрева металл размагничивается. После сварки характер распределения остаточной магнитной индукции в общем случае будет отражать характер распространения теплового поля в пределах температур ниже точки Кюри. Учитывая, что непровар в основном связан с недостаточным разогревом соответствующей зоны металла, по распределению полей остаточной магнитной ин-

дукции можно определить геометрические параметры зоны проплавления сварного соединения.

Интерес также представляет развитие магнитооптического метода контроля, который основан на визуализации магнитограмм [23]. В первую очередь метод используется для контроля поверхностных дефектов (трещин). Кроме этого, с помощью магнитооптического контроля можно визуализировать области концентрации остаточных напряжений в точке роста трещин. Важными преимуществами метода является нечувствительность к плоскостности, шероховатости и ориентации исследуемой поверхности, возможность программной обработки и документирования результатов контроля.

В работе [24] предложен способ магнитооптического контроля, который заключается в том, что после намагничивания ОК к его поверхности прижимается гибкий магнитный носитель. На носитель копируется магнитное поле при перемещении его вдоль поверхности изделия. Записанное распределение намагниченности визуализируется в магнитооптической пленке из копии распределения, полученной на гибком магнитном носителе.

**Электрические методы контроля.** Согласно работе [25], к перспективным методам НК соединения, полученного контактной точечной сваркой, относится использование токов шунтирования (рис. 2). Способ состоит в пропускании через сварное соединение с одной стороны листа постоянного или высокочастотного тока 10...20 А в импульсном режиме (0,3...0,5 с) с замером тока шунтирования (величины падения напряжения со стороны второго листа в области сварки). По величине сигнала от датчика судят о характере сварки по сравнению с сигналом от эталонного образца.

**Тепловые методы контроля.** Тепловые методы основаны на измерении температурного поля поверхности объекта, являющегося источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Основными регистрируемыми параметрами являются интенсивность, температурный градиент, контраст, лучистость и др.

Достоинствами теплового контроля являются дистанционность (при условии использования бесконтактных датчиков), высокая производительность испытаний и возможность создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами. К недостаткам бесконтактных измерений можно отнести достаточно жесткие требования к чистоте окружающей среды и качеству подготовки поверхности. Для контроля КТС разработаны специализированные системы, в которых предусмотрен местный нагрев участка точки и термографическое определение распределения температуры в районе соединения. Система следует за сварочным роботом и фикси-

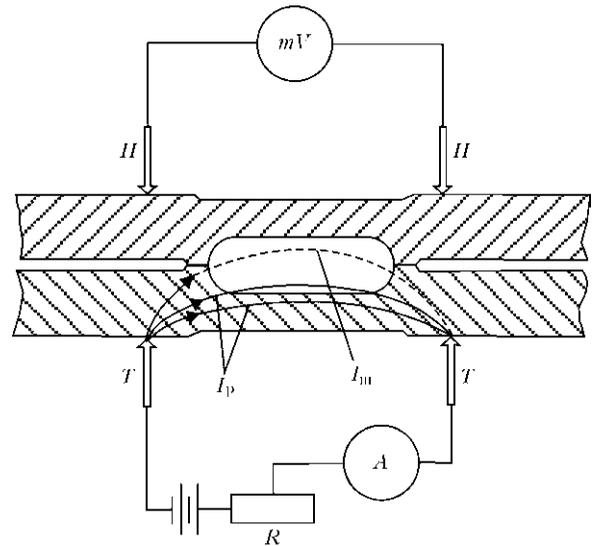


Рис. 2. Схема контроля непровара с использованием токов шунтирования:  $I_{ш}$  — ток шунтирования;  $I_p$  — рабочий ток;  $\Pi$  — потенциальный шуп;  $T$  — токовый шуп

рует дефекты сварки [26]. В качестве импульсного источника нагрева рекомендуется использовать ксеноновую блитц-лампу [27].

Контроль размера литого ядра в сварном точечном соединении можно проводить с помощью анализа термоупругих напряжений. В данном случае с помощью инфракрасной термографии (ИКТ) регистрируется распределение температуры в области сварного соединения, обусловленное адиабатическим тепловым расширением, которое является результатом приложенных к ОК переменных механических сил. Когда величина напряжений ниже предела упругости, соотношение между изменением температуры  $\Delta T$  и изменением главного напряжения  $\Delta \sigma$  может быть выражено следующим уравнением [28]:

$$\Delta T = (-kT\Delta\sigma)/\rho C_v = -K_m T \Delta\sigma, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент теплового расширения;  $T$  — абсолютная температура;  $\rho$  — плотность;  $C_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $K_m$  — коэффициент термоупругости.

Таким образом, регистрируя распределение температуры можно определить изменение суммы главных напряжений. Коэффициент термоупругости  $K_m$  имеет очень низкие значения, например, для алюминия  $K_m \approx 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ . Если предположить, что изменение суммы главных напряжений составит  $\Delta \sigma = 10 \text{ МПа}$ , то при комнатной температуре для алюминия получим  $\Delta T \approx 0,027 \text{ К}$ , т. е. для измерения температуры с высокой точностью необходима соответствующая разрешающая способность оборудования. Современные инфракрасные сенсоры имеют соизмеримую с рассчитанной выше величиной  $\Delta T$  разность эквивалентных шумовых температур при измерении методом ИКТ. Соответственно получить разрешаю-



щую способность и точность, достаточные для измерения термоупругих напряжений, довольно сложно. Для решения проблем с измерением напряжений методом ИКТ при контроле точечных сварных соединений было предложено учитывать тот факт, что объект измерения находится под воздействием переменных циклических нагрузок, поэтому из выходных данных инфракрасного сенсора выбираются только данные о температурах, изменяющихся синхронно с сигналами нагрузки [29]. Они затем суммируются и усредняются для каждого цикла нагружения, что дает возможность значительно повысить точность и разрешающую способность при измерении температуры. Недостатком ИКТ является необходимость приложения переменных нагрузок к ОК.

Необходимо отметить, что тепловые методы могут быть использованы не только для контроля сварных соединений в процессе эксплуатации, но и для управления процессом сваривания [30].

**Радиационные методы контроля.** Радиационный контроль сварных соединений обычно проводят с помощью рентгеновского или гамма-излучения [31]. Этим способом выявляются трещины, раковины, скопление оксидов, поры и выплески. К сожалению, рентгеновское просвечивание для большинства металлов не позволяет установить наличие литой зоны сварных соединений, так как коэффициент ослабления рентгеновских лучей литого и основного металлов практически одинаковы. Поэтому на рентгеновском снимке граница литого ядра практически не выявляется, а видимый круг иной контрастности связан с вмятиной от электродов. Однако у некоторых металлов в результате сварки металл литой зоны неоднороден по химическому составу. Это приводит к неодинаковому ослаблению рентгеновских лучей различными участками литого ядра.

Можно искусственно вызвать химическую неоднородность металла зоны сварки, введя предварительно в нахлестку соединения рентгеноконтрастный материал-свидетель (РКМС), имеющий высокий коэффициент ослабления рентгеновских лучей [32]. При расплавлении металла в ядре РКМС перемещается на периферию. При просвечивании на рентгенограмме видно светлое кольцо, соответствующее диаметру литого ядра. Если литое ядро не образовалось, то РКМС равномерно распределен в нахлестке и светлого кольца нет.

Очевидными недостатками рентгеновских методов являются их повышенная опасность для дефектоскописта, значительная стоимость и габариты оборудования, трудность расшифровки полученных снимков. Однако в последнее время налажен выпуск переносных малогабаритных рентгеновских дефектоскопов (например, серия ERESKO MF4), которые соответствуют европейским требованиям безопасности и могут приме-

няться в условиях производства. При этом достигнут значительный прогресс в разработке методов расшифровки и классификации дефектов по радиографическим снимкам сварных соединений, что позволит автоматизировать процесс контроля. Так, в работе [33] приведено математическое описание изображений различных дефектов сварных соединений и разработан эвристический классификатор для определения типа дефекта. В работе [34] предложен алгоритм многомасштабного анализа рентгенографических снимков металлоконструкций, направленный на обнаружение дефектов и оценку качества сварных соединений. Алгоритм основан на использовании вейвлет-преобразования с выбором масштабирующих коэффициентов адаптивно к изменению геометрических характеристик визуальных образов дефектов.

**Акустические методы контроля.** На сегодня акустические методы приобрели наибольшее распространение в дефектоскопии сварных соединений, в том числе и КТС. Эффективность метода доказана большим количеством исследований и разработок, проведенных на разных заводах [35–38]. Американская металлургическая компания «Alcoa» и международная компания «ScanMaster-IRT» на протяжении нескольких лет проводили исследования качества КТС алюминиевых сплавов с помощью УЗ методов. Результаты НК (ультразвукового) и разрушающего (контроля на разрыв) совпали более чем в 90 % случаев [39].

При УЗ контроле, как правило, используется пьезоэлектрический преобразователь частотой 10...20 МГц с линией задержки для генерации серии эхо-сигналов, представляющих различные отражения звуковой волны внутри сварного соединения, которые далее интерпретируются для определения его качества [40]. При использовании обычных одноэлементных датчиков результат контроля отображается на экране дефектоскопа в виде А-скана, представляющего зависимость амплитуды принятых сигналов от времени (толщины). УЗ контроль позволяет определять раковины, трещины, поры и выплески, а также может эффективно использоваться для диагностики полного непровара. Для определения частичного непровара необходимо использовать специальные методики контроля и расшифровки УЗ дефектограмм. Недостатком большинства УЗ методов является невозможность отличить наличие литого ядра от слипания. В целом для УЗ контроля характерно то, что дефектоскопист должен принимать непосредственное участие в настройке контрольно-измерительных операций во время контроля, например, устанавливать стробы, задавать браковочные уровни и, вообще, наблюдать сам А-скан для обеспечения корректной работы системы. Поэтому перспективным направлением является развитие и внедрение в практику УЗ контроля



систем искусственного интеллекта, которые бы позволяли принимать решения по результатам контроля с минимальным вовлечением в этот процесс дефектоскописта. В последнее время для интерпретации УЗ осциллограмм и оценки качества КТС широко применяются искусственные нейронные сети, что позволяет уменьшить субъективную ошибку и повысить степень автоматизации контроля [41, 42].

Для контроля сварных точек в основном применяют эхо- и реверберационный методы [43]. Первый позволяет определять толщину литого ядра в направлении прозвучивания, второй — основан на анализе времени объемной реверберации (процесса постепенного затухания звука в некотором объеме ОК), что дает возможность определить микроструктуру материала и литого ядра. Литое ядро имеет крупнозернистую структуру, которая увеличивает затухание ультразвука, вследствие чего уменьшается количество убывающих донных импульсов. Измерение толщины литого ядра в направлении прозвучивания вызывает определенные трудности. Это связано с тем, что для некоторых материалов акустические характеристики литого ядра и основного металла практически идентичны, а значит, даже при образовании требуемой зоны взаимного расплавления, отражения УЗ волны от границы изделие-ядро (ядро-изделие) будут минимальны и трудно различимы на А-скане. Теоретическим и экспериментальным аспектам применения эхо-метода для контроля КТС посвящены работы [44, 45], в которых описаны схемы и приборы контроля, а также приведены УЗ дефектограммы образцов, выполненных точечной сваркой. Применение эхо-метода для контроля изменения диаметра литого ядра в зави-

симости от циклического нагружения сварного точечного соединения описано в работе [46].

В качественном сварном соединении расстояние между эхо-сигналами пропорционально общей толщине свариваемых деталей, а скорость распада (скорость, с которой происходит снижение амплитуды в последовательных эхо-сигналах) соотносится с затуханием внутри литого ядра [47]. Если в процессе сварки не образовалось литого ядра (т. е. имеет место полный непровар), то последующие эхо-сигналы гораздо ближе один к другому и имеют большую амплитуду [48]. В случае некачественного сварного соединения (например, диаметр литого ядра меньше номинального) часть звукового импульса будет отражаться от поверхности на глубине общей толщины деталей, а другая часть от поверхности на расстоянии толщины единичного материала. При этом на дисплее будут выводиться мелкие пики, представляющие отраженные сигналы на толщине одного материала, между большими более выраженными эхо-сигналами от свариваемых материалов (рис. 3). Если металлические части вплавлены, но не до конца из-за недостаточно высокой температуры, изменится скорость распада волны, что повлечет за собой отображение на дисплее эхо-сигналов больших размеров с несущественным изменением амплитуды последовательных эхо-сигналов.

В целом, контроль эхо-методом при контактном нормальном вводе колебаний в точечное сварное соединение весьма затруднителен. Во-первых, это обусловлено шероховатостью (или наличием выплесков) и криволинейностью поверхности (рис. 4, а), а также малыми размерами сварной точки, что обуславливает необходимость подбора размера датчика под диаметр сварной точки

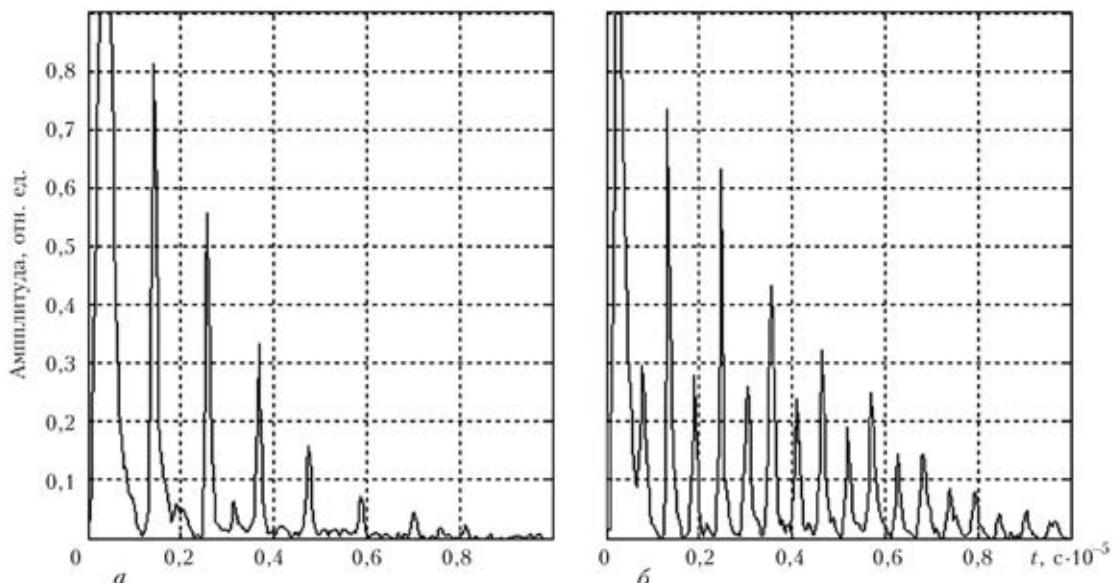


Рис. 3. А-скан УЗ сигнала при контроле сварной точки: а — хорошее сварное соединение; б — некачественное сварное соединение (диаметр литого ядра меньше номинального)

(рис. 4, б). Криволинейность, обусловленная вмятинами от электродов, затрудняет точную установку преобразователя больших размеров, чем сварная точка, и приводит к погрешности измерения толщины литого ядра (рис. 4, в). Для того, чтобы избежать влияния шероховатости на результат контроля используют иммерсионный способ ввода УЗ колебаний в ОК (рис. 4, з). Недостатком иммерсионного способа является необходимость создания сложной конструкции удержания жидкости в месте контроля, что особо трудно реализуемо в производственных условиях при контроле изделий сложной формы. Во-вторых, при малых толщинах контролируемых эхо-методом изделий приходится использовать специальные линии задержки (призмы) и повышать частоту вводимых УЗ колебаний, чтобы на результат контроля не влияла «мертвая зона» преобразователя (рис. 4, д). Мертвая зона — это зона нечувствительности преобразователя, работающего в эхо-импульсном режиме, которая состоит из длительности зондирующего импульса и реверберационных шумов:

$$h_{\text{мз}} = \frac{C}{2} (\tau_{\text{зи}} + \tau_{\text{ш}}), \quad (2)$$

где  $h_{\text{мз}}$  — глубина мертвой зоны;  $\tau_{\text{зи}}$  — длительность зондирующего импульса;  $\tau_{\text{ш}}$  — длительность реверберационных шумов;  $C$  — скорость УЗ колебаний в ОК.

Длительность зондирующего импульса уменьшают сильным демпфированием пьезопреобразователя. Однако при этом стоит учитывать, что снижается чувствительность контроля. Уменьшение реверберационных шумов обеспечивается частотными свойствами самого пьезоэлемента, а также качеством демпфирования, в частности, качеством приклеивания преобразователя к демпферу и протектору. По формуле (2) можно предварительно рассчитать глубину мертвой зоны для разных материалов ОК, частот преобразователя и общей длительности зондирующего импульса. Так, для алюминия со средней скоростью ультразвука  $C = 6300$  м/с при общей длительности зондирующего импульса 5 периодов колебаний ( $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{зи}} + \tau_{\text{ш}} = 5T = 5/f$ ) на частоте 5 МГц глубина мертвой зоны составит  $h_{\text{мз}} = 3,15$  мм, на частоте 20 МГц —  $h_{\text{мз}} = 0,79$  мм.

Важным фактором, который необходимо учитывать при разработке датчиков с линией задержки, является правильный выбор толщины последней. Это связано с тем, что

на границе «линия задержки–изделие» будет возникать отраженная волна. При небольших толщинах линии задержки и малом затухании эта волна будет много раз переотражаться по толщине линии задержки и регистрироваться преобразователем. Если эти сигналы будут перекрывать полезные сигналы от ОК, то правильная интерпретация результатов контроля будет невозможной. Избежать влияния линии задержки и глубины мертвой зоны можно, используя раздельно-совмещенный тип датчика. Однако такие датчики могут иметь сравнительно большие габариты, что усложняет их использование для контроля КТС. При использовании раздельно-совмещенных датчиков необходимо учитывать, что время задержки импульса в ОК непропорционально толщине [49].

Одной из современных систем УЗ контроля, в которой используется иммерсионный способ контроля сварных точечных соединений, является «Nugget Viewer». Это устройство оснащено миниатюрным УЗ преобразователем и позволяет визуализировать состояние металла как в сварных точках, так и на поверхности поперечного сечения в определенных местах [50]. Сканирующее устройство перемещает преобразователь, помещенный в иммерсионную ванну диаметром 12 мм. Минимальный шаг сканирования 0,2 мм. Система сбора данных обрабатывает полученную информацию и выводит ее на цветной экран. В приборе «Nugget Viewer» реализована функция расчета площади и диаметра ядра сварной точки по результатам измерения. Несмотря на положительные возможности системы, из-за использования иммерсион-

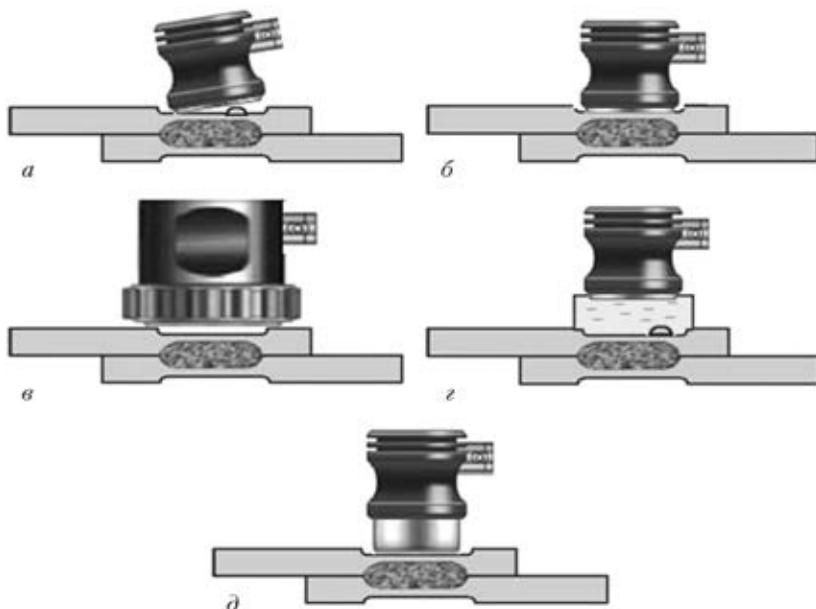


Рис. 4. Контроль КТС УЗ эхо-методом: а — влияние выплесков на установку преобразователя; б — подбор размера преобразователя под диаметр сварной точки; в — установка преобразователя, размер которого больше диаметра сварной точки (возникновение локальной иммерсионной ванны); з — иммерсионный способ контроля; д — установка преобразователя с линией задержки



ной ванны она имеет существенное ограничение при контроле в условиях производства.

В патенте США [51] предложена конструкция датчика для ввода УЗ колебаний в сварное точечное соединение через иммерсионную среду, находящуюся в специальной конической насадке (рис. 5). Используемый частотный диапазон излучаемых колебаний 5...25 МГц. Благодаря сканированию поверхности появляется возможность получать изображения в виде В- и С-сканов.

Конструкция датчика (рис. 5) содержит фокусирующий УЗ преобразователь 1 (в качестве которого может быть использован концентратор), который вводит колебания в коническую насадку 2, заполненную водой. Для удержания воды используется мембрана 3. Материал мембраны выбирается достаточно тонким и таким образом, чтобы он был как можно более акустически прозрачным при заданной частоте вводимых колебаний. Коническая насадка соединяется с круглым наконечником малого диаметра 4 (также заполненным водой), который является частью прижимной системы 5, служащей для обеспечения жесткого контакта датчика с поверхностью ОК, а также позволяющей удерживать датчик строго перпендикулярно поверхности. Благодаря тому, что

система 5 съемная, ее размер можно подбирать под диаметр контролируемого точечного соединения. Контактная жидкость в наконечник вводится через специальное отверстие 6, соединенное с системой подачи воды. На корпусе преобразователя (а именно на конической насадке 2) устанавливается датчик положения 7. В состав сканирующей системы входит тяговый зажим 8 и стержень 9. Данные с выхода УЗ преобразователя 1 и датчика положения 7 поступают на вход системы сбора информации 10. Очевидным преимуществом данного датчика является возможность фокусировки ультразвука, что позволяет улучшить разрешающую способность. К недостаткам стоит отнести очень сложную конструкцию.

Для контроля точечных сварных соединений можно использовать фокусирующие преобразователи на базе твердотельных концентраторов [52]. В отличие от фокусирующих преобразователей с иммерсионным вводом колебаний (см. рис. 5) они имеют более простую конструкцию (рис. 6). В таких преобразователях в качестве излучателя используются пьезопластины любого диаметра и толщины (поэтому возможно использование не только низких частот, но и частот мегагерцового диапазона), мертвая зона всегда будет находиться в теле концентратора, диаметр поверхности контакта «концентратор-изделие» составляет  $1,5\lambda \dots 2\lambda$ . При этом в точке контакта обеспечивается не геометрический, а фазовый фокус, что не удлиняет форму исходного импульса. Благодаря малой поверхности контакта уменьшается влияние шероховатости, к тому же снижается расход контактной жидкости. К недостаткам данных преобразователей можно отнести их низкую чувствительность.

Специально для контроля точечных сварных соединений (рис. 7, а) фирмой «Panametrics-NDT» разработаны преобразователи серии V23xx (рабочая частота 15 МГц) и V24xx (рабочая частота 20 МГц) различных диаметров (рис. 7, б). Преобразователи комплектуются съемными твердотельными или иммерсионными линиями задержек. Интерес представляют фокусирующие преобразо-

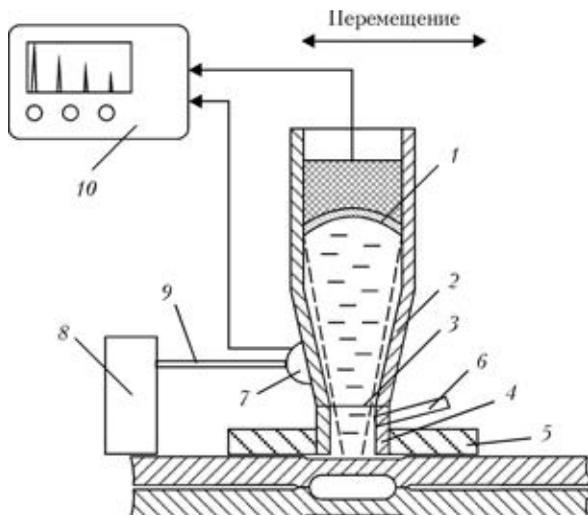


Рис. 5. Конструкция сканирующей системы с фокусирующим преобразователем (обозначения см. в тексте)

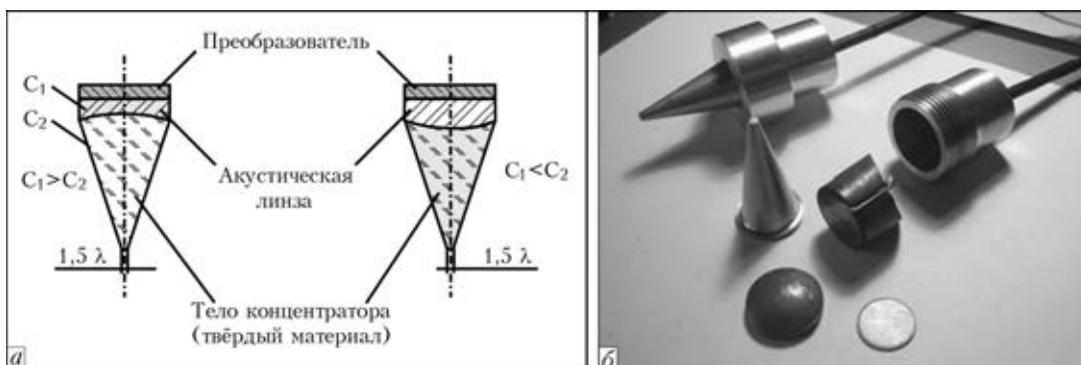


Рис. 6. Ультразвуковые фокусирующие концентраторы на базе рефрактора: а — конструкция преобразователя; б — экспериментальные образцы ( $C_1$ ,  $C_2$  — скорости ультразвука в линзе и теле концентратора соответственно)



Рис. 7. УЗ преобразователи фирмы «Panametrics-NDT»: а — процесс контроля КТС; б — датчики серии V23xx и V24xx; в — фокусирующий датчик серии V316B (V312B)

ватели серии V316B (рабочая частота 20 МГц) и V312B (рабочая частота 10 МГц) для ручного контроля с локальной иммерсионной ванной, которая оснащена сменным наконечником из нержавеющей стали (рис. 7, в). Преобразователи этого типа обеспечивают высокую разрешающую способность и удобны для контроля тонких материалов.

Контроль сварных точек осуществляется также зеркально-теневым методом [53]. Признаком отсутствия сварки является приход донного сигнала от первого листа к приемному искателю. Перемещая искатель по поверхности изделия, определяют размеры сварной точки.

Учитывая, что свариваемые КТС детали в основном имеют небольшие толщины, некоторыми авторами предложено использовать для контроля нормальные волны (волны Лэмба) [54]. Разработанная система включает наклонный излучатель (И) и приемник (П), которые размещаются по разные стороны сварного точечного соединения (рис. 8).

Излученная волна проходит через сварное соединение и попадает на приемник. Амплитуда принятого сигнала будет зависеть от наличия или отсутствия литого ядра. Таким образом, перемещая излучатель и приемник вдоль сварной точки и фиксируя амплитуду, можно определить диаметр литого ядра (рис. 9). Полученные результаты позволяют говорить о хорошей корреляции между измерениями амплитуды прошедшего сигнала и диаметра литого ядра. Недостатками предложенного метода является использование иммерсионного способа контроля и необходимость механического сканирования. Для устранения второго недостатка рекомендовано использовать как для излучения, так и для приема линейки пьезоэлементов. Алгоритм работы следующий: элементы излучателя возбуждают волны Лэмба в ОК пос-

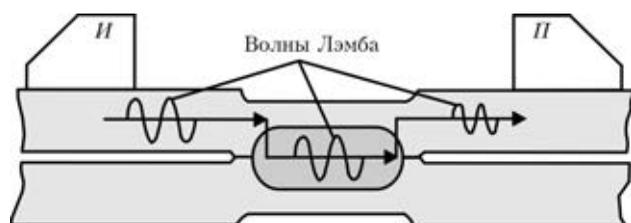


Рис. 8. Контроль КТС с использованием волн Лэмба (И — излучатель; П — приемник)

ледовательно, а фиксируются всеми элементами приемника одновременно. После обработки данные выводятся в виде матрицы, каждый элемент которой кодирован по яркости (отметим, что полученные результаты не являются классическим В-сканом).

Значительно расширить возможности УЗ контроля КТС позволяет технология фазированных решеток (ФР) [55, 56], преимуществом которых является замена механического сканирования сварного точечного соединения электронным, что позволяет увеличить производительность контроля. Также преимуществами ФР по сравнению с обычными преобразователями являются возможность фокусировки луча для повышения разрешающей способности и получение двумерного изображения внутренней структуры ОК. Поэтому использованию систем на базе ФР для контроля КТС необходимо уделять первостепенное внимание.

К общему недостатку УЗ методов с применением пьезопреобразователей часто относят то, что они требуют наличия акустического контакта, который оказывает существенное влияние на информативные сигналы. В целом надежность УЗ контроля зависит от правильной установки пьезопреобразователя на центр сварной точки, его ориентации относительно поверхности детали, качества контакта [57]. Это приводит к необходимости разработки специальных конструкций датчиков и схем прозвучивания, зависящих от характеристик ОК (геометрических и физико-механических) и типов дефектов, а также использованию контактной жидкости. Соответственно, перспективным

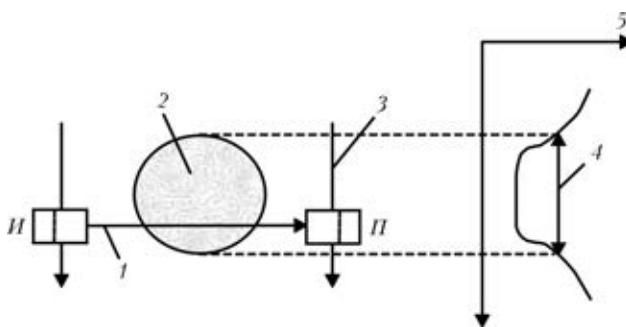


Рис. 9. Определение диаметра литого ядра: 1 — направление излучения; 2 — сварная точка; 3 — направление перемещения датчиков; 4 — ширина полосы ослабления (пропорциональна диаметру литого ядра); 5 — амплитуда



является использование бесконтактных методов излучения/приема УЗ колебаний применительно именно к контролю КТС, основанных на электромагнитоакустическом (ЭМА) преобразовании. Среди недостатков ЭМА способа УЗ контроля ранее отмечались недостаточная чувствительность и сложность практической реализации, однако благодаря использованию современной элементной базы и теоретико-экспериментальным наработкам в настоящее время эти недостатки практически полностью устранены. При применении некоторых способов УЗ контроля КТС излучение и прием колебаний осуществляются под определенным углом к поверхности изделия, тогда как традиционные ЭМА преобразователи позволяют возбуждать волны нормально к поверхности (конечно, если не учитывать возможность возбуждения рэлеевской волны). При излучении под углом используются специальные конструкции ЭМА датчиков и способы их возбуждения [58]. Хотя в этом направлении проведено немало исследований, однако эффективное применение в промышленных целях ЭМА датчиков для ввода волн под углом к поверхности оставляет желать лучшего [59].

УЗ методы находят широкое применение не только при осуществлении контроля сварных точечных соединений в процессе эксплуатации, но и при контроле самого процесса сварки. В этом случае УЗ датчики встраиваются в сварочный электрод [13, 60]. Немецкая компания «Vogt Ultrasonic GmbH» разработала УЗ систему SpotLine для контроля и управления работой машины КТС [61]. В качестве датчиков используются два УЗ преобразователя, которые устанавливаются в канале охлаждения возле рабочей части каждого сварочного электрода.

Особое место среди методов УЗ дефектоскопии занимает акустико-эмиссионный (АЭ) метод, применяемый для контроля и управления процессом КТС [62]. При сварке в материале соединяемых деталей возникают упругие колебания (акустическая эмиссия), которые обусловлены резкими изменениями его структуры, фазовыми превращениями и развитием дефектов [63]. Сигналы АЭ можно принимать на протяжении всего сварочного цикла, а также в процессе остывания сварного соединения. Анализ параметров АЭ сигналов позволяет оценить размеры литой зоны свариваемых деталей и следить за возникновением внутренних дефектов, а также диагностировать слипание (по отсутствию регистрации сигналов АЭ) [64, 65]. Однако метод АЭ имеет ряд недостатков (что затрудняет его широкое применение для контроля и управления процессом КТС), основным из которых является низкая помехоустойчивость, поскольку в процессе сварки сигналы АЭ регистрируются на фоне высокого уровня шумов сварочного оборудования.

**Другие методы НК.** К неразрушающему контролю относят испытания соединений тарированной нагрузкой [25]. В этом случае к сварному соединению прикладываются нагрузки, не превышающие допустимые.

Для контроля точечных сварных соединений предложено использовать метод электромеханического импеданса [66]. Данный метод подразумевает применение матрицы миниатюрных пьезопреобразователей, которые жестко крепятся к поверхности изделия в области сварного соединения. При переменной нагрузке, приложенной к изделию, снимаются данные с каждого датчика и проводится их анализ. Измеряемой величиной является электромеханический импеданс пьезопреобразователей.

**Выбор методов контроля.** Эффективность применения методов НК определяется большим количеством факторов, главные из которых — выявляемость (типы) дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость [67]. В целом понятие «эффективность» достаточно трудно формализуемо при сравнении разных методов контроля и включает не только перечисленные выше факторы. Например, эффективность применения того или иного метода НК зависит от геометрических параметров и физико-механических свойств ОК; степени развития способов обработки полезного сигнала (теоретической базы для используемого метода); уровня развития электроники и схемотехники (возможности использования высокоскоростных устройств приема/передачи и обработки данных); разработки новых методов и материалов для проведения контроля и т. п. Поэтому любое сравнение эффективности методов НК является достаточно субъективным, узконаправленным и применимым в течение ограниченного промежутка времени (например, до очередного скачка в развитии вычислительной техники или создания нового поколения преобразователей для того или иного метода). Например, в работе [68] приведены примерные оценки различных методов НК по выявляемости дефектов в изделиях из различных материалов различного назначения. Для сварных соединений оценки следующие: радиационный — 3, акустический — 5, вихретоковый — 3, магнитный — 3, капиллярный — 4, тепловой — 3, оптический — 0, радиоволновой — 0 (где 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 — удовлетворительно, 0 — неудовлетворительно). Конечно же, такая оценка является обобщенной, потому что неизвестно, по каким конкретно параметрам и какой методике проводилось сравнение. Хотя оптическому методу поставлена оценка «0», однако мы считаем, что тенденции развития этого метода для контроля сварных соединений (и, в частности, КТС) уже сейчас позволяют значительно повысить эту оценку.



Выбор метода НК контактной точечной сварки может быть обусловлен: 1) особенностями геометрических параметров и физико-механических характеристик ОК; 2) требованиями к качеству изделий, что регламентируется соответствующей документацией; 3) характером и видом наиболее вероятных и/или опасных дефектов; 4) производительностью метода контроля; 5) экономическими показателями.

Однако оптимальным решением является использование комплексного подхода к контролю качества КТС. Данный подход заключается в использовании ряда методов, в результате которых получают полную информацию о наличии дефектов, их виде, размерах, глубине залегания [69]. Естественно, что недостатком такого подхода являются значительные затраты времени на проведение всех контрольно-измерительных операций. Все же с развитием электроники (особенно высокоскоростных компонентов обработки, приема/передачи данных) этот недостаток вполне преодолим. Еще один фактор, позволяющий снизить время контроля, — автоматизация процесса измерения и анализа данных, при котором оператор лишь контролирует этот процесс (его вмешательство может быть обусловлено только возникновением нестандартной ситуации). В этом отношении ключевую роль в ближайшем будущем будут играть нейронные сети и разработка алгоритмов классификации дефектов.

Применительно к контролю КТС можно предложить следующий подход, в котором сочетаются такие методы контроля как поверхностных, так и внутренних дефектов: УЗ (с использованием либо ФР, либо ЭМА преобразователей), оптический и магнитотепловой (при условии его дальнейшего развития). Преимуществом оптического, магнитотеплового и УЗ (с использованием ЭМА датчиков) методов является их бесконтактность. Хотя при УЗ контроле с использованием ФР необходим контакт преобразователя и ОК, все же он не требует механического сканирования и позволяет получать двумерное изображение внутренней структуры сварного соединения. УЗ контроль успешно применяется для диагностики таких внутренних дефектов, как раковины, трещины, поры, а также непровар. Учитывая, что непровар является самым опасным дефектом и УЗ способом не всегда эффективно выявляется, для повышения достоверности его обнаружения используется магнитотепловой метод. Установкой оптического контроля в данном случае можно, с одной стороны, выявить поверхностные трещины, выплески, форму и размеры сварной точки; с другой — корректировать пространственное положение остальных узлов системы. Оптические методы можно использовать и для косвенного контроля непровара, который основан на регистрации отсутствия или уменьшения

зоны цветов побежалости, или отсутствия вмятины [70]. При таком подходе важно оптимизировать этапы контроля, например, проводя одновременный контроль разными методами, допускающими параллельное выполнение.

## Выводы

Показано, что НК сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, отличается разнообразием применяемых методов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Самым распространенным методом контроля на сегодня является ультразвуковой, что обусловлено большим количеством методик контроля, номенклатурой типов датчиков и их размеров, возможностью использовать различные типы волн и схемы прозвучивания, а также компактностью аппаратуры для проведения контроля. Перспективным является внедрение ЭМА технологий для контроля КТС.

Учитывая, что отдельные недостатки, присущие каждому из методов контроля, не позволяют надежно выявлять самый опасный дефект точечной сварки — непровар, показана перспективность использования одновременно нескольких бесконтактных методов, а также необходимость разработки оптимальных способов анализа результатов контроля для каждого отдельного метода.

1. *Кочергин К. А.* Контактная сварка. — Л.: Машиностроение, 1987. — 240 с.
2. *Чулошиников П. Л.* Контактная сварка. — М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.
3. *Климов А. С.* Контактная сварка. Вопросы управления и повышению стабильности качества. — М.: Физматлит, 2011. — 216 с.
4. *Сварка. Резка. Контроль.* Справ. В 2-х т. Т. 2 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов и др. // Под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М.: Машиностроение, 2004. — 480 с.
5. *Гуляев А. И.* Технология и оборудование контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1985. — 254 с.
6. *Connie R., Warren P.* Inspecting RSW electrodes and welds with laser-based imaging // *Welding J.* — 2007. — **86**, № 2. — P. 38–45.
7. *Development of an automatic weld surface appearance inspection system using machine vision / Lin Sanbao, Fu Xibin, Fan Chenglei, et al.* // *China weld.* — 2009. — № 3. — P. 74–80.
8. *Rethmeier M., Brauser S., Weber G.* Potential of optical strain field measurement for the characterization of the properties of resistance-spot-welded joints // *Welding and Cutting.* — 2011. — № 1. — P. 48–52.
9. *Francis D., Tatam R. P., Groves R. M.* Shearography technology and applications: a review // *Measurement Sci. and Technology.* — 2010. — **21**, № 10. — 29 p.
10. *Findeis D., Gryzagoridis J., Asur E.* Phase unwrapping applied to portable digital shearography [Электрон. ресурс] // CD-Proc.: IV Pan American conf. for Non Destructive Testing: 22–26 Oct. 2007, Buenos Aires, Argentina.
11. *Методика, технология и аппаратура широгографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец* // *Техн. диагностика и неразруш. контроль.* — 2004. — № 3. — С. 25–28.
12. *Оперативна діагностика зварних точкових з'єднань методом електронної широгографії з використанням механічного та термічного навантаження / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. Киянец та ін.* // *Неруйнівний конт-*



- роль та технічна діагностика: Мат. 7-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 20–23 лист. 2012. — Київ, 2012. — С. 378–382.
13. *Технология и оборудование контактной сварки: Уч. для машиностр. вузов* / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. // Под общ. ред. Б. Д. Орлова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
  14. *Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. II. Технология и оборудование. Справ. изд.* / Под ред. В. М. Ямпольского. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. — 574 с.
  15. *Дерун Е. Н. Вихретоковый контроль точечных сварных соединений.* — Старая Русса: СПК (филиал) НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2010. — 142 с.
  16. *Пат. 2029295 РФ, МПК6 G01N27/83. Способ магнитного контроля точечных сварных соединений* / С. Ф. Мельников, В. П. Березиенко, И. В. Королев, В. Л. Исков. — Заявл. 19.07.1992; опубл. 20.02.1995. — 3 с.
  17. *A magnetic sensor array for spot welding quality monitor* / Wang Rui, Luo Zhen, Shan Ping et al. // China Welding. — 2010. — 19, № 3. — P. 70–73.
  18. *A New Perspective on Magnetic Field Sensing* / M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith, R. Schneider // Sensors Magazine. — 1998. — 15, № 12. — P. 34–46.
  19. *Дубов А. А., Колокольников С. М. Проблемы контроля качества сварки и их решение на основе метода магнитной памяти металла* // Технологии машиностроения. — 2005. — № 4. — С. 43–47.
  20. *ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 1. Термины и определения.* — Взамен ГОСТ Р 52081-2003; Введ. 01.12.2010. — М.: Стандартиформ, 2010. — 7 с.
  21. *О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций* / М. Б. Аркулис, М. П. Барышников, Н. И. Мишневая, Ю. И. Савченко // Дефектоскопия. — 2009. — № 8. — С. 10–12.
  22. *Куликов В. П., Болотов С. В. Магнитно-тепловой метод контроля сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой* // Свароч. пр-во. — 2003. — № 9. — С. 16–20.
  23. *Магнитооптическая дефектоскопия изделий и соединений из ферромагнитных сталей* / Ю. С. Агалиди, С. В. Левый, В. А. Троицкий, Ю. Н. Посыпайко // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали 6-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 9–12 червня 2009. — Київ, 2009. — С. 63–66.
  24. *Пат. 2159426 РФ, МПК7 G01N27/82, G01N27/83. Способ магнитооптического контроля изделия* / С. В. Левый, Ю. С. Агалиди. — Заявл. 25.10.1999; опубл. 20.11.2000. — 7 с.
  25. *Банов М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: уч. для студ. учр. сред. проф. образования.* — 3-е изд., стер. — М.: Издат. центр «Академия», 2008. — 224 с.
  26. *Пат. Германии 102006057802.3, МПК8 G01N 25/72 (2006.01). Verfahren und Prufsystem zur zerstörungsfreien Prufung von Materialverbindungen, insbesondere von Widerstandsschweißverbindungen* / A. G. Daimler, Beyer Roland, Bohmisch Mathias et al. — Заявл. 06.12.06; опубл. 18.10.07. — 18 с.
  27. *Пат. Германии 102007050005.1, МПК8 G01N 25/72 (2006.01). Verfahren und Prufsystem zur zerstörungsfreien Prufung von Materialverbindungen, insbesondere von Widerstandsschweißverbindungen* / Daimler AG, Greiner Glau-dia. — Заявл. 17.10.07; опубл. 23.04.09. — 19 с.
  28. *Analysis of effective nugget size by infrared thermography in spot weldment* / J. H. Song, H. G. Noh, S. M. Akira et al. // International Journal of Automotive Technology. — 2004. — 5, № 1. — P. 55–59.
  29. *Сакагами Т. Измерение термоупругих напряжений с помощью инфракрасной термографии* // Ж-л япон. свароч. об-ва. — 2003. — 72, № 6. — С. 51–55.
  30. *Термосенсорная диагностика и управление качеством соединений при контактной сварке* / П. П. Архипов, А. Ф. Керемжанов, Н. Г. Ефименко и др. // Сварщик. — 2002. — № 5(27). — С. 50–51.
  31. *Зуев В. М., Табакман Р. Л., Удралов Ю. И. Радиографический контроль сварных соединений.* — СПб.: Энергоатомиздат, 2001. — 148 с.
  32. *Меньшиков Г. А. Опыт и перспективы использования методов контроля точечной контактной сварки при производстве изделий ответственного назначения* // Сварка и контроль-2004 / Матер. Всерос. с межд. участием науч.-техн. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Н. Г. Славянова: Теория сварки, 17–20 мая 2004. — Пермь, 2004. — С. 324–327.
  33. *Григорченко С. А., Капустин В. И. Классификация дефектов при автоматизированном радиографическом контроле сварных соединений* // Дефектоскопия. — 2009. — № 9. — С. 73–87.
  34. *Фомин А. А., Жизняков А. Л. Оценка качества сварных соединений по многомасштабному образу рентгенограмм* // Тяжелое машиностроение. — 2010. — № 6. — С. 19–23.
  35. *Fr. Stefan The evolution of weld inspection in the automotive industry* // Welding J. — 2009. — 88, № 8. — P. 52–53.
  36. *Гузунув А. А., Кривов А. В., Хайруллин Т. В. Эффективность применения УЗ контроля качества соединений контактной точечной сварки кузовов автомобилей в ОАО АВТОВАЗ* // Матер. Всерос. науч.-техн. конф.: Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства, 15–17 ноября 2006. — Тольятти, 2006. — С. 24–27.
  37. *Исследование и внедрение технологии УЗК качества точечной сварки кузовов автомобилей LADA в ОАО «АВТОВАЗ»* / А. В. Новиков, Р. П. Хакимьянов, В. В. Григорич, А. В. Семеренко // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 2(44). — С. 66–69.
  38. *Rivas S., Servent R., Belda J. Automated spot weld inspection in the automotive industry* [Электрон. ресурс]. — [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/html/automotive/408\\_rivas/408\\_rivas.htm](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/html/automotive/408_rivas/408_rivas.htm).
  39. *Donald J. Spinella, John R. Brockenbrough, Joseph M. Fridy Trends in Aluminum Resistance Spot Welding for the Auto Industry* // Welding J. — 2005. — 84, № 1. — P. 34–40.
  40. *Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль* / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
  41. *Martin O., Lopez M., Martin F. Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding* // J. of Materials Processing Technology. — 2007. — 183, № 2-3. — P. 226–233.
  42. *Пат. США 7516022B2; МПК8 G06F 17/40, G06F 19/00, G01B 17/00, G01B 21/32. Method and system for assessing quality of spot welds.* / Lee Hsu-Tung, Maev Roman Gr., Maeva Elena Yu, Titov Serguei. — Заявл. 29.09.06; опубл. 07.04.09. — 27 с.
  43. *Бигус Г. А., Травкин А. А. Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой* // Матер. 17-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», 5–9 окт. 2009. — Ялта, 2009. — С. 122–124.
  44. *Семеренко А. В. Ультразвуковой контроль качества точечной сварки* // В мире неразруш. контроля. — 2003. — № 2(20). — С. 43–44.
  45. *Бобовников И. Н., Семеренко А. В. Опыт применения УЗ методов оценки качества точечной сварки (на примере «Машиностроительного завода» г. Электросталь)* // Там же. — 2004. — № 2 (24). — С. 52–54.
  46. *Vural M., Akkus A. The ultrasonic testing of the spot welded different steel sheets* // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2006. — 18, № 1-2. — P. 247–250.
  47. *Doymun A. B., Sonat M. Ultrasonic Examination of Resistance Spot Welds* [Электрон. ресурс]. — <http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/p01/p01.htm>.
  48. *Werner Roye. Ultrasonic Testing of Spot Welds in the Automotive Industry* [Электрон. ресурс]. — [http://www.spot-weldtesting.com/schweisspunktpruefung.de/english/sd\\_298\\_en.pdf](http://www.spot-weldtesting.com/schweisspunktpruefung.de/english/sd_298_en.pdf).
  49. *Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основы УЗ неруйнівного контролю: Підруч.* — Київ: НТУУ «КПІ», 2010. — 448 с.



50. *Ториуми Н., Хиросэ Н.* Оборудование для дефектоскопии точечных швов «Nugget Viewer» // Технологии сварки (Welding Technology). — 2010. — № 10. — С. 51–54.
51. *Пат. США US2005/0132809A1*, МПК7 G01N 9/24. Methods for ultrasonic inspection of spot and seam resistance welds in metallic sheets and a spot weld examination probe system (SWEPS) / Marvin F. Fleming, Jack P. Clark. — Заявл. 12.01.2005; опубл. 23.01.2005. — 19 с.
52. *Пат. 47248 України*, МПК (2009) B06B 3/00. Ультразвуковой концентратор / Р. М. Галаган, В. К. Цапенко, А. Г. Протасов, О. С. Василенко; № u2009 07366; заявл. 13.07.2009; опубл. 25.01.2010.
53. *Сварка в машиностроении*: Справ. В 4-х т. Т. 4 / Под ред. Ю. Н. Зорина. — М.: Машиностроение, 1979. — 512 с.
54. *Takada Hajime, Hirose Tomoyuki.* An ultrasonic method for testing spot-welds // JFE Technical Report. — 2007. — № 10. — Р. 26–30.
55. *Пат. США 7021143 B2*, МПК8 G01N 29/26. Cylindrically-rotating ultrasonic phased array inspection method for resistance spot welds / Cameron J. Dasch. — Заявл. 11.12.2003; опубл. 04.04.2006. — 11 с.
56. *Семеренко А. В., Пенелаяв А. В.* Использование фазированных решеток для УЗ контроля точечной сварки // Сварка и диагностика. — 2009. — № 6. — С. 49–53.
57. *Бобров С. В.* Методы и технология неразрушающего контроля качества точечной сварки // МEGATECH: Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. — 2012. — № 3. — С. 56–67.
58. *Малинка А. В.* Изучение и прием УЗ колебаний под заданным углом при электромагнитно-акустическом методе // Дефектоскопия. — 1970. — № 5. — С. 16–20.
59. *Сучков Г. М.* Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Там же. — 2005. — № 12. — С. 24–39.
60. *Пат. США № 4449029*, МПК8 B23K 11/24. Acoustic wave spot welder adaptive control / Herman A. Nied. — Заявл. 09.05.1983; опубл. 15.05.1984 — 7 с.
61. *Vogt G.* Inline-process and quality control of spotwelds of car bodies — Ultrasonic sensors integrated in resistance welding electrodes // 17th World conf. on nondestructive testing: conf. proc., 25–28 Oct. 2008. — Shanghai, China, 2008. — P. 1–6.
62. *Пат. 3824377 США*: МПК7 H 03k 21/34. Acoustic emission spot welding controller / Kenneth R. Notvest. — Заявл. 10.05.72; опубл. 16.07.74 — 9 с.
63. *ASTM E751-07.* Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Resistance Spot—Welding [Электрон. ресурс] // Annual Book of ASTM Standards. — <http://www.astm.org/Standards/E751.htm>.
64. *Kek T., Polajnar I., Grum J.* Analysis of AE during resistance spot welding // The 10th Intern. conf. of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering», Sept. 1–3, 2009. — Ljubljana, Slovenia, 2009. — P. 243–250.
65. *Chaos analysis of acoustic emission signals in spot welding process* / Luo Zhen, Wang Rui, Shan Ping, Dong An // China Welding. — 2009. — 18, № 1. — P. 73–78.
66. *Adaptive health monitoring concepts for spot—welded and weld—bonded structural joints* / V. Giurgiutiu, Craig A. Rogers, Yuh Jin Chao et al. // ASME Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 16–21, 1997. — Dallas, TX, 1997. — P. 1–6.
67. *Алешин Н. П., Щербинский В. Г.* Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий: Учеб. для ПТУ. — М.: Высш. шк., 1991. — 271 с.
68. *Каневский И. Н., Сальникова Е. Н.* Неразрушающие методы контроля: Уч. пос. — Владивосток: Изд-во ДВБГУ, 2007. — 243 с.
69. *Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В.* Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.
70. *Сварка и резка в промышленном строительстве*. В 2 т. Т. 2 / Б. Д. Малышев, Е. К. Алексеев, А. Н. Блинов и др. / Под ред. Б. Д. Малышева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1989. — 400 с.

This paper presents an overview of modern methods and tools for non-destructive testing of resistance spot welding: liquid-penetrant, optical, eddy current, magnetic, electrical, thermal, radiation and acoustic. We briefly discuss the advantages and disadvantages of the each method and ways of their development. Special attention is paid to analysis capabilities of ultrasonic method with different control techniques, sounding schemes and types of converters. It is shown that still an important issue is to increase the reliability of control of the unsafe defect of resistance spot welding — lack of fusion. Although these goals may use the majority of methods described in the article, but the existing limitations in each method does not allow us to guarantee reliable detection of this defect. So perspective is the use of multiple simultaneous non-contact methods for control of lack of fusion and development of the best ways to analyze the data for each method. Possible disadvantage of this approach is to increase the control time, but it can be minimized by developing the right strategy of the entire complex of measurement. Accordingly, recommendations for choice of methods for control of resistance spot welding and proposed an approach to creation of the automated control system using several methods simultaneously.

*Key words*: nondestructive testing, resistance spot welding, ultrasound, reliability

Поступила в редакцию  
20.09.2012



33-я Международная ежегодная конференция и блиц-выставка  
«КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»  
(СЛАВПОЛИКОМ)

27 – 31 мая 2013 г., санаторный комплекс «Ай–Даниль»,  
Крым, Гурзуф, Даниловка

Приглашаются специалисты авиационной, ракетно-космической, металлургической, горнодобывающей, химической, газовой, нефте- и горноперерабатывающей промышленности, строительного, транспортного, инструментального и другого машиностроения, строительных, научно-исследовательских, проектных, конструкторских организаций.

УИЦ «НАУКА.ТЕХНИКА.ТЕХНОЛОГИЯ»

Тел./ факс: (+38 044) 573 - 30 - 40

моб. тел.: (+38 067) 708 - 93 - 95

E-mail: [office@conference.kiev.ua](mailto:office@conference.kiev.ua),

[www.conference.kiev.ua](http://www.conference.kiev.ua)