

Copper 소재의 마이크로 엔드 밀링 공정에서 공구마모 특성 및 예측 모델에 관한 연구

A Study on Tool Wear Characteristics and Predictive Modeling in Copper Micro End Milling

이정희* · 곽재섭* †
Jung-Hee Lee* and Jae-Seob Kwak* †

(Received 28 July 2025, Revision received 27 October 2025, Accepted 28 October 2025)

초록 : 본 연구는 Copper 소재의 마이크로 밀링 공정에서 공정변수에 따른 공구마모 특성을 정량적으로 분석하고, 공구마모를 최소화하는 최적 공정조건과 예측 모델을 도출하고자 한다. 이송속도, 회전속도, 절삭깊이를 변수로 설정하여 실험을 수행한 결과, 최대 및 최소 공구마모량은 각각 57.6 μm 와 26.1 μm 로 나타났다. S/N비 및 분산분석 결과, 회전속도가 기여율 80.8%로 가장 큰 영향을 미치는 공정변수로 확인되었으며, 이송속도의 영향은 0.3%로 미미하였다. 도출된 최적조건인 8 mm/min, 6,000 rpm, 20 μm 에서 검증 실험을 수행한 결과, 최소 공구마모량을 나타내는 실험조건보다 공구 수명이 약 29% 향상되었다. 또한 실험 데이터를 기반으로 다중 선형 회귀분석을 수행하여 공구마모 예측식을 도출하였다. 회귀모델은 결정계수 R^2 0.70, 유의수준 90% 이상을 나타냄으로써 통계적으로 유의한 예측력을 가짐을 확인할 수 있었다.

키워드 : 마이크로 밀링, 공구 마모 특성, 다구찌 실험계획법, 회귀 예측 모델

Abstract : As the demand for high-precision machining and superior surface quality increases, micro milling has become a key technique for machining freeform geometries at the micro scale. This study quantitatively investigates tool wear characteristics in the micro-milling under varying process parameters to identify optimal condition and develop a predictive model. Experimental results showed that spindle speed had the most significant effect on tool wear with contribution of 80.8%, while feed rate showed only 0.3%. The optimal condition, 8 mm/min, 6,000 rpm, 20 μm , improved tool life by 29% compared to the best result in experimental cases. Additionally, a multiple regression model for tool wear prediction demonstrated statistical significance and predictive capability with R^2 of 0.70 and average deviation of 0.036.

Key Words : Micro Milling, Tool Wear Characteristic, Taguchi Method, Regression-based Predictive Model

* † 곽재섭(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) : 교수, 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공

E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6139

* 이정희(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) : 연구원, 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공

* † Jae-Seob Kwak(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) : Professor, Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6139

* Jung-Hee Lee(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) : Researcher, Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

1. 서 론

최근 정밀 제조 산업에서는 소형화된 장치의 활용이 증가함에 따라 마이크로 스케일의 초정밀 가공 기술에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 마이크로 금형, 바이오 의료, 항공우주, 전자 산업 등의 분야에서 중요성이 강조되고 있다. 이에 대응하기 위하여 마이크로 엔드밀링 가공은 기존 가공 기술 대비 높은 정밀도를 기반으로 복잡한 형상이 가공 가능하다는 이점이 있어 초정밀/초미세 가공 기술이 요구되는 분야에 널리 활용되고 있다.^{1,2)}

일반적인 매크로 엔드밀링에서는 절삭력 분석, 절삭 메커니즘 모델링, 공구 파손 탐지 등의 다양한 연구가 진행되어 왔다. Zhu와 Zhang³⁾은 볼 엔드밀의 플랭크 마모를 예측하기 위하여 절삭력과 가변 계수를 기반으로 공구마모 예측 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 검증 실험 결과, 최대 오차는 1.5% 이내로 우수한 적합도를 나타내었다. Zhang⁴⁾ 등은 절삭력, 진동, 전류 데이터를 기반으로 공구마모 및 파손에 대한 모니터링 기법을 제안하였다. 이론적 분석과 실험 검증을 바탕으로 제안한 방법이 우수함을 검증하였고, 향후 산업계 적용에 있어 유용한 가이드라인이 될 것으로 판단된다. Manimaran⁵⁾ 등은 극저온 냉각과 최소량 윤활을 결합한 하이브리드 냉각 및 윤활 방식이 공작물 표면 개선과 공구마모에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 공구와 공작물 사이에서 효과적인 냉각과 윤활로 인하여 기존 방식 대비 압축 잔류응력 증가, 경도 향상, 공구마모 감소에 이점이 나타나 가공 품질 및 공구 수명 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다. Ehsan⁶⁾ 등은 코팅 초경 엔드밀 날 수에 따른 건식 밀링 공정 중 발생하는 열, 진동, 공구마모 메커니즘을 분석하였다. 이를 바탕으로 머신러닝 기법을 활용하여 표면거칠기와 독립변수 간에 상관관계를 규명하였다.

그러나 마이크로 엔드밀링의 가공방식은 매크로 엔드밀링과 유사하지만, 이에 따른 절삭공구의 마모와 파손 메커니즘은 매우 복잡하다. 특히 마이크로 공구는 작은 마모에도 절삭 성능이 급격

히 저하될 수 있고, 제품의 품질 저하와 가공 정밀도 및 효율성에 큰 영향을 받는다. 따라서, 생산 효율 및 제품의 품질 향상을 위하여 마이크로 엔드밀링 가공 시 공구의 거동 분석, 절삭조건 및 재료에 따른 공구마모도 분석 등의 연구가 주목받고 있다.^{7,8)}

본 연구에서는 마이크로 엔드 밀링 공정을 이용하여 copper 가공 시, 주요 공정변수에 따른 공구마모 특성을 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 공구 수명을 향상시킬 수 있는 최적 가공조건과 공구마모 예측모델을 도출하고자 한다. 이를 통해 마이크로 엔드 밀링 공정의 신뢰성과 효율성을 확보하고자 한다.

2. 공구마모 특성 정립 및 실험 방법

본 연구에서는 copper를 마이크로 밀링 가공 시 공구마모에 영향을 미치는 공정변수를 분석하고, 가공조건의 변화에 따른 공구 직경 감소 특성을 정량적으로 평가하고자 한다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 마이크로 밀링 머신(Hyper-15, Hybrid precision)과 공구의 직경이 300 μm 인 초경 2날 평

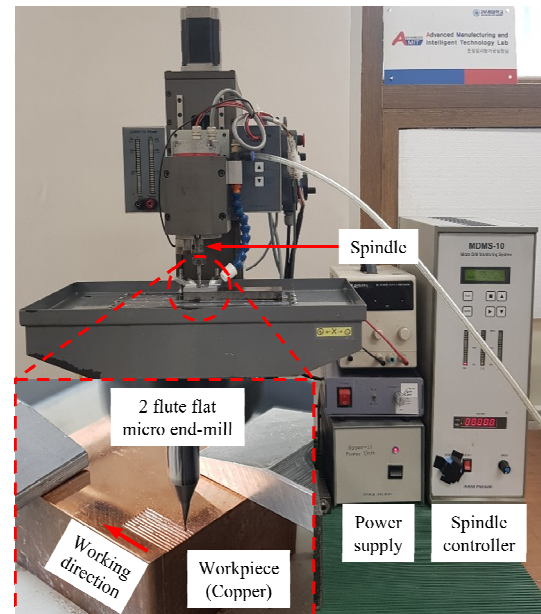


Fig. 1 Definition of micro end-mill diameter

Table 1 Conditions of process factors and levels

Factors	Levels			Unit
	1	2	3	
Feed rate, A	2	5	8	mm/min
Spindle speed, B	6,000	12,000	15,000	rpm
Depth of cut, C	10	20	30	μm

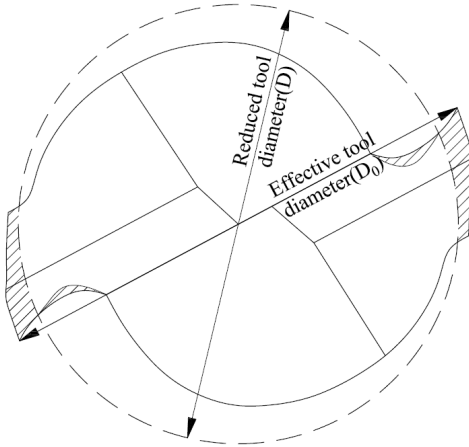


Fig. 2 Definition of micro end-mill diameter

엔드밀(4G Mill, YG-1)을 이용하여 마이크로 채널을 가공하였다. 공구마모에 영향을 미치는 공정변수는 다양하지만, 본 연구에서는 제어 가능하면서 대표적인 가공 변수인 절삭공구의 이송속도, 회전속도, 절삭깊이를 주요 인자로 선정하였다. Table 1은 각 변수의 수준을 나타낸 것으로, 마이크로 밀링 장비의 사양, 공작물 재질, 공구의 특성 등을 고려하여 선정하였다.

선정된 공정변수 및 수준을 바탕으로 다구찌 직교배열 $L_9(3^3)$ 을 활용하여 총 9개의 가공조건을 설계하였고, 각 조건 별 실험은 60분간 랜덤하게 3회 반복 수행하였다. 공구 마모량 측정은 공구현미경(SV-35, Sometech)을 활용하여 수행하였으며, Fig. 2와 같이 가공 전후의 유효직경을 5분 간격으로 측정하였다. 이를 바탕으로 시간에 따른 공구 직경의 변화량을 도출하고, 각 가공 조건에 따른 공구마모 특성을 비교 분석하였다.

3. 공구마모 분석 및 예측모델 개발

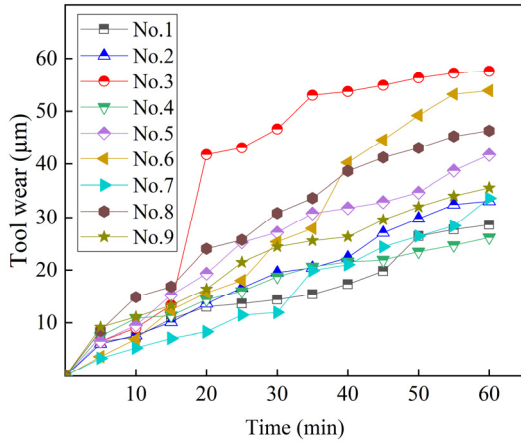
3.1 공구마모 특성 분석

Fig. 3(a)는 각 가공조건에서 5분 간격으로 측정된 공구마모량의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 가공시간의 증가에 따라 공구의 유효직경이 감소하는 경향을 보였고, 이는 일반적인 공구마모 곡선과 유사한 경향을 나타낸다. 일반적으로 공구의 마모는 시간에 따라 초기 급속 마모 영역, 정상 마모 영역, 가속 마모 영역의 세 단계를 거치며, 이러한 공구의 수명 특성은 식 (1)과 같이 Taylor 공구 수명식으로 나타낼 수 있다. 이에 따라, 공구 수명은 회전속도뿐만 아니라, 절삭깊이 증가로 인한 절삭저항의 증대에 의해 공구의 피로 손상이 가속됨으로써 단축된다.

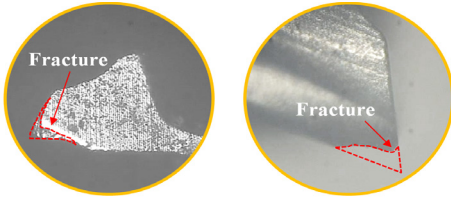
$$VT^n = C \quad (1)$$

여기서, V 는 절삭속도, T 는 공구 수명 시간, n 은 공구 수명 지수, C 는 공구 상수를 의미한다.

저항의 상승에 의해 공구의 피로 손상은 가속화된다. Table 2는 가공 전후의 유효 직경을 나타낸 것으로 가공 전의 직경을 D_0 , 가공 후의 직경을 D 라 정의하였다. 다구찌 실험계획법을 기반으로 제시된 가공조건 중 이송속도 2 mm/min, 회전속도 15,000 rpm, 절삭깊이 30 μm 인 실험조건 no. 3의 경우, 다른 조건 대비 절삭속도에 밀접한 관계를 가진 회전속도와 절삭깊이가 최대 수준으로 설정되어 20분 이후 공구마모가 급격히 증가하였다. 이는 높은 회전속도 및 절삭깊이로 인해 절삭영역 내 온도와 응력이 상대적으로 크게 상승하면서, 공구의 연삭, 응착, 산화마모가 복합적으로 진행되어 비교적 이른 시점에 공구 마모가 가속화된 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라 해당 가공조건에서 공구는 Fig. 3(b)와 마모와 함께 파단이 발생되어 초기 직경 대비 약 57.6 μm 감소하였다. 반면, 이송속도 5 mm/min, 회전속도 6,000 rpm, 절삭깊이 20 μm 일 때, 유효직경의 변화는 약 26.1 μm 으로 가장 적은 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Tool wear over processing time, (b) Tool fracture in Exp. no. 3 in 60 minutes

Table 2 Effective diameter of end-mill tool

Exp. no.	A	B	C	Avg. D_0 (μm)	Avg. D (μm)
1	1	1	1	292.6	264.0
2	1	2	2	293.9	260.9
3	1	3	3	293.6	236.0
4	2	1	2	295.7	269.6
5	2	2	3	289.5	247.8
6	2	3	1	292.4	239.1
7	3	1	3	292.04	258.4
8	3	2	2	291.3	245.0
9	3	3	1	295.2	259.7

서로 다른 수준에서의 인자가 공구마모도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험결과를 바탕으로 유효직경 변화비와 분산분석을 활용하였다. 일

반적으로 2날 평 엔드밀의 유효직경은 공칭 직경이 96% 정도이다. 그러나 모든 공구의 유효직경이 동일하지 않으므로 각 가공조건에서 공구의 마모 정도를 정량적으로 평가 및 비교하기 위하여 식 (2)와 같이 유효직경 변화율 ΔD 로 평가하였다.

$$\Delta D = \frac{D_0 - D}{D_0} \quad (2)$$

식 (2)를 기준으로 ΔD 의 값이 작을수록 공구의 변형이 적게 발생되었음을 의미하므로, 식 (3)과 같이 망소특성 S/N를 활용하여 평가하였다.^{9,10)}

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta D_i^2} \right) \quad (3)$$

Fig. 4는 각 조건에서 산출된 S/N비를 바탕으로 공구마모에 영향을 미치는 인자의 주 효과도를 시각화한 것이다. 분석 결과, 회전속도가 가장 높은 S/N비 값을 나타냄으로써 공구마모에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있었다. 낮은 회전속도에서는 공구 마모가 상대적으로 적게 발생되었는데, 이는 회전속도가 증가할수록 공작물과 공구간 접촉면적이 증가하여 마찰이 심화되

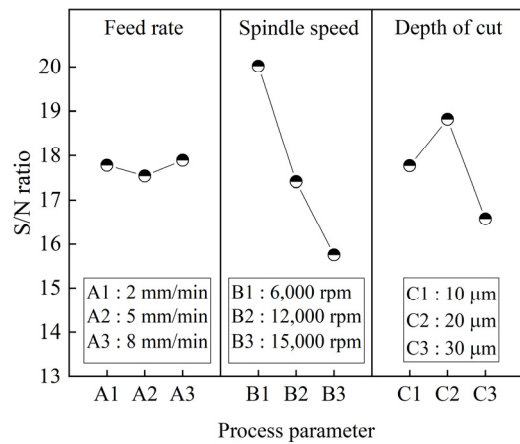


Fig. 4 Main effect of tool wear

고, 이로 인해 공구수명이 감소하는 것으로 판단된다. 반면, 이송속도는 세 수준 간의 S/N비 차이가 거의 없으므로 공구마모에 미치는 영향이 미미한 것으로 해석된다. 절삭깊이는 중간 수준인 20 μm 에서 S/N비가 가장 높게 나타나 공구마모에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 절삭깊이가 깊을수록 절삭저항의 증대로 공구마모가 가속화 되고, 너무 얇은 깊이에서는 가공시간의 증가로 공구마모에 악영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

각 인자에 대한 주효과도 분석을 기준으로, 본 연구에서 허용된 범위에서 공구마모를 최소화할 수 있는 최적조건의 조합을 확인할 수 있었다. 도출된 최적 가공조건은 각 공정변수별 수준에서

S/N비가 가장 큰 값인 A3B1C2로 공구의 이송속도 8 mm/min, 회전속도 6,000 rpm, 절삭깊이 20 μm 로 도출되었다. Fig. 5는 실험에서 도출된 최소 공구마모 조건과 S/N비 기반 최적 가공조건의 공구마모량을 비교한 결과이다. 비교분석 결과, 다구찌 직교배열법에서의 최소 공구마모 조건인 A2B1C2보다 약 29% 공구 수명이 향상되었다.

Table 3은 각 인자에 대한 분산분석 결과이다. 가장 영향력이 낮은 이송속도를 오차항으로 풀링하여 분석한 결과, 공구마모에 가장 큰 영향을 미치는 공정변수는 회전속도로 기여율이 약 81%임을 알 수 있었다. 또한 검정통계량인 F_0 값이 307.6

Table 3 ANOVA result of tool wear

	DOF	SS	V	F_0	Cont. (%)
A	2	0.1	0.05	1.0	0.3
B	2	28.1	14.1	307.5	80.8
C	2	6.6	3.3	72.0	18.9
Error	2	0.1	0.05		
Total	8	34.9			

으로 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서의 기각값인 99를 초과하였기 때문에, 유의수준 99%에서 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다. 절삭깊이는 회전속도 다음으로 영향을 미치는 공정변수로 약 19%의 기여율을 차지하였다. F_0 값이 72.0으로 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 기각값인 19를 초과하였기 때문에 유의수준 95%에서 유의한 공정변수임을 판단할 수 있다. 반면, 이송속도는 기여율이 0.26%로 낮아 유의하지 않음을 알 수 있었다.

3.2 다중 선형 회귀모델 제안 및 분석

3.1장에 기술한 실험 결과를 바탕으로, 각 공정변수가 공구의 마모에 미치는 영향을 수치적으로 해석하고 예측하기 위하여 다중 선형 회귀모델을 기반으로 식 (4)와 같이 도출하였다.

$$\Delta \tilde{D} = 38.8 - 10.9A + 0.006B + 1.48C \quad (4)$$

여기서, $\Delta \tilde{D}$ 는 예측된 공구 유효직경 변화율 ΔD 에 10^3 을 곱한 가중치이다.

회귀모델의 예측정확도를 검토하기 위하여 실험에서 공구마모량이 가장 작은 4번 실험 조건을 기준으로 회귀모델을 검증하였다. Fig. 6은 예측된 유효직경 감소율과 실험에서 측정된 감소율을 비교한 결과로, 평균 편차가 약 0.036으로 나타나 실험값과 예측값 간의 평균 오차가 매우 작음을 확인할 수 있었다. 또한 결정계수 R^2 가 약 0.7로 전체 데이터의 약 70%를 제안한 회귀모델이 설명할 수 있음을 의미한다. 이는 제한적인 실험 개수에도 불구하고, 실험 조건 내에서 충분히 예측력을 갖춘 모델로 판단할 수 있다.

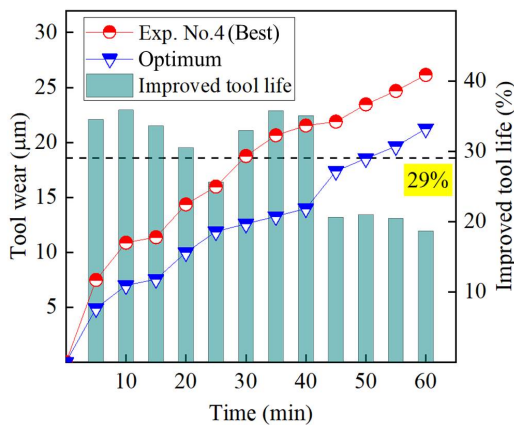


Fig. 5 Comparison between best and optimal results

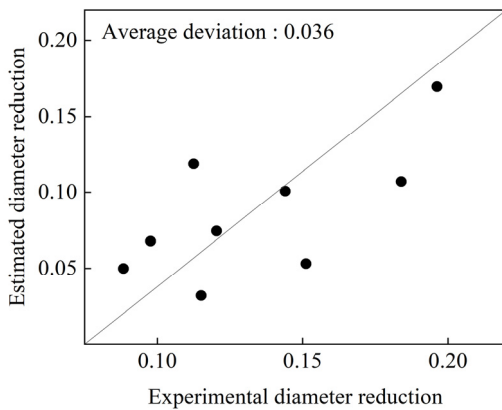


Fig. 6 Performance of predictive model for tool diameter reduction

Table 4 ANOVA result of regression model

	DOF	SS	V	F ₀
Regression	3	0.0793	0.0264	3.723
Residual	5	0.0356	0.0007	
Total	8	0.1149		

Table 4는 산출된 회귀모델에 대해 통계적 유의성을 평가하기 위하여 분산분석을 수행한 결과이다. 회귀항의 F_0 이 3.723으로 유의수준 90%에서의 기각치보다 크므로 본 연구에서 산출된 다중 회귀모델이 통계적으로 유의한 모델임을 의미한다.

본 결과를 바탕으로, 다중 선형 회귀모델이 공정변수에 따라 공구의 마모도를 예측하는데 유효함을 알 수 있었다.

4. 결 론

마이크로 밀링 공정에서 공구마모는 제품 품질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 copper 소재의 마이크로 밀링 공정에서 공구마모 정도를 분석하고 개선하기 위하여 다구찌 직교배열법을 기반으로 실험을 수행하였다. 다양한 공정조건에 따른 공구 직경의 변화를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 회전속도, 절삭깊이, 이송속도 순으로 공구

마모에 영향을 미침을 알 수 있었다. 특히, Taylor 공구 수명식에 따라 공구의 회전속도가 가장 큰 15,000 rpm에서 공구마모가 가속화됨을 확인할 수 있었다.

2) 공구마모가 급격히 발생하는 가공조건은 이송속도 2 mm/min, 회전속도 15,000 rpm, 절삭깊이 30 μ m로, 공구의 직경이 초기 직경 대비 약 20% 감소하였다. 반면, 5 mm/min, 6,000 rpm, 20 μ m의 가공조건에서는 공구의 직경 감소가 약 8%로 최소화됨을 알 수 있었다.

3) 공구 수명 향상을 위한 최적 조건은 망소특성을 바탕으로 8 mm/min, 6,000 rpm, 20 μ m으로 도출되었다. 검증 실험 결과, 실험 기반의 최소 마모 조건 대비 공구수명이 약 29% 향상됨을 확인하였다.

4) 실험 데이터를 바탕으로 구축한 예측모델은 제한된 조건 내에서도 비교적 높은 설명력을 보여 정량적 예측 도구로서의 가능성을 제시하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 실험 조건은 제한적이며 실시간 공정 데이터가 반영되지 않은 점에서 한계가 있다. 따라서 추후 연구에서는 센서 기반의 실시간 데이터 수집 및 공정 모니터링 기술을 활용하여, 공구마모를 실시간으로 예측하는 기술을 개발하고자 한다.

Author contributions

J. H. Lee; Conceptualization, investigation, writing-original draft. J. S. Kwak; Writing-review & editing.

References

1. C. S. Manso, S. Thom, E. Uhlmann, C. L. F. De Assis and E. G. Del Conte, 2019, "Tool wear modelling using micro tool diameter reduction for micro-end-milling of tool steel H13", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105(5), 2531-2542. (<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04575-4>)

2. S. Saha, S. Deb and P. P. Bandyopadhyay, 2022, "Precise measurement of worn-out tool diameter using cutting edge features during progressive wear analysis in micro-milling", *Wear*, 488, 204169.
(<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204169>)
3. K. Zhu and Y. Zhang, 2019, "A generic tool wear model and its application to force modeling and wear monitoring in high speed milling", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 147-161.
(<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.045>)
4. X. Zhang, Y. Gao, Z. Guo, W. Zhang, J. Yin and W. Zhao, 2023, "Physical model-based tool wear and breakage monitoring in milling process", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 184, 109641.
(<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109641>)
5. N. S. Ross K, G. Manimaran, S. Anwar, M. A. Rahman, M. E. Korkmaz, M. K. Gupta, A. Alfaify and M. Mia, 2021, "Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication", *Tribology International*, 155, 106762.
(<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106762>)
6. S. Ehsan, M. A. Ali, S. A. Khan, M. Sana, M. Yasir, S. Anwar and M. U. Farooq, 2024, "Understanding the effects of cutting conditions on vibrations, surface integrity, machining temperature and tool wear mechanisms in end milling of AISI D2 Steel", *Tribology International*, 198, 109894.
(<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109894>)
7. X. Liang, C. Zhang, C. Wang, K. Li, Y. M. Loh and C. F. Cheung, 2023, "Tool wear mechanisms and surface quality assessment during micro-milling of high entropy alloy FeCoNiCrAlx", *Tribology International*, 178, 108053.
(<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108053>)
8. L. Fernández-Robles, L. Sánchez-González, J. Díez-González, M. Castejón-Limas and H. Pérez, 2021, "Use of image processing to monitor tool wear in micro milling", *Neurocomputing*, 452, 333-340.
(<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.146>)
9. S. H. Im, D. H. Kim, H. J. Kim, K. S. Kim and S. C. Huh, 2021, "A study on the wear characteristics of Al alloy by design of experiments", *Journal of Power System Engineering*, 25(3), 46-55.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.3.046>)
10. J. D. Kim and Y. S. Kim, 2020, "Process optimization for plasma-sprayed Cr₂O₃ coating using Taguchi method", *Journal of Power System Engineering*, 24(1), 58-63.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.058>)