

Tuğçe Hacaloğlu 

ATILIM Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu 

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 07-02-2020

Kabul: 04-03-2020

* Sorumlu Yazar: Tuğçe Hacaloğlu
Email: tugcehacaloglu@gmail.com

Karbür Uçlar ve Titanyum Nitrür (TiN) Kaplamalı Karbür Uçlar ile Titanyum Alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 Çeliği Arasında Sürtünme ve Aşınma Performansı Araştırması

Bu çalışmada, Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 çeliği üzerinde, karbür (WC-Co) ve TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uçlar ile kuru sürtünme deneyleri, iki değişik hız ve iki değişik yük altında, tribometre ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney sonuçlarında, sürtünme katsayıları zamana bağlı grafikler olarak elde edilmiş, en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, karbür uçlardaki ve Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 çeliği disklerdeki aşınmalar da ölçülmüştür. Sürtünme katsayılarının, malzemeye, TiN kaplamaya, hız ve yüke bağlı değişkenlikleri elde edilmiştir. Bu bilgilerin, kesme işlemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak modellenmesinde uygulanabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme katsayısı, Aşınma, Triboloji

GİRİŞ

Metal kesme işlemi günümüzde sıklıkla tercih edilen imalat yöntemlerinden biridir [1]. Kesme işlemi esnasında çalışılan iş parçasından ortaya çıkan talaş ile birlikte deformasyonlar, takım ve talaş arasında gerilmeler ve yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır [2]. Metal kesme işlemi esnasında birtakım parametreler kritik öneme sahiptir ve bunların belirlenmesi gerekmektedir. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz; kesme esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin ve sıcaklıklarının belirlenmesi, çalışılan malzemenin yüzeyinde ortaya çıkan artık gerilmelerin belirlenmesi, kesme işleminin optimum kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin belirlenmesidir. Tüm bu bahsedilen parametreler deneysel olarak elde edilebilir. Sayısal yöntemler bu açıdan önem kazanmaktadır. Bahsedilen tüm parametreler sayısal yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi-SEY) ile yaklaşık olarak modellenmektedir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, metal kesme yönteminin sonlu elemanlar uygulamalarında kullanıldığı ve sürtünme modelleri ile malzeme etkileşimini araştıran çalışmalar görülmektedir. Filice vd.[3] beş farklı sürtünme modeli ve sürtünme katsayılarını SEY ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, takım ve iş parçası ile sürtünme modeli arasındaki sıcaklık değişim katsayısının kesme esnasında meydana gelen sıcaklıklara etkileri incelenmiştir. Bil [4] sürtünme modellerini incelemiştir. Üç farklı sonlu elemanlar programı aracılığı ile kesme parametrelerinin kesme

kuvvetlerine etkilerini incelemiştir. Bir diğer, modelleme çalışması ise, Komvopoulos vd. [5] tarafından yapılmıştır. Ortogonal kesme sırasında talaş oluşumunu, talaş akışını, talaş-takım ara yüzeyindeki sürtünme ve takım aşınmasını incelemek için sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır. Özel [6], bir çalışmada kesme parametrelerini ve kesici takım ve iş parçası arasındaki sıcaklık değerlerini incelemiştir. Kaplanmış takımlar günümüz metal işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü ince ve sert kaplamalar takım aşınmasını azaltırken, takım ömrünü ve verimliliği de arttırabilmektedir. Bu tür kaplamalar daha düşük takım aşınmaları ve azalan kesme kuvvetleri nedeniyle, işleme ekonomisine ve kesici takım performansına önemli katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, araştırmacılar kaplamalı takımların aşınma performansındaki artışın işleme koşulları ile yakından ilgili olduğunu göstermişlerdir [7].

Tribolojik uygulamalar için, yüzey mühendisliğinin kullanılmasında iki amaç vardır. Bunlardan birisi, yüzey malzemesinin aşınma direncini arttırmak, diğeri ise yüzey malzemesinin sürtünme davranışını iyileştirmektir. Osakada vd. [8] yaptıkları çalışmada, kaplanmış takımlar üzerine yaptığı incelemede, sürtünme katsayısının yağlayıcı olmadan takım yüzeyinin pürüzlülüğünden hassas bir şekilde etkilendiğini belirtmiştir. Kesme işleminin teorik olarak modellenmesinde sürtünme katsayısının kullanımı gerekmektedir. Bu katsayıların deneysel olarak ve kesme koşullarının gerektirdiği ortamlar

kullanılarak, örneğin tribometre kullanılarak bulunması gerekmektedir. Tribometre deneylerinde ve diğer simülatif deneylerde, kesme koşullarında kullanılan sıcaklık, hız yağlama tekniği ve yük kullanılmalıdır [9]. Katmanlı kaplama tekniklerinin gelişmesi ile birlikte, kaplamalı karbür kesici takımların geliştirilmiş özellikleri bu takımları, sertleştirilmiş çeliklerin, alaşımli çeliklerin ve demir dışı alaşımların işlenmesini kolaylaştırıcı hale getirmiştir. Karbür kesici takımların aşınma davranışları oldukça karmaşıktır ve seçilen iş parçası malzemesi-kesici takım çiftine göre farklılık göstermektedir. Dolayısıyla takım performanslarını arttırmak için optimum parametrelerin belirlenmesi ve aşınma davranışlarının tanımlanması gerekliliği birçok araştırmacıyı bu konularda çalışmaya sevk etmiştir. Wang ve Ezugwu [10] tarafından yapılan çalışmada PVD yöntemi ile TiN ve TiN/TiCN/TiN kaplanmış karbür kesici takımların Ti6Al4V malzemesinin işlenmesindeki performansı araştırılmıştır. Yan kenar aşınması, talaş oluşumu, takım uç yarıçapında ve talaş yüzeyindeki etkin aşınma mekanizması incelenmiştir. Kesici takımların ve kalıpların aşınma dayanımlarını artırmanın etkili yollarından biri yüzey kaplaması uygulamasıdır. Bu kaplamalardan sanayide en yaygın olarak kullanılanlar titanyum nitrür (TiN) ve titanyum alüminyum nitrür (TiAlN) kaplamalarıdır [11].

Sürtünme katsayısı, genelde “pin on disk” yöntemi kullanılarak bulunmaktadır. Bu çalışmada, bu yöntem kullanılarak Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı ve kaplamsız karbür uçlar ile Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 çeliğinin sürtünme ve aşınmaları incelenmiştir.

DENEY DÜZENİ

Ölçümler Şekil 1’de gösterilen CSM Marka Tribometre® cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler “pin on disk” yöntemi ile yapılmıştır. Deneylerde pin veya bilye tipi aşındırıcılar veya aşınan numuneler dönen bir diske karşı bir kuvvet uygulanır. Deney sırasında veya sonrasında sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, aşınma hızı/oranı, aşınma hacmi, test sıcaklığı ve daha pek çok tribolojik parametre ölçülebilmektedir. Bu yöntem ile alaşımların, seramiklerin, polimerlerin, metallerin, kaplamaların, katı yağlayıcılar vb malzemelerin tribolojik özellikleri karakterize edilebilmektedir. Bu testler kuru, yağlı ve korozif ortamlarda ile farklı atmosferik şartlarda yapılabilmektedir. Test Numuneleri olarak ise, Pin-on-disk yöntemi ile pin veya disk şeklinde numuneler kullanılmaktadır. Bu amaçla bilye hem aşındırıcı hem de numune olarak kullanılabilir.



Şekil 1. Sürtünme ve aşınma test cihazı

Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 çeliği olmak üzere iki çeşit numune bulunmaktadır. Kullanılan malzemelere ait malzeme özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzeme Mekanik Özellikleri

Malzeme Adı	Poisson Oranı	Elastik Modülüs (GPa)
Titanyum alaşımı (Ti6Al4V)	0,3	110
AISI 1045 Çeliği	0,3	210

Şekil 2’de gösterilen 80mm çapında, 500mm boyundaki çubuklardan Şekil 3’de gösterilen 40-55 mm çapında diskler kesilerek 8 deney için toplam 16 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 2. AISI 1045 çeliği



Şekil 3. Ti6Al4V ve AISI 1045 çeliği örnekleri ile kaplamasız WC-Co ve TiN kaplamalı uçlar

Aynı şekilde kesici uç malzemesi olan karbürden (WC-Co) 16 adet pin SECO tarafından hazırlanmıştır. Hazırlanan karbür (WC-Co) pinlerin 8 tanesi TiN ile SECO tarafından kaplanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve yağlayıcı kullanılmadan kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneyler sırasında temas sıcaklıkları da ölçülmüştür.

Deneylerde, 1.6 N ve 4.5 N olmak üzere iki farklı normal yük ve iki farklı doğrusal hız kullanılmıştır. Bu hızlar, 333.33mm/s ve 1333.3 mm/s' dir. Dönüş çapı 40-55 mm olacak şekilde 56 m boyunca yapılmıştır. Ölçüm parametrelerini içeren arayüz bilgileri Şekil 4'de verilmiştir.

Kullanılan pinlerden birinde oluşan aşınmanın birinde oluşan aşınmanın mikroskop görüntüsü Şekil 5'de verilmiştir

DENEYLER

SÜRTÜNME VE AŞINMA TESTLERİ

Deneyler toplamda 16 adet olmak üzere, karbür WC-Co uçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu uçların yarısı TiN kaplama ile kaplanmış olarak kullanılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız deneyler her iki malzeme içinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde diğer parametre ise hız ve yük olmuştur. Yüksek ve düşük yük olmak üzere iki farklı yük kullanılmıştır. Aynı şekilde, yüksek ve düşük hız olmak üzere iki farklı hız kullanılmıştır. Deney parametrelerinin tamamını içeren Tablo 2'de verilmiştir.

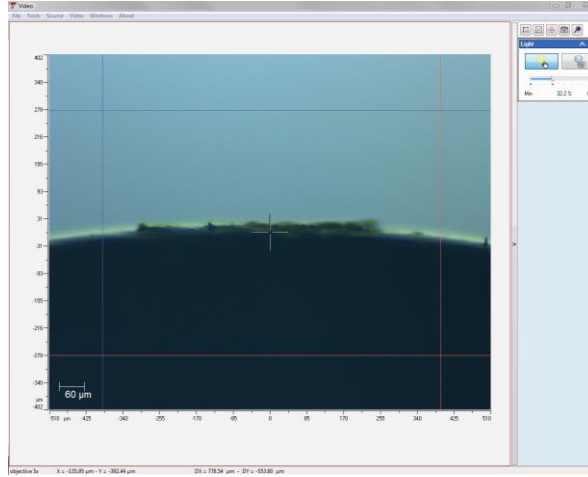
Tablo 2. Deney parametreleri

Malzeme Cinsi	Ti6Al4V	AISI1045
Pin/Uç	TiN+WC-Co	WC-Co
Hız (mm/s)	1333,33	333,33
Yük (N)	4,5	1,6

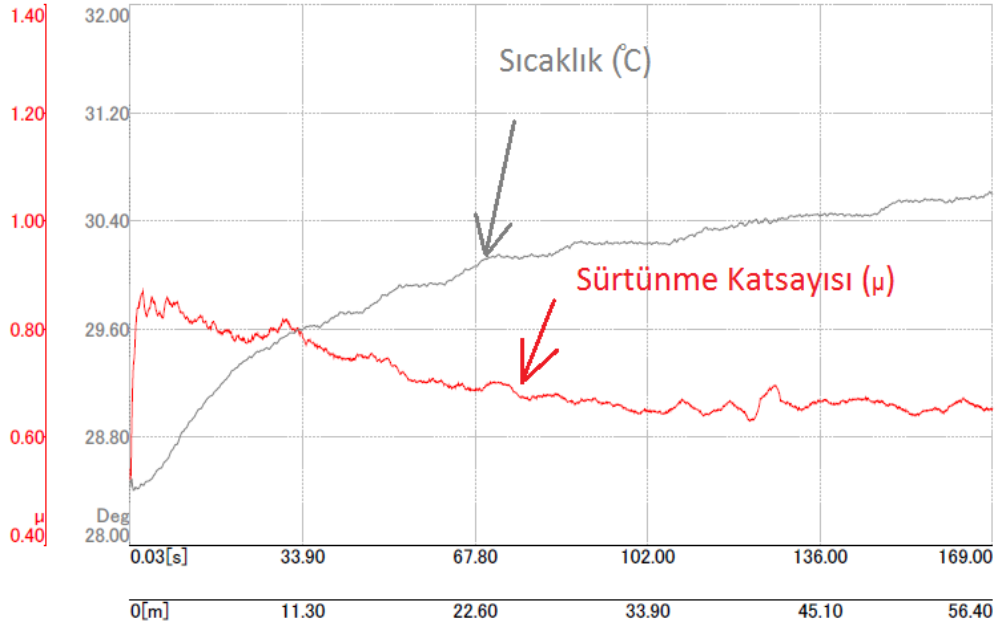
DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ti6Al4V ve AISI 1045 çeliği ölçüm sonuçları sırası ile Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 6 ve Şekil 7'de Ti6Al4V ve AISI 1045 çeliğin ait sürtünme katsayısı ölçüm sonuç grafiği verilmiştir.

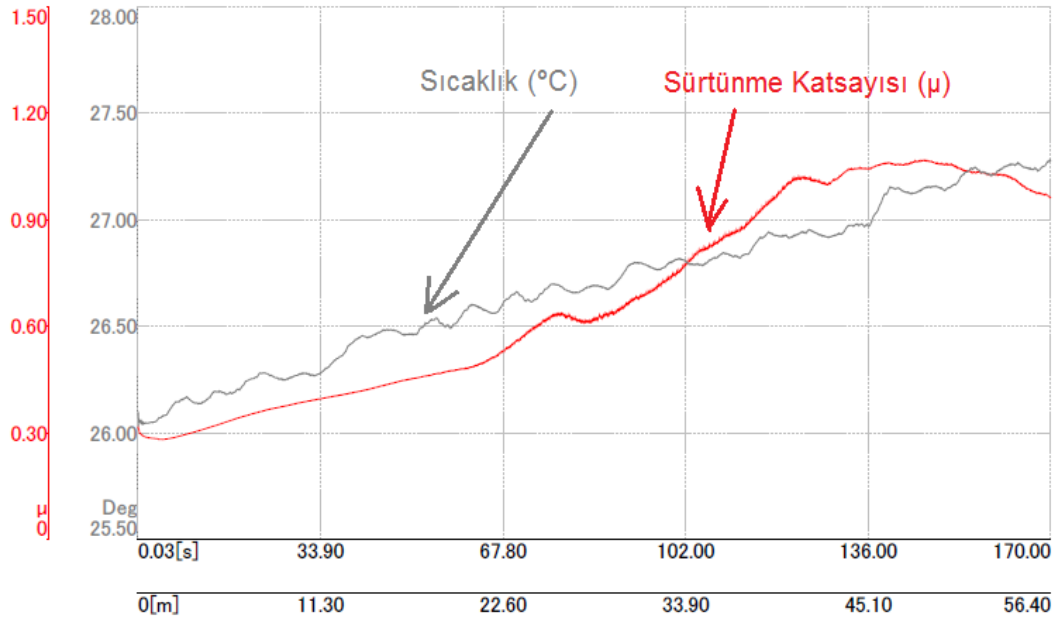
Şekil 4. Tribometre Deney parametreleri



Şekil 5. Pinde oluşan aşınmanın mikroskop görüntüsü



Şekil 6. TiAl6V4 alaşımı 6 numaralı örneğin TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç ile yapılan tribometre deneyi sonuç grafiği



Şekil 7. AISI 1045 çeliği 4 numaralı örneğin kaplamasız karbür (WC-Co) uç ile yapılan tribometre deneyi sonuç grafiği

Tablo 3. Titanyum alaşım (Ti6Al4V) örneklerine ait ölçüm parametreleri ve sürtünme katsayısı sonuçları

Pin tipi	Numune Tipi ve adı	Yük (N)	Hız (mm/s)	Sürtünme katsayısı ortalama değeri
Kaplamasız Karbür Uç	Ti-1	4.5	333.33	0.62
	Ti-2	1.6	333.33	0.72
	Ti-3	4.5	1333.33	0.67
	Ti-4	1.6	1333.33	0.70
TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç	Ti-5	4.5	1333.33	0.62
	Ti-6	4.5	333.33	0.71
	Ti-7	1.6	1333.33	0.76
	Ti-8	1.6	333.33	0.84

AISI 1045 Çeliği üzerinde kaplamalı ve kaplamasız karbür (WC-Co) uçlar ile yapılan ölçümlere ait tablo Tablo 4’de verilmiştir.

Aşınma deneyleri sonuçları:

Aşınma, birbirine temas eden yüzeylerden mekanik etkiler sebebiyle mikro parçacıkların ayrılması sonucunda malzemede istenilmeyen bir değişikliğin meydana gelmesi şeklinde açıklanmıştır.

Temas halindeki yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına neden olmakta, aşınma ise çalışma toleranslarının bozulmasına ve makine parçalarının fonksiyonlarını tam olarak yerine getirmesine engel olmaktadır [9]. Aşınma deneyleri yine aynı şekilde sürtünme katsayısı ölçümü esnasında ölçülmüştür. Yazılımdaki aynı ekrana malzeme bilgileri girilerek elde edilmiştir. Mikroskop ile pinde oluşan aşınma görülebilmektedir.

Tablo 4. AISI 1045 Çeliği örneklerine ait ölçüm parametreleri ve sürtünme katsayısı sonuçları

Pin tipi	Numune Tipi ve adı	Yük (N)	Hız (mm/s)	Sürtünme katsayısı ortalama değeri
Kaplamasız Karbür (WC-Co) uç	C45-1	4.5	1333.33	0.74
	C45-2	1.6	1333.33	0.67
	C45-3	4.5	333.33	0.88
	C45-4	1.6	333.33	0.68
TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç	C45-5	4.5	1333.33	0.71
	C45-6	4.5	333.33	0.85
	C45-7	1.6	1333.33	0.72
	C45-8	1.6	333.33	0.86

AISI 1045 Çeliği aşınma deneyleri sonuçları:

Tablo 5. AISI 1045 Çeliği örnekleri ve karbür (WC-Co) uçlardaki aşınma bilgileri

Pin tipi	Numune Tipi ve adı	Pin aşınma oranı (mm ³ /n/m)
Kaplamasız Karbür (WC-Co) uç	C45-1	4,037E-18
	C45-2	2,197E-17
	C45-3	3,727E-15
	C45-4	1,952E-17
TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç	C45-5	6,076E-19
	C45-6	4,651E-19
	C45-7	1,501E-18
	C45-8	6,956E-18

Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) aşınma deneyleri sonuçları:

Tablo 6. Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) örnekleri ve karbür (WC-Co) uçlardaki aşınma bilgileri

Pin tipi	Numune Tipi ve adı	Pin aşınma oranı (mm ³ /n/m)
Kaplamasız Karbür (WC-Co) uç	Ti-1	1,827E-18
	Ti-2	7,457E-18
	Ti-3	7,839E-18
	Ti-4	1,792E-17
TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç	Ti-5	5,192E-18
	Ti-6	1,172E-17
	Ti-7	1,252E-17
	Ti-8	1,251E-17

Tablo 7. TiN kaplamalı uçlar ile yapılan deneylerin aşınma oranları karşılaştırma tablosu

TiN kaplamalı uçlar ile yapılan deneyler	Pin aşınma oranı (mm ³ /n/m)
Ti-5	5,192E-18
Ti-6	1,172E-17
Ti-7	1,252E-17
Ti-8	1,251E-17
C45-5	6,076E-19
C45-6	4,651E-19
C45-7	1,501E-18
C45-8	6,956E-18

Tablo 8. Kaplamasız WC-Co uçlar ile yapılan deneylerin aşınma oranları karşılaştırma tablosu

WC-Co kaplamasız uçlar ile yapılan deneyler	Pin aşınma oranı (mm ³ /n/m)
Ti-1	1,827E-18
Ti-2	7,457E-18
Ti-3	7,839E-18
Ti-4	1,792E-17
C45-1	4,037E-18
C45-2	2,197E-17
C45-3	3,727E-15
C45-4	1,952E-17

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) örnekler üzerinde elde edilen sonuçlara ilişkin yorumlar aşağıda verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'te kaplamalı ve kaplamsız uçlara ait sürtünme katsayısı değerleri ayrı ayrı sunulmuştur. Tablo 5 ve Tablo 6'da ise kullanılan pinlere ait aşınma sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Tablo 7 ve Tablo 8'de pinlerdeki aşınma sonuçlarının kaplamalı ve kaplamsız uçlara göre karşılaştırması verilmiştir.

Kaplamasız karbür (WC-Co) pinlerin kullanıldığı sürtünme ölçümleri sonucu:

1. Yüksek yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı 0,05 azalmıştır.
2. Düşük yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı aynı kalmıştır.

TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uçların kullanıldığı sürtünme ölçümlerinin sonucu:

1. Yüksek yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı 0,09 azalmıştır.
2. Düşük yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı 0,08 azalmıştır.

Titanyum (Ti6Al4V) alaşımı üzerinde, TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uçlar ile yapılan ölçümlerde hızın artması ile sürtünme katsayısını azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük yük altında yapılan kaplamalı ve kaplamsız pinlerin kullanıldığı deneylerde hızın artışı etken olmuştur.

AISI 1045 çeliği örnekleri üzerinde elde edilen sonuçlara ilişkin yorumlar aşağıda verilmiştir. Kaplamalı ve kaplamsız uçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Kaplamsız karbür (WC-Co) pinlerin kullanıldığı sürtünme ölçümleri sonucu:

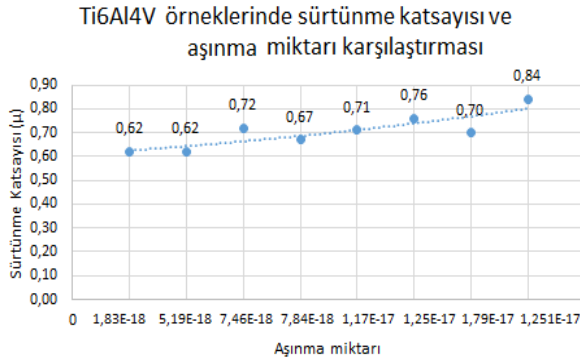
1. Yüksek yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı 0,14 azalmıştır.
2. Düşük yükte, hız arttıkça sürtünme katsayısı aynı kalmıştır.

TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uçların kullanıldığı sürtünme ölçümlerinin sonucu:

Hız arttıkça sürtünme katsayısı 0.14 azalmıştır. Yükün etkisi bulunmamaktadır.

AISI 1045 çeliği üzerinde, TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uçlar ile yapılan ölçümlerde hızın etkisi belirleyici olmuştur. Hız arttıkça sürtünme katsayısı değeri genel anlamda azalmaktadır.

Aşınma deneyleri sonucunda, TiN kaplamalı WC-Co uçların kullanıldığı sonuçlar karşılaştırıldığında Ti-7 örneğinde kullanılan pin en çok aşınmıştır.

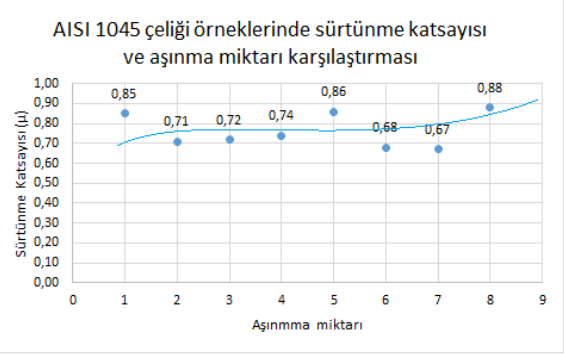


Şekil 8. Ti6Al4V örneklerinde sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı karşılaştırması

Aynı şekilde, kaplamsız WC-Co uçlardaki aşınma sonuçları karşılaştırıldığında C45-3 örneğinin kullanıldığı pin en çok aşınmıştır.

AISI 1045 çeliği örneklerinde TiN kaplı uçlarda C45-8 en çok aşınan olmuştur. Kaplamsız uçla yapılan deneylerde C45-3 en çok aşınmıştır. İncelemeler sonucunda, AISI 1045 çeliği örneklerinde kullanılan düşük hızda yapılan deneylerde aşınma daha fazla olmuştur. Ayrıca,

sürtünme katsayıları incelendiğinde her iki örneğinde sürtünme katsayısı aynıdır.



Şekil 9. AISI 1045 çeliği örneklerinde sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı karşılaştırması

Ti6Al4V örneklerinde Ti-4 kaplamsız uçlarda, Ti-7 örneği de kaplamalı uçlarda en çok aşınan olmuştur.

İncelemeler sonucunda, Ti6Al4V örneğinde kullanılan pinlerde yüksek hızda yapılan deneylerde aşınma daha fazla olmuştur. Ayrıca, sürtünme katsayıları incelendiğinde her iki örneğin de sürtünme katsayısı aynıdır.

Her iki malzeme için sürtünme katsayısı ve aşınma karşılaştırması Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sürtünme katsayısı arttıkça aşınma artmaktadır. Bu artış hızı çelikte daha düşüktür.

INVESTIGATION OF FRICTION AND WEAR PERFORMANCE BETWEEN COATED (TiN) AND UNCOATED TUNGSTEN CARBIDE PINS FOR TITANIUM ALLOY (Ti6Al4V) AND AISI 1045 STEEL

In this research, dry friction tests at two different speeds, two different loads, for Coated (TiN) and uncoated Tungsten Carbide Pins and Titanium Alloy (Ti6Al4V) and AISI 1045 Steel are conducted using a tribometer at room temperature. Curves showing coefficient of friction as a function of time are obtained. Minimum, maximum and average friction coefficients are calculated. Wear rates on Tungsten Carbide Pins and Titanium Alloy (Ti6Al4V) and AISI 1045 Steel Discs are measured. Variation of friction coefficients as a function of materials, TiN Coating, speed, and load are obtained. This data can be useful in the modelling of the cutting operation by Finite Element Method (FEM).

Keywords: Coefficient of Friction, Wear, Tribology

TEŞEKKÜR

Yazarlar, ATILIM Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne ve

BOREN Bor Kaplamaları Yetkinlik Merkezi'ne deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve destekleri için teşekkür ederler. Karlsruhe Üniversitesine ve SECO firmasına da gösterdikleri işbirliği ve sağladıkları deney malzemesi için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Grzesik W. “Advanced machining processes of metallic materials” Elsevier 2008.
2. Tekait, İ., & Demir, H. (2015). A1S1 H13 ve A1S1 D2 Çeliklerinin Delinmesi Esnasında Kesme Bölgesinde Oluşan Sıcaklığa Kesici Takım Kaplamasının ve İşleme Parametrelerinin Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2).
3. Filice L. Micari F. , Rizutti S. , Umbrello D. “A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining” International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 709-714.
4. Bil H. “Simulation of orthogonal metal cutting by finite element analysis” Yüksek lisans tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ankara 2003.
5. Komvopoulos K. ve Erpenbeck S.A., “Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting” 1991 J. Eng. Ind113(3): 253-267,doi:10.1115/1.2899695
6. Özel T. “The influence of friction models on finite element simulations of machining” International Journal of Tools & Manufacture 46 (2006) 518-530.
7. H. Czichos, “Tribology-A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear”, Elsevier, Amsterdam, 1987.
8. Osakada K. Ve Matsumoto R. , fundametnal Study of Dry Metal Forming with Coated Tools, 2000,Annals of CIRP Vol. 49/1/2000.
9. Rech J., Arrazola P.J., Claudin C., Courbon C., Pusavec F., Kopac J., Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting, 2003, CIRP Annals-Manufacturing Technology 62 ,79–82.
10. Wang, Z. M., Ezugwu, E. O. Performance of PVD-Coated Carbide Tools when Machining Ti6Al-4V. Tribology Transaction, 1997, 40 (1), 81-86
11. Bunshah, R. F., Handbook of Hard Coatings: Deposition Technolgies, Properties and Applications, 2002, 1st edition, William Andrew, Park Ridge, New York