

RESEARCH CONCERNING INCONEL ALLOY BY CONVENTIONAL AND NONCONVENTIONAL MACHINING

TECUCEANU Roxana-Alexandra

Facultatea: Inginerie Industrială și Robotică, Specializarea: Tehnologia Construcțiilor de Mașini,
Anul de studii: IV, e-mail: tecuceanuroxanaalexandra@gmail.com

Conducător științific: Prof.dr.ing. **Daniel GHICULESCU**

ABSTRACT: The paper deals with the comparison between two types of machining Inconel 718 alloy by milling and sinking electrical discharge machining (EDM). This material was characterized by its properties, and in connection its applicability. 3D modeling was achieved in SolidWorks, CNC program and milling simulation in PowerMill. The milling operation was achieved on CNC machining center. Later, the tool-electrode was machined on another, CNC, and its technical control was done on coordinate measuring machine. Then EDM was achieved on a CNC specialized machine. Finally, the obtained results were compared by a technical-economic analysis, the optimum variant being established, respective the EDM operation. A finite element analysis was approached in order to compare the behavior at EDM of Inconel 718 alloy and the usual high alloyed steel, C120.

CUVINTE CHEIE: Inconel 718, prelucrare, electroeroziune, frezare, modelare-simulare

1. Introducere

Pentru acest studiu a fost necesară achiziționarea semifabricatului și prelucrarea acestuia prin cele două procedee diferite, convențional și neconvențional, pe una dintre fețele piesei, frezare și pe cealaltă, electroeroziune cu electrod masiv. Pentru partea obținută prin frezare au fost necesare 6 faze de degroșare și 4 de finisare, ce au condus la timpuri de execuție și costuri mari. În final, s-a făcut controlul suprafețelor pentru a se ajunge la o concluzie privind calitatea obținută. Inconel este un material foarte greu de prelucrat prin procedee convenționale, ca urmare a proprietăților sale excepționale, dar care permite utilizarea sa în industrii de vârf. Forma aleasă a suprafeței de prelucrat fiind una destul de complexă, studiul comparativ al prelucrării acesteia a fost unul foarte provocator prin prisma resurselor utilizate. Din analiza tehnico-economică, pe baza datelor experimentale obținute s-a ajuns la concluzia finală, și anume, care este varianta optimă din punct de vedere al timpurilor de prelucrare și al costurilor aferente.

2. Stadiul actual

Date despre materialul Inconel 718 (2.4668): Inconel 718 este un aliaj pe bază de nichel, cu crom, fier, molbiden, rezistența fiind datorată prezenței în compoziția sa a niobiului, titanului și aluminiului. Este potrivit pentru aplicații care necesită rezistență ridicată la temperaturi până la 1300 °F (704 °C) și la oxidare până la aproximativ 1800 °F (982 °C). [1] Pe baza concentrațiilor ridicate de crom și molibden, aliajul are o bună rezistență împotriva coroziunii abrazive și locale, cum ar fi sablarea. Datorită conținutului său ridicat de nichel, are de asemenea, o bună rezistență la crăparea la coroziune. Acesta prezintă, o rezistență excelentă la tracțiune și la impact. [2] Rezistă foarte bine la acizi organici, substanțe alcaline și săruri și la apa de mare, la carburizare, nitrurare și săruri topite, respectiv la atacul chimic cu acizii sulfuric, clorhidric, hidrofluoric, fosforic și nitric. Caracteristicile sale de sudare, în special rezistența la fisurarea post-sudare, sunt deosebite. Este disponibil sub formă de sârmă, bară, tijă, bandă, forjare, placă, tablă, tub, element de fixare și alte forme standard. [3]

Domenii de utilizare: Datorită proprietăților foarte bune și eficienței, acest material este utilizat pe scară largă pentru componentele statice și rotative în turbinele aeronavelor, cum ar fi carcase, elemente

de montare, discuri de turbină, ale turbinelor cu gaz, rachete și nave spațiale, turbo-încărcătoarele pentru autovehicule, șuruburile de înaltă rezistență, arcuri, unde se aplică cerințe dure pentru rezistența la temperaturi criogenice, oxidare și oboseală. Acesta este folosit și în industria de petrol și gaze, fiind utilizat pentru echipamentele de foraj și arbori pentru pompare. Componentele trebuie să asigure o extracție eficientă și sigură a petrolului și gazelor, cu creșterea adâncimii găurilor de foraj, a presiunilor și temperaturilor, ajungând până la unele critice. Trebuie să reziste unui mediu gazos acid (H₂S, CO₂, clorură). În tabelele 1-4 au fost structurate proprietățile materialului analizat [3], [4], [5].

Tabelul 1. Proprietăți chimice - compoziție

Element component	Ni	Cr	Mo	Nb, Ta	Co	Mn	Cu	Al	Ti	Si	C	S	P	B
Compoziție [%]	50 - 55	17 - 21	2.8-3.3	4.75 - 5.5	≤1	≤0.35	≤0.3	0.2-0.8	0.6 5-1.1 5	≤0.3 5	≤0.08	≤0.01 5	≤0.015	≤0.006

Tabelul 2. Proprietăți mecanice

Rezistența la rupere R _m [MPa] min. (20°C)	Modul de elasticitate E [GPa] min. (20°C)	Elasticitate A [%] min. (20°C)	Duritatea Rockwell HRC min. (20°C)	Limita de curgere R _{p0.2} [MPa] min. (20°C)	Densitate ρ [g/cm ³] min. (20°C)
1280	204	12	45	1030	8,26

Tabelul 3. Proprietăți termice

Coeficientul de dilatare termică α [1/K] min. (20°C)	Punctul de topire T _m [°C] min. (20°C)	Capacitate termică specifică c _p [J/(kg·K)] min. (20°C)	Conductivitate termică λ [W/(m·K)] min. (20°C)
1,41E-5	1257-1342	460	11.5

Tabelul 4. Proprietăți electrice și magnetice

Proprietăți electrice	Proprietăți magnetice	
Rezistivitate electrică ρ _{el} [Ω·m] min. (20°C)	Permeabilitate magnetică relativă μ _{rel} min. (20°C)	Punctul Curie T _c [°C]
1,18E-6	Max.	-195

Având în vedere caracteristicile ridicate de rezistență ale Inconel au fost raportate numeroase rezultate obținute ale prelucrării acestuia prin electroeroziune. În urma studiului amănunțit asupra acestor superaliaje s-a ales aliajul Inconel 718 [8].

3. Prelucrarea materialului prin frezare. Etape tehnologice.

- 1) Modelarea 3D a piesei: s-a efectuat în soft-ul de proiectare SolidWorks.
- 2) Simularea prelucrării și programul CNC: s-au efectuat în softul PowerMill Autodesk (Delcam). În fig.1, este prezentată o captură de ecran, unde se poate observa simularea prelucrării, iar în partea din dreapta sunt inserate primele și ultimele rânduri ale programului CNC generat. Este o fază de degroșare cu freza CF12R05, unde se prelucrează doar zona ce nu a fost prelucrată în programul anterior DEGPR.
- 3) Efectuarea prelucrării: Suprafața finită, obținută prin frezare, se poate observa în fig.2. Sculele folosite (adaosuri, turații, avansuri și timpii de execuție) sunt evidențiate în fișa de execuție, prezentată în fig. 3. Prelucrarea s-a făcut pe centrul de prelucrare cu comandă numerică, vertical Mazak Nexus 510C-II, ce se regăsește în fig.4.

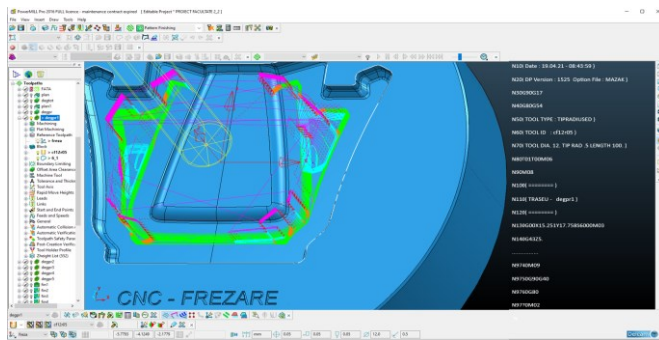


Fig. 1. Program DEGPR



Fig. 2. Suprafața executată prin frezare

Sumar program		S.C. Electromagnetica S.A.	
Program		Programator	
Operator		Program	
plan	10	0	0
degnot	20	1	CF20R1
plan1	8	0	eR
degr	20	1	CF20R1
degr1	1.2	0.5	eR1205
degr2	8	0.5	eR65
degr3	6	0	eR
degr4	4	0	eR
degr5	7	0	eR
fin1	8	4	M04
fin2	8	1	M04
fin3	4	2	M04
fin4	2	1	M02
HSM_A	0.3	0	eR.3
HSM_B	0.3	0	eR.3
HSM_C	0.3	0	eR.3

Fig. 3. Fișă de execuție – program de frezare piesă



Fig. 4. Centrul vertical Mazak Nexus 510C-II

4. Prelucrarea materialului prin electroeroziune cu electrod masiv. Etape tehnologice.

1) Realizarea electrodului din grafit fin R8500, prezentat în fig.5 s-a efectuat pe CNC Hurco VMX 10Hsi, regăsit în fig.6. Sculele folosite (adaosuri, turații, avansuri și timpii de execuție) sunt evidențiate în fișa de execuție, din fig.8.

2) S-a efectuat controlul electrodului sculă, pentru a se putea trece la prelucrarea suprafeței date, și s-au obținut rezultatele din fig.7, toleranța maximă obținută fiind de 0,249 mm pe pereții laterali și 0,245 mm pe suprafața frontală a piesei. Această etapă a avut loc pe masa de masurat în coordonate, DEA, prezentată în fig.9.

3) Realizarea electroeroziunii a avut loc pe centrul de eroziune ONA NX3, din fig.10. Suprafața finită obținută prin EDM pe piesă este observă în fig.11. S-a creat o strategie de prelucrare, tip „Cuts,, cu deplasare pe axa Z, cu o adâncime de 4 mm și distanța de siguranța deasupra piesei de 20 mm. A fost ales electrodul de grafit fin. Subdimensionarea electrodului, cu ajutorul căruia se creează interstițiul de prelucrare, a fost aleasă de 0.15 mm. Tehnologia folosită este de grafit fin pe Inconel, iar criteriul de care se ține cont este avansul. Se pornește de la VDI 37, și se cere să se ajungă la VDI 32, urmând ca ulterior să se facă o semifinisare pana la VDI 27.



Fig. 5. Electrod grafit fin R8500



Fig. 6. CNC Hurco VMX 10Hsi

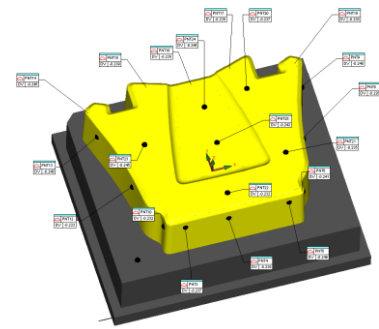


Fig. 7. Rezultate control electrod

Formular PL-110-001		Sumar programe										S.C. Electromagnetica S.A.							
electromagnetica.ro		Data:		2021-04-22										Pagina 1 din 1					
Semifabricat:		Proiect:		E:\DSerbin files\Desktop\proiect facultate\ELECTROD															
		Programator:		Adrian C.															
		Xmin:												Zmin:					
		Xmax:												Zmax:					
Operator	Inceput centrare	Terminat centrare	Program	Diam.	Raza	Felul sculei	Lt	Lp	Adaos	Turatie	Avans	Timp	Data intrare	Data iesire	Scula nr	Zmin	Zmax		
			DEG	10	0	CF10	40	0	0.3	5000	2500	0:18:32				-33.253	12		
			FIN	4	0	CF4	40	0	0	6500	2000	0:23:08				-18.699	12		
			FINB3	3	1.5	BILA3	40	0	0.1	7500	2000	0:44:15				-18.6	12		
			FINB2	2	1	BILA2	40	0	0.02	8000	2000	0:02:38				-18.68	12		
			FINB1	1	0.5	BILA1	40	0	0.02	10000	300	0:22:17				-18.68	12		
			CONT	10	0	CF10	40	0	0.02	4000	2000	0:05:00				-32.999	12		

Fig. 8. Fișă de execuție – program de frezare pentru electrodul sculă degroșare și finisare

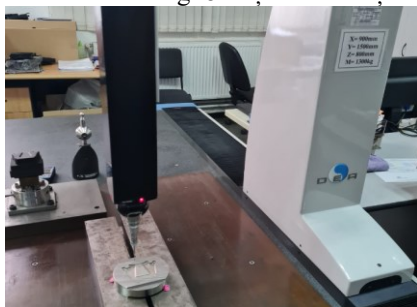


Fig. 9. Masă de control DEA



Fig. 10. Centru eroziune ONA NX3



Fig. 11. Suprafața electroeroziune

5. Controlul piesei prelucrate

S-a efectuat în prealabil controlul electrodului sculă, fig.7 și ulterior cel al suprafețelor obținute ale piesei ce fac obiectul cercetării, executate prin frezare (fig.12) și, respectiv electroeroziune (fig.13), pe mașina de măsurat în coordonate DEA Global Silver SF. Abaterea pe contur maximă, a suprafeței obținute prin EDM de 0.022 mm, iar a celei obținute prin frezare de 0.015 mm; abaterea de la forma dată, în ambele cazuri, 0.006 mm. Rugozitatea generală pentru suprafața prelucrată prin EDM este de 2.24 μm (27 VDI), iar la frezare este de 1.6 μm.

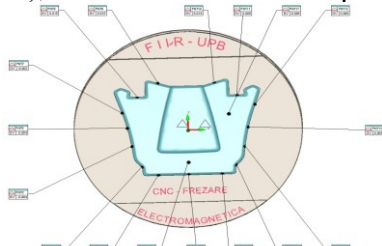


Fig. 12. Controlul suprafeței obținute prin frezare

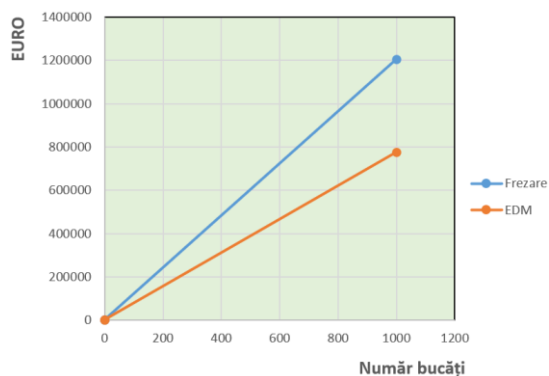


Fig. 13. Controlul suprafeței obținute prin EDM

6. Rezultate finale

În urma prelucrărilor au fost extrase datele și generate rezultatele din fig.15 a) pentru prelucrarea prin frezare, iar b) EDM, privind norma tehnică de timp: 262 min -frezare, 239 min -EDM. Din calculele economice, semnificațiile termenilor și modelul matematic, s-au obținut rezultatele: 1205€-frezare, 775€-EDM. Graficul rezultat din comparație (fig.14) demonstrează că, indiferent de situație, operația de frezare presupune costuri mai mari.

Fig. 14. Costul pentru frezare și EDM



a) Calculul normei tehnice de timp-FREZARE														
Operatia	Timp	Valori	UM	Timp	%	Valori	UM	Timp/n	Valori	UM	Timp	Valori	UM	
10. degpr	$\sum \tau_b$	18.19	min	$\sum \tau_{at}$	10	1.819	min	τ_u	34.447	min	τ_{buc}	35.122	min	
	$\sum \tau_a$	9	min	$\sum \tau_{do}$	10	2.719	min	n	40	buc	τ_{buc}	35.122	min	
	$\sum \tau_{ef}$	27.19	min	$\sum \tau_{on}$	10	2.719	min	τ_{pi}	27	min	$\tau_{buc-var}$	262.412	min	
20. degpr1	τ_{buc}	24.28	min	70. fin1	τ_{buc}	90.14	min							
30. degpr2	τ_{buc}	9.37	min	80. fin2	τ_{buc}	14.24	min							
40. degpr3	τ_{buc}	7.31	min	90. fin3	τ_{buc}	19.47	min							
50. degpr4	τ_{buc}	8.33	min	100. fin4	τ_{buc}	51.05	min							
60. degpr5	τ_{buc}	3.1	min											
b) Calculul normei tehnice de timp-ELECTROEROZIUNE (PRELUCRARE ELECTROD+PRELUCRARE PIESA)														
Operatia	Timp	Valori	UM	Timp	%	Valori	UM	Timp/n	Valori	UM	Timp	Valori	UM	
10. DEG	$\sum \tau_b$	18.32	min	$\sum \tau_{at}$	10	1.832	min	τ_u	41.816	min	τ_{buc}	42.491	min	
	$\sum \tau_a$	15	min	$\sum \tau_{do}$	10	3.332	min	n	40	buc	τ_{buc}	42.491	min	
	$\sum \tau_{ef}$	33.32	min	$\sum \tau_{on}$	10	3.332	min	τ_{pi}	27	min	$\tau_{buc-tot}$	239.271	min	
20. FIN	τ_{buc}	23.08	min	Prel.	τ_{buc}	100	min				PRELUCRARE PIESA	$\tau_{buc-pretal}$	130.1	
30. FINB3	τ_{buc}	44.15	min											
40. FINB2	τ_{buc}	2.38	min											
50. FINB1	τ_{buc}	22.17	min											
60. CONT	τ_{buc}	5	min											
Calcul economic-FREZARE a)														
Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM
pret/kg	2.3	buc	R _r	150	%	CMU	104000	€	A1	1204.75	€			
cost sf	80	€	τ_{buc}	262.412	min	A _{1g}	8	ani						
	184	€	S _{mi et}	80	€/luna	Fara f.com.	3411356.00	€						
			Fara regie	2.1867667	€	Z _i	7	zile						
			Manopera	5.4669167	€	n _{sch}	1	ore						
						h	8	ore						
						F _n	448	ore						
						Amortizare	1015.28	€						
Calcul economic-ELECTROEROZIUNE b)														
Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM	Parametri	Valori	UM
m _r	2.3	kg	R _r	150	%	CMU et	100000	€	A1	774.52	€			
pret/kg	80	€	$\tau_{buc et}$	130.1	min	A ₁	8	ani						
cost sf	184	€	S _{mi et}	85	€/luna	CMU edm	65000	€						
			$\tau_{buc edm}$	42.491	min	A ₂	8	ani						
			S _{mi adm}	80	€/luna	Fara f.com.	1971489.38	€						
			Fara regie	1.5060188	€	Z _i	7	zile						
			Manopera	3.7650469	€	n _{sch}	1	ore						
						h	8	ore						
						F _n	448	ore						
						Amortizare	586.75	€						
						A1-A2	430.23	x						
						B2-B1	121.38	x _{cr}	0.282131	C1(K _{cr})	740.70			
						K _{cr}	0.282131176	x _{cr+1000}	1000.282	C1(K _{cr+1000})	1205492.14			
								x	0	B2	522.18			
								x _{cr}	0.282131	C2(K _{cr})	740.70			
								x _{cr+1000}	1000.282	C2(K _{cr+1000})	775258.53			

Fig. 15. Calculul tehnico-economic pentru procedeul de prelucrare prin: a) frezare și b) EDM

7. Modelarea și simularea cu elemente finite a EDM Inconel și compararea cu prelucrarea unui oțel de referință X210 Cr12 (C 120), echivalent cu D3 (UNS T30403)

Modelarea s-a realizat în Comsol Multiphysics 4.2. S-au definit parametrii din fig.16 și s-a generat geometria piesei. Pe suprafața frontală a piesei s-a creat o microgeometrie reprezentată de două cratere cu profilul eliptic (fig.17). Bula de gaz din jurul canalului de plasma este delimitată de cele două puncte aflate la distanța rgb de origine. S-au introdus caracteristicile necesare simulării materialelor analizate, Inconel 718 (fig.18) și, respectiv D3 (fig.19).

Name	Expression	Value	Description
lp	100[mm]	0.1 m	latura piesei 2D
Ra	2.24E-6	2.24E-6	Rugozitatea initiala Ra
Rz	4*Ra	8.96E-6	Rugozitatea initiala Rz
dcr	20E-6	2.0E-5	Diametre medii catrene initiale Inconel
rgb	0.2[mm]	2.0E-4 m	Raza bulai gaz din jurul canal plasma al descarcarii
ti	100E-6	1.0E-4	Timp de impuls
rms	1E-6	1.0E-6	Raza material resolidificat pe marginea craterului

Fig. 16. Parametrii modelării-Global Definitions-Parameters

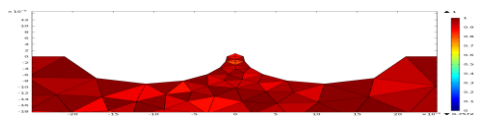


Fig. 17. Microgeometrie-discretizare

Property	Name	Value	Unit	Proprietate
Thermal conductivity	k	k(T[1/K])[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Heat capacity at constant...	Cp	C(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
Density	rho	rho(T[1/K])[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
dL	dL	dL(T[1/K])[1/K]	1/K	Basic
CTE	CTE	CTE(T[1/K])[1/K]	1/K	Basic
Resistivity	res	res_solid_full_her...	Ohm*m	Basic
Coefficient of thermal ...	alpha	alpha(T[1/K])[1/K]	1/K	Basic
mu	mu	mu(T[1/K])[Pa]	Pa	Basic

Fig. 18. Caracteristicile materialului Inconel 718

Property	Name	Value	Unit	Property
Density	rho	rho(T[...])	kg/...	Basic
Thermal conductivity	k	400	W/(...)	Basic
Heat capacity at constant...	Cp	386	J/(kg...)	Basic
dL	dL	dL(T[1...])	1/(kg...)	Basic
CTE	CTE	CTE(T[...])	1/K	Basic
Coefficient of thermal ex...	alpha	alpha(...)	1/K	Basic

Fig. 19. Caracteristicile materialului D3 (UNS T30403)

Spotul EDM este poziționat în funcție de axa de simetrie, iar temperatura este 3493,15 K [7], v. fig.20. În jurul acestuia se formează bula de gaz, care creează izolare termică, precum este prezentat în fig.21. Distribuția temperaturii este prezentată în fig.22. Se poate observa că influența acesteia este foarte mică, așadar produce efect doar în zona spotului. Volumul materialului prelevat de descărcare este delimitat de izoterma de fierbere, conform fig.23 pentru Inconel și fig.24 la D3, unde se pot observa coordonatele și valorile acestora. Se constată că acestea sunt similare valorilor experimentale, așadar se validează modelarea și rezultă comparația dintre valorile obținute pentru fiecare material, conform graficului din fig.25.



Fig. 20. Spotul EDM-Heat Transfer-Temperature 1



Fig. 21. Izolarea termică-Heat tranfer-Thermal Insulation 1

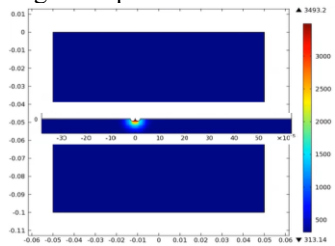


Fig. 22. Distribuție temperaturatură

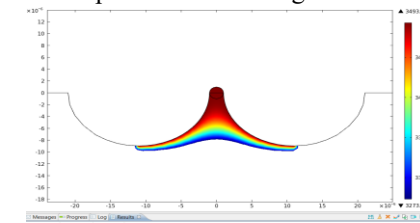


Fig. 23. Poziție izotermă fierbere Inconel

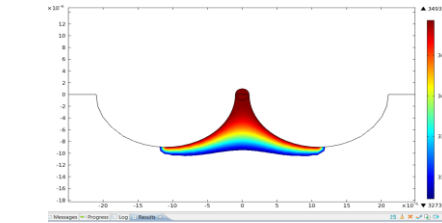
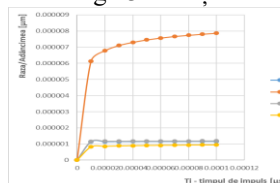


Fig. 24. Poziție izotermă fierbere D3



Inconel		C120		
r	h	r	h	ti
0	0	0	0	0
1.14E-06	6.14E-06	1.16E-06	8.19E-07	1.00E-05
1.14E-06	6.78E-06	1.17E-06	8.60E-07	2.00E-05
1.15E-06	7.11E-06	1.18E-06	8.82E-07	3.00E-05
1.15E-06	7.31E-06	1.18E-06	8.98E-07	4.00E-05
1.15E-06	7.46E-06	1.18E-06	9.11E-07	5.00E-05
1.15E-06	7.57E-06	1.18E-06	9.21E-07	6.00E-05
1.15E-06	7.67E-06	1.19E-06	9.29E-07	7.00E-05
1.15E-06	7.74E-06	1.19E-06	9.37E-07	8.00E-05
1.16E-06	7.81E-06	1.19E-06	9.43E-07	9.00E-05
1.16E-06	7.87E-06	1.19E-06	9.49E-07	1.00E-04

Fig. 25. Graficul și valorile rezultate în urma analizei cu elemente finite

8. Concluzii

În urma prelucrării comparative a aliajului Inconel 718 prin frezare și EDM, s-a efectuat o analiză tehnico-economică cu un program elaborat în Microsoft Excel, din care a rezultat varianta optimă de prelucrare, din punct de vedere al normei tehnice de timp și al costurilor. Diferențele de costuri sunt cu adevărat semnificative în favoarea EDM. Întrucât precizia de prelucrare obținută este apropiată în cele două cazuri, varianta tehnologică superioară este prelucrarea prin electroeroziune cu electrod masiv.

În urma modelării și simulării cu elemente finite a unei descărcări singulare EDM comparative pe aliajul Inconel 718 și oțelul C 120, prelucrat uzual prin EDM la matrițele pentru injecția polimerilor, s-a constatat comportamentul diferit al celor două materiale, urmărind poziția izotermei de fierbere, conform modelului supraîncălzirii. Pătrunderea termică este mai mare atât pe adâncime, cât și pe rază, la C120, față de Inconel. Deși C120 tratat termic este foarte dur, poate ajunge la peste 60HRC, comparativ cu Inconelul care are o duritate de 45HRC, Inconel are o rezistență la temperaturi ridicate remarcabilă, de aici și domeniile în care acesta este utilizat și prelucrabilitatea mai scăzută prin EDM.

9. Bibliografie

- [1]. Andreescu I. (2012), "Mechanical strength properties investigated on some heat resistant alloys (inconel x-718)", Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, Volumul 3, București, disponibil la: <http://www.smta.ro/reviste/articole/vol3nr1art4.pdf> accesat la: 29.03.2021
- [2].***, Alloy 718/Inconel 718, <https://bswmetals.ro/> accesat la: 29.03.2021
- [3].***VDM Alloy 718, disponibil la <https://matmatch.com/> accesat la: 31.03.2021
- [4].***Special Metals Corporation (2007), "INCONEL is a trademark of Special Metals Corporation group of companies", Publication Number SMC-045, disponibil la: <https://specialmetals.com/>, accesat la: 31.03.2021
- [5]. Ahmad, S. and Lajis, M.A. (2013), "Electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- [6]. Ghiculescu, D. și Marinescu, N.I., și Alupei, O. (2016), On Overlapping the Pulses on Cumulative Microjets Stage at Ultrasonically Aided Electrical Discharge Machining, Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1662-7482, Vol. 834, p. 126-131.
- [7]. Jahan, M. P. (2015), *Electrical Discharge Machining (EDM). Types, Technologies and applications*, Nova, New York.8].***U.S. Government Printing Office (1988), "Metallic Materials and Element for Flight Vehicle Structures", Washington, D.C.