

УДК 658.562:004.8

Н.А. Зубрецкая, к.т.н., С.С. Федин, д.т.н.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Киевский национальный университет технологий и дизайна  
e-mail: zubr\_27@mail.ru, sergey\_fedin@bigmir.net

*В статье разработана нейросетевая модель прогнозирования качества сварных точечных соединений для повышения эффективности использования измерительной информации о параметрах технологических режимов их изготовления.*

**Ключевые слова:** измерительная информация, параметры качества, сварные точечные соединения, нейросетевое моделирование.

**Введение.** Определяющими факторами качества сварных точечных соединений на стадии изготовления являются параметры технологических режимов: сила и длительность импульса сварочного тока  $I_{CB}$  и  $t_{CB}$ ; усилие сжатия электродов  $F_{CB}$ ; ковочное усилие  $F_K$ ; радиус сферы электродов  $R_{Э1}$  и  $R_{Э2}$ , толщина свариваемых деталей  $s_1$  и  $s_2$ . Качество сварного точечного соединения, изготовленного способом контактной точечной сварки (КТС) электродами с цилиндрической рабочей частью, определяют по геометрическим параметрам соединения: диаметру ядра  $d_я$ ; вмятине  $B$ ; величине проплавления  $A_{П}$  [1, 2].

Эффективным подходом к оценке и прогнозированию качества соединений является установление многофакторных зависимостей между средними значениями и коэффициентами вариации геометрических параметров ядра  $d_я$ ,  $B$ ,  $A_{П}$  и параметрами технологических режимов  $I_{CB}$ ,  $t_{CB}$ ,  $F_{CB}$ ,  $F_K$ ,  $R_{Э1}$ ,  $R_{Э2}$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  на основе регрессионного анализа. Однако для создания регрессионной модели по плану полного факторного эксперимента необходимо проведение двух серий из 256 опытов ( $2^8=256$ ) с использованием экспериментальных образцов, что в условиях промышленного производства не всегда возможно в связи с большими затратами материальных и временных ресурсов. Кроме того, высокая трудоемкость регрессионного анализа проявляется при многокритериальном моделировании качества сварных соединений. При этом использование классических методов, направленных на уменьшение числа опытов (дробно-факторный эксперимент, методы отсеивания и т.д.), не всегда позволяет снизить трудоемкость экспериментальных исследований, т.к. приводит к снижению достоверности и полноты информации, необходимой для построения адекватной, информативной и устойчивой модели.

Решение этой проблемы может быть основано на использовании нейросетевого многокритериального моделирования, позволяющего решать задачи при невозможности получения достаточного количества многомерных данных, их высокой стоимости, неполноте, нелинейности, зашумленности и противоречивости. При этом важным является отсутствие значимого различия между результатами выборочных оценок прогнозируемого показателя регрессионной и нейросетевой моделей в условиях ограниченного объема измерительной информации на выбранном уровне значимости.

**Постановка задачи.** Целью статьи является разработка нейросетевой модели прогнозирования качества сварных точечных соединений и проверка гипотезы об адекватности ее применения в условиях ограниченного объема измерительной информации о параметрах технологических режимов.

**Проведение вычислительного эксперимента и разработка многофакторных моделей прогнозирования качества сварных точечных соединений.** С целью установления функциональной зависимости между геометрическими характеристиками неразъемных соединений и совокупностью изменяющихся технологических режимов их изготовления проведены полнофакторные исследования неразъемных сварных точечных соединений. Для разработки математической модели проведен вычислительный эксперимент на основе априорных данных, полученных по результатам выборочного контроля геометрических характеристик выборок из 500-580 опытных соединений, сформированных при различных технологических режимах [2, 3].

На первом этапе экспериментального исследования на основе анализа априорной информации о технологическом процессе изготовления неразъемных сварных точечных соединений образцов из алюминиевого сплава Д16АТ в качестве независимых входных переменных (факторов  $X_1 - X_8$ ) выбраны основные режимы формирования соединений:  $I_{CB}$ ,  $t_{CB}$ ,  $F_{CB}$ ,  $F_K$ ,  $R_{Э1}$ ,  $R_{Э2}$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ , а в качестве

зависимой выходной переменной (отклика  $Y$ ) выбран параметр  $d_n$  и получена многофакторная регрессионная модель, преобразованная для натуральных значений переменных (1)

$$Y = 3,904 - 0,307X_1 + 0,439X_2 - 0,003X_3 - 0,011X_4 + 12,776X_5 + 0,009X_6 + 0,045X_7 + 0,136X_8 \quad (1)$$

Для проверки предположения об отсутствии значимого различия между результатами выборочных оценок прогнозируемого показателя  $Y$  регрессионной и нейросетевой моделей на первом этапе выбирали три выборки данных объемом  $N=18$  фактов (примеров) методом простого случайного бесповторного отбора из множества равномерно распределенных случайных чисел. Случайные выборки №1, №2 и №3 получены из генеральных совокупностей объемом 256, 238 и 220 опытов соответственно. Выборка №1 и выборка, содержащая априорную измерительную информацию о параметрах технологических режимов КТС, необходимую для создания модели нейронной сети, приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Случайная выборка №1 для  $N=18$  из результатов 256 опытов полнофакторного эксперимента

Номер факта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$Y_1$
190	0,8	2	50	50	0,04	32	6	3,5	5,38
159	1,8	0,8	50	50	0,04	50	6	3,5	4,71
206	0,8	2	50	50	0,08	50	3	3,5	5,92
147	1,8	0,8	100	100	0,04	50	6	3,5	4,01
233	1,8	2	100	50	0,08	32	3	3,5	5,30
186	0,8	2	100	50	0,04	32	6	3,5	5,23
171	1,8	0,8	100	50	0,08	32	6	3,5	4,91
81	1,8	2	100	100	0,04	50	3	9	5,15
78	0,8	2	50	50	0,08	50	3	9	6,67
28	0,8	0,8	100	50	0,04	50	6	9	5,61
218	0,8	2	100	50	0,04	50	3	3,5	5,26
40	0,8	0,8	50	100	0,08	32	6	9	5,56
20	0,8	0,8	100	100	0,04	50	6	9	5,06
164	0,8	0,8	100	100	0,08	32	6	3,5	4,67
140	0,8	0,8	100	50	0,08	50	6	3,5	5,39
105	1,8	2	100	50	0,08	32	3	9	6,04
119	1,8	0,8	50	100	0,04	32	3	9	4,61
39	1,8	0,8	50	100	0,08	32	6	9	5,26

При разработке нейросетевой модели в качестве входов и выхода обучающей выборки выбирали параметры  $X_1 - X_8$  и  $Y$  соответственно (табл.2).

Допуск ошибки обучения  $Tol=0,1$  (10%) модели нейронной сети с архитектурой 8:10:1 обусловлен тем, что минимальное, среднее и максимальное относительные значения погрешности аппроксимации регрессионной модели (1) равны соответственно 6,94%, 8,79% и 10,63%. Тестирование модели позволило определить один нераспознанный факт (*Bad fact*) из четырех, что свидетельствует о хороших обобщающих способностях нейронной сети.

Таблица 2

Выборка для создания, обучения и тестирования модели нейронной сети

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$Y_1$
0,8	0,8	50	50	0,04	32	4	3,5	4,13
1,0	0,8	75	50	0,04	32	3	4,2	4,37
0,8	1,0	50	75	0,04	32	5	3,5	4,20
1,0	2,0	75	100	0,06	40	5	5,0	4,35
1,0	1,2	75	100	0,06	40	4	6,0	4,59
1,0	1,2	75	75	0,06	40	4	4,0	4,69
1,2	1,2	100	75	0,06	45	5	7,0	5,55
1,2	1,2	100	75	0,06	45	6	8,0	5,90
1,5	1,2	100	75	0,06	47	6	8,0	5,49
1,2	2,0	75	100	0,06	47	6	8,0	5,29
1,0	1,2	75	75	0,08	40	5	6,0	4,64
1,5	1,5	100	100	0,08	47	5	9,0	6,35
1,8	1,5	100	75	0,06	47	6	9,0	6,29
1,8	1,2	100	75	0,06	40	5	8,0	5,40
1,2	1,2	100	75	0,06	40	4	6,0	4,67
1,2	1,6	100	100	0,06	45	5	8,0	5,20
1,2	1,3	100	100	0,06	50	5	7,0	5,62
1,8	1,6	100	100	0,08	47	6	9,0	6,25

Обученную модель нейронной сети использовали для получения прогнозных оценок диаметра ядра  $Y$  по данным  $X_1 - X_8$  для каждой из случайных выборок №1, №2 и №3 (табл.3).

Таблиця 3

Результаты нейросетевого прогнозирования значения диаметра ядра  $Y$  для трех выборок,  $N=18$

Выборка №1			Выборка №2			Выборка №3		
Номер факта	$Y_1$	$Y_1$ Прогноз	Номер факта	$Y_2$	$Y_2$ Прогноз	Номер факта	$Y_3$	$Y_3$ Прогноз
190	5,38	4,95	230	4,17	4,14	162	4,40	4,57
159	4,71	6,04	36	6,09	4,61	182	3,87	5,40
206	5,92	5,27	196	4,18	4,38	192	4,75	5,73
147	4,01	5,41	46	5,43	4,77	66	5,68	6,18
233	5,30	5,90	194	4,71	4,59	28	6,29	5,65
186	5,23	4,81	37	6,18	5,73	173	4,84	4,73
171	4,91	5,43	174	4,70	4,58	134	5,09	6,27
81	5,15	6,05	67	5,28	5,98	16	6,28	5,68
78	6,67	5,82	162	5,06	5,46	144	5,04	5,57
28	5,61	5,34	172	4,92	5,70	23	5,21	4,59
218	5,26	5,11	29	5,46	5,91	50	5,98	5,66
40	5,56	5,21	199	4,02	5,25	202	5,08	4,29
20	5,06	5,28	123	4,52	6,14	146	4,51	4,79
164	4,67	4,66	101	5,83	4,46	108	5,01	5,24
140	5,39	4,66	226	4,02	4,14	109	5,32	4,45
105	6,04	5,84	131	5,07	6,21	112	5,16	5,26
119	4,61	4,39	112	4,92	4,24	151	5,59	6,18
39	5,26	4,71	202	4,42	6,09	133	4,47	4,35

**Проверка гипотезы об адекватности применения многофакторной нейросетевой модели в условиях ограниченного объема измерительной информации.** Для определения

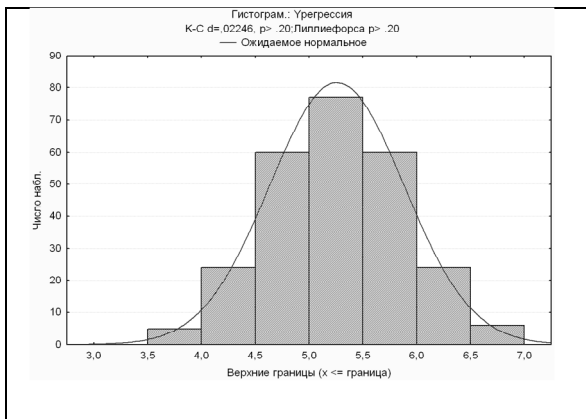


Рис.1. Гистограмма распределения значений диаметра ядра  $Y$  и кривая закона нормального распределения для  $N=256$

значимого различия между значениями выборок и результатами нейросетевого моделирования использовали функцию системы STATISTICA – диаграмму «ящички с усами» типа «среднее, стандартное отклонение, стандартная ошибка», так как значения параметра  $Y$  соответствуют закону нормального распределения (рис.1).

Применение  $t$ -теста для независимых выборок позволило при выбранном уровне значимости  $p=0,05$  в численном и графическом виде однозначно определить отсутствие значимого различия между средними значениями прогнозных и выборочных оценок с учетом их вариации по параметру  $d_n$ .



Рис.2. Результат применения  $t$ -теста для выборки №1 и модели нейронной сети

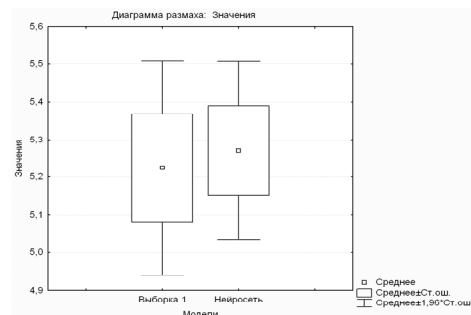


Рис.3. Результат применения диаграммы «ящички с усами» для выборки №1 и модели нейронной сети

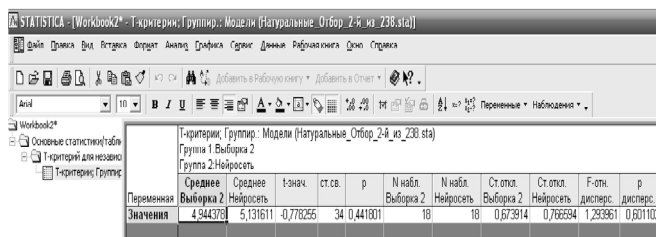


Рис.4. Результат применения *t*-теста для выборки №2 и модели нейронной сети

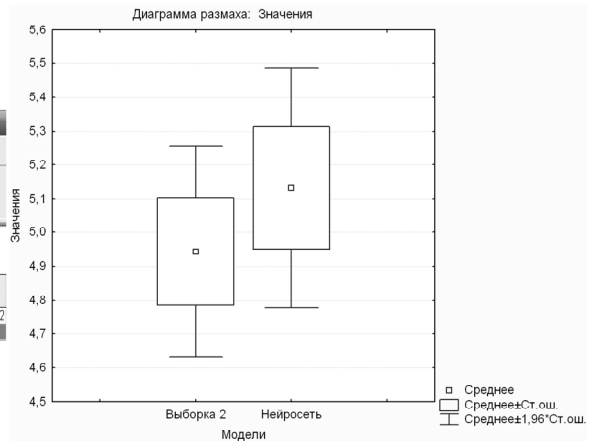


Рис.5. Результат применения диаграммы «ящики с усами» для выборки №2 и модели нейронной сети

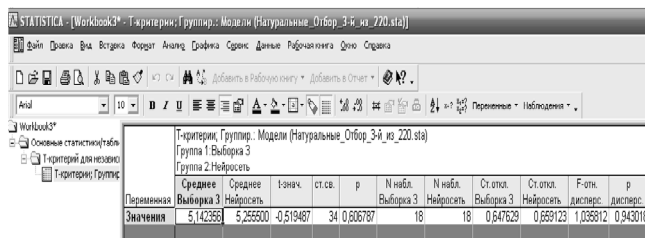


Рис.6. Результат применения *t*-теста для выборки №3 и модели нейронной сети

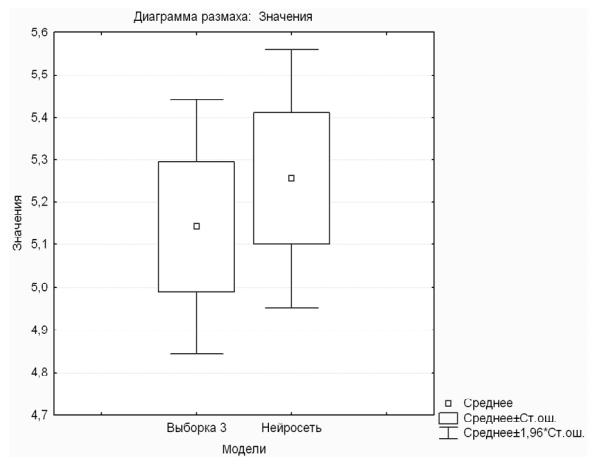


Рис.7. Результат применения диаграммы «ящики с усами» для выборки №3 и модели нейронной сети

Анализ полученных результатов для выборок №1 (рис.2, рис.3), №2 (рис.4, рис.5) и №3 (рис.6, рис.7) показывает отсутствие значимого различия между  $Y_1$  и  $Y_{1\text{Прогноз}}$ ,  $Y_2$  и  $Y_{2\text{Прогноз}}$ ,  $Y_3$  и  $Y_{3\text{Прогноз}}$  (см. табл. 3), так как интервалы стандартных ошибок выборок и нейросетевой модели пересекаются и уровень значимости  $p$  для средних значений и дисперсий намного превышает предельное значение  $p=0,05$ .

**Вывод**

Проведенный статистический анализ с использованием *t*-теста для независимых случайных выборок №1, №2 и №3 показал отсутствие значимого различия между средними значениями отклика, полученными по регрессионной модели и нейросетевой модели с учетом их вариации. Таким образом, для получения достоверных прогнозных оценок диаметра ядра сварных точечных соединений, альтернативой создания регрессионной модели, требующей проведения 256-ти опытов, является многофакторная модель нейронной сети, обеспечивающая прогноз с заданной точностью на основе данных сокращенного объема выборки  $N=18$ .

**Список литературных источников**

1. Козловский С.Н. Основы теории и технологии программированных режимов контактной точечной сварки: монография / С. Н. Козловский. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 260 с.
2. Бурмистров В.П. Обеспечение качества неразъемных соединений и полуфабрикатов / Бурмистров В.П. – Л.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
3. Федин С.С., Зубрецкая Н.А. Многофакторное прогнозирование качества изготовления неразъемных соединений / С.С. Федин, Н.А. Зубрецкая // Системы обработки информации. – 2011. – 8(98). – С. 130 – 134.