



МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

И. О. СКАЧКОВ, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Рассмотрена возможность создания однофакторной системы мониторинга качества сварных точек с использованием механизма вейвлет-преобразований. Показано, что близкие по прочности сварные точки имеют близкие формы детализирующих компонент вейвлет. Осуществление мониторинга технологического процесса сварки требует одновременного анализа всех детализирующих компонент вейвлет-разложения.

A possibility of creation of a single-factor system of monitoring the quality of weld nuggets using the mechanism of wavelet-transformations is considered. It is shown that weld nuggets of similar strength have similar forms of detalizing wavelet components. Monitoring of technological process of welding requires simultaneous analysis of all the detalizing components of wavelet decomposition.

Стремление предприятий к достижению конкурентных преимуществ и повышению экономической эффективности стало мощным стимулом для совершенствования бизнес-технологий [1]. Вместе с тем процессы глобализации промышленного производства способствуют дальнейшей унификации и стандартизации методов управления всеми процессами предприятия. На сегодня наличие у компании понятного как потребителям, так и партнерам системы управления предприятием является необходимым условием обеспечения высокой конкурентоспособности продукции. Такие стандартизированные подходы к управлению предприятием получили обобщенное название системы менеджмента качества (СМК). По сути, СМК представляет собой совокупность методик выявления проблем и постановки задач, которые необходимо решать на различных этапах производства и методов (инструментов) их решения. Широкое распространение на сегодня как в мире, так и в Украине получили СМК, построенные в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 9001:2008 «Quality management systems. Requirement».

Для процесса производства стандарт ISO 9001:2008 предъявляет определенные требования к организации деятельности предприятия. Особые требования СМК выдвигает к производственным процессам, недостатки которых могут быть наверняка выявлены только в процессе эксплуатации продукции. Это означает, что результаты деятельности не могут быть должным образом проверены на соответствие требованиям измерением параметров технологического процесса, т. е. качество продукции подтверждается только в процессе ее эксплуатации. К таким технологическим процессам принято относить сварку.

В соответствии с требованиями ISO 9001:2008 в этом случае предприятию необходимо предос-

тавить объективные доказательства того, что технологический процесс производства в сочетании с организационными мероприятиями способны обеспечить требования к эксплуатационным свойствам сварной конструкции. Такими доказательствами являются статистически обоснованные планы выборочного контроля сварных соединений по адекватным относительно выбранных групп дефектов методиками. Предприятие должно иметь процедуру утверждения технологических процессов сварки, выбора и технического обслуживания оборудования. Отдельной процедурой устанавливаются правила аттестации сварщиков. Таким образом, предприятием обеспечивается стабильность условий производства. В некоторых случаях предприятию необходимо предоставить потребителю доказательства того, что производство осуществляется в стабильных условиях и нарушений технологического процесса не было.

Наиболее широко применяемым при производстве сварных конструкций методом подтверждения качества соединений является выборочный разрушающий и неразрушающий контроль. Очевидно, что выборочный контроль может дать только вероятностную оценку качества тех изделий, которые идут в эксплуатацию.

Основной показатель качества сварного соединения при контактной точечной сварке — прочность точки — может значительно снизиться, если на сварочную машину и зону сварки будут действовать возмущения. При относительно малом значении отдельных возмущений одновременное действие на объект в случае их неблагоприятного сочетания также может вызвать значительную вариабельность прочностных характеристик сварной точки [2]. Этим можно объяснить периодическое появление дефектных соединений даже при строгом соблюдении технологии сварки. Как следствие, для повышения надежности и прочности конструкции количество точек на кузове ав-



томобили устанавливается примерно на 30% больше, чем было бы необходимо при их гарантированном качестве [3].

Подтверждение соответствия хода технологического процесса заданным параметрам осуществляют, как правило, путем мониторинга параметров режима [4, 5] или состояния оборудования. Однако такой подход позволяет контролировать только стабильность затраченной энергии (или удельной энергии) при образовании называемого соединения и имеет существенные недостатки. Во-первых, поскольку каждый из параметров режима задается с определенными допусками, то возможно такое неблагоприятное сочетание параметров режима в пределах допусков, при котором вероятно возникновение дефекта. Во-вторых, контроль соответствия энергетических и кинематических параметров режима заданным значениям не позволяет определить особенности хода процесса образования соединения, который может быть нарушен технологическими возмущениями. Известные системы мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки, основанные на оценке энергетических параметров режима, требуют измерения как сварочного тока, так и напряжения, что существенно усложняет систему измерений.

Постановка задачи. Целью работы является определение соответствия технологического процесса контактной точечной сварки переменным током низкоуглеродистых сталей заданным требованиям. Такой технологический процесс в простейшем случае состоит из четырех этапов: сжатие, нагрев, проковка, пауза. Параметрами режима при этом есть сварочный ток, время нагрева, усилие сжатия электродов, размеры рабочей поверхности электродов.

Практически все параметры режима, кроме временных интервалов, могут меняться во время технологического процесса изготовления изделия. Течение процесса сварки нарушается как из-за нестабильности напряжения питающей сети, так и из-за изменения импеданса сварочного контура машины и изменения плотности сварочного тока, протекающего через свариваемую точку. Изменение импеданса обусловлено как внесением в контур ферромагнитных масс в процессе сварки конструкции, так и нестабильностью усилия сжатия электродов, геометрических размеров рабочей поверхности электродов из-за износа, толщины и качества подготовки поверхностей свариваемых деталей. В некоторых случаях возможно также нарушение условий формирования сварной точки из-за шунтирования сварочного тока ранее сваренными точками.

Мониторинг процесса по параметрам режима, поддающихся измерению, имеет ограниченные возможности прогнозирования качества сварного

соединения, поскольку не позволяет выявить наличие таких опасных возмущений, как шунтирование сварочного тока раньше сварными точками и изменение геометрии электродов.

Методика мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки. Установка контактной точечной сварки переменным током представляет собой нелинейный трансформатор с повышенным магнитным рассеянием, который нагружен на индуктивно-активное сопротивление и питается от сети переменного тока через тиристорный контактор. Существенная индуктивность сварочного трансформатора приводит к тому, что угол открытия тиристорных контакторов превышает 90 электрических градусов и форма импульсов сварочного тока далека от синусоидальной.

Учитывая, что практически все возмущения (кроме изменения напряжения питающей сети) приводят к изменению сопротивления во вторичном контуре сварочной машины, возникает возможность оценить уровень возмущений по изменению формы импульса сварочного тока.

Влияние изменения активного сопротивления на форму импульса сварочного тока осуществляли с помощью компьютерной модели, построенной в среде Simulink пакета Matlab (рис. 1).

Сварочный трансформатор T моделировался как трансформатор с повышенным магнитным рассеянием с параметрами, полученными путем расчета реальной контактной машины. Первичная обмотка рассчитана на питание от сети АС 50 Гц напряжением 380 В. Модель легко позволяет учитывать переменный коэффициент трансформации. В модель входит также вторичный контур трансформатора, представленный резистором $R_k = 140$ мкОм и индуктивностью $L_k = 0,5$ мкГн.

Тиристорный контактор $VS1 - VS2$ управляется фазовращателем FC , который формирует отпирающие импульсы со сдвигом по фазе на α электрических градусов относительно напряжения сети. Сигнал напряжения сети поступает на FC с измерительного блока U_s . Изменение тока осуществляется блоком I .

Сварная точка моделируется активным резистором R . В модели принято предположение о неизменности сопротивления точки на протяжении цикла сварки. Для оценки влияния возмущений параметры модели меняли в пределах 10 % номинальных. Таким образом, активное сопротивление сварной точки составляло 115 и 126,5 мкОм [6], индуктивность контура машины в пределах 0,50 и 0,55 мкГн, напряжение сети питания 380 и 342 В. Угол открытия тиристорного контактора 90 эл. градусов.

При моделировании фиксировалось мгновенное значение тока во вторичном контуре. Оценка действующего значения тока осуществлялась бло-

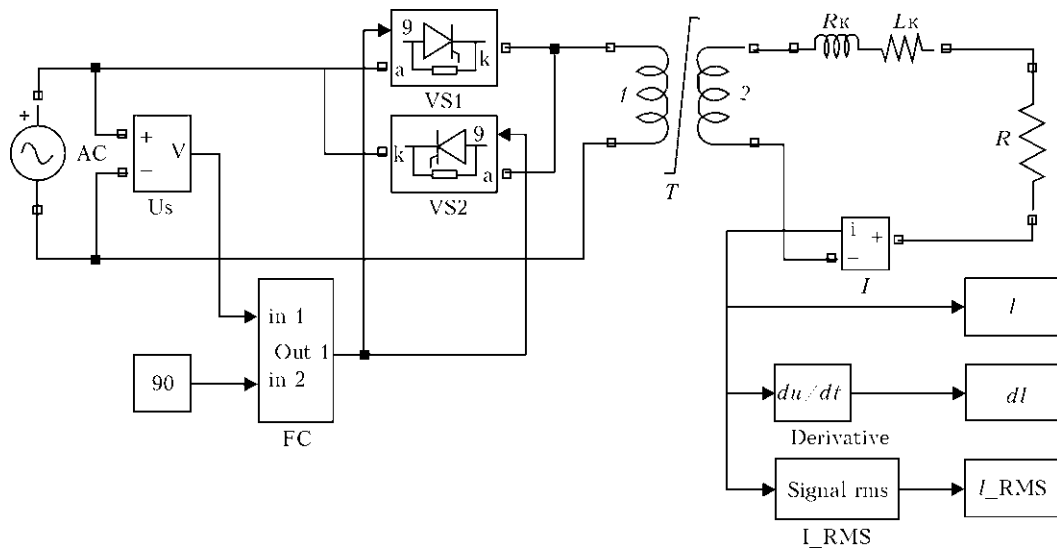


Рис. 1. Компьютерная модель процесса контактной точечной сварки

ком RMS модели. Поскольку наиболее применяемым методом измерения сварочного тока при контактной точечной сварке является пояс Роговского, то дополнительно фиксировалась также первая производная от тока контура посредством стандартного блока дифференцирования Simulink du/dt . Полученные данные передавались в рабочую область Matlab как переменные I, dI, I_RMS .

Изменение амплитудного значения напряжения питающей сети, индуктивности контура или активного сопротивления участка электрод-электрод приводит к изменению длительности и формы импульса тока (рис. 2, а). Заметное изменение формы импульса сварочного тока показано также

на графиках первой производной тока по времени (рис. 2, б).

Расчетное действующее значение сварочного тока при этом составляло 5991 А для номинального режима, 5814 А для возмущения с сопротивлением электрод-электрод, 5817 А для возмущения по индуктивности контура, 5391 А для возмущения по напряжению сети. Таким образом, уменьшение тока составляло от 3 до 10 %.

Оценку формы импульса сварочного тока проводили с применением дискретного вейвлет-анализа, что позволяет рассматривать сигнал как функцию от времени в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте [7]. Анализ про-

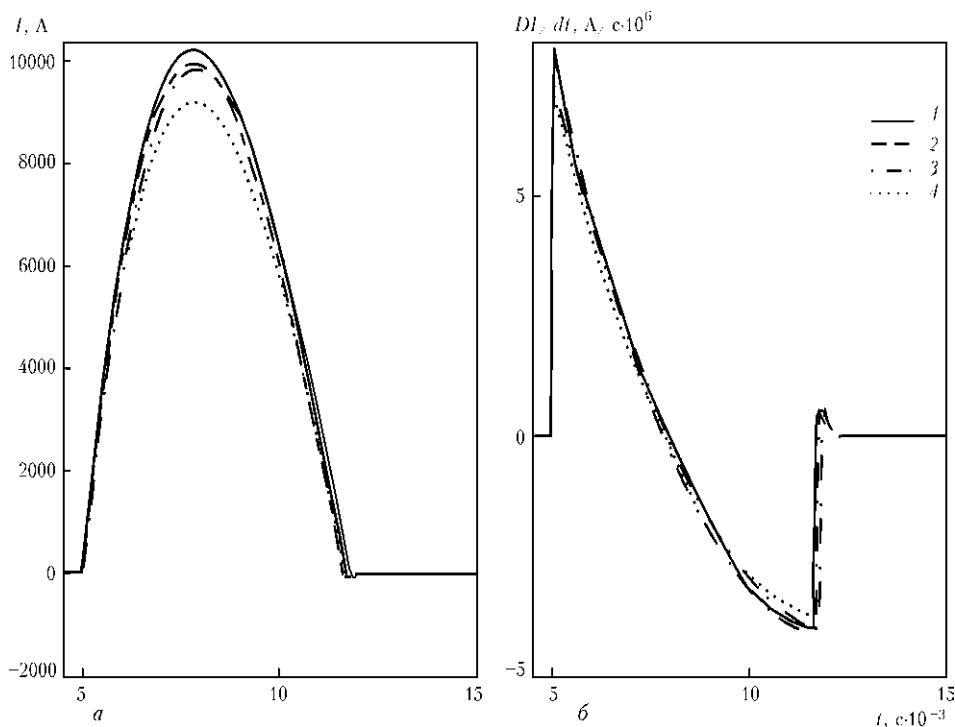


Рис. 2. Форма импульса тока (а) и его первой производной (б): 1 — номинальный режим; 2 — увеличенное сопротивление электрод-электрод; 3 — увеличенная индуктивность контура; 4 — уменьшенное напряжение сети

водили с применением вейвлетов Добеши [8] с помощью пакета расширения Wavelet Toolbox системы Matlab. Выявление различий между формами кривых тока при действии возмущений на технологический процесс осуществляли сравнением составляющих сигнала определенного уровня, восстановленных по детализирующим коэффициентам вейвлет-разложения.

Для сравнения различия между компонентами сравниваемых сигналов, введем обобщенный показатель нормы

$$P = \sqrt{\sum (x_i - x_{ni})^2},$$

где x_i — значение координат вектора компоненты вейвлет-разложения заданного уровня исследуемого сигнала; x_{ni} — соответствующее значение компоненты вейвлет-разложения заданного уровня сигнала, соответствующего номинальному режиму.

Отличие детализирующих компонент по уровням вейвлет-преобразования существенно зависит от вида возмущений (рис. 3) и для первой производной сварочного тока является значительной.

Наиболее существенные различия наблюдаются для компонент вейвлет-преобразований, соответствующих высокочастотным составляющим сигнала. Анализ также показывает, что различия локализованы в основном в зоне затухания импульса (рис. 4).

Экспериментальная проверка методики мониторинга. Проверку метода мониторинга проводили при сварке образцов из низкоуглеродистой стали на машине МТ-1215. Ток сварки фиксировали с помощью пояса Роговского. Образцы сваривали при одинаковых настройках машины. Аналого-цифровое преобразование полученного сигнала осуществляли АЦП Е-140 фирмы «Lcard» с частотой 100 кГц. Обработку данных проводили в среде системы Matlab.

Качество сварных точек проверяли механическими испытаниями на срез в соответствии с ГОСТ 6996–66. Прочность сварных точек находилась в пределах 3200...6390 Н. Причинами разброса значений предположительно является подготовка свариваемых поверхностей.

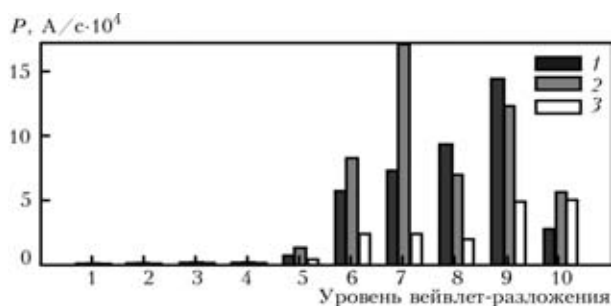


Рис. 3. Показатель нормы для возмущений: 1 — увеличенное сопротивление электрод–электрод; 2 — увеличенная индуктивность контура; 3 — уменьшенное напряжение сети

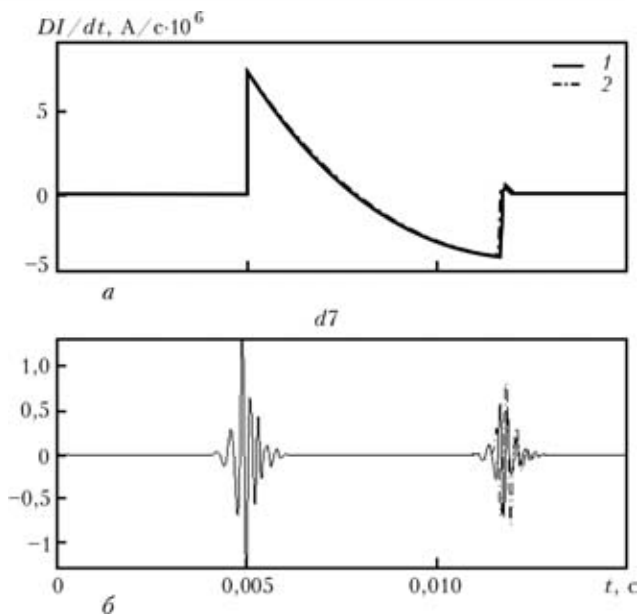


Рис. 4. Первая производная сварочного тока (а) и детализирующей компоненты 7 (б) уровня вейвлет-разложения номинального режима (1) и для возмущений по активному сопротивлению электрод–электрод (2)

Оценку нормы проводили относительно образца, имеющего наивысшую прочность на срез. Близкие по прочности образцы имели близкие значения нормы для детализирующих компонент вейвлет-разложения с малыми номерами, т. е. соответствующими низкочастотной составляющей сигнала (рис. 5). Следует отметить, что для осуществления мониторинга технологического процесса сварки необходимо осуществлять одновременный анализ всех детализирующих компонент вейвлет-разложения.

Выводы

Мониторинг технологического процесса контактной точечной сварки можно осуществлять по форме сигнала, пропорционального первой производной сварочного тока. Имеющиеся в процессе сварки возмущения влияют на форму сигнала.

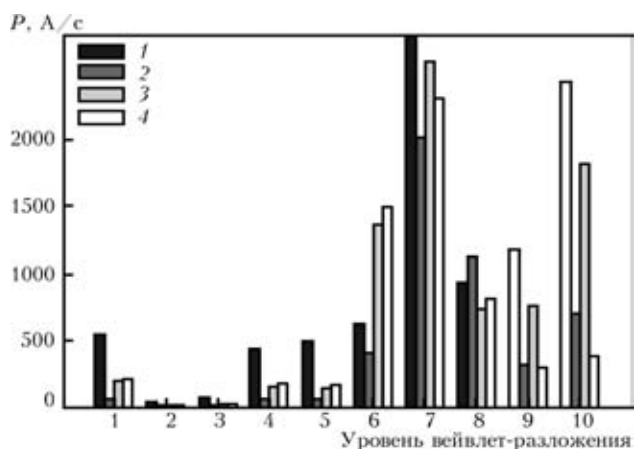


Рис. 5. Показатели нормы для сварных точек: 1 — 3200 Н; 2 — 4837; 3 — 4620; 4 — 4569



Анализ формы сигнала с целью установления соответствия условий сварки и качества соединения требованиям целесообразно осуществлять с помощью дискретного вейвлет-анализа с использованием вейвлетов Добеши.

Дальнейшее развитие метода мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки необходимо проводить в направлении идентификации возмущений.

1. *Портер М.* Конкуренция. — СПб: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 495 с.
2. *Дорофеев А. Н.* Расчет прочности сварных точечных соединений. — М.: Машиностроение, 1964. — 139 с.
3. *Оценка качества контактной точечной сварки с помощью нейронных сетей / Б. Е. Патон, Н. В. Подола,*

- В. С. Гавриш, В. В. Лукович // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 3–10.
4. *Cho Y., Rhee S.* Primary circuit dynamic resistance monitoring and its application to the quality estimation during resistance spot welding // *Welding J.* — 2002. — **81**, № 6. — P. 104–111.
 5. *Monitoring of spot welding by measurement of voltage between electrode tips / S. Nakata, M. Nishikawa, Y. Kurozumi, H. Okuno.* // *Transactions of Japan welding society.* — 1979. — **10**, № 1.
 6. *Пахаренко В. А.* Зварювання тиском. — Киев: Екотехнологія, 2011. — 272 с.
 7. *Дремін І. Е., Іванов О. В., Нечитайло В. А.* Вейвлеты и их использование // *Успехи физ. наук.* — 2001. — **171**, № 5. — С. 465–501.
 8. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. — М.: РХД, 2001.—210 с.

Поступила в редакцию
03.04.2012

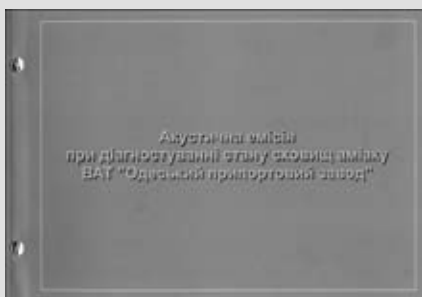
НОВЫЕ КНИГИ

Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко
Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение. — Киев.: Изд-во «ИНДПРОМ», 2012. - 312 с.

Альбом наглядно описывает акустические явления в материалах, связанные с дискретным характером их разрушения при приложении нагрузки различных видов. Дискретный характер разрушения приводит к появлению импульсов упругих волн (квантов излучения), распространяющихся в материале от места разрушения и строго соответствующих характеру и виду разрушения или изменениям его структуры. Это явление получило название акустической эмиссии (АЭ). Показаны основные факторы, снижающие предельные усилия, при которых появляется АЭ. В альбоме также показано практическое применение АЭ при оценке состояния материалов конструкций, приведены разработанные на основе АЭ технологии контроля, необходимое оборудование и приборы. Показано, что в процессе непрерывного мониторинга контроль конструкций с оценкой их остаточного ресурса может осуществляться как на месте, так и дистанционно.

Альбом предназначен для специалистов, занимающихся технической диагностикой конструкций или проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации, преподавателей соответствующих специальностей при чтении лекций и проведении практических занятий, а также студентов и аспирантов, изучающих явление акустической эмиссии и применяющих эти знания при практическом контроле работоспособности конструкций.

Альбом представляет интерес для широкого круга инженеров и научных работников технических специальностей.



Акустична емісія при діагностуванні стану сховищ аміаку ВАТ «Одеський припортовий завод» / Під ред. проф. А.Я. Недосеки. К. Вид-во «ИНДПРОМ», 2012.— 96 с.

Альбом може бути корисним для широкого загалу інженерів та наукових співробітників технічних спеціальностей, а також студентів та аспірантів, що вивчають явища акустичної емісії.