

STD11 와이어 방전가공면의 마찰특성

김영욱 · 조성산*

홍익대학교 대학원 기계공학과

*홍익대학교 기계공학과

Frictional Characteristics of Wire Electric Discharge Machined STD11 Surface

Young-Wook Kim and Sung-San Cho*

Graduate School, Hongik Univ.

*Department of Mechanical Engineering, Hongik Univ.

Abstract – Frictional behavior of wire electric discharge machined surfaces of spheroidized annealed STD11 steel was investigated. The surfaces were produced with a various series of finish cuts where pulse energy was reduced with increase in the number of finish cuts. Roughness and micro-hardness of the surfaces were also measured. It is observed that the increase in the number of finish cuts produces the surface exhibiting lower frictional resistance followed by higher resistance after considerable wear. Effects of finish cuts on the friction characteristics are discussed with the aid of roughness and micro-hardness of the surfaces.

Key words – Wire electric discharge machining, friction, roughness, micro-hardness.

1. 서 론

정밀 금형 및 부품 제작에 많이 이용되는 와이어 방전가공은 와이어와 가공물 사이의 간극에서 방전을 발생시켜 가공물 표면의 재료를 용융 및 기화시킨 후, 방전이 중단되었을 때 발생하는 압력파로 용융 및 기화된 재료의 일부를 가공물로부터 분리시키는 가공법이다[1]. 와이어 방전가공 과정에서 다량의 열에너지가 가공물로 전달되므로, 가공면에는 변질층이 생성된다. 즉, 가공면 부근의 재료는 모재(bulk material)와 다른 기계 및 물리적 성질을 나타내며 분화구(crater)형상의 표면 요철, 미세균열 및 잔류응력이 존재한다.

철강재의 방전가공시 가공면 성질에 관한 연구[2-11]에 의하면, 가공면의 경도 변화는 가공액과 가공물 사이에서 원자, 특히 탄소의 이동에 의한 가공면의 조성 변화와 가열 후 냉각되는 과정에서 발생하는 상 변화에 의해 발생한다. 표면 요철은 방전시 발생하는 국부적 플라즈마 채널에 의해 가공물 표면에 생성되는 분화구 형상의 용융부 내 재료의 일부가 압

력파에 의해 제거되는 과정에서 생성된다. 잔류응력은 주로 가열 후 냉각과정에서 발생하는 수축률의 차이에 의해 발생하며, 표면부에는 인장의 잔류응력이 존재한다. 미세균열은 크레이터 형성과정에서 생성되는 국부적 함몰부와 과도한 인장 잔류응력에 의해 가공면에 수직인 방향으로 생성되며, 전해부식에 의해 성장한다. 상기한 기존의 연구결과에 의하면 방전에너지가 가공면의 거칠기와 변질층의 두께 및 성질에 지대한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

일반적으로 제품의 성능 및 수명에 악영향을 미치는 변질층을 최소화하기 위해서는 방전에너지를 감소시키는 것이 바람직하지만, 이는 가공속도의 저하를 수반한다. 따라서, 와이어 방전가공은 황삭가공(rough cut) 후 다듬질 가공(finish cut)을 수행하는 방식을 채택한다. 황삭가공에서는 다량의 방전에너지를 사용하여 가공속도를 증대시키고, 다듬질 가공에서는 방전에너지를 감소시키면서 여러 차례 수행하여 변질층의 두께와 가공면 거칠기를 향상시킨다.

금형과 같이 사용시 접촉상태에서 상대운동이 발생

하는 제품의 경우, 마찰특성은 제품의 수명 및 성능을 결정짓는 주요한 성질이다. 일반적으로 마찰특성은 재료 표면의 기계 및 물리적 성질과 결합이 복합적으로 작용하면서 발생한다. 기존의 연구는 주로 가공면에 존재하는 변질층의 성질을 규명하는데 국한되었고, 마찰특성에 관한 연구는 미흡하다. 따라서, 본 연구에서는 와이어 방전 황삭 및 다듬질 가공으로 생성된 가공면의 마찰특성을 실험을 통해 관찰하고, 마찰특성에 영향을 미치는 주요 인자인 가공면 거칠기와 마이크로 경도를 측정하여 상호 연관성을 규명하였다.

2. 실험 방법

2-1. 와이어 방전가공

와이어 방전가공은 틸새가공(slitting cutting) 방식의 황삭가공 후, 측면가공(side cutting) 방식의 다듬질을 3회 수행하였다. 다듬질 횟수에 따른 가공면의 성질 변화를 고찰하기 위해 다듬질을 수행하지 않는 경우와 1회, 2회, 3회의 다듬질을 수행하는 경우로 총 4가지 가공방식을 채택하였다. Table 1은 기계 제작자가 추천한 가공조건을 근간으로 선정된 황삭 및 다듬질 조건을 보여준다. 방전에너지는 황삭의 경우가 가장 크고 다듬질 순번이 증가할수록 감소한다. 황삭 및 1차 다듬질에서는 삼각 전류파형을 사용하였으며 2차 및 3차 다듬질에서는 사각 전류파형을 사용하였다. Sodik A320 와이어 방전가공기에서 직경 0.2 mm의 황동 와이어를 이용하여 두께 30 mm의 구

Table 1. WEDM conditions

	Roughing	Finishing		
		1st	2nd	3rd
Discharge Voltage (V)	270	80	60	60
Peak Current (A)	200	45	9	3
Pulse On Time (μm)	0.5	0.6	1.5	0.5
Pulse Off Time (μm)	9	5.5	6.5	1
Pulse Energy (mJ)	27.34	2.16	0.81	0.09
Servo Reference Voltage (V)	16	52	28	21
Servo Feed (mm/min)	5	10	10	10
Wire Offset (μm)	-	124	114	109
Wire Tension (gf)	1300	1300	1300	1300
Wire Speed (m/min)	11	11	11	11
Fluid Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	5×10^4	5×10^4	5×10^4	5×10^4

상화 및 연화처리 된 고합금 공구강 STD11을 탈이온수 내에서 가공하였다.

2-2. 가공면 특성 측정

각각의 가공방식으로 생성된 가공면의 거칠기, 마이크로 경도 및 마찰계수를 측정하였다. 각 경우에 대해 4개의 시편을 준비하여 측정하고 평균 및 표준편차를 산출하였다. 가공면 거칠기는 측정 방식의 Kosaka SE-3400 표면거칠기 측정기로 측정하였다. 마찰특성에 영향을 미치는 가공면 거칠기의 방향성을 고려하기 위해 서로 수직관계에 있는 테이블 및 와이어 이송방향으로 거칠기를 측정하였다.

변질층 내의 경도는 가공면으로부터 깊이 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100 μm 에서 Kosaka EF-150S 비커스 마이크로 경도측정기로 측정하였다. 경도 측정은 시편 절단용 다이아몬드 절단기로 가공면에 수직 방향으로 절단된 면에서 수행하였다. 절단 과정에서 발생하는 힘과 열에 의해 생성되는 절단면 변질층을 제거하고, 동시에 경도 측정시 절단면 거칠기의 영향을 최소화하기 위해 폴리싱을 수행하였다. 절단면의 경도가 모재의 경도와 동일해질 때까지 폴리싱을 수행하여 변질층의 제거 여부를 확인하였으며, 폴리싱된 절단면의 중심선 평균 거칠기는 0.3 μm 내외로 유지하였다.

가공면의 마찰계수는 Ball-on-Flat 방식의 Orientec EFM-III-F 마찰마멸측정기로 측정하였다. 가공면과 마찰을 일으키는 볼은 직경 6 mm의 베어링 제작용 강구를 사용하였다. 시간에 따른 마찰계수의 변화를 짧은 시간에 관찰하기 위해, 비교적 가혹한 마찰조건인 수직력 5 kgf와 마찰속도 50 mm/s에서 마찰계수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 가공면 거칠기

Fig. 1은 최종 다듬질에서 사용된 펄스 당 방전에너지와 가공면 거칠기의 관계를 보여준다. 방전에너지가 감소할수록 중심선 평균 거칠기와 최대높이 거칠기 모두 지속적으로 감소한다. 이 결과는 가공면 거칠기와 밀접한 관계가 있는 크레이터의 크기와 방전에너지의 비례관계로 설명이 가능하다. 방전에너지와 가공면 거칠기의 비례관계, 즉 선의 기울기는 비교적 큰 에너지를 사용하는 경우와 적은 에너지를

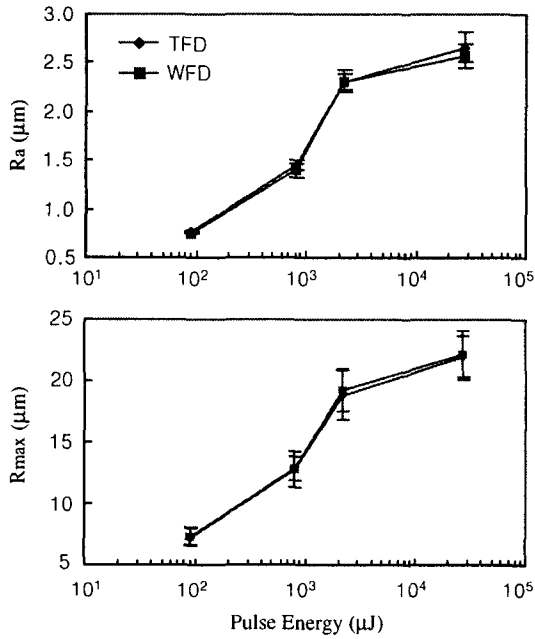


Fig. 1. Variation of machined surface roughness with pulse energy. TFD and WFD represent table and wire feed directions, respectively.

사용하는 경우에서 차이를 나타낸다. 큰 에너지는 삼각 전류파형을 사용한 경우이고 적은 에너지는 사각 전류파형을 사용한 경우이므로, 전류파형이 가공면 거칠기에 영향을 미치는 것으로 추정된다. 거칠기의 표준편차도 방전에너지가 감소할수록 감소하므로, 방전 에너지를 감소시킬수록 가공면의 균일성도 향상될 수 있다.

동일 가공조건에서 생성된 가공면의 와이어 이송 방향과 가공물 이송방향의 거칠기는 미미한 차이를 나타낸다. 방전은 방전조건을 만족시키는 와이어와 가공면 간극내의 특정 위치에서 근사적으로 원기둥형상인 플라즈마 채널의 국부적 생성 및 확장 과정이므로, 실험 결과와 같이 방향성이 없는 가공면이 생성된 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서 사용된 Ball-on-Flat 방식의 마찰실험에서 강구와 접촉된 상태에서 가공면의 회전운동에 의한 마찰방향의 변화는 가공면의 마찰특성에 미미한 영향을 미침을 예견할 수 있다.

3-2. 경도

Fig. 2는 가공면에서 깊이에 따른 비커스 마이크로 경도값의 변화를 보여준다. 경도값은 표면에서 가장

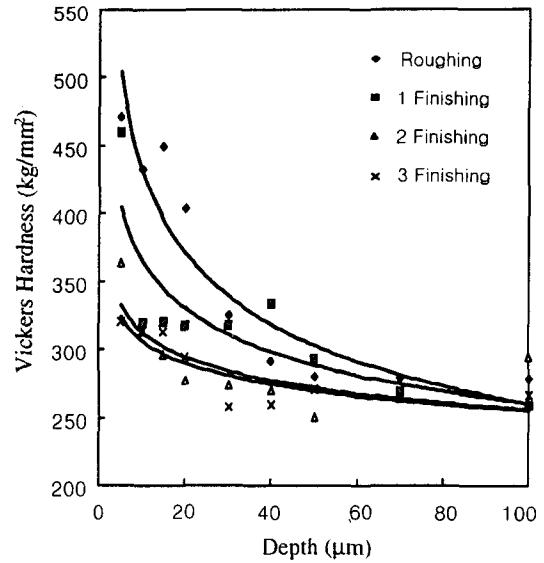


Fig. 2. Variation of vickers micro-hardness with depth.

크며 깊이가 깊어질수록 감소하여 모재의 경도값인 260 kg/mm²에 접근한다. 탈이온수 내에서 연화처리된 강을 와이어 방전가공할 때 가공면 경도값의 변화는 주로 다음 현상에 의해 결정된다[7,10]. 첫째, 가공물 내에 존재하던 탄소가 확산에 의해 가공액으로 이동하면서 가공면 부위의 탄소함량이 감소하여 가공면의 경도값은 낮아진다. 둘째, 연화처리된 가공물의 경우 용융 및 가열된 가공물이 탈이온수 내에서 급속히 응고 및 냉각되는 과정에서 담금질 효과가 발생하여 가공면의 경도값은 증가한다. 본 실험에서는 구상화 및 연화처리된 가공물을 사용하였으므로 표면경도의 증가는 담금질 효과에서 기인하였음을 유추할 수 있으며, 이 결과는 기존의 결과와 일치한다.

Fig. 2는 다듬질 횟수가 증가할수록 표면의 경도값은 감소하며 경도값이 증가된 표면층, 즉 변질층의 두께도 감소함을 보여준다. 이 결과는 다듬질 횟수가 증가할수록 점차적으로 방전 에너지를 감소시키므로 열영향부의 두께가 감소하기 때문이다.

3-3. 마찰계수

Fig. 3은 가공면의 시간에 따른 마찰계수의 변화를 보여준다. 3회 다듬질 면의 중심선 평균 거칠기가 약 0.76 μm이고 다듬질 횟수가 증가할수록 가공면의 거칠기, 표면경도, 변질층 두께는 감소하므로, 중심선

평균 거칠기가 0.3 μm 내외이고 변질층이 없는 모재의 마찰계수를 비교의 목적으로 첨부하였다. 모든 시편의 마찰계수는 시간이 경과하면서 증가한다. 황삭 가공면의 마찰계수는 초기에 상대적으로 가파르게 증가하다가 약 2분 후부터 완만한 증가를 지속한다. 모재의 마찰계수는 초기에 완만한 증가추세를 보이다가 약 4분에서 6분 사이에 급격히 증가한 후 비교적 일정한 값을 유지한다. 다듬질 면의 마찰계수는 모재의 마찰계수와 유사한 변화 특성을 나타낸다. 그러나, 마찰계수의 급격한 증가는 약 2-3분에서 약 9-10분 사이에 발생하며, 다듬질 횟수가 증가할수록 다듬질 면은 모재와 더욱 유사한 마찰계수 변화 특성을 나타낸다. 마찰면을 육안으로 관찰한 결과, 황삭 가공면의 초기 가파른 마찰계수 증가 후와 다듬질 면의 급격한 증가 후에 마찰면에는 비교적 다량의 마멸분이 응착되어 있었다. 따라서, 상대적으로 매끄러운 다듬질 면은 초기에 미미한 마멸분의 생성으로 낮은 마찰계수값을 유지하다가 다량의 마멸분이 생성되면서 마찰계수가 급격히 증가한다. 한편, 거친 황삭가공면은 초기부터 다량의 마찰분이 생성되기 때문에 초기부터 마찰계수가 급격히 증가하는 것으로 사료된다. 마찰실험 종료시점의 큰 마찰계수값은 마찰면에 응착된 마멸분에 의한 거칠기 증가에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 한편, 다듬질 횟수가 증가할수록 초기 마찰계수는 감소하지만 가공면이 마멸되면서 다듬질 횟수가 적은 면이 낮은 마찰저항을 나타낸다.

본 실험은 화학적 조성이 동일한 재료를 대상으로

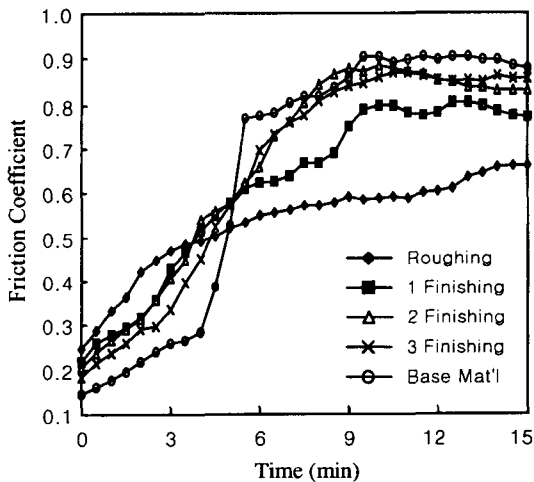


Fig. 3. Variation of friction coefficient with time.

수행되었으므로, 거칠기와 경도가 마찰특성에 영향을 미치는 주요 인자이다. Fig. 4는 깊이 20 μm 의 경도값(Fig. 2)과 마찰시간 15분에서의 마찰계수(Fig. 3)의 관계를 보여준다. 15분의 마찰실험 후 마멸부의 깊이는 15-20 μm 의 범위에 있었으므로, Fig. 4에서 깊이 20 μm 의 경도값을 사용하였다. 경도값과 마찰계수는 반비례 관계를 나타낸다. 15분의 마찰실험 후 마찰면에서 방전가공면의 특성인 크레이터의 흔적을 발견할 수 없었고, 중심선 평균거칠기가 3 μm 이하인 가공면에 깊이 15-20 μm 범위의 마멸이 발생하였으므로, 마찰시간 15분 시점의 마찰은 초기 가공면 거칠기의 영향이 거의 배제된 상태로 볼 수 있다. 15분의 마찰실험 후 마찰면에는 다량의 마멸분이 존재하지만 형상은 모든 시편에서 거의 유사하였다. 또한 마멸량과 다듬질 횟수간의 연관성을 확인할 수 없었다. 따라서, 마찰시간 15분에서 마찰면에 응착된 마멸분이 마찰계수에 미치는 영향이 동일하다고 가정할 때 마찰계수의 차이는 주로 마찰면의 경도 차이에서 기인하는 것으로 추정된다. 즉, 와이어 방전 가공으로 생성된 고풍금 공구강의 가공면은 경도가 높을수록 마찰저항이 낮은 것으로 추정된다. 일반적으로 경도와 마찰계수의 관계는 확실히 규명되지 않은 상태이므로, 본 실험의 결과를 규명하기 위해서는 보다 심도 깊은 연구가 필요하다.

Fig. 5는 가공면 거칠기와 초기 마찰계수의 관계를 보여준다. 가공면 거칠기가 증가할수록 마찰계수는

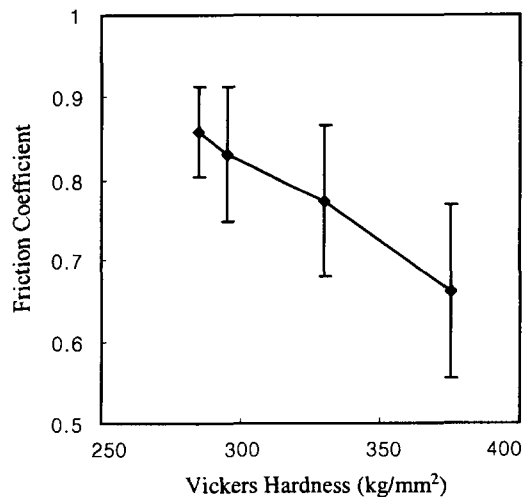


Fig. 4. Relation between hardness at the depth of 20 μm and friction coefficient at the sliding time of 15 min.

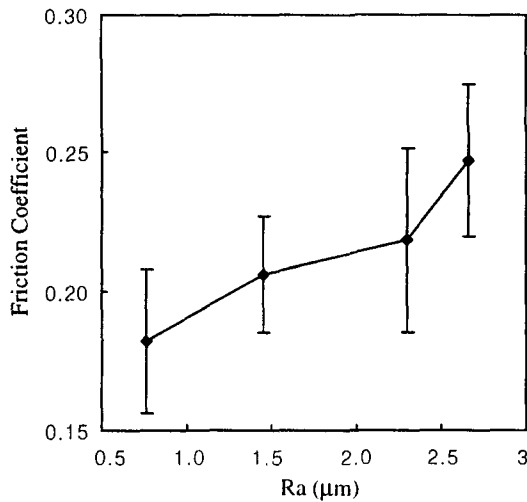


Fig. 5. Relation between machined surface roughness and friction coefficient at the beginning of sliding test.

증가한다. 이 결과는 강의 경우 표면 거칠기와 마찰계수는 비례관계에 있다는 기존의 연구 결과[12]와 일치한다. 앞에서 기술된 고찰에 근거하여 와이어 방전가공면의 경도 증가는 마찰계수를 감소시킨다고 가정할 때, 가공면의 경도는 다듬질 횟수가 증가할수록 감소하므로 다듬질 횟수의 증가에 따른 초기 마찰계수의 감소는 주로 가공면 거칠기의 감소에 의해 발생한 것으로 추정된다. 따라서, 마찰계수는 주로 표면 거칠기의 영향을 받고, 부가적으로 경도의 영향을 받는 것으로 추정된다. 3회 다듬질 면이 2회 다듬질 면에 비해 표면 거칠기는 낮지만(Fig. 1), 깊이에 따른 경도 분포는 유사하므로(Fig. 2), 이 결과를 적용하면 마찰시간 5분 이전에는 표면 거칠기의 차이에 의해 마찰계수의 차이가 발생하고, 5분 이후에는 표면 거칠기의 차이가 사라지면서 경도가 유사한 면이 마찰을 일으키므로 마찰계수가 유사한 변화를 나타내는 것(Fig. 3)으로 판단된다.

이상의 고찰은 종합하면, 다듬질 횟수를 증가시키면 표면 거칠기와 경도 모두 낮은 면이 생성되고, 그 결과 초기 마찰저항은 낮지만 마멸이 진행되면서 마찰저항이 상대적으로 큰 면이 생성된다. 일반적으로 와이어 방전가공은 가공속도가 매우 느리므로(본 실험의 경우 1차 다듬질 속도는 6-7 mm/min, 2차와 3차 다듬질 속도는 9-10 mm/min) 다듬질 횟수를 증가시킬수록 가공비용은 크게 증가하지만, 다듬질 면은 초기 마찰저항을 제외한다면 전반적으로 높은 마찰

저항을 나타내므로, 다듬질 횟수의 선정에 신중한 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

연화처리된 고합금 공구강을 탈이온수 내에서 와이어 방전가공할 때, 방전에너지 감소를 시키면서 여러 차례의 다듬질을 수행해서 얻어지는 가공면의 마찰특성을 실험을 통해 관찰하고 가공면의 거칠기 및 경도와와의 관계를 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

다듬질 횟수를 증가시키면 표면 거칠기와 경도 모두 낮은 면이 생성되고, 그 결과 초기 마찰저항은 낮지만 마멸이 진행되면서 초기 가공면의 요철이 제거되면 마찰저항이 상대적으로 큰 면이 생성된다. 일반적으로 와이어 방전 다듬질 횟수를 증가시킬수록 가공비용은 크게 증가하므로 다듬질 횟수의 선정에 신중한 고려가 필요하다.

참고문헌

1. McGeough, J. A., *Advanced Methods of Machining*, Chapman & Hall, Chap. 6, pp. 128-152, Chapman and Hall, London, 1988.
2. Field, M., and Kahles, J. F., "Review of Surface Integrity of Machined Components," *Annals of the CIRP*, Vol. 20, pp. 153-163, 1971.
3. Field, M., and Kahles, J. F., "Review of Surface Integrity of Machined Components," *Annals of the CIRP*, Vol. 20, pp. 153-163, 1971.
4. Tonshoff, H. K., and Brinksmeier, E., "Determination of the Mechanical and Thermal Influences on Machined Surfaces by Microhardness and Residual Stress Analysis," *Annals of the CIRP*, Vol. 29, pp. 519-530, 1980.
5. Rajurkar, K. P., "Surface Damage and Shock Waves in EDM," *Proc. 13th NAMRC*, pp. 379-385, 1985.
6. Masui, K., and Sone, T., "The Electrolytic Corrosion on Wire-EDM'd Surface," *JSPE*, Vol. 54, No. 6, pp. 160-165, 1988.
7. Masui, K., Sone, T., and Demizu, K., "The Microhardness on Wire-EDM'd Surface," *JSPE*, Vol. 57, No. 1, pp. 138-143, 1991.
8. Ogata, I., Mukoyama, Y., and Hihara, M., "Study on Residual Stress of Wire-EDM'd Surface (1st Report): Relationship between Machining Condition and Stress Distribution," *JSPE*, Vol. 57, No. 1, pp. 144-149, 1991.
9. Kruth, J.-P., Stevens, L., Froyen, L., and Lauwers,

- B., "Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 169-172, 1995.
10. Soni, J. S., and Chakraverti, G., "Experimental Investigation on Migration of Material During EDM of Die Steel (T215Cr12)," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 439-451, 1996.
 11. Rebelo, J. C., Dias, A. M., Kremer, D., and Lebrun, J. C., "Influence of EDM Pulse Energy on the Surface Integrity of Martensitic Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, pp. 90-96, 1998.
 12. Kuora, M. M., "The Effect of Surface Texture on Friction Mechanisms," *Wear*, Vol. 63, pp. 1-12, 1980.