

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ В ПОКРЫТИИ ПРИ РЕМОНТНОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ

А.М. КУЩИЙ, А.Ф. ВЛАСОВ

Донбас. гос. машиностроительная акад. 84313, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шакинова, 72.

E-mail: dgma@dgma.donetsk.ua

Применение высокопроизводительных электродов при заварке дефектов отливок и ремонте станин остается актуальным до настоящего времени. Повысить производительность процесса наплавки возможно использованием экзотермических смесей в покрытии. В работе исследована возможность оптимизации плавления электродного покрытия с железным порошком, содержащего окалину от прокатного производства и алюминиевого порошка. Предложена статистическая модель, позволяющая оптимизировать содержание экзотермической смеси в покрытии для минимизации потерь электродного металла. Библиогр. 6, рис. 6.

*Ключевые слова:* дуговая сварка и наплавка, ремонт, покрытые электроды, экзотермическая смесь, плавление электродов, моделирование

При заварке дефектов отливок и трещин станин металлообрабатывающих станков ручная дуговая сварка и наплавка покрытыми электродами остается одним из эффективных способов ремонта. Повышение производительности при этом может быть достигнуто введением в состав покрытия электродов до 70 % железного порошка при одновременном увеличении его толщины. Введение в электродные покрытия значительного количества железного порошка приводит к снижению их пластичности и затруднению процесса из-за неравномерности плавления стержня и покрытия, образованию так называемого козырька, при котором неудовлетворительно формируется сварочный шов и гаснет дуга.

Для обеспечения равномерности плавления электродного стержня и покрытия целесообразно использовать эффект экзотермических реакций [1]. При термитной сварке стремятся к достижению более высоких температур, поэтому термит-

ные смеси изготавливаются на основе оксида железа. Результаты расчетов термичности окалины и ее составляющих при протекании реакции взаимодействия с алюминиевым порошком показали, что при небольшой разнице при тепловыделении, при использовании прокатной окалины вместо окалины от кузнечно-прессового производства восстанавливается большее количество железа, что положительно сказывается не только на равномерности плавления электродного покрытия и стержня, но и на качестве наплавленного металла и позволяет выбрать в качестве основных компонентов для протекания экзотермической реакции окалину от прокатного производства и алюминиевый порошок [2].

Целью данной работы является оптимизация параметров процесса плавления электродного покрытия с экзотермической смесью, состоящей из окалины от прокатного производства и алюминиевого порошка.

Regr. Coefficients; Var.: Ан; R-sqr=.93047; Adj.:.39357 (Spreadsheet9)						
2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual=2,487993						
DV: Ан						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(4)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	6,91111	3,160179	1,71089	0,016227	-3,36734	14,18079
(1)Q(L)	0,13958	0,158751	0,65771	0,044665	-0,33635	0,54517
Q(Q)	-0,00083	0,002399	0,21521	0,008401	-0,00614	0,00718
(2)D(L)	1,02500	3,175017	2,35885	0,007776	-1,32586	16,30466
D(Q)	-0,01603	0,959621	-1,80210	0,014588	-4,39367	0,93500
<b>1L by 2L</b>	0,00901	0,039433	-2,50422	0,006647	-0,20823	<b>0,01073</b>

Рис. 1. Анализ план-матрицы эксперимента (модель 1)

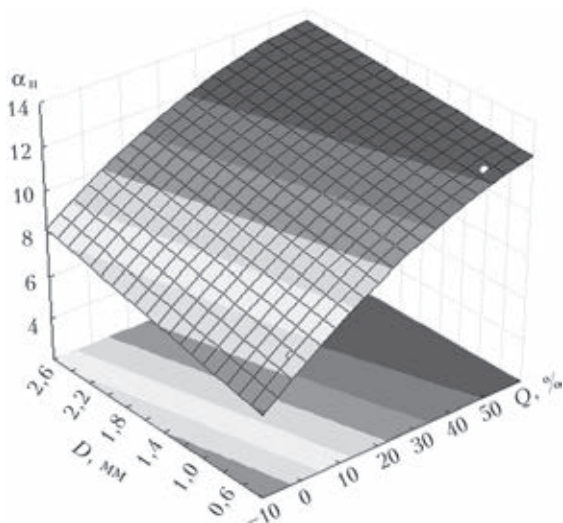


Рис. 2. Зависимость коэффициента наплавки  $\alpha_n$  от количества экзотермической смеси  $Q$  и толщины электродного покрытия  $D$

Моделирование процесса плавления осуществляли при помощи программной системы Statistica 6 [3–6]. Экспериментальная реализация планов осуществлялась путем определения коэффициентов наплавки и коэффициентов потерь электродного металла. Изменяемые параметры: содержание экзотермической смеси в покрытии электродов  $N_{эс}$ , количество частей окалины по отношению к частям алюминиевого порошка  $A$  и толщина электродного покрытия  $D$ . Наибольшее распространение получили эксперименты, в которых факторы варьируются на двух уровнях, т.е. эксперименты типа  $2^k$ . Увеличение числа факторов и уровней варьирования резко увеличивает количество опытов, поэтому использовали ортогональные планы второго порядка  $2^2$  [6]. Были построены математические модели, описывающие влияние на коэффициент наплавки и коэффициент потерь электродного металла следующих пар факторов: содержание экзотермической смеси в покрытии электродов  $N_{эс}$  и толщины электродного покрытия  $D$ , количество частей окалины по отношению к частям алюминиевого порошка  $A$  и толщины электродного покрытия  $D$ .

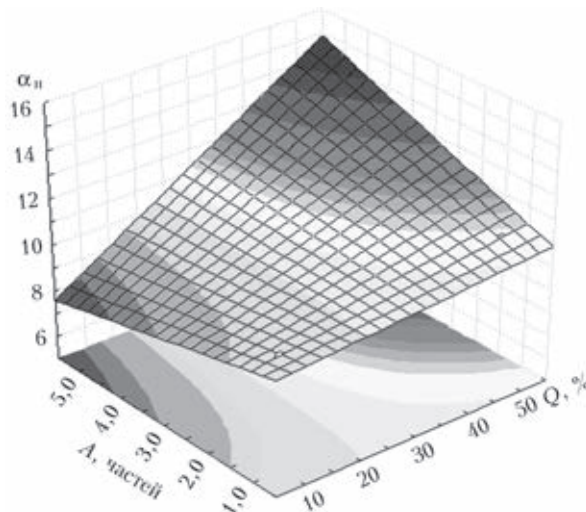


Рис. 4. Зависимость коэффициента наплавки  $\alpha_n$  от количества экзотермической смеси  $Q$  и количества частей окалины  $A$

**Модель 1.** Факторы: количество экзотермической смеси  $Q$  и толщина покрытия электрода  $D$ . Отклик — коэффициент наплавки  $\alpha_n$ . Анализ план-матрицы эксперимента представлен на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что статистически значимые эффекты (уровень  $p < 0,05$ ) имеют все члены модели. Здесь же приведена величина достоверности аппроксимации  $R\text{-sqr} = 0,93047$  — общее качество модели хорошее. Расчет коэффициентов регрессии представлен в первом столбце,  $t(4)$  — наблюдаемые значения критерия Стьюдента,  $p$  — значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, два последних столбца — интервалы для коэффициентов.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\alpha_n = 6,911111 + 0,139500Q - 0,000827Q^2 + 1,025000D - 0,016667D^2 - 0,009000QD.$$

Поверхность отклика представлена на рис. 2.

**Модель 2.** Факторы: количество экзотермической смеси  $Q$  и количество частей окалины по отношению к алюминию  $A$ ; отклик — коэффициент наплавки  $\alpha_n$ . Анализ план-матрицы эксперимента представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что статистически значимые эффекты (уровень  $p < 0,05$ ) имеют все члены мо-

Regr. Coefficients; Var.:Ан; R-sqr=.98857; Adj:0, (Spreadsheet18)						
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=6,450383						
DV: Ан						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	10,20625	15,07188	-0,410578	0,007089	-54,1536	41,77727
(1)Q(L)	0,00437	0,33136	0,709099	0,042940	-0,8196	1,28948
Q(Q)	-0,78361	0,00426	-0,381872	0,007280	-0,0152	0,01192
(2)A(L)	-0,60625	10,02538	1,030793	0,003785	-21,5711	42,23932
A(Q)	5,74601	1,70238	-0,937811	0,004175	-7,0142	3,82122
<b>1L by 2L</b>	0,02563	0,09134	-0,467067	0,006723	-0,3333	<b>0,24802</b>

Рис. 3. Анализ план-матрицы эксперимента (модель 2)

Regr. Coefficients; Var.: Потери; R-sqr=,89417; Adj:,0763 (Spreadsheet22)						
2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual=5,442128						
DV: Потери						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(4)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	29,72222	4,517067	5,74895	0,004538	13,4270	38,50976
(1)Q(L)	-0,47500	0,227022	-1,82022	0,001428	-1,0435	0,21709
Q(Q)	0,00542	0,003116	1,91427	0,012811	-0,0027	0,01462
(2)D(L)	-2,50000	3,661317	-0,84040	0,044798	-13,2424	7,08848
D(Q)	0,16667	1,036221	0,79161	0,047288	-2,0567	3,69729
1L by 2L	0,05000	0,058321	0,75016	0,049487	-0,1182	0,20567

Рис. 5. План-матрица эксперимента и ее реализация (модель 3)

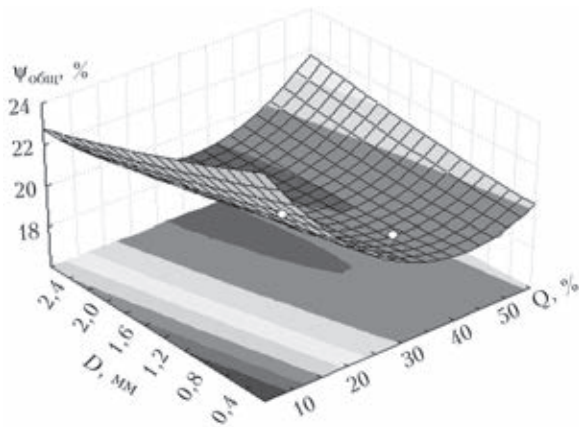


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь электродного металла  $\Psi_{\text{общ}}$  от толщины покрытия  $D$  и количества экзотермической смеси  $Q$

дели. Здесь же приведена величина достоверности аппроксимации  $R\text{-sqr} = 0,98857$  — общее качество модели хорошее. Расчет коэффициентов регрессии представлен в первом столбце,  $t(3)$  — наблюдаемые значения критерия Стьюдента,  $p$  — значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, два последних столбца — интервалы для коэффициентов. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\alpha_n = 10,20625 + 0,00437Q - 0,78361Q^2 - 0,60625A + 5,7460A^2 + 0,02563AQ.$$

Поверхность отклика представлена на рис. 4.

**Модель 3.** Факторы: количество экзотермической смеси  $Q$  и толщина электродного покрытия  $D$ ; отклик — коэффициент потерь  $\Psi_{\text{общ}}$ . Анализ план-матрицы эксперимента представлен на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что статистически значимые эффекты (уровень  $p < ,05$ ) имеют все члены модели. Здесь же приведена величина достоверности аппроксимации  $R\text{-sqr} = 0,89417$  — общее качество модели хорошее. Расчет коэффициентов регрессии представлен в первом столбце,  $t(3)$  — наблюдаемые значения критерия Стьюдента,  $p$  — значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, два последних столбца — интервалы для коэффициентов. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\Psi_{\text{общ}} = 29,72222 - 0,47500Q + 0,00542Q^2 - 2,50000D + 0,16667D^2 + 0,05000QD.$$

Поверхность отклика представлена на рис. 6.

Анализ полученных моделей показал, что оптимальным является содержание экзотермической смеси в количестве 35...40 % при толщине покрытия 1,6 мм на сторону и соотношении окалины к алюминиевому порошку 3:1. При таких параметрах коэффициент потерь электродного металла имеет наименьшее значение, а коэффициент наплавки соответствует заданному значению при расчете оптимального содержания экзотермической смеси.

### Выводы

Предложена статистическая модель, анализ которой показывает, что при толщине покрытия 1,6 мм на сторону и соотношении окалины к алюминиевому порошку 3:1 оптимальным является содержание экзотермической смеси в количестве 35...40 %. При таких параметрах коэффициент потерь электродного металла имеет наименьшее значение, а коэффициент наплавки соответствует заданному значению при расчете оптимального содержания экзотермической смеси.

1. Власов А.Ф., Макаренко Н.А., Куций А.М. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии // Автомат. сварка. — 2014. — С. 151–155.
2. Власов А.Ф., Куций А.М. Усовершенствование высокопроизводительных электродов для ручной дуговой сварки и наплавки // Междунар. науч.-техн. конф. «Университетская наука-2013»: Сб. тез. докл. в 3-х т. — Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. — 122 с.
3. Яцерицын П.И. Планирование эксперимента в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1985. — 288 с.
4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Уч. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 496 с.
6. Боровиков В.П. STATISTICA: Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. — СПб.: Питер, 2001. — 656 с.

Поступила в редакцию 20.03.2015