

## Оптимизиране параметрите на процеса на автоматично електродъгово наваряване на износени детайли от чугун

Даниел Бекана, Живко Колев

**Optimization of rebuilding worn-out cast iron parts by CO<sub>2</sub> shielded arc welding process using Electrode Wire with Diameter 0.8 mm:** In this research parameters of Carbon Dioxide shielded arc welded Deposition of worn out cast iron parts from vehicles and agricultural machines have been studied. For this aim Computer Programs for Statistics and Optimization have been used. Optimum parameters of this process are given.

**Key words:** Optimization process; CO<sub>2</sub> shielded Arc Welded Deposition; Arc Welded Deposition parameters

### ВЪВЕДЕНИЕ

Разгледаният по-долу материал е част от проведено изследване на технология за възстановяване на износени цилиндрични чугунени детайли от земеделската и автотракторната техника чрез автоматично електро дъгово наваряване с електродна тел марка 08Г2С с диаметър  $\Phi = 0,8 \text{ mm}$  [1, 2].

Обект на настоящото изследване е процесът на наваряване на чугунени детайли с диаметър на електродния тел  $d_T = 0,8 \text{ mm}$ . Проведен е многофакторен експеримент, като е използвана метода на планирането на от многофакторен експеримент [3].

### Възстановяване на износени чугунени детайли

На фиг.1 е показана кибернетичната схема на обекта на изследване (процеса на автоматично електродъгово наваряване на износени детайли от чугун в защитна среда от въглероден диоксид). Резултатите от многофакторния експеримент са получени с помощта на програмата „STATISTIQS”.



Фиг. 1. Кибернетична схема на обекта на изследване

Входните управляеми фактори, включени в кибернетичния модел са:

$X_1$  - напрежение на наваряване  $U_H, V$ ;  $X_2$  - стъпка на наваряване  $S_H, \text{mm}/\text{min}^{-1}$ ;  $X_3$  - скорост на подаване на електродния тел  $V_T, \text{m}/\text{min}$ .

Изходните параметри на модела са:  $Y_1$  – коефициент на неравномерност на макро неравностите  $K_{H.M}, \%$ ;  $Y_2$  – дебелина на навареното покритие  $a, \text{mm}$ .

Входните управляеми фактори с неизменящи се стойности са:

Изместване на електродния тел от зенита на образеца,  $l = 2 \text{ mm}$ ; дебит на защитния газ,  $Q_{CO_2} = 20 \text{ l}/\text{min}$ ; обороти на детайла,  $n = 0,79 \text{ min}^{-1}$ ; диаметър на детайла,  $D = 50 \text{ mm}$ ; излаз на електродния тел,  $l_T = 12 \text{ mm}$ .

В табл.1 са показани нивата на вариране на входните фактори.

Таблица 1.

#### Нива на вариране на факторите

Фактори	$X_1 (U_H), V$	$X_2 (S_H), \text{mm}/\text{min}^{-1}$	$X_3 (V_T), \text{m}/\text{min}$
Основно ниво	23	5,8	5,90
Горно ниво	25	6,4	6,35
Долно ниво	21	5,3	5,45

В табл.2 са показани разширената матрица на експеримента и получените опитни стойности за  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Таблица 2.

Разширена матрица на експеримента и получени опитни стойности за  $Y_1$  и  $Y_2$

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$Y_1$	$Y_2$
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	16,61	3,49
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	15,36	3,77
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	43,82	3,93
4	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	19,34	2,99
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	30,43	4,57
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	6,73	3,89
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	71,44	4,24
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18,10	3,51
9	-1	-0,025	0	0,025	0	0	1	0,00625	0	28,12	3,57
10	1	-0,025	0	-0,025	0	0	1	0,00625	0	17,85	3,64
11	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	8,07	3,84
12	0	1	0	0	0	0	0	1	0	21,08	3,24
13	0	-0,025	-1	0	0	0,025	0	0,00625	1	8,80	3,36
14	0	-0,025	1	0	0	-0,025	0	0,00625	1	16,23	3,73

При изменението на управляемите входни фактори  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  в интервала от -1 до +1, параметърът  $Y_1$  се изменя в широки граници (от 6,73 % до 71,44 %). Това означава, че обектът се поддава на управление, а с това и на оптимизация. Най-добрият резултат по отношение на  $Y_1$  (6,73 %) се получава в 6-ти опит, при който  $X_1$  и  $X_3$  са на горно ниво а  $X_2$  – на долно ниво. Най-лошият резултат се получава в опит №7, където  $X_2$  и  $X_3$  са на горно ниво а  $X_1$  - на долно ниво. При същото изменение на управляемите фактори, параметърът  $Y_2$  се изменя в не голям диапазон (от 2,99 mm до 4,57 mm). Най-добрият резултат за  $Y_2$  се получава в опит №4, а най-лошият – в опит №5.

В табл.3 и 4 са показани коефициентите на регресия, коефициентите на определеност и стойностите на критерия на Фишер за изходните параметри  $Y_1$  и  $Y_2$ . С по-тъмен шрифт са отбелязани значимите коефициенти а с по-светъл шрифт – незначимите.

Таблица 3.

Коефициенти на регресия  $B$ , коефициент на определеност  $R^2$  и критерий на Фишер  $F$  за параметъра  $Y_1$  при  $\alpha = 0,2$

N = 14	R = 0,984, R <sup>2</sup> = 0,968, F(9, 4) = 13,363, p < 0,012		
	B	t(4)	p - ниво
$b_0$	<b>11,413</b>	<b>3,253</b>	<b>0,0313</b>
$X_1$	<b>-11,337</b>	<b>-6,515</b>	<b>0,0029</b>
$X_2$	<b>9,658</b>	<b>5,550</b>	<b>0,0052</b>
$X_3$	<b>3,913</b>	<b>2,249</b>	<b>0,0878</b>
$X_1 \cdot X_2$	<b>-6,647</b>	<b>-3,416</b>	<b>0,0269</b>
$X_1 \cdot X_3$	<b>-6,414</b>	<b>-3,297</b>	<b>0,0300</b>
$X_2 \cdot X_3$	2,650	1,945	0,2449
$X_1^2$	<b>11,812</b>	<b>3,368</b>	<b>0,0281</b>
$X_2^2$	3,162	0,901	0,4185
$X_3^2$	1,342	0,383	0,7215

където R е коефициент на корелация;

R<sup>2</sup> - коефициент на детерминираност;

F(9, 4) - критерий на Фишер със степени на свобода 9 и 4;

p - равнище на значимост за критерия на Фишер;

B – коефициенти на регресия;

t(4) – стойности на критерия на Стюдънт със степен на свобода 4;

p – ниво на значимост за критерия на Стюдънт.

Коефициентът на детерминираност (определеност)  $R^2 = 0,97$ , от което следва, че 97 % от изменението на  $Y_1$  се дължи на управляемите фактори и само 3 % - на неуправляемите фактори, което е незначително.

Критерият на Фишер при  $F(9, 4) = 13,36$  на което отговаря на ниво от  $p < 0,0119 < p_{\text{табл.}}$ , т.е. регресионният модел е адекватен.

Уравнението на регресия за  $Y_1$  има вида:

$$Y_1 = 1141 - 1134X_1 + 966X_2 + 391X_3 - 665X_1X_2 - 641X_1X_3 + 265X_2X_3 + 1181X_1^2 + 316X_2^2 + 134X_3^2 \quad (1)$$

Уравнението на регресия за  $Y_1$  след изключване на незначимите коефициенти е следното:

$$Y_1 = 1141 - 1134X_1 + 966X_2 + 391X_3 - 665X_1X_2 - 641X_1X_3 + 1181X_1^2 \quad (2)$$

Таблица 4

Коефициенти на регресия  $B$ , коефициент на определеност  $R^2$  и критерий на Фишер  $F$  за параметъра  $Y_2$  при  $\alpha = 0,2$

N = 14	R = 0,910, R <sup>2</sup> = 0,829, F(9,4) = 2,150, p < 0,240		
	B	t(4)	p - ниво
$b_0$	3,4414	18,0214	0,00006
$X_1$	-0,2008	-2,1200	0,10134
$X_2$	-0,1650	-1,7421	0,15646
$X_3$	0,2398	2,6315	0,06456
$X_1 \cdot X_2$	-0,1602	-1,5129	0,20485
$X_1 \cdot X_3$	0,0937	-0,8853	0,42600
$X_2 \cdot X_3$	-0,0459	-0,4335	0,68702
$X_1^2$	0,1594	0,8349	0,45076
$X_2^2$	0,0986	0,5159	0,63311
$X_3^2$	0,0994	0,5206	0,63017

Коефициентът на детерминираност  $R^2 = 0,83$ , от което следва, че 83 % от изменението на  $Y_2$  се дължи на управляемите фактори и 17 % - на неуправляемите фактори.

Критерият на Фишер при  $F(9, 4) = 2,15$  на което отговаря нивото  $p < 0,240 < p_{\text{табл.}}$ , т.е. регресионният модел е адекватен.

Уравнението на регресия за  $Y_2$  има вида:

$$Y_2 = 3,44 - 0,201X_1 - 0,165X_2 - 0,240X_3 - 0,160X_1X_2 - 0,094X_1X_3 - 0,046X_2X_3 + 0,159X_1^2 + 0,099X_2^2 + 0,099X_3^2 \quad (3)$$

Уравнението на регресия за  $Y_2$  след изключване на незначимите коефициенти е следното:

$$Y_2 = 3,44 - 0,201X_1 - 0,165X_2 - 0,240X_3 \quad (4)$$

Таблица 5.

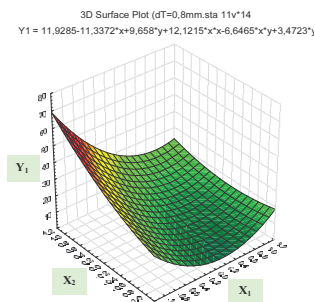
Ранжиране на входните фактори, според степента им на влияние им върху изходните параметри

Изходен параметър	$Y_1$	$Y_2$
Подредяне на входните фактори	1	$X_1$
	2	$X_2$
	3	$X_3$

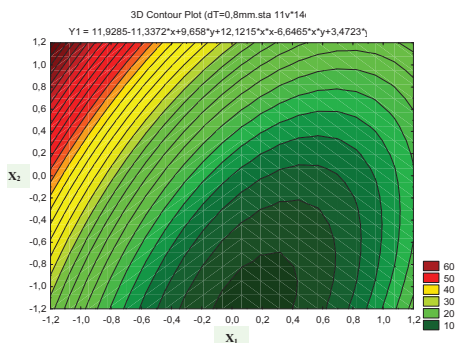
Интерес представлява определяне влиянието на степента на влияние на отделните входни фактори върху изходните параметри. Това се извършва чрез последователно изключване на факторите с отразяването им върху коефициента на определеност  $R^2$ . Значим е този фактор след чийто изключване намаляването на изходния параметър е най-голямо.

В табл.5 е показано ранжирането на входните фактори с намаляващо влияние върху дадения изходен параметър, при  $\alpha = 0,05$ .

На следващите фигури са показани повърхнините на отклиците и линиите на еднакъв отклик в координати на двата входни фактора, които оказват по-голямо влияние върху изходните параметри.

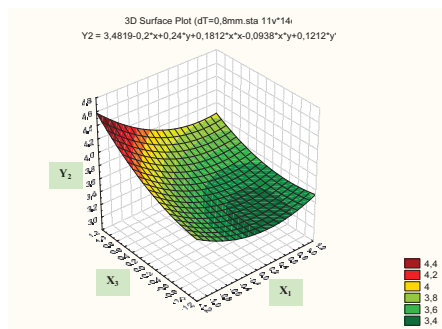


Фиг.2. Повърхнина на отклика на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$

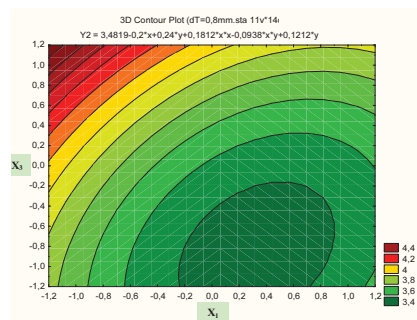


Фиг.3. Линии на еднакъв отклик на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$

На фиг.2 е показана повърхнината на отклика на  $Y_1$  в координатна система  $X_1O X_2$ .  
На фиг.3 и фиг. 4 са показани линиите на еднакъв отклик на  $Y_1$  в координатна система и  $X_1O X_2$  показана повърхнината на отклика на  $Y_2$  в координатна система  $X_1O X_3$ .



Фиг.4. Повърхнина на отклика на  $Y_2$  в координатна система  $X_1O X_3$



Фиг.5. Линии на еднакъв отклик на  $Y_2$  в координатна система  $X_1O X_3$

На фиг.5 са показани линиите на еднакъв отклик на  $Y_2$  в координатна система  $X_1O X_3$ .

След многофакторния анализ е извършено оптимизиране на изходните параметри. За целта е използвана програма за оптимизация "MATHCAD".

Резултатите от извършената оптимизация са следните:

Оптимални натурални стойности на входните фактори спрямо  $Y_1$  са:

$$X_1 (U_H) = 23,41 \text{ V}; X_2 (S_H) = 5,30 \text{ mm/min}^{-1}; X_3 (V_T) = 5,91 \text{ m/min}.$$

Оптимални натурални стойности на входните фактори спрямо  $Y_2$  са:

$$X_1 (U_H) = 24,97 \text{ V}; X_2 (S_H) = 6,40 \text{ mm/min}^{-1}; X_3 (V_T) = 5,67 \text{ m/min}.$$

Необходимо е да се използват методите за компромисна оптимизация, с минимизиране на  $Y_1$  при ограничаване на  $Y_2$  в определени граници.

В резултат на проведена компромисна оптимизация като комбинация от оптималните параметри на процеса на наваряване е избран опит №6 от таблица 2 ( $U_H = 25 \text{ V}$ ;  $S_H = 5,3 \text{ mm/min}^{-1}$ ;  $V_T = 6,35 \text{ m/min}$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Използваният модел е адекватен и за двата изходни параметъра.
2. Входните фактори в различна степен влияят върху изменението на изходните параметри.
3. От резултатите, показани на фиг. 2 и 3 се вижда, че оптимума за  $Y_1$  ( $K_{\text{нер}}$  - коефициент на неравномерност на макро неравностите) може да се реализира напълно по отношение стойностите на входния фактор  $X_1$  ( $U_H$  - напрежение на наваряване, V) но не и напълно по отношение на  $X_2$  ( $S_H$  - стъпка на наваряване,  $\text{mm/min}^{-1}$ ). Това ограничение произтича от технологични съображения относно избора на нивата на вариране на този входен фактор.
4. От графиките, показани на фиг. 4 и 5 ясно се вижда че при изходен параметър  $Y_2$  максималната дебелина по отношение на наваръчното покритие в границите на вариране на входните фактори  $X_1$  и  $X_3$  тази дебелина може да бъде постигната.
5. От проведената оптимизация се вижда, че оптималните стойности на изходните параметри могат да бъдат получени при различно съчетание на входните фактори. Ето защо се налага да се използва метода на компромисната оптимизация.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Белоев, Хр., Ж. Колев, Д. Бекана. Многофакторно изследване на комбинирана технология за нанасяне на наваръчни възстановителни покрития при поддържането и ремонта на земеделска и автотракторна техника. Списание "Селскостопанска техника", София, том 6, 2008 г., стр. 25–36.
- [2]. Колев, Ж., Д. Бекана. Изследване на комбинирана технология за нанасяне на възстановителни покрития върху износени чугунени детайли от земеделски машини. Научни трудове на РУ "А. Кънчев", том 44, допълнително издание, Русе, 2005 г., стр. 53-57.
- [3]. Колев Ж., Хр. Белоев, Д. Бекана. Изследване режима на автоматично електродъгово наваряване в защитна среда от въглероден диоксид на износени чугунени детайли от автотракторната и земеделската техника. Селскостопанска техника, София, 2006, брой 5, стр. 12-20.

Изследванията са проведени по проект 2013-АИФ-04, финансиран от фонд „Научни изследвания“ към РУ „Ангел Кънчев“

### За контакти:

доц. д-р Даниел Ликаса Бекана, кат. РНММЛХТ, Русенски университет "Ангел Кънчев", Тел.: 082 888 701, E-mail: dbekana@uni-ruse.bg.  
гл. ас. д-р Живко Димитров Колев, кат. ТХЕ, Русенски университет "Ангел Кънчев", Тел.: 082 888 304, E-mail: zkolev@uni-ruse.bg.

**Докладът е рецензиран.**