

# RESEARCH ON PARAMETERS ON PROCESS ANODIZING OF ALUMINUM PARTS FROM TRANSPORT AND AGRICULTURAL ENGINEERING

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ПРОЦЕСА АНОДИРАНЕ НА ДЕТАЙЛИТЕ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ ОТ ТРАНСПОРТНАТА И ЗЕМЕДЕЛСКАТА ТЕХНИКА

Pr. Ass. Kadikyanov G., PhD<sup>1</sup>  
Faculty of Transport – University of Rousse<sup>1</sup>

**Abstract:** One of the major disadvantages in anodizing of aluminum parts is increasing the roughness of the working surface. This disadvantage limits the use of the technique. It is imperative that the analysis of the technological process for the preparation of an anode for the coating to be sought to resolve this problem.

In this work a regression analysis and optimization are defined: the adequacy of the model, the regression equations, the degree of influence of the different input factors on the output parameters. The optimal values of input factors are determined.

**Keywords:** ALUMINUM PARTS, ANODIZING, REGRESSION ANALYSIS, OPTIMIZATION

### 1. Въведение

В миналото се е доказало [1, 8], че естествения оксиден слой винаги присъства при алуминия и неговите сплави и процеса може да бъде подсилен чрез анодни процеси. В същността си това представлява анодно третиране на участъци от повърхността във вана от разредена киселина чрез контролиран ел. ток. По такъв начин повърхността на анода се превръща в алуминиев оксид. Анодните покрития осигуряват по-висока износоустойчивост, но по-голяма степен на такава устойчивост може да се постигне чрез използване на „твърдо анодиране“. Твърдите оксидни покрития до 75  $\mu\text{m}$  дебелина могат да се образуват върху всички обикновени алуминиеви сплави, чрез подобряване на тяхната твърдост и абразивна устойчивост.

Един от основните недостатъци при анодирането на детайли от алуминиеви сплави е повишаване на грапавостта на работните повърхности. Този недостатък ограничава приложението на метода.

Това налага изследване влиянието на основните фактори и ефектите им на взаимодействие върху изходните параметри с цел определяне възможността за целенасочено управление на процеса. Наложително е анализирани на технологичния процес за получаване на анодно покритие за да се търсят възможности за решаване на този проблем.

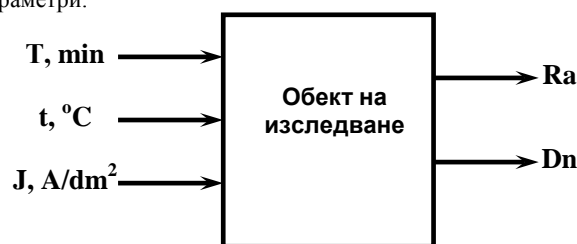
### 2. Методика на изследването

При планиране на експерименталните изследвания от съществено значение е избора на изходните параметри, които носят по-голяма информация за количествените и качествените показатели на покритието. Известно е, че параметрите на оптимизация са реакция на въздействието на факторите, които определят поведението на избраната система. [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Основните параметри, характеризиращи основните свойства на анодното покритие са неговата дебелина и грапавостта на работната повърхност. За подобряване условията на работа на детайлите от алуминиеви сплави е необходимо постигане на минимална грапавост при определена дебелина на покритието. Съществен проблем в случая се явява факта, че с повишаване дебелината на покритието се увеличава и неговата грапавост. Това налага при многофакторното планиране на експеримента с последващо оптимизиране на изходните параметри да се вземе компромисно решение. Ето защо в зависимост от условията на работа на двоичите

алуминиеви – желязовъглеродни сплави е необходимо да се подхожда диференцирано по отношение избора дебелината на покритието.

На тази база е разработен кибернетичен модел (фиг.1), който отчита специфичните особености на процеса и изискванията относно качествените показатели на покритието. За целта са определени входните фактори и изходните параметри.



Фиг. 1. Кибернетична схема на обекта на изследване

Входните управляеми фактори, включени в кибернетичния модел са:

$X_1$  – Време за получаване на покритието  $T$ , min  
 $X_2$  – (първоначална) Температура на електролита  $t$ , °C;  
 $X_3$  – Плътност на тока  $J$ ,  $\text{A}/\text{dm}^2$ ;

Изходните параметри на модела са:  
 $Y_1$  – Грапавост на покритието  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$ ;  
 $Y_2$  – Дебелина на покритието  $D_n$ ,  $\mu\text{m}$ ;

Планът на многофакторния експеримент е от типа “ $B_m$ ”, при  $m=3$ . Планът на експеримента се състои от ядро на плана, което представлява пълен факторен експеримент (ПФЕ) от вида  $2^3$ . При този тип многофакторен експеримент уравнението на регресия има вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2, \quad (3.1)$$

където  $b_i$  са коефициентите на регресия.

Изборът на нивата на вариране на входните фактори е извършен въз основа на предварителни изследвания за влиянието на отделните фактори на процеса за получаване на анодно покритие върху изходните му параметри.

Съображенията при избора на фактора  $T$ , време за определяне на долното и горното ниво се базират на факта, че при продължителност за нанасяне на покритието от 10 min интензивността на нарастване на дебелината е 1,8  $\mu\text{m}/\text{min}$ . При по-малка продължителност производителността на процеса

рязко намалява което е икономически неизгодно. При продължителност на процеса от 30 min интензивността на нарастване на покритието е 2,9 μm/min. След трийсетата минута грапавостта на покритието не се изменя съществено, но интензивността на отлагане на покритието намалява до 2,4 μm/min. Това ни дава основание да приемем и за горно ниво продължителността на процеса да е от 30 min.

Въз основа на подобен анализ на резултатите предварителните изследвания. са подбрани и интервалите на вариране за температурата на електролита и плътността на тока.

За нива на вариране на фактора t, температура на електролита в прианодния електролитен слой са подбрани за долно ниво -4 °C, а за горно ниво 4 °C, а за J, плътност на тока са избрани за долно ниво 2 A/dm<sup>2</sup>, а за горно ниво 6 A/dm<sup>2</sup>.

В табл. 1. са показани нивата на вариране и основните нива на входните фактори.

Таблица 1.

Стойности на основното ниво и нивата на вариране на факторите

Фактори	Променливи величини		
	t, min	T, °C	J, A/dm <sup>2</sup>
Размерност	min	°C	A/dm <sup>2</sup>
Основно ниво (X <sub>1</sub> = 0)	20	0	4
Интервал на вариране	10	4	2
Горно ниво (X <sub>1</sub> = +1)	30	4	6
Долно ниво (X <sub>1</sub> = -1)	10	-4	2
Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>

### 3. Резултати от изследването

Резултатите от регресионния експеримент са получени чрез използване на компютърен софтуер за статистическа обработка "STATISTICA 7".

В табл. 2. са показани разширената матрица на експеримента и получените опитни стойности за Y<sub>1</sub> и Y<sub>2</sub>.

Таблица 2.

Разширена матрица на експеримента и получени опитни стойности за Y<sub>1</sub> и Y<sub>2</sub>

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	x1	x2	x3	x12	x13	x23	x11	x22	x33	y1	y2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.6	85
2	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	2.1	42
3	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1.6	79
4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1.5	40
5	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2.3	63
6	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1.9	27
7	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1.4	73
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1.2	34
9	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	73
10	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1.7	26
11	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2.5	44
12	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	1.3	57
13	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1.8	52
14	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1.5	49

При изменението на управляемите фактори X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> и X<sub>3</sub> в интервала от -1 до +1, параметърът Y<sub>1</sub> се изменя в широки граници (от 1,2 μm до 2,6 μm). Това означава, че обектът се поддава на управление, а с това и на оптимизация. Най-добрият резултат по отношение на Y<sub>1</sub> (1,2 μm) се получава в 8<sup>-ми</sup> опит, при който X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> и X<sub>3</sub> са на долно ниво. Най-лошият резултат се получава в опит № 1, където X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> и X<sub>3</sub> са на горно ниво. При същото изменение на управляемите фактори, параметърът Y<sub>2</sub> се изменя също в голям диапазон (от 26 μm до 85 μm). Най-добрият резултат за Y<sub>2</sub> се получава в опит № 1. Това налага да се използват методите за компромисна оптимизация, например минимизиране на Y<sub>1</sub> при ограничаване на Y<sub>2</sub> в определени граници.

В табл. 3. са показани коефициентите на регресия, коефициентите на детерминираност и стойността на критерия на Фишер за параметъра Y<sub>1</sub>.

Таблица 3.

Коефициенти на регресия, коефициент на детерминираност и критерий на Фишер за параметъра Y<sub>1</sub>

Regression Summary for Dependent Variable: y1 (Spreadsheet1.sta)						
R= .98599731 R <sup>2</sup> = .97219069 Adjusted R <sup>2</sup> = .90961975						
F(9,4)=15.537 p<.00897 Std.Error of estimate: .13229						
N=14	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(4)	p-level
Intercept			1.787500	0.084317	21.19973	0.000029
x1	0.298977	0.083381	0.150000	0.041833	3.58569	0.023050
x2	0.876998	0.083381	0.440000	0.041833	10.51801	0.000462
x3	0.259113	0.083381	0.130000	0.041833	3.10759	0.035956
x12	0.133706	0.083381	0.075000	0.046771	1.60357	0.184074
x13	0.000000	0.083381	0.000000	0.046771	0.00000	1.000000
x23	0.000000	0.083381	0.000000	0.046771	0.00000	1.000000
x11	0.066587	0.089831	0.062500	0.084317	0.74125	0.499700
x22	0.119857	0.089831	0.112500	0.084317	1.33425	0.253015
x33	-0.146492	0.089831	-0.137500	0.084317	-1.63075	0.178278

където R<sup>2</sup> е коефициентът на детерминираност;

R – коефициентът на корелация;

B – коефициентите на регресия;

F(9; 5) – критерият на Фишер със степени на свобода 9 и 5;

p – равнището на значимост за критерия на Фишер;

t(4) – критерийте на Стюдънт със степен на свобода 4;

p-level – равнищата на значимост за критерия на Стюдънт.

В по-тъмните клетки са отбелязани значимите коефициенти.

С помощта на критерия на Стюдънт се установява, че всички фактори указва съществено влияние на параметъра Y<sub>1</sub>, а липсват взаимодействия между факторите.

Коефициентът на детерминираност (определеност) R<sup>2</sup> = 0,97, от което следва, че 97 % от изменението на Y<sub>1</sub> се дължи на управляемите фактори и само 3 % - на неуправляемите фактори, което е незначително. След изключване на членовете с незначими коефициенти уравнението на регресия за Y<sub>1</sub> има вида:

$$Y_1 = 1,79 + 0,15.X_1 + 0,44.X_2 + 0,13.X_3 \quad (3.2)$$

Критерият на Фишер при F(9;4) = 15,537 на което отговаря нивото p < 0,009 < 0,05, тоест регресионният модел е адекватен.

В табл. 4. са показани коефициентите на регресия, коефициентите на детерминираност и стойността на критерия на Фишер за параметъра Y<sub>2</sub>.

Таблица 4.

Коефициенти на регресия, коефициент на детерминираност и критерий на Фишер за параметъра Y<sub>2</sub>

Regression Summary for Dependent Variable: y2 (Spreadsheet1.sta)						
R= .98833801 R <sup>2</sup> = .97681203 Adjusted R <sup>2</sup> = .92463909						
F(9,4)=18.723 p<.00630 Std.Error of estimate: 5.2583						
N=14	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(4)	p-level
Intercept			47.56250	3.351539	14.19124	0.000143
x1	0.934080	0.076138	20.40000	1.662829	12.26825	0.000254
x2	-0.100734	0.076138	-2.20000	1.662829	-1.32305	0.256383
x3	0.238099	0.076138	5.20000	1.662829	3.12720	0.035280
x12	0.005119	0.076138	0.12500	1.859099	0.06724	0.949620
x13	0.035835	0.076138	0.87500	1.859099	0.47066	0.662403
x23	0.127982	0.076138	3.12500	1.859099	1.68092	0.168073
x11	0.047420	0.082028	1.93750	3.351539	0.57809	0.594186
x22	0.071895	0.082028	2.93750	3.351539	0.87646	0.430261
x33	0.071895	0.082028	2.93750	3.351539	0.87646	0.430261

От табл. 4. се вижда, че всички квадратични коефициенти (b<sub>11</sub>, b<sub>22</sub>, b<sub>33</sub>) са незначими, тоест повърхността на отклика е по-близка до линейна. Коефициентът на определеност R<sup>2</sup> = 0,98, т.е. 98 % от изменението на Y<sub>2</sub> се дължи на управляемите фактори. След изключване на незначимите фактори уравнението на регресия за параметъра Y<sub>2</sub> добива вида:

$$Y_2 = 47,56 + 20,4.X_1 + 0,454.X_3 \quad (3.3)$$

Вижда се, че върху параметъра  $Y_2$  оказват влияние всички управляеми фактори, освен  $X_2$ . Критерият на Фишер  $F(9;4) = 18,72$  на което съответства ниво на значимост  $p < 0,006 < 0,05$ , т. е. моделът е адекватен (значим).

Интерес представлява определяне влиянието на отделните фактори върху изходните параметри. Това се извършва чрез последователно изключване на факторите един по един и отразяването на това върху коефициента на определеност  $R^2$ , при който за изключения фактор това намаление е най-силно.

В табл. 5., 6. и 7. са показани резултатите от регресионния анализ на  $Y_1$  при изключен съответно фактори  $X_1, X_2$  и  $X_3$ .

Таблица 5.

Резултати от регресионния анализ на  $Y_1$  при изключен фактор  $X_1$

Regression Summary for Dependent Variable: y1 (Spreadsheet1.sta)						
R= .92795811 R <sup>2</sup> = .86110626 Adjusted R <sup>2</sup> = .77429767						
F(5,8)=9.9196 p<.00281 Std.Error of estimate: .20905						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			1.811538	0.122994	14.72864	0.000000
x2	0.876998	0.131764	0.440000	0.066107	6.65583	0.000160
x3	0.259113	0.131764	0.130000	0.066107	1.96650	0.084802
x23	0.000000	0.131764	0.000000	0.073910	0.00000	1.000000
x22	0.135224	0.138126	0.126923	0.129647	0.97899	0.356260
x33	-0.131126	0.138126	-0.123077	0.129647	-0.94932	0.370250

Таблица 6.

Резултати от регресионния анализ на  $Y_1$  при изключен фактор  $X_2$

Regression Summary for Dependent Variable: y1 (Spreadsheet1.sta)						
R= .41570496 R <sup>2</sup> = .17281062 Adjusted R <sup>2</sup> = ----						
F(5,8)=.33426 p<.87864 Std.Error of estimate: .51017						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			1.830769	0.300155	6.099407	0.000290
x1	0.298977	0.321557	0.150000	0.161329	0.929779	0.379686
x3	0.259113	0.321557	0.130000	0.161329	0.805809	0.443644
x13	0.000000	0.321557	0.000000	0.180371	0.000000	1.000000
x11	0.094247	0.337083	0.088462	0.316391	0.279595	0.786881
x33	-0.118833	0.337083	-0.111538	0.316391	-0.352533	0.733546

Таблица 7.

Резултати от регресионния анализ на  $Y_1$  при изключен фактор  $X_3$

Regression Summary for Dependent Variable: y1 (Spreadsheet1.sta)						
R= .94157446 R <sup>2</sup> = .88656247 Adjusted R <sup>2</sup> = .81566402						
F(5,8)=12.505 p<.00130 Std.Error of estimate: .18892						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			1.734615	0.111153	15.60563	0.000000
x1	0.298977	0.119079	0.150000	0.059743	2.51075	0.036328
x2	0.876998	0.119079	0.440000	0.059743	7.36487	0.000079
x12	0.133706	0.119079	0.075000	0.066795	1.12284	0.294069
x11	0.032781	0.124828	0.030769	0.117166	0.26261	0.799485
x22	0.086051	0.124828	0.080769	0.117166	0.68936	0.510094

От сравнението на коефициента на определеност  $R^2$  в трите таблици се вижда, че най-силно влияние върху параметъра  $Y_1$  указва фактора  $X_2$  с  $R^2 = 0,17$ , след това са съответно  $X_1$  и  $X_3$ .

Същите операции е необходимо да се извършат и за параметъра  $Y_2$ .

В табл. 8. са показани резултатите от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_1$ .

Таблица 8.

Резултати от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_1$

Regression Summary for Dependent Variable: y2 (Spreadsheet1.sta)						
R= .31789823 R <sup>2</sup> = .10105928 Adjusted R <sup>2</sup> = ----						
F(5,8)=.17987 p<.96250 Std.Error of estimate: 23.151						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			48.30769	13.62076	3.546623	0.007547
x2	-0.100734	0.335213	-2.20000	7.32094	-0.300508	0.771451
x3	0.238099	0.335213	5.20000	7.32094	0.710292	0.497703
x23	0.127982	0.335213	3.12500	8.18506	0.381793	0.712556
x22	0.082838	0.351398	3.38462	14.35754	0.235738	0.819559
x33	0.082838	0.351398	3.38462	14.35754	0.235738	0.819559

Стойността на коефициента на определеност при изключен фактор  $X_1$  е  $R^2 = 0,101$ .

В табл. 9. са показани резултатите от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_2$ .

Таблица 9.

Резултати от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_2$

Regression Summary for Dependent Variable: y2 (Spreadsheet1.sta)						
R= .97252553 R <sup>2</sup> = .94580590 Adjusted R <sup>2</sup> = .91193458						
F(5,8)=27.924 p<.00007 Std.Error of estimate: 5.6843						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			48.69231	3.344350	14.55957	0.000000
x1	0.934080	0.082306	20.40000	1.797534	11.34888	0.000003
x3	0.238099	0.082306	5.20000	1.797534	2.89285	0.020111
x13	0.035835	0.082306	0.87500	2.009705	0.43539	0.674789
x11	0.064011	0.086280	2.61538	3.525255	0.74190	0.479360
x33	0.088486	0.086280	3.61538	3.525255	1.02557	0.335104

Стойността на коефициента на определеност при изключен фактор  $X_2$  е  $R^2 = 0,946$ .

В табл. 10. са показани резултатите от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_3$ .

Таблица 10.

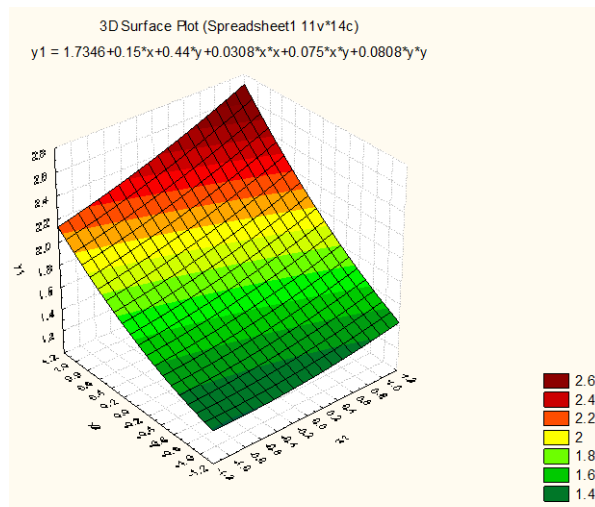
Резултати от регресионния анализ на  $Y_2$  при изключен фактор  $X_3$

Regression Summary for Dependent Variable: y2 (Spreadsheet1.sta)						
R= .94763088 R <sup>2</sup> = .89800429 Adjusted R <sup>2</sup> = .83425697						
F(5,8)=14.087 p<.00086 Std.Error of estimate: 7.7982						
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			48.69231	4.588035	10.61289	0.000005
x1	0.934080	0.112914	20.40000	2.465995	8.27252	0.000034
x2	-0.100734	0.112914	-2.20000	2.465995	-0.89213	0.398360
x12	0.005119	0.112914	0.12500	2.757066	0.04534	0.964949
x11	0.064011	0.118366	2.61538	4.836213	0.54079	0.603378
x22	0.088486	0.118366	3.61538	4.836213	0.74757	0.476120

Стойността на коефициента на определеност при изключен фактор  $X_3$  е  $R^2 = 0,898$ .

От сравняването на коефициентите на определеност  $R^2$  за трите последователни изключения следва, че най-силно влияние върху  $Y_2$  има факторът  $X_1$ , след това  $X_3$ , а най-слабо –  $X_2$ .

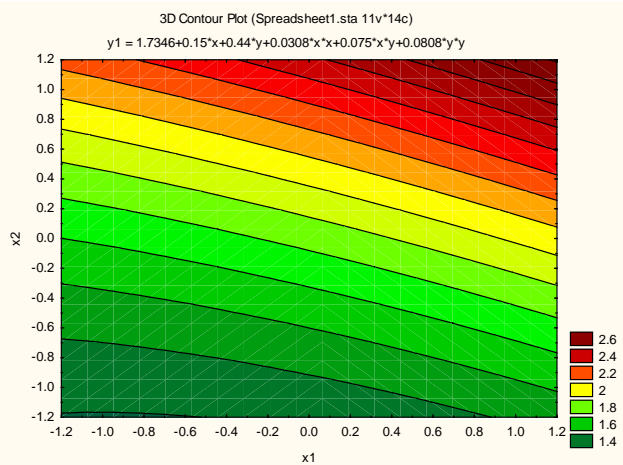
На фиг. 2. е показана повърхнината на отклика на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$  ( $X_3 = 0$ ).



Фиг. 2. Повърхнина на отклика на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$  ( $X_3 = 0$ )

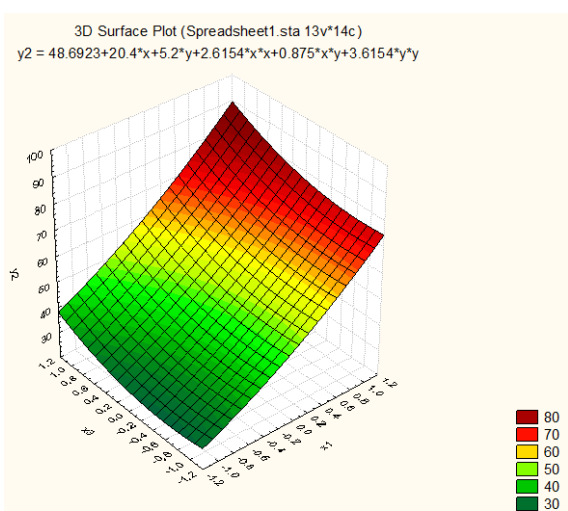
От повърхнините на еднакъв отклик следва, че повърхнината на отклика е екстремална и при  $X_1 = -1$  и  $X_2 = -1$   $Y_1$  има минимум. Останалите повърхнини на отклика за  $Y_1$  не е необходимо да се показват, тъй като  $X_3$  не оказва съществено влияние.

На фиг. 3. са показани линиите на еднакъв отклик на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$ .



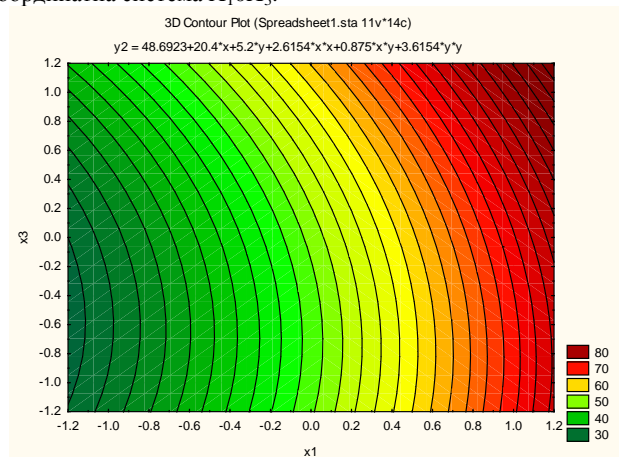
Фиг. 3. Линии на еднакъв отклик на  $Y_1$  в координатна система  $X_1Ox_2$

На фиг. 4. е показана повърхнината на отклика на  $Y_2$  в координатна система  $X_1Ox_3$ .



Фиг. 4. Повърхнина на отклика на  $Y_2$  в координатна система  $X_1Ox_3$

На фиг. 5. са показани линиите на еднакъв отклик на  $Y_2$  в координатна система  $X_1Ox_3$ .



Фиг. 5. Линии на еднакъв отклик на  $Y_2$  в координатна система  $X_1Ox_3$

След многофакторния анализ е необходимо да се извърши оптимизиране на изходните параметри. За целта е използвана програмата за оптимизация "MATHCAD".

От анализа на априорната информация следва, че дебелината на анодното покритие –  $Y_2$  е фактора с по-голямо значение. Ако се разгледат експлоатационните свойства на анодното покритие и по-точно, за кои работни повърхности е

предназначено, изискванията към него ще са в някои случаи за максимална дебелина, а в други за минимална. Например, ако то се използва като покритие върху челото на буталата, дебелината му трябва да е максимална, за да се постигне по-добра топлинна изолация. Ако анодното покритие бъде използвано върху повърхността, например на каналите за буталните пръстени, тогава дебелината му трябва да е минимална, за да не попречи на топлинния пренос от буталото към буталните пръстени, а само да служи като износостойчиво покритие.

Що се отнася до изходния параметър  $Y_1$  (грапавост на покритието) е необходимо стойностите му да клонят към минимум, независимо от това за кои работни повърхности е използвано покритието. Например, когато то се използва за покриване на челото на буталата за намаляване на нагарообразуването и появата на прегрети микрограпавини, които са центрове на самовъзпламеняване, грапавостта трябва да е минимална. Когато покритието се използва за повърхността на каналите за буталните пръстени, грапавостта също трябва да е минимална, за да се увеличи противозадирната устойчивост.

С оглед на гореказаното е необходимо да се извърши компромисна оптимизация на изходните параметри  $Y_1$  и  $Y_2$ . От зоните на еднакъв отклик за  $Y_2$  на фиг. 5. са подобрени ограничителни условия за значимите за  $Y_2$  -  $X_1$  и  $X_3$ .

За първия случай, когато се търси минимална грапавост при минимална дебелина на покритието, те са  $X_1 < -0,8$ ;  $X_1 > -1$  и  $X_3 < 0,2$ ;  $X_3 > -1$ .

Резултатите от извършената оптимизация са следните:

Стойност на коефициентите на модела

$a_0 = 1.787$      $a_1 = 0.15$      $a_2 = 0.44$      $a_3 = 0.13$   
 $a_{12} = 0.075$      $a_{13} = 0$      $a_{23} = 0$      $a_{11} = 0.0625$      $a_{22} = 0.112$      $a_{33} = -0.137$

Общ вид на модела

$f(x, y, z) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot z + a_{12} \cdot x \cdot y + a_{13} \cdot x \cdot z + a_{23} \cdot y \cdot z + a_{11} \cdot x^2 + a_{22} \cdot y^2 + a_{33} \cdot z^2$

Начална точка

$x = 0.5$      $y = 0.5$      $z = 0.5$      $f(x, y, z) = 2.175$

Given

Ограничения тип неравенство

$x < -0.8$      $x > -1$      $y > -1$      $y < 1$      $z < 0.2$      $z > -1$

Минимализиране на функцията на отклика

$F_{min} = \text{Minimize}(f, x, y, z)$      $F = \begin{pmatrix} -0.8 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$

Стойност на функцията в търсената точка

$f(F_0, F_1, F_2) = 1.172$

Вижда се, че минималната грапавост в този случай е  $R_a = 1,172 \mu\text{m}$ , която се получава при:  $X_1 = -0,8$ ;  $X_2 = -1$  и  $X_3 = -1$ .

Оптимални натурални стойности на входните фактори спрямо  $Y_1$  при налагане на ограничителните условия са:

$X_1 (T) = 12 \text{ min};$   
 $X_2 (t) = -4 \text{ }^\circ\text{C};$   
 $X_3 (J) = 2 \text{ A/dm}^2.$

От зоните на еднакъв отклик за  $Y_2$  от фиг. 5. са подобрени ограничителни условия за значимите за  $Y_2$  -  $X_1$  и  $X_3$  при втория случай, когато се търси минимална грапавост при максимална дебелина на покритието. Те са  $X_1 < 1$ ;  $X_1 > 0,8$  и  $X_3 < 1$ ;  $X_3 > 0,6$ .

Резултатите от извършената оптимизация са следните:

Стойност на коефициентите на модела

$$a_0 = 1.787 \quad a_1 = 0.15 \quad a_2 = 0.44 \quad a_3 = 0.13$$

$$a_{13} = 0 \quad a_{23} = 0 \quad a_{11} = 0.0625 \quad a_{22} = 0.112 \quad a_{33} = -0.137$$

$$a_{12} = 0.075$$

Общ вид на модела

$$f(x, y, z) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot z + a_{12} \cdot x \cdot y + a_{13} \cdot x \cdot z + a_{23} \cdot y \cdot z + a_{11} \cdot x^2 + a_{22} \cdot y^2 + a_{33} \cdot z^2$$

Начална точка

$$x = 0.5 \quad y = 0.5 \quad z = 0.5 \quad f(x, y, z) = 2.175$$

Given

Ограничения тип неравенство

$$x < 1 \quad x > 0.8 \quad y > -1 \quad y < 1 \quad z < 1 \quad z > 0.6$$

Минимизиране на функцията на отклика

$$F := \text{Minimize}(f, x, y, z) \quad F = \begin{pmatrix} 0.8 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Стойност на функцията в търсената точка

$$f(F_0, F_1, F_2) = 1.552$$

Вижда се, че минималната грапавост в този случай е  $R_a = 1,552 \mu\text{m}$ , която се получава при:  $X_1 = 0,8$ ;  $X_2 = -1$  и  $X_3 = 1$ .

Оптимални натурални стойности на входните фактори спрямо  $Y_1$  при налагане на ограничителните условия са:

$$X_1 (T) = 28 \text{ min};$$

$$X_2 (t) = -4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$X_3 (J) = 6 \text{ A/dm}^2.$$

#### 4. Изводи

Чрез извършените регресионен анализ и оптимизация са определени: адекватността на модела, уравненията на регресия, степента на влияние на отделните входни фактори върху изходните параметри.

Определени са и оптималните стойности на входните фактори спрямо изходните параметри а именно:

1. Когато се търси минимална грапавост при минимална дебелина на покритието оптималните натурални стойности на входните фактори спрямо грапавостта на покритието  $Y_1$  при налагане на ограничителните условия са:

$$X_1 (T) = 12 \text{ min};$$

$$X_2 (t) = -4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$X_3 (J) = 2 \text{ A/dm}^2.$$

Минималната грапавост в този случай е  $R_a = 1,172 \mu\text{m}$

2. Когато се търси минимална грапавост при максимална дебелина на покритието оптимални натурални стойности на входните фактори спрямо грапавостта на покритието  $Y_1$  при налагане на ограничителните условия са:

$$X_1 (T) = 28 \text{ min};$$

$$X_2 (t) = -4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$X_3 (J) = 6 \text{ A/dm}^2.$$

Минималната грапавост в този случай е  $R_a = 1,552 \mu\text{m}$

След получаването на оптималните стойности на факторите спрямо изходните параметри те могат да бъдат използвани за извършване на изследванията за доказване на подобряването на свойствата на работните повърхнини на детайлите от алуминиева сплав.

#### 5. Литература

1. Бестек Т., Бренек Е. И др. Корозия автомобилей и ее предотвращение. Москва, „Транспорт“, 1985
2. Деликостов, Т. и др., 2006. Многокритериално оптимизиране на параметрите на качеството при подфлюсово наваряване с различни електродни материали. Международна научна конференция “ТРАНСПОРТ 2006”, ВТУ “Тодор Каблешков”, София.
3. Колев, Ж. “Изследване на комбинирана технология за възстановяване на чугунени детайли от земеделската и автотракторната техника” – Дисертация за присъждане на образователна и научна степен ”доктор”, Русе, 2009.
4. Любенов, Д. „Изследване технико-икономическите показатели на възстановени детайли от земеделската и автотракторната техника” - Дисертация за присъждане на образователна и научна степен ”доктор”, Русе, 2010.
5. Любенов, Д., И.А. Митев, Д.Л. Бекана. Изследване и оптимизиране режимите на наваряване на износени детайли от земеделската и автотракторната техника. НАУЧНИ ТРУДОВЕ на РУ, 2009, том, Русенски университет, 2009, ISBN 1311-3321
6. Митков Ат., Теория на експеримента кратък терминологичен речник, Русенски Университет „Ангел Кънчев”, 2010.
7. Митков Ат., Теория на експеримента, Университетски издателски център при РУ “Ангел Кънчев” 2010, Русе.
8. Bertolini, G. Extra- and intra-European Union exchanges of recovered materials and products. Resources Policy, Volume 29, Issues 3-4, September-December 2003, Pages 153-164