

Índice general

1	ANTECEDENTES DE LA ELECTRO-EROSIÓN	1
2.	UNIDADES	
2.1.	Unidades	5
3.	CONSTITUCIÓN DE LA MATERIA	
3.1.	Constitución de la materia	7
3.2.	Red cúbica simple y de cuerpo centrado	8
3.3.	Red cúbica de caras centradas	8
3.4.	Red hexagonal	9
3.5.	Índices de Miller	9
3.6.	Estructura policristalina	9
3.6.1.	Metales aleados	10
3.6.2.	Conducción eléctrica.	10
3.7.	Tratamiento térmico de los aceros	10
3.8.	Estructura del átomo	11
3.8.1.	Teoría de bandas	12
3.8.2.	Distribución de los electrones por capas	13
3.8.3.	La unidad de energía electrón-voltio	14
3.8.4.	Energía de extracción	14
4.	LOS DIELECTRICOS Y LA PERMITIVIDAD	
4.1.	Campos y fuerzas.	17
4.2.	Polarización de un dieléctrico	18
4.3.	Energía de un capacitor	20
4.4.	Inductores	21
4.5.	Resistividad	22
5.	MECANIZADO DE LOS METALES	
5.1.	Mecanizado por arranque de viruta	23
5.2.	Mecanizado electroquímico	25
5.3.	Mecanizado de cavidades	29
6.	PRODUCCIÓN DE DESCARGAS	
6.1.	Producción de descargas	33
6.2.	La descarga disruptiva en el vacío	33
6.3.	Emisión por efecto de campo	34
6.4.	Emisión secundaria	34
6.5.	Formación del plasma	35
6.6.	Descargas eléctricas en el seno de un gas. Iones	35
6.7.	Descarga en arco	37
6.8.	Arco de campo	40
7.	LOS DIELECTRICOS	
7.1.	Rigidez dieléctrica	43
7.1.1.	Procesos de ruptura dieléctrica	44
7.1.2.	Ruptura térmica	44

Electro-erosión

7.1.3.	La ruptura electrónica	44
7.1.4.	La teoría intrínseca	44
7.1.5.	La teoría de avalancha	44
7.1.6.	Descarga a través de un líquido dieléctrico	45
7.2.	Características de los dieléctricos	49
7.2.1.	Punto de inflamación	49
7.2.2.	Densidad	49
7.2.3.	Viscosidad	50
7.2.4.	Contenido aromático	51
7.2.5.	Índice de saponificación	51
7.3.	El agua como dieléctrico	52
7.3.1.	Agua desionizada	52
7.3.2.	Resinas de intercambio iónico	53
7.3.3.	Equipos de desionización del agua	54
7.3.4.	Membranas permeables	54
8.	EL FILTRADO	
8.1.	Especificaciones de un filtro	55
8.2.	Capacidad nominal	55
8.3.	Capacidad media del filtro	56
8.4.	Valor beta (?) de un filtro	56
8.5.	Clases de filtros	56
8.5.1.	Elementos de filtración de superficie	57
8.5.2.	Filtros de canto	57
8.5.3.	Filtros de pila	58
8.5.4.	Filtros de profundidad	58
8.5.5.	Filtros de bujías	58
8.5.6.	Filtros de pre-cobertura	59
8.6.	Capacidad de filtrado	60
8.7.	Tierra de diatomeas o Kieselgur	60
8.8.	Perlita	61
8.9.	Celulosa	61
8.10.	Carbón activado	61
9.	LÉXICO DE LA ELECTRO-EROSIÓN	
9.1.	Arco-eléctrico	63
9.2.	Arranque de material.	63
9.3.	Arranque de material específico	63
9.4.	Corto circuito.	63
9.5.	Densidad de corriente	63
9.6.	Descarga	63
9.7.	Descarga anormal.	63
9.8.	Desgaste	63
9.10.	Desgaste lineal.	63
9.11.	Desgaste volumétrico	63
9.12.	Desionización	64
9.13.	Dieléctrico	64
9.14.	Distancia de electro-erosionado diametral	64
9.15.	Distancia de electro-erosionado diametral media	64
9.16.	Electrodo-Herramienta.	64
9.16.1	Entrehierro, juego o gap	64
9.17.	Estado de superficie	64
9.18.	Frecuencia de los impulsos	64

Índice general

9.19.	Impulso de corriente	64
9.20.	Impulso isoenergético.	64
9.21.	Impulso isofrecuencial	64
9.22.	Impulso de tensión	64
9.23.	Intensidad de cresta o de pico	65
9.24.	Intensidad media de corriente	65
9.25.	Interferencia de seguridad.	65
9.26.	Ionización.	65
9.27.	Polaridad	65
9.28.	Solapamiento diametral.	65
9.28.	Solapamiento diametral.-	65
9.29.	Tiempo de descarga.	65
9.30.	Tensión de descarga o tensión en el gap.	65
9.31.	Tiempo de impulso.	66
9.32.	Tiempo de pausa o de intervalo	66
9.33.	Tensión en vacío.	66
9.34.	Tiempo de ionización.	66
10.	MÉTODOS DE MECANIZADO POR ELECTRO-EROSIÓN	
10.1.	Funcionamiento del circuito	68
10.2.	Energía de las descargas	71
10.3.	Generadores con circuito RCL.	72
10.4.	Circuitos RLCL	72
10.5.	Generadores RCLD	73
10.6.	Circuitos RCR	74
10.7.	Generadores de régimen semi-independiente	76
10.8.	Generadores de régimen independiente	76
10.9.	Generadores electromecánicos.	77
10.10.	Generadores a válvulas de vacío	78
10.11.	Generadores transistorizados	79
10.12.	Generadores modernos	81
10.13.	Mosfets	82
11.	IMPULSOS	
11.1.	Energía de un impulso	87
11.2.	Valor eficaz de un impulso repetitivo	88
11.3.	Tiempo de encendido de un impulso	88
11.4.	Impulsos isoenergéticos	89
11.5.	Mecanizado por impulsos no rectangulares	89
11.6.	Descargas normales y anormales	91
11.7.	Ecuaciones matemáticas de los impulsos	93
11.7.1.	Valor de pico, eficaz y medio. Señales recurrentes	93
11.7.2.	Efecto de una componente de corriente continua superpuesta	94
11.7.3.	Series de Fourier	94
11.7.4.	Espectro de señales periódicas y no periódicas	96
11.7.5.	Integral de Fourier	96
11.7.6.	Características generales del espectro de amplitud	97
11.7.7.	Efecto de la frecuencia de repetición en formas de onda periódicas	97
11.7.8.	Efecto de la amplitud de la señal	98
11.7.9.	Efecto del tiempo de duración de la señal	98
11.8.	Consecuencias prácticas	98

Electro-erosión

11.9.	Intensidad de pico e intensidad media	100
11.10.	Densidad de corriente	100
11.11.	Formas de onda óptimas.	102
12.	CONTROL DEL GAP	
12.1.	El sistema de control del gap	107
	Sistema controlado por tensión.	110
	Sistema controlado por intensidad.	110
	Por el tiempo de ionización.	110
	Por la radiofrecuencia.	110
12.2.	El servo	111
12.3.	Sistema de regulación del gap	112
12.4.	Accionadores	113
12.5.	Rozamientos	114
12.6.	Estabilidad del servo	115
12.7.	Tiempo de respuesta	116
12.8.	El servo en la máquina de electro-erosión	116
12.9.	Distintos sistemas de servos empleados	117
12.10.	Sistema electro-hidráulico	117
12.11.	Servomecanismos electromecánicos	118
12.12.	El generador	119
	12.12.2. Características de un generador	119
	12.12.3. Ley de máxima transferencia de potencia	120
	12.12.4. Mandos de regulación de intensidad de corriente	120
	12.12.5. Gama de tiempos de impulso	120
	12.12.6. Regulación de los tiempos de pausa	121
	12.12.7. Temporizador de limpieza	121
	12.12.9. Controles adaptativos.	122
13.	LOS ELECTRODOS	
13.1.	Materiales de los electrodos	124
	13.1.1. Cobre	125
	13.1.2. El cuprotungsteno	125
	13.1.3. Plata-tungsteno	126
	13.1.4. Aluminio	127
	13.1.5. Duraluminio	127
	13.1.6. Siluminio	127
14.	GRAFITOS	
14.1.	Electrodos no metálicos - Grafitos	129
14.2.	Estructura atómica y cristalográfica	129
14.3.	Isotropía y anisotropía	130
14.4.	Densidad	130
14.5.	Dureza	130
14.6.	Porosidad	130
14.7.	Propiedades mecánicas	131
14.8.	Propiedades térmicas	131
14.9.	Propiedades eléctricas	131
14.10.	Propiedades químicas	132
14.11.	Grafito pirolítico	132
14.12.	Coeficiente de dilatación	132
14.13.	Conductibilidad térmica	132
14.14.	Resistividad eléctrica	132

Índice general

14.15.	Sistema de producción	132
14.16.	Cupro-grafitos	132
14.17.	Criterios de selección	134
15.	MECANIZADO DE LOS ELECTRODOS	
15.1.	Herramientas de corte	137
15.2.	Herramientas para torneado	137
15.3.	Ángulo de desprendimiento (γ)	137
15.4.	Ángulo de incidencia (α)	138
15.5.	Ángulo de corte (β)	138
15.6.	Ángulo de inclinación (λ)	138
15.7.	Ángulo de posición principal (χ)	138
15.8.	Ángulo de la punta (ϵ)	139
15.9.	Radio de punta	139
15.10.	Herramienta de corte para el fresado	139
15.11.	Ángulo de desprendimiento (γ)	140
15.12.	Ángulo de incidencia (α)	140
15.13.	Ángulo de corte (β)	140
15.14.	Ángulo de hélice (λ)	140
15.15.	Ángulo de desprendimiento (γ)	140
15.16.	Mecanizado de electrodos de grafito	140
15.17.	Aserrado del grafito	141
15.18.	Fresado	141
15.19.	Rectificado	141
15.20.	Torneado	142
15.21.	Taladrado	142
15.22.	Líquidos de corte	143
15.23.	Desventajas del grafito	143
15.24.	Procedimientos de obtención de los electrodos	144
15.25.	Electrodos obtenidos por estampación	144
15.26.	Obtención de electrodos por extrusión	145
15.27.	Electrodos obtenidos por mecanización	145
15.28.	Electrodos obtenidos por fundición	145
15.29.	Fabricación de electrodos por galvano-plastia	146
15.30.	Electrodos de acero	148
15.30.	Reducción de electrodos al ácido	149
15.31.	Reducción al ácido de los cupro-tungstenos	150
16.	DESGASTE DE LOS ELECTRODOS	
16.1.	Desgaste de aristas	153
16.2.	Arranque de material	154
16.3.	Dependencia del arranque de material y desgaste en función del gap	155
16.4.	Mecanizado de cerámicas conductoras	157
16.5.	Diamante policristalino	158
16.5.1.	Comportamiento del diamante policristalino (DPC)	159
16.5.2.	Influencia de la energía de los impulsos	160
16.5.3.	Tipos de hilo empleado	160
16.5.4.	Hileras de diamante policristalino.	160
17.	LA RUGOSIDAD	
17.1.	Estado de superficie. La rugosidad	163
17.2.	Medición de la rugosidad	164

Electro-erosión

17.3.	Rugosidad mínima obtenible	166
17.4.	Estructura de las superficies erosionadas	168
17.5.	Subdimensionado de los electrodos	170
18.	LA LIMPIEZA	
18.1.	La limpieza en la zona de trabajo	173
18.2.	Limpieza con temporizador de lavado	173
18.3.	Sistema por inyección	175
18.4.	Limpieza por aspiración	176
18.5.	Limpieza por autosucción	177
18.6.	Limpieza por corriente de líquido lateral	177
18.7.	Presión del líquido de lavado	179
18.8.	Fuerza de un chorro sobre una superficie	180
18.9.	Limpieza por efecto de bombeo del electrodo	181
18.10.	Limpieza por ultrasonidos	181
18.11.	Eliminación de gases	181
18.12.	Realización de agujeros pasantes	182
18.12.1.	Electrodos tampón	182
18.13.	Electrodos rotativos	183
18.14.	Amarre de la pieza	183
18.15.	Platos magnéticos	184
19.	ELEMENTOS DE UNA MÁQUINA DE ELECTRO-EROSIÓN	
19.1.	El cuerpo de la máquina	186
19.2.	El tanque de trabajo	188
19.3.	Husillos a bolas	190
19.4.	Sistemas de guiado de las mesas	191
19.5.	Máquinas de mesa fija.	192
19.6.	Sistemas de refrigeración.	192
19.7.	Máquinas de hilo	193
19.8.	Precisión	195
19.9.	Repetitividad	195
19.10.	Actuadores	195
19.11.	Motores paso a paso	196
19.12.	Motores de c.c	196
19.13.	Motores de baja inercia	197
19.14.	Motores de c.a	198
20.	LÉXICO DE CONTROL NUMÉRICO	
21.	SISTEMAS DE MEDICIÓN	
21.1.	Captadores de posición	203
21.2.	Diferencias técnicas en los sistemas de medida	205
21.2.1.	Sistema lineal directo	205
21.2.2.	Sistema lineal indirecto con transmisión	205
21.2.3.	Sistema lineal indirecto mediante el husillo	206
21.2.4.	Medición de ángulos	206
21.3.	Controles de bucle abierto	207
21.4.	Controles de bucle cerrado	207
22.	EL CONTROL NUMÉRICO	
22.1.	Arquitectura general de un control numérico	209
22.2.	Servomecanismo digital de posición	210
22.3.	Funciones del control numérico	215

Índice general

23.4.	El cambiador de electrodos	216
22.5.	Parámetros del generador	217
22.6.	Control de las máquinas	218
22.7.	Máquinas de dos ejes y medio	218
22.8.	Máquinas de ejes conmutables	218
22.9.	Controles punto a punto	218
22.10.	Denominación de ejes	218
22.11.	Controles paraxiales	219
22.12.	Control numérico continuo	219
22.13.	Clases de interpolación	219
22.13.1.	Interpolación lineal	219
22.13.2.	Interpolación circular	219
22.13.3.	Interpolación helicoidal	219
22.13.4.	Interpolación parabólica	220
22.14.	Ejes de coordenadas	220
22.15.	Factor de escala	220
22.16.	Imagen espejo	220
22.17.	Coordenadas absolutas e incrementales	220
22.18.	Traslación de coordenadas	221
22.19.	Giro de coordenadas	221
22.20.	Carreras de la máquina	221
22.21.	Origen máquina y origen pieza	221
22.22.	Coordenadas	222
22.22.1.	Coordenadas cartesianas rectangulares	222
22.22.2.	Coordenadas polares	222
22.22.3.	Coordenadas cilíndricas	222
22.22.4.	Coordenadas esféricas	223
23.	PROGRAMACIÓN	
23.1.	Estructura de un programa	225
23.2.	Ciclos fijos	225
23.3.	Norma ISO	225
23.4.	Movimientos de los ejes de la máquina	226
23.4.1.	Eje X	227
23.4.2.	Eje Y	227
23.4.3.	Eje Z	227
23.4.4.	Eje C	227
23.5.	Origen de coordenadas	228
23.6.	Programación de velocidades	228
23.7.	Programación de electrodo	228
23.8.	Compensación de radio del electrodo	229
23.9.	Lenguaje ISO	229
23.9.1.	G00	231
23.9.2.	G01	231
23.9.3.	G02/G03	231
23.10.	Programación mediante el centro	232
23.11.	Programación mediante el radio	232
23.12.	Selección del plano de trabajo	233
23.13.	Selección del modo de trabajo	234
23.14.	Funciones pre-programadas	235
23.14.1.	Centrado interior	235
23.14.2.	Ciclo de centrado	235

Electro-erosión

23.14.3.	Centros pieza	235
23.14.4.	Centrado exterior	235
23.14.5.	Centrado por chispa	236
23.14.6.	Centrado o punto de referencia en Z	236
23.14.7.	Función anticolisión	237
23.14.8.	Ciclo multifigura con distribución por filas y columnas ..	237
23.14.9.	Ciclo multifigura con disposición circular	237
23.14.10.	Conos	237
23.14.11.	Pirámides	238
23.14.12.	Orbitado	238
23.14.13.	Sistema de orbitado	239
23.14.14.	Orbitados	240
23.14.15.	Selección óptima de intensidad de corriente y tiempo de impulso	240
23.14.16.	Semiesferas	241
23.14.17.	Orbitado cuadrado	241
23.14.18.	Avivado de aristas	241
23.14.19.	Ciclo helicoidal	242
23.14.20.	Interpolación a tres ejes	242
23.14.21.	Contorneado	243
23.14.22.	Mecanización lateral	243
23.14.23.	Roscado por orbitación	243
23.14.24.	Eje C	243
24.	ESTUDIO ECONÓMICO	
24.1.	Estudio económico	245
24.1.1.	Tiempo de preparación	245
24.1.2..	Tiempos de programación, lectura y verificación del programa	245
24.1.3.	Tiempo de preparación de la pieza	245
24.1.4.	Tiempo de preparación del trabajo	246
24.1.5.	Tiempo de erosión	246
24.1.6.	Tiempo total	246
24.1.7.	Cálculo de costes	246
24.1.7.1.	Costes variables	246
24.1.7.2.	Costes de los electrodos	247
24.1.7.3.	Costes fijos	247
25.	NORMAS	
	Compatibilidad electromagnética.	249
	ANEXOS DE FÓRMULAS	
	ANEXO A	251
	ANEXO B	255
	ANEXO C	257