

Buse Ortaç Baştekli^{ID}

Hacı Abdullah Taşdemir^{ID}

Emin Orhun Baştekli*^{ID}

Batu Yüzbaşgil^{ID}

Seyfullah Hatipoğlu^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi,
Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği,
İstanbul/Türkiye

Lazer Kesme Hızının Tungsten Karbür Malzemede Kesme Derinliği Üzerine Olan Etkisi

Talaşlı imalat malzemelere uygulanan en yaygın imalat yöntemlerinden biridir. Talaşlı imalatla talaş kaldırma işlemi genellikle bir kesici uç vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kesici uçlar, işlenen malzemeden kayma deformasyonu ile malzeme kaldırarak yeni bir yüzey oluştururlar. Bu işlem neticesinde kesici uç zamanla aşınır ve kullanılamaz hale gelir. Kesici uç performansının iyileştirilmesi ve kesici takım ömrünün artırılması ile ilgili çalışmalar son yıllarda lazer ışınları ile tekstür oluşturma üzerine yoğunlaştırılmıştır. Yüzeylere lazer ışınları ile tekstür açma işlemlerinde malzemeye çeşitli gravürler açılarak bu gravürlerin bir desen oluşturması ve malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Yüzeylerde lazer ışınları ile tekstür oluşturma işlemlerinin mekanizmasının anlaşılabilmesi için lazer işleme parametrelerinin malzeme üzerinde bıraktığı etkilerin irdelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da, en çok kullanılan kesici uç malzemelerinden biri olan tungsten karbür malzemenin üzerine farklı lazer kesme hızları ile gravürler açılmış ve lazer kesme hızı ile kesme derinliği arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer ışınları ile tekstür oluşturma, lazer kesme hızı, tungsten karbür.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25 Şubat 2025

Kabul: 16 Ağustos 2025

*Sorumlu yazar: Emin Orhun Baştekli

E-mail: orhun-bastekli@yandex.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1646833>

1. GİRİŞ

Son yıllarda yüzey tekstürü oluşturma çalışmaları oldukça hız kazanmıştır [1]. Yüzeylerde tekstür oluşturma işlemlerinin amacı adhezyonu ve sürtünen yüzeylerin temas alanını azaltmak, sürtünme katsayısını azaltmak ve aşınma sonucu olan partikülleri toplamaktır [2]. Tribolojik özellikleri iyileştirmesi sebebi ile birbiri ile temas halinde çalışan sistemlerde kullanım yeri bulmuştur. Kullanım alanlarına örnek olarak; piston-silindir sistemleri, kesici takımlar, yataklar, hidrolik motorlar, protezler ve diş implantları verilebilir. Yüzey tekstürü oluşturma tekniklerinin arasında lazer ışınlarından yararlanma, elektroerozyon ile işleme, kimyasal dağlama, kumlama, mikro taşlama ve mikro döküm gibi yöntemler yer almaktadır [3]. Bu yöntemler arasında lazer ışınları ile tekstür oluşturma işlemi, sahip olduğu yüksek doğruluk, hızlı işlem kabiliyeti ve karmaşık yüzeylerin oluşturulabilmesine imkan verme özellikleri sebebi ile tercih sebebi olmaktadır [4]. Lazer ışınları yardımıyla yüzey tekstürü oluşturma işlemi çeşitli kesici uçlara uygulanabilmektedir. Literatürde matkap uçlarına [5, 6], torna plakalarına [7] ve frezeleme takımlarına [8] uygulanmış çalışmalar mevcuttur.

Malzeme yüzeyine açılan tekstürler farklı şekil ve geometride olabilmektedir. Tekstürler; noktalar şeklinde [9, 10], paralel ya da dik çizgiler şeklinde [11, 12], çeşitli geometrik şekillerin ya da harflerin oluşturduğu gravürler şeklinde [13, 14] olabileceği gibi biyomimetik şekillerde [15, 16] oluşturulabilir.

Lazer makineleri ile yapılan malzeme yüzeyinden talaş kaldırma işlemlerinde, çok kısa sürelerde çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığından malzeme özelinde lazer işleme parametrelerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Lazer gücü, lazer kesme hızı, frekans ve spot çapı gibi lazer parametrelerinin seçilmesi gereken optimum değerleri malzemeden malzemeye değişiklik gösterebilmektedir. Uygun lazer parametrelerinin tam olarak malzeme üzerinde etkisinin bilinmemesi halinde, lazer ile işleme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülüğü, metalürjik yapı ve mekanik özelliklerinin istenmeyen değer aralıklarında olması kaçınılmazdır. Lazer ışınları ile malzemenin üzerinde açılan gravürler bir araya gelerek yüzey tekstürünü oluştururlar. Her oluşturulan tekstür kendi içinde bulunduğu ortam ve

çalışma koşullarına göre performans göstermektedir. Yüzey tekstürlerinin istenilen boyutlarda ve boyut hassasiyetlerinde, malzemenin kimyasal özelliklerini değiştirmeden açılabilmesi için öncelikli olarak lazer parametrelerinin malzemeye olan etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmanın amacı da tungsten karbür malzeme üzerinde lazer ışınlarının etkisini farklı kesme hızları ile belirlemektir. Çalışma kapsamında malzemeye farklı lazer kesme hızlarında açılan gravürlerin derinlikleri ölçülmüştür. Yapılan çalışmanın, ileride gerçekleştirilmesi planlanan kesici takım üzerine lazer ışınları ile tekstür oluşturma çalışmalarına girdi oluşturması hedeflenmiştir.

Bertolete ve ark. [17] gerçekleştirdikleri çalışmada, tungsten karbür kesici takımların üzerine mikro kanallar şeklinde gravürler açarak yüzeyinde tekstür oluşturulmuş bu kesici takımların martenzitik paslanmaz çelik işleme performansına olan etkisini incelemişlerdir. İşlem sırasında 785 nm dalga boyuna sahip lazer makinesinde 15 μJ enerji ve 4 kHz frekans değerinde çalışmışlardır. Gravürlerin açılmasında 3 mm/s lazer kesme hızı tercih etmişler ve sonuç olarak ortalama 32 mikron derinliğe sahip gravürler elde etmişlerdir. Sonuç olarak işleme veriminin arttığı ve tribolojik özelliklerin iyileştiği gözlemlenmiştir. Schwanekamp ve ark. [18] gerçekleştirdikleri çalışmada, güç yoğunluk dağılımı Gauss eğrisine uyan, odak çapı 70 μm olan Nd-YAG lazer makinesi kullanmışlardır. Deneylerde lazer gücü 50 W ile 200 W arasında, lazer kesme hızı ise 25 mm/s ile 200 mm/s arasında seçilmiştir. Bunun sonucunda, tungsten karbür malzemede gravür açmak için gerekli olan kritik P/Vs (Lazer gücü/Lazer kesme hızı) değerinin 0,25-8 J/mm aralığında olması gerektiği sonucuna varmışlardır. P/Vs oranının bu değer aralığında olmadığı lazer işleme operasyonlarının malzeme üzerinde herhangi bir etki oluşturmadığı görülmüştür.

Marimuthu ve ark. [19] yaptıkları çalışmada, pikosaniye lazeri ve tungsten karbür blokları üzerinde çalışmışlardır. Lazer parametresi olarak, lazer gücü maksimum 300 W ve frekans 0,6-40 MHz değerlerini tercih etmişlerdir. Çalışmanın sonunda, kesme derinliği ile kesme hızları arasındaki ilişki hakkında yorum yapmışlardır. 2,30-9,6 mm/s aralığında seçilen lazer kesme hızlarının, kesme derinliği üzerinde düşük bir etkisinin olduğu ancak malzemeden talaş kaldırma konusunda etkili hız aralığı olduğu tespit edilmiştir. Teicher ve ark. [20] yaptıkları çalışmada, yüzeylere direkt lazer ışını interferansı ile tekstür açma yöntemini kullanmışlardır. Tungsten karbür ile yapılan çalışmalarda frekans değeri 20 kHz seçilmiş olup gravürler 2,46 J/ cm^2 enerji yoğunluğu ile açılmıştır. 2,2 mikron derinliğe ve 5 mikron aralığa sahip gravürler malzemenin tekstür yapısını oluşturmuştur. Bu araştırmada, tekstürleme için gerekli kesme hızı değeri paylaşılmamış olsa da sabit

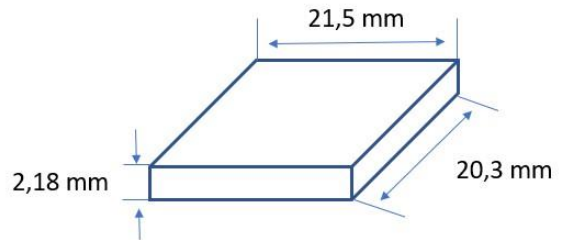
bir enerji yoğunluğu değeri ile işlemin stabil olarak gerçekleştirilmiş olması, sabit güce sahip lazer makinasının sabit bir kesme hız değerinde çalıştırıldığını göstermektedir.

Shin ve ark. [21] gerçekleştirdikleri çalışmada, femtosaniye lazeri ile %10 Co içeren tungsten karbür malzemede delik açabilmek için gerekli olan eşik enerji yoğunluk değerini araştırmışlardır. 1026 nm dalga boyunda ve 100 kHz frekans değerinde gerçekleştirdikleri deneylerde karbür plakalarda delik delme/talaşlı işleme yapabilmek için gerekli eşik enerji yoğunluğu değerini 0,33 J/ cm^2 olarak tespit etmişlerdir. Ding ve ark. [22] yaptıkları araştırmada, femtosaniye lazeri vasıtasıyla 50-200 mm/s kesme hızı aralığında, 1,92-11,20 W ortalama lazer güç çıkışı değerlerinde, WC-Co malzemeye çeşitli boyutlarda gravürler açmışlar ve yüzeyin kesme derinlikleri ile pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak lazer tarama hızları ile kaldırılan talaş miktarı arasındaki ilişkiyi grafiğe çevirerek gelecek çalışmalar için anlamlı hale getirmişlerdir.

Çalışmanın amacı, 50W ortalama çıkış gücü, 50 mikron sabit spot çapı, 50 kHz sabit frekans ve lazer kesme hızı 1-128 mm/s aralığı parametreleri ile, 1064 nm dalgaboylu, Q-switch, nanosaniye atımlı lazer makinesinde, tungsten karbür malzeme üzerinde açılan gravürlerin kesme derinliklerinin araştırılmasıdır. Ayrıca, çalışmanın tungsten karbür esaslı kesici uçların yüzeylerinin lazer ile tekstürlenerek kesme performanslarının iyileştirilmesi konusundaki gelecek çalışmalara temel oluşturması hedeflenmiştir. Çalışmanın özgünlüğü, kullanılan lazer makinasının teknik özelliklerinin ve seçilen lazer parametrelerinin mevcut çalışmalardan farklı olmasıdır.

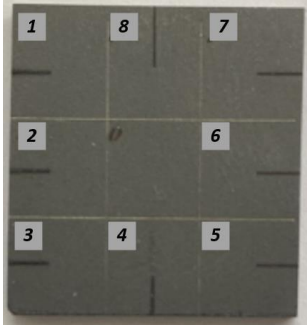
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneylerde 2,18 mm kalınlığa, 20,3 mm ve 21,5 mm kenar uzunluklarına sahip, %8,82 kobalt içeren, çizimi Şekil 1'de görülen tungsten karbür plaka kullanılmıştır. Plaka, standart üretim prosedürlerine göre, 5 eksen taşlama operasyonundan sonra kesici uç (insert) olarak piyasaya sunulması planlanan yarı mamül malzemedir.



Şekil 1: Tungsten karbür plakaya ait geometrik çizim.

Plakanın üzerine Şekil 2’de görüldüğü gibi numaralandırma yapılmıştır. Her numara alanına farklı lazer kesme hızı ile gravür açma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2: Numaralandırılmış ve farklı lazer ilerleme hızlarında işlenmiş tungsten karbür plaka.

Lazer ile yüzey gravürü oluşturma işlemlerinde 1064 nm dalga boyuna sahip darbe modlu-QB anahtarlamalı 50 W Nd:YAG lazer kaynağı (Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd.) kullanılmıştır. Lazer makinesinin güç yoğunluk dağılımı Gauss eğrisine (TEM 00) uymaktadır. Lazer ile işleme esnasında herhangi bir soğutma işlemi uygulanmamış işlemler atmosferik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan Nd:YAG fiber lazer makinesinin teknik özellikleri Tablo 1’de, makineye ait alt bileşenlerin gösterildiği şematik çizim ise Şekil 3’te görülmektedir.

Tablo 1: Fiber lazer makinesinin özellikleri.

Nd:YAG Fiber Lazer Makinesi Teknik Özellikleri	
Lazer Tipi	Nanosaniye Lazeri
Ortalama Çıkış Gücü (W)	50
Dalga boyu (nm)	1060~1085
Darbe süresi (ns)	120~150@50 kHz

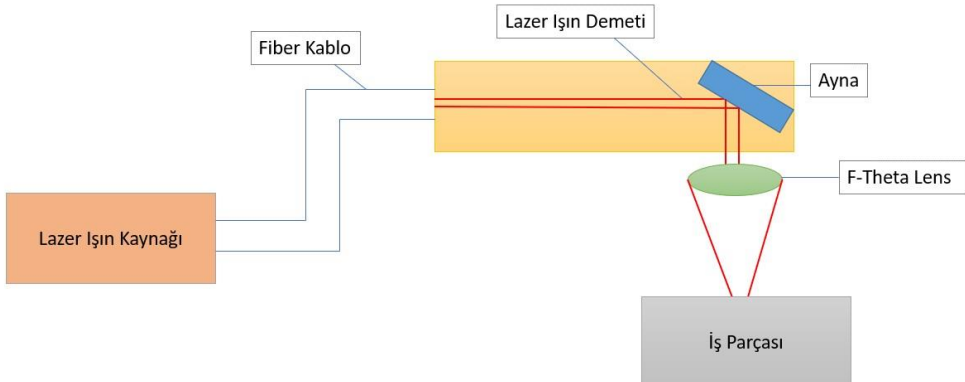
Tungsten karbür plakanın numaralandırılmış bölümlerine etki ettirilen lazer parametreleri Tablo 2’de görüldüğü gibidir. Kesme derinliği üzerinde lazer kesme hızının etkisini görebilmek için lazer gücü, frekans ve spot çapı değerleri sabit tutulmuş sadece lazer kesim hızı değerleri değiştirilmiştir. Yapılan deneylerde lazer gücü 50 W, frekans 50 kHz ve spot çapı 0,05 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 2: Deneylerde seçilen lazer parametre değerleri.

Gravür Numarası	Hız (mm/s)
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tungsten karbür plaka üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, açılan 8 adet gravüre ait lazer kesme hızına bağlı olarak değişen kesme derinlikleri Tablo 3’te belirtildiği gibi ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin grafiğe yansımış hali Şekil 3’te görülmektedir. Lazer kesme hızı ve kesme derinliği değerlerine göre çizdirilen grafikte 3 ana bölgenin oluşumundan bahsedilebilir. 7 ve 8 numaralı gravür değerlerini kapsayan 1. bölgede kesme derinliklerinin 50 mikron ve altında olduğu, 5 ve 6 numaralı gravür değerlerini kapsayan 2. bölgede kesme derinliklerinin 50 ve 100 mikron arasında seyrettiği, 1, 2, 3 ve 4 numaralı gravür değerlerini kapsayan bölgede ise kesme derinliklerinin 100 mikron ve üzeri olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 3: Fiber lazer makinesinin alt bileşenlerinin şematik gösterimi.

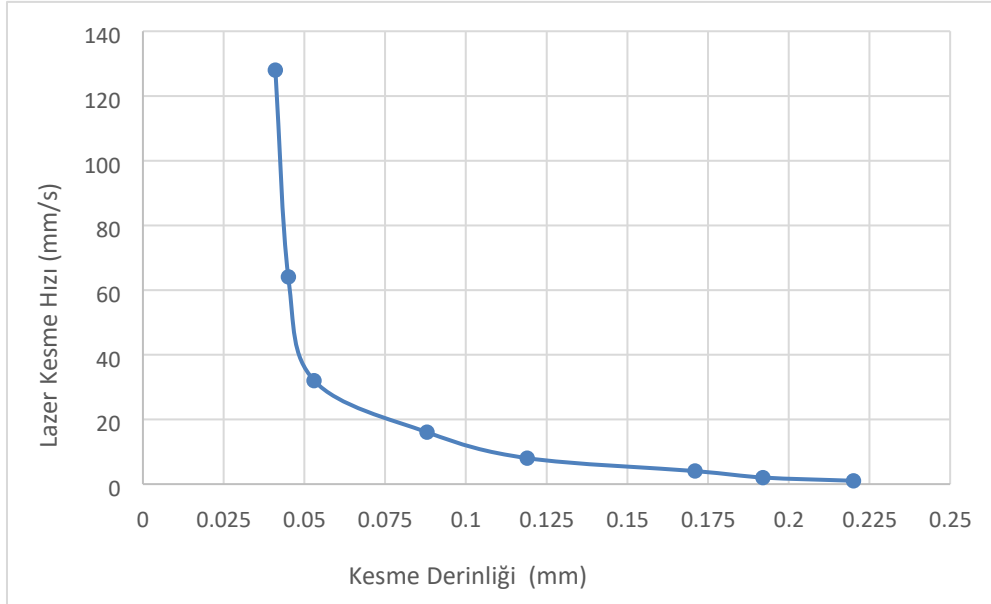
1000x dijital mikroskop ile büyütülerek incelenen gravür bölgelerine ait fotoğraf Şekil 5'te görüldüğü gibidir. Fotoğraftan da görüleceği gibi 2 mm/s lazer kesme hızı ile açılan gravüre ait bu görüntüde gravür bölgesinin kaynak dikişi bölgesine benzeyen bir görüntüde olduğu gözlemlenmiştir. V şekline benzeyen bu görüntü lazer makinesinin gönderdiği ışınların gauss eğrisi ile uyumlu olmasının bir sonucudur. Isıdan etkilenen bölge V şeklini çevreleyen bölge boyunca belirginleşmiş durumdadır. 2 mm/s, 32 mm/s ve 128 mm/s lazer kesme hızları ile açılmış kesme derinlikleri ise sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için Şekil 6'da yanyana verilmiştir. Lazer kesme hızının artması ile derinliğin azaldığı ve gravür bölgesinin 'V' şeklinden 'U' şekline doğru bir görünüm oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen çizgisel gravür geometrilerinin, literatürde lazer yüzey

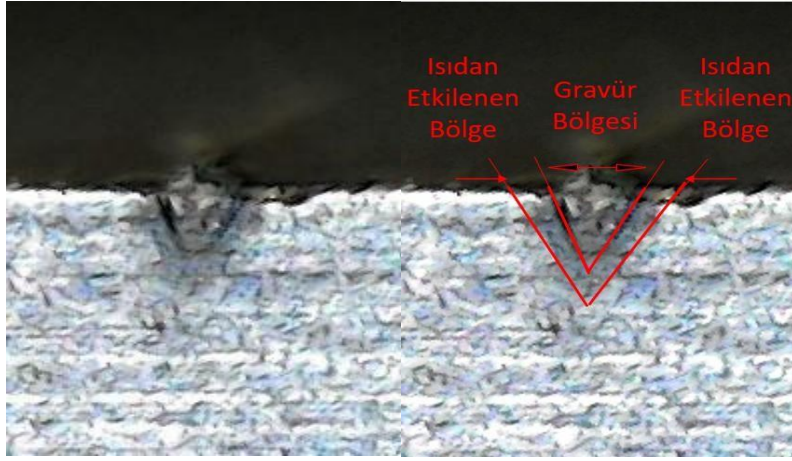
tekstürleme çalışmalarında da tercih edildiği görülmektedir [11, 12]. Ölçümlenen kesme derinlik değerlerinin literatür ile karşılaştırıldığında kullanılan farklı lazer makinası teknik özelliklerine ve seçilen lazer parametrelerine göre farklılık gösterdiği dikkat çekmektedir. Kullanılan lazer makinesinin lazer kaynağının [17], modülasyon tipinin [18], lazer atım tipinin [19], lazer işleme tekniğinin [20], lazer atım sürelerinin [21] farklı olması açılan gravür boyutlarının (derinlik ve genişlik) farklı olmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum işlenebilirliğin, belirtilen özelliklerin fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır. Bahsi geçen özellikler her ne kadar yapılan çalışmalarda farklılıklar gösterse de lazer kesme hızı-kesme derinliği trendi geçmiş çalışmalar ile paraleldir [17-22]. Bu bağlamda, lazer kesme hızı azaldıkça açılan gravür derinliği artmaktadır.

Tablo 3: Lazer kesme hızına bağlı olarak kesme derinliği ölçümleri.

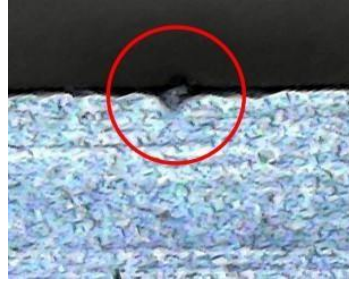
Gravür Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Kesme Hızı (mm/s)	1	2	4	8	16	32	64	128
Kesme Derinliği (mm)	0,220	0,192	0,171	0,119	0,088	0,053	0,045	0,041



Şekil 4: Farklı lazer kesme hızları ile açılmış gravür derinlikleri.



Şekil 5: Gravür bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge.



Şekil 6: 2 mm/s, 32 mm/s ve 128 mm/s lazer kesme hızları ile açılmış kesme derinlikleri.

4. SONUÇ

Yapılan çalışmada, 1064 nm dalgaboyunda, nanosaniye atımlı 50W Nd:YAG lazeri ile 50 kHz sabit frekansta, 1-128 mm/s lazer kesme hızı aralığındaki çeşitli hızlarda, tungsten karbür malzeme işlenmiş ve çeşitli kesme derinliklerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. 50W maksimum güç seviyesinde ve 1 mm/s minimum lazer kesme hızı değerinde ulaşılabilen maksimum kesme derinliği 220 mikron olarak ölçümlenmiştir. Maksimum lazer kesme hızı 128 mm/s olarak seçilen lazer kesme hızı için ise ulaşılabilen kesme derinliği 41 mikrondur. Elde edilen kesme derinliklerine göre çizdirilen lazer kesme hızı-kesme derinliği grafiğinde şekilsel olarak 3 bölgenin olduğu gözlemlenmektedir. Bunlar 0-50 mikron, 50-120 mikron ve 120-220 mikron aralığındaki kesme derinlik bölgeleri olmaktadır. Belirli lazer kesme aralıklarında kesme derinliği değerlerinin belirli bir karakteristiğe göre değiştiği belirlenmiştir. İncelenen mikroskop görüntülerinde de, farklı lazer kesme hızlarında gravürlerin nispeten farklı geometrik özellik ('V' ve 'U' formasyonu) gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, lazer kesme hızı azaldıkça ısıdan etkilenen bölgenin varlığı dikkat çekmektedir.

EFFECT OF LASER CUTTING SPEED ON CUTTING DEPTH IN TUNGSTEN CARBIDE MATERIAL

Machining is one of the most commonly applied manufacturing methods for materials. In machining, the material removal process is typically performed using a cutting tool. Cutting tools generate a new surface by removing material from the workpiece through shear deformation. As a result of this process, the cutting tool gradually wears out and becomes unusable. In recent years, research has increasingly focused on enhancing cutting tool performance and extending tool life through the use of laser beam texturing techniques. Laser surface texturing involves engraving patterns onto the material using laser beams, with the aim of forming specific textures that improve the tribological properties of the material. In order to understand the mechanism of laser surface texturing, it is essential to investigate the effects of laser processing parameters on the material. In this study, one of the most commonly used cutting tool materials, tungsten carbide, was textured using various laser cutting speeds. The relationship between laser cutting speed and cutting depth was observed and analyzed.

Keywords: Laser surface texturing, laser cutting speed, tungsten carbide.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Birimi tarafından MGA-2023-45222 numaralı genel araştırma projesi ile desteklenmektedir. Yazarlar, deneylerin yapılmasında malzeme ve cihaz tedarikini sağlayan Buse

Dental San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Moncarb Kesici Takımlar San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarına, ayrıca projenin fonlanmasını sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

1. Nagpal, J., Rana, R., Lal, R., Singari, R. M., & Kumar, H. 2022. "A brief review on various effects of surface texturing using lasers on the tool inserts", *Materials Today: Proceedings*, 56, 3803-3812.
2. Roushan, A. 2023. "Influence of laser parameters on the machining performance of textured cutting tools". *Optics & Laser Technology*, 165, 109569.
3. Arslan, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Mufti, R. A., Mosarof, M. H., Khuong, L.S., & Quazi, M. M. 2016. "Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review". *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(6), 447-481.
4. Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y., & Menezes, P. L. 2020. "Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review", *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 153-173.
5. Öztürk, E., & Kaya, K. 2024. "Drilling performance of micro-textured twist drill bit for TI-6AL-4V alloy: Validated FEM and statistical approaches". *Journal of Manufacturing Processes*, 115, 342-351.
6. Niketh, S., & Samuel, G. L. 2017. "Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy". *Journal of cleaner production*, 167, 253-270.
7. Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N., & Hori, I. 2009. "Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior". *Precision Engineering*, 33(3), 248254.
8. Sugihara, T., & Enomoto, T. 2012. "Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture". *Precision Engineering*, 36(2), 229-237.
9. Vignesh, G., Barik, D., Ragupathi, P., & Aravind, S. 2020. "Experimental analysis on turning of AISI 4340 steel using non-textured,

dimple textured and MoS2 coated dimple textured carbide cutting inserts at the rack surface". *Materials Today: Proceedings*, 33, 2616-2620.

10. Etsion, I. 2004. "Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing". *Tribology letters*, 17, 733-737.
11. Baumann, R., Bouraoui, Y., Teicher, U., Selbmann, E., Ihlenfeldt, S., & Lasagni, A. F. 2023. "Tailored laser structuring of tungsten carbide cutting tools for improving their tribological performance in turning aluminum alloy Al6061 T6". *Materials*, 16(3), 1205.
12. Bhaduri, D., Dimov, S., & Soo, S. L. 2016. "Laser texturing of tungsten carbide tools: the effects on tribological performance when machining Ti-6Al-4V alloy". In *euspen's 16th International Conference & Exhibition*, UK.
13. Maldonado-Cortés, D., Peña-Parás, L., Martínez, N. R., Leal, M. P., & Correa, D. I. Q. 2021. "Tribological characterization of different geometries generated with laser surface texturing for tooling applications". *Wear*, 477, 203856.
14. Sreedath, P., Bhat, S., & Arunachalam, N. 2019. "Evaluation and characterization of deterministic laser textured surfaces using machine vision". *Measurement*, 135, 537-546.
15. Fatima, A., & Mativenga, P. T. 2017. "On the comparative cutting performance of nature-inspired structured cutting tool in dry cutting of AISI/SAE 4140". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(11), 1941-1948.
16. Ranjan, P., & Hiremath, S. S. 2022. "Influence of texture parameters of the bio-inspired crescent textured tool on machining performance of martensitic stainless steel". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 39, 70-90.
17. Bertolete, Marcelo & Barbosa, Patrícia & Machado, Alisson & Samad, Ricardo & Vieira, Nilson & Vilar, R. & de Rossi, Wagner. 2018. "Effects of texturing the rake surfaces of cemented tungsten carbide tools by ultrashort laser pulses in machining of martensitic stainless steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 98. 1-12. 10.1007/s00170-018-2407-x.
18. Schwanekamp, Tobias & Gussone, Joachim & Reuber, Martin. 2020. "Impact of laser irradiation on microstructure and phase development of tungsten carbide - cobalt". *Procedia CIRP*. 94. 239-242.
19. 10.1016/j.procir.2020.09.045.

20. Marimuthu, Sundar & Dunleavy, Justin & Smith, Bethan. 2020. "High-power ultrashort pulse laser machining of tungsten carbide". *Procedia CIRP*. 94. 829-833. 10.1016/j.procir.2020.09.115.
21. Teicher, Uwe & Baumann, Robert & Bouraoui, Yasmine & Ben Achour, Anas & Lasagni, Andrés & Ihlenfeldt, Steffen. 2022. "Laser structuring with DLIP technology of tungsten carbide with different binder content". *Procedia CIRP*. 111. 601-604. 10.1016/j.procir.2022.08.159.
22. Shin, Young-Gwan & Ji, Seok-Young & Choi, Junha & Cho, Sung-Hak. 2022. "Morphologies of cemented tungsten carbide ablated by pulsed femtosecond laser to manufacture next-generation blades of a cutting tool". *Applied Physics A*. 128. 10.1007/s00339-022-05945-8.
23. Li, Guangxian & Li, Xuanang & He, Guichao & Fan, Ruiguang & Li, Feiyuan & Ding, Songlin. 2023. "Surface Quality and Material Removal Rate in Fabricating Microtexture on Tungsten Carbide via Femtosecond Laser". *Micromachines*. 14. 1143. 10.3390/mi14061143.