



직교 가공 시험법을 이용한 내열 Ta-W 합금 절삭 가공 최적화 연구

김규식^{1,*} · 김신원² · 문창현² · 박정효¹ · 김동훈¹ · 양성호¹ · 박형욱^{2,*}

¹국방과학연구소

²울산과학기술원

Optimization of Mechanical Machining for Heat-Resistance Ta-W Alloy by Using Orthogonal Cutting Method

Kyu-Sik Kim^{1,*}, Sinwon Kim², Chang Hyeon Mun², Jung Hyo Park¹,
Donghoon Kim¹, Seongho Yang¹, and Hyung Wook Park^{2,*}

¹Agency for Defense Development, Yuseong-gu, Daejeon 34186, Republic of Korea

²Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Republic of Korea

Abstract: Tantalum and tantalum alloys, which have superior thermal properties, including a high melting temperature, low specific heat, low thermal conductivity, and high density, are promising candidates for high-performance parts exposed to high temperatures and hazardous environments in aerospace, defense, and other industries. However, those alloys are hard to cut and mechanically machine, and the poor machinability of tantalum alloys has precluded their wide use. This study investigates mechanisms for cutting Ta-10%W alloys using orthogonal cutting methods for precision part manufacturing. During orthogonal cutting processes, the cutting forces are increased dramatically because of the surface folding phenomenon of Ta-W alloys. As a result of experiments and simulation calculations, the tool's rake angle and depth of cut are critical parameters for controlling the cutting shear angle, which makes a significant difference in chip thicknesses and surface folding phenomenon. Based on the results, about 12 degrees of cutting shear angle is suitable for the mechanical machining of a Ta-W alloy. Additionally, cutting speed may be one of the critical parameters to consider for changing the mechanical responses of Ta-W alloys. With this perspective, the mechanical properties of Ta-W alloys at high strain rates seem to be an important factor in orthogonal cutting. Based on these results, the cutting mechanisms and optimal cutting parameters for Ta-W alloys are discussed.

(Received 2 September, 2024; Accepted 20 November, 2024)

Keywords: Ta-10%W alloy, Orthogonal cutting, Cutting mechanism, Cutting force

1. 서 론

탄탈륨은 높은 내식성과 내화성(용융점 ~ 3020°C), 기계 및 열-물리적 특성으로 높은 전단 강도, 가공 경화능, 고인성, 낮은 열전달계수 및 비열 등의 특징을 가지고 있다[1]. 순수 탄탈륨은 낮은 강도를 나타냄에 따라 텅스텐을 첨가

하여 고온에서 기계적 특성을 향상시키기 위한 방향으로 개발되고 있다. 텅스텐은 탄탈륨에 완전 고용화가 가능하며 탄탈륨 보다 더 높은 용점(~3420°C)을 나타냄에 따라 합금 첨가량이 증가할수록 탄탈륨-텅스텐 합금의 용점이 증가되는 경향을 보인다. 또한 고온에서 단상을 유지할 수 있어 높은 상 안정성과 고온에서 우수한 기계적 특성을 나타낼 수 있다. 이에 따라 탄탈륨-텅스텐 합금은 제트 엔진 및 미사일 구성 요소, 발사체, 원자로 구성 요소, 화학 처리 장비 등의 구성 부품으로 적용이 기대되고 있다[2-4].

일반적으로 구조용 또는 기능성 부품으로 제작하기 위해서는 다양한 성형 공정을 거치게 되며 최종적인 부품 형태를 구현하기 위하여 절삭, 선삭 등의 가공 공정이 필수적

- 김규식: 선임연구원, 김신원: 연구원, 문창현: 연구원, 박정효: 선임연구원, 김동훈: 책임연구원, 양성호: 책임연구원, 박형욱: 교수

*Corresponding Author: Kyu-Sik Kim

[Tel: +82-42-821-4581, E-mail: kskim87@add.re.kr]

*Corresponding Author: Hyung Wook Park

[Tel: +82-52-217-2332, E-mail: hwpark@unist.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

으로 수행된다. 그러나 순수 탄탈륨 및 탄탈륨-텅스텐 합금은 난삭재로 가공이 어려운 소재로 알려져 있으며 이를 해결하기 위한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다[1,5-7]. 순수 탄탈륨 및 탄탈륨 합금의 가공이 어려운 이유는 다음과 같이 제시되고 있다. 첫번째로, 탄탈륨은 연성이 우수하지만 가공시 가공 경화가 크게 발생[1,8]하며 절삭 공구 끝에서 소재의 적층이 발생해 절삭력이 증가된다[8,9]. 두번째로 탄탈륨의 낮은 열 전도도(thermal conductivity)로 인해 절삭시 발생하는 전단 영역의 열이 느리게 분산[1]되어 과도한 열이 발생한다[10]. 마지막으로, 절삭 전단 각도가 매우 낮기 때문에 공구-칩 계면의 마찰이 크게 발생된다[10,11]. 상기의 절삭 거동은 어닐링 또는 부분적으로 가공된 상태의 구리 및 구리 합금, 알루미늄 및 나이오븀과 같은 순수한(CP) 금속과 스테인리스강 및 니켈계 합금에서도 나타나고 있다. 구리 및 알루미늄의 절삭 과정을 고속 이미징 기법으로 측정 그리고 분석되었으며 단순 전단에 의한 칩 형성과 다르게 표면 굴곡 현상에 의하여 칩 두께가 증가되는 결과가 제시되었다[12,13]. 이 결과에 비추어 볼 때, 탄탈륨 및 탄탈륨 합금의 절삭 거동시에도 표면 굴곡에 의한 두꺼운 칩이 형성되는 것으로 판단해 볼 수 있다.

이와 같은 현상을 해소 및 해결하기 위하여 일반적인 절삭가공 공정 변수 제어[10], 저온 가공[1], 화학적 절삭[6] 등의 다양한 시도들이 수행되었다. Mizutani 등 [14]은 순수 탄탈륨 소재의 가공성에 대한 공구 각도(23°, 28° 및 33°)효과를 연구했으며 그 결과, 공구 각도가 비교적 큰 28°인 카바이드 공구를 사용하여 최소 절삭력과 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 제시했다. Lazarus [10]는 탄탈륨-텅스텐 합금 소재의 가공을 연구했으며 절삭 공구의 각도가 20° 이상의 탄화물 계열의 공구 소재가 필요함을 밝혔다. 그럼에도 탄탈륨-텅스텐 합금의 가공성은 큰 공구 각도로 개선될 수 있지만 공구 수명은 크게 증가하지 않음을 나타냈다. 공구 형상 최적화에 대한 연구 외에도 절삭유를 사용하여 탄탈륨-텅스텐 합금의 가공성을 개선할 수 있다. 절삭유는 절삭 공구와 공작물 재료 사이의 열 축적과 마찰 계수를 효과적으로 줄여 공구 수명을 개선할 수 있다. Lazarus[10]는 고염소화 절삭유가 공구 앞에서 적층되는 소재를 방지하여 고점성 재료인 탄탈륨-텅스텐 합금(Ta-2.5 W)의 가공성을 개선할 수 있다는 것을 언급했다. 하지만 전술한 연구 결과에도 불구하고 실제 가공 현장에서 적용하기 난해한 부분이 있어 상기의 기술이 실제 산업에서 활발히 확산되지는 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 탄탈륨-텅스텐 합금의 공정 변수를 제어하여 일반적인 절삭 가공을 가능하게 하기 위하여

직교 가공을 통해 가공 최적화를 연구하였다. 이를 위해서 탄탈륨 합금의 절삭시 발생하는 절삭력을 측정하고 절삭 공정 변수에 따른 절삭력 변화를 탄탈륨-텅스텐 합금의 물성과 연계하여 그 원인을 고찰하고자 했다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 탄탈륨 합금의 절삭 가공 특성을 확인하기 위하여 Ta-10.1wt.%W 조성의 합금을 사용하였다. 탄탈륨 합금의 절삭 거동을 비교 분석하기 위하여 대표적인 구조용 소재인 AISI 4340 마르텐사이트강을 비교재로 사용하였다.

미세조직 분석을 위하여 SiC 연마지 #400~#2000를 이용하여 순차적으로 연마하였으며 1 μm 다이아몬드 서스펜션을 적용하여 정밀 연마를 수행하였다. 콜로이드 실리카(Colloidal silica) 용액으로 최종 연마를 수행한 후, 후방산란 전자 회절 패턴분석기(EBSD, MIRA 3, TESCAN)를 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 후방산란 전자 회절분석을 위하여 Oxford사의 검출기를 이용하였으며 가속전압 15 kV, 스텝 사이즈 (step size) 100 nm 조건으로 100 μm × 100 μm 범위를 측정하였다. EBSD 측정 후, 분석 프로그램(OIM analysis 8)을 이용하여 결과를 분석하였다.

탄탈륨 합금의 가공성 평가는 그림 1에서 제시한 것과 같이 5축 턴 밀 장비(DMG MORI, NTX1000)를 활용하여 직교 가공(Orthogonal cutting) 시험으로 수행되었다.

탄탈륨 합금 시험편은 20mm × 5mm × 4mm 로 재가공하여 적용하였으며 가공 길이를 5mm로 제한하여 가공칩 형상 관찰이 가능하도록 시험을 진행하였다. 또한 최적 가공 조건을 확보하기 위하여 공구 각도(rake angle), 가공 속도, 가공 깊이를 변수로 가공 시험을 수행하였다. 그림 1 (b)에서 제시한 것과 같이 공구 각도는 10°~20°, 가공 속도는 5 mm/s ~ 10 mm/s, 가공 깊이는 0.02~0.04 mm 범위로 변경하였으며 탄탈륨-텅스텐 합금 시험편 하부에 공구 동력계(Kistler, 9257b)를 설치하여 가공 조건에 따른 절삭력 변화를 측정하였다. 그 외 가공 공구 형상은 턴 반경 20μm, 소재는 텅스텐 카바이드(WC) 소재에 AlCrN 코팅 적용되어 있었으며 시험 변수 외 조건은 동일하게 제어하였다. 가공 칩 분석은 광학현미경(Keyence, VHX-7000)과 이미지 분석 프로그램을 이용하여 칩 두께 및 형상을 관찰하였다. 칩 형상 비교를 위하여 대표적인 구조용 소재인 철강(AISI 4340)을 동일한 조건에서 직교가공을 수행하여 가공 거동을 비교하였다.

유한요소법을 이용하여 탄탈륨 합금의 가공을 모사하여

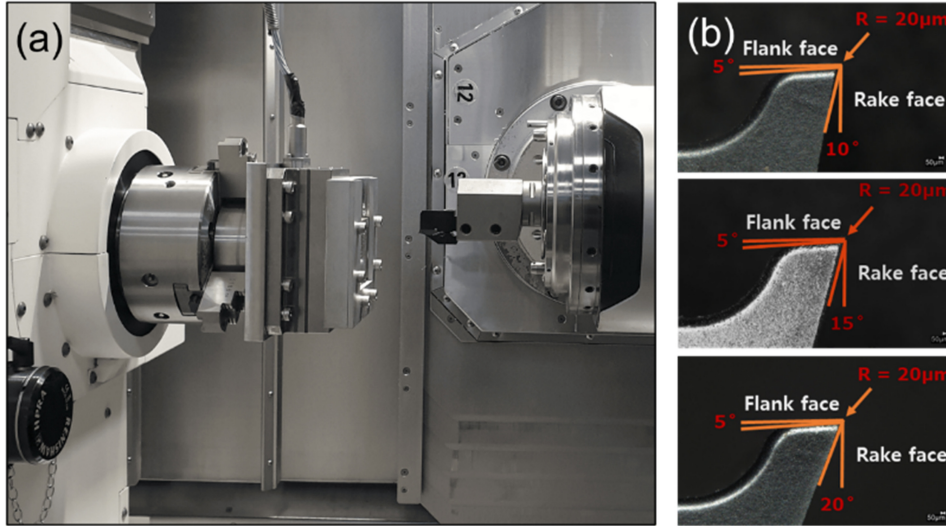


Fig. 1. (a) Orthogonal cutting equipment and (b) three different WC tools used in this study.

Table 1. Thermo-physical properties of Ta-W alloy and tool materials.

Properties	Ta-W alloy	Tool
Density (kg/m ³)	16,920	15,500
Young's modulus (GPa)	208.5	550
Poisson's ratio	0.3	0.21
Thermal Expansion coefficient (K ⁻¹)	6×10 ⁻⁶	5.80×10 ⁻⁶
Specific heat (J/kg·K)	135	400
Melting Temperature (K)	3,300	-
Thermal conductivity (W/m/K)	50	-

가공 거동을 해석했다. 유한요소해석을 위하여 Dassault systems사의 Abaqus 프로그램을 사용하였으며 해석에 사용된 소재 물성은 표 1에 나타났다. 공구의 접촉면과 시편의 절삭 부 간의 물리 현상 반응을 위하여 표면-표면 접촉 (explicit)으로 설정하였으며 건식 절삭 가공으로 가정하여 0.6의 마찰 계수를 적용하였다. 절삭 가공 해석 모델은 아래의 Johnson-Cook 소성 모델(plasticity model)과 파괴 모델(damage model)을 적용하였다.

$$\sigma = [A + B \epsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (1)$$

$$\epsilon = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - D_5 \hat{T}] \quad (2)$$

A는 항복응력, B는 변형률 경화 계수, C는 변형률 속도 계수, m은 열 연화 지수이다. 모델의 변수는 상온 인장

Table 2. Constituent parameters for plasticity and damage models.

Parameters	Plasticity model	Parameters	Damage model
A	535.124	D1	0.3
B	1118.479	D2	0.8
n	0.881	D3	0.5
m	0.7	D4	0.02895
C	0.0321	D5	4
$\dot{\epsilon}_0$	0.001	-	-

및 고속 변형 시험으로 구해진 응력-변형률 거동과 직교 가공시험에서 도출되었으며 그 값은 표 2에 제시했다. 상온 인장시험은 ASTM E8 규격의 인장 시험편 및 MTS810 장비를 활용하여 상온에서 평가되었다. 또한 고속 변형 시험(Split-Hopkinson Pressure Bar)은 시험으로 상온에서 직경 10 mm * 두께 3 mm 시험편으로 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에서는 본 연구에서 사용한 탄탈륨 합금과 비교재의 미세조직 관찰 결과를 나타냈다. 탄탈륨 합금의 후방전자 산란 패턴 분석(EBSD) 결과에서 무작위 집합 조직을 나타내고 있었으며 단상으로 분석되었다. 탄탈륨 합금의 조직은 약 20~40 µm 크기의 결정립으로 구성되어 있었으나 상대적으로 큰 결정 사이에서 1~5 µm 수준의 결정립이 모여 밴드 형태로 관찰되었다(그림 2 (a)). 또한 1 µm 이하의 미세한 결정립에서도 아결정립이 관찰되었다. 이러한

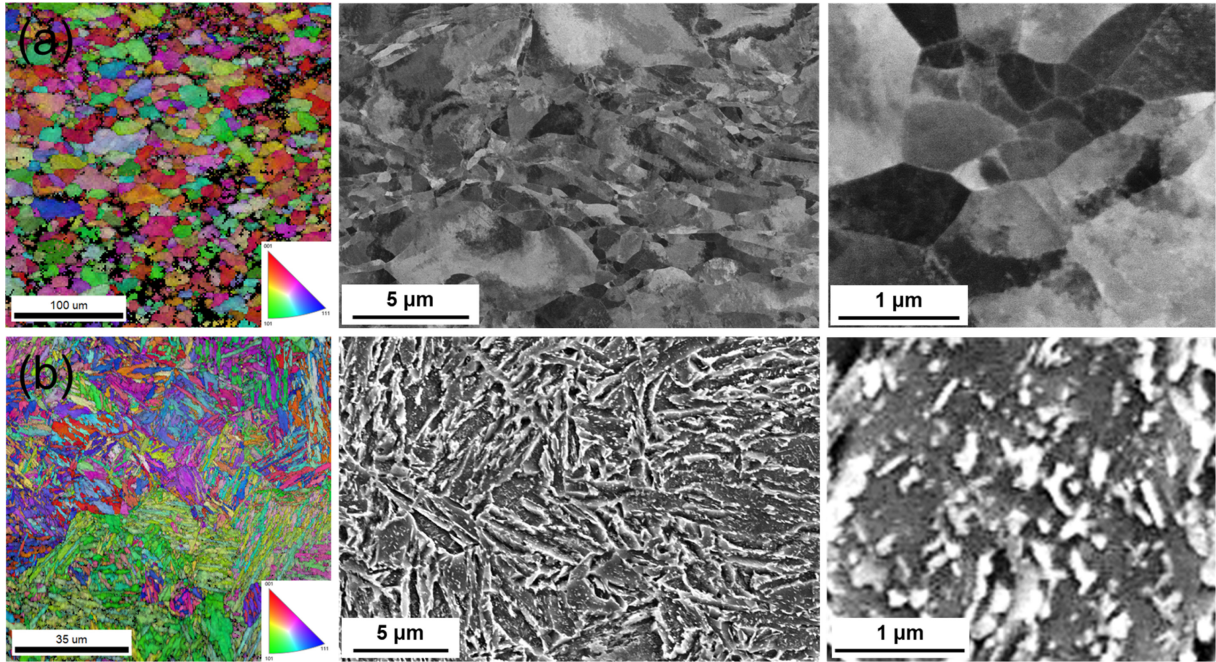


Fig. 2. Initial microstructure of (a) Ta-10W alloy and (b) AISI 4340 steel.

미세조직은 탄탈륨 및 탄탈륨 합금에서 일반적으로 나타나는 미세조직으로, 성형에 의한 변형 조직이 후열처리를 통하여 충분히 재결정 또는 회복되지 않았음을 나타낸다. 비교재인 AISI4340 소재는 전형적인 템퍼드 마르텐사이트 조직을 나타내고 있었으며 마르텐사이트 블록내에 2차상인 탄화물이 수백 나노미터 크기로 석출되어 있었다. 두 소재의 경도는 탄탈륨 합금의 경우에는 약 ~ 270 HV로 측정되었으며 AISI 4340은 약 ~340 HV로 측정되었다.

그림 3에서는 직교 가공시 탄탈륨 합금과 비교재인 AISI4340 합금의 대표적인 절삭력 측정 결과를 나타냈다.

AISI 4340 소재의 경우, 절삭이 시작될 때까지 절삭력이 증가하고 있으며 절삭이 시작됨에 따라 절삭력이 일정하게 유지되는 결과를 보였다. 반면 탄탈륨 합금의 경우, AISI4340보다 낮은 경도값을 나타내지만 절삭시에는 상대적으로 높은 시작 절삭력(F_{initial})을 보이고 있었으며, 절삭이 진행됨에 따라서 절삭력이 크게 상승($F_{\text{initial}} - F_{\text{final}} = \Delta F$)하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 현상은 탄탈륨 합금의 절삭가공을 어렵게 하는 대표적인 원인으로 판단할 수 있다. 이 현상은 순수 구리 및 구리 합금, 타이타늄 합금 등에서도 동일하게 나타나는 것으로 제시되었다[12]. 하지만 순수 구리 및 구리 합금은 탄탈륨 합금과 동일하게 절삭력이 증가하더라도 낮은 강도로 인하여 절삭이 가능한 것으로 알려지고 있으며 절삭에 의한 가공 공구의 마모는 크게 발생하지 않는다. 타이타늄 또한 유사한 거동을 나타냄에 따라

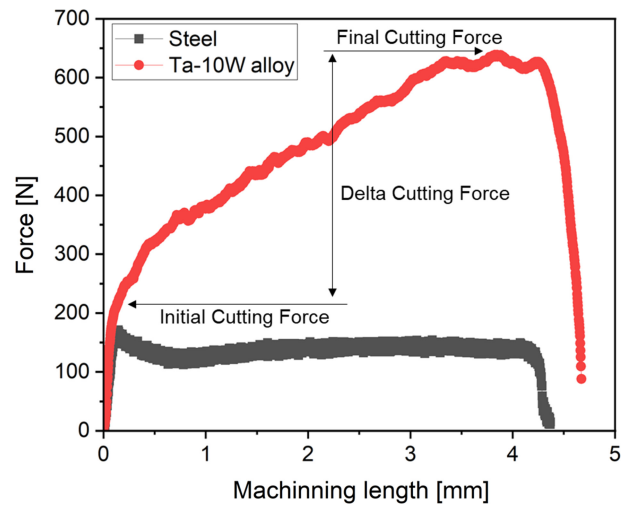


Fig. 3. Cutting force changes for Ta-W alloy and AISI 4340 steel during orthogonal cutting experiments.

난가공성을 나타내지만 가공이 가능한 발표되고 있다. 이 결과들을 고찰해보면 탄탈륨 합금의 난가공성은 칩 두께의 증가 영향만으로 해석하기에는 한계가 있다. 기존 연구 결과들에 따르면 탄탈륨 합금은 높은 가공 경화능으로 인해 절삭력이 증가한다는 결과 또한 제시되고 있으며 가공 공구와 유사한 응점을 가지고 있어 절삭 공구의 높은 마모 및 파단이 쉽게 유도될 수 있다는 결과들이 있다[1,7]. 이와 같은 영향을 확인하기 위하여 칩 두께 증가 효과, 가공 공정

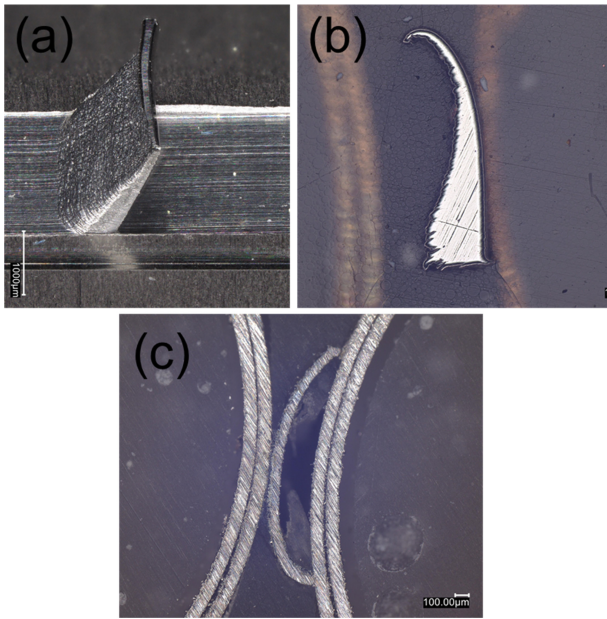


Fig. 4. Typical cutting chip morphologies of (a, b) Ta-W alloy, and (c) AISI 4340.

조건이 절삭 조건에 미치는 효과, 탄탈륨 합금의 준정적 및 동적 기계적 특성을 평가하여 고찰했다.

그림 4에서는 직교 가공으로 절삭된 칩의 형태를 관찰하여 그 결과를 나타냈다. 탄탈륨 합금 가공 칩의 경우, 기존 문헌에서 언급되고 있는 것과 동일하게 균일하지 않은 두께를 나타내고 있으며 불규칙한 형태로 형성되어 있었다.

이와 같은 불규칙 형태의 가공 칩이 발생하는 이유는 그림 4(a)에 제시한 결과로 확인 가능하다. 직교 가공이 진행됨에 따라 가공 공구 앞에서 탄탈륨 합금의 두께가 증가하는 현상을 보이고 있으며 이는 단면 관찰 결과(그림 4(b))에서 명확하게 확인이 가능하다. A.S. Vandana 등[15]의 결과에 의하면 가공에 의해 소성변형이 크게 발생할 수 있으며 이에 따라 탄탈륨 합금의 표면 굴곡 변형(surface folding)이 심화됨에 따라 칩의 형상은 최종적으로 버섯 형태로 변화하는 것으로 제시한 바 있다. 즉, 가공이 진행됨에 따라 그림 3에서 제시한 것과 같이 탄탈륨 합금의 두께가 증가함에 따라 절삭력이 상승하는 것으로 판단할 수 있다. 이와 함께 J.M. Davis 등[6]의 결과에 따라 표면 굴곡 변형 영역은 약 2~4 이상의 변형량이 가해지며, 탄탈륨 합금을 고속으로 변형될 시에 단열 전단 밴드(adiabatic shear band)가 형성되고 동적 회복현상이 발생[16]하여 동적 회복 조직이 절삭력 변화에 영향을 줄 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 반면, 비교재인 AISI 4340 합금의 가공 칩(그림 4(c))은 균일한 두께를 보여 균일한 절삭력을 보이는 거동을 설명할 수 있다. 즉, 절삭 가공에 의한 표면 굴곡 변형이 최소가 되는 절삭 공정 조건을 도출함에 따라 탄탈륨 합금의 절삭 가공이 가능할 것으로 사료되는 결과이다.

그림 5에서는 가공 툴 각도, 가공 속도, 가공 깊이를 변화시켜 시작 및 끝 절삭력, 그리고 절삭력 변화량을 나타냈으며 그 값을 표 3에 제시하였다. 제시된 결과에 따르면

Table 3. Cutting forces for a Ta-10W alloy according to orthogonal machining parameters.

Machining parameters			Initial Cutting Force (N)	Final Cutting Force (N)	Delta Cutting Force (N)
Rate (mm/s)	Rake angle (°)	Depth of cut (mm)			
5	10	0.02	271±22	707±163	436±162
5	10	0.03	328±16	971±129	642±129
5	10	0.04	408±91	1107±106	698±107
5	15	0.02	240±42	635±155	395±151
5	15	0.03	314±18	893±69	579±60
5	15	0.04	342±10	1024±82	681±88
5	20	0.02	252±29	508±113	256±127
5	20	0.03	292±9	521±31	228±28
5	20	0.04	331±19	667±59	335±60
7.5	10	0.02	-	-	-
7.5	15	0.02	293±29	776±128	483±134
7.5	20	0.02	259±10	494±29	235±32
10	10	0.02	332±47	895±105	563±115
10	15	0.02	290±18	766±103	476±105
10	20	0.02	261±16	540±56	279±62

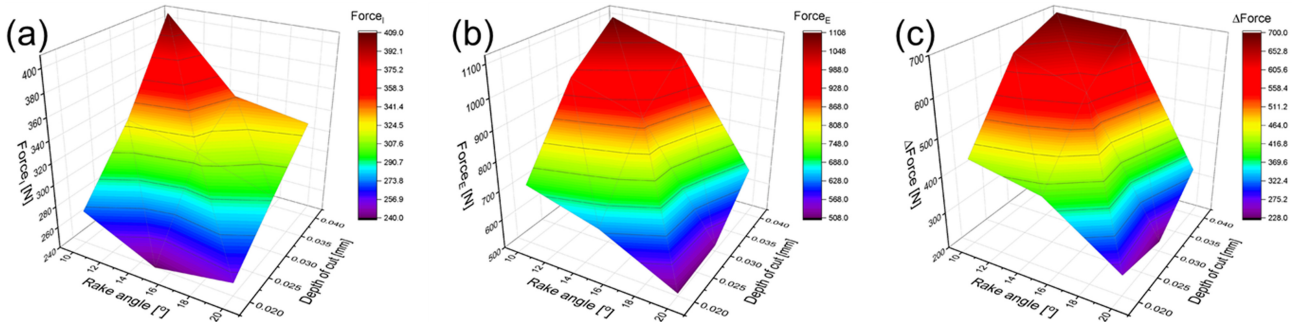


Fig. 5. Processing maps for the machining processes of Ta-W alloy. (a) initial cutting force, (b) final cutting force, and (c) delta cutting force.

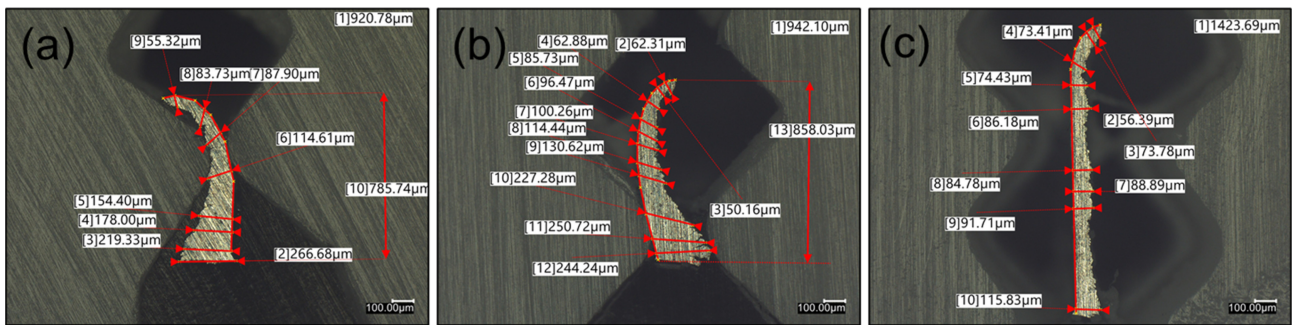


Fig. 6. Chip morphologies of Ta-W alloy machined with different tool's rake angles; (a) 10°, (b) 15°, and (c) 20°

가공 속도의 증가, 낮은 가공 톨 각도, 절삭 깊이의 증가는 시작 및 끝 절삭력의 상승을 보였다. 그러나 그림에서 나타낸 것과 같이 동일한 5 mm/s의 가공 속도 조건에서 15°의 톨 각도와 0.02 mm의 가공 깊이에서 가장 낮은 시작 절삭력(240N)을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 끝 절삭력은 20°의 톨 각도, 0.02 mm ~ 0.03 mm의 절삭 깊이에서 낮은 값(508~521N)을 나타냈다. 그리고 절삭력 변화량(상승)의 경우에는 20°의 톨 각도에서 0.03 mm 절삭 깊이인 경우 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 즉, 단순히 낮은 가공 속도, 높은 톨 각도, 및 낮은 절삭 깊이를 조합하는 경우에 가장 낮은 절삭력을 나타내는 것이 아니라 각 조건의 조합으로 최적의 가공 조건이 있음을 확인할 수 있었다.

절삭력 변화량의 감소의 원인은 그림 6에서 나타낸 것과 같이 톨 각도에 따른 칩 형상 관찰을 통하여 확인이 가능하다. 그림에서 나타낸 것과 같이 10° 및 15°의 톨에서는 그림 4(a, b)에서 제시한 것과 같이 칩 두께가 증가하는 형태를 보이고 있었다. 10°의 톨 각도에서는 약 55 μm 두께의 칩이 약 266 μm로 4.84배 증가하는 것이 확인되었으며, 15°의 톨 각도에서는 약 62 μm 두께의 칩이 약 244 μm로 3.93배 증가하였다. 반면, 20°의 톨 각도에서는 초기 73 μm

두께의 칩이 115 μm로 1.57배로 소폭 증가하는 결과를 나타냈다. 이 결과에서 주목해야 할 현상은 동일한 절삭 깊이를 가지더라도 톨 각도에 따라서 초기 절삭 두께가 달라지며 톨 각도가 증가함에 따라 초기 칩 두께는 증가하는 경향을 보였다. 또한 20° 톨 각도를 적용하는 경우, 절삭이 진행됨에 따라 철강을 가공한 것과 같이 균일한 두께의 칩 형태를 나타냈으며 이는 표면 굴곡 변형 현상이 감소되었음을 유추할 수 있는 결과이다.

그림 7에서는 가장 대표적인 직교 가공 조건을 적용한 수치 해석 결과를 나타냈다. 그림에서 나타낸 것과 같이 가공이 진행됨에 따라서 가공 톨과 탄탈륨 합금의 접촉 영역에서 온도 상승이 나타나는 결과를 보이고 있으며 온도는 탄탈륨 합금의 용점에 근접한 결과(그림 7 (a))를 나타냈다. 이 온도는 톨 소재(텅스텐 카바이드, WC)의 용점과 유사하며 이와 같은 높은 온도 상승이 발생하는 경우, 톨 마모/파괴는 가속화될 수 있다. 또한 직교 가공에 의한 탄탈륨 합금의 변형률(그림 7 (b))을 확인해 보면 톨과 접촉 영역에서는 상대적으로 낮은 변형률(0.5~2.5)을 확인할 수 있으며 팁 전방에서 변형이 집중되어 있었다. 직교 가공시 전단 변형의 각도(shear angle)는 절삭력 및 칩 형상과 큰 관계를 가진다. 특히 전단 변형 방향은 절삭 가공 조건에

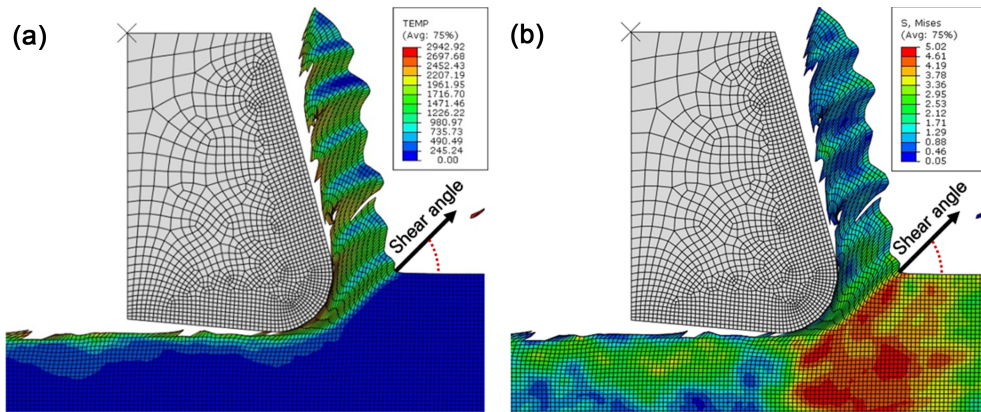


Fig. 7. Calculation results of (a) thermal and (b) strain analysis during orthogonal machining of Ta-W alloys.

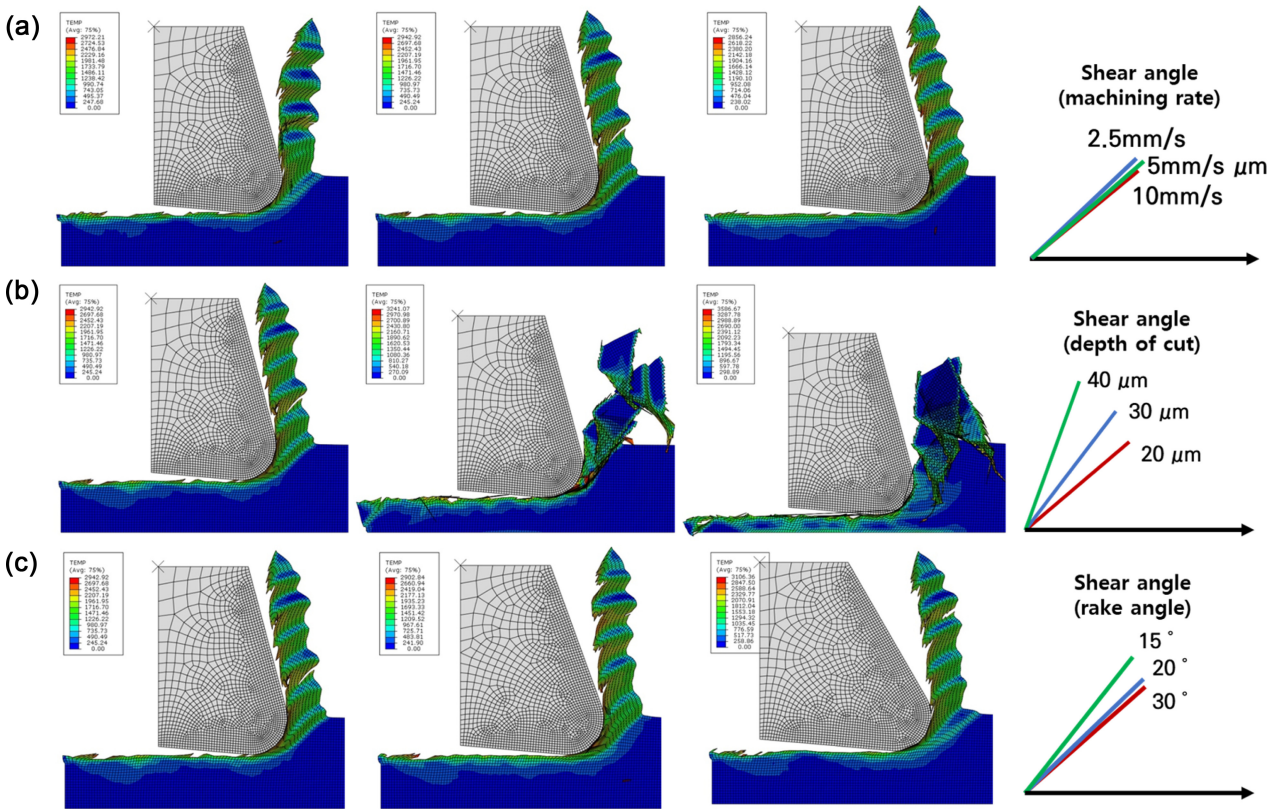


Fig. 8. Calculation results of cutting shear angles with different processing parameters; (a) machining rate, (b) depth of cut, and (c) rake angle.

따라 변화하며 특히, 툴 각도에 민감하게 변화하는 것으로 알려지고 있다[17]. 그러나 전산해석에서는 탄탈륨 합금의 가공시 발생하는 표면 굴곡 현상으로 인한 칩 두께 증가 현상을 구현할 수 없으므로 따라 기존 AISI 4340 소재 가공과 동일하게 가공 칩 두께가 일정한 경우로 해석되어 탄탈륨 합금의 가공 초기 영역만을 예측할 수 있다. 표 4에

서는 공정 조건 변화에 따른 전산 해석으로 계산된 절삭력과 탄탈륨 합금 가공 시험으로 구해진 초기 절삭력을 비교하여 제시하였다. 그 결과, 초기 절삭력은 전산해석을 통해 매우 정밀하게 예측이 가능한 것으로 확인되었다. 그림 8에서 나타난 것과 같이 가공 조건의 변화는 초기 전단 변형 방향에 영향을 줄 수 있다.

Table 4. Cutting forces for a Ta-10W alloy according to orthogonal machining parameters.

Machining parameters			Initial Cutting Force (N)	FEM (N)
Rate (mm/s)	Rake angle (°)	Depth of cut (mm)		
5	15	0.02	240±42	252
7.5	15	0.02	293±29	257
10	15	0.02	290±18	288
5	15	0.02	240±42	252
5	15	0.03	314±18	294
5	15	0.04	342±10	362
5	10	0.02	271±22	272
5	15	0.02	240±42	252
5	20	0.02	252±29	242

툴 각도가 결정되는 경우, 가공 속도가 증가함에 따라서 전단 변형 방향에는 큰 영향이 없는 것을 예측할 수 있다. 하지만 절삭 깊이는 전단 변형 방향을 크게 변화시킴에 따라 절삭력에 영향이 있을 것으로 판단된다. 툴 각도는 20° 이상의 각도에서는 전단 방향의 변화가 크지 않음을 확인했다. 하지만 이 결과는 전산 해석의 경우, 그림 6에서 언급한 것과 같이 실제 시험에서는 칩 두께 변화가 발생함에 따라 전단 방향 및 가공 속도 등의 변화가 크게 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

기존 연구 결과에 따르면 절삭 공정 조건에 따른 전단 변형 각도, 전단 변형률 및 전단 속도는 아래와 같은 경험 식으로 표현할 수 있다[17].

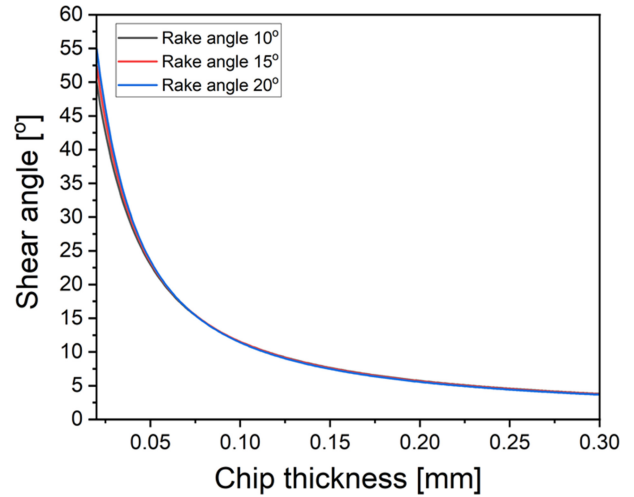
$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (1)$$

$$\frac{V}{\cos(\phi - \alpha)} = \frac{V_s}{\cos \alpha} = \frac{V_c}{\sin \phi} \quad (2)$$

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (3)$$

r 은 칩 두께 절삭비, t_0 는 초기 절삭 깊이, t_c 는 칩 두께, V 는 절삭 속도, V_s 는 전단 변형 속도, V_c 는 칩 속도, ϕ 는 전단 각도 그리고 α 는 툴 각도를 의미한다. 상기의 관계를 이용하여 탄탈륨 합금을 가공하는 동안 발생하는 절삭비의 변화를 고려한 전단 각도의 변화를 그림 9에 나타냈다.

그림에서 확인되는 것과 같이 칩의 두께가 증가함에 따라서 전단 각도는 낮아지는 현상을 보이고 있다. 즉 그림 4에서 제시한 것과 같이 소재의 절단이 발생하지 않은 경우, 더욱 심한 표면 변형을 유도하며 이에 따라 높은 절삭력이 필요로 하게 되는 것을 의미한다. 그림 9에서 제시된

**Fig. 9.** Relationship between cutting shear angle and chip thickness of Ta-W alloys.

것과 같이 툴 각도에 따라서 전단 각도의 큰 차이가 없을 것으로 예상되지만 실제 시험 결과(그림 6)에서는 툴 각도가 낮은 경우, 더욱 빠르게 칩 두께가 증가하는 경향이 있어 가공이 더욱 어려워지는 경향을 나타내는 것으로 사료된다. 반면, 실제 실험 결과에서 칩 두께가 유지되는 조건(툴 각도 20°, 절삭 깊이 0.03 mm, 절삭 속도 5 mm/s)을 확인해 보면 약 12도의 전단 각도일 경우, 절삭이 용이하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 이때 칩 절삭비는 약 5인 경우를 나타냈다. 탄탈륨 합금의 경우, 이러한 조건을 충족시켰을 때 연속적인 절삭 가공이 가능할 것으로 판단된다. 이와 함께 가공 속도의 경우, 표 3에서 제시한 것과 같이 속도의 증가에 따라서 절삭력이 크게 증가하지 않는 결과를 보이고 있다. 여기서 주목해야 할 점은 절삭력 증가폭이 가공 속도에 영향을 받는 것으로 확인되었으며 변형률 속도가 증가함에 따라 감소되었다가 증가되는

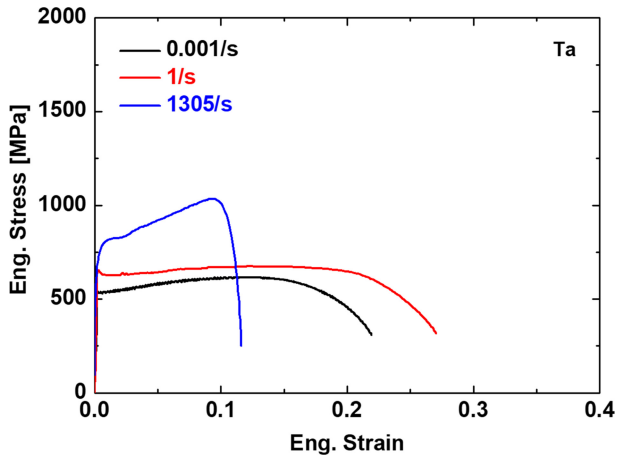


Fig. 10. Mechanical properties of Ta-W alloys with different strain rate.

결과를 나타냈다. 이는 탄탈륨 합금의 변형률 속도에 따른 기계적 특성의 변화에 의한 것으로 사료된다.

그림 10에서는 탄탈륨 합금의 상온 기계적 특성을 변형률 속도에 따라서 평가한 결과를 나타냈다. 0.001/s 속도 조건에서 항복강도는 약 500 MPa, 최대 강도는 600 MPa, 연신율은 22.5%로 확인되었으며 1/s 조건에서는 항복강도 650 MPa, 최대 강도 700 MPa, 연신율 27%로 측정되어 연신율이 다소 증가된 결과를 보였다. 1,305/s의 변형률 속도에서는 항복강도 750 MPa, 최대 강도 1,100 MPa를 나타냈다. 이 결과에서 주목해야 할 점은 1/s에서 항복점 이후 강도가 감소하는 결과를 보이고 있으며 변형 경화가 0.001/s와 1,305/s 조건보다 낮은 값을 나타내고 있었다. A.M. Rajendran 등[18]에 따르면 순수 탄탈륨에서도 동일한 현상(1/s~10/s 변형률 속도 조건에서 낮은 변형 경화)이 나타나고 있으며 이는 변형 불안정성 등의 원인으로 설명되고 있다. 즉, 특정 변형률 속도로 변형 또는 절삭/가공이 수행되는 경우, 상대적으로 낮은 절삭력을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 절삭 가공이 난해한 것으로 알려지고 있는 탄탈륨 합금의 가공 조건에 따른 절삭력을 측정하고 그 거동을 분석하였으며 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

비교제인 AISI 4340의 절삭력이 일정하게 유지되었으나 탄탈륨 합금을 절삭하는 경우, 공정 조건에 관계없이 비교제 보다 높은 절삭력을 나타내고 있었으며 절삭이 진행됨

에 따라서 절삭력이 유지되지 않고 크게 증가하는 결과를 보였다. 이는 탄탈륨 합금은 초기에는 상대적으로 얇은 두께의 칩이 형성되었으나 표면 굴곡에 의하여 칩 두께가 크게 증가하는 현상이 나타났다.

틀 각도를 20° 까지 증가시키는 경우, 절삭력이 효과적으로 감소되는 결과를 나타냈으며 칩 두께 또한 일정하게 유지되어 절삭력 증가분이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 가공 깊이의 경우, 가공 깊이가 증가함에 따라서 절삭력과 절삭력 증가분이 같이 증가하는 일반적인 경향이 관찰되었으며 절삭에 의한 전단 방향에 영향을 크게 주었다. 반면, 가공 속도는 다른 공정 조건에 비해 절삭력에 상대적으로 큰 영향을 미치지 않았다. 본 연구에서 제시한 최적 절삭 가공 조건은 틀 각도 20도, 절삭 깊이 30 μm , 절삭 속도 7.5 mm/s로 확인되었다.

일정한 칩 두께가 유지되는 조건을 확보하는 것이 절삭을 가능하게 하며 본 연구에서 적용한 탄탈륨 합금은 약 12°의 전단 각도, 칩 절삭비가 약 5인 경우에 절삭이 가능한 것으로 판단되었다. 또한 탄탈륨 합금의 절삭 변형률 속도에 따른 기계적 특성이 절삭력 상승분에 영향을 주는 것으로 판단됨에 따라 변형 경화가 상대적으로 적은 변형률 속도 조건이 될 수 있도록 가공 속도를 제어해 주는 것이 유리한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행(UE2111041D)되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, J. Fan, G. Petrescu, *J. Manuf. Processes* **4**, 112 (2002).
2. B. Swain, J. Lee, B.W. Gu, C.G. Lee, J.H. Yoon, *Waste Manag.* **144**, 294 (2022).
3. C. Cheng, Y. Fu, C. Du, Z. Du, Z. Jiang, F. Zhou, K. Zhong, X. Wang, *Int. J. Refract. Met. Hard. Mater.* **27**, 105873 (2022).
4. Y.N. Lv, K.G. Hu, C. Du, Z. Du, Z. Jiang, F. Zhou, M. Pan, H.Q. Deng, *Solid State Commun.* **206**, 5 (2020).
5. R. Wang, X. Wang, P. Yan, T. Zhou, L. Jiao, L. Teng, B. Zhao, *J. Manuf. Processes* **86**, 152 (2023).
6. J.M. Davis, M. Saei, D. P. Mohanty, A. Udupa, T. Sugihara, S. Chandrasekar, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.* **157**,

- 103607 (2020).
7. J. Wang, Z. Liu, Y. Wu, Q. Wang, D. Shu, *Machines* **12**, 170 (2024).
 8. T. Bergs, M. Abouridouane, M. Meurer, B. Peng, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* **70**, 45 (2021).
 9. K. Shintani, K. Wakabayashi, Y. Higuchi, H. Sumiya, *Proc. JSPE Autumn Conf.*, p.199, JSPE, Japan (2012).
 10. L.J. Lazarus, *Topical report: tantalum-2.5% tungsten machinability testing (KCP-613-8615)*, p.12-13, Honeywell Fed. Manuf. Technol., USA (2009).
 11. K. Shintani, K. Sakai, H. Kato, *Proc. JSPE Autumn Conf.*, p. 201, JSPE, Japan (2011).
 12. H. Yeung, K. Viswanathan, W. D. Compton, and S. Chandrasekar, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **112**, 9828 (2015).
 13. A. Udupa, K. Viswanathan, Y. Ho, S. Chandrasekar, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **473**, 20160863 (2017).
 14. M. Mizutani, T. Naruse, Y. Kameyama, Y. Koma, H. Ohmori, C. Sasaki, *J Vac Sci Technol B* **27**, 1367 (2009).
 15. A.S. Vandana, N. K. Sundaram, *Tribol. Lett.* **66**, 94 (2018).
 16. M.T. Perez-Prado, J.A. Hines, K.S. Vecchio, *Acta Mater.* **49**, 2905 (2001).
 17. T.G. Molnar, S. Berezvai, A. K. Kiss, D. Bachrathy, G. Stepan, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.* **145**, 103429 (2019).
 18. A.M. Rajendran, R.K. Garrett, Jr., J.B. Clark, T.L. Jungling, *J. Mater. Shaping Technol.* **9**, 7 (1991).