

## МАТЕМАТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ГЕОМЕТРИЯТА НА СТАТОРНА ПЛАСТИНА ПРИ ПРОЦЕСА ПЛАЗМЕНО ЗАВАРЯВАНЕ

## MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY STATOR PLATES FOR PLASMA WELDING PROCESS

Петров М.С.<sup>1</sup>

Барзев И.Т.<sup>2</sup>

Технически университет – Габрово

<sup>1</sup> Кате́дра “Техническа механика”

<sup>2</sup> Кате́дра “Материалознание и технология  
на материалите”

### Abstract

*A genuinely manufactured stator is analyzed by plasma welding. The temperature space is moulded in a separate stator plate by means of the Finite element method (FEM). Numerical experiments are carried out trough FEM and on the basis of the obtained results a mathematical regression model that relates the surface of the area of thermal influence to the geometry of the stator plate is deduced. A one-purpose optimization is accomplished under observation of enjoined restraints.*

**Keywords:** Finite element method (FEM), Mathematical modeling, optimization.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Масово разпространена практика в момента при изработване на електродвигатели и трансформатори е използването на заваръчни технологии. Това има някои отрицателни последствия. В зоната на термично влияние за температури над 150°С се нарушават изолационните качества на лаковото покритие, нанесено върху отделните пластини. Това предизвиква влошаване на някои електрически параметри на машината. Една от използваните технологии е плазменото заваряване. Този метод позволява висока прецизност и стабилност на заваръчния процес, има голяма производителност и е икономически изгоден.

Цел на настоящото изследване е да се моделира температурното поле в отделната статорна пластина посредством метода на крайните елементи за конкретна конструкция електродвигател и да се намери количествена зависимост - математически регресионен модел въз основа на числен експеримент. Изведения математически модел да свързва изходната величина - площ на

зоната на термично влияние загрята над 150°С с размерите на тъй наречения заваръчен зъб. При постоянна стойност на внесена от вън при плазмено заваряване топлинна енергия да се направи едноцелева оптимизация използваща получения математически модел. В резултат на това да се намери минимална стойност на изходната величина при наложени ограничения на управляващите фактори.

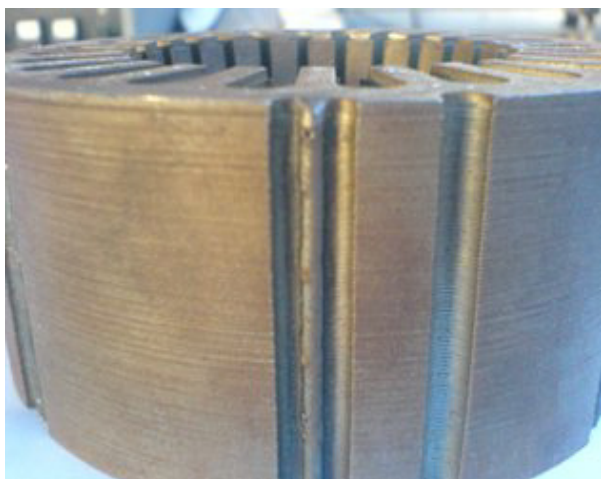
### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### Материали и методика на експеримента

Обект на изследвания са статорни пакети, които се заваряват посредством ниско температурна плазма - фиг.1.

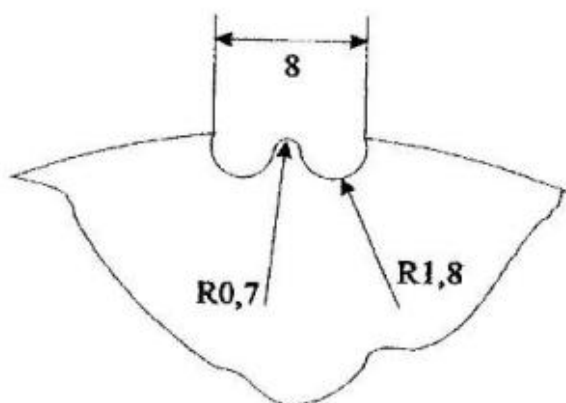
Изследваните конусовидни статорни пакети се използват за електродвигатели в подемно-транспортни средства.

Пакетите имат външен диаметър  $D = 100 \text{ mm}$  и височина  $H = 80 \text{ mm}$ . По външния диаметър има оформени осем зони за заваряване с форма на зъб [4].



Фиг. 1. Заварен статорен пакет

Геометричните параметри, на които са показани на фиг.2.



Фиг. 2. Геометрични параметри на зъб на статорна пластина с диаметър  $D = 100 \text{ mm}$

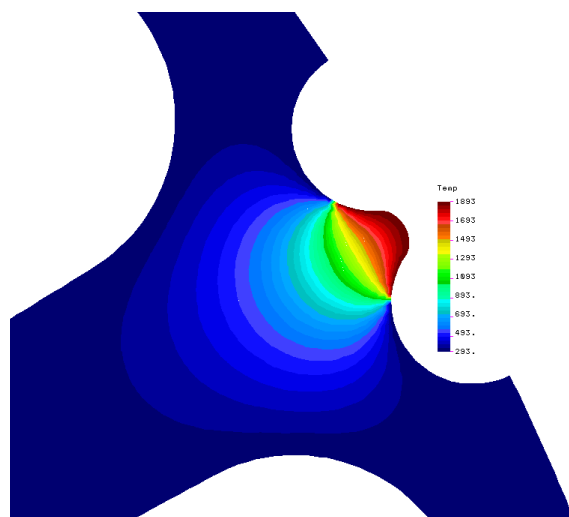
Материалът, от който са изрязани статорните пластини е лакирана силициева електротехническа стомана с дебелина  $\delta = 0,5 \text{ mm}$ , марка M340-50E (EN 10027-1).

Дебелината на двустранното лаково покритие е  $5 \mu\text{m}$ . За експеримента е използван следния режим- заваръчен ток  $120 \text{ A}$ , напрежение на дъгата  $20 \text{ V}$ , диаметър на дюзата  $2,5 \text{ mm}$ , разход на газ-  $1,2 \text{ l/min}$ , скорост на заваряване-  $12 \text{ mm/s}$  [1].

Използвайки графичния моделиер на програмния продукт COSMOS/M е изграден 2D параметричен модел. Генерирани са триъгълни крайни елементи- triang позволяващи прилагането на адаптивен процес за повишаване на точността на решението. Като характеристика за материала, който се заварява е зададен неговия коефициент на топлопроводимост  $\lambda = 38 \text{ W/mK}$ . [5]

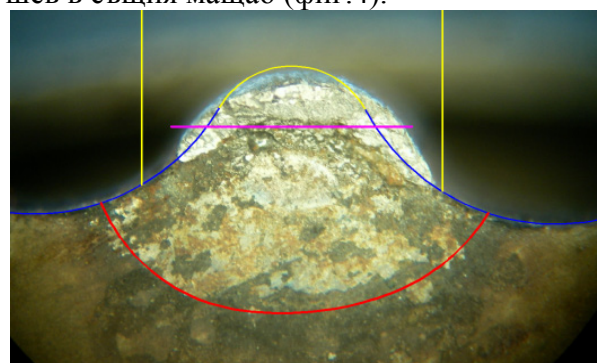
Температурното натоварване е зададено чрез температурата на стопилката -  $T = 1600^\circ\text{C}$ , въздействаща върху закръгленето  $R_2 = 0,7 \text{ mm}$ . Във всички точки извън зоната на термично влияние е зададена температура-  $20^\circ\text{C}$ . Времето на нагриване е  $0,04 \text{ s}$  за всяка отделна пластина. Освен това лаковото покритие и газовата среда между пластините имат в сравнение със стоманата много ниска топлопроводимост. Това на практика не дава значимо влияние върху процесите на топлообмен между пластината и околната среда за времето на въздействие.

Резултатът от анализа по МКЕ е представен на фиг.3.



Фиг.3. Получено температурно поле по МКЕ

В последствие линията с температура  $T = 150^\circ\text{C}$  от модела е наложена върху снимка на макроструктурата на заваръчния шев в същия мащаб (фиг.4).



Фиг.4. Нанесена температурна граница  $T = 150^\circ\text{C}$  от МКЕ върху макроструктура от реален експеримент

Вижда се отлично припокриване на двата резултата. Това дава основание да заключим, че крайноелементния модел е адекватен и дава точно описание на изследвания обект.

Следователно могат да бъдат проведени редица от числени експерименти по МКЕ, формирайки план на числен експеримент даден в таб. 1. Плана е изграден въз основа на промяна, на входните параметри: радиус на върха на зъба-  $R_2$  и радиус на освобождения-  $R_1$  (фиг.2).

След крайно елементен анализ на всеки ред от предвидените стойности в плана на експеримента използвайки параметричния модел в средата на ПП Cosmos/M се отчита площта на прогорелия изолационен лак  $A, \text{mm}^2$ , т.е. това е площта на зоната на термично влияние загрята над  $150^\circ \text{C}$ .

Входните параметри: радиус на освобожденията  $x_1=R_1$  и радиус на върха на зъба  $x_2=R_2$  (фиг.2) и изходния резултат  $y= A_{150^\circ \text{C}}$  са приведени в таб. 1.

Таблица 1

| №  | $x_1$         | $x_2$         | $y$                                            |
|----|---------------|---------------|------------------------------------------------|
|    | $R_1$<br>[mm] | $R_2$<br>[mm] | $A_{150^\circ \text{C}}$<br>[mm <sup>2</sup> ] |
| 1  | 1,40          | 0,50          | 6,6609                                         |
| 2  | 1,40          | 0,70          | 12,6983                                        |
| 3  | 1,40          | 0,90          | 21,3420                                        |
| 4  | 1,40          | 1,10          | 24,3638                                        |
| 5  | 1,60          | 0,50          | 6,3221                                         |
| 6  | 1,60          | 0,70          | 13,5618                                        |
| 7  | 1,60          | 0,90          | 19,1365                                        |
| 8  | 1,60          | 1,10          | 25,0499                                        |
| 9  | 1,80          | 0,50          | 5,3766                                         |
| 10 | 1,80          | 0,70          | 11,2972                                        |
| 11 | 1,80          | 0,90          | 18,8374                                        |
| 12 | 1,80          | 1,10          | 21,5469                                        |
| 13 | 2,00          | 0,50          | 4,6094                                         |
| 14 | 2,00          | 0,70          | 10,1769                                        |
| 15 | 2,00          | 0,90          | 14,9969                                        |
| 16 | 2,00          | 1,10          | 19,0404                                        |
| 17 | 2,20          | 0,50          | 3,2422                                         |
| 18 | 2,20          | 0,70          | 8,5041                                         |
| 19 | 2,20          | 0,90          | 14,5400                                        |
| 20 | 2,20          | 1,10          | 18,8255                                        |

Използвайки получените данни в таблица 1 посредством класически регресионен анализ използвайки програма REGRENAL е съставен математичен модел.

Бяха направени редица опити за избор на вид математичен модел. От тях, като най-подходящ, адекватен и точен бе избран пълен полиномен модел от втора степен.

Математичния модел има вида:

$$A(\text{mm}^2) = -24,21163 + 10,1418.(R_1, \text{mm}) + 62,3598.(R_2, \text{mm}) - 7,892955.(R_1, \text{mm}.R_2, \text{mm}) - 2,978042.(R_1, \text{mm})^2 - 12,56657.(R_2, \text{mm})^2.$$

Моделът е изведен при стойности за средна процентна грешка 0,4 %, коефициент на множествена корелация  $R=0,993328$  и изпълнено условие за адекватност- критерий на Фишер:

$$F=207,7338 > F_{\text{таб}}=2,96 \\ (v_1=5; v_2=14), \text{ при ниво на значимост } \alpha=0,5.$$

Така полученият модел гарантира точност на предсказване на характеристиките при следните интервали на изменение на факторите:

$$1,4, \text{ mm} < R_1 < 2,2, \text{ mm}; \\ 0,5, \text{ mm} < R_2 < 1,1, \text{ mm}$$

### Едноцелева оптимизация

За формулиране на оптимизационната задача е необходимо да се изясни оптимизационния критерий. Това е минимизиране площта на зоната на термично влияние загрята над  $150^\circ \text{C}$ , тъй като при екстремна стойност би се намалило неизбежното увреждане на лака.

Математичния запис на задачата има вида:

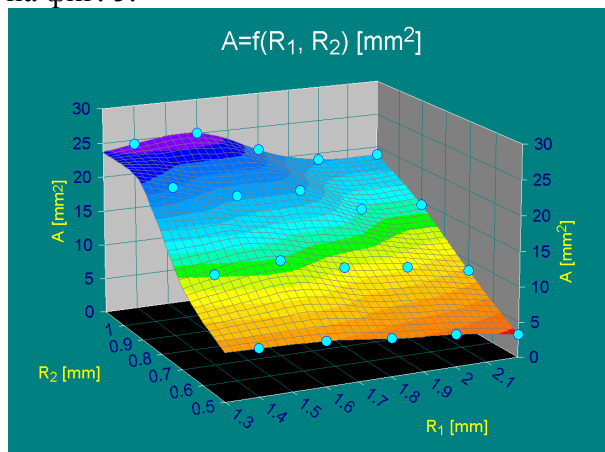
$$A_x \rightarrow \min_x$$

За решаване на едноцелевата оптимизационна задача е използван продукта FPOLM. [3] Като е използван получения модел и факторните ограничения е получена минимална стойност за площта на зоната на термично влияние загрята над  $150^\circ \text{C}$ .

$$\min A = 3,041, \text{ mm}^2$$

при  $R_1 = 2,200, \text{ mm}$ ;  
и  $R_2 = 0,500, \text{ mm}$ .

Графичен вид на резултатите са дадени на фиг. 5.



Фиг. 5. Резултати от едноцелевата оптимизация,  
 $\min A = 3.04 \text{ [mm}^2\text{]}$   
при  $R_1 = 2.2 \text{ [mm]}$ ;  $R_2 = 0.5 \text{ [mm]}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От анализа на получените резултати могат да се направят следните изводи:

1. Коефициента на множествена корелация на изведения регресионен математически модел има високи и значими стойности. Това показва, че е направен правилен избор на структурата на модела и са включени силно влияещи фактори.

2. Изпълнено е условието за адекватност при ниво на значимост  $\alpha = 0,05$ , което по казва, че предсказаните стойности по модели-

те съответстват на получените от числените експерименти и могат да се използват за прогнозиране на площта на зоната на термично влияние.

3. Средната процентна грешка на предсказаните стойности е 0,4%, което напълно удовлетворява изискванията за точност на решенията в инженерната практика.

4. При сравнение на резултата от анализа по МКЕ с този от реалния експеримент се получава припокриване на двата.

5. Решаването на оптимизационната задача позволява усъвършенстване конструкцията на статорната пластина с цел намаляване вредното влияние на заваръчния процес.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барзев И.Т., Х.В.Тодоров. Плазмено заваряване на статорни пакети от лакирана електротехническа стомана. Механика на машините кн.3, 2009г.
- [2] Джонов Ц., Ив.Ангелов, М.Петров. Математично моделиране механичните характеристики на стоманите. Печатна база при ТУ-Габрово, Габрово, 1995г.
- [3] Ангелов,И.А., М.С. Петров. Теория на инженерния експеримент, Печатна база при ТУ-Габрово, Габрово, 2002.
- [4] Парашкевов Ст.,Ив. Барзев, А.Йорданов. Оборудване за плазмено заваряване на статорни пластини в пакет. НК-35г. ТУ-Габрово, Габрово, 1999г.
- [5] Петров М. Математично моделиране на еластичен динамометър. Известия на ТУ-Габрово том XXV, 2001г.