

مدل سازی مکانیکی و حرارتی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به روش اجزاء محدود

مجید قریشی^۱ و عاطفه نادری فرد^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۸/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۶)

چکیده

در این مقاله، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی EDM به روش اجزاء محدود FEM مدل سازی 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 تنش حرارتی و پسماند استفاده شد. در ادامه، برای اثبات مدل، مقایسه ای بین نتایج حاصل از شبیه سازی 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 شبیه سازی وجود دارد و با افزایش انرژی تخلیه، عمق ترک های ایجاد شده، بیشتر می شود.

واژه های کلیدی: ماشین کاری تخلیه الکتریکی، تنش های حرارتی، تنش های 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

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): ghoreishi@kntu.ac.ir

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

۱- مقدمه

برای مدل‌سازی سابقه چندانی ندارد. در سال ۱۹۹۷ شانکار^{۱۵} و همکارانش [۱۶] به مطالعه فرآیند EDM به وسیله روش FEM^{۱۶} پرداختند، آنها ثابت کردند کانال پلاسمای ایجاد شده در فرآیند EDM غیر استوانه‌ای است و شعاع آن در سطح مقطع‌های مختلف متفاوت است، به علاوه درصد گرمای ورودی به آند، کاتد و دی‌الکترونیک را محاسبه کرده، همین‌طور میزان بار برداشته شده در الکترودها را نیز محاسبه کردند.

در سال ۲۰۰۲ آهن^{۱۷} و چانگ^{۱۸} [۱۷]، با کمک روش FEM، برای به دست آوردن توزیع دما در الکترودها، مدلی دوبعدی با منبع حرارتی صفحه‌ای که شار ثابتی را ایجاد می‌کند، شبیه‌سازی کردند. سپس اثر جریان را روی میزان نرخ براده‌برداری مورد بررسی قرار دادند. در همان سال، یاداو^{۱۹} و همکاران [۱۸]، مدلی دوبعدی، به کمک روش FEM برای محاسبه تنش‌های حرارتی ایجاد شده بر اثر گرادیان شدید دمایی ناشی از فرآیند EDM 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 EDM را روی فولاد زنگ نزن AISI 304 تخمین زدند و شعاع کانال پلاسمای را به صورت تابعی از زمان در نظر گرفتند.

داس^{۲۱} و همکاران [۲۰]، در سال ۲۰۰۳ به محاسبه توزیع دمایی ایجاد شده در الکترودها به کمک روش FEM پرداختند، علاوه بر آن تنش‌های پسماند ناشی از تغییر شدید دما در الکترودها را محاسبه کردند. در همان سال قائم^{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 316L را ارائه کرده و با نتایج تجربی مقایسه کردند.

فرآیند ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتریکی یکی از روش‌های جایگزین برای ماشین‌کاری سنتی است. این روش جزء اولین فرآیندهای ماشین‌کاری غیرسنتی بوده و قدمتی ۵۰ ساله دارد [۱]. در برخی مواقع در ماشین‌کاری مواد با استحکام و مقاومت بالا تنها روش ماشین‌کاری به شمار می‌رود و در طیف گسترده‌ای از صنایع کاربرد دارد [۲]. عامل اساسی براده‌برداری، در این فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی است، به طوری که حرارت بسیار زیاد تولید شده سبب ذوب و تبخیر مقادیر بسیار کوچکی از قطعه می‌شود. مواد ذوب یا تبخیر شده از الکترودها جدا شده و سپس توسط دی‌الکترونیک شسته می‌شوند.

اساس روش EDM^۱ به سال ۱۷۷۰ که شیمیدان انگلیسی آقای ژوزف پریستلی^۲ اثر سایشی تخلیه الکتریکی را دریافت، برمی‌گردد. 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 مدل‌سازی این فرآیند و بررسی اثر پارامترهای مختلف روی صافی سطح، نرخ براده‌برداری، مدل‌سازی کانال پلاسمای و... پرداختند. محققینی همچون اسنوئیس^۴ [۴]، ون دیجک^۵ [۵]، هوولمن^۶ [۶]، کونینگ^۷ [۷]، پاندیت^۸ [۸]، اردن^۹ [۹]، دیبیتونتو^{۱۰} [۱۰-۱۱]، ابانک^{۱۱} [۱۲]، سینگ^{۱۲} [۱۳]، ناتسو^{۱۳} [۱۴]، کومار^{۱۴} [۱۵] و... به بررسی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و مدل‌سازی آن پرداخته‌اند.

با وجود کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده از روش اجزاء محدود

1- Electro Discharge Machining

2- Joseph Priestly

3- Mr. and Mrs. Lazarenko

4- Snoyes

5- Van Dijck

6- Heuvelman

7- Koning

8- Pandit

9- Erden

10- DiBitonto

11- Eubank

12- Singh

13- Natsu

14- Kumar

15- Shankar

16- Finite Element Method

17- Ahn

18- Chung

19- Yadav

20- Rebelo

21- Das

22- Ghanem

۴. مواد تشکیل دهنده قطعه‌کار الاستیک، کاملاً پلاستیکی است،
۵. قطعه‌کار قبل از انجام فرآیند فاقد تنش‌های پسماند می‌باشد،
۶. خصوصیات فیزیکی قطعه‌کار وابسته به دما است و
۷. آنالیز حرارتی در نظر گرفته شده از نوع گذرا (وابسته به زمان) است.

۲-۲-۲- 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 قطعه‌کار بیان شده است.

۲-۲-۱- معادلات حرارتی

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

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

که در این معادله، T دمای کنونی (دما در هر لحظه)، ρ چگالی، C گرمای ویژه، t زمان، r و z مختصات استفاده شده است، معادله (۱) را می‌توان به‌شکل ماتریسی به‌صورت معادله (۲) نوشت [۲۶]:

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \{L\}^T \{q\} = 0, \quad (2)$$

که در این معادله، L عملگر برداری و q بردار شار حرارتی است و به‌صورت معادله‌های (۳ و ۴) تعریف می‌شوند:

$$\{L\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

$$\{q\} = \left\{ \begin{array}{c} Q_r \\ Q_z \end{array} \right\}. \quad (4)$$

۲-۲-۲- شرایط مرزی

در شکل ۱ شرایط مرزی اعمال شده مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، انتقال گرما فقط در مرزهای c و b انجام می‌شود. مرزهای e و d به‌دلیل فاصله زیاد تا محل اعمال شار می‌توان به‌صورت عایق فرض کرد. مرز

مورالی^۱ و همکاران [۲۲]، در سال ۲۰۰۵ مدلی را به‌کمک روش FEM برای محاسبه تنش‌های پسماند ایجاد شده در فرآیند میکرو EDM روی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) پیشنهاد کردند. در ادامه کارهای انجام شده به‌کمک روش FEM این‌بار، در سال ۲۰۰۷ آلن^۲ و چن^۳ [۲۳] فرآیند میکرو EDM را روی مولیبدن شبیه‌سازی کردند و علاوه بر محاسبه عمق حفره ناشی از تخلیه الکتریکی، تنش‌های 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 افتادن^۶ حفره‌ها در فرآیند میکرو EDM به‌کمک روش اجزاء محدود پرداختند. در همان سال سلا^۷ و همکارانش [۲۵] به شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌کمک روش اجزاء محدود پرداخته و تنش‌های 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 شبیه‌سازی مکانیکی و هم شبیه‌سازی حرارتی فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به‌کمک اعمال شار حرارتی توزیع دمای حاصل از فرآیند مورد محاسبه قرار گرفته و در ادامه، هم تنش‌های حرارتی و هم پسماند حاصل از آن مورد محاسبه قرار گرفتند. در انتها نیز مقایسه‌ای با نتایج تجربی ارائه شد و درنهایت پس از اثبات مدل اثر انرژی پالس روی تنش‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی عددی

در ابتدا فرضیات مطرح شده جهت مدل‌سازی و در ادامه هم مدل حرارتی به‌کار رفته و در انتها مدل مکانیکی در نظر گرفته شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- فرضیات

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

- 1- Murali
- 2- Allen
- 3- Chen
- 4- Tan
- 5- Yeo
- 6- Overlapping
- 7- Salah

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

$$q_0 = \frac{F_c VI}{\pi r_s^2}, \quad (8)$$

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

۲-۲-۵- درصد انرژی ورودی به قطعه کار

همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، کل انرژی تولید شده در کانال پلاسما، بین کاتد، و دی الکتریک تقسیم می شود.

خصوصیات جنس مواد استفاده شده در الکترودها، مقدار درصد گرمای ورودی به الکترودها را تعیین می کند. به طور تئوری می توان گفت: اگر فولاد به عنوان آند استفاده شود و مس به عنوان کاتد، انرژی ای که مس نسبت به فولاد جذب می کند، 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 DiBitonto [۱۰]، درصد انرژی ورودی به قطعه کار، F_c ، $1.8/3\%$ لحاظ شد.

۲-۳-۲- مدل مکانیکی

ابتدا معادلات حاکم، آنگاه کلیه شرایط مرزی، همین طور نوع المان های استفاده شده بیان شده است.

۲-۳-۱- معادلات حاکم

معادلات پایه ای مربوط به تحلیل مکانیکی شامل معادلات تعادل^۱ و معادلات پایه ای^۲ هستند که در زیر بیان می شوند:

- معادلات تعادل

معادلات تعادل عبارت است از:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot b_i = 0 \quad (10)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (11)$$

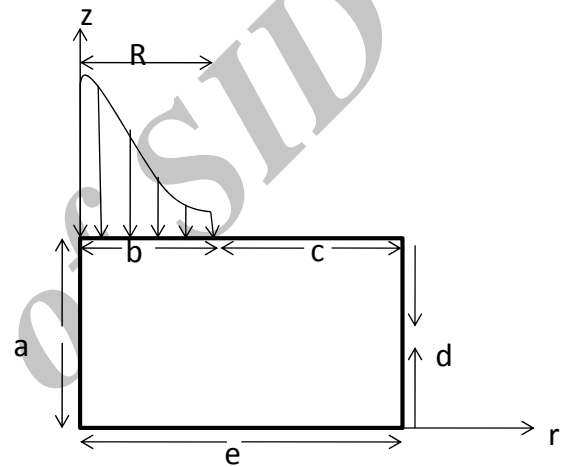
که σ_{ij} تانسور تنش و b_i نیروی حجمی است. معادله (۱۱) نشان می دهد که تانسور تنش متقارن است.

a نیز به دلیل محور تقارن بودن، عایق است.

$$\begin{cases} h_c(T - T_0) & r > R \text{ on } b, \\ q_w & r \geq R \text{ on } c, \\ 0 & \text{در زمان خاموشی پالس} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad \text{روی مرزهای } a, d, e \quad (6)$$

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



شکل (۱): مدل انتقال حرارت به کار رفته.

۲-۳-۲- شعاع کانال پلاسما

تحقیقات زیادی برای تعیین مقدار شعاع کانال پلاسما (r_s) 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 الکترودها، پلاریته و زمان است [۲۷]. در این مقاله از رابطه (۷) که در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده بود، استفاده شد:

$$r_s = r_0 t^{3/4}, \quad (7)$$

که در آن، $r_0 = 0.788 \mu\text{m}$ و t زمان روشنی پالس است.

۲-۳-۲- شار حرارتی

برای مدل کردن حرارت ورودی در مدل سازی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، بهترین و مناسب ترین روش،

1- Equations of equilibrium

2- Constitutive Equations

- معادلات پایه

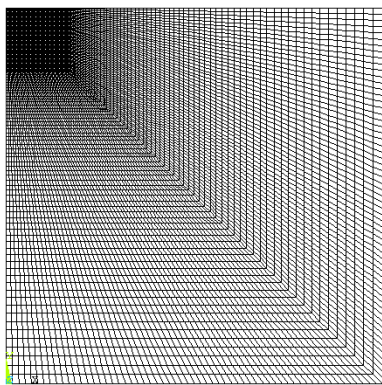
ارتباط میان تنش- کرنش را می توان به صورت معادله های (۱۲) و (۱۳) نوشت:

$$[d\sigma] = [D^{ep}] [d\varepsilon] - [C^{th}] dT \quad (12)$$

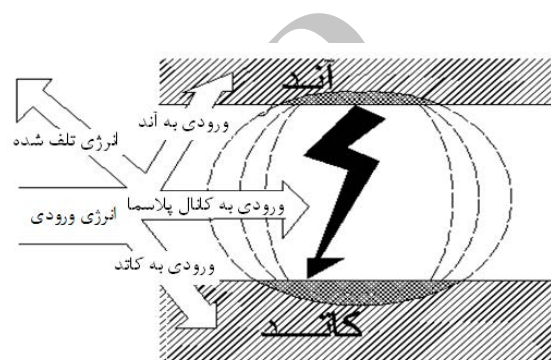
$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (13)$$

در این معادلات، $[D^e]$ ماتریس سختی الاستیک، $[D^{ep}]$ ماتریس سختی پلاستیک، $[C^{th}]$ ماتریس سختی حرارت، $d\sigma$ جزء تنش، $d\varepsilon$ جزء کرنش و dT جزء دماست [۳۰].

المان مکانیکی استفاده شده، المان درجه دوم 82 Plane است. جنس قطعه کار به کار رفته نیز فولاد زنگ نزن 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 ۷-۱، در قسمت پیوست، آمده است.



شکل (۳): نمای دوبعدی از مدل مش بندی شده.



شکل (۲): نمای کلی از فرآیند EDM [۲۹].

۳- نتایج و بحث

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

۳-۱- نتایج حاصل از مدل حرارتی

شار حرارتی در زمان روشنی پالس روی قطعه کار اعمال می شود، آنگاه در زمان خاموشی پالس شار حرارتی حذف و المان هایی که دمای آنها از دمای ذوب قطعه کار بیشتر است، برداشته می شوند.

این کار در شبیه سازی به وسیله تکنیک تولد و مرگ المان ها انجام می شود. در شکل های ۶-۴ توزیع دمای حاصل از کانال پلاسما ناشی از جریان ۳۲A و زمان روشنی پالس $80 \mu s$ نشان داده شده است. ولتاژ لحاظ شده ۳۲۷ می باشد. همان طور که در شکل ها دیده می شود، شیب دمایی در محل اعمال کانال پلاسما بسیار بالاست که همین امر خطر وقوع تنش های حرارتی و پسماند را افزایش می دهد. بنابراین، در ادامه مقادیر این تنش ها مورد محاسبه قرار گرفته است. علت بالا بودن این دما را می توان در زمان روشنی پالس زیاد، جریان بالا و نیز کوچک بودن شعاع پالس، دانست.

از آنجا که تحلیل الاستو- پلاستیک حرارتی مسئله غیرخطی است، در مقاله حاضر از روش تحلیل افزایشی^۱ برای حل مسئله استفاده می شود. تنش های حرارتی را می توان از روش نیوتن-رافسون کامل به دست آورد.

۳-۲- شرایط مرزی

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

۳-۲-۴- مدل اجزاء محدود

قطعه کار در نظر گرفته شده، استوانه ای است که به دلیل تقارن محوری به صورت دوبعدی مدل شده است. در شکل ۳ اعمال کانال پلاسما ریزتر شده اند که این امر منجر به افزایش دقت در این نواحی می شود.

المان حرارتی انتخاب شده، المان درجه دوم 77 Plane و

۳-۲- 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 می‌شود، توزیع تنش در اطراف حفره از نوع فشاری است. این پدیده را به‌سادگی می‌توان توضیح داد، هنگامی که قطعه‌کار حرارت می‌بیند، تمایل به انبساط دارد، ولی فلز سرد اطراف، مانع از انبساط آن می‌شود. همین امر منجر به ایجاد تنش فشاری در منطقه حرارت دیده می‌شود. 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 می‌باشد. علت هم، بیشتر بودن توزیع دما در راستای شعاعی نسبت به راستای محوری است، که در شکل ۵ دیده می‌شود. به‌همین دلیل نیز چاله‌های حاصل از یک جرقه EDM، پهن هستند تا اینکه عمیق باشند. شرایط ماشین‌کاری لحاظ شده در

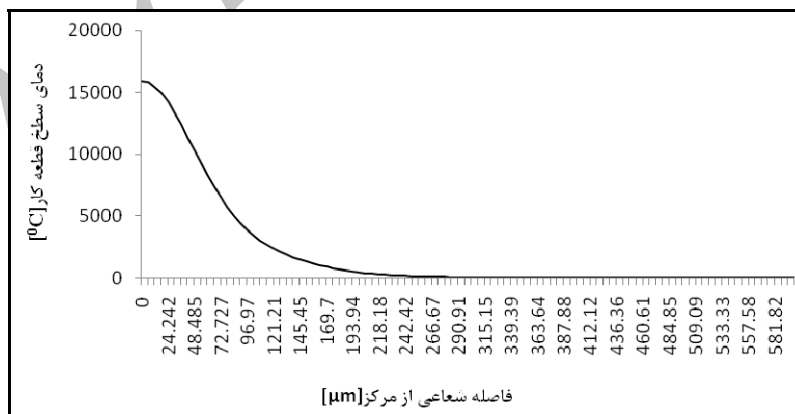
شکل‌های ۷ و ۸ با فرض شدت جریان ۴۸۸ و زمان روشنی $800 \mu s$ است.

۳-۲-۲- تنش‌های پسماند

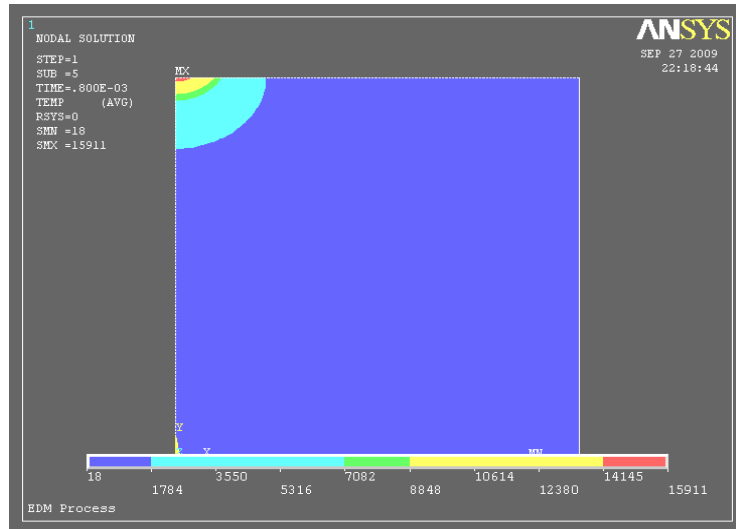
در شکل‌های ۹ و ۱۰ تنش‌های پسماند باقی‌مانده در قطعه‌کار پس از رسیدن به دمای محیط نشان داده شده است.

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: هنگامی که 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.

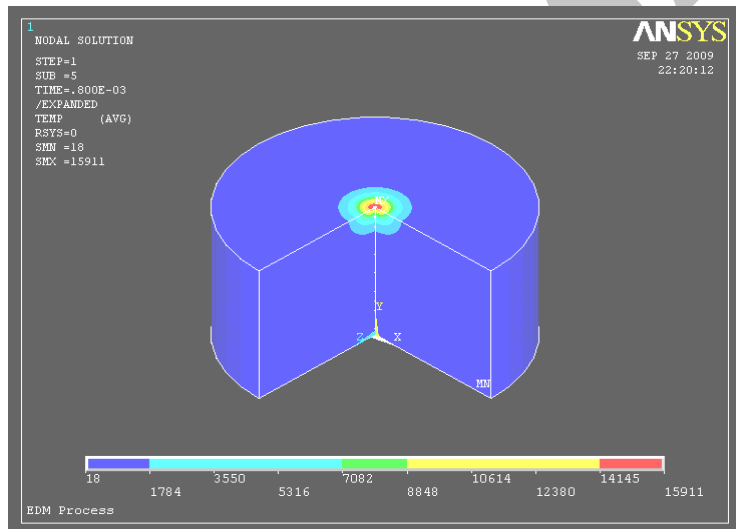
شرایط ماشین‌کاری لحاظ شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ با لحاظ کردن جریان ۴۸۸ و زمان روشنی پالس $400 \mu s$ می‌باشد. تنش‌های پسماند محیطی مانند تنش‌های پسماند شعاعی است. بنابراین در شکل‌ها از آوردن آن صرف‌نظر شده است. مانند آنچه در شکل‌های ۷ و ۸ دیده شد، مقادیر تنش‌های پسماند شعاعی از محوری بیشتر است.



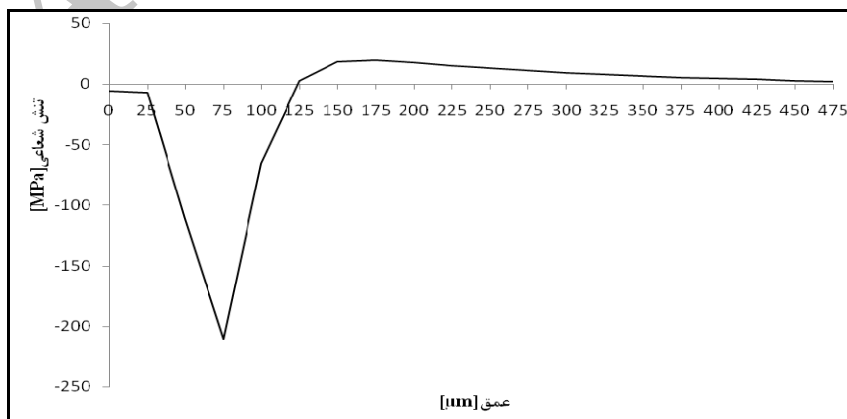
شکل (۴): نمودار تغییرات دما در سطح قطعه‌کار بلافاصله پس از قطع کانال پلاسما.



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

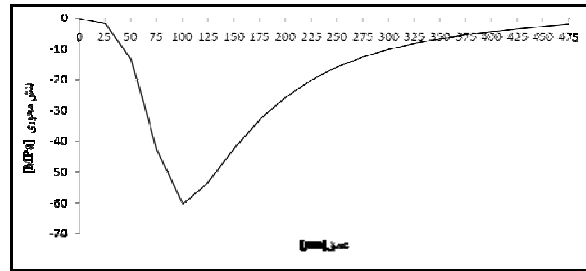


شکل (۶): نمایی سه‌بعدی از کانتور توزیع دمایی درون قطعه‌کار پس از قطع کانال پلاسما.

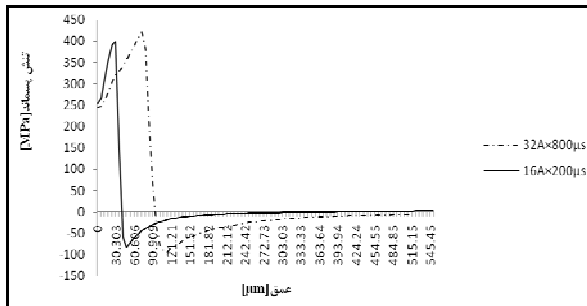


شکل (۷): نمودار توزیع تنش شعاعی در امتداد عمق قطعه‌کار.

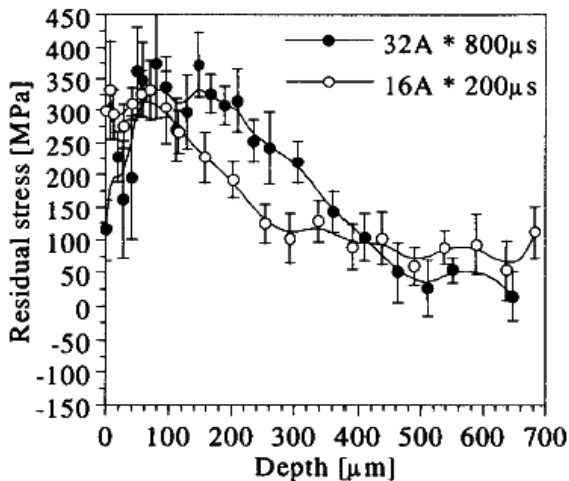
۴۵۰ MPa است که با افزایش انرژی، تخلیه عمقی که بیشینه تنش در آن رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد. تفاوتی که در مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ دیده می‌شود، به این دلیل است که مدل شبیه‌سازی شده برای یک جرقه است و از اثر روی هم افتادن حفره‌ها در حالت چند جرقه صرف نظر شده است.



شکل (۸): نمودار توزیع تنش محوری در امتداد عمق قطعه کار.



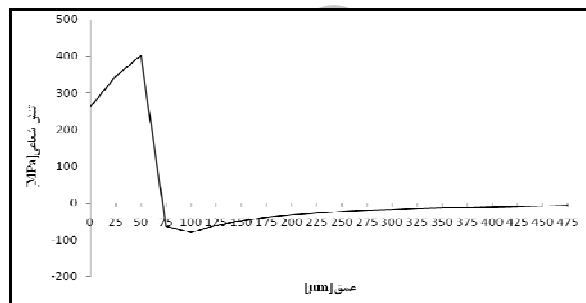
شکل (۱۱): نتایج حاصل از مدل ارائه شده.



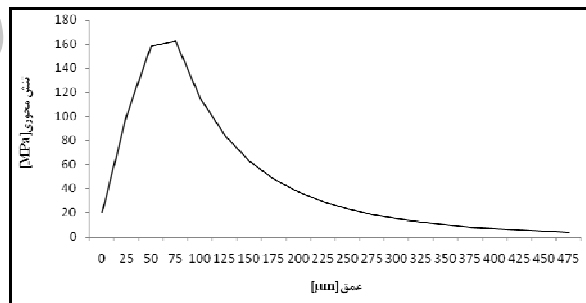
شکل (۱۲): نتایج ارائه شده در مرجع [۱۹].

۴- نتیجه‌گیری

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



شکل (۹): نمودار توزیع تنش پسماند شعاعی در امتداد عمق.



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

6. 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.
7. 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.
8. Pandit, S.M. and Rajurkar, K.P. "Comparision of Various Approaches to EDM Process Modeling from Surface Roughness Profiles", *Ann.CIRP*: 107, 1980.
9. Erden, A. and Kaftanoglu, B. "Heat Transfer Modeling of Electric Discarge Machining", 21th Int. Mach. Tool Res. Conf. Swansea, pp. 351-358, 1980.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

سپس مقادیر تنش‌های پسماند حاصل از فرآیند مورد محاسبه قرار گرفت. ملاحظه شد مقادیر این تنش‌ها مثبت است و این به معنای کششی بودن این تنش‌هاست. این امر خود دلیلی بر وقوع ترک‌های ریزسطحی در قطعات ماشین‌کاری شده با ماشین‌کاری 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 هم است و تنها تفاوت موجود در مقادیر تنش‌هاست. دلیل آن، این است که آزمایش انجام‌شده مربوط به حالت چند جرقه است درحالی‌که داده‌های تجربی مربوط به حالت تک جرقه می‌باشد. پس از اثبات مدل با نتایج تجربی، این بار اثر انرژی تخلیه روی تنش‌ها پسماند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش انرژی تخلیه عمقی که تنش‌ها به مقدار حداکثر می‌رسد، افزایش می‌یابد که این امر خود خطر عمیق‌تر شدن ترک‌های ایجاد شده را در بر دارد.

مراجع

1. 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)
2. Amorim, F.L. and Weingaertner, W.L. "Die-sinking Electrical Discharge Machining of a High-strength Copper-based Alloy for Injection Molds", *J. the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Vol. XXVI, No. 2, pp. 137-144, 2004.
3. 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.
4. Snoyes, R. and Van Dyck, F. "Investigations of Electrodischarge Machining Operations by Means of Thermo-mathematical Model", *Ann. CIRP*, pp. 35-6, 1971.
5. Van Dijk, 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.

25. 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.
27. 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.
28. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

Archive

پیوست‌ها

جدول (۱): هدایت حرارتی فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

هدایت حرارتی [W/m.K]	دما [°C]
۱۵/۹	۲۰
۲۱/۸	۵۰۰
۳۳/۸	۱۴۲۷
۴۵/۶	۲۹۵۰

جدول (۲): گرمای ویژه فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

گرمای ویژه [W/mK]	دما [°C]
۴۵۲	۲۰
۵۶۱	۴۰۰
۶۲۸	۸۰۰
۸۲۲	۲۹۵۰

جدول (۳): ضریب انبساط حرارتی فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

ضریب انبساط حرارتی [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	دما [°C]
۱/۲	۲۰
۲/۵	۲۰۰
۳/۶	۵۰۰
۵/۳	۸۰۰
۵/۸	۹۰۰
۷/۵	۱۲۰۰

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

مدول الاستیسیته [GPa]	دما [°C]
۱۹۶	۲۰
۱۸۲	۲۰۰
۱۵۸	۵۰۰
۱۲۶	۸۰۰
۱۰۶	۹۰۰
۱۵	۱۲۰۰

جدول (۵): تغییرات مقاومت تسلیم فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

مقاومت تسلیم [MPa]	دما [°C]
۲۵۰	۲۰
۲۱۰	۲۰۰
۱۴۰	۵۰۰
۸۵	۸۰۰
۶۰	۹۰۰
۵	۱۲۰۰

جدول (۶): تغییرات چگالی فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

چگالی [Kg/m ³]	دما [°C]
۷۹۰۰	۱۰۰
۷۸۰۰	۲۰۰
۷۷۰۰	۴۰۰
۷۶۰۰	۶۰۰
۷۶۰۰	۸۰۰
۷۵۰۰	۱۰۰۰

جدول (۷): تغییرات ضریب انتقال حرارت فولاد به کاررفته برحسب دما [۱۸].

ضریب انتقال حرارت همرفتی [W/m ² .K]	دما [°C]
۶۶۸/۹	۲۰
۶۶۸/۹	۲۰۰
۳۱۷۷	۶۰۰
۸۳۶/۲	۷۲۰