

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HAI THÔNG SỐ (U_e , t_e) ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC KÍCH THƯỚC KHI GIA CÔNG HỢP KIM CỨNG BK25 TRÊN MÁY CẮT DÂY CW420 HS

RESEARCH ON THE IMPACT OF DATA (U_e , t_e) TO THE ACCURACY OF THE SIZE WHEN MACHINING HARD ALLOYS BK25 ON THE CW420 HS WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Đặng Xuân Thao^{1,*}, Nguyễn Chí Bảo¹

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hai thông số U_e và t_e đến độ chính xác kích thước khi gia công hợp kim cứng BK25 trên máy cắt dây CW420 HS. Kết quả nghiên cứu đưa ra là cơ sở giúp các nhà làm công nghệ xác định được các thông số đầu vào tối ưu nhằm nâng cao độ chính xác kích thước và năng suất khi gia công vật liệu hợp kim cứng BK25. Đồng thời kết quả làm tài liệu phục vụ giảng dạy chuyên môn trong nhà trường.

Từ khóa: Thông số công nghệ, độ chính xác kích thước, BK25, máy cắt dây CW420 HS.

ABSTRACT

This paper presents the results of studying the effect of two parameters of U_e and t_e power to the accuracy of size when machining BK25 hard alloy on the CW420 Wire discharge machining. The results of this research are the basis for helping technologists determine the optimal input parameters in order to improve the accuracy of size and productivity when processing hard alloy materials in general and BK25 in particular. And also these results shall be used as materials for teaching in the school.

Keywords: Technological specifications, the accuracy of the size, BK25, CW420 HS wire cutters.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: xuanthao.hau@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/01/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 02/04/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/04/2018

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
OV (U_e)	V	Điện áp phóng điện
ON (t_e)	μ s	Thời gian phóng điện
OFF	μ s	Thời gian ngừng phóng điện
AN	μ s	Thời gian phóng điện ngắn mạch
AFF	μ s	Thời gian nghỉ
SV	v	Điện áp tham chiếu Servo
FR	mm/ph	Điều chỉnh tốc độ gia công

WF	mm/s	Tốc độ chạy dây
WT	g	Lực căng dây
WL	Kg/cm ²	Áp lực nước bơm làm mát

CHỮ VIẾT TẮT

CW	Wire Cutting
TN	Thí nghiệm
HQ	Hàn Quốc

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây tại Việt Nam nhu cầu sử dụng các máy gia công có độ cứng và độ bền cao như: SKD11, SKD61, BK20, BK25... làm khuôn dập, chà dập trong chế tạo roto và stato của động cơ điện không ngừng tăng. Gia công các loại vật liệu có độ cứng cao này chủ yếu dùng máy gia công tia lửa điện, cụ thể là trên máy cắt dây, xung điện [8].

Trong nước, nhiều doanh nghiệp đã trang bị máy gia công tia lửa để chủ động trong vấn đề gia công. Tuy nhiên việc xác định chế độ công nghệ để gia công tại các cơ sở thường xác định dựa vào tài liệu kèm theo máy hoặc theo kinh nghiệm, do đó chưa có một thông số cụ thể đánh giá cho từng vật liệu cụ thể giúp cho người gia công thấy được ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chính xác hình dáng hình học và độ chính xác kích thước gia công, vì vậy hiệu quả khai thác và sử dụng máy vì thế bị hạn chế.

Để giúp người gia công có sự đánh giá cụ thể hơn trong quá trình gia công và có thêm thông tin để làm tài liệu tham khảo, nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu sự ảnh hưởng của hai thông số (U_e , t_e) đến độ chính xác kích thước khi gia công hợp kim cứng BK25 trên máy cắt dây CW 420 HS.

2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Máy: Sử dụng máy cắt dây WC420 HS, đặt tại Trung tâm Cơ khí, trường Đại học Công nghiệp Hà Nội (Hình 1).

Thông số máy: Máy cắt dây CW420 HS có thông số như bảng 1 [7].

Vật liệu: Hợp kim cứng BK25 với kích thước 60x60x20 mm (hình 2 có thành phần hóa học của thép BK25 như trong bảng 2).

Dây cắt: Dây đồng (HQ), đường kính dây áp dụng 0,2mm (hình 3).

Thiết bị đo: Panme đo lỗ 3 chấu, thang đo 1 μ m Mitutoyo 368-163 (hình 4).



Hình 1. Máy cắt dây CW 420 HS

Bảng 1. Thông số kỹ thuật máy cắt dây CW 420 HS

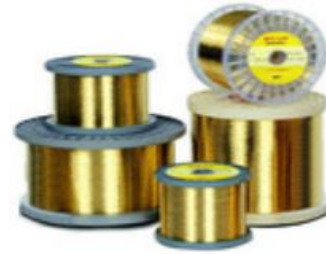
MACHINE BODY		CW-420HS
Hành trình trục (XxYxZ)	mm/in	400x280x220
Hành trình phụ (UxV)	mm/in	60x60
Kích thước lớn nhất của phôi	mm/in	800x600x215
Khối lượng lớn nhất của phôi	kg/lb	500/350
Bước tiến phôi	mm/in	800mm/min
Hệ thống ổ trục	mm/in	AC Servo Motor
Phạm vi đường kính của dây	mm/in	0,15 - 0,3
Vòng quay phôi lớn nhất	mm/in	300mm/sec / 11,8 inch/sec
Lực căng dây	Gf	400-2500
Kích thước máy	mm/in	2200x2200x2130
Khi ngập nước	mm/in	2200x2100x2130
Khối lượng máy	kg/lb	2500



Hình 2. Hợp kim cứng BK25

Bảng 2. Thành phần hóa học của hợp kim BK25

Mác vật liệu	Thành phần hóa học trung bình các nguyên tố (%)					
	WC	Co	Cu	Ni	Mo	Zn
BK 25	75,15	9,42	12,31	0,81	0,45	1,86



Hình 3. Dây đồng 0.2- HQ



Hình 4. Panme đo lỗ 3 chấu Mitutoyo 368-163

2.2. Phạm vi nghiên cứu

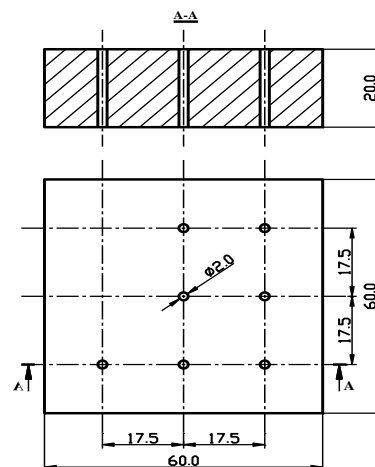
Xác định ảnh hưởng của hai thông số là điện áp phóng điện (U_e) và thời gian phóng điện (t_e) đến độ chính xác kích thước khi gia công thép hợp kim BK25.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện gia công trên 7 lỗ, vật liệu cắt thép hợp kim BK25. Các mẫu được tiến hành cắt trên máy cắt dây WC420 HS với thông số đầu vào U_e và t_e thay đổi; Sử dụng phương pháp quy hoạch trực giao, chọn dạng phương trình hồi quy, xác định được thông số thí nghiệm và tiến hành thực nghiệm. Đo, kiểm tra đánh giá kích thước sau khi gia công, xác định được mối quan hệ giữa độ chính xác kích thước với điện áp phóng điện U_e và thời gian phóng điện t_e [1, 3].

3. THỰC NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Thiết kế mẫu thí nghiệm

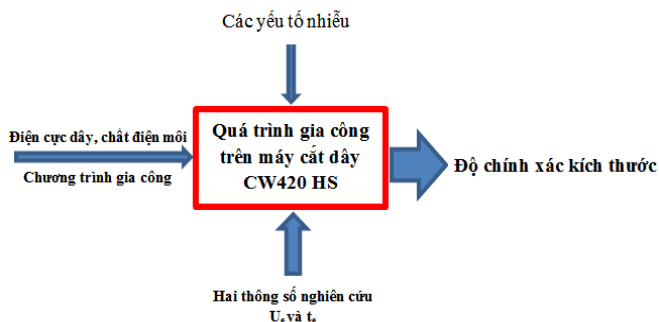


Hình 5. Bản vẽ gia công lỗ luồn dây, trên phôi

Sử dụng máy bắn lỗ gia công 7 lỗ Ø 2 để luồn dây cắt (hình 5).

Đường kính lỗ cắt $\varnothing 11 \pm 0,005$ mm.

3.2. Mô hình hóa quá trình gia công (hình 6)



Hình 6. Hình vẽ mô hình hóa quá trình gia công

3.3. Chọn thông số đầu vào

Qua quá trình tìm hiểu máy cắt dây CW420HS lựa chọn khảo sát hai biến: U_e và t_e

- U_e khảo sát từ $75 \div 85$ (V)

- t_e khảo sát từ $5 \div 7$ (μ s)

Số ddiemr thí nghiệm N theo quy hoạch thực nghiệm là [2]: $N = 2^k$

Trong đó: N - số thí nghiệm

k - số biến đầu vào

Với biến đầu vào $k = 2$ có số thí nghiệm $N = 4$. Để nâng cao độ chính xác tiến hành thêm 3 thí nghiệm nên tổng số thí nghiệm là: $N = 2^k + 3 = 7$.

Đặt $X_1 = U_e$; $X_2 = t_e$

Mã hóa giá trị:

$U_e \text{ max} = 85$ (V); $U_e \text{ min} = 75$ (V); $U_e \text{ trung bình} = 80$ (V)

$t_e \text{ max} = 7$ (μ s); $t_e \text{ min} = 5$ (μ s); $t_e \text{ trung bình} = 6$ (μ s)

$U_e \text{ max} = +1$; $U_e \text{ min} = -1$; $U_e \text{ trung bình} = 0$

$t_e \text{ max} = +1$; $t_e \text{ min} = -1$; $t_e \text{ trung bình} = 0$

Với thí nghiệm đầu vào là hai biến U_e , t_e , theo quy hoạch thực nghiệm ta thực hiện 7 thí nghiệm vậy có thông số quy hoạch thực nghiệm trên máy gia công cắt dây tia lửa điện CW 420 HS (bảng 3).

Bảng 3. Bảng quy hoạch thực nghiệm thông số đầu vào

Thí nghiệm	Biến thức mã hóa		OV (U_e) (V)	ON (t_e) (μ s)	OFF (μ s)	AN (μ s)	AFF (μ s)	SV (V)	FR (mm /ph)	WF (mm /s)	WT (g)	WL (Kg /cm ²)
	X1	X2										
1	-1	-1	75	5	13	3	13	43	3	4	10	4
2	-1	+1	75	7	13	3	13	43	3	4	10	4
3	+1	-1	85	5	13	3	13	43	3	4	10	4
4	+1	+1	85	7	13	3	13	43	3	4	10	4
5	0	0	80	6	13	3	13	43	3	4	10	4

6	0	0	80	6	13	3	13	43	3	4	10	4
7	0	0	80	6	13	3	13	43	3	4	10	4

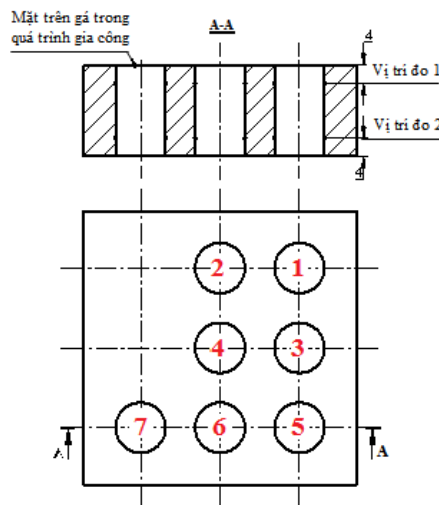
3.4. Chọn thông số đầu ra

Độ chính xác kích thước lỗ gia công, ký hiệu (Y): Độ chính xác kích thước được xét là hiệu số giữa kích thước thực đo được và kích thước danh nghĩa tính tại tâm dung sai. Giả sử ta xét kích thước danh nghĩa tại miền dung sai Js. Do miền dung sai này có tâm đối xứng nên độ chính xác kích thước là phần sai lệch giữa hiệu số kích thước thực đo được và kích thước danh nghĩa.

3.5. Thực nghiệm đo kết quả và xây dựng mô hình toán học độ chính xác kích thước phụ thuộc vào U_e và t_e



Hình 7. Hình ảnh cắt 7 lỗ thí nghiệm



Hình 8. Bản vẽ vị trí đo kích thước

Hình 7, 8 là hình ảnh của 7 lỗ thí nghiệm và vị trí đo kích thước.

3.5.1. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 1 (bảng 4).

Bảng 4. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 1

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,008	11,006	11,007
2	11,006	11,004	11,005

3	11,010	11,008	11,009
4	11,009	11,007	11,008
5	11,011	11,009	11,010
6	11,011	11,009	11,010
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,009	11,007	11,008

3.5.2. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 2 (bảng 5).

Bảng 5. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 2

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,014	11,010	11,012
2	11,013	11,009	11,011
3	11,015	11,011	11,013
4	11,012	11,010	11,011
5	11,015	11,011	11,013
6	11,012	11,010	11,011
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,014	11,010	11,012

3.5.3. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 3 (bảng 6).

Bảng 6. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 3

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,016	11,013	11,015
2	11,013	11,010	11,012
3	11,014	11,012	11,013
4	11,015	11,011	11,013
5	11,016	11,013	11,015
6	11,015	11,013	11,014
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,015	11,012	11,013

3.5.4. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 4 (bảng 7).

Bảng 7. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 4

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,022	11,021	11,022
2	11,023	11,020	11,022

3	11,022	11,019	11,021
4	11,021	11,021	11,021
5	11,023	11,020	11,022
6	11,023	11,021	11,022
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,022	11,020	11,021

3.5.5. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 5 (bảng 8).

Bảng 8. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 5

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,017	11,014	11,016
2	11,015	11,013	11,014
3	11,016	11,014	11,015
4	11,017	11,015	11,016
5	11,016	11,014	11,015
6	11,015	11,013	11,014
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,016	11,014	11,015

3.5.6. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 6 (bảng 9).

Bảng 9. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 6

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,015	11,013	11,014
2	11,016	11,014	11,015
3	11,017	11,015	11,016
4	11,016	11,014	11,015
5	11,016	11,013	11,015
6	11,015	11,014	11,015
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,016	11,014	11,015

3.5.7. Kết quả đo đường kính lỗ sau khi gia công của thí nghiệm lỗ 7 (bảng 10).

Bảng 10. Kết quả đo đường kính lỗ tại 2 vị trí lỗ 7

Lần đo	Đường kính tại vị trí đo 1 (mm)	Đường kính tại vị trí đo 2 (mm)	Đường kính trung bình của 2 vị trí đo (mm)
1	11,016	11,013	11,015
2	11,017	11,014	11,016

3	11,017	11,014	11,016
4	11,016	11,013	11,015
5	11,017	11,015	11,016
6	11,016	11,013	11,015
Giá trị trung bình của 6 lần đo	11,017	11,014	11,015

3.6. Xây dựng phương trình toán học biểu diễn độ chính xác kích thước theo U_e và t_e

Để tìm ra mối quan hệ giữa độ chính xác kích thước (được ký hiệu là Y) với các chế độ (U_e, t_e) khác nhau trong 7 thí nghiệm trên tiến hành như sau [5, 6]:

- Xác định kích thước lỗ gia công khi thay đổi thông số đầu vào (U_e, t_e)
- Xây dựng phương trình hồi quy biểu diễn độ chính xác kích thước theo (U_e và t_e) từ các kích thước lỗ gia công
- Đánh giá độ tin cậy của hàm hồi quy thực nghiệm.

3.6.1. Xác định kích thước lỗ gia công ở từng thí nghiệm

Kích thước lỗ gia công ở từng thí nghiệm được xác định theo công thức:

$$Y_j = d_{thực\ tế} - d_{đanh\ nghĩa\ ở\ tâm\ dung\ sai} \tag{1}$$

Trong đó:

- Y_j là kích thước lỗ ở lần thí nghiệm thứ j (j chạy từ 1 đến 7).
- $d_{đanh\ nghĩa\ ở\ tâm\ dung\ sai} = 11,0mm$ là kích thước danh nghĩa của lỗ $\varnothing 11,0mm$ có dung sai là $\pm 0,005mm$

$$d_{thucte} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{i1} + \sum_{i=1}^n d_{i2}}{2} \tag{2}$$

- + d_{i1} : Đường kính lần đo i ở điểm đo 1
- + d_{i2} : Đường kính lần đo i ở điểm đo 2
- + n : Số lần đo (6 lần)

Kết quả đo trung bình được trình bày ở bảng 11.

Bảng 11. Kết quả đo trung bình các mẫu thí nghiệm.

Thí nghiệm	U_e (V)	t_e (μs)	Y_i
1	75	5	0.008
2	75	7	0.012
3	85	5	0.013
4	85	7	0.021
5	80	6	0.015
6	80	6	0.014
7	80	6	0.015

3.6.2. Xây dựng phương trình hồi quy độ chính xác kích thước phụ thuộc vào U_e và t_e

Bảng mã hóa các giá trị dùng cho khảo sát hồi quy như bảng 12. Sử dụng phần mềm Excel để xây dựng phương trình hồi quy theo số liệu bảng trên ta được kết quả trả ra như bảng 13.

Bảng 12. Bảng mã hóa các giá trị dùng cho khảo sát hồi quy

TT	X1	X2	X1.X2	y_i
1	-1	-1	1	0.008
2	-1	1	-1	0.012
3	1	-1	-1	0.013
4	1	1	1	0.021
5	0	0	0	0.015
6	0	0	0	0.014
7	0	0	0	0.015

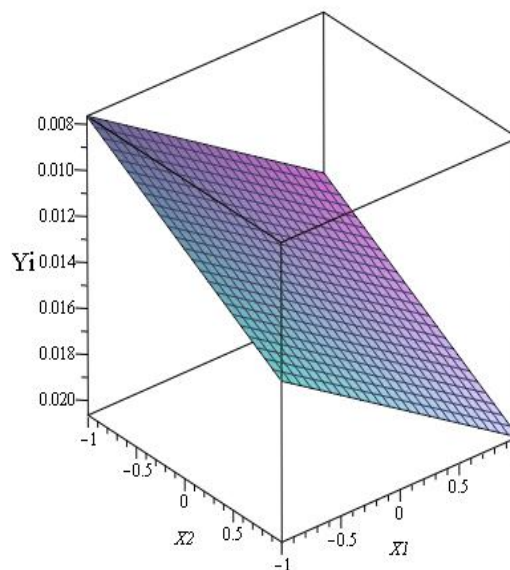
Quan sát mức độ có ý nghĩa của các biên đầu vào ảnh hưởng đến hàm Y_j tại cột P-value ta thấy với mức ý nghĩa $\alpha < 0,05$ thì tương tác $X1.X2$ là không đáng kể nên có thể bỏ qua. Căn cứ bảng 12 ta có phương trình hồi quy mã hóa có dạng như sau:

$$y_i = 0,01414286 + 0,0035 X1 + 0,003 X2 \tag{3}$$

Theo phương trình (3) cho thấy, độ chính xác kích thước gia công giảm khi tăng giá trị $X1$ (U_e) và $X2$ (t_e) nhưng do hệ số tự do của U_e lớn hơn hệ số tự do của t_e nên U_e ảnh hưởng nhiều hơn t_e .

Sử dụng phần mềm Maple 13[4], xây dựng đồ thị mô tả mối quan hệ giữa độ chính xác hình dáng hình học y_i với $X1(U_e)$ và $X2(t_e)$, cho phương trình hồi quy (dạng mã hóa) được kết quả như hình 9.

Plot3d(0,014143 + 0,0035*X1 + 0,003*X2, X1=-1..1, X2=-1..1);



Hình 9. Đồ thị 3D biểu diễn quan hệ giữa độ chính xác kích thước Y_i với U_e và t_e

Bảng 13. Kết quả phân tích hồi quy

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0,97901049
R Square	0,95846154
Adjusted R Square	0,91692308
Standard Error	0,00113389
Observations	7

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	0,000089	2,9667E-05	23,07407407	0,01419179
Residual	3	3,8571E-06	1,2857E-06		
Total	6	9,2857E-05			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0,01414286	0,00042857	33	6,11639E-05	0,012778952	0,01550676	0,01277895	0,01550676
X1	0,0035	0,00056695	6,17341973	0,008556942	0,001695723	0,00530428	0,00169572	0,00530428
X2	0,003	0,00056695	5,29150262	0,013168452	0,001195723	0,00480428	0,00119572	0,00480428
X1.X2	0,001	0,00056695	1,76383421	0,17595496	-0,000804277	0,00280428	-0,00080428	0,00280428

3.6.3. Kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm

Sự tương thích của phương trình hồi quy được kiểm định bằng tiêu chuẩn Fisher [5, 6]:

$$F = \frac{S_{du}^2}{S_{th}^2} \quad (4)$$

Đối với phương án thí nghiệm lặp tại tâm:

$$S_{du}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - l} \quad (5)$$

Trong đó:

- S_{du}^2 : Phương sai dư.
- y_i : Giá trị đo từ thực nghiệm (bảng 13)
- \hat{y}_i : Giá trị tính theo phương trình hồi quy (bảng 13)
- N : Số thí nghiệm trong phương án ($N = 7$)
- l : Hệ số có nghĩa của phương trình hồi quy ($l = 3$)

Thay số vào phương trình (5) ta được:

$$S_{du}^2 = 0,0000017675 \quad (6)$$

Bảng 14. Số liệu thực nghiệm

Số thí nghiệm	y_i	\hat{y}_i	$(y_i - \hat{y}_i)$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0,008	0,0076	0,0004	0,00000016
2	0,012	0,0136	-0,0016	0,00000256

3	0,013	0,0146	-0,0016	0,00000256
4	0,021	0,0206	0,0004	0,00000016
5	0,015	0,0141	0,0009	0,00000081
6	0,014	0,0141	-0,0001	0,00000001
7	0,015	0,0141	0,0009	0,00000081

Do thí nghiệm lặp 3 lần tại tâm nên phương sai tái hiện được tính như sau [5]:

$$S_{th}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{m - 1} \quad (7)$$

Trong đó:

- S_{th}^2 : Phương sai tái hiện.
- y_i : Giá trị đo từ thực nghiệm (bảng 13)
- \hat{y}_i : Giá trị tính theo phương trình hồi quy (bảng 13)
- m : Số thí nghiệm lặp tại tâm ($m = 3$)

Thay số vào phương trình (7) ta được

$$S_{th}^2 = 0,000000168 \quad (8)$$

Thay (6) và (8) vào phương trình (4) ta được F theo tiêu chuẩn Fisher:

$$F = 10,5$$

Tra bảng phân vị phân bố Fisher với $p = 0,05$; $f_1 = N - l = 7 - 3 = 4$; $f_2 = m - 1 = 2$

Ta có: $F_{1-p} = F_{0,95} = 19,3$

Vậy $F < F_{0,95}$ nên phương trình hồi quy tương thích thực nghiệm.

4. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã nghiên cứu ảnh hưởng của điện áp phóng điện khởi tạo U_e , thời gian phóng điện t_e trên máy gia công tia lửa điện, điện cực dây (CW 420 HS) đến độ chính xác kích thước gia công khi gia công vật liệu mác thép BK25 đã tìm ra được phương trình hồi quy (dạng mã hóa) biểu diễn mối liên hệ toán học giữa độ chính xác kích thước theo X_1 và X_2 (U_e và t_e) là:

$$Y = 0,01414286 + 0,0035 X_1 + 0,003 X_2 \quad (*)$$

Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi tăng U_e và t_e thì năng suất cắt tăng nhưng độ chính xác kích thước giảm, do vậy căn cứ vào phương trình (*) người làm công nghệ có thể lựa chọn hợp lý U_e và t_e để vừa đảm bảo năng suất vừa đảm bảo độ chính xác kích thước trên máy gia công tia lửa điện điện cực dây (CW 420 HS).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trần Văn Địch, 2003. "Nghiên cứu độ chính xác gia công bằng thực nghiệm". NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [2]. Dương Thủy Vĩ, 2007. "Giáo trình Phương pháp tính". NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [3]. Nguyễn Tiến Nga, 2009. "Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác gia công khi gia công cắt dây các vật liệu khó gia công". Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Thái Nguyên.
- [4]. Nguyễn Phùng Quang, 2008. "Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động". NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [5]. Nguyễn Văn Dự, Nguyễn Đăng Bình, 2011. "Quy hoạch thực nghiệm trong kỹ thuật". NXB khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [6]. Nguyễn Doãn Ý, 2003. "Giáo trình quy hoạch thực nghiệm". NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [7]. CHI HUNG MACHINERY & ELECTRIC INDUSTRIAL CO.,LTD. "CHMER_{EDM} WIRE-EDM QUICK START", 2006.
- [8]. Nghiêm Hùng, 1979. "Kim loại học và nhiệt luyện". NXB Đại học và trung học chuyên nghiệp, Hà Nội.