

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СТЫКОВОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ, С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, А. В. ДИДКОВСКИЙ, Е. В. АНТИПИН

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

Проведен анализ основных параметров стыковой контактной сварки оплавлением по данным текущих технологических рапортов, формируемых компьютерной системой управления при сварке железнодорожных рельсов. Показана возможность разработки модели предсказания выходного показателя качества сварного стыка железнодорожного рельса — разрушающей нагрузки образца и стрелы прогиба — по параметрам процесса сварки различными методами статистического анализа, в частности, корреляционным и регрессионным анализом и нейронными сетями. Расчеты проводились по экспериментальным данным, полученным на Киевском рельсосварочном предприятии при сварке рельсов на сварочной машине K1000. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, статистические модели контроля и управления, контроль параметров процесса, статистическое управление

При сварке железнодорожных рельсов на стационарных и подвесных контактных машинах осуществляется контроль технологических параметров режима с регистрацией их компьютерной системой для каждого сварного стыка. Одновременно осуществляется УЗ контроль этих стыков. Периодически проводятся механические испытания сварных рельсов и выдается заключение о соответствии данного технологического режима требуемому качеству сварки. Контроль процесса осуществляется за счет проверки наличия параметров режима в допусках, установленных техническими условиями (ТУ) [1].

В настоящее время компьютерными системами контроля оснащены стационарные и передвижные рельсосварочные машины нового поколения типа K1000, K920, K922. Схемы управления машин построены на основе промышленных контроллеров SIEMENS. Современная элементная база позволила воспроизводить с высокой точностью значения параметров режима, регламентированы ТУ на сварку железнодорожных рельсов. Однако даже в этом случае нельзя исключить возможность появления дефектов в сварных соединениях, если под действием случайных внешних факторов изменилась зона разогрева, пластическая деформация или стабильность оплавления. В производственных условиях возникают различные технологические и электрические возмущения, которые приводят к нарушению стабильности процесса и к ухудшению качества сварки. Необходимы исследования новых параметров и алгоритмов управ-

ления, повышающие вероятность прогнозирования качества сварных соединений.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов контроля для системы управления процессом сварки оплавлением в стационарных и полевых условиях, обеспечивающих контроль качества стыков по параметрам процесса и контроль технического состояния сварочного оборудования. Эти алгоритмы воплощаются в двухуровневую систему контроля и управления. Такая система, кроме прямого цифрового управления сварочным процессом и контроля параметров процесса по допускам выполняет следующие функции:

- прогнозирование качества сварного стыка по параметрам процесса и повышения достоверности его за счет применения более совершенных алгоритмов и привлечения к прогнозированию квалифицированных специалистов;

- контроль технического состояния сварочного оборудования, систематизация видов износа узлов сварочного оборудования, разделение их на общие для всех машин данного типа и частные для конкретных машин, выработки рекомендаций и планирования технического обслуживания сварочного оборудования;

- обнаружение и распознавание аварийных ситуаций (недопустимых отклонений параметров процесса сварки, технического состояния оборудования, выполнение вспомогательных технологических операций, данных механических испытаний, недопустимого отклонения напряжения,

охлаждения и т. д.) для немедленного вмешательства в технологический процесс;

- систематизация отклонений параметров процесса сварки, которые могут приводить к ухудшению показателей качества сварных соединений, разработка рекомендаций по корректировке параметров режима сварки;

- косвенный контроль по ходу процесса сварки отклонений в выполнении вспомогательных технологических операций (подготовки торцов к сварке), в состоянии вспомогательных объектов (трансформаторной подстанции, оборудование подготовки торцов).

Алгоритмы контроля основаны на анализе параметров процесса сварки, которые отображаются в технологическом рапорте компьютерной системы управления. Пример рапорта приведен ниже: $v_{оп}$ — 0,108 мм/с; S — 26,1 мм; T — 67 с; U_1 — 412 В; U_2 — 320 В; I — 359 А; $v_{ф}$ — 1 мм/с; P_a — 136 атм; $L_{ос}$ — 15,5 мм; T_{ocl} — 1,4 с; $Z_{к.з}$ — 104,5 мкОм; Q — 2271 Вт·ч; $v_{ос}$ — 68 мм/с; P_p — 2400 кН; $L_{пр}$ — 48 мм.

При этом $v_{оп}$ — скорость оплавления; S — припуск на оплавление; T — длительность сварки; U_1 — напряжение на 1-ом этапе; U_2 — напряжение на 2-ом этапе; I — ток сварки; $v_{ф}$ — скорость форсировки; P_a — давление; $L_{ос}$ — припуск на осадку; T_{ocl} — длительность осадки; $Z_{к.з}$ — сопротивление короткого замыкания контура машины; Q — общая энергия; $v_{ос}$ — скорость осадки; P_p — разрушающая нагрузка; $L_{пр}$ — стрела прогиба.

Целью исследований была проверка возможности разработки модели предсказания выходного показателя качества сварного стыка железнодорожного рельса — разрушающей нагрузки образца и стрелы прогиба — по параметрам процесса сварки различными методами статистического анализа, в частности, корреляционным и регрессионным анализом и нейронными сетями. Конструктивная прочность сварных рельсов определяется при проведении испытаний на статический поперечный изгиб. При этом регистрируется величина разрушающей нагрузки P_p и стрела прогиба рельса $L_{пр}$ под действием этой нагрузки. Допустимые значения этих величин регламентируются ТУ. Эксперименты проводились на Киевском рельсосварочном предприятии на сварочной машине К1000. Данные параметров процесса (162 набора) измерялись и контролировались системой контроля и управления сварочной машиной. Все дальнейшие исследования проводились с помощью программ Excell 2010 (Microsoft) и Statistica v.10 (StatSoft, Dell) [2].

Каждый из контролируемых параметров определяет ход процесса на отдельных этапах: 1 — сплавления косины (U_1); 2 — оплавления (U_2, I ,

$v_{оп}, Q$); 3 — форсирования ($v_{ф}, T_{к.з}$); 4 — осадка ($v_{ос}, L_{ос}, P_a, T_{ocl}$).

Параметр S характеризует процесс до осадки (1, 2, 3 этапы), T характеризует процесс за время сварки (1, 2, 3, 4); $Z_{к.з}$ — техническое состояние сварочной машины.

Для управления процессом задание каждого этапа осуществляется по величине перемещения подвижной колонны, т.е. при достижении заданного S (типовой режим для машин К920 и К1000). Таким образом, параметр S , а также $U_1, U_2, L_{ос}, P_a, T_{ocl}$ стабилизируются системой управления. Другие параметры: $I, v_{оп}, Q, v_{ф}, T_{к.з}, v_{ос}, Z_{к.з}, T$ определяются условиями прохождения процесса (имеющимися возмущениями, техническим состоянием сварочного оборудования, квалификацией сварщика и вспомогательных рабочих).

Если какой-то параметр имеет постоянное значение, его бессмысленно вводить в модель [3, 4]. Однако все перечисленные параметры кроме $T_{к.з}$ имеют рассеивание от ± 8 до ± 100 % и целесообразны для изучения.

Отклонение параметров процесса (\pm), в исследуемых экспериментах: $v_{оп}$ — 99 мм/с; S — 17 мм; T — 68 с; U_1 — 8 В; U_2 — 8 В; I — 41 А; $v_{ф}$ — 67 мм/с; P_a — 9 атм; $L_{ос}$ — 14 мм; T_{ocl} — 56 с; $Z_{к.з}$ — 9 мкОм; Q — 49 Вт·ч; $v_{ос}$ — 79 мм/с; P_p — 38 кН; $L_{пр}$ — 39 мм.

Из данных корреляционного анализа (табл. 1) наибольшая связь с выходом — разрушающей нагрузкой P_p имеют следующие параметры в порядке убывания (рис. 1): $U_1, U_2, I, L_{ос}, S, v_{ос}, T_{ocl}, P_a, v_{ос}, Z_{к.з}, Q, T, v_{ф}$. Из них два последних ниже оценки по Стьюденту (0,159) и 6 ниже по Чеддоку (0,3). Для оценки силы связи в теории корреляции применяется шкала английского статистика Чеддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0.

Из коэффициентов взаимной корреляции между параметрами следует:

- высокая связь (0,7...0,9) между $U_1, U_2, I, L_{ос}, S$;

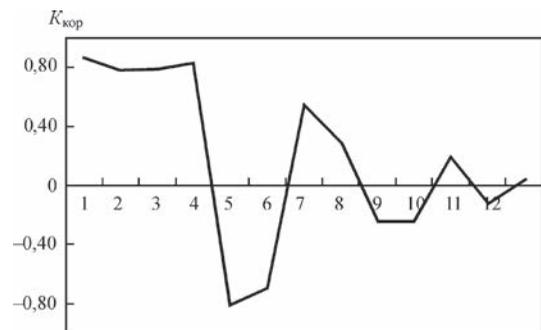


Рис. 1. Коэффициенты корреляции параметров процесса с величиной разрушающей нагрузки образца по убыванию: 1 — U_1 ; 2 — U_2 ; 3 — I ; 4 — $L_{ос}$; 5 — S ; 6 — $v_{оп}$; 7 — T_{ocl} ; 8 — P_a ; 9 — $v_{ос}$; 10 — $Z_{к.з}$; 11 — Q ; 12 — T ; 13 — $v_{ф}$

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между параметрами процесса сварки

$v_{оп}$	S	T	U_1	U_2	I	v_{ϕ}	P_a	L_{oc}	T_{ocl}	$Z_{к.з}$	Q	v_{oc}	P_p	$L_{пр}$	
1,00	0,67	-0,34	-0,78	-0,67	-0,70	-0,14	0,00	-0,82	-0,45	0,12	-0,64	0,15	-0,69	-0,46	$v_{оп}$
	1,00	0,30	-0,89	-0,82	-0,88	0,13	-0,46	-0,74	-0,38	0,37	-0,05	0,35	-0,81	-0,54	S
		1,00	-0,09	-0,16	-0,23	0,14	-0,35	0,05	0,03	0,35	0,80	0,17	-0,13	-0,04	T
			1,00	0,87	0,83	-0,03	0,32	0,91	0,62	-0,28	0,25	-0,29	0,86	0,59	U_1
				1,00	0,74	-0,09	0,32	0,81	0,62	-0,18	0,15	-0,20	0,78	0,47	U_2
					1,00	0,07	0,22	0,75	0,33	-0,40	0,27	-0,34	0,79	0,51	I
						1,00	-0,49	0,10	0,09	-0,03	0,31	0,07	0,03	0,13	v_{ϕ}
							1,00	0,11	0,17	-0,32	-0,37	-0,13	0,29	0,13	P_a
								1,00	0,72	-0,14	0,39	-0,17	0,82	0,58	L_{oc}
									1,00	0,10	0,24	0,05	0,55	0,37	T_{ocl}
										1,00	0,13	0,22	-0,24	-0,16	Z
											1,00	0,01	0,19	0,12	Q
												1,00	-0,24	-0,14	v_{oc}
													1,00	0,67	P_p
														1	$L_{пр}$

– высокая связь $v_{оп}$ с этой группой кроме S (0,67) и с Q (0,64);

– Q имеет высокую связь с T (0,8) и среднюю с $v_{оп}$ (0,64);

– остальные параметры T_{ocl} , P_a , v_{oc} , $Z_{к.з}$, T , v_{ϕ} имеют связь с другими параметрами ниже средней.

Проверка корреляционных связей параметров второго порядка на этапе оплавления показала, что эти параметры мало изменили картину связи с P_p .

Анализ данных со стрелой прогиба показывает явно худшую зависимость, что возможно связано с точностью измерения.

С учетом данных теоретических и опытных исследований на первом этапе строили линейную регрессию от параметров:

$$v_{оп}, S, U_2, I, P_a, L_{oc}, Z_{к.з}, v_{oc}.$$

Далее с учетом коэффициентов корреляции были рассчитаны модели с различной комбинацией параметров:

$$\begin{aligned} &v_{оп}, S, U_2, I, P_a, L_{oc}, Z_{к.з}, Q, v_{oc}; \\ &v_{оп}, S, U_2, P_a, L_{oc}; \\ &v_{оп}, S, P_a, L_{oc}; \\ &v_{оп}, S, U_2, I, L_{oc}; \\ &S, L_{oc}. \end{aligned}$$

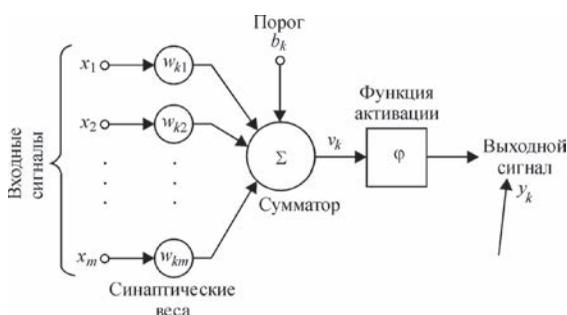


Рис. 2. Структурная схема искусственного нейрона

Все перечисленные модели имеют среднее квадратическое отклонение (С.К.О.), равное 73 кН для P_p и 2,35 мм для $L_{пр}$.

Нейронные сети для моделирования процесса. Искусственная нейронная сеть — математическая зависимость, моделирующая способ обработки конкретной задачи. Очевидно, что она сильно упрощена и примитивна по сравнению с биологическими нейронами [5, 6].

Имея сигналы или численные их значения на входе сети, однозначно определяется выходной сигнал по формуле (рис. 2):

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k, \quad y_k = \phi(v_k).$$

Ошибка прогнозирования по нейронной сети

$$e_k(n) = Y_k(n) - y_k(n),$$

где $Y_k(n)$ — действительное значение выхода; $y_k(n)$ — расчетное значение.

Функция стоимости

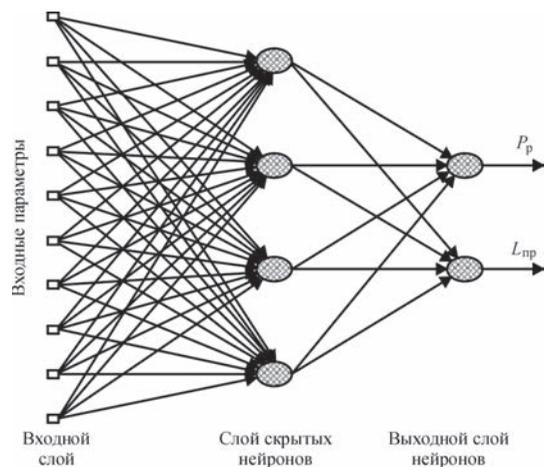


Рис. 3. Многослойный перцептрон MLP

Таблиця 2. Нейронні мережі на основі MLP для величини розривного зусилля P_p і стрели прогиба $L_{пр}$ об'єктів

Номер п.п.	Выходные переменные сети	Входные переменные сети	Структура	С.К.О
1	P_p	$v_{оп}, S, L_{oc}, U_2$	4-8-1	66,4
2	$L_{пр}$	$v_{оп}, S, L_{oc}, U_2$	4-10-1	2,27
3	P_p	$v_{оп}, S, L_{oc}$	3-4-1	66,1
4	$L_{пр}$	$v_{оп}, S, L_{oc}$	3-3-1	2,33
5	P_p	S, L_{oc}	2-4-1	66,8
6	$L_{пр}$	S, L_{oc}	2-4-1	2,3

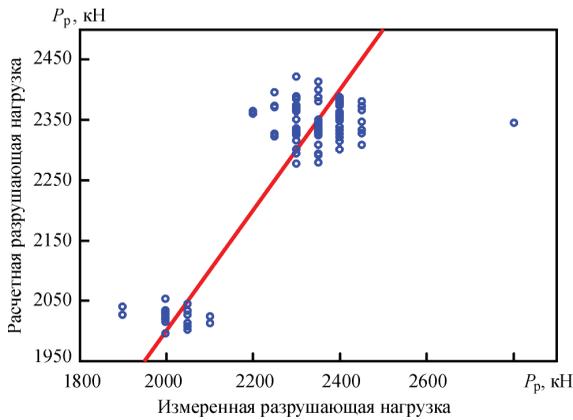


Рис. 4. Ошибка предсказания P_p по сетям 3-4-1, 0,87, 79 кН

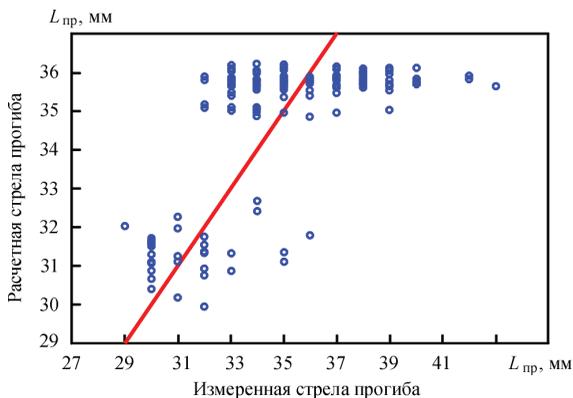


Рис. 5. Ошибка предсказания $L_{пр}$ по сетям 4-10-1, 0,88, 2,27

$$E(n) = e_k^2(n) / 2 \rightarrow \min,$$

где номер шага n итеративного процесса настройки синаптических весов нейрона k .

При разработке нейронных сетей использовали те же входные параметры, что и для нелинейной регрессии без членов второго порядка. Структура сети была в MLP с одним скрытым слоем, в котором и отрабатываются нелинейности аппроксимируемой зависимости. В качестве функции активации внутренних нейронов применялся гиперболический тангенс, выходной — тождественная (identity) функция [6]. Начальные весовые коэффициенты не задавались. Обучение проводилось по алгоритму BFGS. Сначала поиск наилучшей сети осуществляли в режиме ANS (automated network search), а затем CNN (custom neural networks) для выбора одной и той же

структуры скрытого слоя. Результаты расчета приведены в табл. 2. Ошибки предсказания показаны на графиках (рис. 4, 5).

Выводы

1. Регрессионные модели и нейронные сети с входными параметрами $v_{оп}, S, L_{oc}, U_2$, которые входят в технологический рапорт системы управления сварочной машиной, могут быть использованы для предсказания прочностных характеристик сварных стыков железнодорожных рельсов.

2. Разработанные модели имеют приблизительно одинаковую погрешность предсказания, а среднее квадратическое отклонение (С.К.О) равно 73 кН для P_p и 2,35 мм для $L_{пр}$.

Список литературы

1. Мойсеенко К. В., Мала Т. Л. (2016) *Рейки нові зварені для залізниць*. Технічні умови. ТУ У 24.1-40075815-002:2016.
2. Neuron Networks. Manual. www.statsoft.com.
3. Мостицкий С. Э., Шитиков В. К. (2014) *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва, ДМК Пресс.
4. Дрейпер Н., Смит Г. (2007) *Прикладной регрессионный анализ*. Москва, Вильямс.
5. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. (2001) *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. Москва, Физматлит.
6. Осовский С. (2002) *Нейронные сети для обработки информации*. Москва, Финансы и статистика.

П. М. Руденко, В. С. Гавриш, С. І. Кучук-Яценко,
О. В. Дідковський, Є. В. Антіпін

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СТИКОВОГО КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Проведено аналіз основних параметрів стикового контактного зварювання оплавленням за даними поточних технологічних рапортів, що формуються комп'ютерною системою управління при зварюванні залізничних рейок. Показана можливість розробки моделі передбачення вихідного показника якості зварного стику залізничної рейки — руйнівного навантаження зразка і стріли прогину — за параметрами процесу зварювання різними методами статистичного аналізу, зокрема, кореляційним і регресійним аналізом і нейронними мережами. Розрахунки проводилися за експериментальними даними, отриманими на Київському рейкозварювальному підприємстві при зварюванні рейок на зварювальній машині K1000. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: контактне стикове зварювання оплавленням, статистичні моделі контролю і управління, контроль параметрів процесу, статистичне управління

Поступила в редакцію 12.05.2017