



## ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

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

Разработана методика мониторинга процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением. Установлено, что применение нейронных сетей для оценки стабильности процесса сварки является принципиально возможным.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, непрерывное оплавление, стабильность процесса, дефекты соединений, отклонения параметров процесса, мониторинг качества, нейронные сети

При контактной стыковой сварке давлением разрушающий контроль качества сварных соединений не всегда позволяет достоверно выявлять дефекты. Учитывая, что свойства соединений напрямую зависят от параметров режима сварки, стабильность последних часто определяют по наличию отклонений их от задаваемых значений.

Обычно при сварке непрерывным оплавлением удовлетворительное качество соединений достигается при обеспечении оптимальных распределений температуры в приконтактной зоне на всей площади поперечного сечения перед осадкой, а также величины и скорости осадки. Поскольку в ряде случаев прямые измерения указанных характеристик весьма затруднены или невозможны, измеряют другие параметры, влияющие на нагрев деталей: сварочное напряжение, скорость подачи деталей и пр. Стабильные значения указанных показателей обеспечивают оптимальный нагрев деталей и, как следствие, качество стыков. При этом допустимыми считаются отклонения напряжения холостого хода не более чем на 10 % заданного значения, для скорости подачи детали — до 20 %, отклонения значения вылетов деталей не должны превышать 5 % [1]. Такой подход позволяет фиксировать отклонения каждого из указанных параметров отдельно, но не дает представления об их суммарном влиянии на стабильность процесса.

Информацию, необходимую для оценки качества сварного соединения, можно получить по результатам анализа основных физических параметров процесса сварки, в частности, электрических [1–3]. При контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением процесс образования жидких перемычек, их нагрев, разрушение и образование новых может быть описан вероятностными методами. Его ход определяется мгновенными значениями параметров режима (как электрических, так и механических), а также случайными воз-

мущениями разного рода, в том числе и технологическими, связанными с подготовкой деталей под сварку и их установкой в зажимах машины. Влияние возмущений на протекание процесса наиболее часто характеризуется отклонением основных параметров режима от заданных значений, т. е. изменение напряжения в процессе оплавления носит вероятностный характер, а само вторичное напряжение является одним из наиболее чувствительных к возмущениям параметром режима сварки.

Поскольку предпосылки, определяющие снижение показателей качества соединений, могут возникать на всех стадиях процесса сварки, одним из вариантов оценки качества может быть анализ осциллограмм напряжения и их разделение на группы, соответствующие отклонениям основных параметров. Таким образом, задача мониторинга качества сводится к задаче классификации.

Разработана методика мониторинга процесса сварки непрерывным оплавлением для выявления отклонений сварочного напряжения в реальном времени. Эксперименты по контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением стержневой арматуры класса А400С диаметром 14 мм проводили на машине МСО-606 с жестким электромеханическим приводом оплавления без обратных связей. Регистрацию напряжения во вторичном контуре машины выполняли с помощью аналого-цифрового преобразователя Е-140 (L-Card, Россия).

Оценивали оптимальный режим и три случая отклонения параметров процесса, снижающих качественные характеристики стыка, которые наиболее часто возникают при сварке: снижение скорости подачи детали  $v$ ; снижение напряжения холостого хода машины  $U_{x,x}$ ; изменение установочной длины деталей  $l$ .

Отклонения параметров процесса создавали путем введения возмущений, больших допустимых из условий обеспечения качества. В результате экспериментов получены соединения (рис. 1), которые отличаются зоной нагрева и наличием в стыке дефектов, в частности, несплошностей. Из осциллограмм напряжения сварки на различных режимах (рис. 2) видно, что достаточно информативным сигналом, отображающим ход

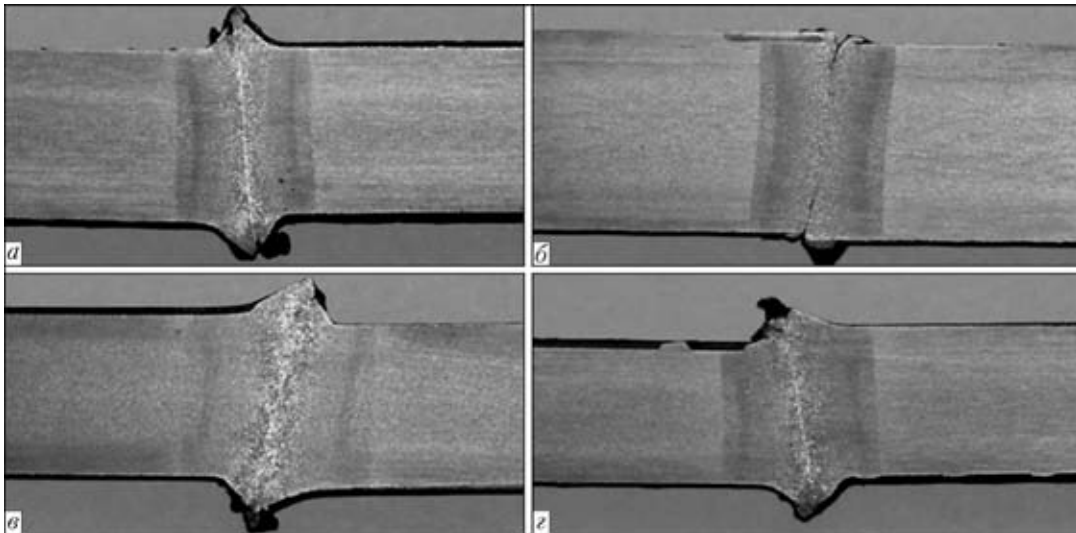


Рис. 1. Макрошлифы стыков, полученных на различных режимах сварки: здесь и далее на рис. 2 и 3 *а* — оптимальный; *б, в* — соответственно пониженные скорость и напряжение; *г* — увеличенный вылет

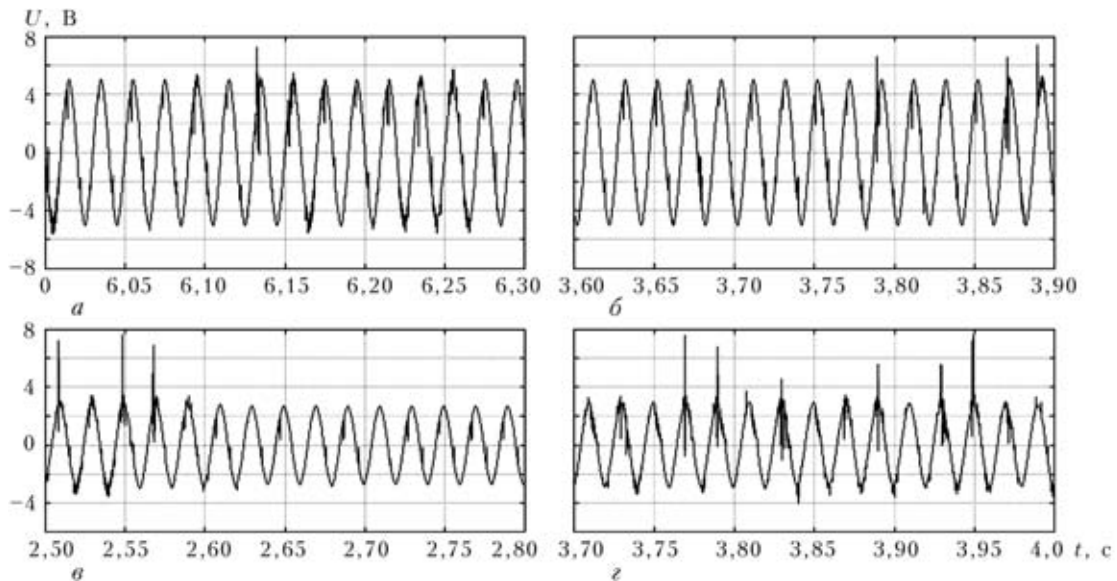


Рис. 2. Типичные осциллограммы напряжения на различных режимах сварки (*а-г*)

взрывно-искрового процесса, является высокочастотная составляющая, которую выделили с помощью цифрового фильтра.

После первичной обработки данных массивы разделили на блоки, равные десяти периодам напряжения промышленной сети, исходя из допустимой длительности отклонений в ходе процесса оплавления [1]. Для каждого блока данных оп-

ределено математическое ожидание модуля случайной величины, отражающее интенсивность оплавления на данном этапе осциллограммы. В результате получены массивы данных, отражающие интенсивность оплавления (рис. 3).

Даже для стыков, сваренных на режимах с одинаковыми параметрами, массивы данных отличаются, хотя для каждой группы стыков можно оп-

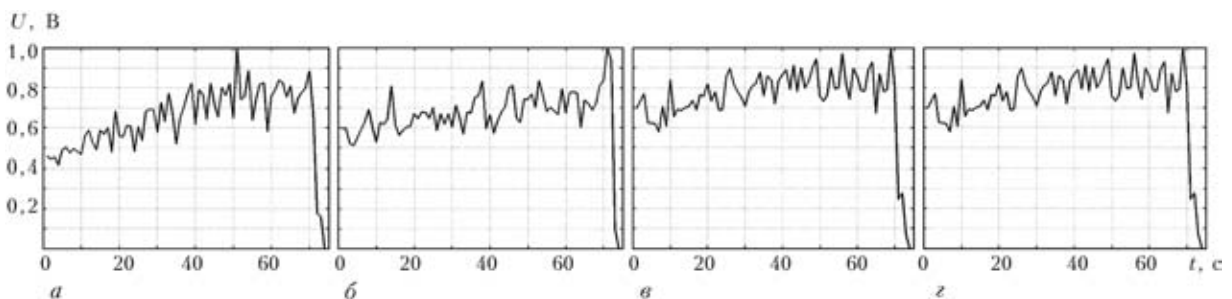


Рис. 3. Типичные массивы данных (*а-г*), отражающих интенсивность оплавления для групп стыков

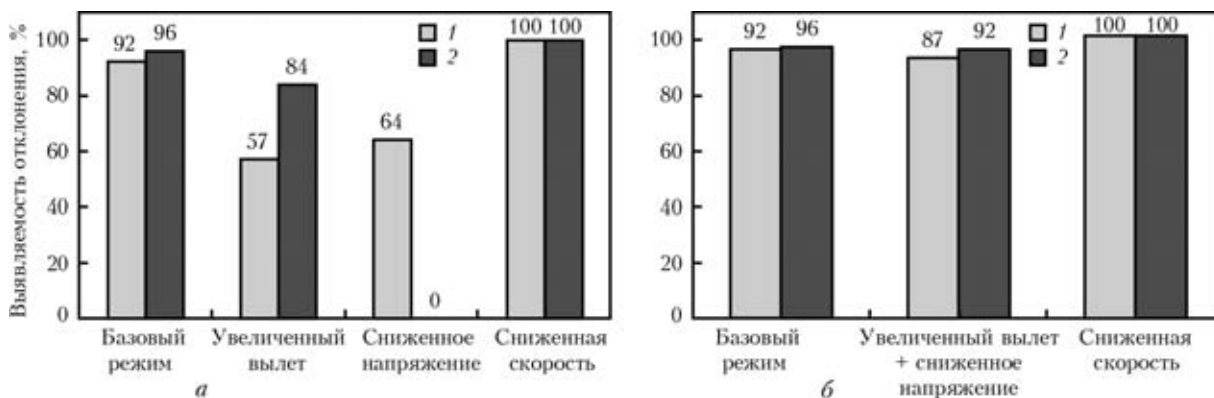


Рис. 4. Результаты работы сетей PNN (1) и LVQ (2) первичные (а) и после повторного обучения (б)

ределить пределы изменения значений параметров. Поэтому возникает задача автоматической классификации массивов.

Указанная задача может быть успешно решена с помощью нейронных сетей классификации и кластеризации данных. Для классификации применили вероятностную нейронную сеть Probabilistic Neural Networks (PNN), которая относится к радиально-базисным сетям, и Learning Vector Quantization (LVQ) — сеть разделения учебных векторов. Обе сети относят к самоорганизационным [4]. Классификацию осуществляли по признаку наличия отклонения по одному из параметров режима ( $v$ ,  $U_{x,x}$ ,  $l$ ). Таким образом, данные разделялись на четыре класса.

Для обучения сетей использовали данные, полученные во время экспериментов. Для обоих типов сетей применили одну обучающую последовательность, включающую по 15 массивов данных каждой группы режимов. Сеть PNN имела 4 нейрона, LVQ — 4 нейрона во втором слое. Работоспособность сетей проверили на множествах значений, которые не использовали при обучении сетей.

Относительная ошибка при идентификации массивов данных для стыков, сваренных на оптимальном режиме, не превышает 8 % (рис. 4, а). Массивы данных, относящиеся к группе режимов со сниженной скоростью, определили безошибочно. При идентификации массивов данных, относящихся к режимам со сниженным напряжением и увеличенным вылетом, ошибка превышала 16 %. Это связано с тем, что оба отк-

лонения приводят к появлению похожих изменений хода процесса (например, см. рис. 3).

Провели повторное обучение сети, для которого две группы стыков объединили. Новая сеть PNN имела 3 нейрона, сеть LVQ — 3 нейрона во втором слое. Параметры обучения сети остались прежними. Ошибка выявления возмущений в этом случае не превышает 8 % для сети LVQ и 13 % для сети PNN (рис. 4, б).

Полученные результаты показали, что применение искусственных нейронных сетей для оценки стабильности процесса при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением является принципиально возможным.

## Выводы

1. Анализ высокочастотной составляющей сварочного напряжения контактной машины позволяет эффективно реализовать 100%-й мониторинг процесса контактной стыковой сварки оплавлением.

2. Для автоматического мониторинга на основе анализа интенсивности оплавления целесообразно использовать нейронные сети классификации и кластеризации.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. On-line quality monitoring in short-circuit metal arc welding / S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, N. Claesson // Welding Res. — 1999. — № 2. — P. 59–72.
3. Shannon G. August 8, 2007. Gaining control of resistance welding: [http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding\\_Article.cfm?ID=1689](http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding_Article.cfm?ID=1689).
4. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети: Matlab 6. — М.: Диалог-МИФИ, 2002. — 489 с.

A procedure for monitoring the process of continuous flash-butt has been developed. It is established that application of neural networks for assessment of the stability of the welding process is possible in principle.

Поступила в редакцию 03.07.2009