

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

조사후 중수로 압력관 시험편 가공을 위한 핫셀용 방전가공기 개발

Development of Electric Discharge Machine to Fabricate Test Specimens from Irradiated CANDU Pressure Tube

안상복, 오완호, 김도식, 주기남, 홍권표

한국원자력연구소

요 약

조사후 중수로 압력관의 건전성 평가를 위한 각종 시험편을 핫셀 내에서 제작하기 위한 방전가공기를 개발하였다. 본 기기는 시험편 가공작업을 수행하는 핫셀내의 본체부분과 가공조건을 입력하고 제어하는 핫셀 밖의 운전반으로 구성하였다. 핫셀 내의 고방사선 환경을 고려하여 일부의 전자장치는 방사선 차폐를 보강하고 내 방사선 부품을 사용하여 본체의 방사선 손상을 최소화 하였다. 한편 핫셀 내에서 설치된 본체는 핫셀의 운전조건과 공간의 협소를 고려하여 소형화 하였으며, 특히 원통형 압력관의 다양한 위치에서 시편채취가 가능토록 360° 회전이 가능한 척(chuck) 장치를 작업테이블에 별도로 고안하여 장착하였다. 가공물의 설치, 전극의 장착 및 장치보수등 일련의 모든 작업을 원격조종기를 이용하여 핫셀내에서 가능토록 하였다.

조사후 중수로 압력관으로 부터 각종 시편을 제작하기 위한 최적의 시편 가공조건을 설정하기 위한 가공조건 설정시험을 실시하였다. 방전 가공시편의 열영향부의 깊이, 표면의 거칠기, 가공열에 의한 시편의 온도 상승, 칩수 손실량에 대한 시험을 수행하여 결정된 가공조건을 이용하여 인장, 파괴인성, 수소지연, 조직시험용 시험편등을 성공적으로 제작하였다.

Abstract

The electric discharge machine(EDM) has been specially developed to fabricate the test specimens directly from the irradiated CANDU pressure tubes in hot cell.

The EDM was composed of mainly two parts, which were main body to discharge cutting specimens in hot cell and electric and control parts installed in hot cell operating

area. The radiation resistance items and shielded electric parts of the machine were partly adopted to minimize radiation damages in hot cell. The size were compacted for hot cell space and especially the fully rotating chuck was attached to work table to fabricate specimens at various positions in tube. The whole work including the installation of irradiated tube on work table, electrode, and maintenances could be done using only manipulators.

Various performance tests, which were specimen dimension loss, discharge heating, surface roughness, HAZ size tests, were executed to get optimum discharge conditions to fabricate specimens from irradiated tubes. From these results the optimum discharge conditions were decided and adopted to fabricate specimens from irradiated CANDU pressure tubes.

1. 서 론

방전가공은 전기적인 방전현상을 인공적으로 설정하고, 그 에너지를 이용한 가공방법으로 초기에는 전극과 피가공체 금속사이에 저전압 대전류를 흘려보내 각인이나 문자를 쓰기 위해 활용되었으나, 1943년 소련의 라자네키에 의해 방전 현상을 이용하여 금속에 구멍을 뚫는데 성공한 이후부터 방전가공을 금속의 가공에 적극적으로 이용하기 시작하였다. 원자력 분야에서는 고 방사선을 내는 조사재료로부터 시편을 채취/가공하기 위하여 방전가공 방법을 널리 채택하고 있다. 특히 각종 기계/재료 시편을 모재의 변형없이 직접 가공하기 위하여 방전가공이 많은 이점을 가지며, 중수로 압력관과 같은 원통형 모재로부터 다양한 형상의 시편을 가공하기 위해서는 방전가공 방법이 필수적이다. 따라서 핫셀의 특수 조건하에서 압력관으로 부터 인장, 파괴인성, TEM, 금속조직, 수소지연, 수소량 분석등의 여러 종류의 시험편을 가공하기 위하여 방전가공의 방법을 채택하였으며 기존의 상업용 기기와는 별도로 개발하였다.

2. 장비의 주요 개발사양

핫셀용 방전가공기는 일반 산업용과는 달리 핫셀 내의 고방사선 작업환경 조건하에서 각 기능이 충분히 발휘되어야 하며 특히 조사된 피작업물에서 발생하는 방사선에 견딜 수 있어야 한다. 본 방전가공기는 가공능력 및 작업자의 편의를 도모키 위하여 방전이 이루어지는

4축을 수치 제어방식을 도입하였으며, 방전이 이루어지는 본체부, 시편가공 작업 시에 방전 유를 저장하고 공급하며 정화역활을 하는 방전액 공급 장치부 및 방전조건 및 전극 및 시편 소재의 위치이동을 제어하는 전기/제어 시스템으로 구성하였으며 주요사양은 표 1과 같으며 각 장치별 상세사양은 다음과 같다

표1. 핫셀용 방전가공기의 주요사양

부분	항목	사양	비고
본체부	무게	900 kg	
	전체크기(WxDxH)	1000x905x800 mm	
	작업테이블의 크기(XxY)	450x350 mm	
	작업전극 이송량(XxYxH)	300x200x100 mm	
	공작물 회전각	360°	
	작업대 수직이동	공압실린더 방식	
	방전전극 고정	공압식 자동척 방식	
	공작물 고정	양면 공압 조임 방식	
방전액 장치부	방전액 탱크용량	80 ℓ	
	여과방식	종이 필터 방식	
	방전액 순환용량	100 ℓ/min.	
전기 및 제어부	사용전원	440V 3Ph	
	동시제어축	4축 (XxYxZxC)	
	최소이송설정단위	1/1000 mm.	
	축 이동속도 조정량	200 mm/min.	
	위치지정	상대/절대좌표계	
	Code	G, M 방식	

가. 본체부

기기의 본체는 베드, 작업테이블, 전극의 장착부위 구성하였으며 핫셀 내에 설치된 기기 본체의 형상은 사진 1과 같다.

1) 베드

기기의 베드는 기기 본체의 컬럼, 새들, 작업탱크를 지지토록 하였으며 핫셀내의 작업테이블 위에서 각각의 위치에 따른 수평도 유지를 위하여 4개의 레벨링 블록 설치하여 수평 조절이 가능하도록 하였으며 상세한 정면의 형상은 그림 1과 같다.

2) 헤드

헤드는 전극을 서보제어 시스템을 이용하여 정확도 1/1000mm 이내로 상하/좌우로

이동하여 공작물을 가공하기 위한 부분으로서 몸체, 램(ram), 공압척으로 구성하였다. 가공 시에 전극의 이동 정밀도를 향상시키기 위하여 직류 서브모터, 볼스크류, 선형베어링을 결합하였으며 제어반에서 입력되는 신호에 의해 X, Y, Z 방향으로 선형이동토록 하였다. 공작물의 가공을 위한 전극의 이동범위는 3000(L)x200(D)x100(H)mm로서 이는 최대 가공 공작물의 크기를 의미한다. 특히 피공작물과 작업자는 최소한 2.5m이상 이격된 위치에서 원격조정기를 이용하여 피작업물의 고정하고 시편가공 위치의 결정하여야 하므로, 작업자의 작업 효율을 향상시키기 위하여 방전 전극의 가공위치를 핫셀 외부에서 작업자가 차폐창을 통하여 직접 확인이 가능토록 작업자의 눈높이와 수평선상에 일치토록 제작하였다. 램부(sliding ram)는 서보-모터의 회전에 의하여 작동되는 볼스크류와 선형베어링을 결합하여 이동하도록 하였으며, 램부의 이동 정확성을 높이기 위하여 구름베어링(cross roller bearing)을 회전운동부에 설치하였다. 원격조정기를 이용하여 용이하게 전극을 탈/부착하기 위하여 핫셀에 공급되는 6bar의 압축공기로 작동되는 특수 공압척 시스템(air chuck system)을 채택하였다.

3) 작업테이블

작업테이블은 가공할 공작물을 고정하고, 방전작업 시에 방전유가 공작물 주위를 순환하여 방전열을 냉각하고 방전시에 발생된 칩등의 불순물을 여과 필터시스템으로 이동시키는 기능을 갖는다. 피공작물의 형태에 따라 튜브와 판형 고정하기 위한 지그를 설치하였으며, 필요시에 보조 고정판(auxiliary plate)을 교체하여 별도 형상의 공작물도 고정이 가능토록 하였다. 특히 튜브형 공작물을 고정하기 위한 척(chuck)은 C-축에 대하여 360° 회전이 가능하여 원주 방향의 각각의 위치에서 시편을 채취할 수 있도록 하였다. 방전가공 시에 방전유의 외부 유출을 방지하기 위하여 별도의 이중 작업테이블 덮개가 수직으로 상하운동을 하도록 하였으며 그림 2는 작업테이블의 형상을 나타낸 것이다.

4) 전극

방전시 발생하는 열에 의한 전극의 과도한 소모를 방지하기 위하여 전극은 3% Cr-Cu합금으로 제작되었다. 방전가공에 의한 시편편의 손실치수는 고려하여 중수로 압력관 재료의 경우에는 전극을 원하는 시편 치수보다 크거나 작게 제작하였으며, 각종 시편을 제작하기 위하여 사용된 전극의 형상의 예를 사진 3에 나타내었다.

나. 작업유의 공급과 필터시스템

이 시스템은 오일펌프와 여과기로 구성되며, 방전가공을 하는 동안 계속적으로 작업유를 작업탱크에 공급하여 순환시키고 방전 가공열을 제거하며 불순물을 여과하는 기능을 한다. 이 시스템은 핫셀 내에 기기 본체의 옆에 설치하였다. 또한 핫셀 내에서 원격조정기를 사용하여 필터를 용이하게 교체할 수 있도록 공압식 필터 조임방식을 도입하여 설계되었으

며, 방전유의 순환용량은 분당 100ℓ이다.

다. 전기 및 제어시스템

기기의 주 전원은 3상 440V를 사용되며 기기의 각 부품에서 요구되는 전압으로 변압된다. 핫셀 작업구역 내에 설치된 본체의 운전장치의 형상은 사진 2와 같으며 전기와 제어시스템의 흐름도는 그림 3과 같다. 주 컴퓨터는 RS-232C 포트를 통하여 작동신호를 핫셀내의 본체에 전달하고 제어하는 기능을 한다. 제어신호는 별도의 운전 제어판 이나 키보드를 이용하여 작업자가 임의의 방전조건을 입력토록하였다. 사진 4는 기기 작동중의 모니터를 보여준다.

컴퓨터에서 입력된 명령을 전기 제어신호로 변환하기 위하여 APOS 메인보드를 채택하였다. APOS 메인보드는 입력된 신호에 따라서 위치제어신호와 작동신호로 분리되며, 분리된 신호는 펄스(pulse)와 보조 CPU 보드로 전달된다. APOS 보조 보드(sub board)는 위치제어와 인코더(encoder) 발생되는 아날로그신호(differential analog signal)를 발생시키며, 이 신호는 서보 증폭기(servo amplifier)에서 전기적인 신호로 증폭된다.

APOS 보조 보드로부터 발생된 위치제어신호에 따라서 서보모터는 요구되는 속도로 회전하며 서보모터에 장착된 인코더는 이때의 회전량을 감지하고, 이 값을 APOS 보조 보드에 전달토록 하였다.

키보드로 입력된 작동조건들은 펄스 발생기(pulse generator)에서 신호로 변환된다. 펄스 발생기는 MOS-FET를 통하여 전극에 전달되는 가공 단락시간신호(Ton-off time signal)를 발생시킨다. 이 신호가 서보모터와 전력 제어기(electric power controller)로 보내져서 방전 on-off 시간이 결정된다. 또한 펄스 발생기의 또 다른 기능은 피드백 신호(feed back signal)로부터 비정상적인 방전을 감지토록하였다.

3. 최적 시편 가공조건 결정시험

조사후 중수로 압력관으로부터 시편을 채취/가공하기 위하여 다양한 방전가공 조건에 따른 채취 시험편의 가공상태를 검사하였다. 시험을 통하여 최적의 방전가공 조건을 결정하였으며 최적의 시험편을 얻기위한 방전전극을 제작하였다.

가. 치수변화

방전가공시 공작물은 방전 스파크(spark)에 의하여 손실되므로, 정확한 치수의 시험편을 제작하기 위해서는 방전 손실 치수를 고려하여 전극을 제작하여야 한다. 방전시의 치수변화를 검토하기 위하여 직경 5mm인 봉형 전극을 다양한 조건에서 방전가공을 실시한 후에 가공된 원형의 직경을 측정하였다. 방전 후 공작물에 가공된 원공의 직경은 입력 전류

4~15Ampere의 조건에서 5.16~5.22mm 이었다. 이는 방전가공 시에 시험편의 크기는 방전에 의한 공작물의 손실치수가 단면을 기준으로 약 0.08~0.11mm에 달하며 실제 시편을 제작 시에는 이 치수를 사전에 고려하여 전극의 크기를 결정해야 할 것이다.

나. 표면거칠기

시험편의 표면거칠기는 재료의 기계적 특성 값에 영향을 미치므로, 방전가공에 의하여 생성되는 표면거칠기의 정도를 검토하였다. 이를 위하여 여러 가지 가공조건 하에서 표면거칠기를 측정하였다. 방전가공을 위한 전류는 4~15A 그리고 방전 간격(Ton time)은 $2\mu\text{sec}$ 로 하였다. 그림 4는 표면거칠기에 대한 전류의 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 평균 표면거칠기(R_a)는 전류의 증가에 따라 완만하게 증가하지만, 최대 표면거칠기(R_{max})는 $30\mu\text{m}$ 로부터 $60\mu\text{m}$ 까지 급격하게 증가함을 보인다.

다. 열영향층

방전가공중 공작물은 전기 스파크에 의한 열의 영향을 받는다. 이 열은 재료에 주위에 흐르는 냉각된 방전유의 영향으로 시험편의 표면에 담금질(thermal quenching)의 효과를 준다. 이로 인하여 시험편의 방전면은 경화되며, 재료의 기계적 또는 조직적(metallurgical) 특성이 변화될 수도 있다[1,2]. 따라서 공작물에 미치는 방전열의 영향을 검토하기 위하여 다양한 방전조건으로 가공된 시험편의 방전면으로 부터 깊이방향으로 Vickers 미소경도시험을 수행하였으며, 이의 결과는 사진 5 및 그림 5와 같다. 가공조건은 전류가 6A, 방전간격은 $2\mu\text{sec}$ Ton 그리고 $6\mu\text{sec}$ Toff 로 하였다. 이 그림에서 Vickers 경도 값은 가공면으로 부터 $100\mu\text{m}$ 깊이까지 급격히 감소하였지만, 그 이상의 깊이에서는 원 재료의 경도 값을 보이고 있다. 이로부터 열영향층의 깊이는 약 $100\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

라. 가공 열(heat-up temperature)

방전가공시 전기에너지는 공작물과 전극사이의 스파크에 의하여 열에너지로 변환된다. 발생된 열은 시험편의 온도를 상승시키며, 이로 인하여 재료의 조직 및 표면조건 등이 영향을 받게 된다. 방전시 가공부의 온도변화를 측정하기 위하여 그림 6과 같이 가공부에서 1mm 떨어진 위치에 열전대를 부착하고, 가공하는 동안 공작물의 온도를 연속적으로 기록하였다. 그림 7은 시간에 따른 시험편의 온도변화를 나타낸 것이다. 가공부의 온도는 방전 초기에 급격하게 상승하며, 그 후에는 서서히 최대 온도에 도달한다. 중수로 압력관의 경우 최대 온도는 약 $80\sim 90^\circ\text{C}$ 이다. 이 온도는 Zr-2.5%Nb 합금의 재결정 온도보다 낮으므로 재료의 기계적 특성에 영향을 주지 않으리라고 사료된다.

4. 결 론

조사후 중수로 압력관으로부터 각종 기계/재료 시험편을 채취하기 위한 방전가공기(EDM)를 개발하였으며, 다양한 방전가공 조건의 시험을 통하여 최적의 가공조건을 결정하였다. 개발된 방전 가공기를 이용하여 중수로 압력관을 대상으로 방전조건에 따른 시험편의 가공영향을 파악하기 위한 다양한 시험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다. 방전용 전극은 요구되는 시편의 치수보다 방전 칫수 손실을 고려하여 한면을 기준으로 약 0.08~0.11mm 정도 크게 제작되어야하며, 가공된 방전 표면의 최대 표면거칠기는 30~60 μm 에 이르며, 열영향층의 깊이는 약 100 μm 정도 이었으며 그리고 시험편의 온도는 최대 80~90 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 이의 모든 조건을 고려하여 결정된 최적 방전가공조건의 전류는 6~7A, 그리고 방전간격은 Ton time은 2 μs , Toff time은 6 μs 로 이었다. 한편 이와 같은 방전조건 하에서 한 개의 시험편을 가공하기 위하여 약 3~3.5시간이 소요되었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업중 중수로압력관재료개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Fuller, J. E., 1991, "The EDM Surface : Topography, Chemistry, and Metallurgy," RFP-4498.
2. Fuller, J. E., 1990, "Metallurgical Effects from Conventional EDM, and Electro-chemical Drilling," RFP-3066.
3. 유제구 "방전가공" 대광서림, 1988
4. 서석용외 "탁상용 방전가공기개발" KAERI-RR-1033/91, 1991

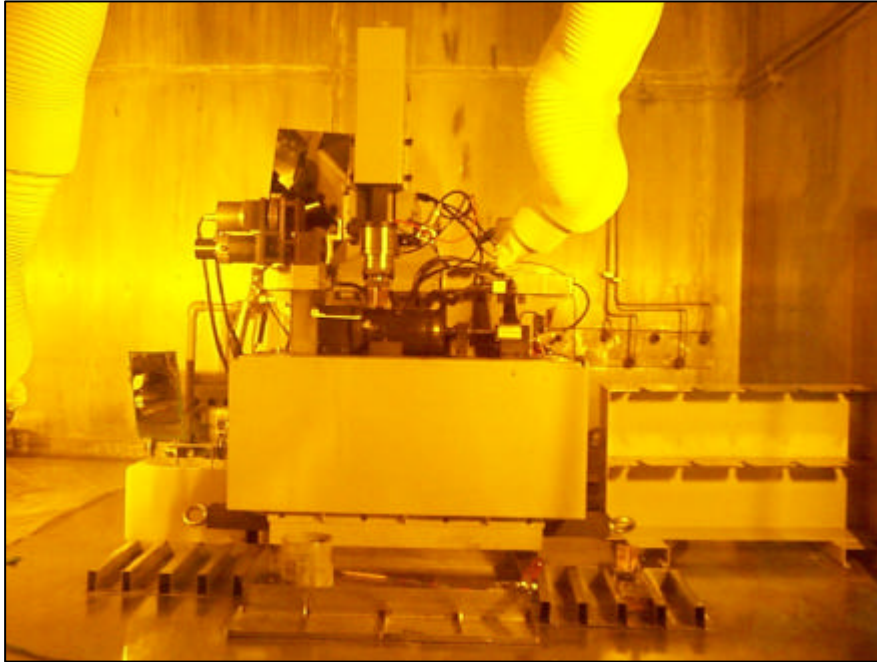


Photo 1. The EDM view of main body in hot cell

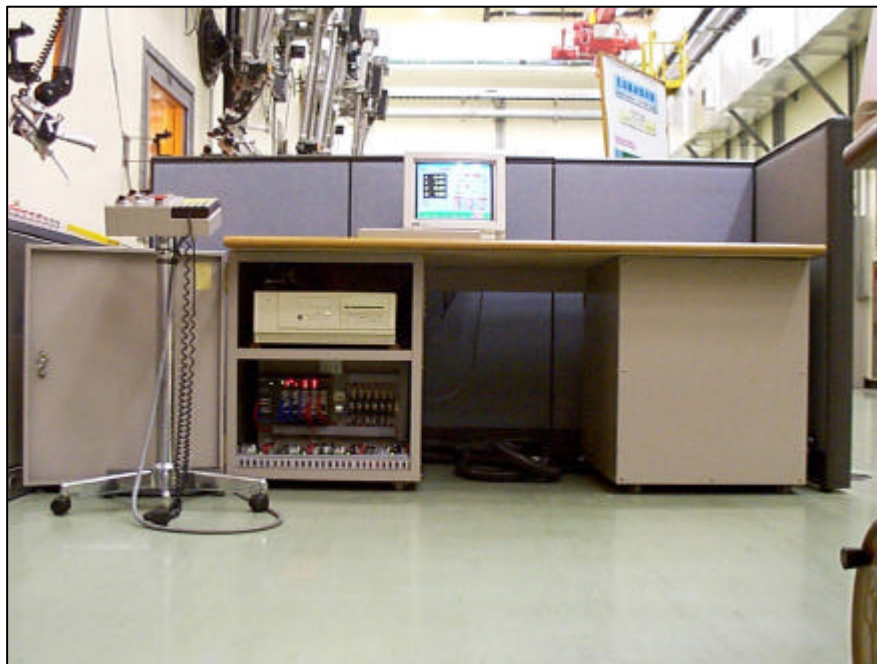


Photo 2. The electric control part of EDM in operating area

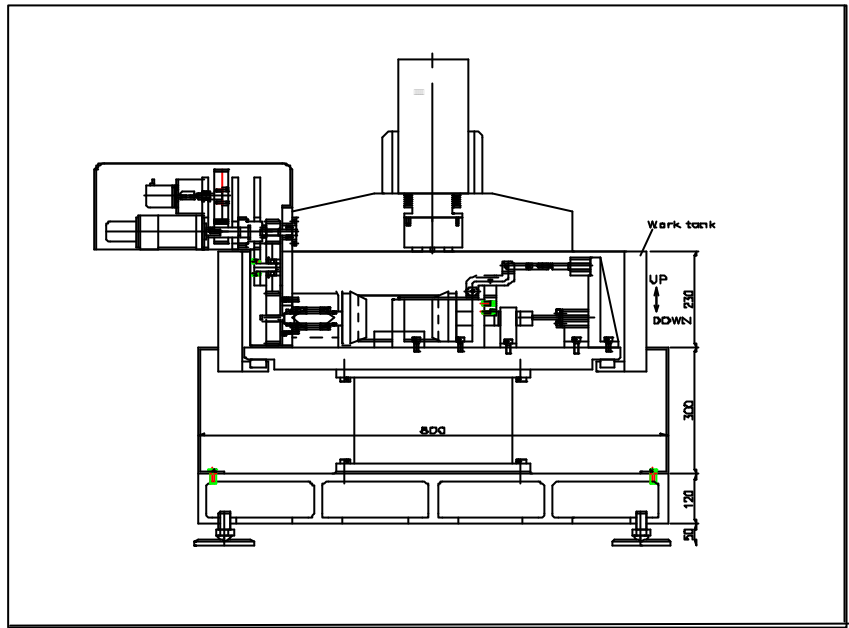


Figure 1. The layout of main body

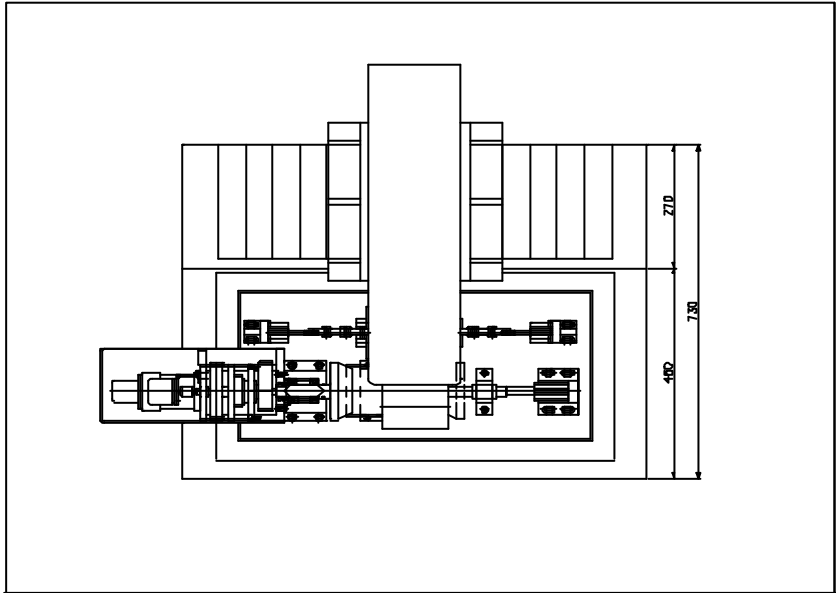


Figure 2. The layout of the working table box

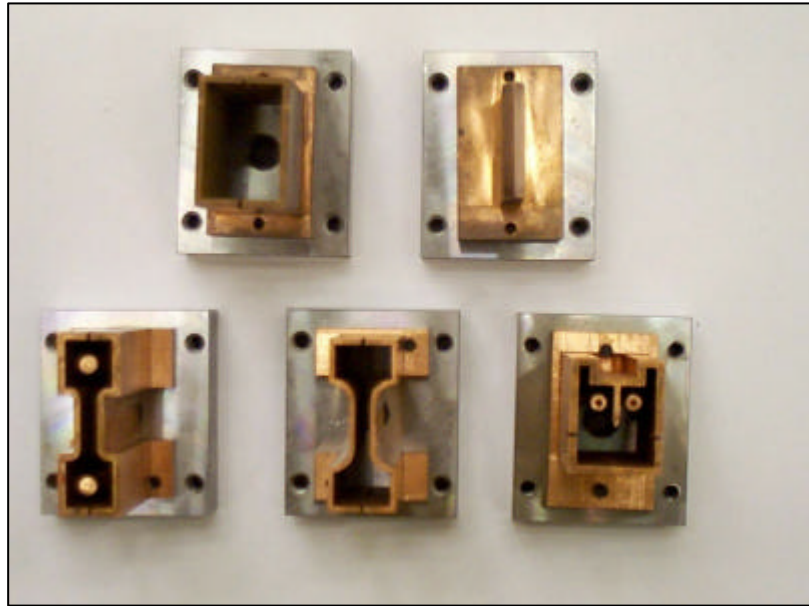


Photo 3. The various electrode for EDM

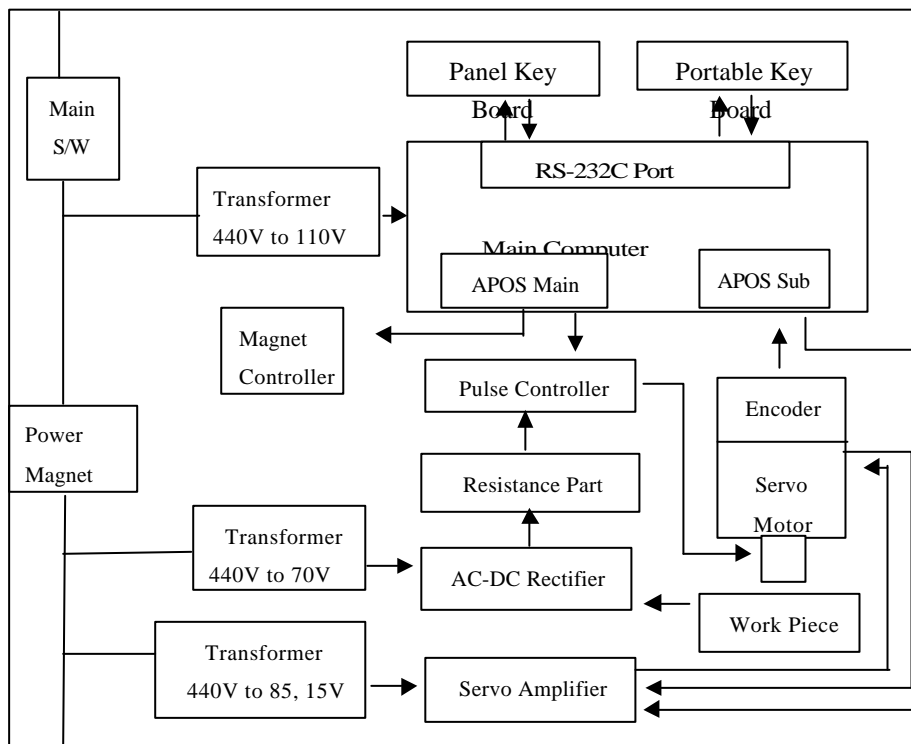


Figure 3. The flow chart of electric and control system for EDM



Photo 4. The computer monitor view of machining conditions

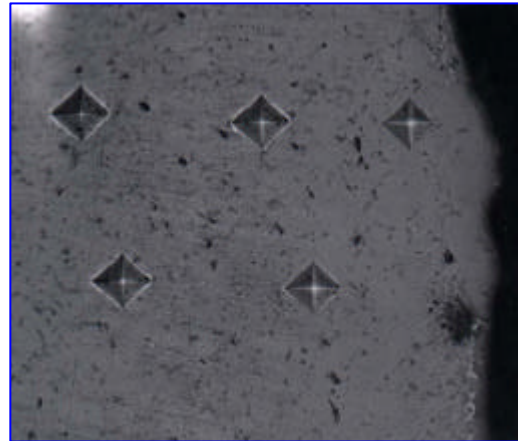


Photo 5. The indentation marks of micro hardness test surface

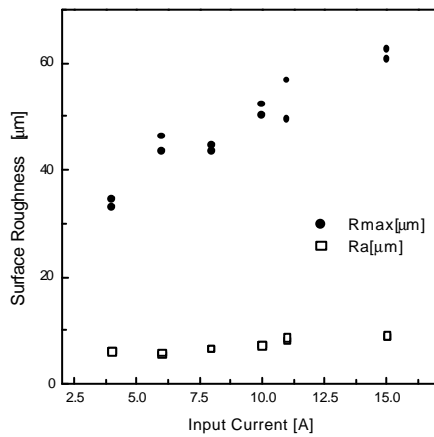


Figure 4. The maximum and average roughness of discharged surface

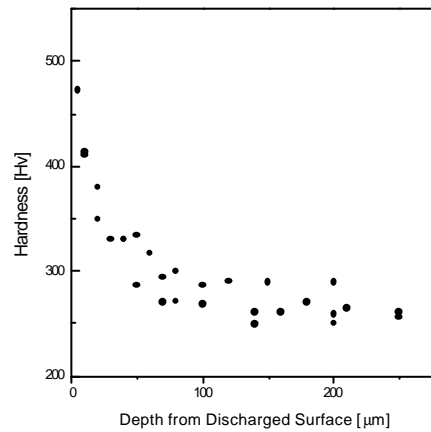


Figure 5. The hardness variation with depth from discharged surface

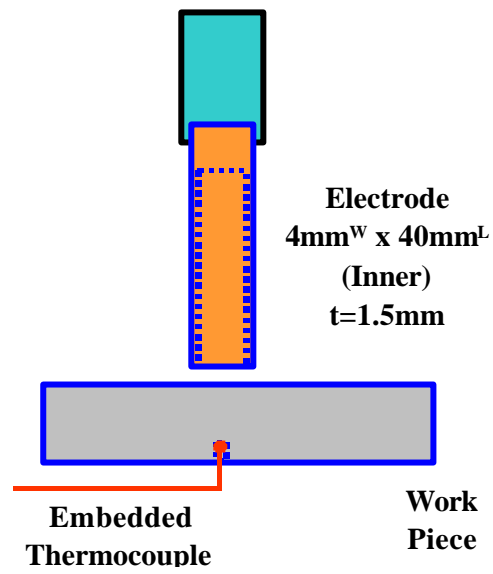


Figure 6. The apparatus of embedded thermocouple in cutting specimen

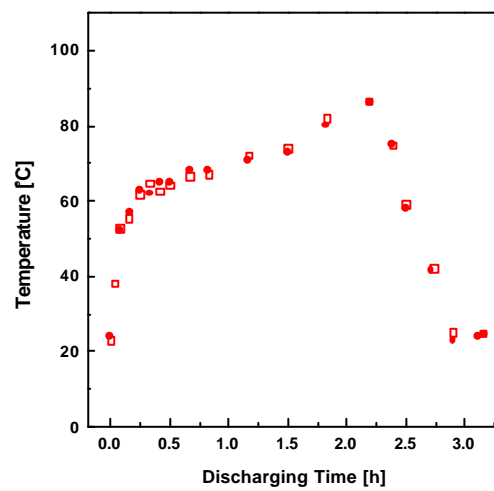


Figure 7. Temperature variation with discharging time