بررسی مدل ریاضی تراشکاری با جت الکتروشیمیایی

امین میراحمدی[۱]، نادر شرفی[۲]

چکیده

یکی از انواع روشهای ماشینکاری الکتروشیمیایی تراشکاری الکتروشیمیایی می‌باشد. اگر در تراشکاری الکتروشیمیایی به جای ابزارهای متداول ECM از یک نازل برای رساندن الکترولیت به گپ ماشینکاری استفاده شود، فرآیندی با نام تراشکاری با جت الکتروشیمیایی بوجود می‌آید. در تحقیق حاضر یک مدل ریاضی برای این فرآیند ارائه شده و نتایج حاصل از آن با آزمایشهای عملی مقایسه و نشان داده شده که تطابق قابل قبولی بین آنها وجود دارد.

کلمات کلیدی: جت الکتروشیمیایی- ماشینکاری الکتروشیمیایی- تراشکاری با جت الکتروشیمیایی

فهرست علائم

زاویه بر حسب درجه	α	هدایت الکترولیت بر حسب $\Omega^{-1}mm^{-1}$	κ
قطر قطعه بر حسب میلیمتر	D	سطح مقطع جت بر حسب میلیمتر مربع	A
قطر جت الکتروشیمایی بر حسب میلیمتر	d	گپ ماشینکار بر حسب میلیمتر	G و g
عمق بار بر حسب میلیمتر	a	فاصله بین جت الکترولیت و قطعه	z
سرعت دورانی قطعه‌کار بر حسب دور بر دقیقه	N	دما بر حسب درجه سانتیگراد	T و θ
پیشروی طولی ابزار بر حسب میلیمتر بر دقیقه	f	ضریب دمایی هدایت الکتریکی	α_T
زمان بر حسب دقیقه	t	تعداد الکترونهای والانس	n
نرخ ماشینکاری	$\frac{dy}{dt}$ و MRR	ثابت فارادی بر حسب کولن بر مول	F
مقدار ماده برداشته شده از قطعه	Δy	دانسیته جنس قطعه‌کار بر حسب $\frac{g}{mm^3}$	ρ
جریان الکتریکی بر حسب آمپر	I	وزن مولکولی	M
اختلاف پتانسیل بر حسب ولت	U		

۱- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناس ارشد ساخت و تولید دانشگاه علم و صنعت ایران: nadersharafi@Gmail.com

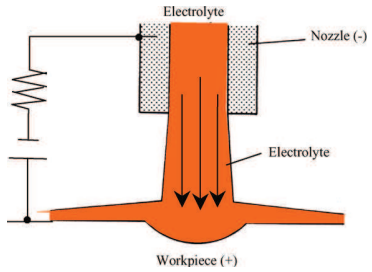
۱- مقدمه

در چند دهه گذشته شاهد رشد سریعی در روشهای ماشینکاری مواد سخت بوده‌ایم و بسیاری از تحقیقات و پژوهشهای انجام شده به تدریج از حالت آزمایشگاهی خارج شده و نقش تولیدی به خود گرفته‌اند. عملاً بسیاری از این روشهای جدید پایه اصلی سیستمهای جدید ساخت قطعات صنعتی هستند که در حالت عادی امکان ساخت آنها یا ممکن نیست و یا به سختی میسر می‌شود. بنابراین روشهای ماشینکاری مدرن ایجاد شد تا بتواند به این نیازها پاسخ دهد. یکی از این روشهای مدرن، ماشینکاری الکتروشیمیایی (Electrochemical Machining (ECM)) می‌باشد.

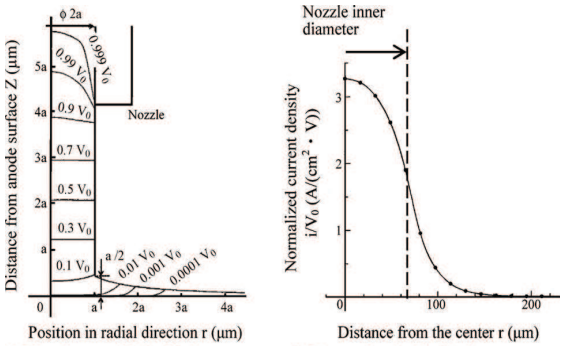
در ECM ابتدا باید ابزاری که بصورت معکوس شکل قطعه‌کار مورد نظر می‌باشد، ساخته شود و سپس با استفاده از این ابزار در فرآیند الکتروشیمیایی محصول نهایی تولید شود. بنابراین یکی از معایب عمده ماشینکاری الکتروشیمیایی ساخت ابزار می‌باشد که فرآیندی بسیار زمانبر و مشکل می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از یک ستون الکترولیت (جت الکتروشیمیایی) که توسط یک نازل به محل ماشینکاری تحویل می‌شود، ماشینکاری الکتروشیمیایی انجام می‌شود. اصول این روش به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از این تکنیک دیگر نیازی به ساخت ابزار برای ساخت پروفیلهای گوناگون نمی‌باشد و با کنترل حرکت ابزار در جهت‌های گوناگون می‌توان پروفیل مورد نظر را بر روی قطعه‌کار ایجاد کرد.

معمولاً در ماشینکاری الکتروشیمیایی ابزار و قطعه‌کار در الکترولیت غوطه‌ور هستند، اثر جریانهای سرگردان جدی است، مگر اینکه با تکنیکهایی از تاثیر آن کاسته شود. یک راه موثر برای کاهش این جریانهای سرگردان استفاده از جت الکتروشیمیایی می‌باشد [۱].

توزیع پتانسیل الکتریکی و دانسیته جریان الکتریکی در جت الکتروشیمیایی برای ماشینکاری سطح یک قطعه‌کار تخت توسط پاپیسی وهمکارانش [۲] و همچنین یوندا و کونیدا [۳] محاسبه و در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که پیکهای جریان در مرکز جت الکتروشیمیایی می‌باشند و با دور شدن از مرکز به شدت کاهش پیدا می‌کنند. بنابراین فقط ماده‌ای که در زیر جت الکتروشیمیایی واقع شده است، خورده می‌شود، زیرا طبق قانون فارادی برداشت ماده در فرآیند الکتروشیمیایی متناسب با مقدار جریان الکتریکی عبوری از قطعه‌کار می‌باشد و جریان الکتریکی در مناطق دورتر از مرکز جت الکتروشیمیایی بشدت کم می‌شود. بنابراین در این روش مقدار برداشت ماده به آسانی توسط جریان و مکان جت الکتروشیمیایی کنترل می‌شود.



شکل (۱): استفاده از جت الکتروشیمیایی در ماشینکاری الکتروشیمیایی[۱]



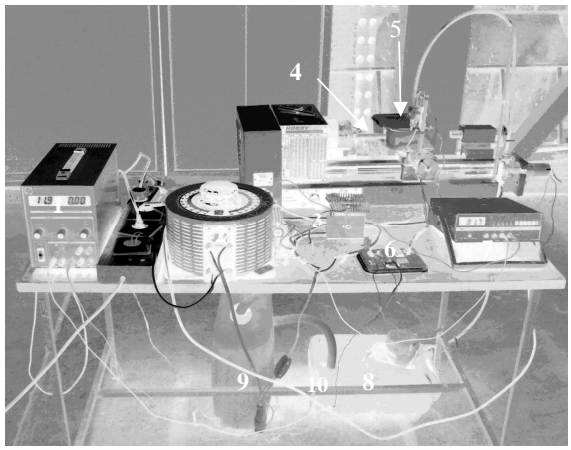
شکل (۲): a) توزیع پتانسیل الکتریکی و b) توزیع دانسیته جریان در جت الکتروشیمیایی[۳]

۲- ساخت دستگاه تراشکاری با جت الکتروشیمیایی[۱] (ECJT)

هر گاه ماشینکاری الکتروشیمیایی در شرایطی انجام شود که قطعه‌کار در حال دوران باشد به آن تراشکاری الکتروشیمیایی[۲] گفته می‌شود. در این شیوه، با حرکت ابزار بر روی قطعه‌کار در حال دوران پروفیل مورد نظر در آن ایجاد خواهد شد. تا کنون تحقیقات زیادی بر روی موضوع تراشکاری الکتروشیمیایی انجام نشده است و محققین اندکی مانند هوچنگ[۳]، پا[۴]، ابید[۵] و التاول[۶] نیز بر روی پولیشکاری الکتروشیمیایی تحقیقاتی داشته‌اند.

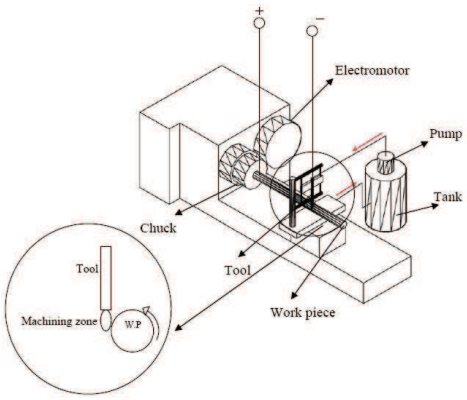
در تحقیق حاضر نیز به بررسی تراشکاری الکتروشیمیایی پرداخته شده است. در سیستم ساخته شده برای کاهش اثر جریانهای سرگردان و کنترل بهتر فرآیند بجای ابزار از جت الکتروشیمیایی استفاده شده است. نام این سیستم آزمایشگاهی تراشکاری با جت الکتروشیمیایی (ECJT) می‌باشد که در شکل ۳ نمای دستگاه ساخته شده و در شکل ٤ شماتیک آن نشان داده شده‌اند. همانطور که از این شکلها پیدا است، اجزای دستگاه شامل ابزار، سیستم نگهدارنده و سیستم حرکتی ابزار، سیستم کنترل، منبع تغذیه ولتاژ بالا، الکترولیت و مخزن برای نگهداری آن، پمپ برای رساندن الکترولیت به محل ماشینکاری و در نهایت مکانیزمی برای دوران قطعه‌کار، می‌باشد.

برای کنترل فاصله گپ ماشینکاری نیز از یک سیستم کنترل مطابق شکل ۵ استفاده شده است. این سیستم تضمین می‌کند که گپ ماشینکاری در طول فرآیند ثابت باقی بماند.

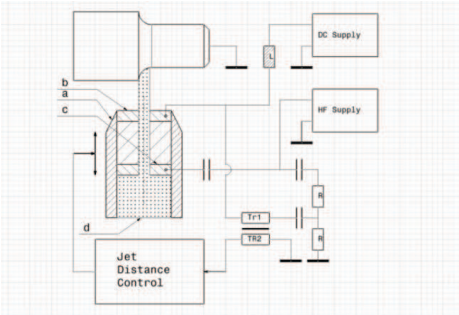


(1- DC Power supply, 2-Transformator, 3-Bridge Diode, 4-Workpiece, 5-Tool, 6-Control Unit, 7-Multimeter, 8-Pump, 9,10-Tank)

شکل (۳): تصویر دستگاه تراشکاری با جت الکتروشیمیایی ساخته شده در آزمایشگاه



شکل (٤): شماتیک دستگاه تراشکاری با جت الکتروشیمیایی

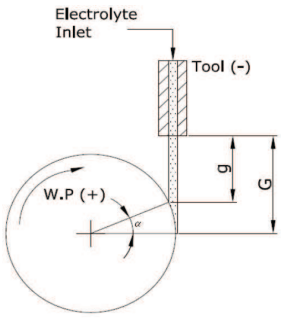


شکل (٥): شماتیک سیستم کنترل گپ بین نازل و قطعه‌کار

۳- روابط تئوری در تراشکاری با جت الکتروشیمیای

۳-۱- تاثیر سرعت دورانی قطعه‌کار بر تراشکاری با جت الکتروشیمیایی

شکل ٦ بصورت شماتیک ارتباط بین جت الکتروشیمیایی و قطعه‌کار نشان می‌دهد. این شکل به شرایط واقعی بسیار نزدیک است زیرا در عمل نیز پس مماس شدن جت الکتروشیمیایی با قطعه‌کار، مقداری بر روی قطعه‌کار حرکت می‌کند تا جت الکتروشیمیایی کاملاً با قطعه‌کار برخورد کرده و بتواند عمل برداشت ماده را انجام دهد.



شکل (٦): شماتیک ارتباط بین جت الکتروشیمیایی و قطعه‌کار

با استفاده از این شکل ابتدا به محاسبه زمان ماشینکاری برای یک نقطه خاص بر روی قطعه‌کار می‌پردازیم:

$$\cos\alpha = \frac{(D_0/2)-a}{(D_0/2)} \Rightarrow \cos\alpha = 1-\frac{a.D_0}{2} \qquad (۱)$$

که α زاویه‌ای است که از برخورد جت الکتروشیمیایی با قطعه‌کار حاصل می‌شود، D_0 قطر اولیه قطعه‌کار بر حسب میلیمتر، a عمق بار دهی پس از مماس کردن جت الکتروشیمیایی با لبه قطعه‌کار بر حسب میلیمتر می‌باشند.

اگر فرض کنیم که ابزار دارای حرکت پیشروی نیست آنگاه زمانی که یک نقطه خاص در هر دور کامل قطعه‌کار، در زیر جت الکتروشیمیایی قرار می‌گیرد برابر است با:

$$t_1 = \frac{\alpha}{N\times 360} \qquad (۲)$$

که N سرعت دورانی قطعه‌کار بر حسب دور بر دقیقه (rpm) می‌باشد.

در مدت زمانی که ابزار به اندازه قطر جت الکتروشیمیایی حرکت طولی انجام دهد، تعداد دوران قطعه‌کار برابر خواهد شد با:

$$N_1 \frac{N.d}{f} \qquad (۳)$$

که d قطر جت الکتروشیمیایی بر حسب میلیمتر و f مقدار پیشروی طولی ابزار بر حسب میلیمتر بر دقیقه می‌باشند. بنابراین کل زمانی که یک نقطه خاص در یک پاس ماشینکاری در زیر جت الکتروشیمیایی قرار دارد برابر است با:

$$t = \frac{\alpha}{N\times 360}\times\frac{N.d}{f} \Rightarrow t = \frac{\alpha.d}{360f} \qquad (٤)$$

که t کل زمانی است که یک نقطه در زیر جت الکتروشیمیایی قرار می‌گیرد و بر حسب دقیقه بیان می‌شود.

از آنجایی که ماشینکاری فقط در زمانی انجام می‌شود که یک نقطه در زیر جت الکتروشیمیایی قرار داشته باشد بنابراین طبق فرمول فوق می‌توان متوجه شد که زمان ماشینکاری یک نقطه که بر روی قطعه‌کار قرار دارد وابسته به تعداد دوران آن نمی‌باشد. به عبارت دیگر در شرایط یکسان، عده دوران قطعه‌کار تاثیری بر عمق ماشینکاری ندارد.

۲-۳- مدل ریاضی فرآیند

شکل ٦ شماتیک تراشکاری با جت الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. در این فرآیند، ابزار با نرخ تغذیه ثابت، f، بطرف قطعه‌کار حرکت می‌کند. جریان الکترولیت به سرعت در گپ جریان دارد و ماشینکاری در نرخ $\frac{dy}{dt}$ انجام می‌شود. نازل الکترولیت دارای سوراخ به قطر d می‌باشد و در جهت طولی قطعه‌کار استوانه‌ای با نرخ تغذیه f حرکت می‌کند. در اینجا فرض می‌شود که جریان الکترولیت به حد کافی زیاد می‌باشد که محصولات حاصل از واکنشها را از گپ ماشینکاری دور می‌کند و هدایت الکترولیت[۷] در طول فرآیند ثابت می‌ماند.

جریان انتقالی بین جت الکتروشیمیایی و قطعه‌کار، I، بصورت زیر بدست می‌آید[٤]:

$$I = \frac{\kappa A \Delta U}{Z} \qquad (٥)$$

که κ هدایت الکترولیت بر حسب $\Omega^{-1}mm^{-1}$، ΔU ولتاژ کاری بر حسب V، A سطح مقطع ابزار بر حسب mm^2 و z گپ بین ابزار و قطعه‌کار می‌باشد.

از طرفی می‌دانیم که هدایت الکترولیت در طول ماشینکاری ثابت نبوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود[٤]:

$$\kappa = \kappa_0(1+\alpha_r\theta)(1-\beta)^{3/2} \qquad (٦)$$

که $\theta = T - T_0$، مقدار افزایش دما، κ_0 هدایت الکترولیت در دمای T_0، β کسر حجمی حبابهای گازی ایجاد شده و α_T، ضریب دمایی هدایت الکتریکی در دمای ورودی است که برای ECM دارای مقادیر $0.02-0.03\ K^{-1}$ می‌باشد.

با تطبیق این رابطه برای جت الکتروشیمیایی خواهیم داشت:

$$I = \frac{\pi\kappa {d_0}^2 \Delta U}{4\overline{G}} \qquad (۷)$$

$$\overline{G} = G - \frac{h}{2} \qquad (۸)$$

$$h = G - g = \sqrt{D_0 d_0 - d_0^2} \qquad (۹)$$

که d_0 قطر جت الکتروشیمیایی بر حسب mm، $\overline{G}$ گپ متوسط بین قطعه‌کار و ابزار برحسب mm، G اندازه بزرگترین گپ بین الکترودها برحسب mm، g اندازه کوچکترین گپ بین الکترودها بر حسب mm و h فاصله عمودی تماس جت الکتروشیمیایی با قطعه‌کار بر حسب mm می‌باشند.

فرض می‌کنیم که تمام جریان تولید شده صرف حلالیت قطعه‌کار می‌شود. این جریان حلالیت قطعه‌کار است پس داریم [٤]:

$$I = (\frac{nFA\rho}{M})\frac{dy}{dt} \qquad (۱۰)$$

که n تعداد الکترونهای منتقل شده برای هر اتم محلول (والانس)، F ثابت فارادی ($96487\ Cmol^{-1}$)، A سطح زیر جت الکتروشیمیایی، ρ دانسیته جنس قطعه‌کار بر حسب $\frac{g}{mm^3}$، $\frac{dy}{dt}$ ضخامت ماده برداشته شده از قطعه‌کار بر واحد زمان و M متوسط وزن مولکولی (جرم یک مول از ماده قطعه‌کار) می‌باشند. با ترکیب رابطه (۷) و (۱۰) می‌توانیم ضخامت ماده برداشته شده از قطعه‌کار بر واحد زمان را محاسبه کنیم:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\kappa M \Delta U}{nF\rho\overline{G}} \qquad (۱۱)$$

بنابراین نرخ برداشت ماده برای جت الکتروشیمیایی بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$MRR = \frac{\pi\kappa d^2 M \Delta U}{4nF\rho\overline{G}} \qquad (۱۲)$$

حال اگر فرض کنیم می‌خواهیم پاس iام تراشکاری را انجام دهیم، می‌توان روابط تئوری را بصورت بازگشتی مطابق زیر ارائه نمود:

$$d_i = d_{i-1} - c_{i-1} \qquad (۱۳)$$

$$h_i = \sqrt{D_{i-1}d_{i-1} - d_{i-1}^2} \qquad (۱٤)$$

می‌دانیم که اگر قطعه استوانه‌ای با جت الکتروشیمیایی روتراشی شود نرخ تغییر در گپ ماشینکاری برابر نرخ برداشت ماده است و در طی عبور پاس iام جت الکتروشیمیایی بر روی قطعه‌کار مقدار ماده برداشته شده از آن (c_i) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$-\frac{d\overline{G}}{dt} = \frac{dy}{dt} = \frac{\kappa M \Delta U}{nF\rho\overline{G}} \Rightarrow \overline{G}f\overline{G} = \frac{\kappa M \Delta U}{nF\rho}dt \qquad (۱۵)$$

حال اگر فرض کنیم عملیات تراشکاری برای پاس i-1ام انجام شده است با انتگرال‌گیری از رابطه فوق، مقدار گپ برای حالت iام بدست می‌آید:

$$\overline{G}_{i-1}^2 - \overline{G}_i^2 = \frac{2\kappa M \Delta U}{nF\rho}\Delta t \qquad (۱٦)$$

$$(\Delta y)_i = \overline{G}_{i-1} - \overline{G}_i \qquad (۱۷)$$

$$(\Delta y)_i \approx c_i \qquad (۱۸)$$

$$D_i = D_{i-1} 2C_i \qquad (۱۹)$$

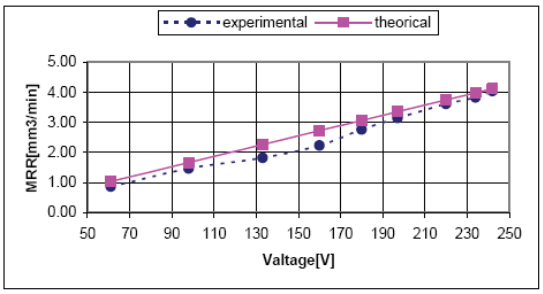
که Δt مدت زمان ماشینکاری و Δy مقدار ماده برداشته شده در زمان Δt در پاس iام و $\overline{G}_i$ گپ ماشینکاری در پاس iام و می‌باشند.

٤- بحث و بررسی آزمایشها

٤-۱- بررسی نرخ برداشت ماده تئوری و عملی

برای بررسی اعتبار رابطه تئوری ارائه شده برای محاسبه نرخ برداشت ماده تعداد ۹ آزمایش با سرعت دورانی ۲۵۰rpm و در ولتاژهای کاری مختلف برای جت الکتروشیمیایی به قطر ۲/۵mm انجام شده و با نتایج حاصل شده از رابطه (۱۲) مقایسه و در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقادیر تئوری با فرض ثابت بودن κ محاسبه شده‌اند. به عبارت دیگر تاثیر افزایش دمای الکترولیت و تشکیل شدن حبابها در الکترولیت در نظر گرفته نشده است.

همانطور که از روی شکل مشخص است، تطابق خوبی بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر تجربی وجود دارد. همانطور که از روی شکل پیدا است، با ادامه یافتن آزمایشها دمای الکترولیت افزایش یافته و اختلاف بین مقادیر تئوری و تجربی نیز بیشتر می‌شود. علت این اختلاف مربوط به تغییر در مقدار κ می‌باشد. زیرا طبق رابطه (٦) مقدار κ با تغییر دمای الکترولیت، تغییر پیدا می‌کند. در سه آزمایش آخر که از الکترولیت تازه استفاده شده است، تطابق بین رابطه تئوری و مقادیر تجربی بهتر می‌شود.

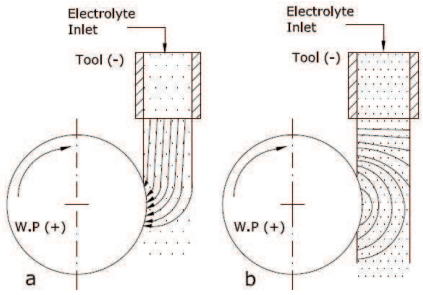


شکل (۷): مقایسه نرخ برداشت ماده محاسبه شده از مدل ریاضی و نرخ برداشت ماده در عمل

٤-۲- تاثیر ابعاد جت الکتروشیمیایی بر نرخ برداشت ماده

طبق قانون اهم میزان مقاومت الکتریکی یک رسانا با عکس سطح مقطع آن نسبت مستقیم دارد به عبارت دیگر با افزایش سطح مقطع آن، میزان مقاومت آن کاهش می‌یابد. با همین استدلال می‌توان گفت که با افزایش سطح مقطع جت

الکتروشیمیایی مقاومت آن نیز کم می‌شود. بنابراین مقدار افت ولتاژ در طول جت الکتروشیمیایی بیشتر می‌شود و جریان کاری نیز کم خواهد شد. از سوی دیگر در شکل ۸ به سادگی دیده می‌شود که با افزایش ابعاد نازل (جت الکتروشیمیایی) مقدار جریان عبوری از قطعه‌کار افزایش پیدا می‌کند. طبق قانون فارادی نیز مقدار برداشت ماده متناسب با جریان کاری می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطح مقطع جت الکتروشیمیایی می‌توان نرخ برداشت ماده را افزایش داد. ولی باید توجه داشت که عامل محدود کننده‌ای به نام گشادی کناری وجود دارد که با افزایش سطح مقطع جت الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد و ممکن است منجر به خراب شدن قطعه‌کار تولید شده بشود.

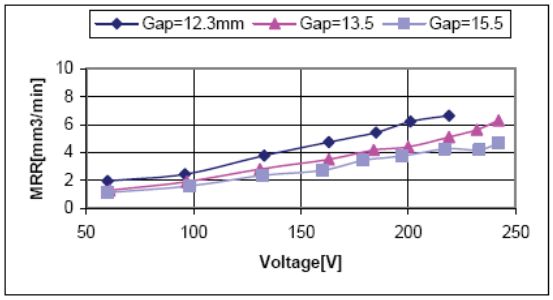


شکل (۸): a- خطوط جریان وارد شده از الکترولیت به قطعه‌کار b- خطوط هم پتانسیل در جت الکتروشیمیایی

برای مواردی مانند خشن‌کاری که حجم براده‌برداری زیاد است می‌توان از جت الکتروشیمیایی با شکل به غیر از دایره استفاده کرد. زیرا در این موارد شکل جت باید به گونه‌ای باشد که در هر لحظه حجم الکترولیت بیشتری را به روی قطعه‌کار منتقل کند. بدین ترتیب در هر لحظه تعداد یونهای بیشتری به قطعه‌کار برخورد کرده و حجم واکنشهای الکتروشیمیایی زیاد شده که منجر به نرخ برداشت ماده بیشتری خواهد شد. برای این موارد می‌توان از ابزارهایی که دارای سوراخ مستطیلی و یا بیضی‌شکل می‌باشند، استفاده نمود. در اینجا باید توجه داشت که طول مستطیل و یا قطر بزرگ بیضی باید از طول کوچکترین پله‌ای که قرار است بر روی قطعه‌کار ایجاد شود کوچکتر باشد زیرا در غیر اینصورت این جت الکتروشیمیایی خشن‌کاری می‌تواند تمام و یا قسمتی از پله‌هایی که باید بر روی قطعه‌کار ایجاد کنیم را از بین ببرد و بدین ترتیب موجب خراب شدن قطعه‌کار شود.

۳-٤- تاثیر ولتاژ و گپ ماشینکاری بر نرخ برداشت ماده

برای بررسی تاثیر ولتاژ بر روی قطعاتی از جنس فولاد ساختمانی در مدت زمان ۲۰ دقیقه شیارهایی ایجاد شد. سپس با اندازه‌گیری ابعاد شیار مقدار حجم ماده برداشته شده از قطعه‌کار تعیین می‌شود و با توجه به مشخص بودن زمان تراشکاری می‌توان نرخ برداشت ماده را حساب کرد که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار مقدار نرخ برداشت ماده بر حسب تغییرات ولتاژ در سرعت دورانی ۲۵۰rpm (جنس قطعه‌کار فولاد ساختمانی و الکترولیت کلرید سدیم و قطر جت الکتروشیمیایی ۲/۵mm می‌باشند)

با توجه به شکل می‌توان دید که با افزایش ولتاژ کاری نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ولتاژ مقدار جریان عبوری از جت الکتروشیمیایی نیز افزایش می‌یابد و طبق قانون فارادی افزایش جریان منجر به برداشت ماده بیشتری از قطعه‌کاری خواهد شد. ولی باید توجه داشت که اگر ولتاژ از یک مقدار معین بیشتر شود، منجر به تولید جرقه در منطقه ماشینکاری می‌شود و همانطور که در قسمتهای قبل بیان شد افزایش جرقه نیز باعث کاهش صحت قطعه‌کار تولیدی می‌شود. بنابراین افزایش ولتاژ تا آنجا که منجر به تولید جرقه نشود مفید است. با افزایش ولتاژ باید مسایل ایمنی برای جلوگیری از بروز خطرات احتمالی برای اپراتور را در نظر گرفت.

بعلت اینکه میزان مقاومت جت الکتروشیمیایی با گپ ماشینکاری نسبت مستقیم دارد. پس هر چقدر گپ ماشینکاری بزرگتر شود، مقاومت جت افزایش یافته و بنابراین مقدار افت ولتاژ در جت الکتروشیمیایی نیز زیادتر می‌شود. با کاهش ولتاژ

مقدار جریان عبوری از جت نیز کاهش می‌یابد و طبق قانون فارادی مقدار برداشت ماده نیز کمتر خواهد شد. این موضوع به سادگی از شکل ۹ قابل تشخیص می‌باشد. پس برای دست‌یابی به نرخ برداشت ماده بیشتر باید اندازه گپ را کوچک انتخاب کرد. از سوی دیگر می‌دانیم که با کاهش اندازه گپ احتمال وقوع جرقه در منطقه ماشینکاری افزایش می‌یابد و می‌دانیم که با افزایش تعداد جرقه‌ها درگپ زبری سطح و گشادی کناری[8] افزایش پیدا می‌کنند که موجب از بین رفتن صحت قطعه‌کار تولیدی می‌شوند. بنابراین باید مصالحه‌ای بین نرخ برداشت ماده و صحت ماشینکاری مورد نیاز برقرار کرد. ولی در شرایطی که هدف خشن‌کاری است تا حدودی که به صحت نهایی مورد نظر برای قطعه‌کار لطمه‌ای وارد نشود، از وجود جرقه‌ها در گپ ماشینکاری می‌توان صرف نظر کرد.

۵- نتیجه‌گیری

۱- استفاده از جت الکتروشیمیایی در ماشینکاری الکتروشیمیایی موجب ساده‌تر شدن سیستم کنترلی دستگاه شده و بدون تحمیل هزینه اضافی از شدت جریانهای سرگردان می‌کاهد. از سوی دیگر با توجه به مطالب فوق می‌توان دریافت که روابط ریاضی ارائه شده به خوبی با نتایج تجربی سازگار می‌باشند. بدین معنی که سرعت دورانی قطعه‌کار تاثیری بر نرخ برداشت ماده از قطعه‌کار ندارد و فرمول پیشنهاد شده برای محاسبه نرخ برداشت ماده بخوبی با مقادیر تجربی سازگار است و برای محاسبات کاربردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲- در تراشکاری الکتروشیمیایی از جت الکتروشیمیایی استفاده می‌شود که بدون نیاز به هر گونه عایق کاری برای کاهش اثر جریانهای سرگردان، می‌تواند به راحتی در هر نقطه دلخواه بر روی قطعه متمرکز شده و عملیات تراشکاری را انجام دهد.

۳- با افزایش سطح مقطع جت الکتروشیمیایی نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد.

٤- برای کارهای خشن تراشی استفاده از جت الکتروشیمیایی با سطح مقطع مستطیلی ویا بیضوی توصیه می‌شود تا بتوان به نرخ برداشت ماده بیشتری دست پیدا کرد.

۵- با این روش بدون صرف هزینه‌های اضافی برای طراحی و ساخت ابزار می‌توان هر شکل پیچیده‌ای را بر روی قطعه‌کار ایجاد نمود.

پی‌نوشت:

1- Electrochemical Jet Turning
2- Electrochemical Turning
3- Hocheng
4- Pa
5- Ebied
6- El-Taweel
7- conductivity
8- Over Cut

مراجع

1- Hassan El-Hofy, "Advanced Machining Processes", McGraw-Hill, (2005)
2- S. Yapici, S. Kuslo, C. Ozmetin, H. Ersahan, T. Pekdemir, "Suface shear stress for a submerged jet impingement using electrochemical technique", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 29, PP. 185-190, (1999)
3- Wataru Natsu, Tomone Ikeda, Masanori Kunieda, "Generating complicated surface with electrolyte jet machining", Precision Engineering, Vol. 31, PP.33–39, (2007)
-۴ A.R. Mount, D. Clifton, P. Howarth, A. Sherlock, "An integrated strategy for materials characterisation and process simulation in electrochemical machining", Journal of Materials Processing Technology 138 (2003) 449–454