

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ В ПОКРЫТИИ

Куций А. М., Васильцов С. И.

В статье рассмотрены результаты расчетов термичности окалины и ее составляющих при протекании реакции взаимодействия с алюминиевым порошком, которые 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. Определение наилучших параметров процесса плавления проводилось при помощи метода математического моделирования, в процессе которого были выполнены выбор и составление плана эксперимента, организация эксперимента и проведение измерений отклика объекта исследований, анализ результатов исследований, включая построение математических моделей объекта исследований, определение оптимальных условий, поиск экстремума функции (поверхности) отклика в программной системе Statistica.

У статті розглянуто результати розрахунків термічності окалини та її складових при протіканні реакції взаємодії з алюмінієвим порошком, які показали, що при невеликій різниці при тепловиділенні, при використанні прокатної окалини замість окалини від ковальсько-пресового виробництва відновлюється більшу кількість заліза, що позитивно позначається не тільки на рівномірності плавлення електродного покриття і стрижня, а й на якості наплавленого металу і дозволяє вибрати в якості основних компонентів для протікання екзотермічної реакції окалину від прокатного виробництва і алюмінієвий порошок. Визначення найкращих параметрів процесу плавлення проводилося за допомогою методу математичного моделювання, в процесі якого були виконані вибір і складання плану експерименту, організація експерименту і проведення вимірювань відгуку об'єкта досліджень, аналіз результатів досліджень, включаючи побудову математичних моделей об'єкта досліджень, визначення оптимальних умов, пошук екстремуму функції (поверхні) відгуку в програмній системі Statistica.

The article describes the results of the calculations of the heat effect of scale and its components during the reaction with aluminum powder, which showed that the small difference in the heat dissipation, using mill scale instead of the scale of forging and pressing production is recovering more iron, which has a positive impact not only on uniform melting of the electrode coating and the core, but also the quality of the weld metal and enables to select as basic components for the exothermic reaction scale from rolling mills and aluminum powder. Determining the optimal parameters of the melting process was conducted using a mathematical modeling method in which were formed the selection and preparation experiment plan, the organization and conduct of the experiment measuring the response of the object of research, analysis of the results of research, including the construction of mathematical models of the object of studies to determine the optimal conditions, the search function extremum (surface) in response software system Statistica.

Куций А. М.

ст. препод. каф. ОиТСП ДГМА
sp@dgma.donetsk.ua

Васильцов С. И.

инженер «Славтяжмаш», г. Славянск

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621. 791.75

Куций А. М., Васильцов С. И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЭКЗОТЕРИЧЕСКОЙ СМЕСИ В ПОКРЫТИИ

Плавление покрытия также, как и электродного стержня, происходит за счет теплоты дуги, теплоты химических реакций, протекающих при плавлении покрытия, и теплоты, выделяемой током в стержне электрода [1]. Опыт показывает, что участок электрода, нагреваемый до высокой температуры, невелик и сравнительно мало зависит от времени плавления электрода. Его размеры стабилизируются через 30 с после начала плавления. Представление о распределении температур в покрытии по его сечению (на торцевой части электрода) дает кольцевой выступ из нерасплавившегося покрытия, образующийся в виде «козырька» на торце электрода [2]. Для обеспечения равномерности плавления электродного стержня и покрытия целесообразно использовать эффект экзотермических реакций [3]. При термитной сварке стремятся к достижению более высоких температур, поэтому термитные 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 [4].

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

Определение наилучших параметров процесса плавления проводилась при помощи метода математического моделирования (выбор и составление плана эксперимента, организация эксперимента и проведение измерений отклика объекта исследований, анализ результатов исследований, включая построение математических моделей объекта исследований, определение оптимальных условий, поиск экстремума функции (поверхности) отклика) [5–7]. Моделирование осуществляли при помощи программной системы Statistica 6 [8]. Экспериментальная реализация планов осуществлялась путем определения коэффициентов наплавки и коэффициентов потерь электродного металла. Изменяемые параметры: содержание экзотермической смеси в покрытии электродов (Нэ.с.), количество частей окалины по отношению к частям алюминиевого порошка (А) и толщина электродного покрытия (δ). 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 число опытов. Поэтому использовались ортогональные планы второго порядка 2^2 [8]. Были построены математические модели, описывающие влияние на коэффициент наплавки и коэффициент потерь электродного металла следующих пар факторов: содержание экзотермической смеси в покрытии электродов (Нэ.с.) и толщины электродного покрытия (δ), количество частей окалины по отношению к частям алюминиевого порошка (А) и толщины электродного покрытия (δ).

Модель 1. Факторы: количество экзотермической смеси (Q) и толщина покрытия электрода (D). Отклик – коэффициент наплавки (α_n).

Основные характеристики плана эксперимента:

- центрально-композиционный план факторного эксперимента – 2^2 ;

- количество факторов – 2;
- количество экспериментов – 10;
- коэффициент ротатабельности – 1,4142;
- коэффициент ортогональности – 1,0781;
- порядок проведения эксперимента – рандомизированный.

Анализ план-матрицы эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1

Анализ плана эксперимента

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.	6,911111	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
1L by 2L	0,00901	0,039433	-2,50422	0,006647	-0,20823	0,01073

Из табл. 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:

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

Контурные кривые и поверхность отклика представлены на рис. 1, 2.

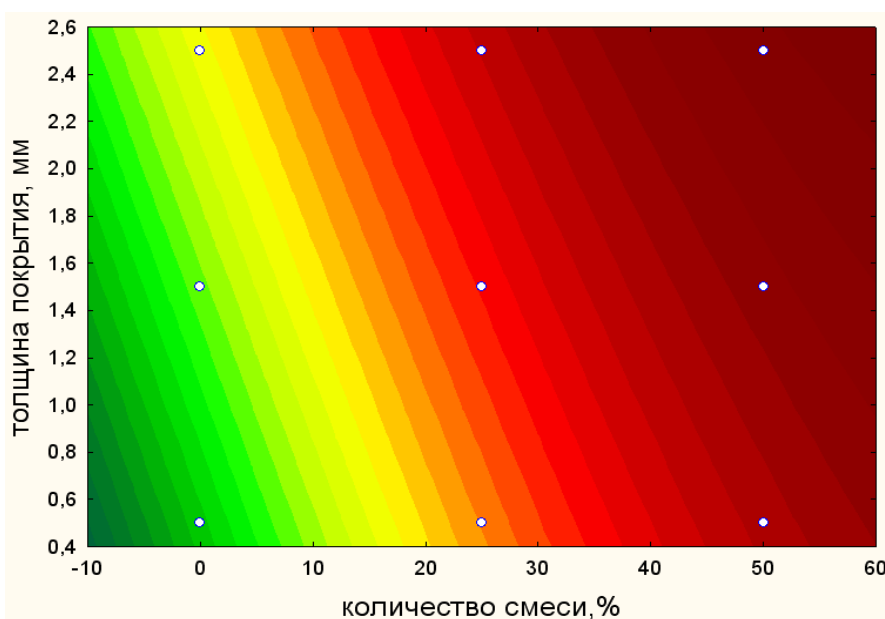


Рис. 1. Контурные кривые отклика коэффициента наплавки от количества экзотермической смеси и толщины электродного покрытия

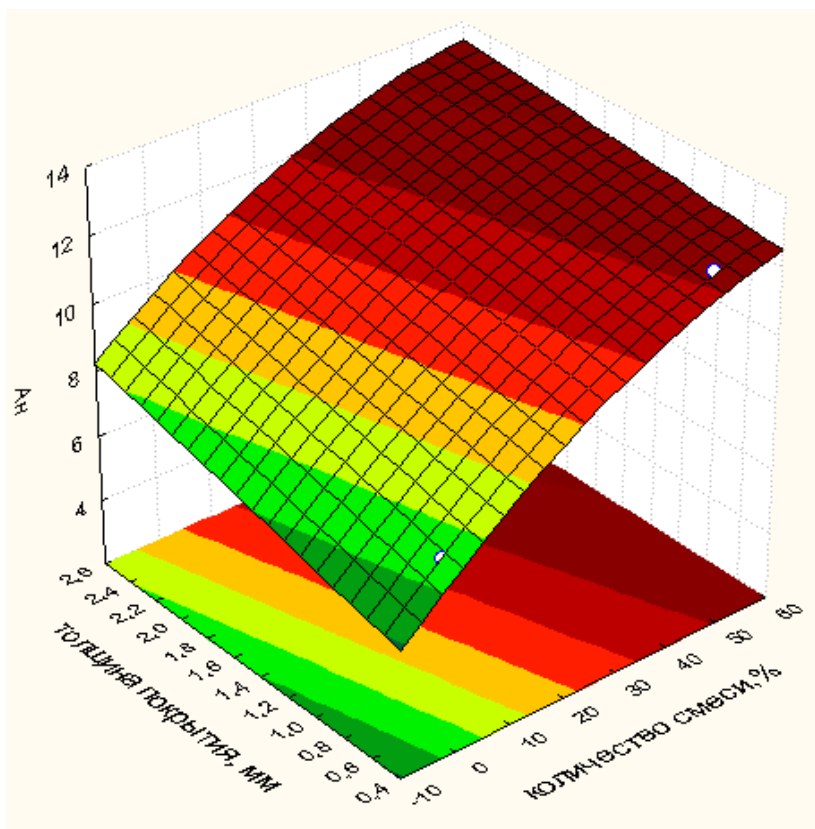


Рис. 2. Зависимость коэффициента наплавки α_n от количества экзотермической смеси и толщины электродного покрытия

Модель 2. Факторы: количество экзотермической смеси (Q) и количество частей окалины по отношению к алюминию (A); отклик – коэффициент наплавки (α_n).

Основные характеристики плана эксперимента:

- центрально-композиционный план факторного эксперимента – 22;
- количество факторов – 2;
- количество экспериментов – 10;
- коэффициент ротатабельности – 1,4142;
- коэффициент ортогональности – 1,0781;
- порядок проведения эксперимента – рандомизированный.

Анализ план-матрицы эксперимента представлен в табл. 2.

Таблица 2

Анализ плана эксперимента

Regr. Coefficients; Var.: α_n ; R-sq=.98857; Adj:0, (Spreadsheet18) 2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=6,450383 DV: α_n						
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
1L by 2L	0,02563	0,09134	-0,467067	0,006723	-0,3333	0,24802

Из табл. 2 видно, что статистически значимые эффекты (уровень $p < 0,05$) имеют все члены модели. Здесь же приведена величина достоверности аппроксимации $R\text{-sq} = 0,98857$ – 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:

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

Поверхность и контурные кривые представлены на рис. 3, 4.

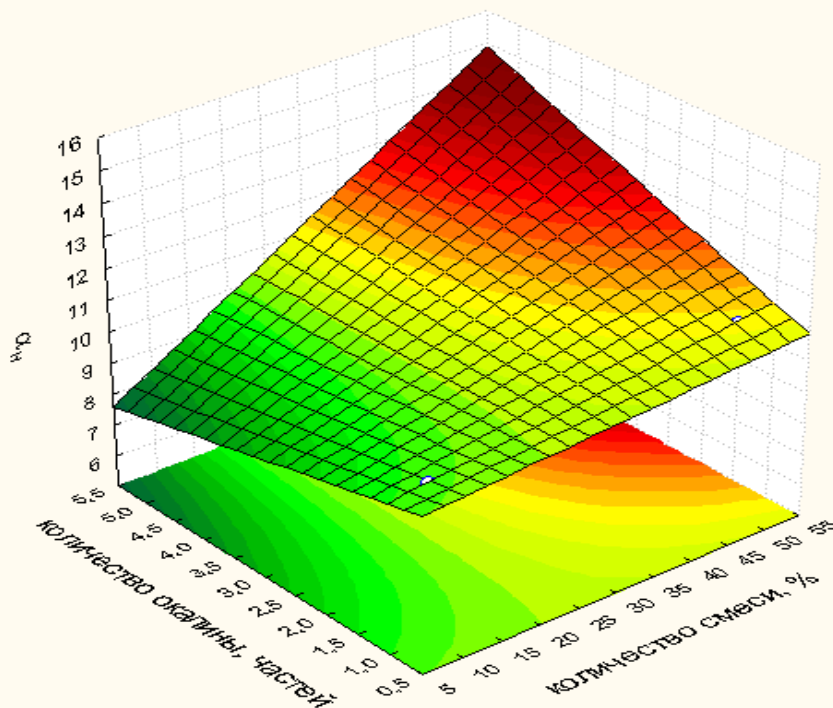


Рис. 3. Зависимость коэффициента наплавки α_n от количества экзотермической смеси и количества частей окалины

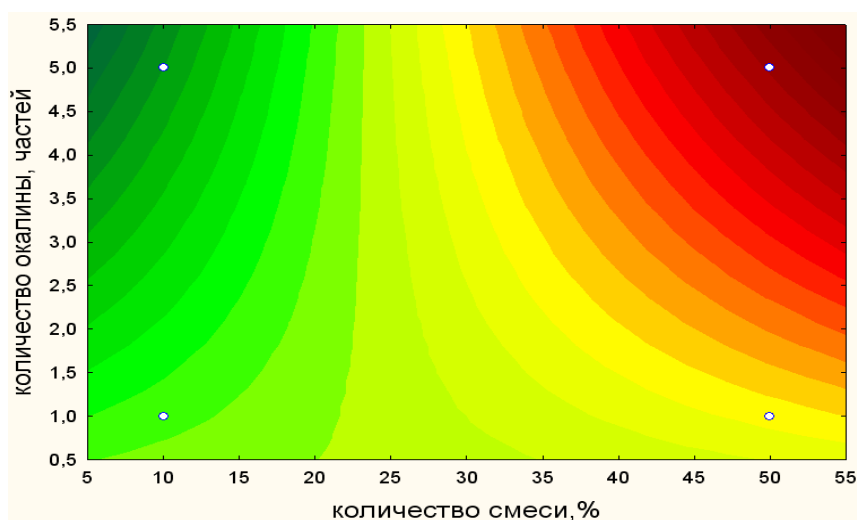


Рис. 4. Контурные кривые отклика коэффициента наплавки от количества экзотермической смеси и толщины электродного покрытия

Модель 3. Факторы: количество экзотермической смеси (Q) и толщина электродного покрытия (D); отклик – коэффициент потерь ($\Psi_{\text{общ}}$).

Основные характеристики плана эксперимента:

- центрально-композиционный план факторного эксперимента – 2^2 ;
- количество факторов – 2;
- количество экспериментов – 10;
- коэффициент ротатабельности – 1,4142;
- коэффициент ортогональности – 1,0781;
- порядок проведения эксперимента – рандомизированный.

Анализ план-матрицы эксперимента представлен в табл. 3.

Таблица 3

План-матрица эксперимента и ее реализация

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. Limit	+95, % Cnf. Limit
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

Из табл. 3 видно, что статистически значимые эффекты (уровень $p < 0,05$) 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:

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

Контурные кривые и поверхность отклика представлены на рис. 5, 6.

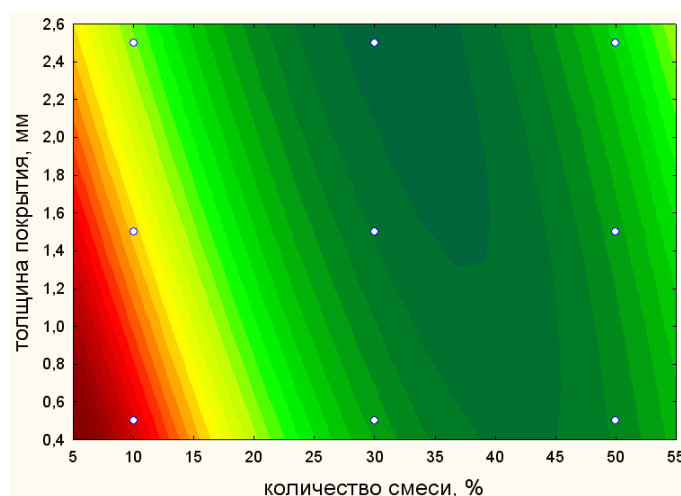


Рис. 5. Контурные кривые отклика коэффициента наплавки от количества экзотермической смеси и толщины электродного покрытия

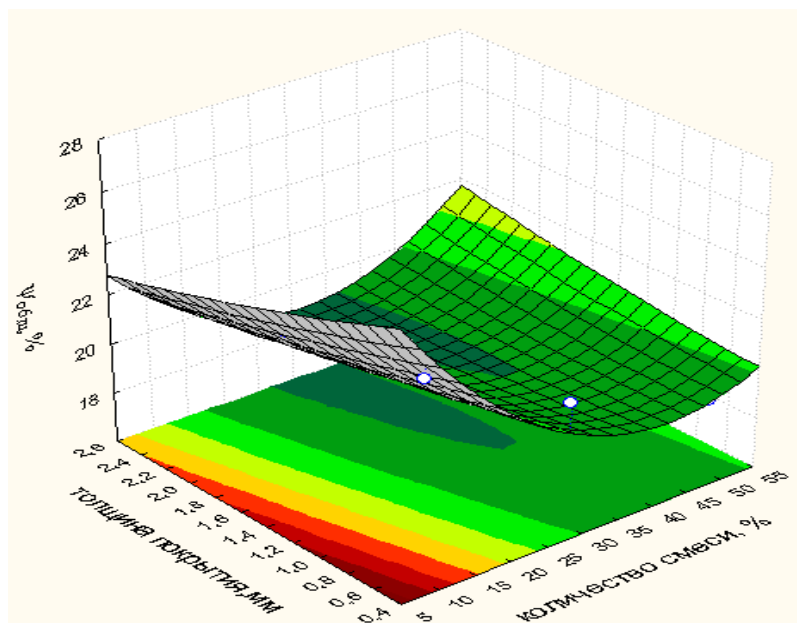


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь электродного металла от толщины покрытия и количества экзотермической смеси

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 алюминиевого порошка 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В. В. Теория сварочных процессов / В. В. Фролов. – М. : Высш. школа, 1988. – 560 с.
2. Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1964. – 256 с.
3. Власов А.Ф. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии / Н. А. Макаренко, А. М. Куций // Автоматическая сварка. – 2014. – №6. – С. 151–155.
4. Власов А.Ф. Усовершенствование высокопроизводительных электродов для ручной дуговой сварки и наплавки / А.Ф. Власов, А.М. Куций // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2013» Сб. тезисов докладов в 3-х томах. – Мариуполь ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – С. 122.
5. Яцерицын П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Яцерицын. – М. : Машиностроение, 1985. – 288 с.
6. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике : учебник для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 496 с.
8. Боровиков В. П. STATISTICA : искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.