



## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

**И. О. СКАЧКОВ**, канд. техн. наук, **А. Е. ПИРУМОВ**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»),  
**С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С использованием искусственных нейронных сетей проведена оценка качества сварных соединений, выполненных под водой, с четырьмя типами дефектов сборки: превышением кромок, изменением расстояния горелка – деталь, изменением зазора между деталями и наличием прихваток. Показана эффективность применения нейронных сетей для указанных типов дефектов, за исключением изменения зазора между свариваемыми кромок.

*Ключевые слова:* подводная сварка, нестационарные возмущения, металл шва, контроль качества, электрические параметры, нейронные сети

Основной задачей производства сварных конструкций является стабилизация качества соединений во всей партии однотипных изделий. Наиболее распространенный способ решения этой задачи — оптимизация параметров режима и минимизация уровня технологических возмущений. Получить сварные соединения с параметрами качества, не худшими чем предельно допустимые по соответствующим стандартам или техническим условиям, позволяют табличные модели, связывающие показатели качества с параметрами сварочного режима. Однако при повышении требований к сварному соединению, определенных конструктивных особенностях изделия и наличии возмущений применение таких моделей не всегда может обеспечить заданное качество. Устранение влияния возмущений вследствие разнообразия природы их возникновения невозможно. Так, при сварке под водой на процесс формирования сварного шва влияет целый комплекс нестационарных возмущений. Например, невозможно устранить вероятность появления возмущений, возникающих вследствие действия на человека таких факторов окружающей среды, как плохая видимость, течение, высокое давление. В связи с этим большое значение приобретает контроль качества сварных соединений, часто являющихся особо ответственными. Однако в большинстве случаев контроль качества сварного соединения, выполненного мокрой подводной сваркой, осуществляется наружным осмотром или в случае ремонта трубопроводов проверкой соединения на герметичность избыточным давлением. Применение общепринятых аппаратных средств в условиях водной среды связано с большими техническими

трудностями. В связи с этим разработка простой в реализации и надежной в эксплуатации технологии объективного контроля качества является наиболее актуальной. Такая технология должна обеспечивать контроль качества формирования шва в реальном масштабе времени или непосредственно после окончания сварки и не требовать погружения под воду ни оборудования, ни контролера.

Информацию, необходимую для оценки качества сварного соединения, можно получать путем анализа физических параметров сварочной дуги, включая электрические [1]. Использование последних требует минимальных аппаратных средств и не увеличивает, как правило, массогабаритные показатели рабочих узлов сварочных установок. Кроме того, сварочная дуга практически безынерционна. Для подводной сварки особенно привлекательным является возможность измерения сварочных параметров с обеспечивающего судна.

Сущность технологии контроля качества сварного соединения по электрическим параметрам дуги заключается в сопоставлении формы осциллограмм тока и напряжения дуги с изменением показателей качества по длине сварного шва. Поскольку большинство дефектов последнего закладывается на стадии образования и кристаллизации сварочной ванны, состояние одного из электродов должно отражать особенности протекания этого процесса. Однако наличие как искусственных, так и естественных обратных связей затрудняет интерпретацию формы осциллограмм для определения качества сварного соединения, поскольку абсолютные значения отклонений в форме осциллограмм весьма незначительны. Таким образом, необходимо оценивать форму кривой тока и напряжения за некоторый период времени горения дуги и выявлять отклонения, существенные с точ-



ки зрения формирования шва. В связи с огромным количеством непредсказуемых и не подлежащих измерению возмущающих факторов процесс горения дуги под водой можно рассматривать как стохастический. Определение качества сварного шва может быть осуществлено путем разделения фрагментов осциллограмм на группы, соответствующие определенным видам дефектов. Таким образом, задача контроля качества по электрическим параметрам дуги сводится к задаче кластеризации. Необходимо также учитывать, что электрическая дуга (независимо от способа дуговой сварки) имеет естественную нелинейность. Существенную нелинейность имеет также свариваемое изделие, поскольку его теплофизические и электрические свойства зависят от температуры. Преимущественно нелинейными системами являются также источники питания дуги. Таким образом, должна решаться задача кластеризации последовательностей, сформированных нелинейной стохастической системой.

Любые возмущения непременно приводят к изменениям флуктуаций электродных пятен и, следовательно, сказываются на электрических параметрах дуги. Поскольку эти флуктуации имеют случайный характер, то и анализ их влияния целесообразно проводить по статистическим оценкам. Наиболее приемлемой оценкой, позволяющей адекватно оценить интенсивность флуктуации электродных пятен при решении поставленной задачи, является дисперсия регистрируемых значений тока сварки и напряжения дуги.

Одним из современных способов решения задачи является использование нейронных сетей. Выбор этого механизма кластеризации данных определяется прежде всего такими особенностями нейронных сетей, как их способность к обобщению и терпимость к различного рода помехам. Математический аппарат и программное обеспечение для симуляции искусственных нейронных сетей на персональных компьютерах в достаточной мере разработаны и доступны.

Цель данной работы заключалась в определении возможности оценки эффективности применения нейронных сетей в качестве инструмента

дистанционного мониторинга качества процесса мокрой подводной сварки.

Эксперименты проводили для случая автоматической дуговой подводной мокрой сварки. Образцы из низкоуглеродистой конструкционной листовой стали толщиной 10 мм, имеющие стандартную V-образную разделку кромок, сваривали встык с использованием порошковой проволоки ППС-АН2, разработанной и изготовленной в ИЭС им. Е. О. Патона. В качестве источника питания использовали сварочный агрегат типа АСУМ-400. Эксперименты проводили в пресной воде в специальной камере высокого давления в условиях, эквивалентных погружению на глубину 10 м.

Регистрацию тока и напряжения на дуге осуществляли с помощью информационно-измерительной системы (ИИС) на базе персонального компьютера, модуля аналогового ввода E-140 производства компании «L-Card» (Россия), а также датчиков тока и напряжения компании «LEM» (Швейцария), работа которых основана на эффекте Холла. Используемые датчики обеспечивают нормализацию и гальваническую развязку входного сигнала. Разработанная ИИС (рис. 1) позволяет осуществлять непрерывный анализ и запись на электронные носители показателей параметров, регистрируемых во время всего цикла сварки, и обрабатывать полученную информацию.

Частота АЦП 10 кГц на канал выбрана на основании литературных данных работы [2] и предварительных собственных экспериментов. Для повышения точности измерений осуществлены меры защиты измерительных цепей от электромагнитных помех такие, как применение витых пар, установка на вход АЦП резисторов (рис. 2) для уменьшения влияния влияния синфазной помехи и др. [3]. В связи с необходимостью проведения контроля с поверхности воды напряжение дуги измеряли на клеммах источника питания (рис. 2). Запись и обработку данных проводили с помощью программы File Recorder v.3.2 из специализированного пакета PowerGraph v.3.2, ориентированного на работу с продукцией фирмы «L-Card», под управлением операционной системы Windows XP. С помощью меню программной среды можно осуществлять настройку каждого входного канала АЦП путем введения частоты сбора данных и уровня входного сигнала.

Оценку качества сварных соединений проводили на основе четырех видов возмущений, которые ухудшают качественные характеристики сварного шва и наиболее часто встречаются при сварке, а именно: превышение кромок свариваемых деталей; изменение расстояния горелка – деталь; изменение зазора между деталями; наличие прихваток.

Для проведения экспериментов каждый образец собирали следующим образом: начальную и

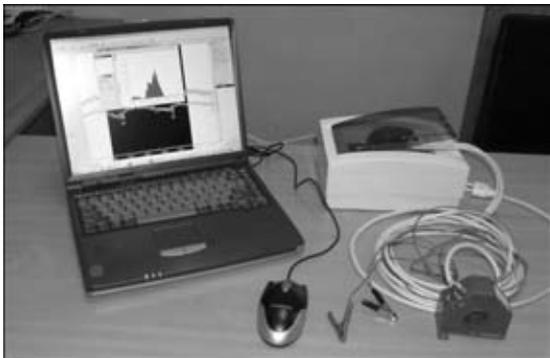


Рис. 1. Внешний вид информационно-измерительной системы



заключительную часть соединения выполнили качественно, а средняя имела соответствующий дефект. Схематические изображения экспериментальных образцов с искусственным введением возмущений и их фотографии приведены на рис. 3.

Анализ осциллограмм тока и напряжения при проведении предварительных экспериментов и оценка свойств используемого оборудования позволили сделать вывод, что наиболее информативным параметром является сварочный ток, так как источник питания имеет жесткую вольт-амперную характеристику, что делает сигнал напряжения неинформативным в связи с его незначительными колебаниями. Первичная обработка полученного сигнала (удаление с помощью цифрового фильтра помех) позволила увеличить его информативность.

После первичной обработки записанных данных осуществляли их разбивку на блоки, приблизительно кратные длине периода колебаний мгновенных значений сигнала сварочного тока, который объясняется капельным переносом электродного металла и определяется путем спектрального анализа выборки данных. Длина блока составила 1000 значений, соответствующих времени 0,1 с.

Таким образом, для каждого эксперимента получена матрица размером  $1000 \times N$ , где  $N$  — количество блоков, равное  $T/1000$  ( $T$  — общее количество записанных данных). После подсчета вы-

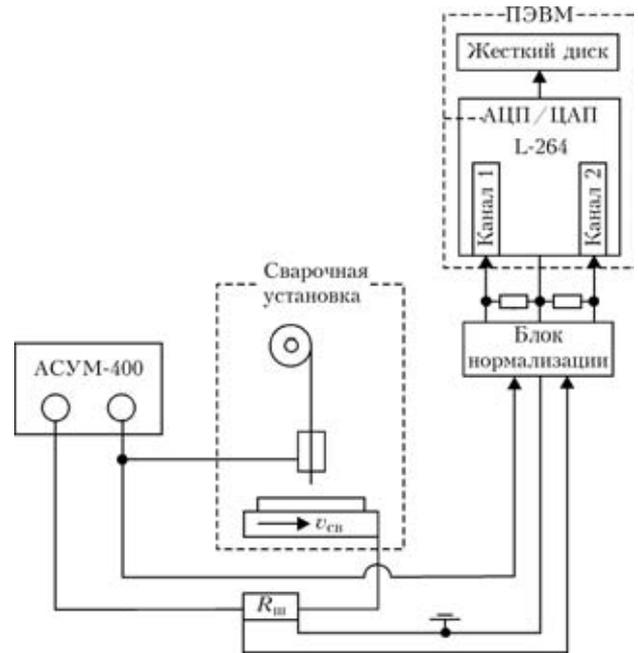


Рис. 2. Функциональная схема сварочной установки

борочных дисперсий для каждого блока был получен вектор размерностью  $1 \times N$ , который перераспределен таким образом, чтобы полученное множество этих значений соответствовало времени проведения сварки. Окончательная матрица имеет размерность  $10 \times (N/10)$ .

Внешний осмотр сварного шва и поперечных сечений вырезанных из него макрошлифов опре-

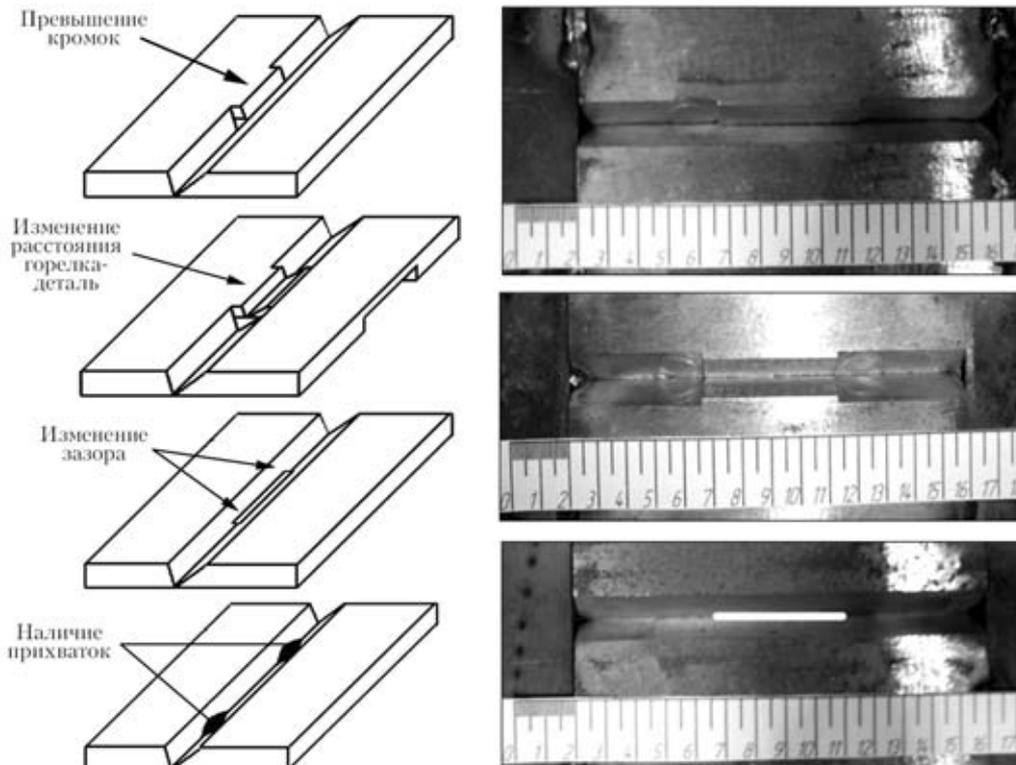


Рис. 3. Схематические изображения и фотографии экспериментальных образцов с искусственным введением возмущений



**Показатели погрешности нейронных сетей при идентификации дефектов**

Вид возмущения	Общее количество блоков	Ошибка работы сети, %	
		Карта Кохонена	LVQ
Превышение кромок	70	15,7	18,6
Изменение расстояния горелка–деталь	60	13,3	13,3
Наличие прихваток	60	16,6	50
Изменение зазора	60	21,6	83,3

делил качественные и некачественные участки для дальнейшего обучения нейронной сети.

Для кластеризации фрагментов осциллограмм параметров дуги использовали хорошо известные нейронные сети — карту Кохонена с упорядоченным расположением нейронов и сеть типа LVQ (Learning Vector Quantization — разделение обучающих векторов). Обе сети относятся к самоорганизующимся. Кластеризацию осуществляли по признаку отсутствия (класс 1) и наличия (класс 2).

Искусственная нейронная сеть для своей работы требует обучения [4], которое заключается в подаче на вход обучающей выборки данных — набора наблюдений, содержащего признаки исследуемого объекта. Одна из наиболее серьезных проблем при обучении сети заключается в том, что во многих случаях минимизируются не те помехи, которые требуется минимизировать. Это определяется как ограниченностью объема обучающей выборки, так и характером данных в ней. Однако увеличение объема обучающей выборки может привести к явлению переобучения и потере сетью важнейшего свойства — обобщения. В связи с этим проводили обязательную проверку на переобучение с помощью контрольной последовательности, не входящей в обучающую. При формировании обучающей и контрольной последовательностей дополнительно применяли алгоритмы, позволяющие выявлять и устранять ошибки измерений, вызванные различного рода помехами.

Для обоих типов применяемых сетей использовали одну и ту же учебную последовательность с 66 блоками. Матрица целей для сети LVQ имела

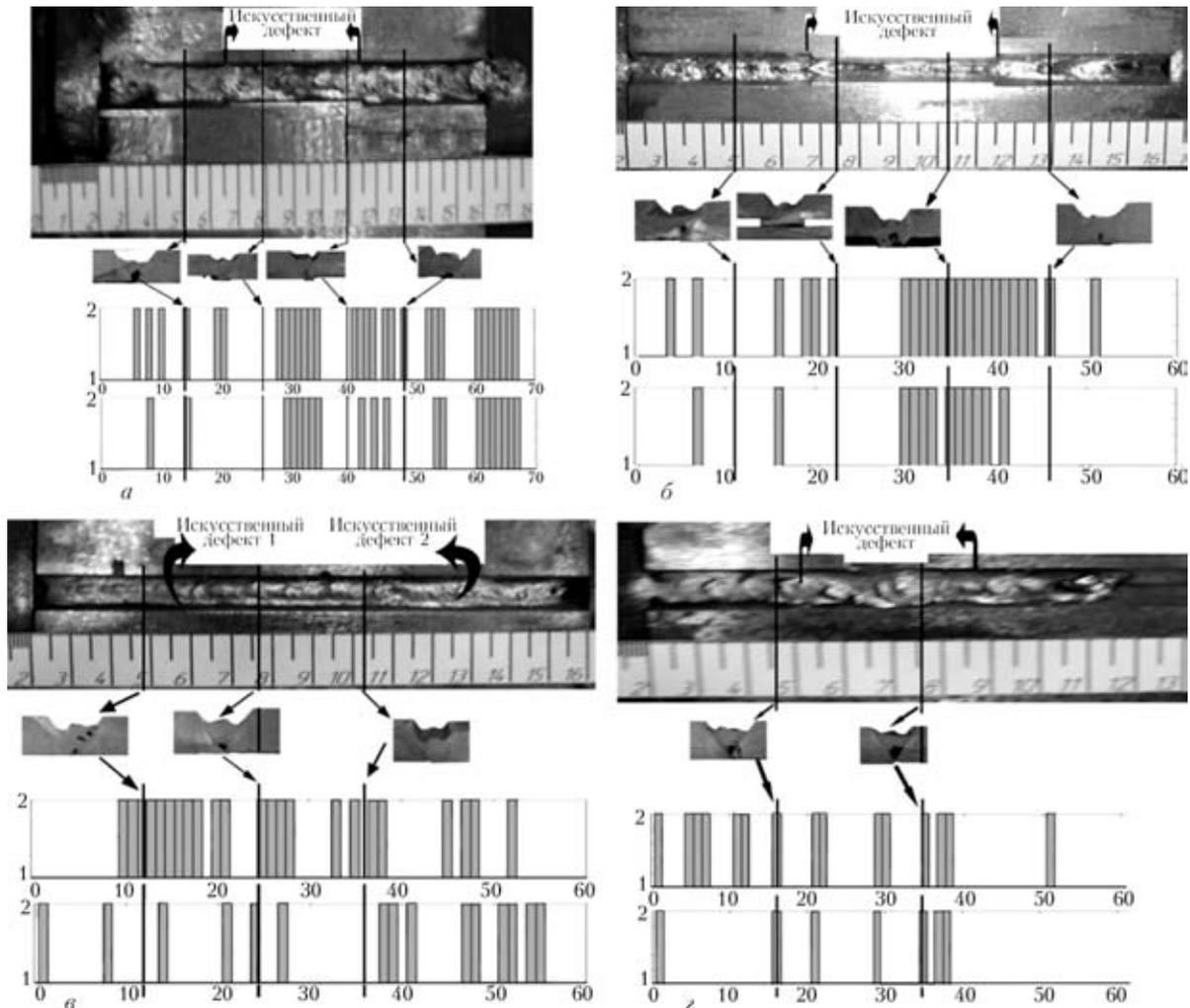


Рис. 4. Выявление в образцах дефектов, обусловленных превышением кромок (а), изменением расстояния горелка – деталь (б), наличием прихваток (е), изменением зазора (з)



размерность  $2 \times 66$ , поскольку классифицировалось только наличие дефекта. Значения для учебной последовательности выбирали из каждого эксперимента. Карта Кохонена имела два нейрона, сеть LVQ — десять нейронов в первом слое и два во втором. Количество нейронов первого слоя соответствует длине вектора входа, второго — количеству классов, на которые разделяется вектор входа. Обучение сети LVQ проводили на протяжении 2000 циклов с шагом 0,001.

Проверку нейронной сети для определения точности выявления дефектов осуществляли путем подачи на вход обученных нейронных сетей всей последовательности данных, записанных для каждого эксперимента. Ошибку работы сетей оценивали на последовательности, данные из которой не использовали при обучении. Оценки погрешности работы сетей сведены в таблице.

Результаты работы нейронных сетей по оценке качества исследуемых образцов приведены на рис. 4. Столбцы на диаграммах показывают наличие дефектов на соответствующих участках шва.

Анализ полученных данных показывает, что нейронные сети достаточно успешно выявляют три из четырех искусственно введенных дефектов сборки — превышение кромок (рис. 4, а), изменение расстояния между горелкой и изделием (рис. 4, б), наличие прихваток (рис. 4, в). Неточное выявление дефекта в начале его появления можно объяснить неизменностью электрических параметров в этот период времени, а также нестабильностью процесса на протяжении всего эксперимента. Погрешность выявления прихваток связана с инерционностью процесса саморегулирования дуги и их незначительным влиянием на электрические параметры дуги. Следует отметить факт выявления внутренних дефектов сварного шва (затекание шлака и несплавление кромок), что видно по фотографиям представленных сечений образцов. Наименее чувствительными нейронные сети оказались к ступенчатому изменению зазора между кромками (рис. 4, г).

Artificial neuron networks have been used to assess the quality of underwater welded joints with four types of fit-up defects: edge displacement, change in workpiece-torch distance, change in edge gap and presence of tack welds. The efficiency is shown of the application of neuron networks for the above types of defects, except for a change in the edge gap.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность применения искусственных нейронных сетей для оценки качества сварного соединения при подводной мокрой сварке. Основным преимуществом данного метода является возможность дистанционного применения, т. е. размещение контрольной аппаратуры на палубе обеспечивающего судна. Повышение точности работы сетей вполне реально, но требует изучения особенностей физических процессов, происходящих в дуге при формировании разного рода дефектов. Перспективным представляется использование нейронных сетей с обратными связями для самосовершенствования систем мониторинга качества формирования шва.

### Выводы

1. Проведенная оценка показала принципиальную возможность применения искусственных нейронных сетей для мониторинга качества сварных соединений при мокрой подводной сварке. Они позволяют выявлять как дефекты сборки сварного соединения, так и внутренние дефекты сварных швов (затекание шлака и несплавление кромок), выполненных под водой.

2. Информативным параметром может служить сигнал сварочного тока. Полученные данные о сигналах нуждаются в предварительной обработке с целью устранения помех и увеличения информативности сигнала.

3. На основании полученной погрешности работы нейронных сетей для дальнейшей работы целесообразно использовать карты Кохонена.

1. *Intelligent control for the shape of the weld pool in pulsed GTAW with filler metal / D. B. Zhao, S. B. Chen, L. Wu et al. // Welding Res. — 2001. — № 11. — P. 253–260.*
2. *On-line quality monitoring in short-circuit metal arc welding / S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, I. Claesson // Ibid. — 1999. — № 2. — P. 59–72.*
3. Денисенко В., Халявко А. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // *Соврем. технологии автоматизации*. — 2001. — № 1. — С. 68–75.
4. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети: Matlab 6. — М.: Диалог-Мифи, 2002. — 489 с.

Поступила в редакцию 19.05.05