http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

مهر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۷ ص‌ص ۸۷-۱۰۱

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/٤/۲۷
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۰/۲٤
ارائه در سایت ۹۲/٤/۳۰

دقت گوشه‌های کوچک- شعاع در برش چندمرحله‌ای در وایرکات: پارامترهای خشن‌کاری و تحلیل هندسی برش

حمید آبیارفیروزآبادی[۱]، جمشید پرویزیان[۲*]، امیر عبداله[۳]، اسماعیل غدیری زهرانی[۴]

۱- مربی مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
* اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، japa@cc.iut.ac.ir

چکیده- اهمیت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات) در توانایی ماشین‌کاری مواد سخت و شکل‌های پیچیده است. با این حال، یکی از مهم‌ترین مشکلات این فرایند خطای ماشین‌کاری گوشه و شعاع گوشه است. این تحقیق خطای شعاع گوشه محدب در یک برش متوالی (شامل یک مرحله خشن و دو مرحله پرداخت) وایرکات را بررسی کرده است. طراحی آزمایش‌ها بر اساس فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی مرحله خشن‌کاری به روش فاکتوریل کامل انجام و بار باقی‌مانده روی مسیر مستقیم و قوس گوشه به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه بهینه‌سازی این پارامترها روی کنترل بار باقی‌مانده در مسیر مستقیم در مقایسه با مسیر قوس گوشه‌اند. از دیگر نتایج این است که خشن‌کاری مؤثرین مرحله برش است و به وسیله بهینه‌سازی پارامترهای وایرکات نمی‌توان خطای شعاع گوشه را به طور کامل حذف کرد. در ادامه، شعاع گوشه مقعر ایجاد شده در برش‌های متوالی (خشن و دو پرداخت) و اثر زاویه و شعاع گوشه و خطای شعاع در زوایای مختلف گوشه مطالعه شده است. تحلیل داده‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر بار باقی‌مانده بر خطای شعاع گوشه با افزایش زاویه گوشه افزایش می‌یابد. یک رویکرد مؤثر به منظور بهبود دقت ماشین‌کاری شعاع گوشه مقعر برای برش پرداخت ارائه شده است. نتیجه مهم این است که در یک گوشه کوچک- شعاع مقعر، برای دستیابی به دقت مناسب، طول قوس پیموده شده باید تا حد امکان افزایش یابد.

کلیدواژگان: ماشین‌کاری وایرکات، دقت ابعادی گوشه، شعاع گوشه، ماده باقی‌مانده.

Accuracy of small radius corners in multi stage WEDM: Roughing parameters and geometrical analysis

H. Abyar Firouzabadi[1], J. Parvizian[2]*, A. Abdullah[3], E. Ghadiri Zahrani[4]

1- Faculty Candidate, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ. of Tech., Tehran, Iran
4- MSc. Graduate, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 8415683111 Isfahan, Iran. japa@cc.iut.ac.ir

Abstract- Wire electrical discharge machining (wire-EDM) has a significant position among production technologies mainly due to its capacity of machining hard materials and intricate shapes. One of the major problems with this process is the error in cutting corners. Processing forces acting on the wire and low rigidity of the wire are responsible for wire deformation, which has a direct influence on the accuracy of the corner cutting. In this research, investigation is focused on the convex corner radii errors and alternative solutions are proposed for the case of successive cuts (one roughing and two finishings). Experiments are carried out for roughing operation by considering frequency of discharges and feed speed. The residual materials on straight and curved paths are the output parameters. Results indicate that optimization of these parameters have a better influence for control of residual material thickness on straight paths than on curved corners. One important conclusion is that roughing is the most influential stage of cutting by WEDM. Then, concave corner radii produced during successive cuts, the effect of corner angle and corner radii are investigated. Errors at radii of different corner angles are identified and related to arc length and residual material thickness in the curved corner. Finally, an effective approach is presented for improving the accuracy of the small-radius concave corner radii of finishing stage. The main conclusion is that to achieve accurate corner radii, one must increase the traversed corner arc length by wire in the small-radius concave corner radii.

Keywords: WEDM, Dimensional Accuracy of Corner, Corner Radii, Residual Material.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

۱- مقدمه

وایرکات یک تکنیک ماشین‌کاری غیرتماسی است که عمل باربرداری را مستقل از سختی ماده و بر اساس تخلیه الکتریکی بین الکترود سیمی و قطعه‌کار هادی انجام می‌دهد (شکل ۱). این فرایند یک روش مناسب برای ساخت قالب‌ها و قطعات صنعتی محسوب می‌شود چرا که کیفیت سطحی مطلوب و دقتی قابل قبول ایجاد می‌کند. بنابراین، هر تلاشی جهت افزایش دقت این فرایند ممکن است گامی بزرگ در تولید قطعات دقیق و پیچیده صنعتی باشد.

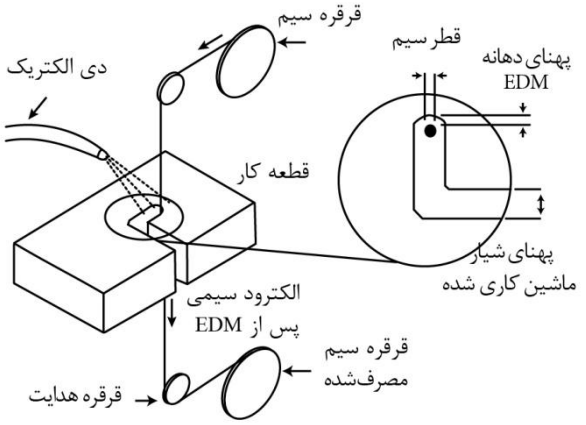
در فرایند وایرکات دقت ابعادی و هندسی به عوامل زیادی از جمله وضعیت دینامیکی و استاتیکی ماشین، سیم، دی‌الکتریک و پارامترهای جرقه بستگی دارد. با وجود دقت بسیار بالای سیستم‌های کنترل، دستیابی به دقت‌های میکرونی در این فرآیند کاری سخت و مشکل است چرا که به دلیل انعطاف‌پذیری سیم و نیروهای فرآیندی، همواره امکان انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده وجود دارد.

در ماشین‌کاری به وسیله وایرکات در اثر عملیات باربرداری، نیروهای الکترواستاتیک، الکترومگنتیک، الکترودینامیک و فشار دی‌الکتریک بر سیم وارد شده و منجر به ارتعاش و خم شدن آن می‌شوند (شکل ۲). در برش گوشه‌های تیز و گوشه‌های کوچک- شعاع[1] به دلیل عقب‌افتادگی سیم[2] از مسیر کنترل عددی همواره خطای ماشین‌کاری وجود دارد (شکل ۳).

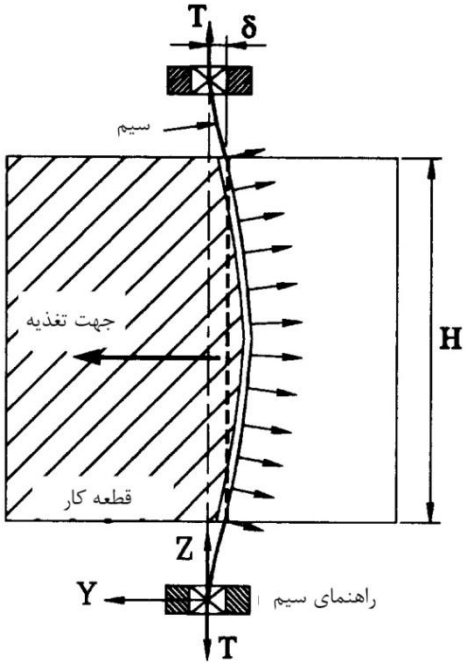
در گوشه‌های محدب[3] (نر) رأس گوشه در اثر این پدیده و همچنین تمرکز حرارتی ایجاد شده، برداشته می‌شود. در گوشه‌های مقعر[4] (ماده) سیم قبل از رسیدن به رأس گوشه، مسیر را می‌پیماید و در نتیجه مقداری ماده در رأس گوشه باقی می‌ماند. خطای ماشین‌کاری گوشه‌ها و انحناها در وایرکات توسط محققان مختلف مورد توجه قرار گرفته است. این محققان با کنترل پارامترهای ماشین و تغییر مسیر (جابجایی مسیر) سعی کرده‌اند تا میزان انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده را کاهش و در نتیجه بی‌دقتی برش گوشه‌ها را کاهش دهند.

از میان اولین تحقیقات پیرامون خطای ماشین‌کاری گوشه‌ها می‌توان به تحقیقات دکسر و اسنویز (۱۹۸۹) اشاره کرد.

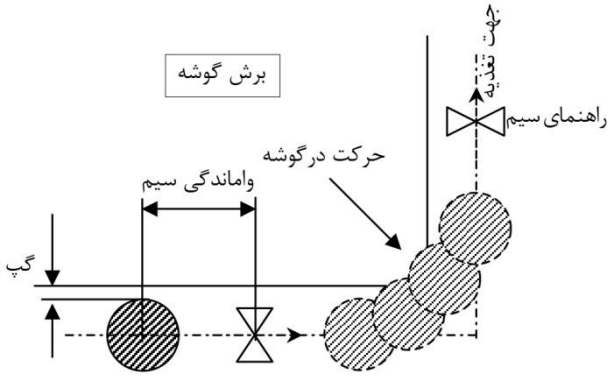
1. Small-Radius Corner
2. Wire Lag
3. Convex Corner
4. Concave Corner



شکل ۱ نمایی از برش وایرکات [۱]



شکل ۲ نمایی از خیز سیم [۲]



شکل ۳ واماندگی سیم در برش گوشه‌ها [۳]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

ایشان سه عامل واماندگی سیم[1]، افزایش ارتعاشات سیم[2] و افزایش احتمال تخلیه الکتریکی[3] را علل اصلی خطای ماشین‌کاری گوشه‌های تیز معرفی کرده‌اند [۴]. برخی دیگر تلاش کرده‌اند تا با تغییر شرایط ماشین‌کاری نظیر زمان خاموشی پالس و توان[4] خیز سیم را کاهش و دقت ماشین‌کاری را افزایش دهند [۶،۵]. عیب اصلی این روش‌ها، طولانی کردن زمان ماشین‌کاری است.

اوبارا و همکاران یک روش ترکیبی کنترل توان و کنترل مسیر برای بهبود دقت گوشه‌ها در خشن‌کاری وایرکات پیشنهاد کرده‌اند [۶]. در این روش از کنترل توان برای کاهش خیز سیم و از اصلاح مسیر برای جبران خطا استفاده شده است. بنا بر نظر نویسندگان، در میان روش‌های ماشین‌کاری گوشه، این روش کمترین زمان ماشین‌کاری را دارد. در مطالعه‌ای دیگر، انواع کنترل برای کاهش زمان ماشین‌کاری در گوشه بررسی شده، در نهایت کنترل زمان خاموشی پالس با کنترل ولتاژ سروو و روش اصلاح مسیر ترکیب شده است [۷]. به کمک یک سیستم جامع کامپیوتری و تلفیقی از یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، خطای ماشین‌کاری پیش‌بینی و برای بهینه‌سازی دقت گوشه‌ها مسیر سیم اصلاح شد [۸].

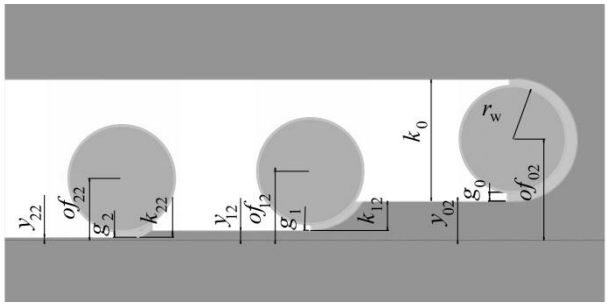
تأثیر تغییر شکل و موقعیت سیم روی دقت برش گوشه‌ها همواره مورد توجه بوده است [۹]. گام بعدی توجه به تأثیرخطاهای ایجاد شده در برش‌های پیشین روی دقت نهایی در برش‌های متوالی (خشن و پرداخت) بود [۳]. در تلاشی دیگر، رابطه میان مسیر واقعی سیم و مسیر NC در خشن‌کاری گوشه‌های تیز شبیه‌سازی شد تا امکان پیش‌بینی مسیر واقعی سیم فراهم آید [۱۰]. بر نقش افزایش کشش سیم، در بهبود دقت شعاع گوشه تأکید شده است چرا که با افزایش کشش خیز سیم کاهش می‌یابد و اختلاف بین شعاع گوشه در صفحات میانی و انتهایی قطعه کم می‌شود [۱۱]. دقت ماشین‌کاری گوشه‌ها در ورق‌های نازک و تأثیر نیروی الکترومغناطیس روی آنها نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۲].

همان طور که اشاره شد بهبود دقت برش گوشه‌ها بستگی زیادی به پارامترهای ماشین‌کاری دارد. بنابراین انتخاب صحیح این پارامترها می‌تواند دستیابی به گوشه‌های دقیق را ممکن سازد. گوشه‌ها بر شکل هندسی به گوشه‌های تیز[5]، گوشه‌های بزرگ- شعاع[6] و گوشه‌های کوچک- شعاع[7] تقسیم می‌شوند[۶]. شوند[۶]. اهمیت گوشه‌های کوچک- شعاع ناشی از کاربردهای زیاد آنها است. در تحقیق حاضر، اول تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری روی بار باقی‌مانده مسیر مستقیم، y_2^{st}، و قوس محدب گوشه، y_2^{cr}، تجزیه و تحلیل شده است. سپس در بخش دوم، خطای ابعادی در گوشه‌های کوچک- شعاع مقعر بررسی شده، روشی برای کاهش خطا روی قوس گوشه پیشنهاد شده - است.

۲- تحلیل برش

به کمک برش چند مرحله‌ای وایرکات می‌توان به زبری سطح کمتر از میکرون در کل مسیر برش و دقت ابعادی در حد یک میکرون در روی مسیرهای مستقیم (البته با تغییر افست) دست یافت. اما در روی قوس‌ها و انحناها خطای ابعادی نسبتاً زیاد است. فاصله مرکز سیم از مسیر برنامه‌ریزی، افست نامیده می‌شود. برای یک برش سه مرحله‌ای، تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی مرحله خشن‌کاری روی دقت برش مسیر مستقیم و شعاع محدب گوشه را بررسی می‌کند. همچنین خطای ابعادی قوس مقعر گوشه و تأثیر تغییر زاویه گوشه و بار باقی‌مانده بر شعاع واقعی قوس مطالعه، برای افزایش دقت پیشنهادی ارائه شده است.

شکل ۴ یک برش سه مرحله‌ای وایرکات در روی مسیر مستقیم و شکل ۵ یک برش سه مرحله‌ای روی قوس محدب گوشه را نشان می‌دهد.

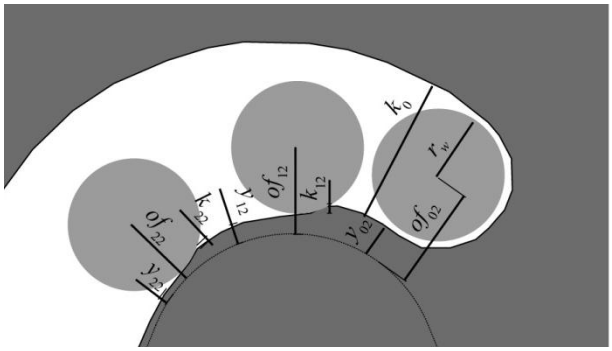


1. Wire Lag
2. Enhanced Wire Vibrations
3. Enhanced Discharge Probability
4. Power

5. Sharp Corner
6. Large-Radius Corner
7. Small-Radius Corner

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

شکل ۴ نمایی از برش سه مرحله‌ای وایرکات در روی مسیر مستقیم



شکل ۵ نمایی از برش سه مرحله‌ای وایرکات در روی قوس محدب

برای ایجاد برش دقیق و دستیابی به شکل هندسی مطلوب در یک برش سه مرحله‌ای وایرکات، باید بار باقی‌مانده بعد از مرحله سوم، y_{22}، در کل مسیر صفر شود. معمولاً در برش‌هایی که به کمک تنظیمات پیشنهادی سازنده ماشین وایرکات انجام می‌شوند مقادیر پارامتر فوق همه جا برابر صفر نمی‌شود و خطای ناشی از اضافه بار برداشت شده یا بار باقی‌مانده وجود دارد.

اگر y_{22} در روی مسیر مستقیم با y_2^{st} و در روی قوس با y_2^{cr} نشان‌داده شود برای امکان حذف خطای ماشین‌کاری باید رابطه (۱) برقرار باشد.

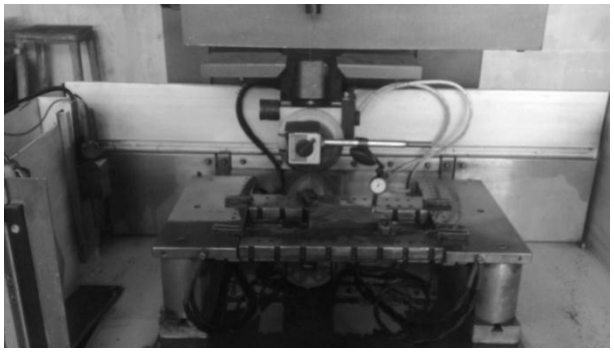
$$y_2^{cr} = y_2^{st} \qquad (۱)$$

در ماشین‌کاری به وسیله وایرکات معمولاً رابطه (۱) برقرار نبوده، برای یک قوس محدب $y_2^{cr} < y_2^{st}$ و برای یک قوس مقعر $y_2^{cr} > y_2^{st}$ است.

۳- مواد و شرایط انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فولادی به ابعاد (۹×۴۹×۵۴) میلی‌متر از جنس ۱/۲۵۱۰ (فولادی پرکاربرد در صنعت قالب‌سازی و ابزارسازی) انجام شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، پس از فرزکاری، طبق استاندارد ASM عملیات حرارتی تنش‌گیری اجرا [۱۳] و سپس کلیه سطوح آنها با دقت توازی ±۲ دقیقه سنگ‌زده شدند. برای جلوگیری از ایجاد تنش پسماند، عملیات سنگ‌زنی با بار کم و مایع خنک‌کاری زیاد انجام گرفت.

نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی مطابق شکل ۶ با استفاده از ساعت میکرونی روی میز ماشین وایرکات تنظیم و بسته شدند. همه آزمایش‌های این تحقیق به وسیله ماشین وایرکات شارمیلز[1] و با سیم Sw25X (با قطر ۰/۲۵میلی‌متر) انجام شدند. سیم مورد استفاده همان سیم پیش نهادی سازنده در کاتالوگ ماشین بود.



شکل ۶ نمایی از تنظیم، دستگاه و شرایط عملیاتی ماشین‌کاری

با در نظر گرفتن حداقل فاصله کلگی‌های بالا و پایین ماشین تا سطح بالا و پایین قطعه‌کار، نمونه‌ها مطابق آزمایش‌های طراحی شده، بریده شدند. در حین انجام آزمایش‌ها سعی شد که شرایط محیطی پایدار و ثابت بماند.

در فرایند تخلیه الکتریکی با تغییر پارامترهای جرقه، اندازه گپ جرقه تغییر می‌کند بنابراین با کنترل گپ جرقه می‌توان مقدار بار باقی‌مانده در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه را کنترل نمود. در ماشین وایرکات تنظیمات برش و همچنین مقادیر افست برای مراحل مختلف برش به وسیله سازنده ماشین پیشنهاد می‌گردد. این مقادیر بسته به ضخامت و جنس قطعه‌کار و سیم تغییر می‌کنند. جدول ۱ تنظیمات پیشنهادی سازنده برای برش سه مرحله‌ای با ماشین مورد آزمایش برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

۴-دقت برش و پارامترهای خشن‌کاری

در این قسمت با انجام آزمایش‌های طراحی‌شده و تحلیل آماری نتایج، تأثیر پارامترهای خشن‌کاری روی بار باقی‌مانده در روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه بررسی شده است. با مطالعه منابع و بررسی قابلیت‌های ماشین وایرکات به نظر می‌رسد که پارامترهای فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی می‌توانند بیشترین تأثیر را بر میزان بار باقی‌مانده در فرایند وایرکات داشته باشند چرا که با کنترل مقدار فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی سیم می‌توان میزان چگالی اصابت جرقه بر سطح جانبی شیار برش (تعداد جرقه بر واحد سطح) و در نتیجه میزان بار باقی‌مانده را کنترل نمود. بنابراین این پارامترها در سه سطح بررسی شدند و برای تعیین سطوح آنها از کاتالوگ شرکت سازنده دستگاه مورد نظر (جدول ۱) کمک گرفته شد [۱۴]. جدول ۲ سطوح مختلف این پارامترها را نشان می‌دهد.

1. Charmilles Robofil 200

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

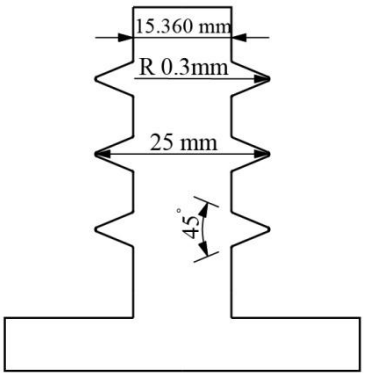
جدول ۱ مقادیر پیشنهادی سازنده برای پارامترهای وایرکات در ماشین‌کاری سه مرحله‌ای برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر [۱۴]

نام پارامتر	نشانه پارامتر	مقدار خشن‌کاری	مقدار پرداخت اول	مقدار پرداخت دوم
مولد	M	-	-	-
خازن	C	۳/۳ μF	۰	۰
ولتاژ مدار باز	V	۱۲۰v سیم قطب منفی	۱۲۰v سیم قطب منفی	۱۲۰v سیم قطب منفی
جریان تخلیه	P	۳۲A	۱۶A	۸A
زمان روشنی پالس	A	۶/۴ μs	۱/۶ μs	۰/۸ μs
کشش سیم	w_b	۱۰N	۱۲N	۱۲N
سرعت سیم	w_s	۶m/min	۶m/min	۶m/min
ولتاژ گپ	Aj	۵۰ درصد ولتاژ مدار باز	۳۵ درصد ولتاژ مدار باز	۳۳ درصد ولتاژ مدار باز
سرعت پیشروی	S	۶/۱۴mm/min	۲۹/۲۸mm/min	۲۱/۹۶mm/min
فرکانس تخلیه	f	۱۸kHz	۱۲۵kHz	۲۰۰kHz

جدول ۲ پارامترهای متغیر در مرحله خشن‌کاری

پارامترها	مقادیر پارامترها		
f (kHz)	۷	۱۳	۱۸
S (mm/min)	۷/۳۲	۱۸/۳	۲۹/۲۸

در این قسمت، نخست طبق آزمایش‌های طراحی شده، سطوح مختلف پارامترهای متغیر در مرحله خشن‌کاری آزموده شدند. سپس پرداخت اول و دوم اجرا شدند. در این آزمایش‌ها، مسیر برش به صورت متقارن مطابق شکل ۷ به گونه‌ای برنامه‌نویسی شد که پهنای قطعه در روی مسیر مستقیم برابر ۱۵/۳۶۰ و روی قوس گوشه برابر ۲۵ میلی‌متر و شعاع قوس برابر ۳۰۰ میکرون باشد.



شکل ۷ شکل هندسی قطعات برش خورده در این بخش

پس از برش قطعه، این ابعاد به وسیله کمپراتور مکانیکی[1] در شرایط اتاق تمیز با ابعاد گیج بلوک‌های مبنا مقایسه و میزان بار باقی‌مانده در روی قسمت‌های مختلف آن (y_2^{st} و y_2^{cr}) مطابق جدول ۳ استخراج شد.

هرگاه متغیرهای مؤثر بر خروجی یک فرآیند مشخص باشند به کمک روش طراحی آزمایش و تحلیل رگرسیون می‌توان رابطه بین این متغیرها و خروجی را توضیح داد. روش طراحی آزمایش مجموعه روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسایلی استفاده می‌شود که در آنها هدف بهینه‌سازی پاسخ دلخواه با چندین ورودی متغیر مستقل باشد [۱۵]. در این تحقیق از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شده است. روش فاکتوریل کامل برای تعیین ارتباط بین پارامترهای متغیر فرایند و تغییرات دلخواه (مطلوب) پاسخ‌ها و همچنین یافتن پارامترهای مؤثر فرایند روی پاسخ‌های به هم پیوسته استفاده می‌شود. این روش یک استراتژی آزمایش متوالی برای ایجاد یا بهینه کردن مدل تجربی است. در این روش با استفاده از آزمایش و تحلیل رگرسیون، مدلی از پاسخ دلخواه با چندین ورودی متغیر مستقل حاصل می‌شود. به علاوه این روش یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده برای حل مسایل بهینه‌سازی در زمینه ساخت و تولید، نظیر توسعه سیستم مانیتورینگ ابزار برشی [۱۶]، پیش‌بینی نرخ باربرداری و نرخ سایش ابزار در فرایند تخلیه الکتریکی [۱۷] و بررسی دما و انرژی مخصوص در فرایند EDDG[2] [۱۸]، به کار گرفته شده است.

1. Peacock Mechanical Comparator

2. Electro Discharge Diamond Grinding

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

جدول ۳ نتایج حاصل از بررسی پارامترها در مرحله خشن

ردیف	فرکانس تخلیه (kHz) f	سرعت پیشروی (mm/min) S	آزمایش اول y_2^{st} (μm)	آزمایش دوم y_2^{st} (μm)	آزمایش اول y_2^{cr} (μm)	آزمایش دوم y_2^{cr} (μm)
۱	۷	۷/۳۲	۴	۵	-۸	-۷/۵
۲	۷	۱۸/۳	۶/۵	۶	-۸	-۷/۵
۳	۷	۲۹/۲۸	۴/۵	۵	-۷/۵	-۷
۴	۱۳	۷/۳۲	۳/۵	۴/۵	-۸	-۸
۵	۱۳	۱۸/۳	۶/۵	۶/۵	-۷	-۷/۵
۶	۱۳	۲۹/۲۸	۶	۵/۵	-۶	-۷
۷	۱۸	۷/۳۲	۴	۳/۵	-۸	-۹
۸	۱۸	۱۸/۳	۴	۳/۵	-۸	-۸/۵
۹	۱۸	۲۹/۲۸	۴/۵	۵/۵	-۸/۵	-۸

افزون بر همه اینها، طرح انتخابی دارای این مزیت است که می‌تواند تمام حالات ممکن را پوشش دهد. در این تحقیق برای تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار آماری مینی‌تب[1] استفاده شده است.

۴-۱- تحلیل بار باقی‌مانده روی مسیر مستقیم برای پارامترهای مرحله خشن‌کاری

تجزیه و تحلیل پاسخ y_2^{st} و رسم نمودار احتمال نرمال آن نشان داد که توزیع مقادیر باقی‌مانده آزمایش نرمال نیست. از آنجا که لازمه تحلیل واریانس، نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده آزمایش است از روش تبدیل[2] داده‌ها برای نرمال کردن توزیع مقادیر باقی‌مانده استفاده شد. این روش نشان داد که استفاده از تغییر متغیر لگاریتم طبیعی بهترین نتیجه را می‌دهد. در نتیجه به جای پاسخ y_2^{st}، پاسخ $\ln y_2^{st}$ تجزیه و تحلیل شد.

جدول ۴، تحلیل واریانس به دست آمده برای پاسخ $\ln y_2^{st}$ با سطح اطمینان[3] ۹۵ درصد را نشان می‌دهد. R^2 معیاری برای تعیین تغییرپذیری در مقدار خروجی است. به طور کلی هر چه مقدار R^2 بزرگتر باشد، تحلیل انجام شده دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر است. از شاخص‌های ارزیابی یک مدل، آزمون مستقل بودن مقادیر باقی‌مانده با استفاده از نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر برازش شده[4] است [۱۵].

نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهند مقادیر باقی‌مانده به طور تصادفی توزیع شده و از روند خاصی پیروی نمی‌کنند و در نتیجه شرط مستقل بودن مقادیر باقی‌مانده به خوبی رعایت شده است. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ $\ln y_2^{st}$ دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده دارد. جدول ۴ نشان‌می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P \le 0.05$)، هر دو پارامتر فرکانس و سرعت پیشروی و اثر متقابل آنها معنی‌دار و به عنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند هستند. معادله رگرسیونی ۲ ارتباط این پارامترها و اثر متقابل آنها با خروجی $\ln y_2^{st}$ را نشان می‌دهد.

$$\ln y_2^{st} = 1.8354 - 0.03662f - 0.0118S + 0.007192f \times S \quad (۲)$$

ضرایب مدل رگرسیون (۲) در جدول ۵ و تحلیل واریانس این معادله در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. نمودار اثرات اصلی پارامترهای فرکانس و سرعت پیشروی در شکل ۹، مشخص می‌کند که تغییر سطوح این پارامترها بر روی خروجی $\ln y_2^{st}$ مؤثر است و ماکزیمم مقدار خروجی در سطح فرکانس ۱۳ کیلوهرتز و سرعت پیشروی ۱۸/۳ میلی‌متر بر دقیقه رخ می‌دهد. در این نمودار بازه فرکانس ۷ تا ۱۳ کیلوهرتز نسبت به بازه ۱۳ تا ۱۸ کیلوهرتز و بازه سرعت پیشروی mm/min ۱۸/۳-۲۹/۲۸ نسبت به بازه mm/min ۷/۳۲-۱۸/۳ مقدار خروجی بیشتر و نوسان کمتر را نشان می‌دهد.

۴-۲- تحلیل بار باقی‌مانده روی قوس گوشه برای پارامترهای مرحله خشن‌کاری

تحلیل پاسخ y_2^{cr} و رسم نمودار احتمال نرمال آن مشخص کرد توزیع مقادیر باقی‌مانده آزمایش نرمال نیست. روش تبدیل داده‌ها نشان‌داد استفاده از لگاریتم طبیعی نمایش بهتری را ممکن می‌سازد. با توجه به اینکه همه مقادیر پاسخ y_2^{cr} منفی بودند به جای پاسخ y_2^{cr}، پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$ تحلیل شد.

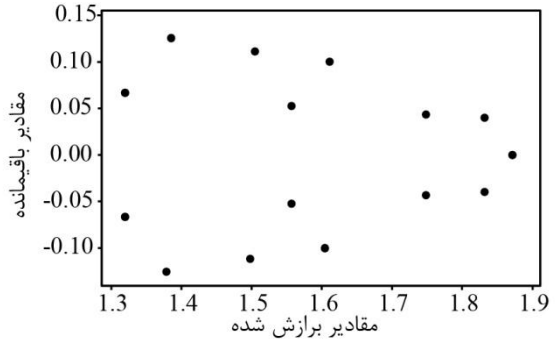
1. Minitab® 15.1.0.0.
2. Transformation
3. Confidence Level
4. Fitted Value

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

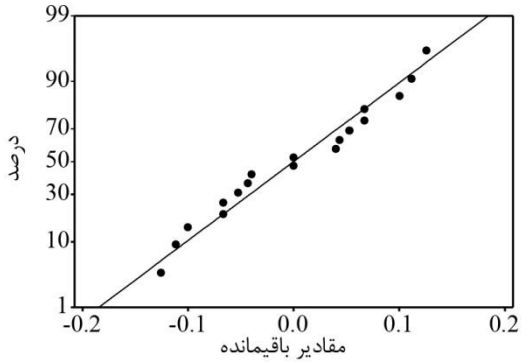
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

جدول ۴ تحلیل واریانس (ANOVA) برای پاسخ $\ln y_2^{st}$

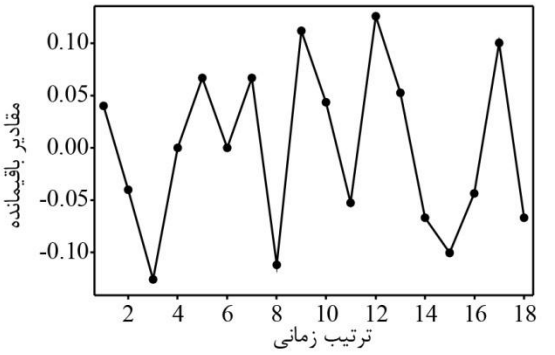
نام پارامتر	DF درجه آزادی	Seq SS مجموع مربعات دنباله‌ای	Adj SS مجموع مربعات تصحیح شده	Adj MS میانگین مربعات تصحیح‌شده	F مقدار آماره F	P مقدار احتمال
فرکانس تخلیه f	۲	۰/۲۲۱۳۲	۰/۲۲۱۳۲	۰/۱۱۰۶۶	۹/۳۱	۰/۰۰۶
سرعت پیشروی S	۲	۰/۲۶۸۱۳	۰/۲۶۸۱۳	۰/۱۳۴۰۶	۱۱/۲۸	۰/۰۰۴
فرکانس تخلیه f × سرعت پیشروی S	۴	۰/۲۳۰۸	۰/۲۳۰۸	۰/۰۵۷۷	۴/۸۵	۰/۰۲۳
خطا	۹	۰/۱۰۶۹۸	۰/۱۰۶۹۸	۰/۰۱۱۸۹		
مجموع	۱۷	۰/۸۲۷۲۳				
$R^2 = ٪۸۷/۰۷$						$R^2(adj) = ٪۷۵/۵۷$



الف – مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر برازش شده برای $\ln y_2^{st}$

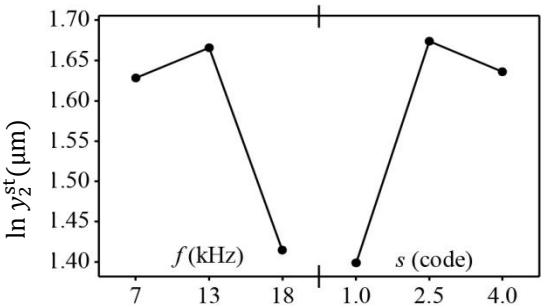


ب - نمودار احتمال نرمال برای پاسخ $\ln y_2^{st}$



ج - نمودار ترتیب زمانی مقادیر باقی‌مانده برای پاسخ $\ln y_2^{st}$

شکل ۸ نمودارهای فرض نرمال برای پاسخ $\ln y_2^{st}$



شکل ۹ نمودار تأثیر تغییر پارامترهای فرکانس و سرعت پیشروی بر روی پاسخ $\ln y_2^{st}$

جدول ۵ ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ $\ln y_2^{st}$

نام پارامتر	ضریب	خطای استاندارد ضریب	T	P
مقدار ثابت	۱/۸۳۵۴	۰/۳۰۳۵	۶/۰۵	۰/۰۰۰
فرکانس تخلیه f	-۰/۰۳۶۶۲	۰/۰۲۲۵۸	-۱/۶۲	۰/۱۲۷
سرعت پیشروی S	-۰/۰۱۱۸	۰/۱۰۹	-۰/۱۱	۰/۹۱۵
فرکانس تخلیه f × سرعت پیشروی S	۰/۰۰۷۱۹۲	۰/۰۰۸۱۱۱	۰/۸۹	۰/۳۹

جدول ۶ تحلیل واریانس مدل رگرسیون برای پاسخ $\ln y_2^{st}$

نام پارامتر	DF درجه آزادی	SS مجموع مریعات	MS میانگین مربعات	F مقدار آماره F	P مقدار احتمال
رگرسیون	۳	۰/۳۲۴۴۰	۰/۱۰۸۱۳	۳/۰۱	۰/۰۶۶
خطای مقادیر باقی‌مانده	۱۴	۰/۵۰۲۸۴	۰/۰۳۵۹۲		
مجموع	۱۷	۰/۸۲۷۲۳			

روش تبدیل داده‌ها نشان‌داد استفاده از لگاریتم طبیعی نمایش بهتری را ممکن می‌سازد. با توجه به اینکه همه مقادیر پاسخ y_2^{cr}

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

منفی بودند به جای پاسخ y_2^{cr}، پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$ تحلیل شد.

جدول ۷، تحلیل واریانس به دست آمده برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$ را نشان‌می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که هر دو پارامتر فرکانس و سرعت پیشروی معنی‌دار هستند ولی اثر متقابل آنها مؤثر نیست. معادله رگرسیونی ۳ ارتباط بین خروجی $\ln(-y_2^{cr})$ با پارامترهای مؤثر را نشان می‌دهد.

$$\ln(-y_2^{cr}) = 2.02344 + 0.008028f - 0.03399S \quad (۳)$$

ضرایب مدل رگرسیون (۳) در جدول ۸ و تحلیل واریانس این معادله در جدول ۹ نشان‌داده شده است. همچنین این دو جدول، شاخص‌های ارزیابی مدل رگرسیون و آماره‌های کفایت آن، برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$ را نشان می‌دهند.

از نمودارهای شکل ۱۰ مشخص است که در این مدل شرط مستقل بودن مقادیر باقی‌مانده به خوبی رعایت شده‌است و توزیع مقادیر باقی‌مانده از روند خاصی پیروی نمی‌کند. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$ نیز دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده دارد.

نمودار تأثیر پارامترهای فرکانس و سرعت پیشروی بر روی خروجی $\ln(-y_2^{cr})$ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نمودار مشخص می‌کند که در سطح فرکانس ۱۳ کیلوهرتز و سرعت پیشروی ۲۹/۲۸ mm/min، بار باقی‌مانده بیشتری در روی قوس گوشه ایجاد شده است.

با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده از مطالعه تأثیر پارامترهای فرکانس و سرعت پیشروی بر بار باقی‌مانده روی مسیر مستقیم و قوس گوشه، سطوح ۱۳ کیلوهرتز برای فرکانس، و ۲۹/۲۸ mm/min برای سرعت پیشروی به عنوان سطوح بهینه این پارامترها استخراج شدند. چرا که این سطوح بار باقی‌مانده بیشتری روی مسیر مستقیم و قوس گوشه ایجاد کرده‌اند.

۴-۳- بحث و بررسی نتایج مطالعه مرحله خشن‌کاری

نتایج آزمایش‌ها، به کمک نمودارهای آماری، میزان تأثیر پارامترهای فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی بر روی پاسخ‌های y_2^{st} و y_2^{cr} را مشخص کردند. پارامتر فرکانس مشخص‌کننده تعداد جرقه (تخلیه) در واحد زمان می‌باشد. با فرض اینکه میزان ماده برداشت شده توسط هر جرقه ثابت و مشخص باشد با افزایش فرکانس تخلیه، میزان ماده برداشته شده در واحد زمان افزایش می‌یابد.

جدول ۷ تحلیل واریانس (ANOVA) برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$

نام پارامتر	DF درجه آزادی	Seq SS مجموع مربعات دنباله‌ای	Adj SS مجموع مربعات تصحیح شده	Adj MS میانگین مربعات تصحیح‌شده	F مقدار آماره F	P مقدار احتمال
فرکانس تخلیه f	۲	۰/۰۶۳۴۷۸	۰/۰۶۳۴۷۸	۰/۰۳۱۷۳۹	۹/۰۹	۰/۰۰۷
سرعت پیشروی S	۲	۰/۰۳۱۴۸۸	۰/۰۳۱۴۸۸	۰/۰۱۵۷۴۴	۴/۵۱	۰/۰۴۴
فرکانس تخلیه f × سرعت پیشروی S	۴	۰/۰۱۹۹۵۲	۰/۰۱۹۹۵۲	۰/۰۰۴۹۸۸	۱/۴۳	۰/۳۰۱
خطا	۹	۰/۰۳۱۴۱۸	۰/۰۳۱۴۱۸	۰/۰۰۳۴۹۱		
مجموع	۱۷	۰/۱۴۶۳۳۷				
R^2 = ٪۷۸/۵۳					R^2(adj) ٪۵۹/۴۵	

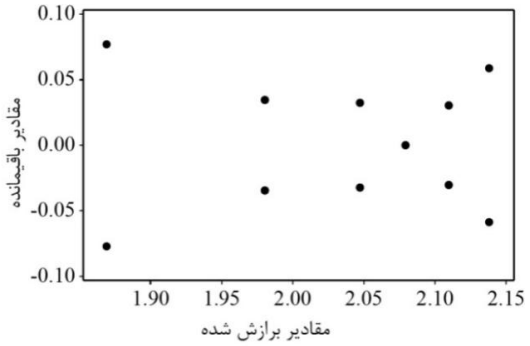
جدول ۸ ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$

نام پارامتر	ضریب	خطای استاندارد ضریب	T	P
مقدار ثابت	۲/۰۲۳۴۴	۰/۰۶۶۶۹	۳۰/۳۴	۰/۰۰۰
فرکانس تخلیه f	۰/۰۰۸۰۲۸	۰/۰۰۴۰۹۸	۱/۹۶	۰/۰۶۹
سرعت پیشروی S	-۰/۰۳۳۹۹	۰/۰۱۵۰۵	-۲/۲۶	۰/۰۳۹

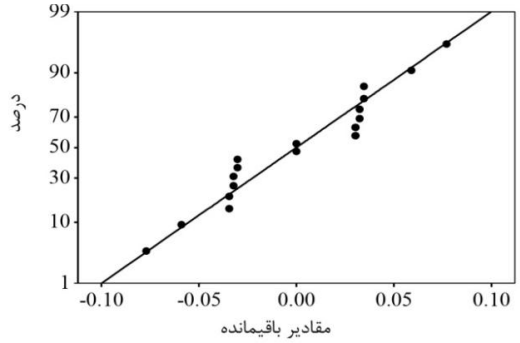
جدول ۹ تحلیل واریانس (ANOVA) مدل رگرسیون برای پاسخ $\ln(-y_2^{cr})$

نام پارامتر	DF درجه آزادی	SS مجموع مریعات	MS میانگین مربعات	F مقدار آماره F	P مقدار احتمال
رگرسیون	۲	۰/۰۵۴۶۶۲	۰/۰۲۷۳۳۱	۴/۴۷	۰/۰۳۰
خطای مقادیر باقی‌مانده	۱۵	۰/۰۹۱۶۷۴	۰/۰۰۶۱۱۲		
مجموع	۱۷	۰/۱۴۶۳۳۷			

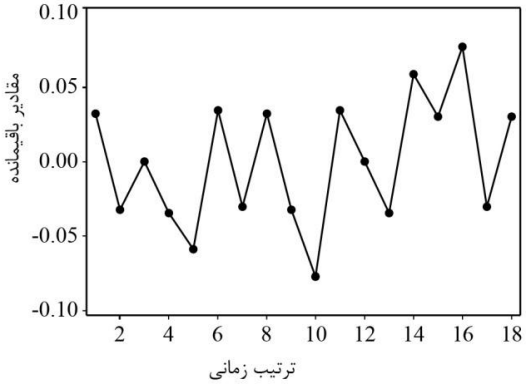
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]



الف- مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر برازش شده برای $\ln(-y_2^{\mathrm{cr}})$



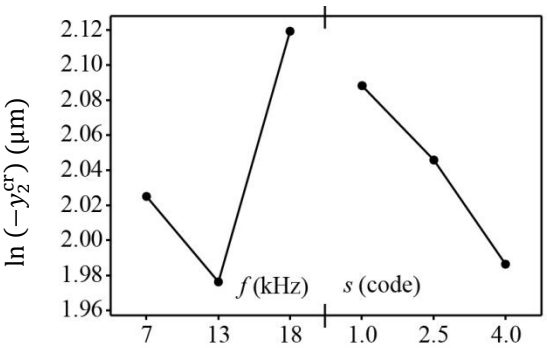
ب- نمودار احتمال نرمال برای پاسخ $\ln(-y_2^{\mathrm{cr}})$



ج- نمودار ترتیب زمانی مقادیر باقی‌مانده برای پاسخ $\ln(-y_2^{\mathrm{cr}})$

شکل ۱۰ نمودارهای فرض نرمال برای پاسخ $\ln(-y_2^{\mathrm{cr}})$

با انجام هر تخلیه الکتریکی، مقداری ماده از پیش روی سیم برداشته می‌شود و فاصله‌ی بین سیم و قطعه‌کار افزایش می‌یابد. برای جبران این فاصله، از پارامتر سرعت پیشروی کمک گرفته می‌شود. در حقیقت این پارامتر، سرعت جبران فاصله بین سیم و قطعه‌کار برای رسیدن به فاصله تعادلی است. افزایش سرعت پیشروی، سرعت جبران فاصله بین قسمت جلوی سیم و قطعه‌کار را افزایش داده، باعث حرکت سریع‌تر سیم روی مسیر برش می‌شود.



شکل ۱۱ نمودار تأثیر تغییر پارامترهای فرکانس و سرعت پیشروی بر روی پاسخ $\ln(-y_2^{\mathrm{cr}})$

سطح جانبی قطعه (شیار برش) که در هنگام باربرداری، مقابل سطح جانبی سیم قرار می‌گیرد، با کاهش مقدار فرکانس تخلیه و افزایش سرعت پیشروی سیم میزان چگالی اصابت جرقه بر این سطح، یعنی سطح جانبی قطعه‌کار، (تعداد جرقه بر واحد سطح) کاهش می‌یابد و درنتیجه میزان بار باقی‌مانده افزایش می‌یابد. پس به‌طورکلی با کاهش مقدار فرکانس تخلیه و افزایش سرعت پیشروی سیم می‌توان میزان بار باقی‌مانده را افزایش‌داد. دیگر عامل مؤثر در تعیین میزان بار باقی‌مانده، پایدار و پیوسته بودن ماشین‌کاری است. در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها، سطوح پارامترها با توجه به محدویت‌های ماشین و فرآیند انتخاب شده‌اند. انتخاب سطح نامناسب برای این پارامترها (نظیرکاهش بیش از اندازه فرکانس) باعث ایجاد برش ناپیوسته و ناپایدار می‌شود. انجام ماشین‌کاری ناپیوسته و ناپایدار سبب افزایش ارتعاش سیم و درنتیجه افزایش برداشت ماده از سطح جانبی برش می‌شود. این مطلب را می‌توان به روشنی از نمودارهای حاصل از آزمایش‌ها در شکل‌های ۸ و ۱۰ مشاهده کرد. این نمودارها نشان می‌دهند که هم در روی مسیر مستقیم و هم در روی قوس گوشه، سطح پایین فرکانس بار باقی‌مانده کمتری نسبت به سطح میانی آن ایجاد نموده است. با توجه به اینکه سطح پایین فرکانس برابر با حداقل مقدار ممکن انتخاب شده‌بود به نظر می‌رسد در این سطح فرکانس، ماشین‌کاری به صورت ناپیوسته و ناپایدار انجام شده است. همچنین این نمودارها این پیش‌بینی را تأیید می‌کنند که افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش بار باقی‌مانده روی سطح جانبی شیار می‌شود. چنان‌که گفته شد با کنترل چگالی اصابت جرقه بر سطح جانبی قطعه‌کار می‌توان بار باقی‌مانده در روی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

مسیر مستقیم و قوس را کنترل کرد ولی نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با کنترل چگالی اصابت جرقه نمی‌توان اختلاف بار باقی‌مانده مسیر مستقیم و قوس را به طور کامل از بین برد. این نتایج همچنین نشان‌می‌دهند که تأثیر کنترل پارامترهای مرحله خشن‌کاری روی بار باقی‌مانده مسیر مستقیم بیشتر از بار باقی‌مانده روی قوس است. نتایج آزمایش‌های این تحقیق مشخص نمودند که با بهینه‌سازی پارامترها در مرحله خشن‌کاری، بار باقی‌مانده روی قوس محدب بیش از ۲۰ درصد افزایش و درنتیجه خطای ماشین‌کاری کاهش یافته است.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که با کنترل پارامترهای مراحل مختلف برش نمی‌توان اختلاف بار باقی‌مانده مسیر مستقیم و قوس را به طور کامل از بین برد. ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود برای کاهش و حذف اختلاف بار باقی‌مانده‌ی مسیر مستقیم و قوس مرحله خشن‌کاری در یک برش یک‌مرحله‌ای بررسی شود.

۵- تحلیل هندسی برش گوشه‌های کوچک- شعاع

در برش چند مرحله‌ای قوس به وسیله وایرکات، زاویه گوشه (θ) با دقت بسیار خوبی ماشین‌کاری می‌شود و همان‌گونه که در شکل ۱۲ نشان‌داده شده است، می‌توان گفت قوس همواره مماس بر دو ضلع زاویه است. بنابراین با داشتن زاویه گوشه، شعاع ایده‌آل قوس (شعاع برنامه NC مسیر) و با اندازه‌گیری مقدار بار باقی‌مانده روی قوس، شعاع واقعی قوس را به کمک روابط (۴) تا (۷) می‌توان محاسبه کرد.

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان نوشت:

$$R_{\mathrm{i}} - R_{\mathrm{a}} = L_{\mathrm{i}} - L_{\mathrm{a}} + r_{\mathrm{i}} - r_{\mathrm{a}} \qquad (۴)$$

و از شکل ۱۳ نتیجه می‌شود:

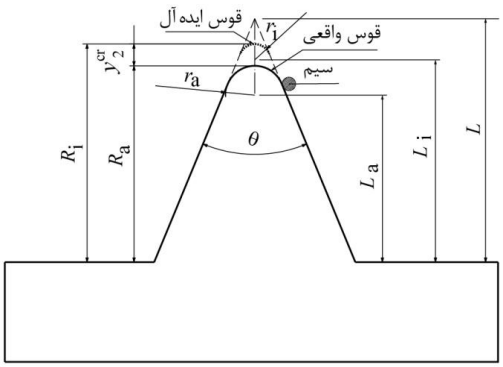
$$L_{\mathrm{i}} - L_{\mathrm{a}} = \frac{r_{\mathrm{a}} - r_{\mathrm{i}}}{\sin\frac{\theta}{2}} \qquad (۵)$$

از جای‌گذاری (۵) در (۴) نتیجه می‌شود:

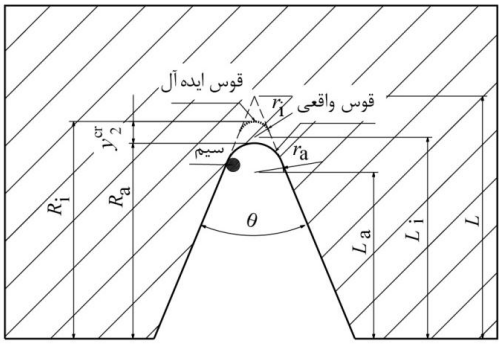
$$R_{\mathrm{i}} - R_{\mathrm{a}} = \frac{(r_{\mathrm{a}} - r_{\mathrm{i}})(1-\sin\frac{\theta}{2})}{\sin\frac{\theta}{2}} \qquad (۶)$$

با توجه به: $y_2^{\mathrm{cr}} = -(R_{\mathrm{i}} - R_{\mathrm{a}})$، رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$y_2^{\mathrm{cr}} = \frac{(r_{\mathrm{i}} - r_{\mathrm{a}})(1-\sin\frac{\theta}{2})}{\sin\frac{\theta}{2}} \qquad (۷)$$

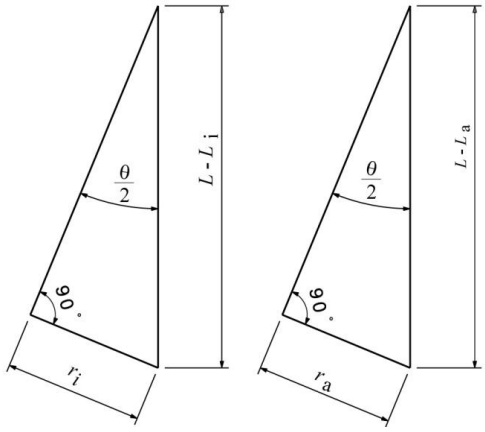


الف- گوشه کوچک- شعاع محدب



ب- گوشه کوچک- شعاع مقعر

شکل ۱۲ شعاع ایده‌آل و شعاع واقعی در قوس گوشه



شکل ۱۳ نمای هندسی زاویه گوشه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

در تمام آزمایش‌های این قسمت، زاویه گوشه و شعاع ایده‌آل قوس به ترتیب $\theta = ۴۵$ و $r_i = ۳۰۰\,\mu m$ هستند. بنابراین می‌توان خطای شعاع قوس را محاسبه نمود:

$$r_i - r_a = ۰/۶۲\, y_2^{cr} \quad (۸)$$

از رابطه (۸) نتیجه می‌شود که خطای شعاع قوس در این آزمایش‌ها به اندازه ۰/۶۲ بار باقی‌مانده روی قوس است.

۶- خطا در گوشه‌های کوچک- شعاع مقعر

در این بخش گوشه‌های کوچک- شعاع مقعر و تأثیر زاویه گوشه روی بار باقی‌مانده در آنها مطالعه شده است. شکل ۱۴ نمایی از برش سه مرحله‌ای روی قوس مقعر گوشه را نشان می‌دهد.

۶-۱- طرح آزمایش و روش اندازه‌گیری

برای انجام آزمایش‌ها، شکل هندسی با گوشه‌های مقعر دارای زاویای $\theta = ۵،۴۵،۹۰،۱۲۰$ و $r_i = ۳۰۰\,\mu m$ انتخاب شد و با استفاده از تنظیمات پیشنهادی سازنده، جدول ۱، در سه مرحله (یک مرحله خشن و دو پرداخت) ماشین‌کاری شد [۱۴]. انتخاب $r_i = ۳۰۰\,\mu m$ به دلیل استفاده از سیم به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر بود تا سیم بتواند به راحتی چنین شعاعی را ایجاد نماید و محدودیتی برای حرکت سیم وجود نداشته باشد. در حین انجام آزمایش‌ها سعی شد تا شرایط محیطی پایدار و ثابت باشد. بعد از انجام آزمایش‌ها شعاع‌های واقعی (r_a) ایجاد شده، به وسیله میکروسکوپ میتوتویو[1] در شرایط اتاق تمیز اندازه‌گیری شد. شکل ۱۵ این مقادیر را نشان می‌دهد.

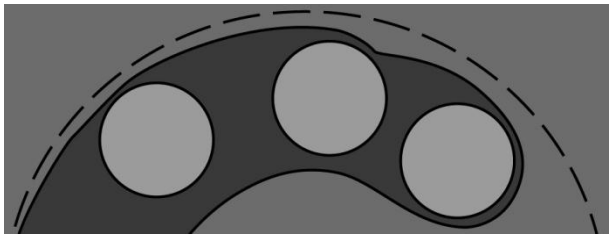
۶-۲- تجزیه و تحلیل نتایج مطالعه زاویه گوشه

شکل ۱۵ تأثیر زاویه گوشه بر اندازه شعاع‌های واقعی اندازه‌گیری شده در گوشه‌های مقعر را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه گوشه، میزان انحراف شعاع گوشه از اندازه اسمی (ایده‌آل) آن افزایش یافته است.

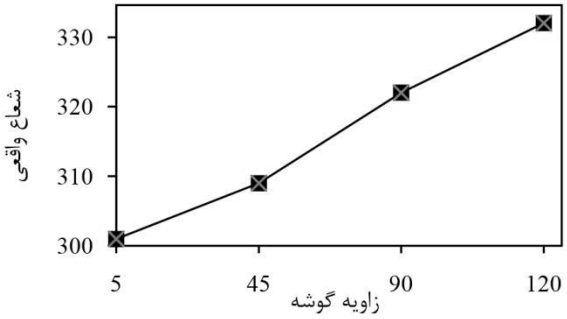
این نتایج نشان می‌دهند که همه شعاع‌های اندازه‌گیری شده از شعاع ایده‌آل بزرگتر هستند و با افزایش زاویه گوشه، شعاع اندازه‌گیری شده افزایش یافته است. با توجه به شکل ۱۱، رابطه هندسی (۷) بین شعاع واقعی و ایده‌آل گوشه و میزان بار باقی‌مانده (خطای برش) برقرار است. به کمک رابطه (۷) می‌توان میزان بار باقی‌مانده را برای هر یک از زوایای بالا محاسبه نمود. جدول ۱۰ این مقادیر را نشان می‌دهد.

1. Mitutoyo

داده‌های جدول ۱۰ نشان‌می‌دهند که بار باقی‌مانده در گوشه باعث افزایش شعاع گوشه گردیده است. همچنین این جدول مشخص می‌کند که تأثیر بار باقی‌مانده بر افزایش شعاع گوشه به اندازه زاویه گوشه بستگی دارد. همان‌گونه که از جدول ۱۰ و شکل ۱۶ مشخص است با افزایش زاویه گوشه از ۵ به ۱۲۰ درجه، بار باقی‌مانده از ۲۱/۹۲ به ۴/۹۵ میکرون کاهش و شعاع گوشه از ۳۰۱ به ۳۳۲ افزایش یافته است.



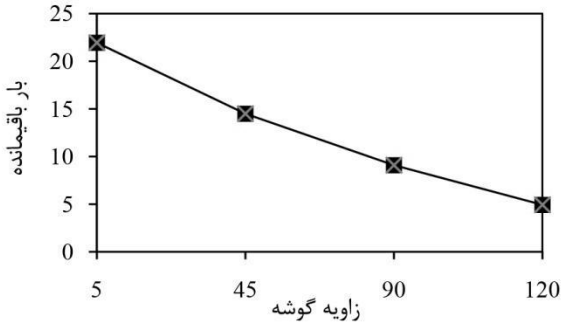
شکل ۱۴ نمایی از برش سه مرحله‌ای در روی قوس مقعر گوشه



شکل ۱۵ تأثیر زاویه گوشه بر اندازه شعاع مقعر گوشه

جدول ۱۰ مقادیر بار باقی‌مانده محاسبه شده

θ (درجه)	۵	۴۵	۹۰	۱۲۰
r_a (μm)	۳۰۱	۳۰۹	۳۲۲	۳۳۲
y_2^{cr} (μm)	۲۱/۹۲	۱۴/۵	۹/۱۱	۴/۹۵



شکل ۱۶ تأثیر زاویه گوشه بر بار باقی‌مانده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

در تأیید رابطه (۷)، نتایج نشان می‌دهند که در زاویه گوشه بزرگتر تأثیر بار باقی‌مانده بر اندازه شعاع گوشه بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه گوشه با وجود اینکه بار باقی‌مانده کاهش می‌یابد شعاع ایجاد شده در گوشه افزایش خواهد یافت چرا که در زاویه گوشه بزرگتر، زاویه مرکزی قوس کوچک‌تر و تغییر جهت سیم نرم‌تر است.

از شکل ۱۷ مشخص است که زاویه مرکزی قوس در هر گوشه مکمل زاویه آن گوشه است. بنابراین، هرگاه شعاع گوشه‌ها یکسان و زوایای آنها متفاوت باشند با افزایش زاویه‌ی گوشه، طول قوس در آن گوشه کاهش می‌یابد. جدول ۱۰ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی گوشه انحراف شعاع گوشه از شعاع اسمی افزایش یافته‌است. پس در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش طول قوس، انحراف شعاع گوشه از شعاع اسمی افزایش می‌یابد.

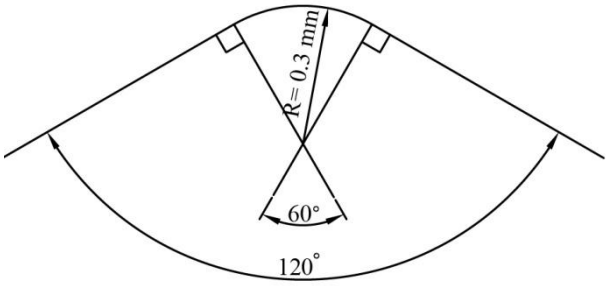
برای پیمودن شعاع گوشه، سیم باید نخست یک تغییر حرکت از خطی به دایره‌ای و سپس یک تغییر از حرکت دایره‌ای به خطی داشته باشد. همان گونه که آمد، به علت وجود نیروهای فرایندی نامتعادل و انعطاف‌پذیری سیم، هر تغییر جهت و نوع حرکت سبب خطای ماشین‌کاری است.

۶-۳- بهبود دقت قوس مقعر گوشه

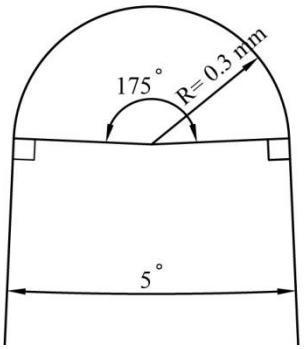
در اینجا برای یکسان‌سازی طول قوس پیموده‌شده، کاهش بار باقی‌مانده روی قوس و کاهش انحراف شعاع واقعی از شعاع اسمی در گوشه‌های مقعر، یک اضافه برش (شکل ۱۸) پیشنهاد شده است.

برای بررسی تأثیر و اعتبار این اضافه برش، آزمایش‌هایی طرح و انجام شدند. در این آزمایش‌ها، شکل هندسی متقارن، مطابق شکل ۱۹ با زاوایای گوشه ۵، ۲۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه و شعاع گوشه ۳۰۰ میکرون مورد مطالعه قرار گرفت. همانند قبل ماشین‌کاری در روی همه گوشه‌ها در سه مرحله و با استفاده از تنظیمات پیشنهادی سازنده انجام گرفت.

برای اینکه همه گوشه‌ها با شرایط یکسان ماشین‌کاری شوند قطعه مورد آزمایش مطابق شکل ۱۹ به صورت دوبل طراحی گردید و اضافه برش تنها در مرحله دوم برش روی گوشه‌های یک طرف اعمال شد در حالی که گوشه‌های طرف دیگر به صورت عادی ماشین‌کاری شدند. بنابراین تنها پارامتر متفاوت در این آزمایش‌ها، اضافه برش اعمال شده روی نیمی از گوشه‌ها بود.

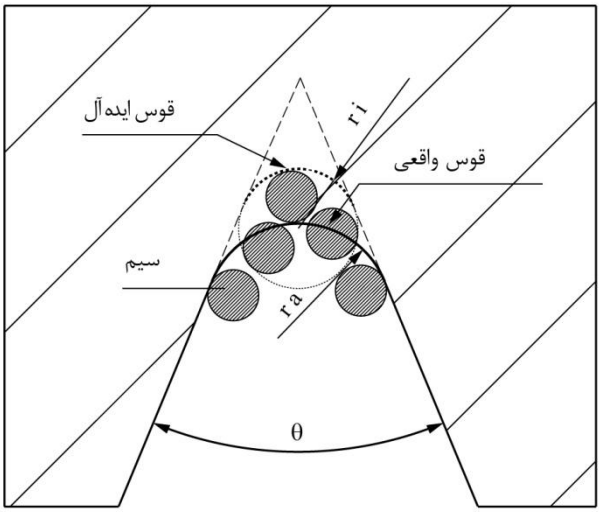


الف- در گوشه ۱۲۰ درجه



ب- در گوشه ۵ درجه

شکل ۱۷ زاویه گوشه و زاویه مرکزی قوس



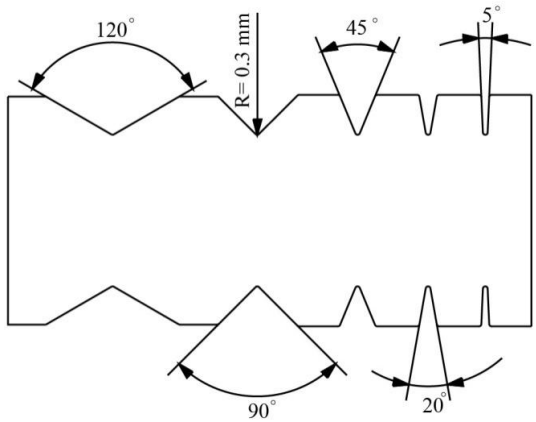
شکل ۱۸ طرح یک اضافه برش برای بهبود دقت قوس مقعر

جدول ۱۱ شعاع‌های گوشه بدست آمده از این آزمایش‌ها و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

مقادیر y_2^{cr} محاسبه شده مربوطه (از رابطه ۷) را نشان می‌دهد. به کمک داده‌های جدول ۱۱ نمودار مقایسه‌ای شکل ۲۰ برای دو پارامتر r_a و y_2^{cr} رسم شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است اضافه برش اعمال‌شده تأثیر مثبتی بر کاهش خطا داشته است و میزان انحراف شعاع گوشه از شعاع ایده‌آل در زاویه ۱۲۰ درجه از ۳۴ میکرون به ۳ میکرون، در زاویه ۹۰ درجه از ۲۰ به ۱، در زاویه ۴۵ درجه از ۷ به ۱ و در زاویه ۲۰ درجه از ۳ به صفر رسیده است. در مجموع به کمک اضافه برش اعمال‌شده انحراف شعاع گوشه از شعاع ایده‌آل به طور متوسط حدود ۷۵ درصد کاهش یافته است.

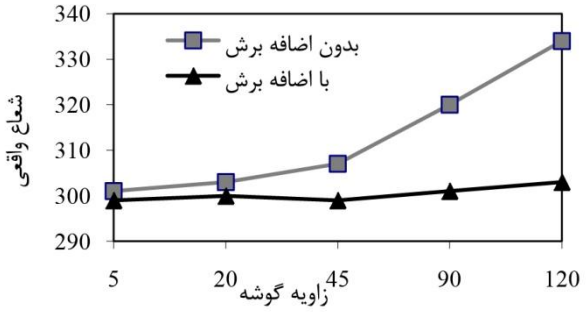
بنابراین اگر در گوشه‌های کوچک- شعاع مقعر یک مسیر دایره‌ای کامل برای سیم در نظر گرفته شود طول قوس پیموده شده توسط سیم تقریبا مستقل از زاویه گوشه می‌شود و تأثیر تغییر زاویه بر روی خطای شعاع گوشه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با اعمال این اضافه برش در گوشه‌های کوچک- شعاع مقعر علاوه بر کاهش خطای شعاع گوشه، کیفیت سطح بهتری نیز حاصل می‌شود. زیرا، در عمل، اضافه برش باعث افزایش یک مرحله پرداخت‌کاری روی این گوشه‌ها می‌شود.



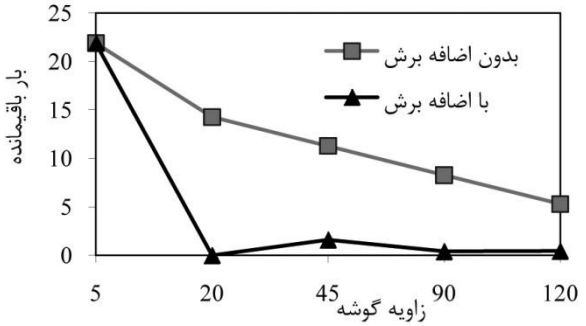
شکل ۱۹ شکل هندسی مورد استفاده در این بخش

جدول ۱۱ اندازه شعاع‌ها و مقادیر y_2^{cr} محاسبه شده برای آنها

استراتژی	θ (درجه)	۵	۲۰	۴۵	۹۰	۱۲۰
بدون اضافه برش	r_a (μm)	۳۰۱	۳۰۳	۳۰۷	۳۲۰	۳۳۴
	y_2^{cr} (μm)	۲۱/۹	۱۴/۲۷	۱۱/۲۹	۸/۲۸	۵/۳
با اضافه برش	r_a (μm)	۲۹۹	۳۰۰	۲۹۹	۳۰۱	۳۰۳
	y_2^{cr} (μm)	۲۱/۹	۰	۱/۶۱	۰/۴۱	۰/۴۶



الف- برای پارامتر r_a



ب- برای پارامتر y_2^{cr}

شکل ۲۰ نمودار مقایسه‌ای برای دو حالت استفاده از اضافه برش و عدم استفاده از آن

۷- نتیجه‌گیری

شناخت تأثیر دو پارامتر فرکانس تخلیه و سرعت پیشروی خشن‌کاری بر بار باقی‌مانده، روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه، نشان می‌دهد که بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند بار باقی‌مانده روی قوس را بیش از ۲۰ درصد افزایش و درنتیجه خطای ماشین‌کاری را کاهش دهد.

مدل هندسی ارائه شده می‌تواند ارتباط میان بار باقی‌مانده، شعاع گوشه و زاویه گوشه را روشن سازد. یک اضافه برش می‌تواند دقت ماشین‌کاری شعاع در گوشه‌های مقعر را تا میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد. در گوشه‌های محدب یا مقعر، همواره، شعاع ایجاد شده بیشتر از شعاع ایده‌آل است.

به طور کلی با کاهش فرکانس و افزایش سرعت پیشروی مقدار بار باقی‌مانده افزایش می‌یابد و تأثیر کنترل چگالی اصابت جرقه روی بار باقی‌مانده مسیر مستقیم بیشتر از بار باقی‌مانده روی قوس است. ماشین‌کاری پایدار و پیوسته بر مقدار بار باقی‌مانده تأثیر می‌گذارد. شعاع واقعی قوس گوشه به کمک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

مقدار بار باقی‌مانده روی آن قوس قابل محاسبه است. شاید دست‌آورد اصلی این تحقیق آن باشد که مرحله‌ی خشن‌کاری عامل اصلی بی‌دقتی‌ها در برش قوس‌ها و انحناها است و به کمک کنترل پارامترهای فرایند نمی‌توان خطای برش قوس‌ها را به طور کامل حذف کرد.

۸- فهرست علایم

A	زمان روشنی پالس (µs)
Adj MS	میانگین مربعات تصحیح شده
Adj SS	مجموع مربعات تصحیح شده
Aj	ولتاژ سروو (ولتاژ گپ) (v)
ANOVA	آنالیز واریانس
C	ظرفیت خازن (µF)
Coef.	ضریب فاکتورهای رگرسیون
DF	درجه آزادی
DOE	طراحی آزمایش‌ها
F	مقدار آماره F
f	فرکانس تخلیه (ثانیه/جرقه)
g	گپ جرقه (µm)
L	فاصله راس زاویه تا سطح مبنا (mm)
M	مد ماشینکاری
MS	میانگین مربعات
of	افست سیم (µm)
P	مقدار احتمال
P	قدرت تخلیه الکتریکی (A)
S	سرعت پیشروی (mm/min)
S	ریشه میانگین مربعات
SS	مجموع مربعات
Seq. SS	مجموع مربعات دنباله‌ای
SE Coef.	خطای استاندارد ضرایب
T	مقدار آماره T
V	ولتاژ مدار باز (v)
y	بار باقی‌مانده (µm)
g_0	گپ جرقه در مرحله خشن‌کاری (µm)
g_1	گپ جرقه در مرحله پرداخت اول (µm)
g_2	گپ جرقه در مرحله پرداخت دوم (µm)
k_0	پهنای ماشینکاری در مرحله خشن‌کاری (µm)
k_{12}	عمق باربرداری مرحله پرداخت اول در برش سه مرحله‌ای (µm)
k_{22}	عمق باربرداری مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای (µm)
L_a	فاصله مرکز قوس واقعی تا سطح مبنا (mm)
L_i	فاصله مرکز قوس ایده‌آل تا سطح مبنا (mm)
of_{02}	افست خشن‌کاری در برش سه مرحله‌ای (µm)
of_{12}	افست پرداخت اول در برش سه مرحله‌ای (µm)
of_{22}	افست پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای (µm)
R_a	فاصله قله قوس واقعی تا سطح مبنا (mm)
R_i	فاصله قله قوس ایده‌آل تا سطح مبنا (mm)
r_a	شعاع واقعی گوشه (µm)
r_i	شعاع ایده‌آل گوشه (µm)
r_w	شعاع سیم (µm)
R^2	ضریب تعیین
$R^2(adj)$	ضریب تعیین تعدیل‌شده
w_b	کشش سیم (N)
w_s	سرعت تغذیه سیم (m/min)
y_{02}	بار باقی‌مانده بعد از مرحله خشن‌کاری در برش سه مرحله‌ای (µm)
y_{12}	بار باقی‌مانده بعد از مرحله پرداخت اول در برش سه مرحله‌ای (µm)
y_{22}	بار باقی‌مانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای (µm)
y_2^{cr}	بار باقی‌مانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای در روی قوس گوشه (µm)
y_2^{st}	بار باقی‌مانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای در روی مسیر مستقیم (µm)
θ	زاویه گوشه (درجه)

۹- مراجع

[1] Kalpakjian, S., Schmid, S. R., *Manufacturing, Engineering and Technology*, 5th Ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2005.

[2] Hsue, W. J., Liao, Y. S., Lu, S. S., "Fundamental Geometry Analysis of Wire Electrical Discharge Machining in Corner Cutting", *Int J. Mach Tools*

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]

[3] Sanchez, J. A., Rodil, J. L., Herrero, A., De Lacalle, L. N. L., Lamikiz, A., "On the Influence of Cutting Speed Limitation on the Accuracy of Wire-EDM Corner-Cutting", *J Mater Process Technol*, Vol. 182(1–3), 2007, pp. 574-579.

[4] Dekeyser, W. L., Snoeys, R., "Geometrical Accuracy of Wire-EDM", *9th Int. Symp. on ElectroMachining (ISEM-9)*, 1989, pp. 226-232, Japan.

[5] Hsue, W. J., Liao, Y. S., Lu, S. S., "A Study of Corner Control Strategy of Wire-EDM Based on Quantitative MRR Analysis", *Int J Elect Machining*, No.4, 1999, pp. 33-39.

[6] Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, M., "Combined Power and Path Control Method to Improve Corner Accuracy of Rough Cuts by WireEDM (1st Report)", *Int J Elect Machining*, Vol. 8, 2003, pp. 27-32.

[7] Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, M., "Combined Power and Path Control Method to Improve Corner Accuracy of Rough Cuts by WireEDM (2nd Report)", *Int J Elect Machining*, Vol. 8, 2003, pp. 33-8.

[8] Sanchez, J. A., De Lacalle, L. N. L., Lamikiz, A., "A Computer Aided System for the Optimization of the Accuracy of the Wire Electro-Discharge Machining Process" *Int J of Comp Integrated Manufact*, Vol. 17(5), 2004, pp. 413-420, DOI:10.1080/09511920310001626590

[9] Mingqi, L., Minghui, L., Guangyao, X., "Study on the Variations of Form and Position of the Wire Electrode in WEDM-HS", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 25, 2005, pp. 929–934, DOI: 10.1007/s00170-003-1915-4

[10] Han, F., Zhang, J., Soichiro, I., "Corner Error Simulation of Rough Cutting in Wire EDM", *Precis Eng*, Vol. 31(4), 2007, 331–336, DOI:10.1016/j.precisioneng.2007.01.005

[11] Han, F., Cheng, G., Feng, Z., Isago, S., "Thermo-Mechanical Analysis and Optimal Tension Control of Micro Wire Electrode", *Int J Mach Tools Manuf*, Vol. 48(7-8), 2008, pp. 922-931.

[12] Dodun, O., Gonçalves-Coelho, A. M., Slătineanu, L., Nagîţ, G., "Using Wire Electrical Discharge Machining for Improved Corner Cutting Accuracy of Thin Parts", *Int J Adv Manuf Technol*, DOI 10.1007/s00170-008-1531-4

[13] ASM Handbook Committee, *ASM Handbook*, Vol. 4th, Heat Treating, 1991.

[14] User Manual ROBOFIL 200, *Charmilles Technologies*, Switzerland, Charmilles Co.,1989.

[15] Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, New York, Wiley, 2001.

[16] Chelladurai, H., Jain, V. K., Vyas, N. S., "Development of a Cutting Tool Condition Monitoring System for High Speed Turning Operation by Vibration and Strain Analysis", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 37(5-6) , 2008, pp. 471-485. DOI 10.1007/s00170-007-0986-z

[17] Pradhan, M. K., Biswas, C. K., "Neuro-Fuzzy and Neural Network-Based Prediction of Various Responses in Electrical Discharge Machining of AISI D2 Steel", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 50(5-8), 2010, pp. 591-610. DOI 10.1007/s00170-010-2531-8

[18] Jain, V. K., Mote, R. G., "On the Temperature and Specific Energy During Electro Discharge Diamond Grinding (EDDG)", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 26(1-2), 2005, pp. 56-67. DOI 10.1007/s00170-003-1983

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.14.8]