مدلسازی مکانیکی و حرارتی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بهروش اجزاء محدود

مجید قریشی ⁽ و عاطفه نادریفرد ^۲

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (تاریخ دریافت: ۸۹/۰۸/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۶)

چکیدہ

در این مقاله، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی EDM بهروش اجزاء محدود FEM مدلسازی شده است. در قسمت اول، توزیع دمای ایجاد شده در قطعه کار حاصل از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، محاسبه شده است. در قسمت دوم، از آنالیز ترمو- مکانیکی برای تخمین تـنش حرارتی و پسماند استفاده شد. در ادامه، برای اثبات مدل، مقایسهای بین نتایج حاصل از شبیهسازی با نتایج آزمایشگاهی که توسط دیگر محققان صورت گرفته است، انجام شد. پس از مقایسه، مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیهسازی وجود دارد و با افزایش انرژی تخلیه، عمق ترکهای ایجادشده، بیشتر میشود.

واژههای کلیدی: ماشین کاری تخلیه الکتریکی، تنشهای حرارتی، تنشهای پسماند، روش اجزاء محدود

Thermal and Mechanical Modeling of Electro Discharge Machining Process Using Finite Element Method (FEM)

M. Ghoreishi and A. Naderifard

Mech. Eng. Dep't., K.N.Toosi Univ. (Received: 27 October, 2010; Accepted: 05 February, 2012)

ABSTRACT

In this paper electro discharge machining (EDM) by finite element method (FEM) has been modeled. First temperature distribution in work piece, resulted of EDM has been calculated. In second section, thermo- mechanical analysis has been used for estimation of thermal and residual stress. Afterwards, for validating results of simulation, comparison with experimental results of the other researchers has been done. Then it has been shown that, there is good agreement between experimental and simulation results. Also it has been shown that, the depth where the maximum stress value is observed increases with discharge energy. So the probability of deep cracks increases.

Keywords: Electro Discharge Machining, Thermal Stresses, Residual Stresses, Finite Element Method

ghoreishi@kntu.ac.ir :- دانشيار (نويسنده پاسخگو):

۲- کارشناسی ارشد: a.naderifard@gmail.com

۱– مقدمه

فرآیند ماشین کاری به کمک تخلیه الکتریکی یکی از روشهای جایگزین برای ماشین کاری سنتی است. این روش جزء اولـین فرآیندهای ماشین کاری غیرسـنتی بـوده و قـدمتی ۵۰ سـاله دارد [۱]. در برخی مواقع در ماشین کاری مواد بـا اسـتحکام و مقاومت بالا تنها روش ماشین کاری به شمار میرود و در طیف گسـتردهای از صـنایع کـاربرد دارد [۲]. عامـل اساسـی برادهبرداری، در این فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی بـه انـرژی حرارتی است، به طوری که حرارت بسیار زیاد تولید شده سبب ذوب و تبخیر مقادیر بسیار کوچکی از قطعـه میشود. مـواد دوب یا تبخیـر شـده از الکتـرود جـدا شـده و سـپس توسط دی الکتریک شسته می شوند.

اساس روش EDM^۱ به سال ۱۷۷۰ که شیمیدان انگلیسی آقای ژوزف پریستلی^۲ اثر سایشی تخلیه الکتریکی را دریافت، برمی گردد. با این حال در سال ۱۹۴۳ بود که آقا و خانم لازارنکو^۳ از خصوصیات تخریبی جرقههای الکتریکی برای ساخت قطعات استفاده کردند [۳].

از آن زمان تاکنون محققین زیادی روی مدلساری این فرآیند و بررسی اثر پارامترهای مختلف روی صافی سطح، نرخ برادهبرداری، مدلسازی کانال پلاسما و… پرداختند. محققینی همچون اسنویس[†] [۴]، ون دیجک⁶ [۵]، هوولمن^۶ [۶]، کونینگ^۷ [۷]، پاندیت^۸ [۸]، اردن^۴ [۹]، ناتسو^{۱۳} [۱۴]، کومار^{۱۴} [۱۵] و… به بررسی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی و مدلسازی آن پرداختهاند.

با وجود کارهای انجام شده در زمینه مدلسـازی، فرآینـد ماشینکاری تخلیه الکتریکی اسـتفاده از روش اجـزاء محـدود

- 1- Electro Discharge Machining
- 2- Joseph Priestly
- 3- Mr. and Mrs. Lazarenko

7- Koning

- 9- Eldell
- 10- DiBitonto

- 12- Singi 13- Natsu
- 14- Kumar

15- Shankar

17- Ahn

18- Chung

19-Yadav

20- Rebelo

21- Das

16- Finite Element Method

برای مدلسازی سابقه چندانی ندارد.

در سال ۱۹۹۷ شانکار^{۱۵} و همکارانش [۱۶] به مطالعه فرآیند EDM بهوسیله روش ^{۱۵}FEM پرداختند، آنها ثابت کردند کانال پلاسمای ایجاد شده در فرآیند EDM غیر استوانهای است و شعاع آن در سطح مقطعهای مختلف متفاوت است، بهعلاوه درصد گرمای ورودی به آند، کاتد و دیالکتریک را محاسبه کرده، همین طور میزان بار برداشته شده در الکترودها را نیز محاسبه کردند.

در سال ۲۰۰۲ آهون^{۱۷} و چانگ^{۱۸} [۱۷]، با کمک روش FEM، برای بهدست آوردن توزیع دما در الکترود، مدلی دوبعدی با منبع حرارتی صفحهای که شار ثابتی را ایجاد می کرد، شبیهسازی کردند. سپس اثر جریان را روی میزان نرخ برادهبرداری مورد بررسی قرار دادند. در همان سال، Isle^{۹۹} و همکاران [۱۸]، مدلی دوبعدی، به کمک روش FEM برای محاسبه تنشهای حرارتی ایجاد شده بر اثر گرادیان شدید دمایی ناشی از فرآیند MDH ارائه دادند و اثر پارامترهای زمان روشنی پالس و جریان را روی آن مورد بررسی قرار دادند. ربلو^{۲۰} و همکاران [۱۹] نیز در سال ۲۰۰۲ در مدلی که ارائه دادند، علاوه بر تنشهای حرارتی، تنشهای پسماند ناشی از MDH را روی فولاد زنگ نزن 304 تحمین زدند و شعاع کانال پلاسما را به صورت تابعی از زمان درنظر گرفتند.

داس^(۲) و همکاران [۲۰]، در سال ۲۰۰۳ به محاسبه توزیع دمای ایجاد شده در الکترود به کمک روش FEM پرداختند، علاوه بر آن تنشهای پسماند ناشی از تغییر شدید دما در الکترود را محاسبه کردند. در همان سال قانم^{۲۲} و همکاران [۲۱]، اثر نوع فولاد را روی کیفیت سطح مورد بررسی قرار دادند و مدلی به کمک FEM برای محاسبه تنشهای پسماند ایجاد شده در فولاد ارائه کرده و با نتایج تجربی مقایسه کردند.

⁴⁻ Snoyes

⁵⁻ Van Dijck

^{6 -}Heuvelman

⁸⁻ Pandit 9- Erden

¹¹⁻ Eubank 12- Singh

²²⁻ Ghanem

www.SID.ir

مـورالی^۱ و همکـاران [۲۲]، در سـال ۲۰۰۵ مـدلی را به کمک روش FEM برای محاسبه تنشهای پسماند ایجاد شده در فرآیند میکرو EDM روی آلیاژ تیتانیم (Ti-6Al-4V) پیشنهاد کردند. در ادامه کارهای انجام شـده بـه کمـک روش FEM این بار، در سال ۲۰۰۷ آلن^۲ و چن^۳ [۲۳] فرآیند میکرو میکرو EDM را روی مولیبدن شبیه سازی کردند و علاوه بر محاسبه عمق حفـره ناشی از تخلیه الکتریکی، تـنشهای پسماند ایجاد شده در آن را هم تعیین کردند.

تان^۴ و یو^۵ [۲۴] در سال ۲۰۰۸، به مدلسازی سطح ناشی از روی هم افتادن⁹ حفرهها در فرآیند میکرو EDM به کمک روش اجزاء محدود پرداختند. در همان سال سلا^۷ و همکارانش [۲۵] به شبیه سازی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک روش اجزاء محدود پرداخته و تنش های حرارتی و پسماند ایجاد شده بر اثر EDM محاسبه کرده، آنگاه با کمک مقایسه با نتایج تجربی مدل خویش را اثبات کردند.

در این مقاله هم شبیه سازی مکانیکی و هم شبیه سازی حرارتی فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. ابت دا به کمک اعمال شار حرارتی توزیع دمای حاصل از فرآیند مورد محاسبه قرار گرفته و در ادامه، هم تنش های حرارتی و هم پسماند حاصل از آن مورد محاسبه قرار گرفتند. در انتها نیز مقایسه ای با نتایج تجربی ارائه شد و درنهایت پس از اثبات مدل اثر انرژی پالس روی تنش ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مدلسازی عددی

در ابتدا فرضیات مطرح شده جهت مدل سازی و در ادامه هـم مدل حرارتی به کار رفته و در انتها مدل مکانیکی درنظر گرفته شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- فرضیات ۱. قطعهکار درنظر گرفته شده دارای تقارن محوری است، ۲. جنس مواد قطعهکار همگن و ایزوتروپیک میباشد، ۳. آنالیز انجام شده برای یک جرقه است،

1- Murali

- 3- Chen
- 4- Tan
- 5- Yeo
- 6- Overlapping
- 7- Salah

۴. مواد تشکیل دهنده قطعهکار الاسـتیک، کـاملاً پلاسـتیکی است،

۵. قطعه کار قبـل از انجـام فرآینـد فاقـد تـنش.هـای پسـماند می باشد،

۶. خصوصیات فیزیکی قطعه کار وابسته به دما است و
 ۷. آنالیز حرارتی درنظر گرفته شده از نوع گذرا (وابسته به زمان) است.

۲-۲- مدل حرارتی

ابتدا معادلات حرارتی مربوط به شبیهسازی و آنگاه کلیه شرایط مرزی مسئله، شعاع کانال پلاسما، شعاع کانال پلاسما، و سپس درصد انرژی ورودی به قطعه کار بیان شده است. ۲-۲-۱- معادلات حرارتی

معادلات دیفرانسیل انتقال حرارتی حاکم بر جسم با تقارن محوری از رابطه (۱) بهدست میآید [۲۶]:

 $\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(Kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t},\qquad(1)$

که در این معادلـه، T دمـای کنـونی (دمـا در هـر لحظـه)، م چگالی، C گرمای ویژه، t زمان، r و z مختصات استفاده شـده است. معادله (۱) را میتوان بهشکل ماتریسی بهصورت معادله (۲) نوشت [۲۶]:

 $\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) + \left\{L\right\}^T \left\{q\right\} = 0, \tag{(7)}$

که در این معادله، L عملگر بـرداری و q بـردار شـار حرارتـی است و بهصورت معادلههای (۴ و ۳) تعریف میشوند:

$$\{L\} = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{cases}, \tag{(f)}$$
$$\{q\} = \begin{cases} Q_r \\ Q_r \end{cases}. \tag{(f)}$$

$$\{q\} = \begin{cases} \mathcal{Q}_r \\ \mathcal{Q}_z \end{cases}.$$
 (f

۲-۲-۲ شرایط مرزی

در شکل ۱ شرایط مرزی اعمال شده مشاهده می شود. همان طور که در شکل دیده می شود، انتقال گرما فقط در مرزهای c و b انجام می شود. مرزهای e و h به دلیل فاصله زیاد تا محل اعمال شار می توان به صورت عایق فرض کرد. مرز

²⁻ Allen

a نیز بەدلیل محور تقارن بودن، عایق است.

$$\begin{cases} h_c(T - T_o) & r \succ R & on & b , \\ q_w & r \ge R & on & c , \\ 0 &$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$
 a, d, e روی مرزهای (۶) (۶)

R معادلات، q_w مقدار شار ورودی به قطعه کار، R مناع کانال پلاسما، h_c ضریب انتقال حرارت همرفتی، T_0 دمای اتاق و n بردار عمود بر مرز است.



۲–۲–۳– شعاع کانال پلاسما

تحقیقات زیادی برای تعیین مقدار شعاع کانال پلاسما (rs) صورت گرفته، اما هنوز مدل جامعی ارائه نشده است. براساس تحقیقات انجام گرفته مشخص شد که شعاع کانال پلاسما ثابت نیست و تابعی از زمان است [۱۰]. این رشد تابع فاکتورهایی نظیر جنس الکترود، پلاریته و زمان است [۲۷].

در این مقاله از رابطـه (۲) کـه در مرجـع [۱۰] پیشـنهاد شده بود، استفاده شد:

$$r_s = r_0 t^{3/4},$$
 (Y)

۲-۲-۴ شار حرارتی برای مدل کردن حرارت ورودی در مدلسازی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، بهترین و مناسبترین روش،

اعمال شار حرارتی یا مدلسازی منبع حرارت ورودی است. شار حرارتی درنظر گرفته شده در این مقاله، برای تطبیق بهتر با واقعیت مطابق با منبع [۲۸]، با توزیع گوسی از رابطه (۹) حاصل می شود:

$$q_0 = \frac{F_C V I}{\pi r_s^2},\tag{A}$$

$$q_r = 3.2q_0 \exp\left[-3\left(\frac{r}{r_s}\right)^2\right].$$
 (9)

۲-۲-۵- درصد انرژی ورودی به قطعه کار

همانطور که در شکل ۲ دیده می شود، کل انرژی تولید شده در کانال پلاسام، بین آند، کاتد، و دی الکتریک تقسیم می شود.

خصوصیات جنس مواد استفاده شده در الکترودها، مقدار درصد گرمای ورودی به الکترودها را تعیین میکند. بهطور تئوری می توان گفت: اگر فولاد به عنوان آند استفاده شود و مس به عنوان کاتد، انرژیای که مس نسبت به فولاد جذب میکند، به علت بالاتر بودن ضریب پخش آن، بیشتر است. ولی هنوز روش جامعی برای تعیین این پارامتر ارائه داده نشده است. در این تحقیق مطابق با نظر ۱۸/۳ [۱۰]، درصد انرژی ورودی به قطعه کار، ۲۶، ۱۸/۳/ لحاظ شد.

۲–۳– مدل مکانیکی

ابتدا معادلات حاکم، آنگاه کلیه شرایط مرزی، همینطور نـوع المانهای استفاده شده بیان شده است.

$$I - T - I - n$$
 معادلات حاکم
معادلات پایه ای مربوط به تحلیل مکانیکی شامل معادلات
معادل¹ و معادلات پایه ای^۲ هستند که در زیر بیان می شوند:
- معادلات تعادل
معادلات تعادل عبارت است از:
 $\sigma_{ij,j} + \rho.b_i = 0$ (۱۰
 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ (۱۱)
(۱۱) $b_i = 0$ است. معادله (۱۱)

نشان میدهد که تانسور تنش متقارن است.

2- Constitutive Equations

¹⁻ Equations of equilibrium

- معادلات پایه ار تباط میان تنش- کرنش را می توان به صورت معادل اله ا (۱۲) و (۱۳) نوشت: $\begin{bmatrix} d\sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{ep} \end{bmatrix} d\varepsilon \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C^{th} \end{bmatrix} dT$ (۱۲) $\begin{bmatrix} D^{ep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D^p \end{bmatrix}$ (۱۳) $\begin{bmatrix} D^{ep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D^p \end{bmatrix}$ (۱۳) $\begin{bmatrix} D^{ep} \end{bmatrix}$ ماتریس سختی الاستیک، $\begin{bmatrix} C^{th} \end{bmatrix}$ ماتریس سختی حرارت،

جزء تنش، $d \varepsilon$ جزء کرنش و d d t جزء دماست [۳۰].



شکل (۲): نمای کلی از فرآیند EDM [۲۹].

از آنجا که تحلیل الاستو- پلاستیک حرارتی مسئله غیرخطی است، در مقاله حاضر از روش تحلیل افزایشی^۱ برای حل مسئله استفاده میشود. تنشهای حرارتی را میتوان از روش نیوتن-رافسون کامل بهدست آورد.

۲-۳-۲ شرایط مرزی

شرایط مرزی متقارن هم، روی خط تقارن درنظر گرفته شد. سطح زیرین قطعه کار نیز به طور کامل از حرکت در راستای عمودی و افقی مهار شده است.

۲-۴- مدل اجزاء محدود

قطعه کار درنظر گرفته شده، استوانهای است که بهدلیل تقارن محوری به صورت دوبعدی مدل شده است. در شکل ۳ اعمال کانال پلاسما ریزتر شدهاند که این امر منجر به افزایش دقت در این نواحی می شود.

المان حرارتي انتخاب شده، المان درجه دوم Plane77 و

المان مکانیکی استفاده شده، المان درجه دوم 82 Plane است. جنس قطعه کار به کار رفته نیز فولاد زنگنزن آستنیتی AISI 304 است. خصوصیات فیزیکی قطعه کار استفاده شده و نیز تغییرات ضریب انتقال حرارت همرفتی دی الکتریک روغنی استفاده شده، به ترتیب در جدول های ۲ – ۱، در قسمت پیوست، آمده است.



شکل (۳): نمای دوبعدی از مدل مشبندی شده.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل حرارتی و مکانیکی بهصورت مجزا، در ادامه آمده است.

۳-۱- نتایج حاصل از مدل حرارتی

شار حرارتی در زمان روشنی پالس روی قطعه کار اعمال میشود، آنگاه در زمان خاموشی پالس شار حرارتی حذف و المانهایی که دمای آنها از دمای ذوب قطعه کار بیشتر است، برداشته میشوند.

این کار در شبیهسازی بهوسیله تکنیک تولد و مرگ المانها انجام میشود. در شکلهای ۶–۴ توزیع دمای حاصل از کانال پلاسما ناشی از جریان ۳۲A و زمان روشنی پالس ۸۰۰µs نشان داده شده است. ولتاژ لحاظ شده ۳۲۷ میباشد.

همان طور که در شکلها دیده می شود، شیب دمایی در محل اعمال کانال پلاسما بسیار بالاست که همین امر خطر وقوع تنشهای حرارتی و پسماند را افزایش میدهد. بنابراین، در ادامه مقادیر این تنشها مورد محاسبه قرار گرفته است. علت بالا بودن این دما را میتوان در زمان روشنی پالس زیاد، جریان بالا و نیز کوچک بودن شعاع پالس، دانست.

¹⁻ Incremental

۲-۳- نتایج حاصل از مدل مکانیکی در این قسمت تنشهای حرارتی، پسماند و مقایسه بین دادههای تجربی با نتایج شبیهسازی آمده است.

۳-۲-۱- تنشهای حرارتی

تنشهای حرارتی شعاعی و محوری ناشی از اعمال کانال پلاسما در شکلهای ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکلها ملاحظه می شود، توزیع تنش در اطراف حفره از نوع فشاری است. این پدیده را بهسادگی میتوان توضیح داد، هنگامی که قطعه کار حرارت می بیند، تمایل به انبساط دارد، ولى فلز سرد اطراف، مانع از انبساط آن مى شود. همين امر منجر به ایجاد تنش فشاری در منطقه حرارت دیده می شود. توزیع تنشهای حرارتی در راستای محیطی مانند تنشهای شعاعی است. بنابراین از آوردن نمودار آن در شکلها خودداری شده است. نکته قابل ذکر دیگری که در شکلها دیده میشود، بزرگتر بودن مقادیر تنشهای حرارتی شعاعی نسبت به محوری است که همین امر مؤید اهمیت بیشتر این نوع تنش نسبت به تنش محوری می باشد. علت هم، بیشتر بودن توزیع دما در راستای شعاعی نسبت به راستای محوری است، که در شکل ۵ دیده می شود. به همین دلیل نیز چالههای حاصل از یک جرقه EDM، یهن هستند تا اینکه عمیق باشند. شرایط ماشین کاری لحاظ شده در



۳–۲–۲– تنشهای پسماند

در شکلهای ۹ و ۱۰ تنشهای پسماند باقیمانده در قطعه کار پس از رسیدن به دمای محیط نشان داده شده است.

همانطور که از مقایسه این شکلها با شکلهای ۷ و ۸ دیده میشود، تنشهای فشاری اطراف حفره، پس از سرد شدن کامل قطعهکار به تنشهای کششی تبدیل شده است. علت را میتوان اینگونه توضیح داد: هنگامیکه فلز مذاب/داغ سرد میشود، تمایل به انقباض دارد، ولی بهدلیل اتصالی که با فلز سرد دارد، از انقباض آن جلوگیری میشود که همین منشأ تنش کششی پسماند در سطح میشود و احتمال ایجاد ترکهای سطحی را قوت میبخشد.

شرایط ماشین کاری لحاظ شده در شکلهای ۹ و ۱۰ با لحاظ کردن جریان ۴۸۸ و زمان روشنی پالس ۴۰۰µs میباشد. تنشهای پسماند محیطی مانند تنشهای پسماند شعاعی است. بنابراین در شکلها از آوردن آن صرفنظر شده است. مانند آنچه در شکلهای ۷ و ۸ دیده شد، مقادیر تنشهای پسماند شعاعی از محوری بیشتر است.



www.SID.ir



شکل (۵): کانتور توزیع دمایی درون قطعه کار بلافاصله پس از قطع کانال پلاسما.



ر المراجع ال

شکل (۷): نمودار توزیع تنش شعاعی در امتداد عمق قطعه کار.







۴- نتیجهگیری

در این مقاله مدل دوبعدی برای محاسبه توزیع دمای ایجادشده در قطعه کار در نتیجه انجام فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی ارائه شد. از روی توزیع دما دیده شد که گرادیان شدید حرارتی در محل اعمال کانال پلاسما درون قطعه کار ایجاد می شود. وجود این گرادیان شدید دمایی بیانگر احتمال ایجاد تنشهای حرارتی درون قطعه کار می باشد. بنابراین، در ابتدا تنشهای حرارتی ایجاد شده درون قطعه کار



شکل (۱۰): نمودار توزیع تنش محوری پسماند در امتداد عمق.

۳-۲-۳ مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی

برای اثبات صحت نتایج حاصل از مدل، از دادههای ارائه شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است. شکل ۱۱ نتایج حاصل از شبیهسازی و شکل **۱۲** نیز نتیجه کار آزمایشگاهی انجام شده در مرجع [۱۹] است.

از مقایسه دو شکل ۱۱ و ۱۲ دیده میشود که روند تغییرات در هر دو شکل مشابه یکدیگر است. تنش پسماند کششی در سطح وجود دارد که تا مقدار بیشینه در عمق افزایش یافته و مجدداً کاهش مییابد. مقدار بیشینه تنش

- Heuvelman, C.J., Horesten, H.J.A., and Veenstra, P.C. "An Introductory Investigation of the Breakdown Mechanism in Electro-discharge Machining" Annals of the CIRP, 20/1, pp. 43-44, 1971.
- König, W., Wertheim, R., Zvirin, Y., and Roren, M. "Material Removal and Energy Distribution in Electrical- discharge Machining" Annals of the CIRP, 24/1, pp. 95-100, 1975.
- Pandit, S.M. and Rajurkar, K.P. "Comparision of Various Approaches to EDM Process Modeling from Surface Roughness Profiles", Ann.CIRP: 107, 1980.
- Erden, A. and Kaftanoglu, B. "Heat Transfer Modeling of Electric Discarge Machining", 21th Int. Mach. Tool Res. Conf. Swansea, pp. 351-358, 1980.
- DiBitonto, D., Eubank, P.T., Patel, M.R. and Barrufet, M.A. "Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model", J. Appl. Phys. Vol. 66, No. 9, pp. 4095-4103, 1989.
- DiBitonto, D., Patel, M.R., Barrufet, M.A. and Eubank, P.T. "Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. II. The Anode Erosion Model", J. Appl. Phys. Vol. 66, No. 9, pp. 4104-4111, 1989.
- Eubank, P.T., Patel, M.R., Barrufet, M.A., and Bozkurt, B. "Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. III. The Variable Mass, Cylindrical Plasma Model", J. Appl. Phys. Vol. 73, No. 11, pp. 7900-7909, 1993.
- Singh, A. and Ghosh, A. "A Thermo-electric Model of Material Removal During Electric Discharge Machining", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No.4, pp. 669-682, 1999.
- Natsu, W., Shimoyamada, M., and Kunieda, M. "Study on Expansion of Arc Plasma", JSME Int. J., Series C, Vol. 49, No. 2 pp. 600-605, 2006.
- Kumar, P.D. "Study of Thermal Stresses Induced Surface Damage under Growing Plasma Channel in Electro-discharge Machining", J. Materials Processing Tech., Vol. 202, No.1-3, pp. 86-95, 2008.
- Shankar, P., Jain, V.K., and Sundararajan, T. "Analysis of Spark Profiles During EDM Peocess", Machining Sci. and Tech., Vol. 1, No. 2, pp. 195-217, 1997.
- Ahn, Y.C. and Chung, Y.S. "Numerical Analysis of the Electro-discharge Machining Process for Alumina-Titanium Carbide Composite II. Unsteady State Approach", Korean J. Chem. Eng., Vol. 19, No. 4, pp. 694-702, 2002.
- Yadav, V., Jain, V.K., and Dixit, P.M. "Thermal Stresses Due to Electrical Discharge Machining", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 42,

درست پس از قطع کانال پلاسما مورد محاسبه قرار گرفت. ملاحظه شد مقادیر این تنشها منفی است که خود مبین فشاری بودن این تنشهاست.

سیس مقادیر تنشهای یسماند حاصل از فرآیند مورد محاسبه قرار گرفت. ملاحظه شد مقادیر این تـنشهـا مثبـت است و این به معنای کششی بودن این تنش هاست. این امر خود دلیلی بر وقوع ترکهای ریزسطحی در قطعات ماشین کاری شده با ماشین کاری تخلیه الکتریکی میباشد. در انتها هم برای بررسی صحت مدل مقایسهای بین نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱۹] و نتایج حاصل از مدل انجام گرفت. پس از مقایسه، مشاهده شد که روند هر دو نمودار مشابه هـم است و تنها تفاوت موجود در مقادیر تنش هاست. دلیل آن، این است که آزمایش انجامشده مربوط به حالت چند جرقه است در حالی که داده های تجربی مربوط به حالت تک جرقه میباشد. پس از اثبات مدل با نتایج تجربی، این بار اثـر انـرژی تخلیہ روی تنشھا یسماند مورد بررسے قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش انرژی تخلیه عمقی که تنشها به مقدار حداکثر میرسد، افزایش می یابد که این امر خود خطر عمیقتر شدن ترکهای ایجاد شده را در بر دارد.

مراجع

- Asadi, M., Ghoreishi, M. "Investigation of Electro Discharge Machining Parameters Using Aluminium Powder Suspended in Dielectric", Mech. & Aerospace Eng. J. Vol. 1, No. 1, pp. 11-17, 2005. (In Persian)
- Amorim, F.L. and Weingaertner, W.L. "Diesinking Electrical Discharge Machining of a Highstrength Copper-based Alloy for Injection Molds", J. the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., Vol. XXVI, No. 2, pp. 137-144, 2004.
- Salman, O. and Kayacan, M.C. "Evolutionary Programming Method for Modeling the EDM Parameters for Roughness", J. Materials Processing Technology, Vol. 200, No. 1-3, pp. 347-355, 2008.
- Snoyes, R. and Van Dyjck, F. "Investigations of Electrodischarge Machining Operations by Means of Thermo-mathematical Model", Ann. CIRP, pp. 35-6, 1971.
- Van Dijck, F.S. and Duttre, W.L. "Heat Conduction Model for Calculation of the Volume of Molten Metal in Electric Discharges", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.7, No.6, pp. 899-910, 1974.

- Salah, N.B., Ghanem, F., and Atig, K.B. "Thermal and Mechanical Modeling of Electric Discharge Machining Process", Commun. Numer. Meth. Engng 24, pp.2021-2034, 2008.
- 26. Kansal, H.K., Singh, S., and Kumar, P. "Numerical Simulation of Powder Mixed Electric Discharge (PMEDM) Using Finite Element Method" Mathematical and Computer Modeling Vol. 47, No. 11-12, pp. 1217-1237, 2008.
- Schulze, H.P., Herms, R., Juhr, H., Schaetzing, W., and Wollenberg, G. "Comparison of Measured and Simulated Crater Morphology for EDM", J. Materials Processing Tech. Vol. 105, No. 2, pp. 316-322, 2004.
- Yeo, S.H., Kurnia, W., and Tan, P.C. "Critical Assessment and Numerical Comparison of Electro-thermal Models in EDM", J. Materials Processing Tech., Vol. 203, No. 1-3, pp. 241-251, 2008.
- 29. Yu, Z.Y., Masuzawa, T., and Fujino, M. "Micro EDM for Three Dimensional Cavities", Annals of the C.I.R.P., Vol. 47, No. 1, pp. 169-172, 1998.
- 30. Najaf Abadi Farahani, M.R., "Study on Weld Design on Magnitude and Distribution of Welding Residual Stresses", Thesis for Degree of Master of Science, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, 2006. (In Persian)

No. 8, pp. 877-888, 2002.

- Rebelo, J.C., Kornmeier, M., Batista, A.C., Dias, A.M. "Residual Stress after EDM - FEM Study and Measurement Results", Materials Sci. Forum Vols. 404-407, No. 159, pp. 159-164, 2002.
- Das, S., Klotz, M., Klocke, F. "EDM Simulation: Finite Element-based Calculation of Deformation, Microstructure and Residual Stresses", J. Materials Processing Tech., Vol. 142, No. 2, pp. 434-451, 2003.
- Ghanem, F., Braham, C., and Sidhom, H. "Influence of Steel Type on Electrical Discharge Machined Surface Integrity", J. Materials Processing Tech., Vol. 142, No. 1, pp. 163-173, 2003.
- Murali, M. S. and Yeo, S.H. "Process Simulation and Residual Stress Estimation of Micro-Electro Discharge Machining, Using Finite Element Method", Japanese J. Applied Physics, Vol. 44, No. 7A, pp. 5254-5263, 2005.
- Allen, P. and Chen, X. "Process Simulation of Micro Electro-discharge Machining on Molybdenum", J. Materials Processing Tech., Vol. 186, No. 1-3, pp. 346-355, 2007.
- Tan, P.C. and Yeo, S.H. "Modeling of Overlapping Craters in Micro-electrical Discharge Machining", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 41, No. 205302, pp.12, 2008.

پيوستھا

	-
لاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].	جدو ل (۱): هدایت حرار تی فو

هدایت حرار تی[W/m.K]	دما[°C]
۱۵/۹	۲.
۲۱/۸	۵۰۰
۳۳/۸	1477
40/8	2900

۸۸].	رحسب دما [لاد به کاررفته ب	گرمای ویژه فو <i>ا</i>	جدول (۲):
------	------------	------------------	------------------------	-----------

گرمای ویژه[W/mK]	دما[°C]
401	۲.
۵۶۱	4
۶۲۸	٨٠٠
٨٢٢	790.

جدول (٣): ضریب انبساط حرارتی فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

ضریب انبساط حرارتی [⁻⁶ .K ⁻¹]	دما[℃]
1/۲	۲.
۲/۵	7
٣/۶	۵۰۰
۵/۳	٨٠٠
Δ/Λ	٩٠٠
V/Δ	17

جدول (۴): مدول الاستیسیته فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

مدول الاستيسيته [GPa]	دما[°C]
198	۲.
١٨٢	۲۰۰
۱۵۸	۵۰۰
178	٨٠٠
۱ <i>۰۶</i>	٩٠٠
۱۵	17

جدول (۵): تغییرات مقاومت تسلیم فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].	
مقاومت تسليم[MPa]	دما[°C]
20.	۲.

۲۱.	7
14.	۵۰۰
٨۵	٨٠٠
۶.	٩
۵	17

[11]	1	مكا فته	. N.à	115~	• تور ات	(8)	10.12
.[1/1]	برحسب دما	له ن رقبه	, خو د د د	چیاہے	. تعييرات	V).	جندور

<u>, e , , , , , , , , , , , , , , , , , ,</u>
دما[°C]
١٠٠
۲۰۰
4
۶۰۰
٨٠٠
1

· ضريب انتقال حرارت فولاد به كاررفته برحسب دما [18]	تغييرات	جدول (۷):	

ضریب انتقال حرارت همرفتی[W/m ² .K]	دما[°C]
<u> </u>	۲۰
۶۶۸/۹	۲۰۰
TIVY	۶۰۰
۸۳۶/۲	۷۲۰