

Emre Taşcıoğlu* 

Marmara Üniversitesi
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
İstanbul/Türkiye

Yusuf Kaynak 

Marmara Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul/Türkiye

Özhan Kıtay 

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
Bilecik/Türkiye

Kesici Takım Geometrisinin CW511L Kurşunsuz Pirinç Malzemenin İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi

Kurşunsuz pirinç malzemeler çok geniş bir uygulama alanına sahip olmasına rağmen talaşlı işlenebilirliğinde halen problemlerle karşılaşılabilinmektedir. Bu çalışmada kurşunsuz pirinç olan CW511L malzemenin talaşlı işlenebilirliği farklı kesme hızları, takım talaş açısı ve ilerleme değeri bakımından incelenmiştir. Elde edilen bulgular düşük kesme hızında ve ilerleme değerinde kesme kuvvetinin ve kesme sıcaklığının azaldığını göstermektedir. Ayrıca takım geometrisi işlenebilirliği doğrudan etkilemiştir. En yüksek mikrosertlik değeri negatif talaş açısıyla yapılan deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca malzemenin deformasyon hızının 105 s-1 olduğu hesaplanmıştır. Deformasyon hızına takım geometrisinin etkisi sınırlı olurken kesme hızının etkisi belirgin farklılıklar sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: CW511L, kurşunsuz pirinç, talaşlı işlenebilirlik

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 16 Mart 2025

Kabul: 26 Haziran 2025

*Sorumlu Yazar: Emre Taşcıoğlu

Email: emre_tascioglu@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1658896>

GİRİŞ

Boru, profil, vana, pompa, su saatleri, kol saatindeki çok küçük parçalar gibi birçok nesne pirinç alaşımlarından üretilmektedir. Pirincin mukavemeti, sızdırmazlığı ve işlenebilirliği çok iyi olup fiyatı da gayet uygun sınırlar içindedir. Ana metal olarak bakır ve çinkodan meydana gelen pirinç alaşımlarının büyük bir çoğunluğu kurşunludur. Kurşunun doğada çok olması, düşük sıcaklıkta ergimesi ve kolay şekillendirilebilmesi gibi birçok nedenler kullanılmasını cazip kılmaktadır [1-3]. Pirinç imal edilirken işlenebilirliği artırıcı farklı alaşım elementleri ilave edilir. Bu elementlerden bazıları silikon [4], selenyum [2], bizmut [5], grafit [6] ve özellikle kurşundur [7]. Bu bağlamda en önemli unsur, mükemmel talaş kırılması, düşük takım aşınması ve yüksek kesme parametreleri ile ilgili olan kurşundur. Çünkü kurşunun pirincin içinde çözünmesi çok düşüktür, kurşun tüm mikro yapıyı özellikle tane sınırlarını ayırır. Bu nedenle kayma mukavemeti önemli ölçüde azalır ve mükemmel talaş kırılması ile sonuçlanır.

Bununla birlikte kurşunlu pirinç insan sağlığı ve doğa için önemli bir tehlike oluşturmaktadır. [8-10]. Bu nedenle pirinç alaşımlarında kullanılan kurşun miktarı Avrupa, ABD, Çin ve Japonya'da önemli ölçüde sınırlıdır. [11]. Bu kısıtlamalar kurşunsuz pirinç kullanımını artırmış ve bu nedenle çalışmalar kurşunsuz pirinç üzerine yoğunlaşmıştır. Kurşun tehlikeli ağır metal olduğu için son yıllarda bakır alaşımlarında kurşun kullanımı belirli uygulamalar için sınırlandırılmıştır. Pirinç malzemelerdeki kurşun oranının azaltılması talaşlı imalat performansına talaş kırılabilirliği açısından olumsuz etkileri vardır. Kurşun içermeyen pirinçler çoğu işleme sırasında sürekli talaş üretme eğilimindedir [12].

Literatürdeki birçok çalışma kurşunlu malzemelere odaklanmış olup, sınırlı sayıda çalışma kurşunsuz malzemeleri analiz etmiştir [12-14]. Nobel ve ark. [3], CuZn42 (CW510L) ve CuZn38As (CW511L) gibi kurşunsuz pirinç alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmıştır. Bu alaşımlar için ana problemlerin uzun talaş oluşumu ve takıma gelen yüksek termal ve mekanik yüklerin olduğunu tespit

etmişlerdir. Nobel ve ark. [8] ayrıca ortogonal kesme yöntemiyle talaş oluşumu ve kırılabilirliğini incelemiştir. Kato ve ark. [15] CuZn21Si3P malzemenin mikro delinmesinde farklı takımlar kullanılarak talaş oluşumunu incelemiştir. Nobel ve ark. [16] takım kaplamasının ve malzemenin düşük kurşunlu pirinç alaşımlarının işlenebilirliği üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Kurşunlu ve düşük kurşunlu pirinç alaşımlarının işleme davranışlarını karşılaştırmışlar ve çok farklı işlenebilirlik sonuçları elde etmişlerdir. Pantazopoulos ve ark. [17] kurşunsuz pirinçlerin mekanik özellikleri ve mikro yapısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlar ve en uygun kurşunsuz pirinç alaşımını belirlemeye çalışmışlardır. CW510L kurşunsuz pirincin kurşunlu pirincin yerini alabilecek potansiyel bir aday olduğunu göstermişlerdir. Bu hususta CW511L kurşunsuz pirincin işlenebilirliğinin geniş bir parametre aralığında incelenmesi literatürde sınırlı sayıda çalışmaya ek olarak önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Bu çalışmada CW511L kurşunsuz pirinç malzemenin dik tornalanması deneylerinde farklı kesme hızları ve talaş açılarının etkisinin işlenebilirlik kabiliyetine etkisi kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı bakımından incelenmiştir. Ayrıca kesme parametrelerinin malzemenin deformasyon hızına etkisi hesaplanmış olup işlenmiş yüzeydeki mikrosertlik değişimleri incelenmiştir.

DENEYSEL TASARIM

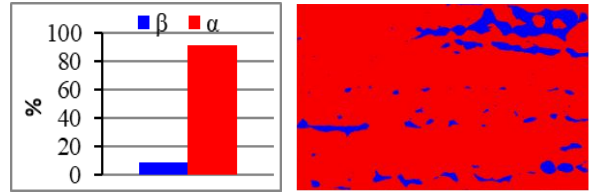
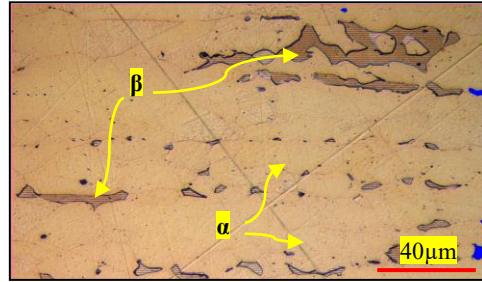
Çalışmalarda iş parçası olarak 80 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda çubuk CW511L kurşunsuz pirinç malzemesi kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 1' de sunulmuştur. Pirinçler alfa (α) ve beta (β) fazından oluşmakta olup, malzemelerin mikro yapı görüntüleri Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. CW511L pirinç malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

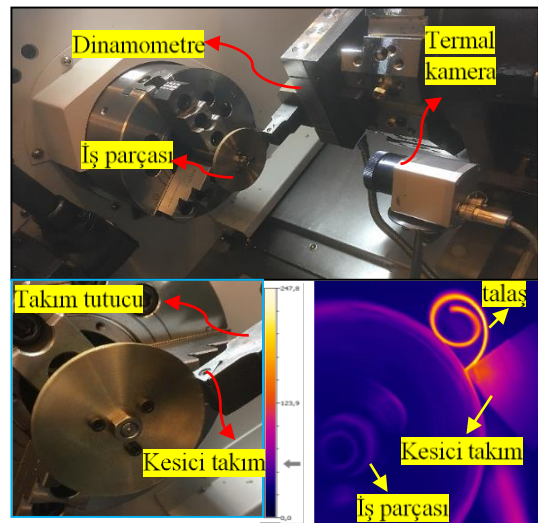
Cu	Zn	Pb	As
%61.16	%38.39	%0.15	%0.07
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
392	250	22	90 $\pm$ 5 HV

Deneylerde kullanılmak üzere CW511L malzemeden 4 mm çapında diskler tel erozyonla kesilmiştir. Deneysel düzenek Şekil 2' de gösterilmiştir. Deneyler 4500 dev/dak kapasiteli Doosan Puma CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Kesme hızları 50, 150 ve 350 m/dak olarak seçilmiştir. 0.05 ve 0.15 mm/dev olmak üzere iki

farklı ilerleme değeri kullanılmıştır. Kesici uç olarak TCMW16T308 H13A kodlu kaplamasız ve 0° boşluk açısına sahip takım tercih edilmiştir. Her bir deneyde tekrarlanabilirlik açısından yeni kesici takım kullanılmıştır ve her deney iki kez tekrar edilmiştir. Özel olarak imal edilmiş takım tutucular kullanılarak deneyler -6, -3, 0, 3 ve 6° olmak üzere beş farklı talaş açısında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri KISTLER 2129AA dinamometreyle ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde Optris PI400 termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera örnek görüntüsü Şekil 2' de gösterilmiştir. Vickers(HV) sertlik ölçmede FutureTech FM310e model cihaz kullanılarak yapılan 10 adet ölçümün ortalaması alınmıştır.



Şekil 1. CW511L pirinç malzemenin optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüsü



Şekil 2. Deneyel düzenek gösterimi

Tablo 2. Dik kesme parametreleri

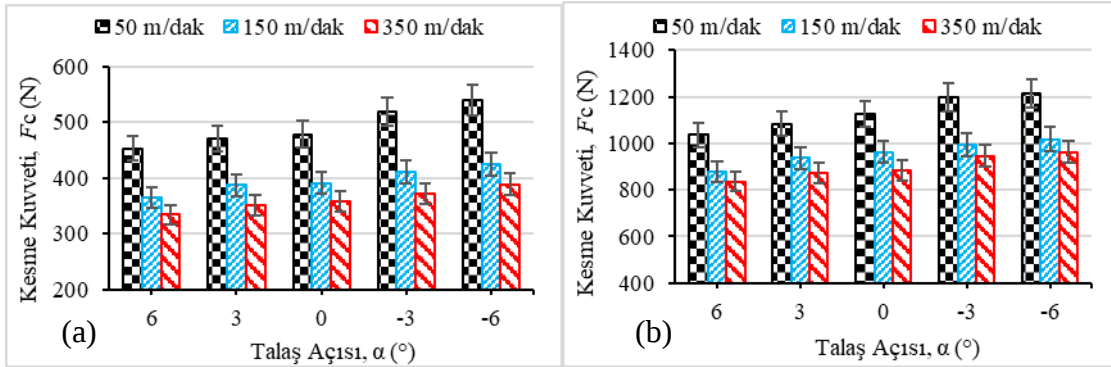
Kesme hızı, V_c (m/dak)	50, 150, 350
İlerleme, f (mm/dev)	0.05, 0.15
Talaş açısı, γ (°)	+6, +3, 0, -3, -6

KESME KUVVETİ

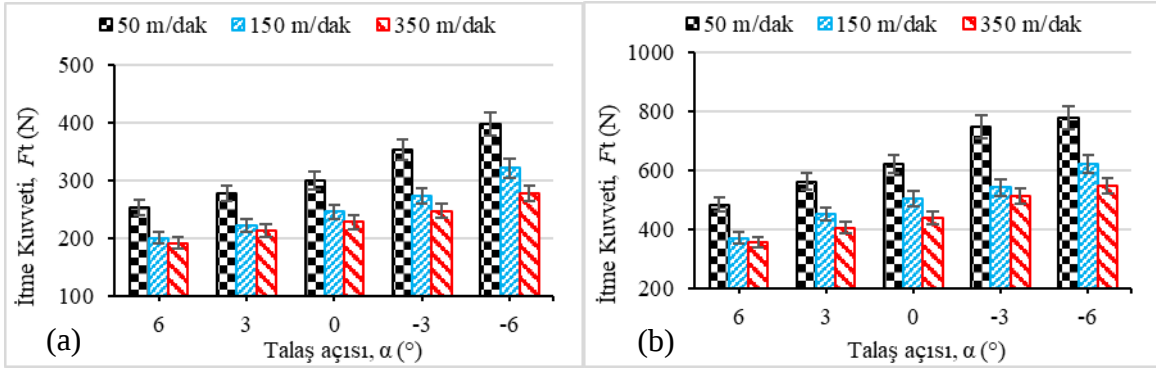
Değişken talaş açısı değerlerinde ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetleri Şekil 3' te gösterilmiştir. 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev olmak üzere her iki ilerleme değerinde de kesme hızları ve talaş açıları bakımından ölçülen esas kesme kuvvetlerindeki değişim eğilimleri aynıdır. Şekil 3a 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen esas kesme kuvvetlerini göstermektedir. Tüm talaş açısı değerlerinde kesme hızındaki artış esas kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olmuştur. Kesme hızının artması takım-talaş sürtünmesinin artması ve dolayısıyla kesme sıcaklığının artmasına yol açmıştır. Kesme bölgesinde artan sıcaklık iş parçasında termal yumuşama etkisi yaratarak daha kolay talaş kaldırılmasına yardım etmiştir. Bunun sebebi talaş kaldırma esnasında artan ısı nedeniyle malzemenin kristal yapısındaki atomların kinetik enerjilerinin artmasıdır. Bir diğer eğilim ise talaş açısı değerlerinin pozitiften negatife doğru değiştikçe ölçülen kesme kuvvetlerinde meydana gelen düzenli artıştır. En düşük esas kesme kuvvetleri 6° pozitif talaş açısı değerinde ölçülmüştür. En yüksek esas kesme kuvvetleri ise -6° negatif talaş açısı değerinde ölçülmüştür. Bunun sebebi talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kayma düzlem açısı ve dolayısıyla alanının oluşumunda talaş açısı değerinin doğrudan ilgili olmasındandır. Çünkü büyük talaş açısı büyük kayma açısı oluşturur. Kayma açısının büyük olması kesme birinci deformasyon bölgesinde kayma düzlem alanının küçük olmasına yol açar. Sonuçta kayma düzlem alanının küçük olması talaş kaldırmak için

daha az kuvvet harcanmasına yol açar. Görüleceği üzere pozitif talaş açısı değerlerinde ölçülen kuvvetlerin negatif talaş açısı değerlerindeki kuvvetlerden az olması bu durumu desteklemektedir. En yüksek esas kesme kuvveti 50 m/dak kesme hızında ve -6° talaş açısı değerinde 540N olarak ölçülmüştür. En düşük esas kesme kuvveti ise 334N olarak 350 m/dak kesme hızında ve 6° talaş açısı değerinde ölçülmüş olup aradaki fark %62 kadardır. Şekil 3b' de gösterilen 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen kuvvetler ise 0.05 mm/dev ilerleme değerindeki kuvvetlerin iki katı civarında seyretmiştir. Talaş açısı ve kesme hızı bakımından benzer eğilimlerin geçerliği olduğu görülmektedir. En yüksek esas kesme kuvveti olan 1212N ile en düşük esas kesme kuvveti olan 835N arasındaki fark %45 kadardır. İlerleme değerinin büyümesi talaş kesit alanının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artmasıyla daha fazla esas kesme kuvvetinin harcanmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen kuvvetler daha fazladır.

Değişken kesme hızları ve talaş açıları yapılan dik kesme deneylerinde ölçülen itme kuvvetleri 0.05 mm/dev ilerleme değeri için Şekil 4a' da ve 0.15 mm/dev ilerleme değeri için Şekil 4b' de gösterilmiştir. Kesme kuvvetlerindeki eğilimler itme kuvvetlerinde de aynen geçerlidir. En yüksek itme kuvveti 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev ilerleme değerlerinde sırasıyla 50 m/dak kesme hızı ve -6° talaş açısında 397N ve 781N olarak ölçülmüştür. En düşük itme kuvvetleri ise 350 m/dak kesme hızı ve 6° talaş açısı değerinde 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev ilerleme değerlerinde sırasıyla 192N ve 356N olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Dik kesme deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetleri a)f=0.05 mm/dev, b)f=0.15 mm/dev

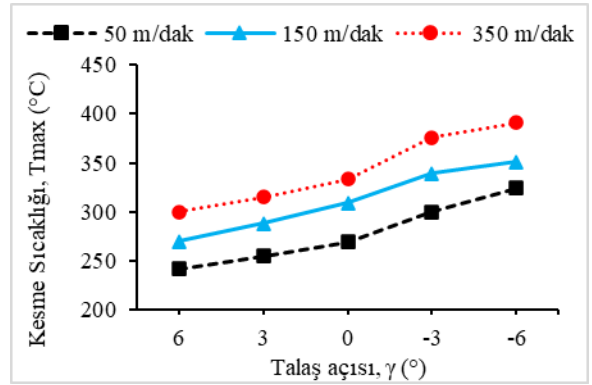


Şekil 4. Dik kesme deneylerinde ölçülen itme kuvvetleri a)f=0.05 mm/dev, b)f=0.15 mm/dev

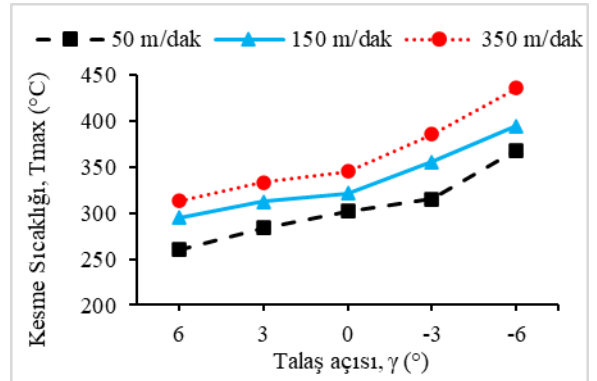
KESME SICAKLIĞI

Şekil 5' te 0.05 mm/dev ilerleme değerinde değişken kesme hızı ve talaş açısı değerlerinde yapılan dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları gösterilmiştir. Tüm talaş açısı değerlerinde en düşük sıcaklıklar 50 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Kesme hızının artmasıyla sıcaklık değerlerinde de artış söz konusudur. Ayrıca tüm kesme hızı değerlerinde de en düşük sıcaklıklar 6° pozitif talaş açısında elde edilmiştir. Talaş açısı pozitiften negatife doğru değiştikçe sıcaklıktaki artış eğilimi açıktır. Talaş kaldırma esnasında en çok ısı birinci deformasyon bölgesinde oluşur. Bu bölge de kayma düzlemine denk gelmektedir ve asıl elasto-plastik deformasyon burada gerçekleşmektedir. Dolayısıyla negatif talaş açısında daha büyük kayma düzlemi oluştuğundan burada ki deformasyonun pozitif talaş açısına göre daha büyük olması ve dolayısıyla takım-talaş arasına tekabül eden ikincil deformasyon bölgesinde ki sürtünmenin daha fazla olması beklenir. Nitekim termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin negatif talaş açısında en yüksek değerler olduğu görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında 6° ve -6° talaş açılarında ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları sırasıyla 242°C ve 324°C olup arada %34 fark vardır. Ayrıca 350 m/dak kesme hızında ise en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ise sırasıyla 300°C ve 391°C olup arada ki %30 dur. Buradan anlaşılabileceği üzere kesme hızı değişse bile talaş açısı değerlerine bağlı olarak yaşanan sıcaklık değişim oranı benzerdir.

İlerleme değeri 0.15 mm/dev olduğu durumda değişken kesme hızı ve talaş açısına bağlı olarak ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları Şekil 6' te gösterilmiştir. İlerleme değerinin artması sonucu ölçülen sıcaklık değerlerinde artışlar belirgindir. Ayrıca kesme hızına ve talaş açısına bağlı eğilimlerin değişmediği görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında ölçülen en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 260°C ve 368°C dir. 350 m/dak kesme hızında ise en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ise sırasıyla 313°C ve 435°C dir.



Şekil 5. Dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları (f=0.05 mm/dev)

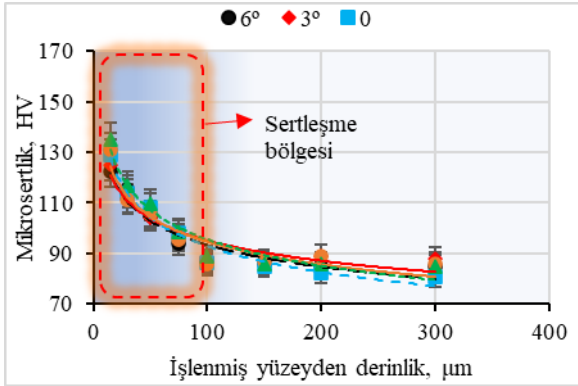


Şekil 6. Dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları (f=0.15 mm/dev)

MİKROSERTLİK

Talaş kaldırma operasyonlarında takım-iş parçası arasında meydana gelen mekanik, termal ve hatta kimyasal reaksiyonlar sonucu iş parçasının işlenmiş yüzeyinde plastik deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu durum işlenmiş yüzeyin ve yüzeyaltının sertlik özelliklerini değiştirmekte ve ortaya çıkan ürünün başta yorulma olmak üzere

kullanım performansını doğrudan etkilemektedir. Bu hususta işlenen malzemelerin mikrosertlik değerleri incelenmiştir. Şekil 7’ te değişken talaş açısı değerlerinde 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen sertlik değerleri gösterilmiştir. İşlenmiş yüzeyden 15 µm derinlikte ölçülen sertlik değerleri arasında en yüksek sertlik 135 HV ile -6° talaş açısında ölçülmüştür. İşlem görmemiş malzeme sertliğine kıyasla %50 artış söz konusudur. En düşük sertlik artışı ise 122 HV ile 6° talaş açısında ölçülmüştür. Bu durum açıkçası kesme kuvvetleri sonuçlarıyla örtüşmektedir. Çünkü negatif talaş açısı değerindeki kuvvetler daha yüksek olduğundan meydana gelen plastik deformasyon oranının da yüksek olması malzemenin sertliğini etkilemiştir. Tüm talaş açısı değerlerinde sertlik değerleri işlenmiş yüzeyden 100 µm derinliğe ulaşıldığında işlem görmemiş malzeme sertliğine düştüğü görülmektedir.

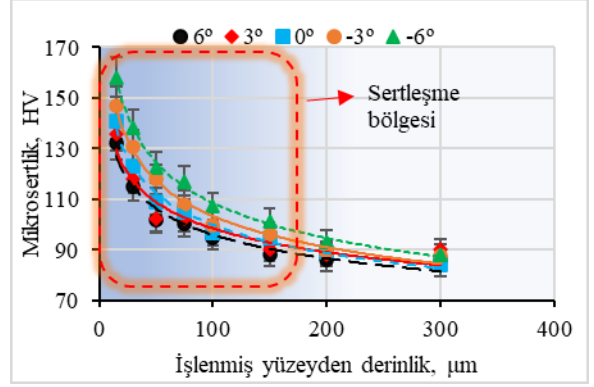


Şekil 7. Değişken talaş açısı değerlerinde işlenen malzeme sertliği (Vc=350 m/dak, f=0.05 mm/dev)

Şekil 8’ te ise değişken talaş açısı değerlerinde ve 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen mikrosertlik değerleri gösterilmiştir. En yüksek sertlik değeri işlenmiş yüzeyden 15 µm derinlikte -6° talaş açısında 158 HV olarak ölçülmüş olup bu değer işlenmemiş malzeme sertliğinden %75 daha fazladır. Aynı noktada en az sertlik artışı ise 6° talaş açısında 132 HV olarak ölçülmüş olup benzer eğilim ilerleme değeri artsa bile devam etmiştir. İşlenmemiş malzeme sertliğine ise 150 µm derinlikte ulaşılmıştır.

ANALİTİK ANALİZ

Talaş açısı ve kesme hızı parametrelerinin malzemenin işlenebilmesine etkisinin daha iyi anlaşılması için analitik hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Merchant teorisine göre Denklem 1-4 kullanılarak malzemenin farklı kesme parametrelerindeki deformasyon hızı davranışı incelenmiştir.



Şekil 8. Değişken talaş açısı değerlerinde işlenen malzeme sertliği (Vc=350 m/dak, f=0.15 mm/dev)

$$\mu = \frac{F_c \tan \gamma + F_t}{F_c - F_t \tan \gamma} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

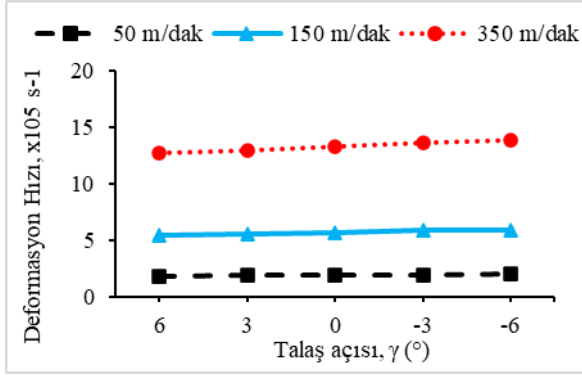
$$\dot{\epsilon} = \frac{10 v_c \cos \gamma}{t_n \cos(\phi - \gamma)} \quad (4)$$

Burada μ sürtünme katsayısı, γ talaş açısı, β sürtünme açısı, t_0 ilerleme değeri, ϕ ise kayma açısıdır. Şekil 9’te 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ve Şekil 10’ te 0.15 mm/dev ilerleme değerinde hesaplanan deformasyon hızları paylaşılmıştır. Her iki ilerleme değerinde de deformasyon hızı 105 s-1 olarak gerçekleşmiştir. İlerlemenin 0.05 mm/dev değerinde deformasyon hızının 0.15 mm/dev değerine kıyasla tüm kesme parametrelerinde daha yüksektir. En yüksek deformasyon hızı 350 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Ayrıca negatif talaş açısı değerlerinde deformasyon hızı daha fazladır.

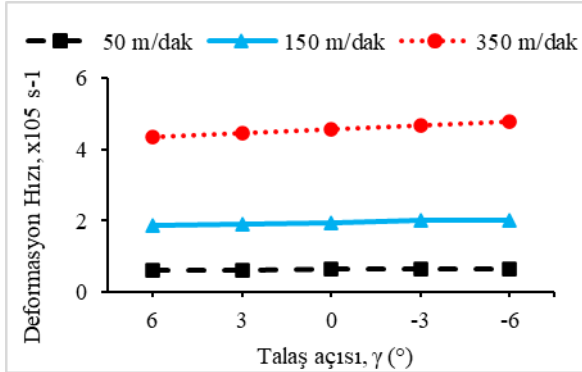
Deformasyon hızı genelde kesme hızı ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. Kesme hızının artması deformasyon hızının artması için Zemin oluşturmaktadır.

Aslında, 103 s-1’den büyük deformasyon hızları, deformasyon oranının yüksek bölgede olduğunu gösterir ve bu aynı zamanda deformasyon hızının gerilim-gerinim üzerindeki etkisinin de büyük olduğunu gösterir. Aslında, sıcaklık ve deformasyon hızı birbirini tetikleyen iki faktördür. Yüksek deformasyon hızı önemli ısı üretimine neden olur. Bu nedenle, ortaya çıkan yüksek sıcaklık, adiabatik kayma bantlarının oluşumunun önünü açar ve talaş oluşumu gerçekleşir [34]. Yüksek deformasyon

hızlarında oluşan deformasyon mekanizmasının, düşük deformasyon hızlarına göre daha karmaşık olması da bir diğer konudur. Düşük deformasyon hızlarındaki deformasyon mekanizması kayma ve eğilmeden oluşurken, yüksek deformasyon hızlarında mikroyapı, kusurlar ve mekanik özellikler gibi malzeme özellikleri etkilidir. Hesaplanan deformasyon hızlarının yüksek sınıfta olduğu düşünüldüğünde, yüksek kesme hızında düşük kesme kuvveti ve yüksek sıcaklık ölçülmesi bu durumu desteklemektedir.



Şekil 9. Farklı kesme parametrelerinin deformasyon hızına etkisi (f=0.05 mm/dev)



Şekil 10. Farklı kesme parametrelerinin deformasyon hızına etkisi (f=0.15 mm/dev)

SONUÇ

Bu çalışmada CW551L kurşunsuz pirinç malzemenin farklı kesme parametrelerinde dik tornalama deneyleri yapılmıştır. Özellikle farklı talaş açılarının malzemenin işlenebilirliği ve deformasyon hızına etkisi ortaya konmuştur. Bazı dikkat çekici bulgular şu şekildedir;

- Malzeme -6° talaş açısı değerinde işlendiğinde tüm kesme hızları ve ilerleme değerlerinde en yüksek kesme kuvveti ve kesme sıcaklıkları elde edilmiştir.

- Pozitif talaş açısına sahip kesici takımlar işlenebilirlik performansı açısından daha verimlidir.
- CW551L malzemenin işlenmesi 105 S-1 deformasyon hızında gerçekleşmiştir.
- Deformasyon hızına etki bakımından talaş açısı nispeten etkili bir parametreyken kesme hızının etkisi daha barizdir. En yüksek deformasyon hızı maksimum kesme hızı ve -6° talaş açısı değerinde elde edilmiştir.

Bu çalışma kurşunsuz pirinç malzemelerin işlenebilirliğinin kesme parametreleri ile kontrol edilebileceğini ve talaş kaldırma operasyonlarında karşılaşılan problemlerin çözülebileceğini göstermektedir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING TOOL GEOMETRY ON THE MACHINABILITY OF CW551L LEAD-FREE BRASS MATERIAL

Although lead-free brass materials have a very wide application area, problems can still be encountered in machinability. In this study, the machinability of lead-free brass CW551L material was investigated in terms of different cutting speeds, tool rake angle and feed rate. The findings obtained show that cutting force and cutting temperature decrease at low cutting speed and feed rate. In addition, tool geometry directly affected machinability. The highest microhardness value was obtained in experiments conducted with negative rake angle. In addition, the strain rate of the material was calculated as 105 s⁻¹. While the effect of tool geometry on strain rate was limited, the effect of cutting speed provided significant differences.

Keywords: CW551L, Lead-free brass, Machining

KAYNAKLAR

1. Nobel, C., et al., Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 84: p. 1127-1140.
2. Vilarinho, C., et al., Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. Journal of materials processing Technology, 2005. 170(1-2): p. 441-447.
3. Nobel, C., et al., Machinability enhancement of lead-free brass alloys. Procedia Cirp, 2014. 14: p. 95-100.
4. Hofmann, U., et al., Messing und Stahl auf dem Prüfstand: Ein Vergleich der Zerspanbarkeit. Werkstatt und Betrieb, 2005. 7: p. 93-97.

5. IMAI, H., et al., Mechanical properties and machinability of extruded Cu-40% Zn brass alloys with bismuth via powder metallurgy process. Transactions of JWRI, 2009. 38(1): p. 25-30.
6. Saigal, A. and P. Rohatgi, Machinability of cast lead-free yellow brass containing graphite particles. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1996. 104: p. 225-228.
7. Gane, N., The effect of lead on the friction and machining of brass. Philosophical Magazine A, 1981. 43(3): p. 545-566.
8. Nobel, C., et al., Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 84(5-8): p. 1127-1140.
9. Chen, X., et al., Study on the properties of Sn-9Zn-xCr lead-free solder. Journal of alloys and Compounds, 2008. 460(1-2): p. 478-484.
10. Atsumi, H., et al., High-strength, lead-free machinable α - β duplex phase brass Cu-40Zn-Cr-Fe-Sn-Bi alloys. Materials Science and Engineering: A, 2011. 529: p. 275-281.
11. Directive, E., Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011, on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast). Official Journal of the European Communities, 2011.
12. Hofmann, U. and E. El-Magd, Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. Materials Science and Engineering: A, 2005. 395(1-2): p. 129-140.
13. Klocke, F., D. Lung, and C. Nobel, Ansätze zur Hochleistungserschpannung bleifreier Kupferwerkstoffe. Metall-Clausthal, 2012. 66(11): p. 496.
14. Taha, M.A., et al., Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties. Ain Shams Engineering Journal, 2012. 3(4): p. 383-392.
15. Kato, H., S. Nakata, and N. Ikenaga, Improvement of chip evacuation in drilling of lead-free brass using micro drill. International journal of automation technology, 2014. 8(6): p. 874-879.
16. Klocke, F., C. Nobel, and D. Veselovac, Influence of tool coating, tool material, and cutting speed on the machinability of low-leaded brass alloys in turning. Materials and Manufacturing Processes, 2016. 31(14): p. 1895-1903.
17. Toulfatzis, A.I., G.A. Pantazopoulos, and A.S. Paipetis, Fracture behavior and characterization of lead-free brass alloys for machining applications. Journal of materials engineering and performance, 2014. 23(9): p. 3193-3206.