

# بررسی علل ناپایداری ماشینکاری کاربرد تنگستن به روش تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup>

رمضانعلی مهدوی نژاد

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

امیر عبدالله

استادیار بخش مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۸/۴/۲۷، تاریخ تصویب ۷۹/۱۰/۲۴)

## چکیده

کامپوزیت کاربرد تنگستن - کبالت از مواد بسیار مهم صنعتی است که از آن در ساخت قالبهای برشی کاربایدی و ابزارهای برشی و قطعات تحت فرسایش خطوط تولید استفاده زیادی می‌شود. برای ماشینکاری این ماده در میان روشهای سنتی ماشینکاری، تنها سنگ زنی پاندولی آنها با استفاده از سنگ سمباده‌های مخصوص و گرانقیمت و با وجود محدودیت در انتخاب پارامترهای ماشینکاری (انتخاب شکلهای ساده قطعه کار و سرعت بر داده برداری پایین) مقدور می‌باشد. در میان روشهای جدید ماشینکاری روش تخلیه الکتریکی بهترین آنهاست، لیکن فرآیند ماشینکاری بویژه با ماشینهای حفره ساز<sup>۲</sup> بسیار ناپایدار بوده و توأم با پالسهای مدار باز، اتصال کوتاه و آرک می‌باشد. این آزمایش نشان می‌دهد که ماشینکاری انواع مختلف کاربرد تنگستن - کبالت، با زمانهای مختلف روشنی پالسهای مدار باز با بیش از ۵۰٪ بالاترین و جرقه‌های آرک و شبه آرک به صورت مساوی و مقدار تقریبی کمتر از ۱۵٪ پایین‌ترین مقادیر مختلف زمان روشنی پالس را دارا می‌باشند. افزایش زمان روشنی پالس ناپایداری فرآیند را در ماشینکاری انواع مختلف کاربرد تنگستن - کبالت افزایش می‌دهد. در اثر افزایش زمان روشنی پالس، بافت سطحی تقریباً در کلیه نمونه‌های کاربرد تنگستن - کبالت درشت تر می‌شود که نشانه ذوب، ملحق شدن و انجماد مجدد حجم زیادتری از ماده روی سطح قطعه کار است. وجود کبالت در تمامی نواحی بافت سطحی ماشینکاری شده نشانه انجماد مجدد کبالت بر روی سطح قطعه کار یا آلیاژ شدن آن با کاربرد تنگستن یا تنگستن است. در اثر حذف کاربرد تنگستن و کبالت از منطقه آرک حفره‌ای جهت جایگزینی و رشد کربن ایجاد شده و نتیجتاً زمینه را برای وقوع پدیده آرک فراهم می‌آورد. این مقاله ضمن بررسی علل ناپایداری در ماشینکاری کاربرد تنگستن، پیشنهاداتی در جهت حذف و یا تعدیل آنها ارائه می‌کند.

## واژه‌های کلیدی: پروسه تولید تنگستن کارباید، ماشینکاری تنگستن کارباید، ناپایداری در EDM

## مقدمه

درصد کاربرد تنگستن کاهش یافته و درصد کبالت زیادتر باشد، سختی آن کم شده و به چقرمگی آن افزوده می‌شود [۲]. برای تهیه بلوکهای کاربرد تنگستن می‌توان از روشهای مختلف پرس داغ<sup>۴</sup>، پرس ایزواستاتیک داغ<sup>۵</sup>، تف‌جوشی<sup>۶</sup> و یا ترکیبی از آنها استفاده کرد [۳ و ۱]. تف‌جوشی کاربیدها نسبت به بلوکهای فلزی سخت است ولی نسبت به بدنه‌های سرامیکی آسانتر است، زیرا دیفیوژیون در آنها راحت‌تر انجام می‌گیرد. جدول (۱) پاره‌ای از خواص انواع مختلف کاربرد تنگستن را نشان می‌دهد [۳]. در میان روشهای سنتی، ماشینکاری کاربرد تنگستن تنها به روش سنگ زنی امکان‌پذیر است و انواع مختلف کاربیدهای سمانته، مخصوصاً در مواردی که کیفیت بالای صافی سطح مد نظر باشد،

کاربید تنگستن جزء کاربیدهای سمانته است که به کاربیدهای فلزی معروفند. تنگستن و کربن عناصر سازنده منوکاربید تنگستن (WC)، دی‌کاربید تنگستن (W<sub>2</sub>C) و پنتاکاربید تنگستن (W<sub>5</sub>C<sub>3</sub>) می‌باشند. از میان سه ترکیب فوق‌الذکر، منوکاربید تنگستن که به اختصار کاربرد تنگستن نامیده می‌شود پایدارتر بوده و اهمیت بیشتری دارد [۱]. در صنعت بیشتر به صورت کامپوزیت کاربرد تنگستن - کبالت<sup>۳</sup> (که به همراه ۳۰-۵۰ کبالت بعنوان چسب نگه دارنده) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده صلبیت بالایی داشته و مدول الاستیسیته آن حدود سه برابر فولاد است. سختی این ماده در بدترین شرایط از فولاد مرغوب بالاتر بوده و این سختی را در دمای بالا بخوبی حفظ می‌کند. هر قدر

جدول ۱: خواص عمومی کاربردهای سمانته [۳].

| Material                                     | Density<br>( $\text{kg m}^{-3}$ ) | Melting<br>temperature<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Vickers<br>hardness<br>at $20^{\circ}\text{C}$ | Heat of<br>formation<br>( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) | Young's<br>modulus<br>(GPa) | Transverse<br>rupture<br>stress<br>(MPa) | Coefficient<br>of thermal<br>expansion<br>( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) | Thermal<br>conductivity<br>( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) | Electrical<br>resistivity<br>( $10^{-8} \Omega \text{m}$ ) |
|--|-----------------------------------|--|--|--|-----------------------------|--|---|--|--|
| TiC  | 4910                              | 3000   | 3000   | -183   | 450                         | 400                                      | 7.7   | 21   | 70   |
| ZrC  | 6560                              | 3400   | 2300   | -197   | 350                         |  | 6.7   | 21   | 40   |
| HfC  | 12670                             | 3900   | 2700   | -230   | 352                         |  | 6.6   | 6  | 40   |
| VC   | 5710                              | 2700   | 2900   | -125   | 422                         |  | 7.2   | 25   | 60   |
| NbC  | 7780                              | 3600   | 2400   | -141   | 338                         |  | 6.7   | 14   | 40   |
| TaC  | 14480                             | 4000   | 1600   | -147   | 285                         |  | 6.3   | 22   | 25   |
| $\text{Cr}_3\text{C}_2$                      | 6680                              | 1800   | 1300   | -94  | 373                         |  | 10.3  |  | 75   |
| $\text{Mo}_3\text{C}$                        | 9180                              | 2500   | 1600   | -49  | 533                         |  | 7.8   | 7  | 70   |
| WC   | 15700                             | 2700   | 2200   | -40  | 696                         | 600                                      | 5.0   | 120  | 22   |
| WC-3 wt%Co                                   | 15250                             |  | 1900   |  | 670                         | 1700                                     | 4.0   | 120  | 20   |
| WC-10 wt%Co                                  | 14600                             |  | 1500   |  | 570                         | 3000                                     | 5.2   | 112  | 16   |
| WC-12 wt%TiC-<br>10 wt%(Ta,<br>Nb)C-10 wt%Co | 11400                             |  | 1450   |  | 510                         | 1900                                     | 6.6   | 40   | 37   |
| (Ti, Mo)C-Ni                                 | 5500                              |  | 1900   |  | 460                         | 1100                                     | 7.5   | 17   | 90   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC                 | 4250                              |  | 2000   |  | 400                         | 750                                      | 4.3   | 17   |  |

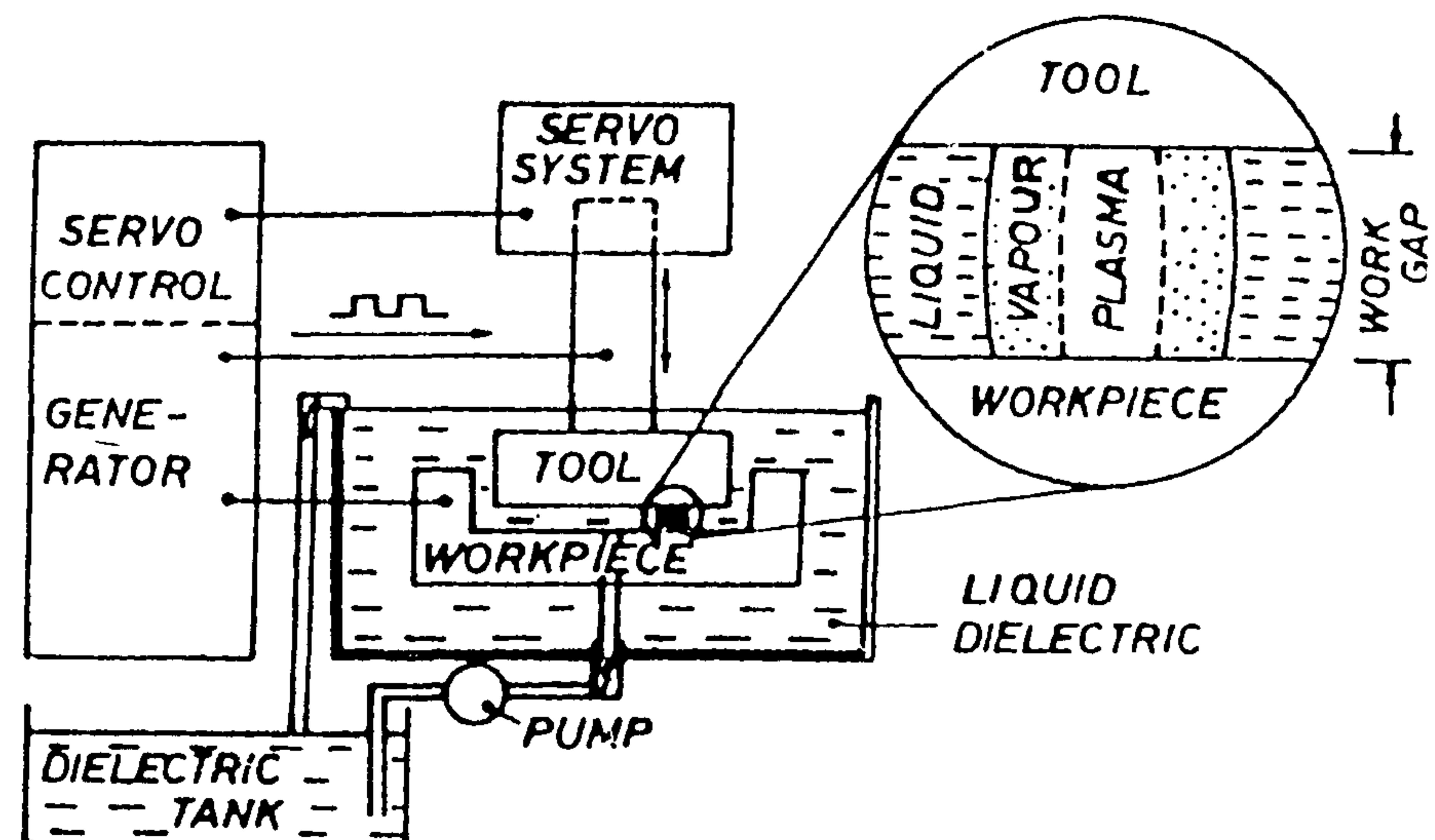
در میان روشهای نوین براده برداری، تنها از ماشینکاری به روش الکتروشیمیایی<sup>۸</sup> و تخلیه الکتریکی برای ماشینکاری آن استفاده شده است. ماشینکاری به روش الکتروشیمیایی بعلاوه ایجاد لایه اکسیدی مقاوم با سرعت کم امکان پذیر است. سرعت ماشینکاری با افزایش میزان کبالت پایین می آید. حداکثر سرعت براده برداری قابل حصول با این روش  $0.237 \text{ mm}^3/\text{sec}$  با صافی سطح  $1/2 \mu\text{m}$  در مقیاس Ra با توجه به ولتاژ حداکثر (24V) و شدت جریان  $11 \text{ A/m}^2$  می باشد [۴].

در سالهای اخیر بر روی ماشینکاری انواع مختلف کاربرد تنگستن به روش EDM کار شده است. از جمله یک گروه هفت نفره از کمیته منتخب CIRP<sup>۹</sup> در سال ۱۹۷۸ بر روی ماشینکاری انواع مختلف کاربردهای سمانته به روش EDM تحقیق نموده و وجود ترکهای سطحی را گزارش نمودند [۷]. اگر چه کارهای وسیعی در زمینه ماشینکاری کاربرد تنگستن - کبالت انجام شده ولی در هیچیک از آنها مسئله علل ناپایداری فرآیند ماشینکاری مطرح و تعقیب نشده است. با توجه به توانایی EDM در مقایسه با سایر روشها، این روش جایگاه ویژه ای در ماشینکاری کاربردهای سمانته (از جمله کاربرد تنگستن) دارد.

### روش آزمایش

EDM یک روش ماشینکاری غیرسنتی است. در این روش بین دو قطعه به نامهای ابزار و قطعه کار که در فاصله نزدیکی از هم

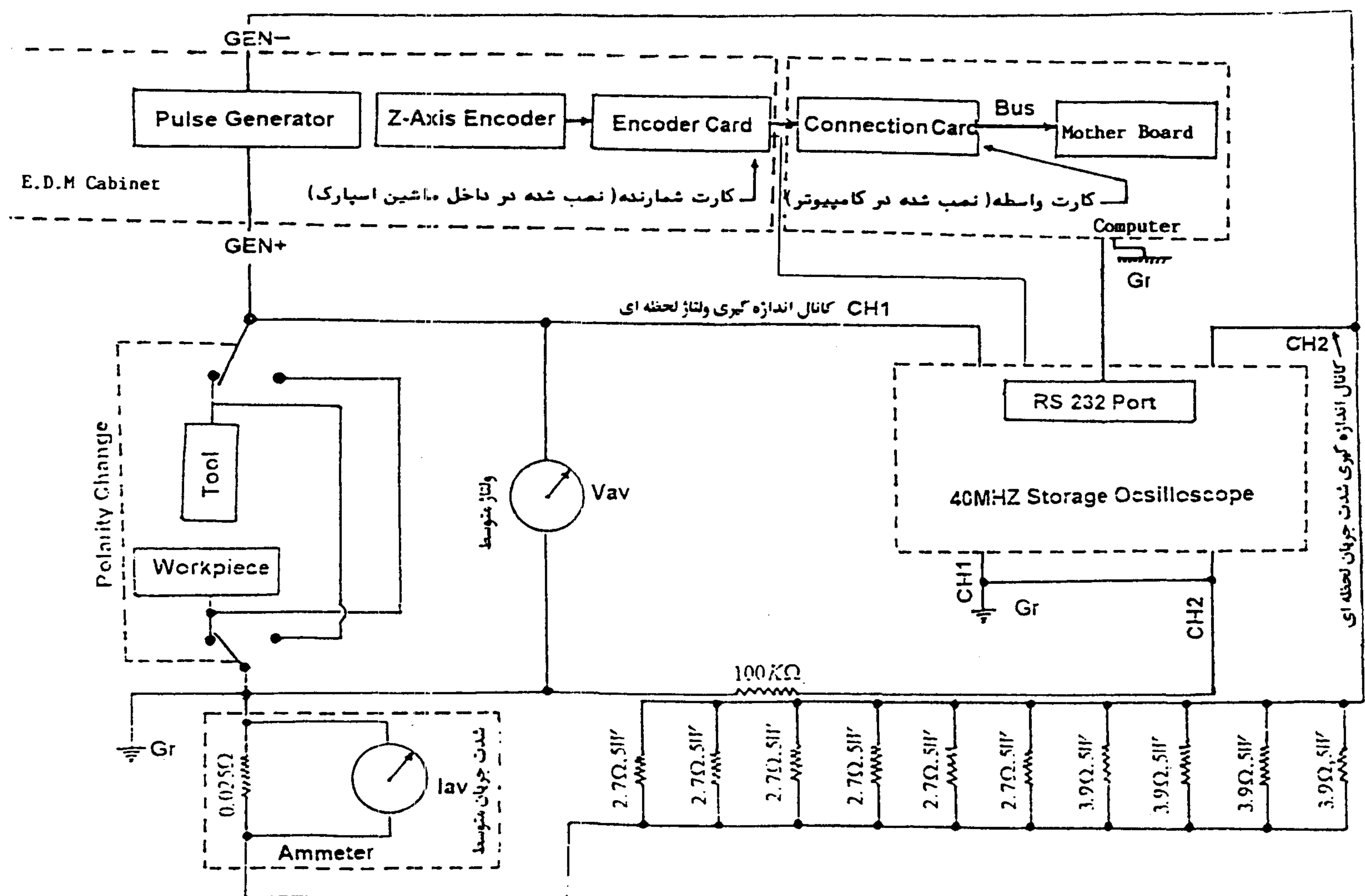
سنگ زنی می شوند [۲]. حرارت موضعی حاصل از ماشینکاری و وجود دو فاز مختلف کاربرد تنگستن و کبالت باعث ایجاد ترک شده و لذا هم به جهت حصول به یک کیفیت سطحی مطلوب و هم حذف ترکهای حاصل، مرحله پرداخت نهایی لازم و اجتناب ناپذیر است. گرد تراشی این ماده با استفاده از ابزار نیتريدبر<sup>۷</sup> با سرعت برشی  $20-30 \text{ m/min}$ ، تغذیه  $0.2-0.25 \text{ mm/rev}$  و عمق برشی  $0.1-0.5 \text{ mm}$  امکان پذیر است [۲]. فرزکاری کاربرد تنگستن توسط ابزارهای الماسه با سرعت برشی  $4-6 \text{ m/min}$  و عمق برش  $0.2-0.4 \text{ mm}$  مناسب است [۲]. شرایط سنگ زنی آن با توجه به انواع مختلف ماشینهای سنگ، روشهای متفاوت سنگ زنی و چرخهای مختلف سنگ متنوع است.



شکل ۱: شمای کلی ماشینکاری به روش E.D.M [۵].

برداری به روش EDM ترمودینامیکی است که با ایجاد چاله مذاب و پدیده جوشش حجمی<sup>۱۰</sup> همراه است. از میان پالسهای متعدد در EDM، چهار نوع آنها یعنی جرقه عادی، جرقه آرک، پالس اتصال کوتاه و پالس مدار باز کاملاً متمایز هستند [۶]. مواد و وسایل مورد آزمایش عبارتند از:

قرار دارند و فضای بین آنها را سیال عایق جریان الکتریکی پر کرده است، در نزدیکترین برجستگیهای زبری، توسط ولتاژ منقطع جرقه‌های منقطع ایجاد می‌شود (شکل ۱) و در هر جرقه قسمت کوچکی از سطح قطعه کار کنده شده و در نهایت مادگی شکل پیشانی ابزار در قطعه کار بوجود می‌آید. مکانیزم غالب در براده



شکل ۲: شمای کلی نحوه ارتباط و اتصال دستگاهها و لوازم مورد استفاده در آزمایشها.

خاصی وجود ندارد و تنها دلیل، دسترسی بهتر این چهار نوع ماده در داخل کشور بوده است. از آنجا که تعداد آنها در مقایسه با حجم آزمایشهای لازم بسیار کم می‌باشد لذا از محملهای مسی که دارای هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی هستند، استفاده شده است. با توجه به محدودیت مواد مورد آزمایش و نیز اخذ اطلاعات آماری کافی و بهینه، از هر نمونه چهار آزمایش و جمعاً بیست آزمایش انجام شده و به ازاء هر آزمایش صد فایل اطلاعاتی و مجموعاً دو هزار فایل تهیه و آنالیز شده است.

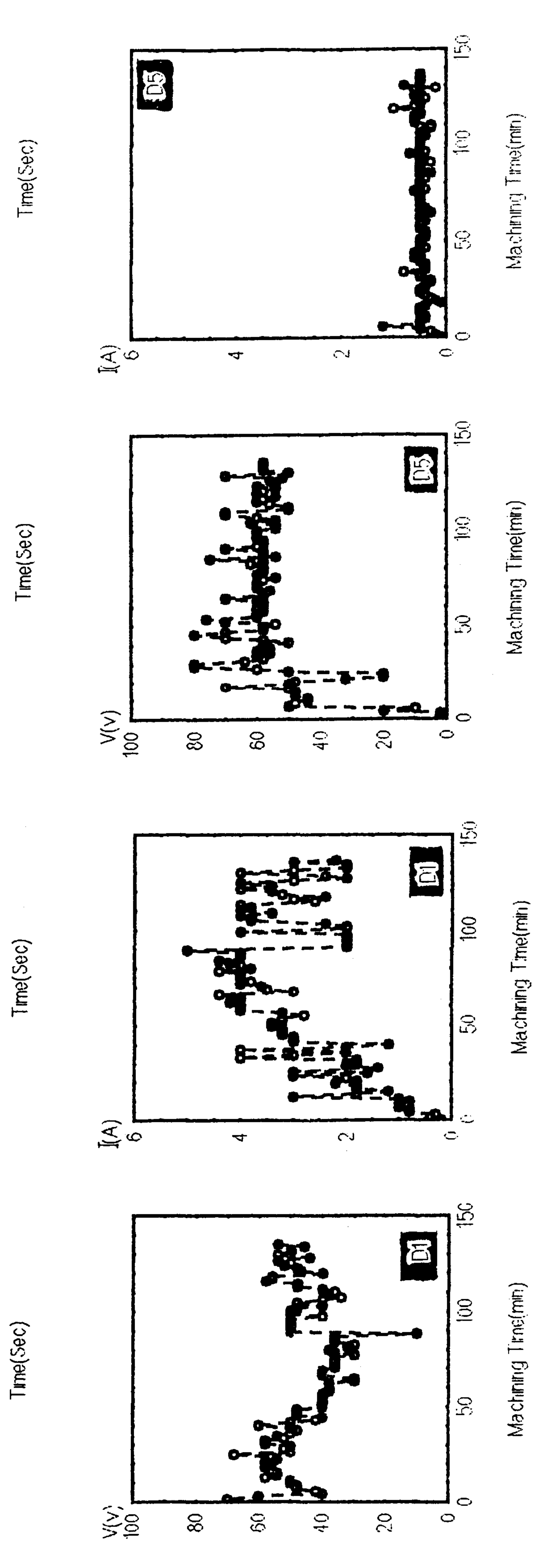
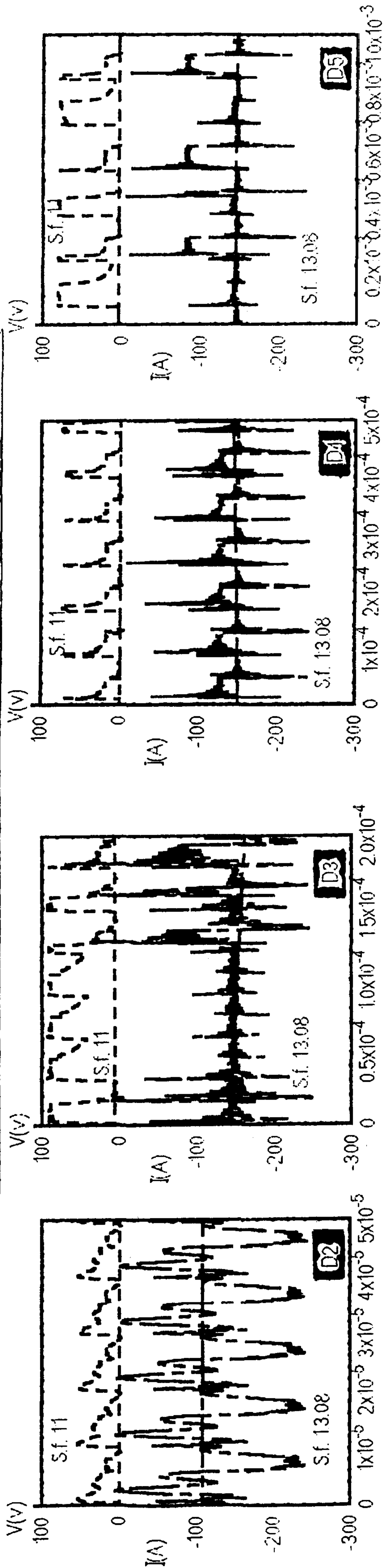
ب - ابزار: از مفتولهای مسی به قطر  $\varphi_{10}$  و  $\varphi_{11}$  و  $\varphi_{12}$  که به طول ۵۵mm برش خورده و کف تراشی شدند. چون مسئله هادی بردن الکترودها در ماشینکاری به روش EDM اهمیت بسیاری دارد، بنابراین از الکتروده مس که دارای چنین ویژگی می‌باشد و ارزان و فراوان نیز هست، استفاده شده است.

### ۱- مواد

الف - قطعه کار: چهار نمونه کاربرد تنگستن به قطرهای  $\varphi_{10}$  (WC-%۶Co)،  $\varphi_{11}$  دو نمونه WC/TaC-%۶Co و  $\varphi_{12}$  (WC-%۶Co) به ضخامت ۵ میلی متر که توسط وایرکات برش خورده و بر روی مفتولهای مسی به همین قطر و طول ۵۵ میلی متر بعنوان محمل توسط چسب نقره که هادی خوب الکتریسیته و حرارت است، چسبانده شده است. این چهار نمونه به ترتیب با حروف A، B، C و D نمایش داده شده است. عکسهای میکروسکوپی توزیع کبالت و تنگستن در این نمونه‌ها از همین حروف استفاده شده است. بعنوان مثال A-W و A-Co تصاویر ترزیع تنگستن و کبالت را در نمونه A نشان می‌دهند.

در مورد انتخاب چهار نوع مشخص شده کاربرد تنگستن دلیل

Workpiece Material : WC/10%Co, Dia. 1mm  
 Tool Electrode : Cu  
 Electrode Polarity : Positive  
 Dielectric : Paraffin  
 No. Of Transistors : 6  
 Open Circuit Voltage : 120V  
 Pulse Time=Pause Time:  
 D1:1Micro.Sec  
 D2:5Micro.Sec  
 D3:15Micro.Sec  
 D4:40Micro.Sec  
 D5:80Micro.Sec



شکل ۳ - ب : منحنی تغییرات ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای برحسب زمان برای تنگستن کار باید با شش ترانزیستور در مدار و برای چهار زمان روشنی پالس مختلف.

شکل ۳ - الف : منحنی تغییرات ولتاژ و شدت جریان متوسط لحظه‌ای برحسب زمان ماشینکاری برای تنگستن کار باید با شش ترانزیستور در مدار و دو زمان روشنی پالس مختلف.

بین دو الکتروود:

ولتاژ متوسط لحظه‌ای بین ابزار و قطعه کار و شدت جریان متوسط لحظه‌ای از روی مولتی مترهای مربوطه به دفعات قرائت و ثبت شده‌اند و در نهایت منحنی آنها بر حسب زمان به صورت جداگانه رسم شده است (برای نمونه شکل ۳ - الف)

ب - رسم منحنیهای ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط نسبت به زمان روشنی پالس:

از آنجا که بعضی از نقاط منحنیهای ولتاژ و شدت جریان متوسط لحظه‌ای نسبت به زمان پراکندگی زیادی دارند متوسط گیری برای هر آزمایش از نتایجی صورت پذیرفته است که در محدوده  $\pm 3\sigma$  قرار دارند:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (1)$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

n: تعداد کل نقاط آزمایش

$$V_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} V_i}{m_1} \quad (3)$$

$$I_{av} = \frac{\sum_{j=1}^{m_2} I_j}{m_2} \quad (4)$$

که در آن  $m_1$  و  $m_2$  به ترتیب نقاط باقیمانده از ولتاژ و شدت جریان متوسط لحظه‌ای پس از حذف نقاط خارج از  $\pm 3\sigma$  است. پارامترهای  $\bar{x}$ ،  $\sigma$ ،  $V_{av}$  و  $I_{av}$  به ترتیب مقدار اندازه گیری شده، متوسط مقادیر، انحراف از معیار، ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط می‌باشند.

شکل‌های (۴) و (۵) منحنیهای ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط و نیز منحنیهای پراکندگیهای حول متوسط رانست به زمان روشنی پالس نشان می‌دهند.

ج - رسم منحنیهای سرعت باربرداری و فرسایش نسبی ابزار بر حسب زمان روشنی پالس:

با توزین جرم قطعه کار قبل و بعد از هر آزمایش، میزان جرم برداشته شده ( $\Delta m$ ) بدست می‌آید که از تقسیم نمودن آن بر مقدار چگالی کاربرد تنگستن حجم مربوطه محاسبه شده و از تقسیم این حجم بر زمان ماشینکاری، سرعت باربرداری در هر

## ۲ - وسایل مورد استفاده در آزمایشها

- ماشین اسپارک: Deckel-CNC، مدل ۲۰ DE مجهز به سیستم آیزوفرکانس باولتاژهای مدار باز اسمی ۱۲۰/۱۵۰/۱۸۰V، سیستم تنظیم و کنترل گپ ماشینکاری و سیستم تنظیم پارامتر جلوگیری از آرک و اتصال کوتاه. این سیستم قادر است زمان روشنی  $1-30 \mu s$ ، زمان خاموشی پالس  $50-1 \mu s$  و شدت جریان جرقه  $45A-3/5$  را در سیزده انتخاب جریان تولید نماید [۸].

- اسپیسکوپ حافظه دار ۴۰MHZ دو کاناله، مارک Hung Chang، مدل ۵۸۰۴، دارای قلمرو ۴۰۰۷ و کوچکترین قسمت بندی  $5v/div - 5mv/div$ .

- مولتی متر عقربه‌ای - دیجیتالی، مارک Hung Chang، دارای قلمرو  $1000v-200mv$  و کوچکترین قسمت بندی  $1v-10 \mu v$  برای اندازه گیری ولتاژ متوسط بین ابزار و قطعه کار.

- مولتی متر عقربه‌ای، مارک Tandy مدل Micronta، دارای قلمرو  $10A$  و کوچکترین قسمت بندی  $5 \mu A$  برای اندازه گیری شدت جریان متوسط ماشینکاری.

- ترازوی دیجیتالی، مدل Kern S۲۰۰۰، با قلمرو  $200gr-1000gr$  و کوچکترین تقسیم بندی  $0.0001gr$ .

- میکروسکوپ الکترونی SEM، مدل Cambridge با بزرگنمایی  $X300000$ .

- کرومومتر

## شرایط آزمایشها

- دی الکتریک: نفت سفید با ۱۵٪ روغن ترانس

- پلاریته ابزار: مثبت

- ولتاژ مدار باز اسمی: ۱۲۰V

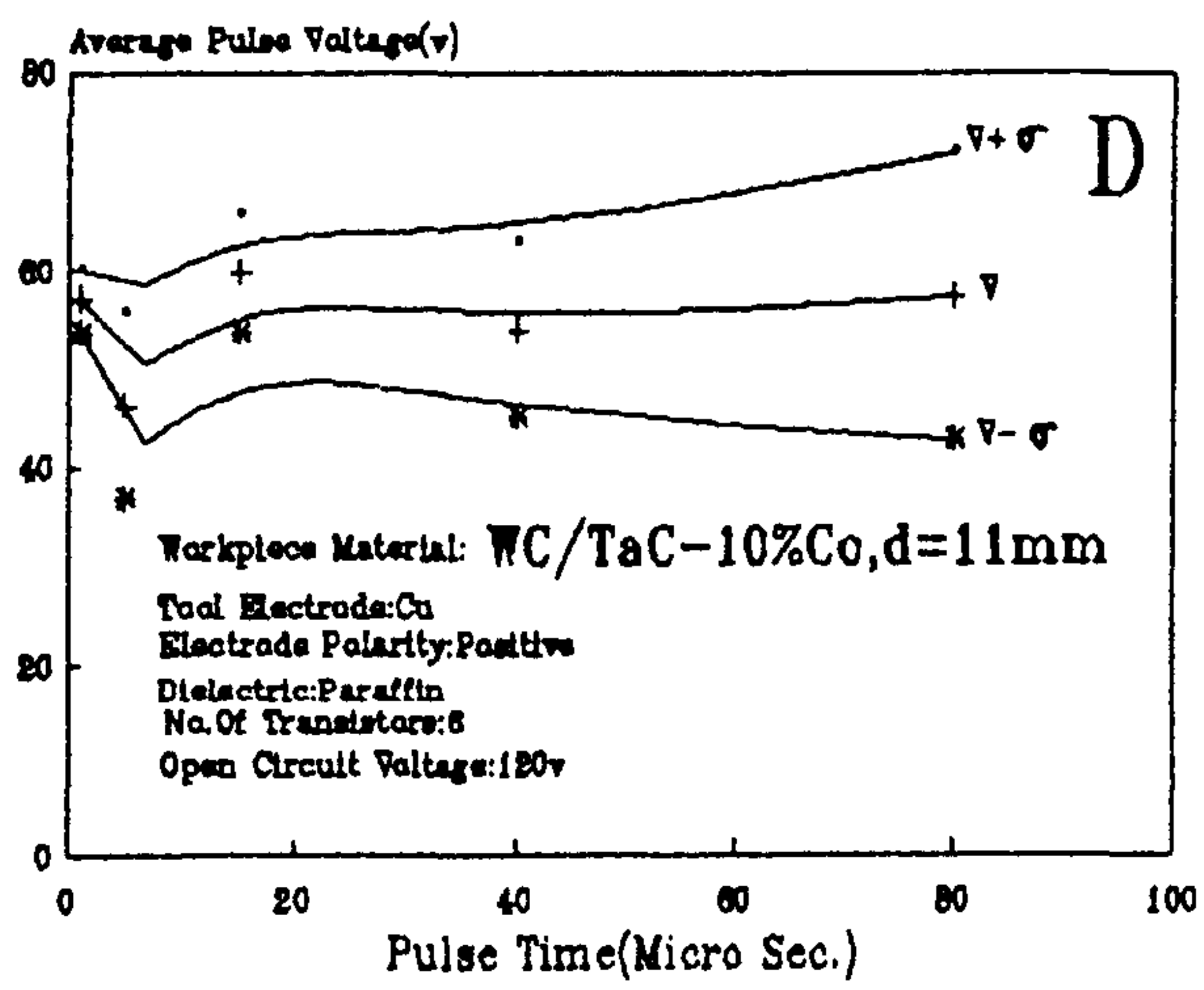
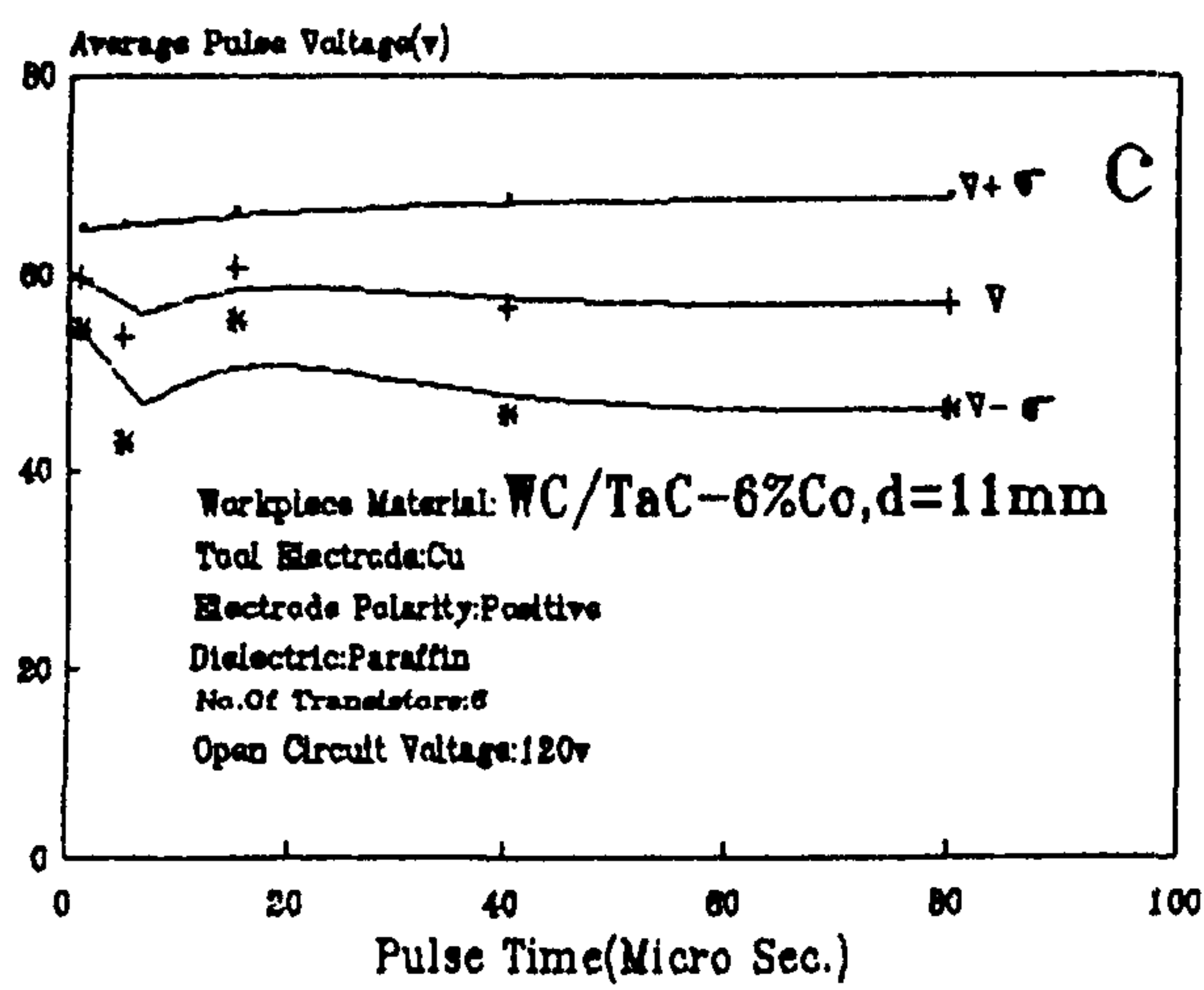
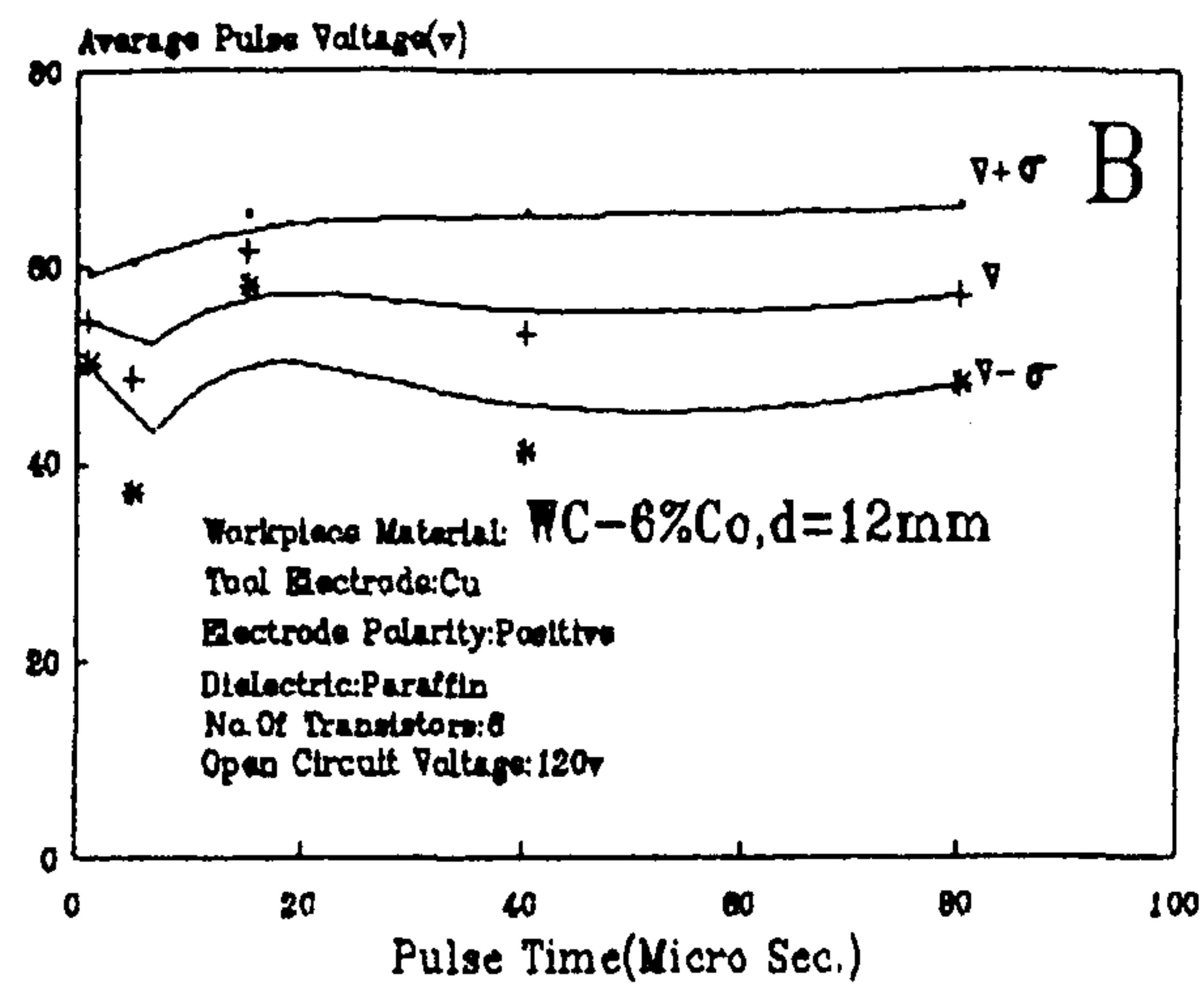
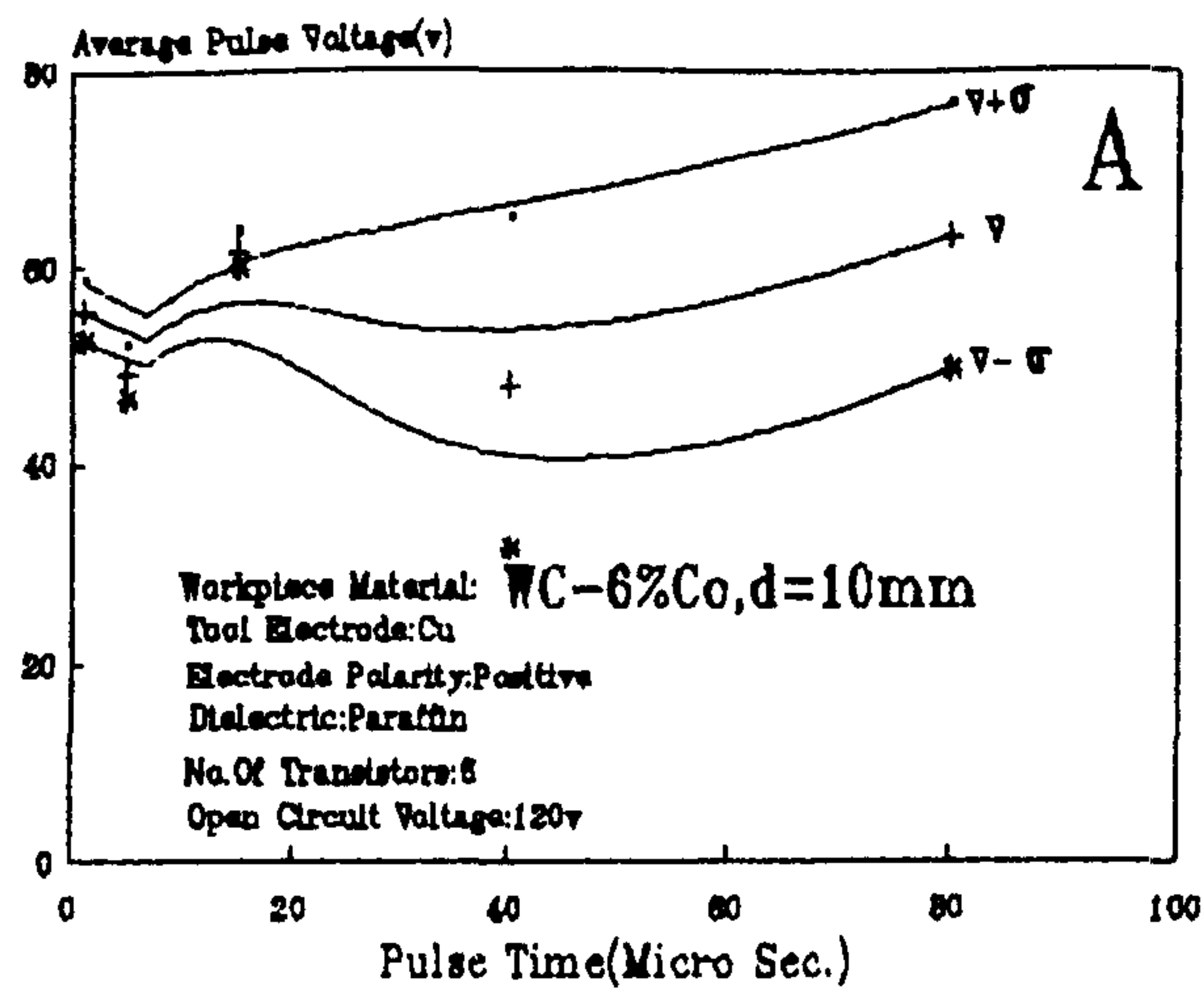
- ولتاژ مدار باز واقعی: ۱۲۸V

- تعداد ترانزیستور در مدار (شدت جریان تنظیمی): ۶ عدد

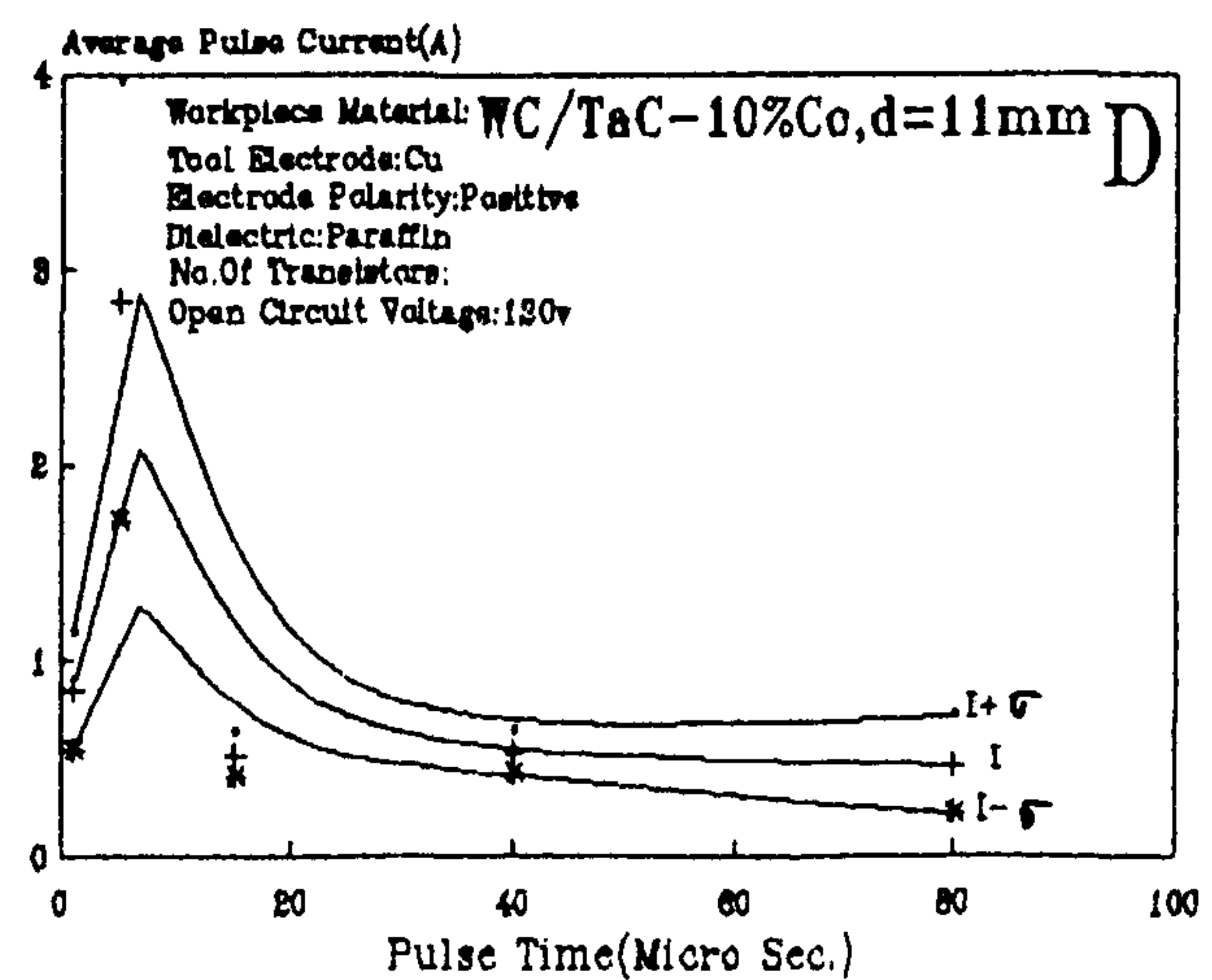
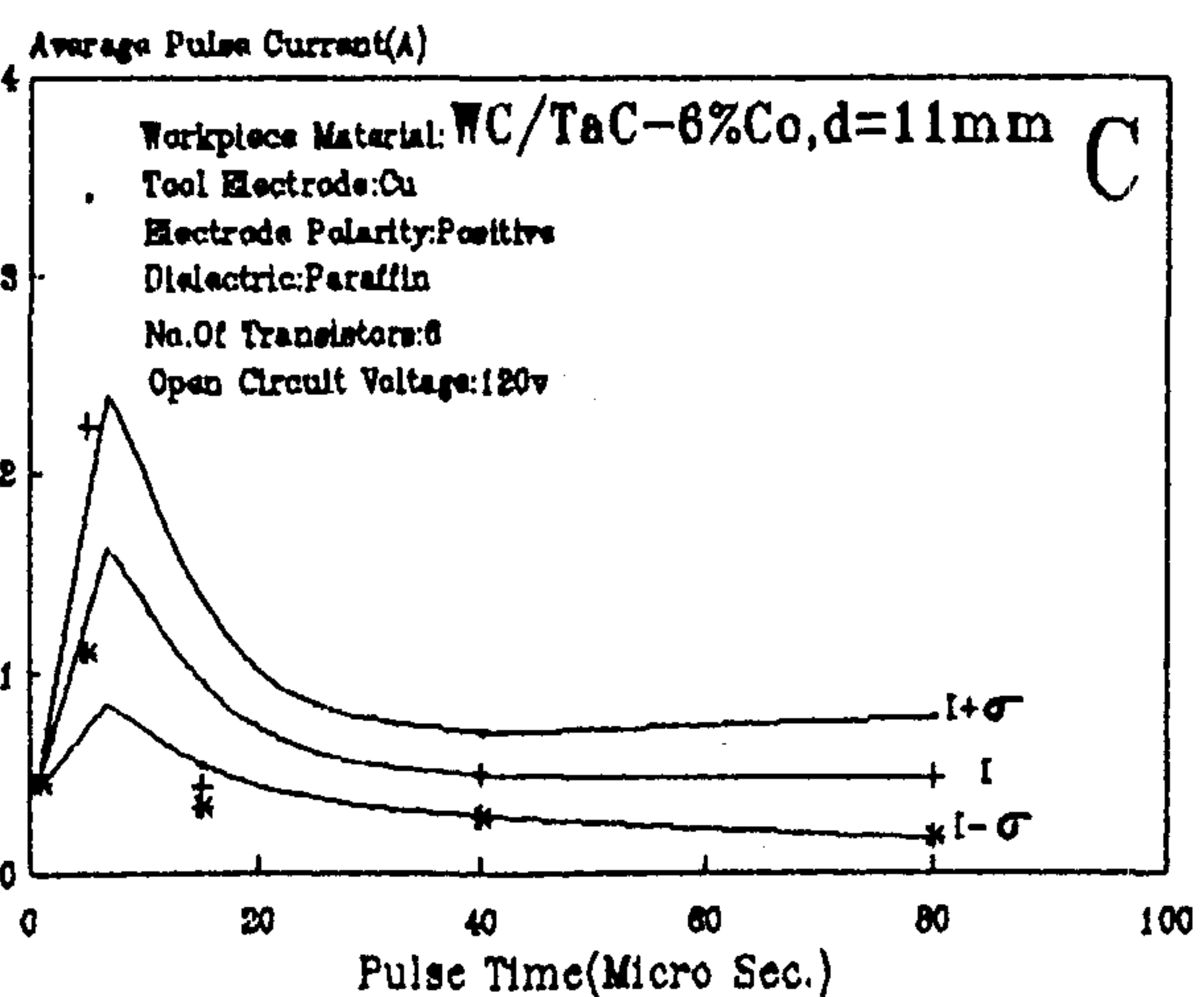
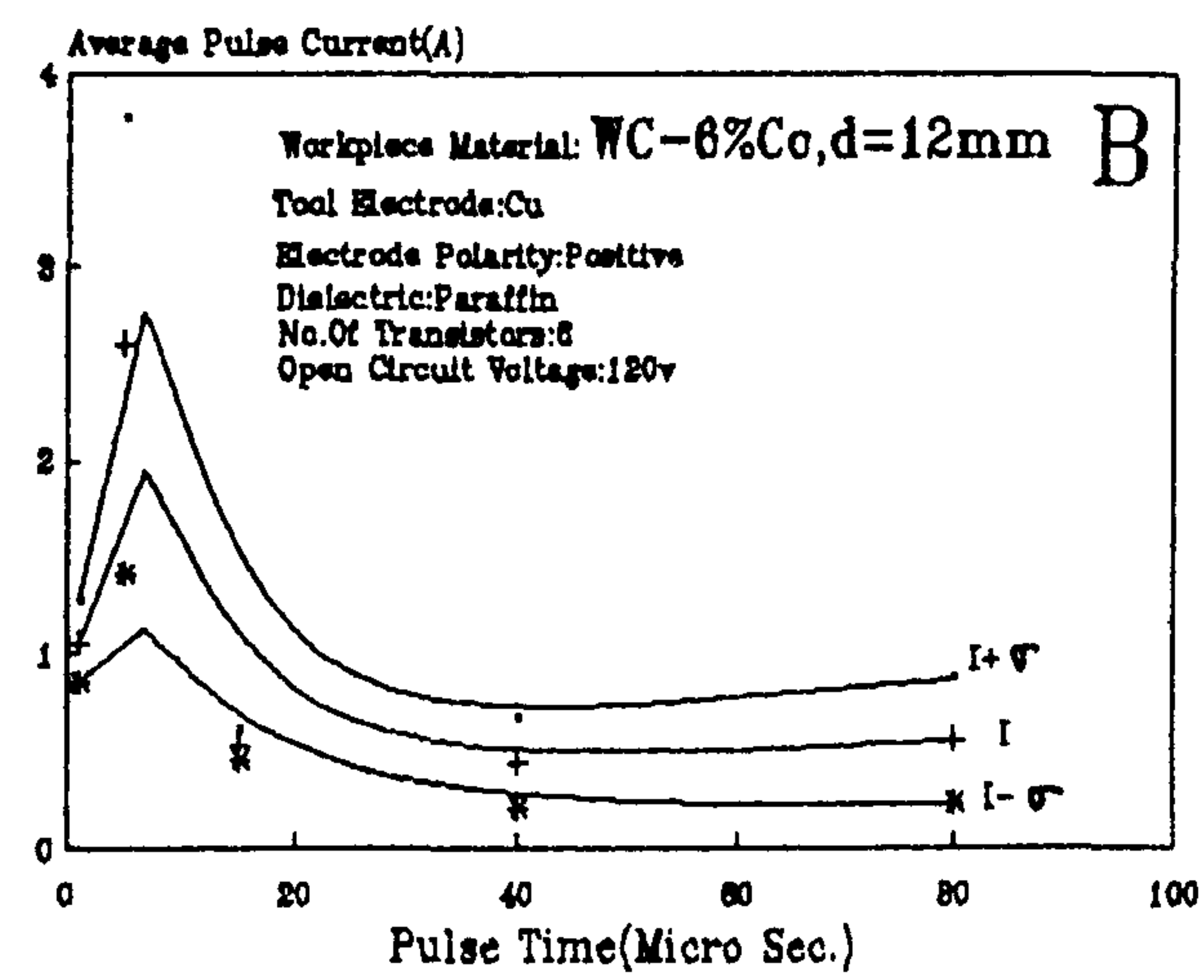
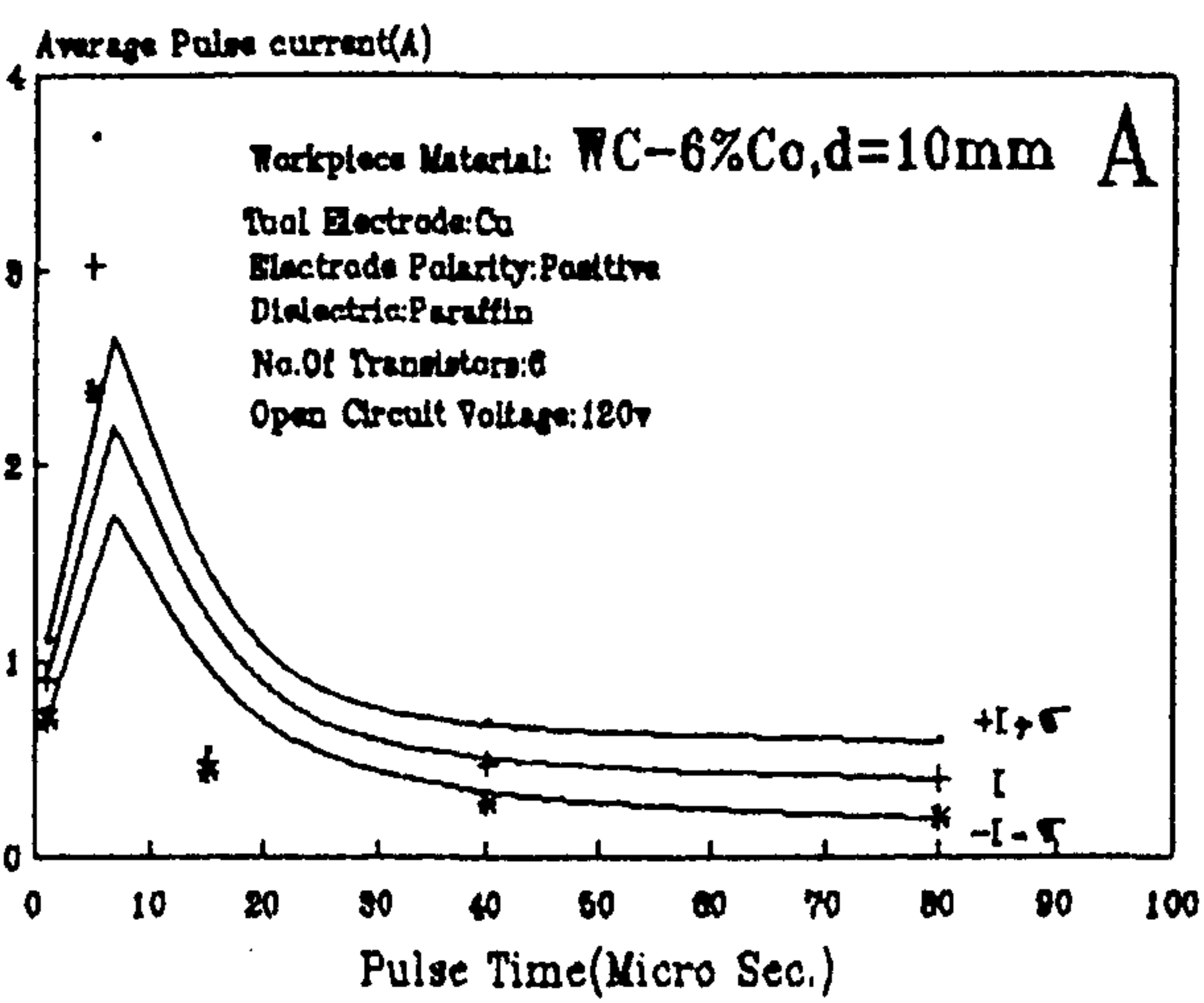
- زمان روشنی و خاموشی پالس:  $80 \mu s$  و  $40$  و  $15$  و  $5$  و  $T_0=T_i=1$  از مایع عایق کاملاً تمیز و با دمای  $20^\circ C$  استفاده شده است. برای این منظور در ابتدای هر آزمایش به مدت پانزده دقیقه مایع عایق بدون ماشینکاری پمپ و جریان داشته است. پس از اتمام هر آزمایش ابزار و قطعه کار و نیز وان مایع توسط الکل کاملاً تمیز شده‌اند.

## پارامترهای اندازه گیری شده

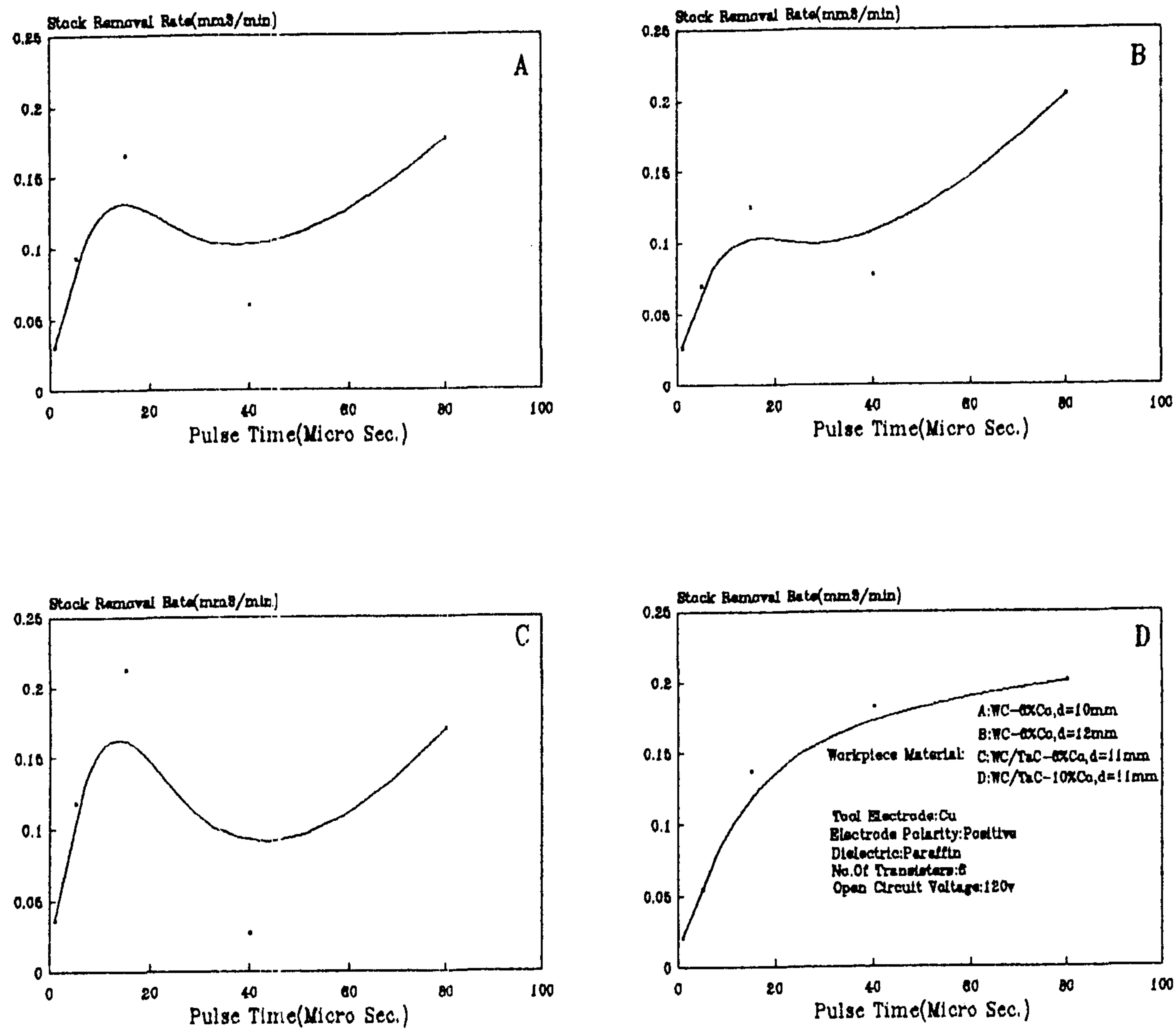
الف - اندازه گیری ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط لحظه‌ای



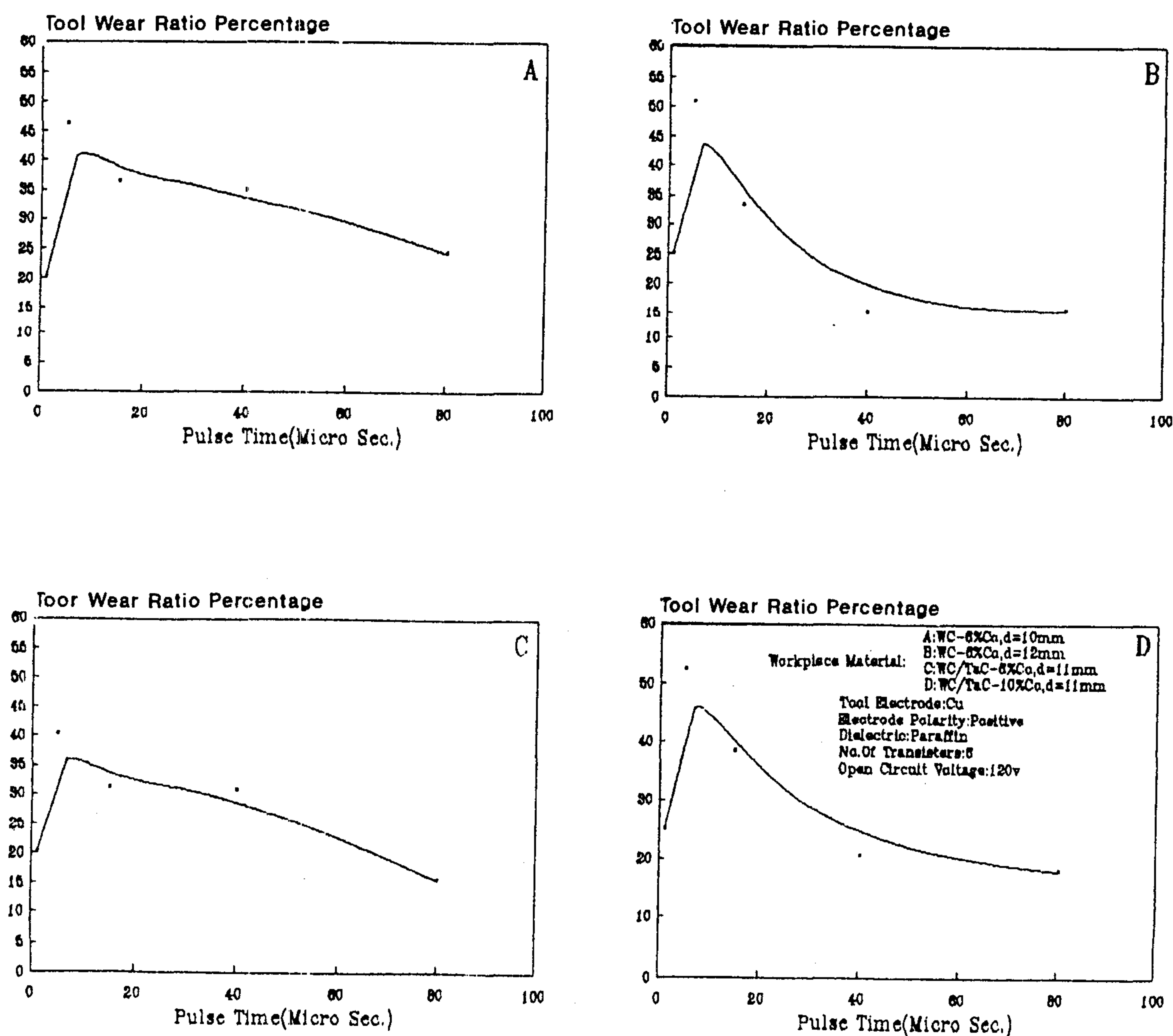
شکل ۴: منحنی تغییرات ولتاژ متوسط برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری انواع مختلف تنگستن کار باید.



شکل ۵: منحنی تغییرات شدت جریان متوسط برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری انواع مختلف تنگستن کار باید.



شکل ۶: منحنی تغییرات سرعت براده برداری برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری انواع مختلف تنگستن کارباید.



شکل ۷: منحنی تغییرات فرسایش نسبی ابزار برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری انواع مختلف تنگستن کارباید.

دانه‌های تنگستن کاربرد را به یکدیگر مرتبط می‌کند نه تنها دیگر به صورت یک چسب عمل نمی‌کند بلکه دانه‌های کاربرد تنگستن در مرز مشترک خود با کبالت تحت نیروهای کششی قرار می‌گیرند [۷]. در اثر انرژی بالای جرقه، در مناطقی که کبالت تخلیه شده، تعدادی از دانه‌های کاربرد تنگستن در اثر ذوب و انجماد مجدد بهم ملحق شده و بعضی در محل محکم نشست نموده و بعضی آزاد می‌شوند و در فرآیند ناپایداری ایجاد می‌کنند. شخصی به نام آجیترون<sup>۱۱</sup> با قراردادن یک خازن الکتریکی به موازات ابزار و قطعه کار و ساختن مدار هایبرید<sup>۱۲</sup>، انرژی جرقه را متمرکز و از انبساط و گسترش بیش از حد کانال پلاسما جلوگیری نمود. در حقیقت با تمرکز انرژی روی دانه‌های کاربرد تنگستن توانست تا حدودی از ناپایداری فرآیند بکاهد [۷].

واگرایی نوسانات ولتاژ و شدت جریان متوسط در اثر افزایش زمان روشنی پالس برای انواع مختلف کاربرد تنگستن، تقریباً به یک مقدار وجود دارد (شکل‌های ۴ و ۵). متوسط منحنیهای جریان و ولتاژ چهارنوع کاربرد تنگستن در تمام زمانهای روشنی پالس تقریباً برهم منطبق هستند.

اگر از نقاط بدست آمده برای زمان روشنی پالس یک میکروثانیه که در آن ناپایداری به شدت زیاد است، صرف نظر شود، شدت جریان متوسط با افزایش زمان روشنی پالس، کاهش می‌یابد (شکل ۵). در مورد نمونه D، با افزایش زمانهای روشنی پالس، افزایش سرعت باربرداری ملاحظه می‌شود. مقدار سرعت باربرداری برای جنسهای مختلف کاربرد تنگستن بهم نزدیک می‌باشد (شکل ۶). اگر از نقاط بدست آمده برای زمان روشنی پالس یک میکروثانیه صرف نظر شود، فرسایش نسبی ابزار نسبت به زمان روشنی پالس نزولی است و برای چهار نوع مختلف کاربرد تنگستن تقریباً یکسان است (شکل ۷). به جزء نمونه D، در سایر نمونه‌ها، در یک میکروثانیه زمان روشنی پالس، آشفته‌گیهای زیادی در منحنیهای ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای ملاحظه می‌گردد. در حالی که در نمونه D، پریودهای پالس کاملاً قابل تفکیک می‌باشد (شکل ۳-ب). قابل توجه است که نمونه D دارای ۱۰٪ کبالت و مقداری نتالم کارباید می‌باشد. ولی سایر نمونه‌ها ۶٪ کبالت دارند. البته لازم به ذکر است که معمولاً مدارات الکترونیکی ژنراتور و سیستم کنترل فاصله دو الکتروود در مرز توانایی خویش ( $T_i = T_0 = 1\mu s$ )، به خوبی عمل نمی‌نماید و نابسامانی شکل پالسهای ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای در یک میکروثانیه در نمونه‌های A تا C می‌تواند ناشی از این پدیده باشد [۹]. در هر چهار نمونه با افزایش زمان روشنی پالس،

آزمایش بدست می‌آید (شکل ۶).

با توزین ابزار قبل و بعد از ماشینکاری و محاسبه تغییر حجم آن و سپس تقسیم آن بر تغییر حجم قطعه کار می‌توان فرسایش نسبی ابزار را بدست آورد (شکل ۷).

د- استخراج درصد ولتاژ مدار باز، جرقه عادی، جرقه غیر عادی آرک و نزدیک به آرک و رسم منحنی آنها:

در پالس مدار باز ولتاژ در طول زمان پالس بالا است و شدت جریان صفر است. در جرقه عادی زمان تأخیر جرقه طولانی وجود دارد. در حالت وقوع جرقه شبه آرک زمان تأخیر جرقه نزدیک به صفر است و در جرقه غیر عادی آرک زمان تأخیر جرقه صفر است.

با توجه به منحنیهای بدست آمده ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای توسط اسیلوسکوپ (نمونه شکل ۳-ب) و ذخیره آنها در حافظه کامپیوتر و سپس آنالیز چشمی آنها، درصد هر یک از پالسهای چهارگانه در یک آزمایش مشخص و منحنی مربوط به تغییرات درصد این پالسها بر حسب زمان روشنی پالس رسم شده است (شکل ۸).

اگر در یک آزمایش n صفحه تصویر از اسیلوسکوپ ضبط شده و در هر صفحه تصویر m پریود وجود داشته باشد بنابراین جمعاً  $m \times n$  پریود ضبط شده است. حال اگر تعداد جرقه‌های عادی، آرک، نزدیک به آرک و پالسهای مدار باز به ترتیب a, b, c باشند در نتیجه می‌شود:

$$\text{درصد جرقه عادی} = \frac{a}{m \times n} \times 100$$

$$\text{درصد جرقه آرک} = \frac{b}{m \times n} \times 100$$

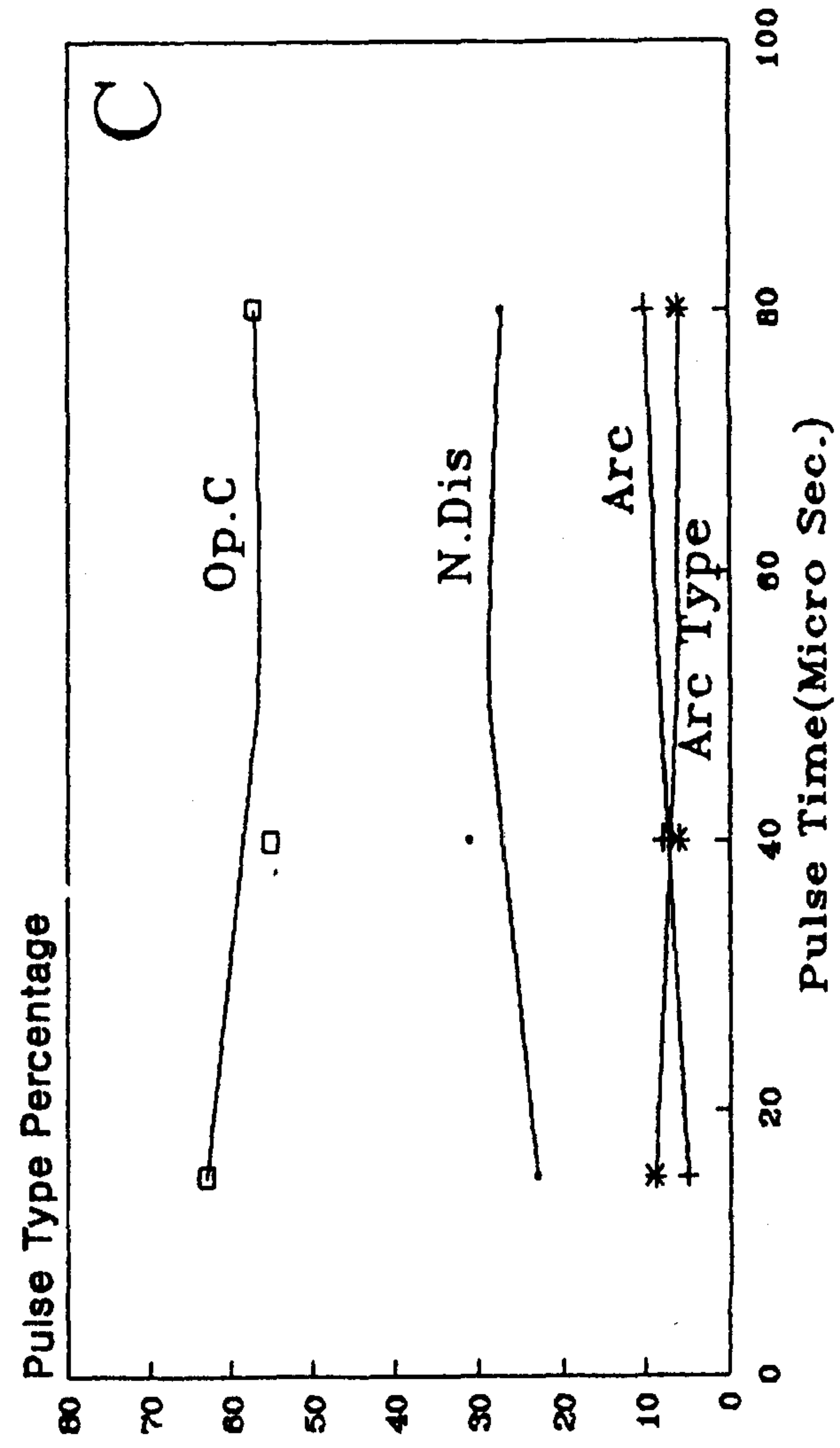
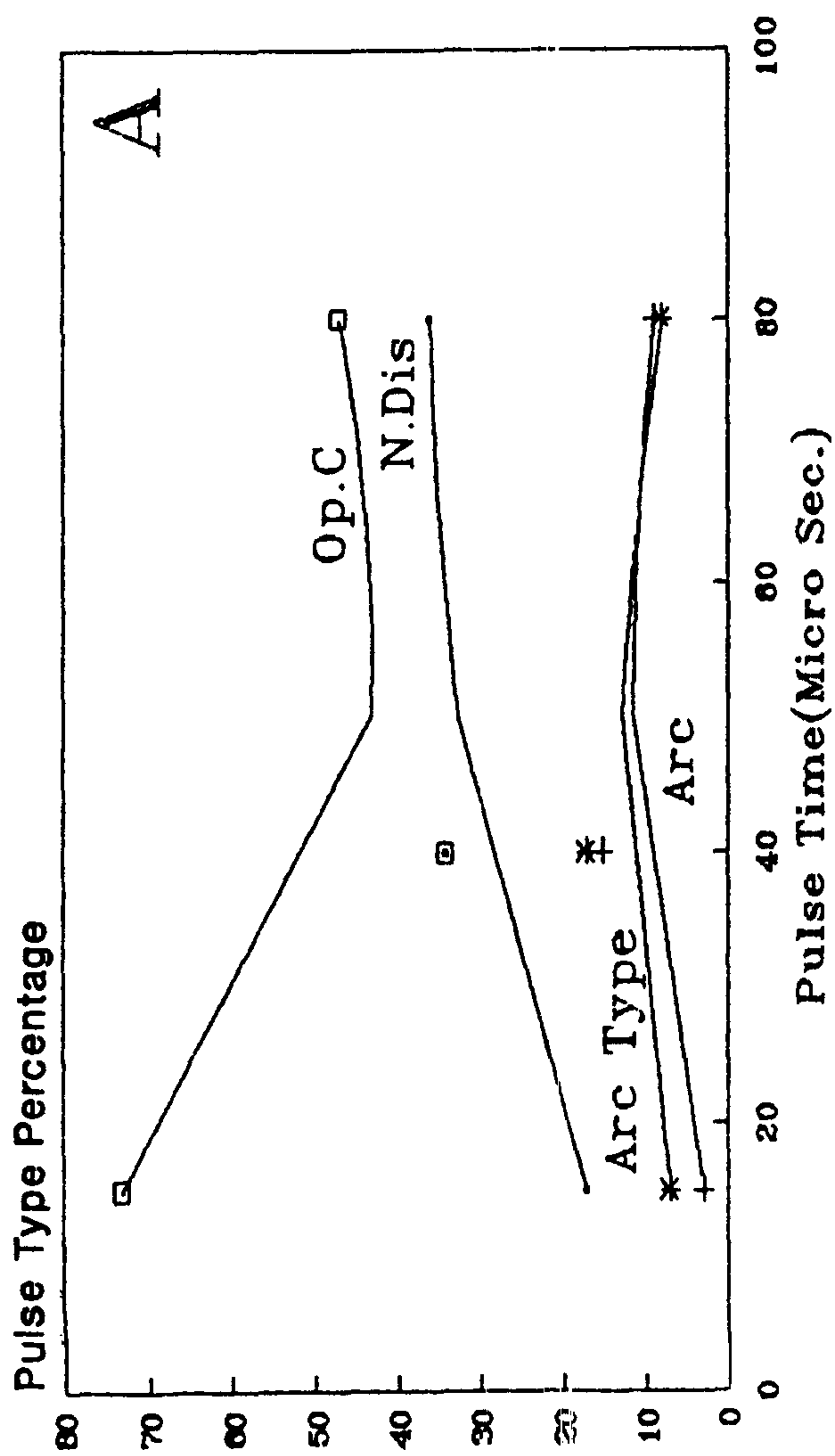
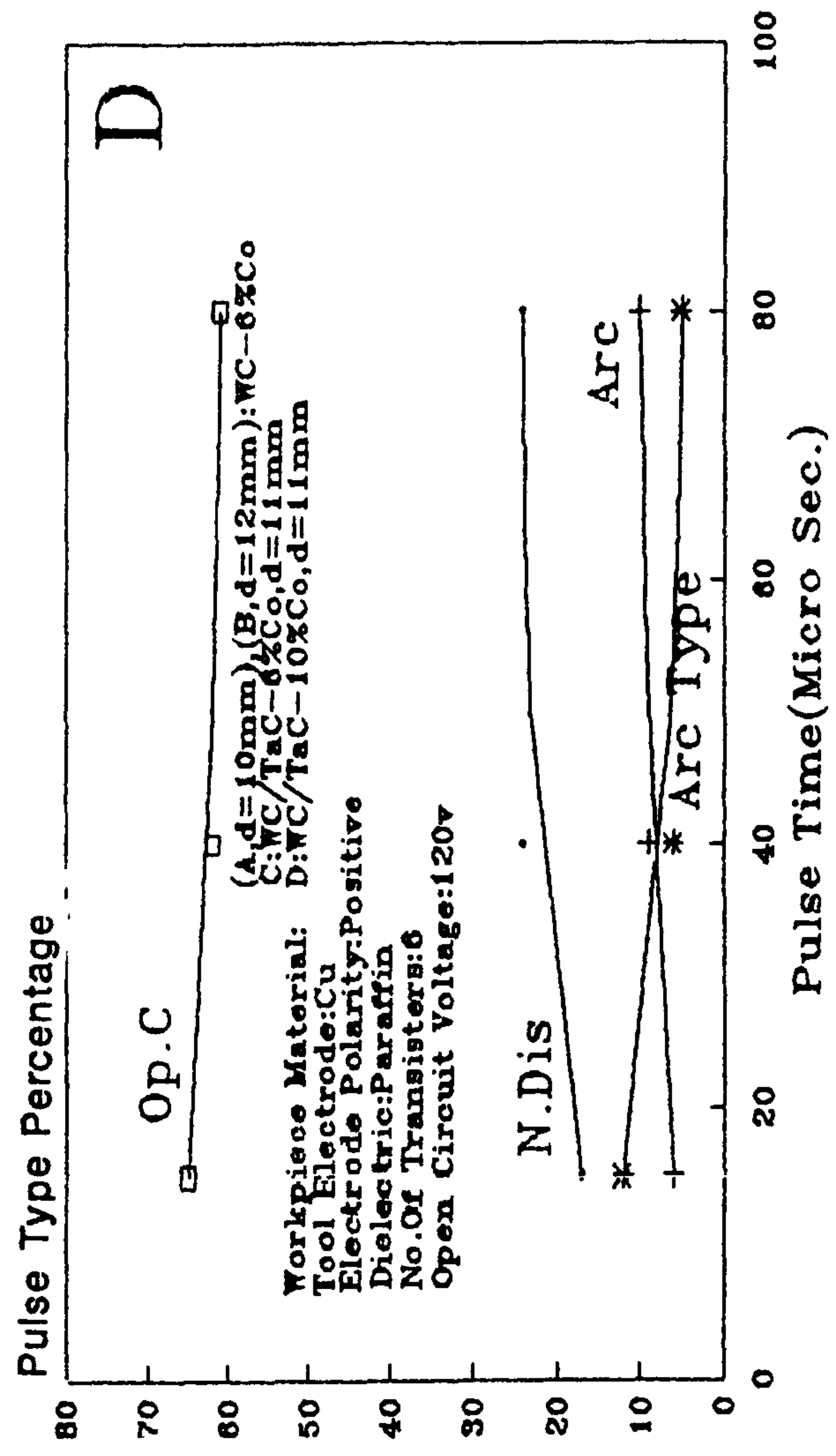
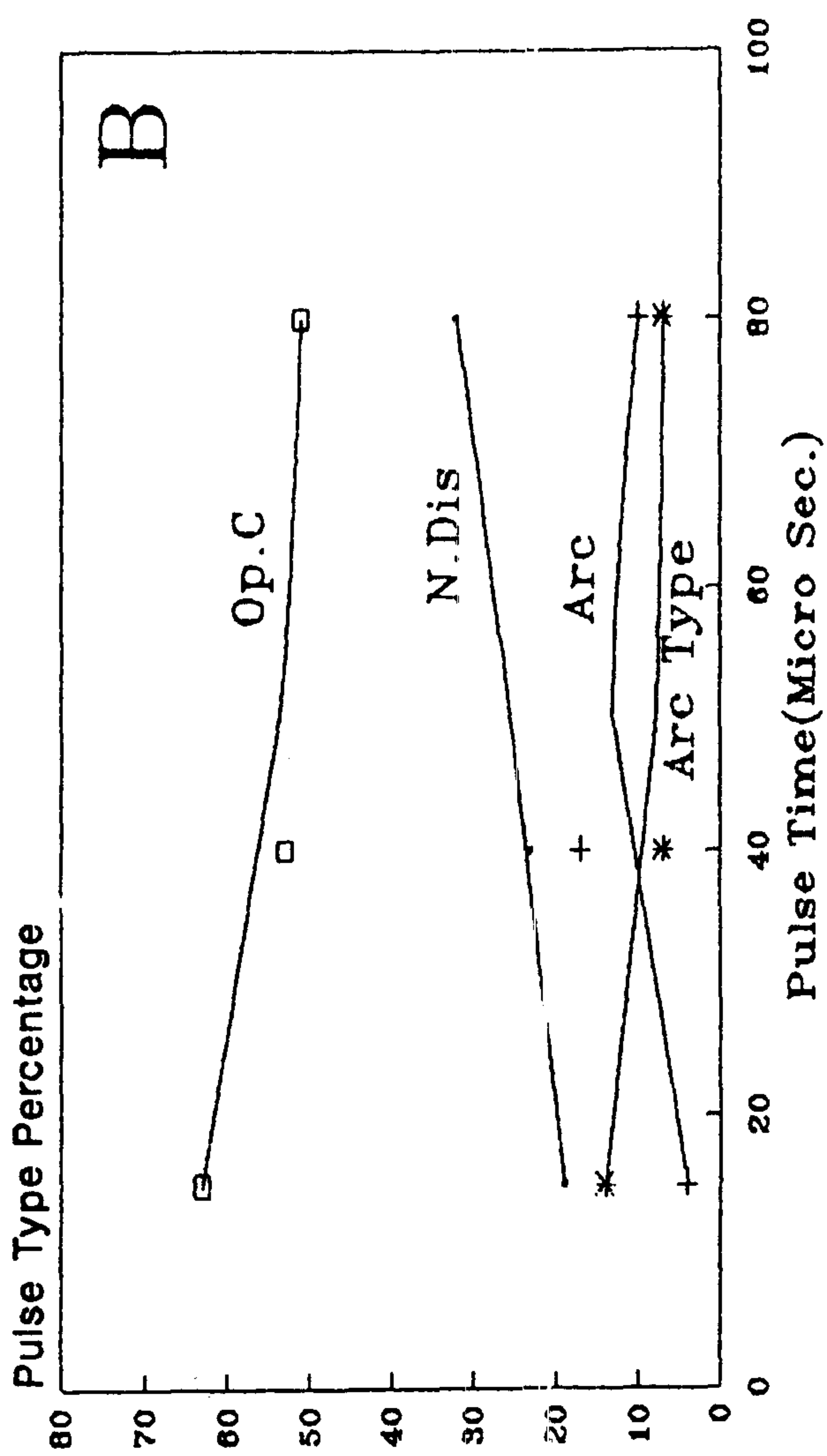
$$\text{درصد جرقه نزدیک به آرک} = \frac{c}{m \times n} \times 100$$

$$\text{درصد پالس مدار باز} = \frac{d}{m \times n} \times 100$$

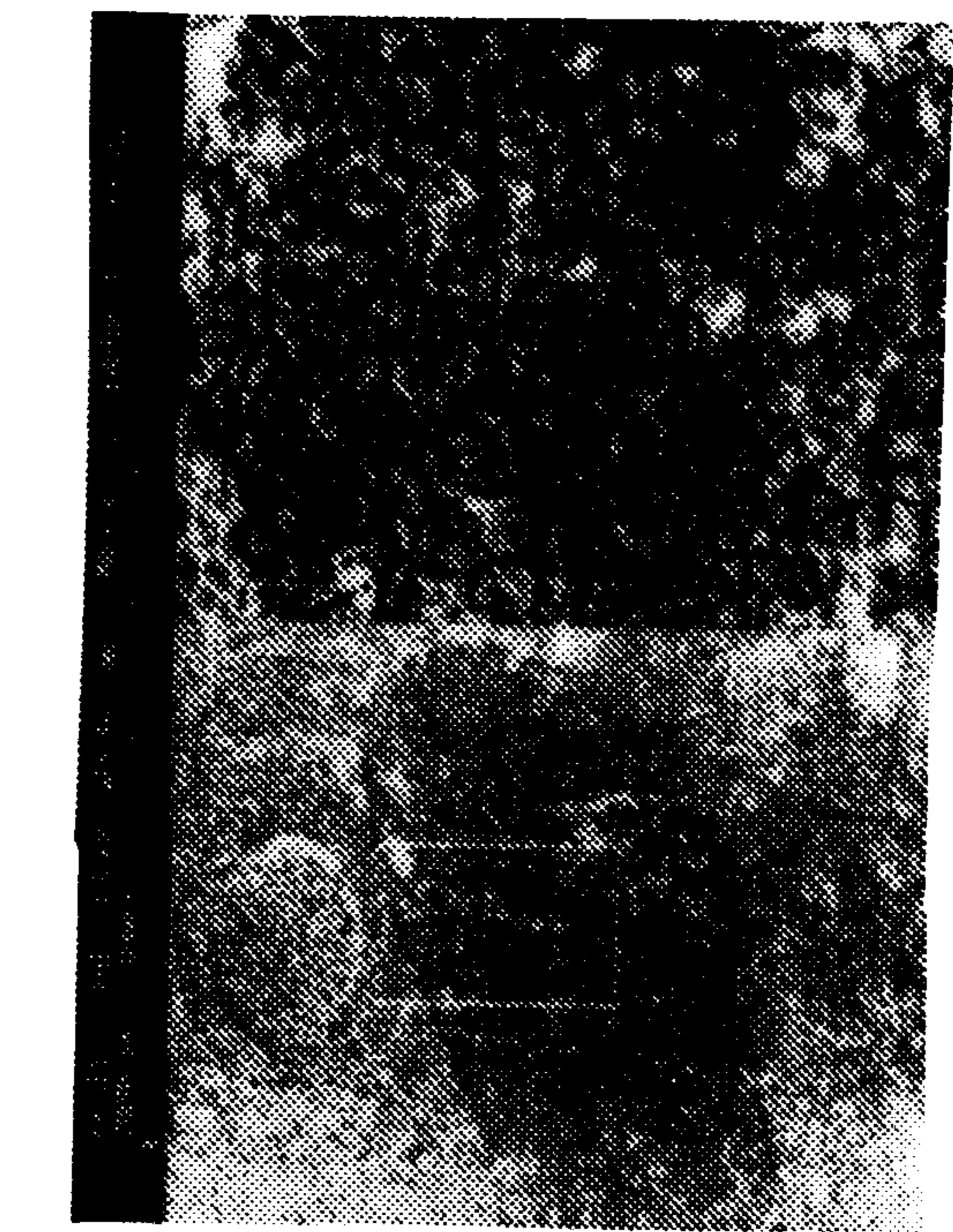
## بحث

مسئله‌ای که در مورد ماشینکاری کاربرد تنگستن به روش EDM وجود دارد آن است که کبالت دارای هدایت الکتریکی بالا بوده و درجه حرارت ذوب و تبخیر آن به ترتیب  $1320^\circ C$  و  $2700^\circ C$  می‌باشد. در حالیکه کاربرد تنگستن در مقابل جریان الکتریکی به شدت مقاوم بوده و نقطه ذوب و تبخیر آن به ترتیب  $2800^\circ C$  و  $6000^\circ C$  می‌باشد. لذا انرژی جرقه باعث ذوب و تبخیر زمینه کبالت شده و به تخلیه آن می‌انجامد. در حقیقت کبالت که

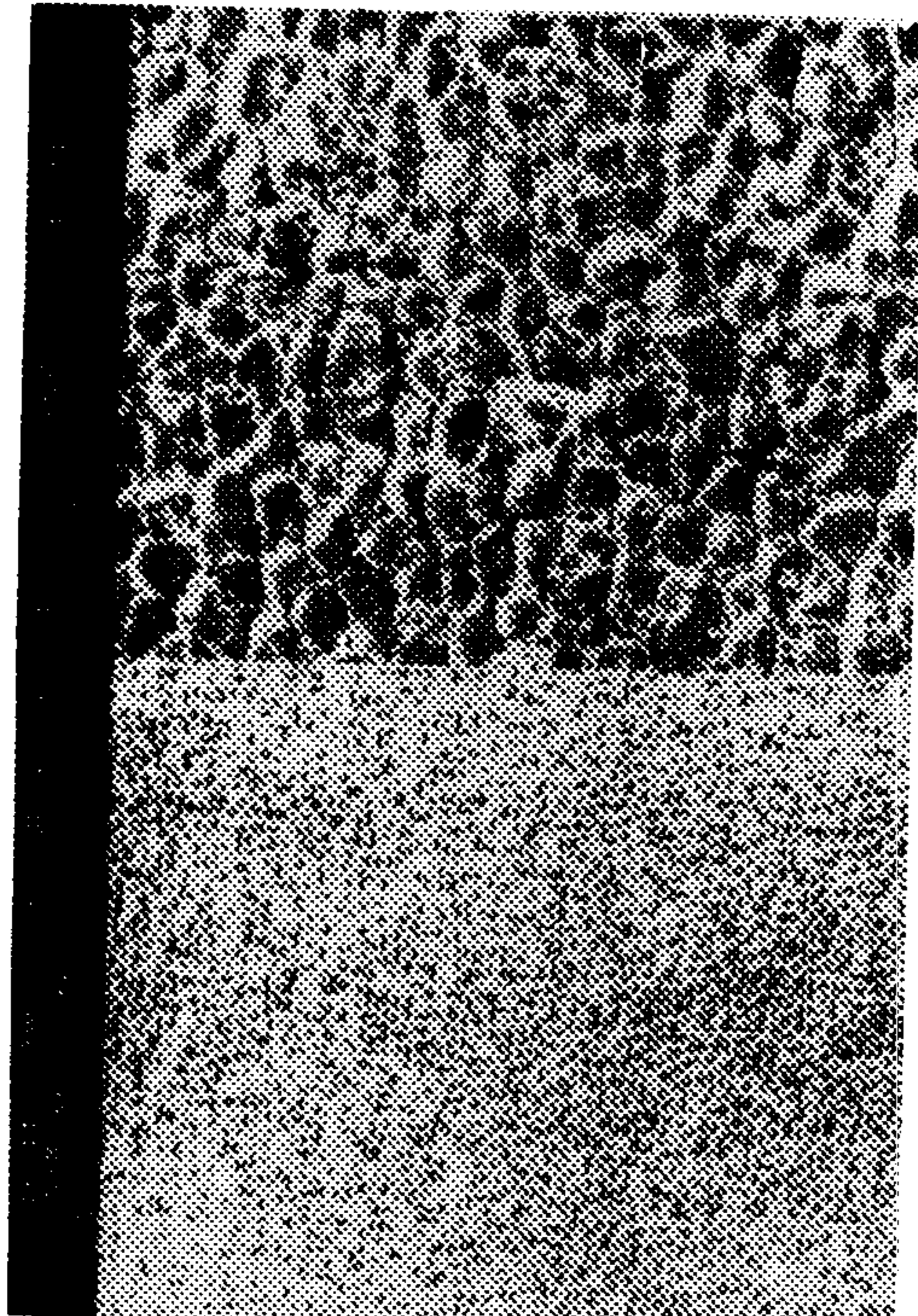




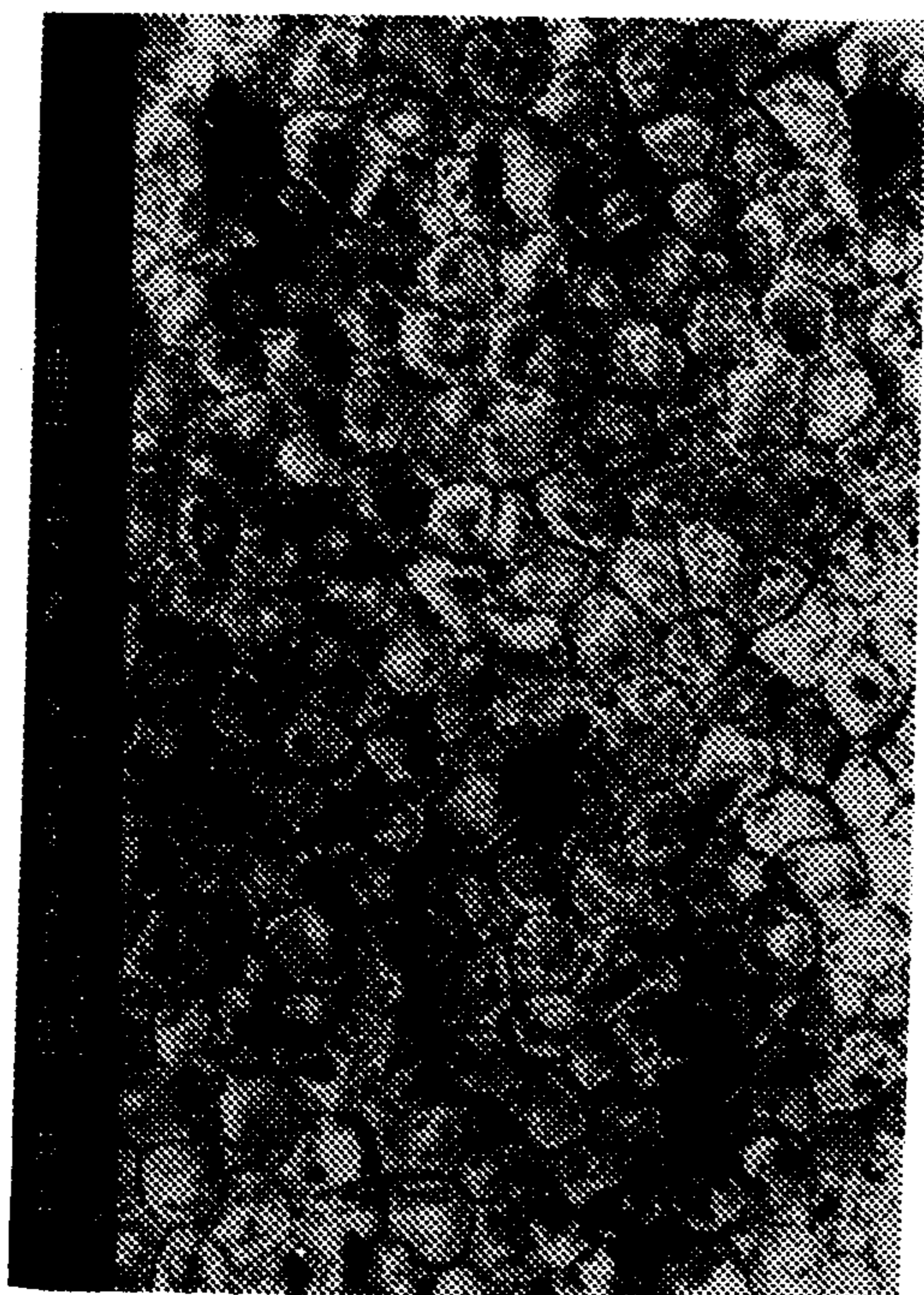
شکل ۸: منحنی تغییرات درصد انواع پالسها برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری انواع مختلف تنگستن کار باید.



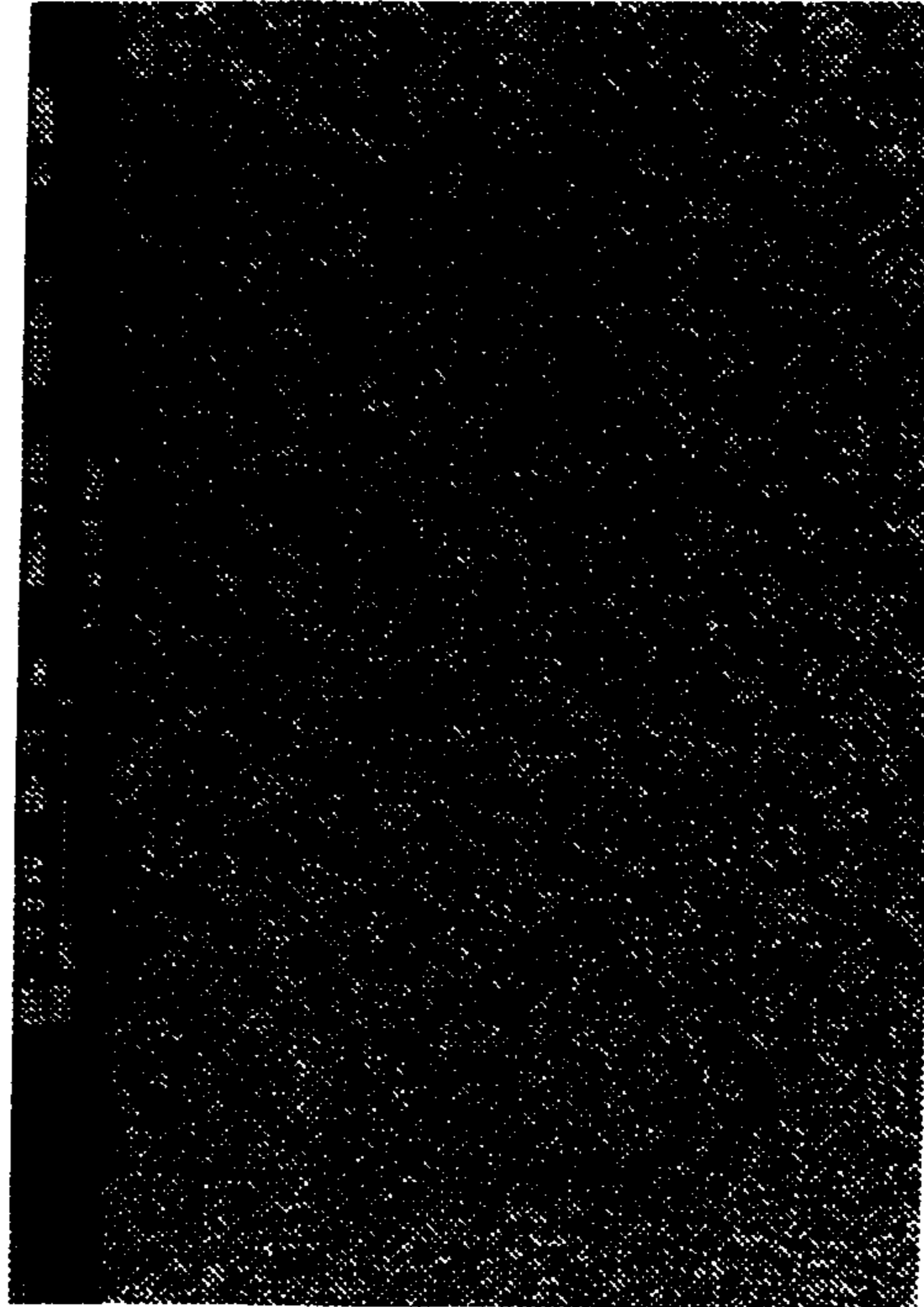
جنس: WC-6%CO (d=10mm) زاویه دید: عمود  
تعداد تراش‌شماره در معیار: ۶ (T<sub>۰</sub>=T<sub>۸۰</sub>=۸۰ s) ۱۲۰V



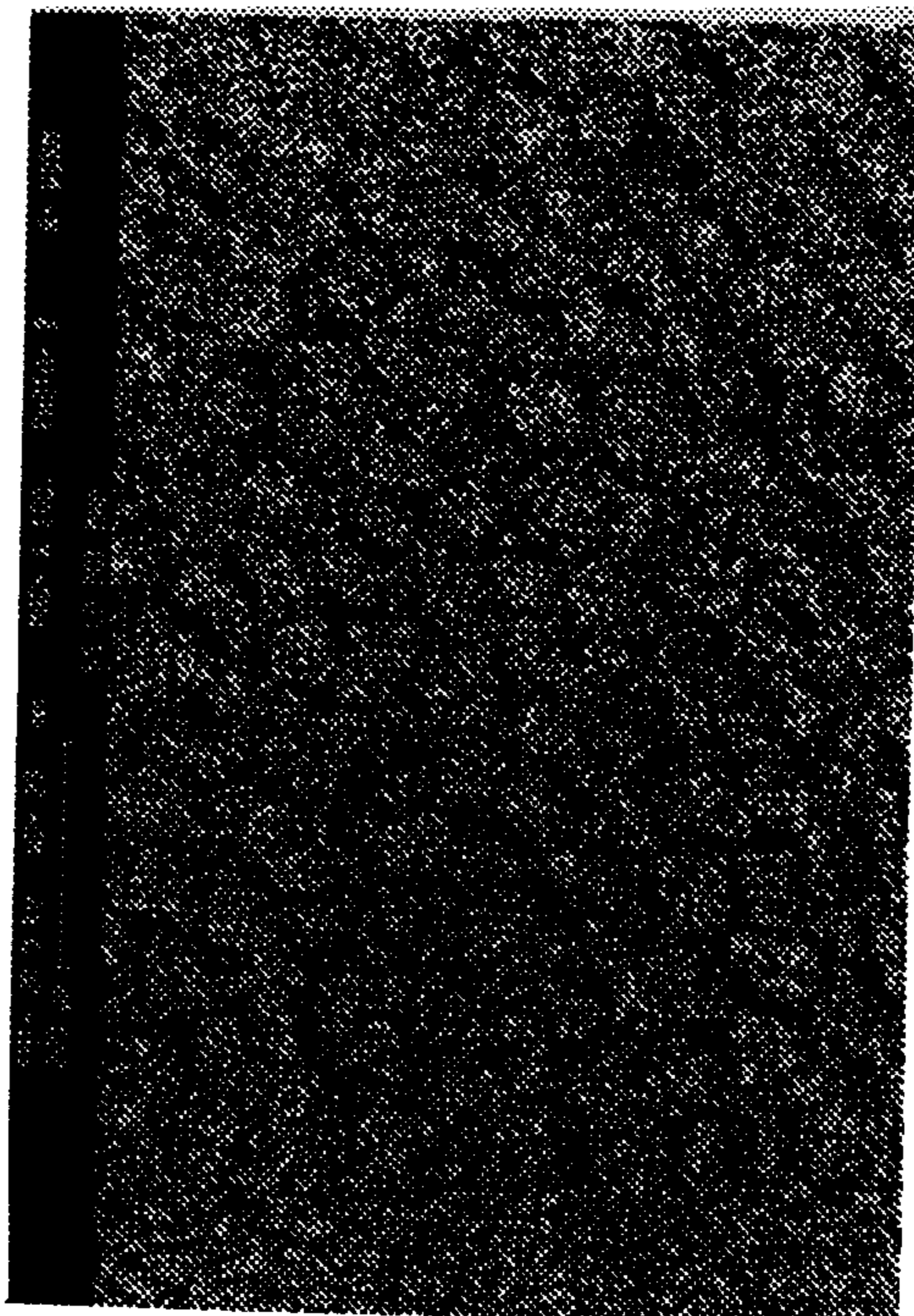
جنس: WC-6%CO (d=10mm) زاویه دید: عمود  
تعداد تراش‌شماره در معیار: ۶ (T<sub>۰</sub>=T<sub>۸۰</sub>=۸۰ s) ۱۲۰V



جنس: WC-6%CO (d=10mm) زاویه دید: عمود  
تعداد تراش‌شماره در معیار: ۶ (T<sub>۰</sub>=T<sub>۸۰</sub>=۸۰ s) ۱۲۰V

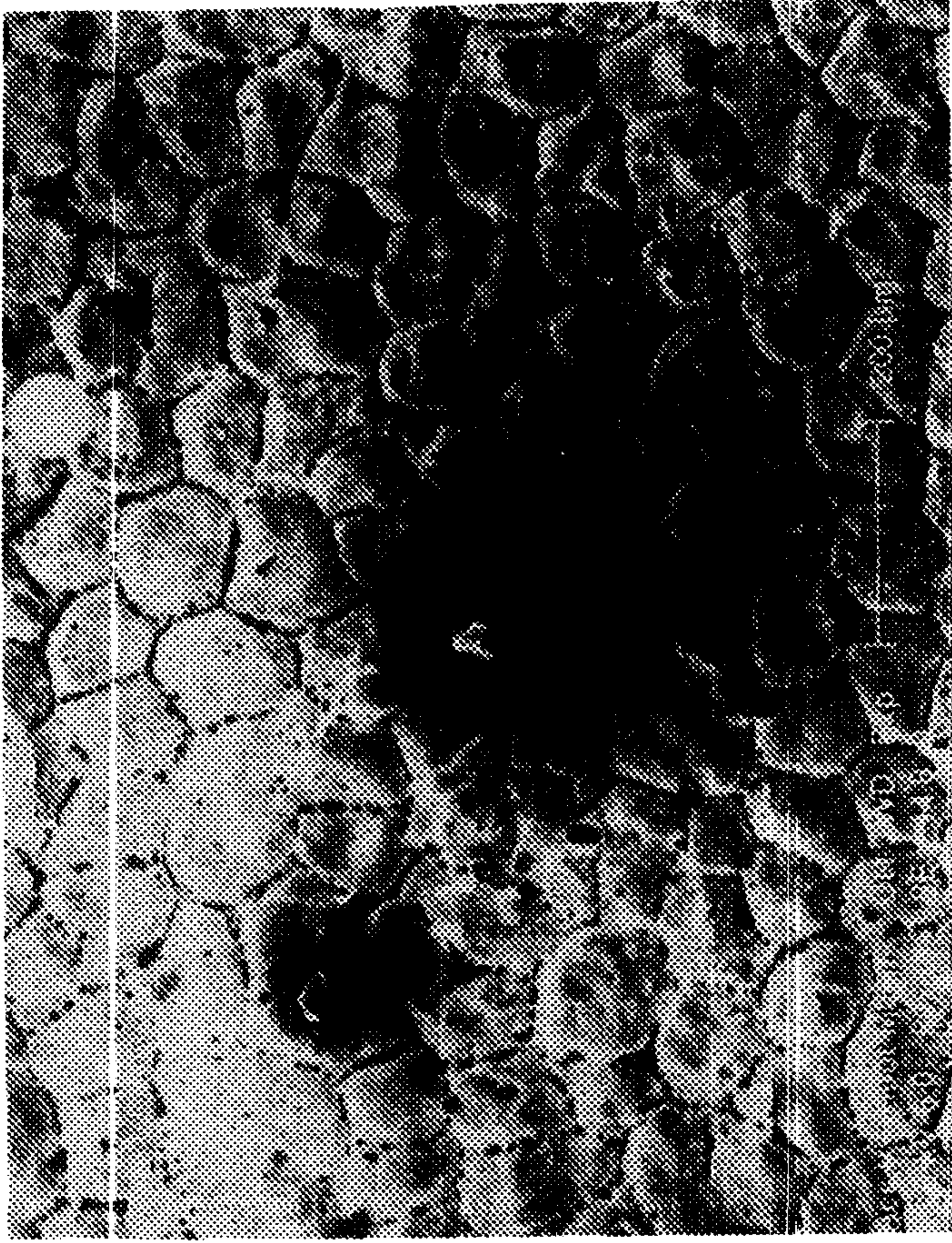


جنس: WC-6%CO (d=10mm) زاویه دید: عمود  
تعداد تراش‌شماره در معیار: ۶ (T<sub>۰</sub>=T<sub>۸۰</sub>=۸۰ s) نوع توزیع: W



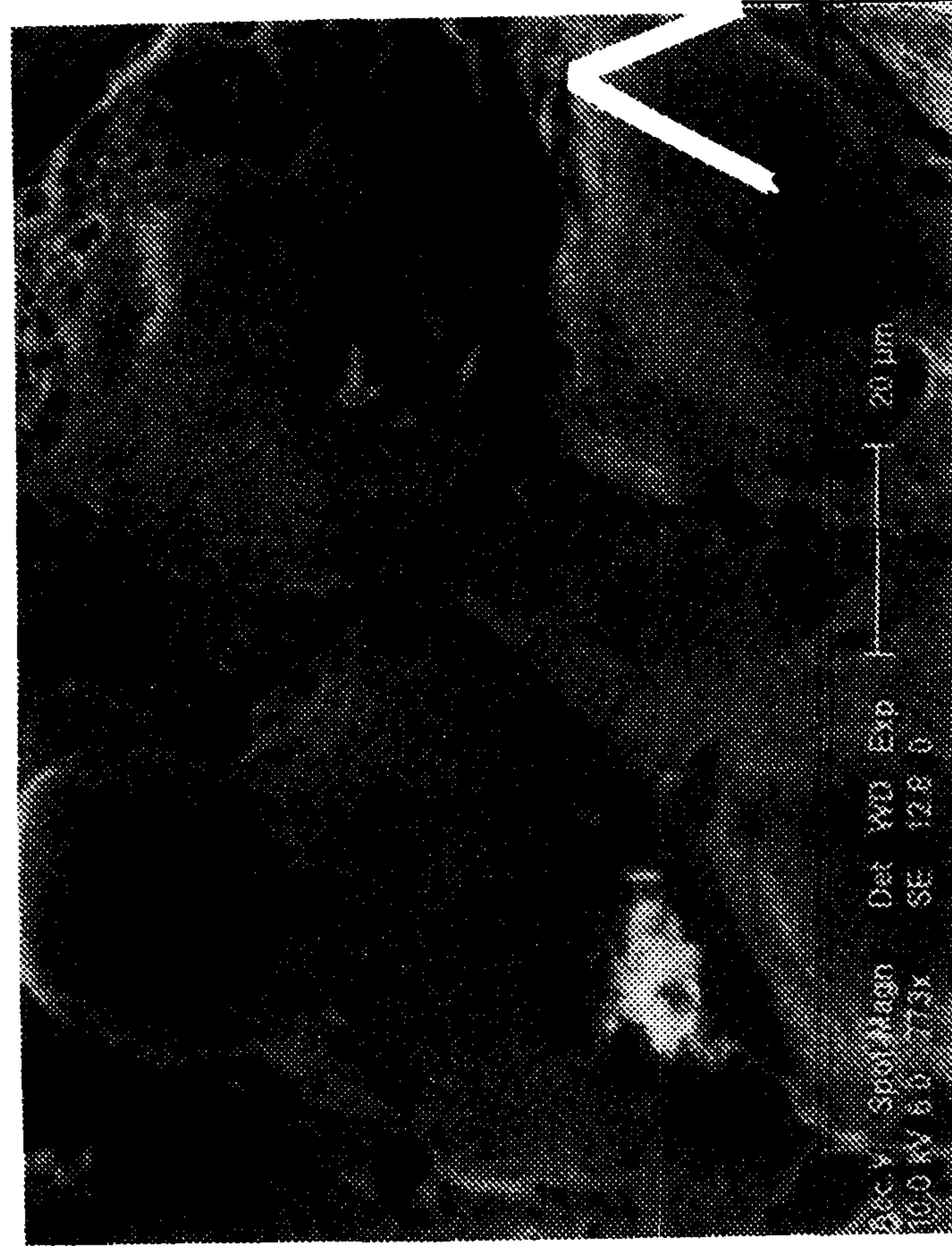
جنس: WC-6%CO (d=10mm) زاویه دید: عمود  
تعداد تراش‌شماره در معیار: ۶ (T<sub>۰</sub>=T<sub>۸۰</sub>=۸۰ s) نوع توزیع: CO

شکل ۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده تنگستن کار باید در حالت عادی و پس از اخذ توزیع تنگستن و کبالت.



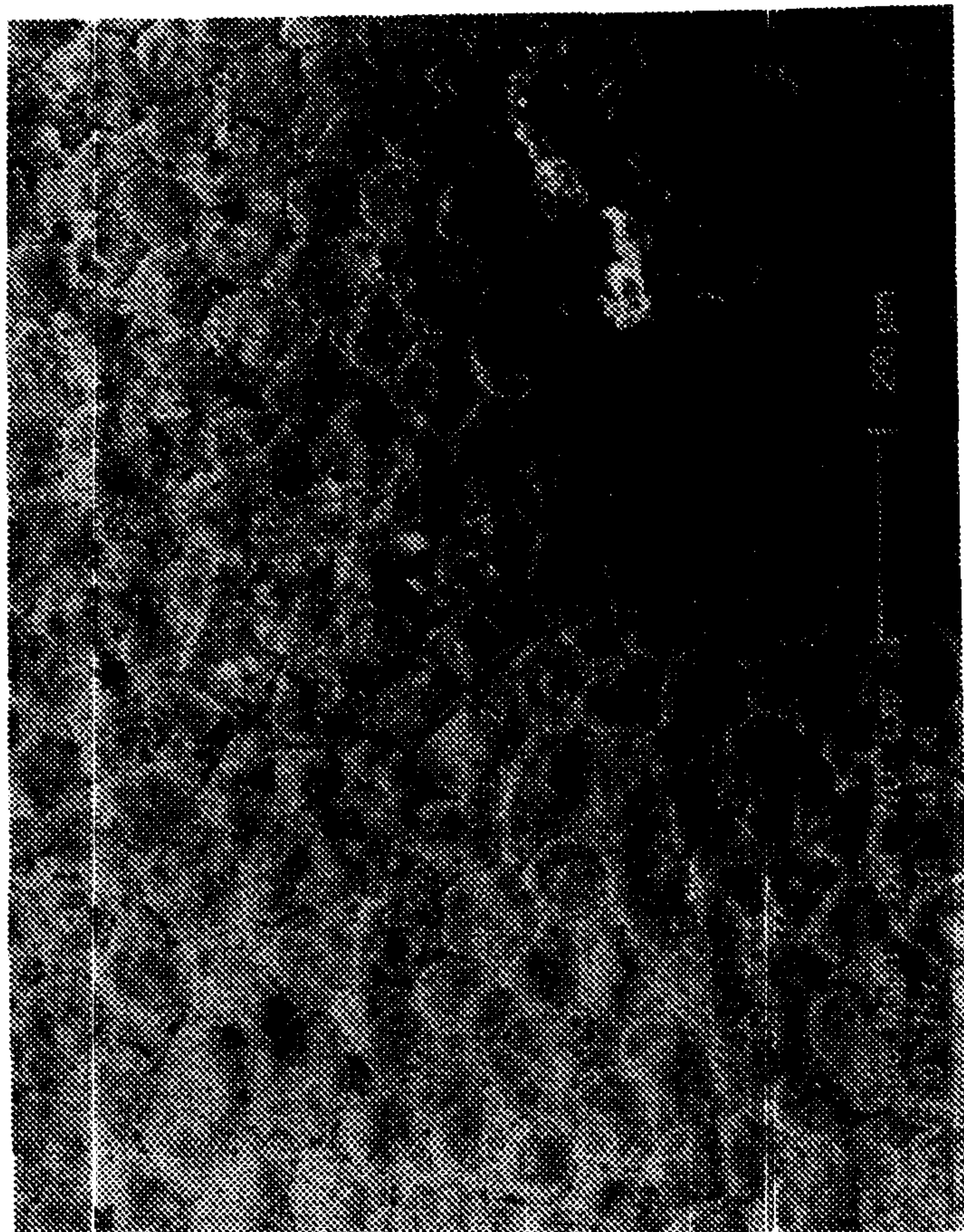
(D2)

جنس:  $WC/TaC-10\%Co(d=11mm)$  زاویه دید: صفر  
 تعداد ترازیستور در مدار:  $6 (T_i = T_e = 4.4S)$  ولتاژ مداربارز:  $12.0V$



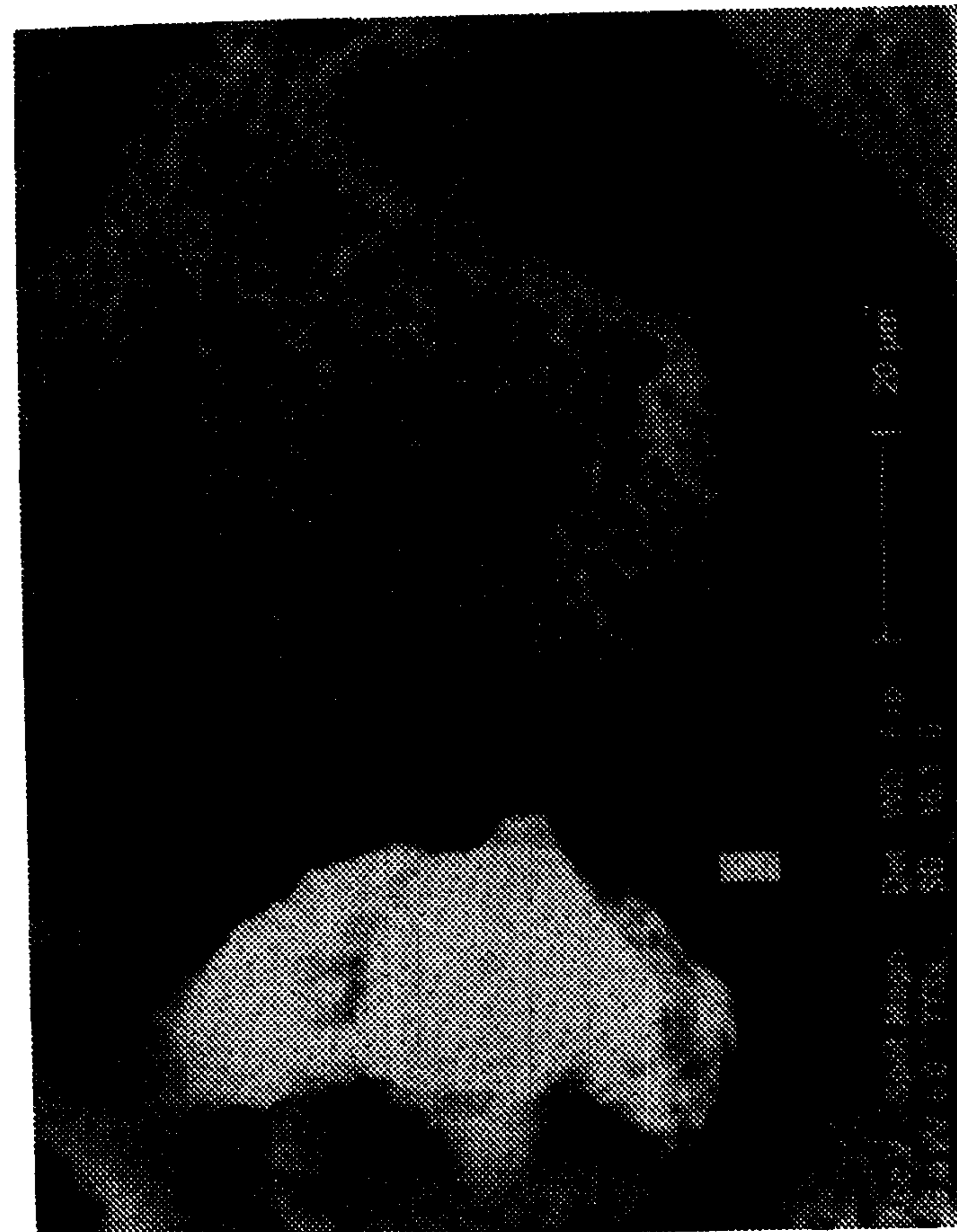
(D4)

جنس:  $WC/TaC-10\%Co(d=11mm)$  زاویه دید: صفر  
 تعداد ترازیستور در مدار:  $6 (T_i = T_e = 4.4S)$  ولتاژ مداربارز:  $12.0V$



(A4)

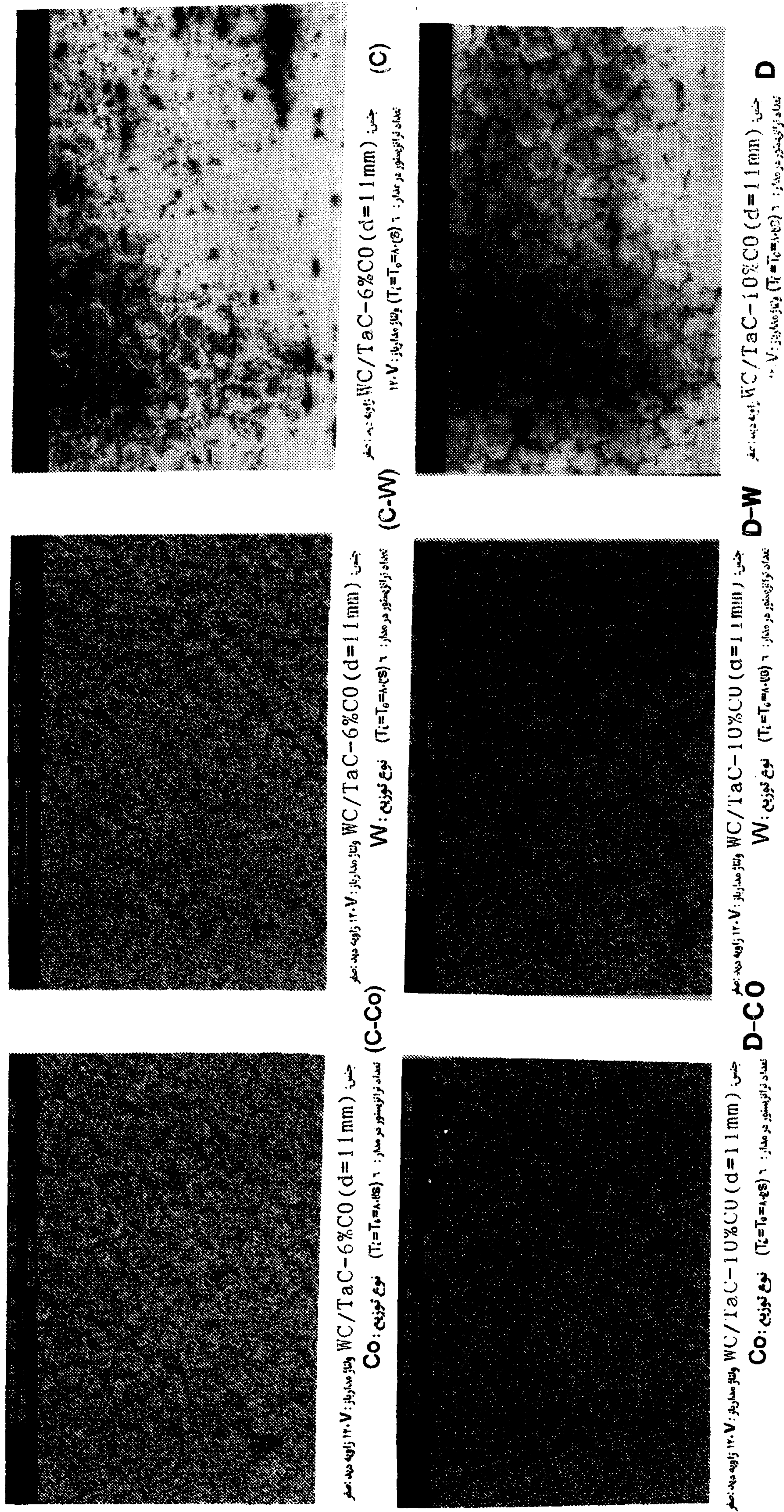
جنس:  $WC-6\%Co(d=10mm)$  زاویه دید: صفر  
 تعداد ترازیستور در مدار:  $6 (T_i = T_o = 8.04S)$  ولتاژ مداربارز:  $12.0V$



(D3)

جنس:  $WC/TaC-10\%Co(d=11mm)$  زاویه دید: صفر  
 تعداد ترازیستور در مدار:  $6 (T_i = T_e = 4.4S)$  ولتاژ مداربارز:  $12.0V$

شکل ۱۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده تنگستن کارباید در زمانهای مختلف روشنی پالس.



شکل ۱۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده تنگستن کارباید در حالت عادی و پس از اخذ توزیع تنگستن و کبالت.

می‌شود که نشانه ذوب، الحاق و انجماد حجم زیادتری از ماده است (شکل ۹، تصاویر  $A_1$  و  $A_4$ ).

### نتیجه‌گیری

افزایش زمان روشنی پالس ناپایداری فرآیند را در ماشینکاری انواع مختلف کاربرد تنگستن افزایش می‌دهد. منحنی تغییرات سرعت باربرداری و نیز فرسایش نسبی ابزار برای انواع مختلف کاربرد تنگستن به هم نزدیک هستند. در انواع مختلف کاربرد تنگستن، پالسهای مدار باز با بیش از ۵۰٪ بالاترین و جرقه‌های آرک و شبه آرک با مقدار تقریبی یکسان (کمتر از ۱۵٪). در تمام نمونه‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش زمانی روشنی پالس، درصد پالسهای مدار باز کاهش یافته و درصد جرقه‌های عادی افزایش می‌یابد. در حالیکه درصد جرقه‌های آرک و شبه آرک تقریباً ثابت است. منحنیهای شکل (۸) نشان می‌دهند که درصد هر یک از انواع مختلف پالس در نمونه‌های مختلف کاربرد تنگستن بهم نزدیک می‌باشند. بر اساس تصویر شکل (۹) ( $A_1$ )، نواحی نزدیک به آرک دارای دانه بندی بامرز سیاه می‌باشد. در حالیکه نواحی بدون آرک دارای دانه بندی با مرز سفید است که در مورد اولی نشانه فقدان کبالت در مرز دانه‌ها و در دومی حضور کبالت را نشان می‌دهد. زمانی که آرک تحقق می‌یابد، ناحیه آرک زده کبالت و کاربرد تنگستن هردو راز دست می‌دهد (شکل ۱۰، تصاویر  $A_4$  و  $D_4$ ). در عکسهای توزیع کبالت و تنگستن شکل‌های (۹) و (۱۱) ( $A-Co, A-W, A, C, C-W, C-Co, D-W, D$ ) حضور تنگستن و کبالت در تمام نواحی سطحی ملاحظه می‌شود.

حضور کبالت تقریباً در همه نواحی، احتمالاً نشانه انجماد مجدد کبالت روی سطح قطعه، و یا آلیاژ شدن کبالت با تنگستن کاربرد یا تنگستن است. لکه‌های سیاه خلل و فرج روی دانه‌ها که در عکسهای شکل (۱۰) ( $D_4, D_3$ ) مشاهده می‌شوند می‌توانند منشاء به تله افتادن کربن و رشد آنها و ایجاد پدیده آرک باشند. نتیجه آن است که اگر از فقدان کبالت در مرز دانه‌های سطحی و پیدایش خلل و فرج دانه‌ها جلوگیری شود احتمال وقوع آرک کمتر می‌شود و پایداری فرآیند و سرعت باربرداری افزایش می‌یابد.

علاوه بر بالابودن درصد کبالت، احتمالاً شستشوی موضع ماشینکاری و کم بودن ولتاژ مدار باز می‌توانند در کاهش حمله موضعی به کبالت مؤثر باشند که این خود مانع ناپایداری فرآیند می‌شود. با افزایش زمان روشنی پالس بافت سطحی درشت‌تر در منطقه آرک حذف کبالت و کاربرد تنگستن ملاحظه می‌شود و این خود حفره‌ای برای جایگزینی و رشد کربن می‌گردد و نتیجتاً زمینه را برای ایجاد پدیده آرک فراهم می‌آورد. افزایش نسبت کبالت باعث افزایش پایداری فرآیند می‌شود. ممانعت از فقدان کبالت پایداری فرآیند را افزایش می‌دهد. جلوگیری از پیدایش دانه‌های درشت دارای خلل و فرج در موضع ماشینکاری باعث افزایش پایداری فرآیند می‌شود.

### تشکر و قدردانی

از بخش کارگاه، آزمایشگاه تولید مخصوص و آزمایشگاه متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که کمال همکاری و مساعدت را نموده‌اند، قدردانی و سپاسگزاری می‌گردد.

### مراجع

- 1 - Brook, R. J. (1991). "Concise encyclopedia of advanced ceramic materials." *Max-Planck Institut - Für Metallforschung Stuttgart, Germany.*

- 2 - Sandvik CIC Rolls "Machining of cemented carbide." *Sandvik Hard Materials, Scheydgasse44, A-1211 Wien.*
- 3 - Mc Colm, I. J. and Clark, N. J. (1988). "Forming, shaping & working of high performance ceramics." *Schools of Industrial Technology, University of Bradford.*
- 4 - Watson, S. H. and Freer, H. E. (1980). "A comparative study of electro - chemical and electro discharge machining of a tungsten - carbide -%25 cobalt alloy." *Proceedings of Sixth International Symposium for Electro Machining ISEM 6.*
- 5 - Van Dijck, F. (1973). "Physio - mathematical analysis of the electro discharge machining process." Ph.D.Thesis, *Catholic University of Leuven, (English translation).*
- 6 - Levy, G. N. and Werthiem, R. (1988). "ED machining of sintered carbide-compacting dies." *Annals of the CIRP, Vol. 37/1, PP. 175-178.*
- 7 - Pandle, S. M. and Rajurkar, K. P. (1981). "Analysing electro discharge machining of cemented Carbide." *Annals of the CIRP, Vol. 30/1, PP. 111-116.*
- 8 - EDM Product Group. (1986). "Spark erosion machine's operating instructions." *DE Center, Germany.*

۹ - مهدوی نژاد، ر.ع. "مطالعه و بررسی علل ناپایداری ماشینکاری مواد کاربیدی توسط EDM." دانشگاه تربیت مدرس.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Electro Discharge Machining (EDM)
- 2 - Die Sinking
- 3 - Metal Matrix
- 4 - Hot Pressing (HP)
- 5 - Hot Isostatic Pressing (HIP)
- 6 - Sintering
- 7 - Cubic Bron Nitride (CBN)
- 8 - Electro Chemical Machining (ECM)
- 9 - Cooperative Industrial Research Program
- 10 - Bulk Boiling
- 11 - Agietron
- 12 - Hybrid Relaxation Circuit