



Micro milling of tungsten-copper composite materials produced through powder metallurgy method: Effect of composition and sintering temperature

Ali Erçetin¹ , Kubilay Aslantaş² , Mustafa Perçin²

¹Bingöl University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 12000, Bingöl, Turkey

²Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Turkey

Highlights:

- Increasing sintering temperature accelerates tool wear while increasing micro hardness of composite materials
- The high sintering temperature has increased the surface quality of the machined surface
- Increased cutting length and increased Cu ratio caused an increase in burr width

Keywords:

- Powder metallurgy
- Micro milling
- Tool wear
- Surface roughness
- Burr formation

Article Info:

Received: 16.03.2017

Accepted: 11.10.2017

DOI:

10.17341/gummfd.43569

Acknowledgement:

This work was supported by grants from Afyon Kocatepe University BAPK, Project No: 14.FEN.BİL.39 and TUBITAK, Project No: 213M572

Correspondence:

Author: A. Erçetin
e-mail:
aliercetin@bingol.edu.tr
phone: +90 426 216 0012

Graphical/Tabular Abstract

In the sintered sample at 1000 °C, tungsten (W) and copper (Cu) do not form the neck and the structure is in a more porous form. As a result of this, especially during the cutting process, W grains were ruptured and stayed between the cutting tool and work piece and plastered onto the machined surface.. This resulted in degraded surface quality (Figure A(a)). When the sintering was done at 1100 °C, a harder structure was formed and the grains were forced not to break but to cut during the cutting because the Cu and W grains formed a sufficient bond with each other. This results in better surface quality (Figure A(b)).

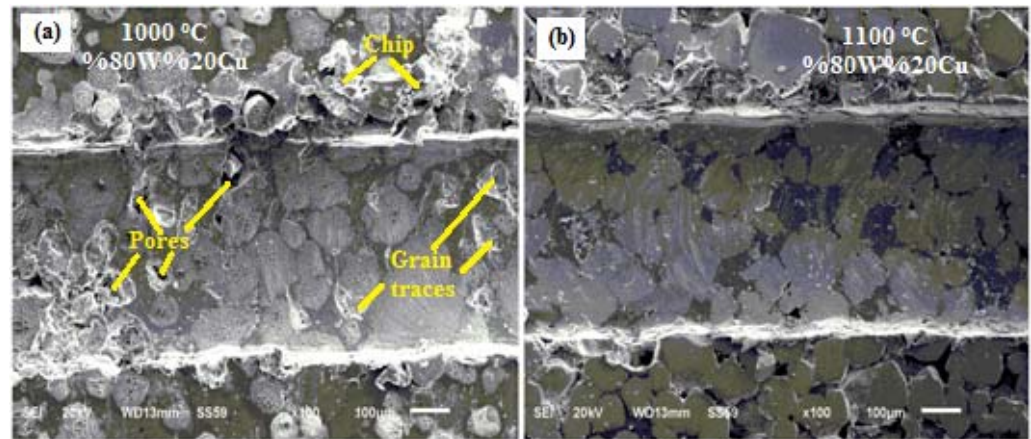


Figure A. SEM images of machined slots for 1000 °C and 1100 °C

Purpose: WCu composite material produced in different temperature and composition was micro-milled. During the micro milling process of WCu material, the relationship between the cutting force differences and tool wear and the relationship between surface roughness and burr formation was tried to be determined.

Theory and Methods:

WCu samples are produced by powder metallurgy method. SEM (scanning electron microscope) device for metallographic examination, Vickers hardness tester for hardness tests, Kistler dynamometer for the cutting force measurements and Nanovea 3D optical surface profilometer for the surface roughness measurements of machined slots were used.

Results:

The sintering temperature and tungsten ratio significantly affected the cutting forces and surface roughness. The edge and corner radii of the cutting tools have increased as a result of the abrasive wear mechanism and the tool edge has lost its cutting ability. As a result, changes in the dimensions of the machined geometry and increased burr formation were observed.

Conclusion:

According to the results, high sintering temperature and high tungsten ratio increased the hardness values of the samples. Cutting tools were worn more during the micro milling WCu samples sintered at higher temperature. As a result of the abrasive wear mechanism, the deterioration in tool geometry caused increased cutting forces, deterioration of surface quality and burr formation.



Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tungsten-bakır kompozit malzemelerin mikro frezelenmesi: Kompozisyon ve sinterleme sıcaklığının etkisi

Ali Erçetin^{1*}, Kubilay Aslantaş², Mustafa Perçin²

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye;

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyon, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Artan sinterleme sıcaklığı kompozit malzemelerin mikro sertliğini artırırken takım aşınmasını hızlandırmaktadır
- Yüksek sinterleme sıcaklığı işlenen yüzeyin yüzey kalitesinin artmasına neden olmuştur
- Artan kesme uzunluğu ve Cu oranının artışı çapak genişliğinin artmasına neden olmuştur

Makale Bilgileri

Geliş: 16.03.2017

Kabul: 11.10.2017

DOI:

10.17341/gummfd.43569

Anahtar Kelimeler:

Toz metalurjisi,
mikro frezeleme,
takım aşınması,
yüzey pürüzlülüğü,
çapak oluşumu

ÖZET

Her geçen gün, toz metalurjisi yöntemiyle yeni/farklı kompozisyonlara sahip malzeme üretilmektedir. Üretilen malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri kadar işlenebilirlikleri de önemlidir. Söz konusu makalede; 2 farklı sıcaklıkta sinterlenen farklı içerikteki W-Cu alaşımlarının mikro frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvveti farklılıkları, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu incelenmiştir. Çalışmada önemli miktarda karakterizasyon çalışması yapılmış ve farklı ölçüm sistemleri (dinamometre, SEM, pürüzlülük ölçümü, yüzey profilometresi gibi) ve yazılımdan faydalanılmıştır. Seçilen sinterleme sıcaklıklarının mikro yapıdaki etkileri SEM fotoğrafları ile gösterilmiş, ardından, bu sıcaklıkların değişik Cu oranlarındaki bileşimler için neden olduğu, kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumuna etkileri tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek sinterleme sıcaklığı ve yüksek tungsten oranı numunelerin sertlik değerlerini arttırmıştır. Bu nedenle, 1100°C'de sinterlenen %90W%10Cu numunesinin mikro frezelenmesinde meydana gelen takım aşınması maksimum düzeydedir. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ve tungsten oranı kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü önemli oranda etkilemektedir. Abrasif aşınma mekanizması sonucunda takım geometrisinde meydana gelen bozulma kesme kuvvetlerinin artmasına, yüzey kalitesinin bozulmasına ve çapak oluşumuna neden olmuştur.

Micro milling of tungsten-copper composite materials produced through powder metallurgy method: Effect of composition and sintering temperature

HIGHLIGHTS

- Increasing sintering temperature accelerates tool wear while increasing micro hardness of composite materials
- The high sintering temperature has increased the surface quality of the machined surface
- Increased cutting length and increased Cu ratio caused an increase in burr width

Article Info

Received: 16.03.2017

Accepted: 11.10.2017

DOI:

10.17341/gummfd.43569

Keywords:

Powder metallurgy,
micro milling,
tool wear, surface roughness,
burr formation

ABSTRACT

Each passing day, materials are produced with different compositions by the method of powder metallurgy. The machinability of the produced materials is as important as the mechanical and chemical properties. In aforesaid article, cutting force variations, tool wear, surface roughness and burr formation during the micro milling of W-Cu alloys in different content sintered at 2 different temperatures were investigated. Significant amount of characterization study has been done and different measuring systems (like dynamometer, SEM, roughness measurement, surface profilometer) and software are used. The effect of the selected sintering temperatures on the microstructure are shown by SEM photographs, and then, effects of these temperatures on cutting force, tool wear, surface roughness and burr formation, which are caused by compositions with different Cu contents, are discussed. According to the obtained results, high sintering temperature and high tungsten ratio have been increased hardness values of samples. For this reason, tool wear in micro milling of W-%10wtCu sample sintered at 1100°C is the maximum level. In addition, the sintering temperature and tungsten ratio significantly affect the cutting forces and surface roughness. As a result of abrasive wear mechanism, deterioration in tool geometry causes increasing of cutting forces, deterioration of surface quality and burr formation.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aliercetin@bingol.edu.tr / Tel: +90 426 216 0012 - 1970

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tungsten elementi (W); yüksek sıcaklıktaki mukavemeti, çok iyi aşınma direnci, yüksek basma dayanımı ve yüksek sertliği dolayısıyla birçok alanda kullanılmaktadır [1]. Tungsten elementi bakır (Cu) elementi ile birlikte kullanıldığında elektriksel ve ısıl iletkenliği artmaktadır [2]. Isı gidericiler, elektrotlar [3], elektrik şalterleri, kontaktörler, akım kesiciler, voltaj düzenleyiciler ve anahtar dişlileri [4] gibi çeşitli uygulamalar ile ısı ve elektronik endüstrisinde kendisine geniş bir kullanım alanı bulur [5]. Fakat bu iki elementin ergime sıcaklıkları farkının yüksek olması, eritme ve döküm gibi yöntemler ile üretimini [6], homojen bir biçimde birleştirilmesini zorlaştırmaktadır [7]. Bu yüzden WCu kompozitlerini imal etmenin en etkili yolu toz metalürjisidir [3, 8]. Toz metalürjisinin diğer bir avantajı da; tanelerin homojen dağılımını [9] ve daha iyi bir tane yapısı oluşumunu sağlamaktadır [10]. Üretim esnasında kullanılan presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, üretilecek malzemenin mekanik, ısıl, elektriksel özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. Bu yüzden farklı alaşım elementlerinin ilavesi, sinterleme kolaylığı ve mekanik iyileştirme sağlayabilmektedir [11, 12]. Endüstride, tungsten-bakır esaslı kompozit numuneler üretildikten sonra istenilen boyutlara getirebilmek için en çok talaşlı imalat yöntemleri tercih edilir [13]. Eğer ürünün nihai şekli milimetreler seviyesindeyse bu durumda da mikro işleme teknolojileri kullanılır. Yüksek üretim hızı nedeniyle, mikro frezeleme en çok kullanılan mikro imalat yöntemidir [14].

Mikro frezeleme işlemi, temel olarak geleneksel frezeleme işlemine oldukça benzemektedir. Bir anlamda geleneksel frezelemenin boyutunun küçültülmüş hali de denilebilir [12]. Mikro frezelemeyi geleneksel frezelemeden ayıran en temel unsur; her iki işlem arasındaki boyut farklılığıdır. Takım çapının çok küçük olması nedeniyle kesici kenar yarıçapı da küçülmektedir. Kesici takım kenar yarıçapı, düzgün bir talaş oluşumunun meydana gelmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır [8]. Geleneksel frezeleme işleminde, kesme derinliği genellikle kesici takımın kenar yarıçapından çok büyük olduğu için kesme sırasında düzgün bir talaş oluşumu sağlanabilmektedir [8, 15]. Bu durum, mikro frezeleme için her zaman mümkün değildir. Çünkü mikro frezelemede, kesme derinliği veya dış başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar yarıçapına oranı genellikle büyüktür [16]. Böyle bir durumda, kesici takım negatif talaş açısına sahip bir kesici takım gibi davranmaktadır. Bu durum, kesme işleminde kararsızlıklara sebep olmaktadır [17]. Bununla birlikte hızlı takım aşınması, kesici geometrisinin bozulmasına neden olur [18]. Takım geometrisinin bozulması ise hem yüzey kalitesinin düşmesine hem de çapak oluşumuna neden olmaktadır [19, 20]. Tungsten-bakır esaslı kompozit malzemelerin talaşlı işlenmesine yönelik çalışmaları termal ve mekanik işleme olarak iki gruba ayırmak mümkün. Termalden kastedilen yöntem elektro erozyon, mekanik ile kast edilen ise frezeleme veya tornalama yöntemleridir. Gaitonde vd. [13], tungsten-bakır esaslı kompozit malzemelerin tornalanmasında kesme

parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre, kesme hızı arttırıldığında kesme kuvveti değerleri azalmış, ilerleme hızı arttırıldığında ise kesme kuvveti değerleri artış göstermiştir. Kompozisyonun kesme kuvveti ve takım aşınması üzerindeki etkisi ilk defa Uhlman vd. [21] tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada sinterlenmiş üç farklı tane yapısına sahip WCu malzemesi kullanılmıştır. Farklı kesme hızı ve ilerleme değerleri için yapılan deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının değişimi araştırılmıştır. Artan ilerleme ve talaş derinliğinin kesme kuvvetlerinin artmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Çapak oluşumu ve takım aşınmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimine yer verilmemiştir. Filiz vd. [22], yaptıkları çalışmada ise saf bakır malzemesinin mikro işlenebilirliği araştırılmıştır. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi elde edilmiştir. Ayrıca takım çapındaki değişim ve mikro çapak oluşumu da elde edilen sonuçlar arasındadır. Liu vd. [23], nano boyutlu tane yapısına sahip magnezyum esaslı metal matrisli kompozit malzemesinin mikro frezelemesini araştırmıştır. Samuel vd. [24], nano karbon tüp takviyeli polikarbon kompozit malzemenin mikro şartlarda işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, dış başına düşen ilerleme değerinin artmasına bağlı olarak kesme kuvvetleri artmakta ve talaş geometrisi de değişmektedir. Karbon elyaf içeren kompozit malzemede kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Minimum kesme kuvvetleri karbon nano tüp takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. Literatürde metal matrisli kompozit malzemelerinin mikro işlenmesine yönelik çok az çalışma vardır. Bu çalışmalar içerisinde toz metalürjisinin kullanıldığı ve kompozisyonun etkisinin ele alındığı çalışma ise yok denecek kadar azdır. Bu nedenle yapılan çalışmanın hem toz metalürjisi ile üretim yapan sektöre hem de mikro takım üreticilerine ışık tutacağı kanaatindeyiz. Bu noktadan hareketle W, Cu tozları belirli oranlarda karıştırılmak suretiyle iki farklı sıcaklıkta sinterlenmiş ve geleneksel toz metalürjisi metoduyla üretilmiştir. Üretilen kompozit numunelerinin sabit kesme parametrelerinde mikro frezeleme şartlarında işlenebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, sinterleme sıcaklığı ve bakır oranındaki değişimlerin kesme kuvvetlerine, takım aşınmasına, yüzey pürüzlülüğüne ve çapak oluşumuna etkileri araştırılmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. İş Parçası ve Kesici Takım (Workpiece Material and Cutting Tool)

Mikron boyutlarındaki (8-25 µm) tungsten (W) ve bakır (Cu) metal tozları ağırlıkça WCu 90/10, 80/20, 70/30 oranlarında karıştırılmış ve bir kalıp içerisinde 50 MPa basınç altında presleme işlemine tabi tutulmuştur. Preslenen numuneler 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında 1,5 saat süre sinterlenmiştir. Burada sinterleme sıcaklıklarının bakırın ergime sıcaklığı olan 1083°C'nin altında seçilerek katı faz

sinterleme (KFS) ile gözenekli bir yapının oluşturulması, bakırın ergime sıcaklığının üstünde seçilerek de sıvı faz sinterleme (SFS) ile gözeneksiz bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır. Çünkü gözenekli malzemeler gözeneksiz olanlara göre daha fazla ısı transferi sağlamak ve ısı uygulamalarda tercih edilmektedir [25]. SFS ile ise taneler arası ıslanma daha fazla sağlanacak ve bunun neticesinde elektriksel iletkenlik değerlerinde artış gerçekleşecektir [2]. WCu kompozitlerinin karışım oranları Tablo1'de görülmektedir. Sinterleme işlemi sonrasında numunelerin metalografik incelemeleri SEM (scanning electron microscope) analizleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler üzerinde aynı zamanda sertlik ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Her bir numune üzerinden 5 farklı bölgeden alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sertlik testleri için Shimadzu HMV 2L marka vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numunelerin yüzey tabakalarının sertliği mikro vickers sertlik ($HV_{0,5}$) cihazında 4.903 N yük altında ölçülmüştür. Çalışmada, 508 μ m çapında ağırlıkça %92WC ve %8 Co içeren iki ağızlı kesici takımlar (PMT part TS-2-0200-S) kullanılmıştır. Mikro takımlar Performance Micro Tool (PMT) firmasından kaplanmamış olarak temin edilmiştir. Kesici takımın bazı karakteristik ve geometrik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

2.2. Kesme Testleri ve Yüzey Analizi (Cutting Tests and Surface Analysis)

Çalışmada 3 eksenli, 24000 dev/dk devir sayısına sahip bir CNC tezgahı kullanılmıştır (Şekil 2a). Kesme deneylerinde, talaş derinliği (0,1 mm), kesme hızı (15,71 m/dk) ve ilerleme hızı (25 mm/dk) değerleri sabit alınmış olup, takımda

meydana gelen aşınmanın kesme kuvvetlerine, yüzey pürüzlülüğüne ve çapak oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Her bir kesme deneyinde toplam 6 adet kanal işlenmiş olup, her bir kesici takım için toplam kesme uzunluğu 42 mm'dir. Artan kesme mesafesine bağlı olarak hem çapak boyutundaki değişim hem de kesme kuvvetlerinin değişimi elde edilmiştir. Kesme deneyleri öncesinde takımda meydana gelen radyal sapma komparatör yardımıyla tespit edilmiş olup bu değer yaklaşık 2 μ m olduğu tespit edilmiştir. Deneylerde herhangi bir soğutma yağlama sistemi kullanılmamış, tüm deneyler kuru kesme koşullarında yapılmıştır. Her bir kesme deneyi için yeni takım kullanılmış olup, kesme kuvveti ölçümlerinde Kistler 9119AA1 tipi mini dinamometre kullanılmıştır (Şekil 2b). İş parçası dört adet civata ile dinamometreye sabitlenmiştir (Şekil 2c). İşlenen kanallara ait yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Nanovea 3D optik yüzey profilometresi (Şekil 3) kullanılmıştır. Kesme işlemi sonrasında, her bir kanalın giriş ve çıkış noktalarında kanal genişliği, kanal derinliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kanal kenarlarında meydana gelen çapaklar ve takım aşınması için SEM fotoğrafları baz alınmış ve ölçümler için Screen Caliper yazılımı kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Mikroyapı Analizi (Microstructure Analysis)

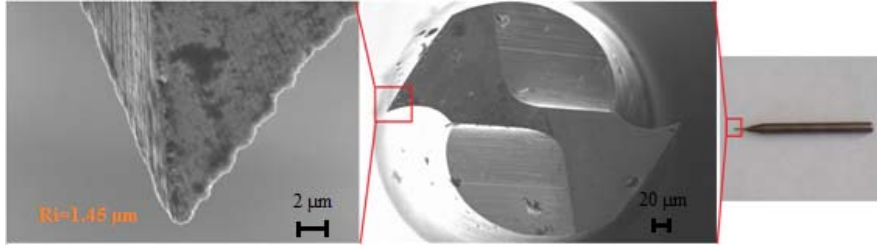
1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında sinterlenen WCu kompozit numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde,

Tablo 1. WCu kompozit numunelerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of WCu samples)

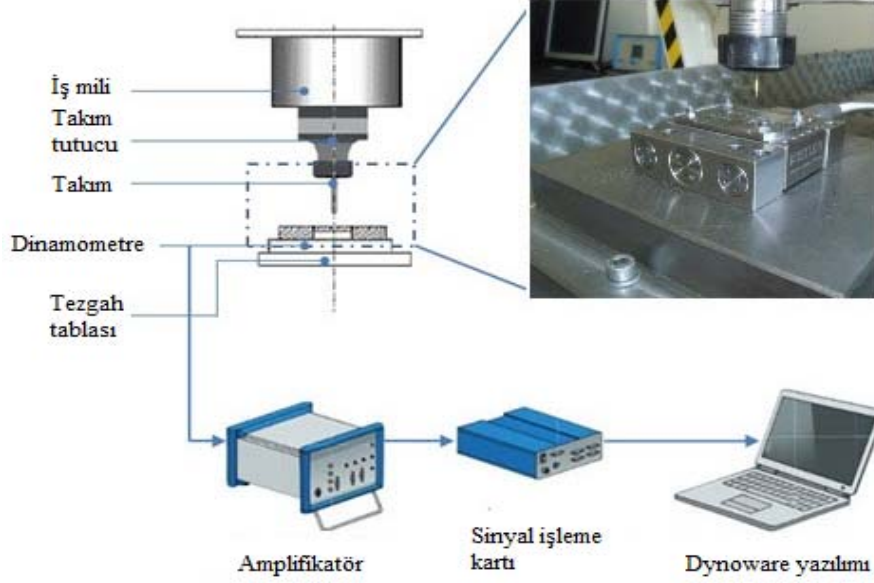
Numune	Elementler(% Ağırlık)		Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Presleme Basıncı (MPa)
	W	Cu		
WCu-1	90	10	1000°C	50
WCu-2	80	20		
WCu-3	70	30		
WCu-4	90	10	1100°C	
WCu-5	80	20		
WCu-6	70	30		

Tablo 2. Kesici takımın geometrik ve karakteristik özellikleri (Geometric and characteristic properties of cutting tool)

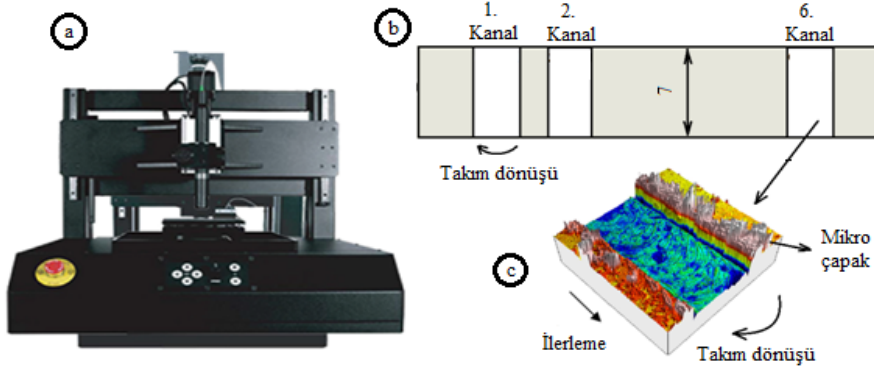
Geometrik Özellikler			Karakteristik Özellikler		
Gövde çapı (mm)	3,2	Helis uzunluğu (mm)	2,3	Kaplama tipi	Kaplanmamış
Takım çapı (mm)	0,508	Helis açısı, θ (°)	30	Sertlik (HV 0,05)	1680
Uzunluk (mm)	38,3	Talaş açısı, α (°)	15	Sürtünme katsayısı	0,4-0,6
Ağız sayısı	2	Boşluk açısı, γ (°)	6	Kesici köşe yarıçapı (μ m)	1-1,5



Şekil 1. Kesme deneylerinde kullanılan mikro kesici takım ve kenar yarıçapı (Micro cutting tool used in cutting tests and its edge radii)



Şekil 2. Mikro frezeleme işleminde kullanılan deney düzeneği (Experimental setup for micro-milling tests)



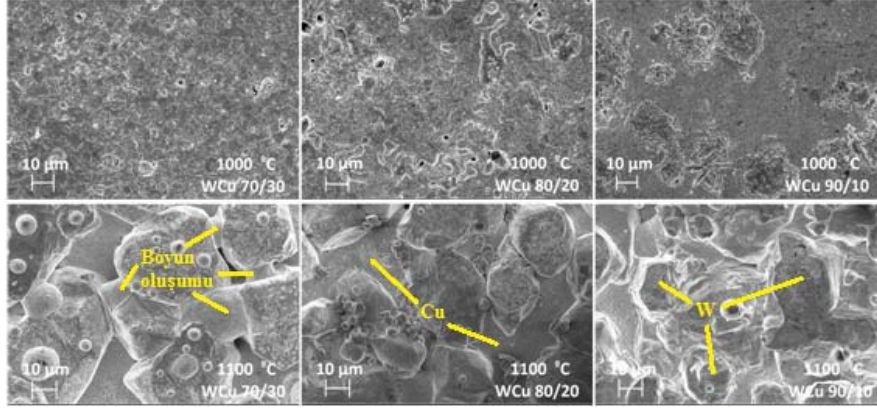
Şekil 3. a) Yüzey analizi için kullanılan Nanovea optic profilometre b) yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin alındığı bölge c) slot taramasının bir örneği ((a) Nanovea optic profilometer used for surface analyses (b) the region where surface roughness measurement are made (c) an example of slot scanning)

1000°C'de sinterlenen kompozit numunelerde ıslanmanın tam olarak gerçekleşmediği görülebilir. Bakırın ergime sıcaklığının 1083°C olduğu göz önüne alınırsa, 1000°C sinterleme sıcaklığında bakır tam anlamıyla sıvı faza geçememiştir. Bunun sonucu olarak ta nüfuziyet yeterince gerçekleşmemiş ve taneler arasında boyun oluşumu gözlemlenmemiştir. 1100°C'de sinterlenen numunelerde ise sıvı sinterleme oluşmuş ve Cu matris yapısı bu sıcaklıkta sıvı faza geçerek taneler arası boyun oluşumu gerçekleştirmiştir.

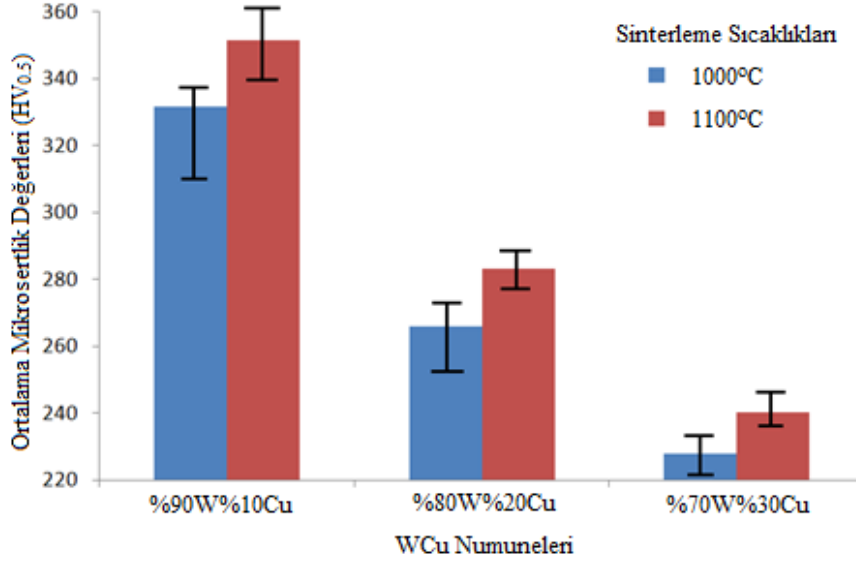
Boyun oluşumu bakır oranının arttığı numunelerde (WCu-6) daha net ve yaygın bir şekilde görülmektedir.

3.2. Mikrosertlik Değerlerinin Değişimi (Variation of Microhardness Values)

Üç farklı kompozisyon ve iki farklı sinterleme sıcaklığı için üretilen numunelere ait sertlik değişimi Şekil 5'te verilmektedir. 1100°C de sinterlenen numunelerde bakırın



Şekil 4. 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında sinterlenen WCu kompozit numunelerinin SEM görüntüleri (SEM images of WCu composite samples sintered at 1000°C and 1100°C)



Şekil 5. 1000°C ve 1100°C'de sinterlenmiş WCu numunelerinin mikrosertlik değerlerinin değişimi (Variation of microhardness values of WCu samples sintered at 1000°C and 1100°C)

ergimesi ile birlikte tam ısınma gerçekleşmiştir. Böylece taneler arası daha kuvvetli bağ oluşumu meydana gelmiş ve sertlik değerleri de artmıştır. Ayrıca numunelerdeki bakır oranının azalması da mikro sertlik değerlerinin artmasına katkıda bulunmuştur. Sinterleme sıcaklığının artışının genellikle malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı literatürde de belirtilmiştir [26, 27].

3.3. Kesme Kuvvetlerinin Değişimi (Variation of Cutting Forces)

Şekil 6'da WCu kompozit numunelerinin mikro frezelemesi sırasında kesme uzunluğuna bağlı olarak, Fx ve Fy kuvvetlerinin değişimi verilmektedir. İç yapıdaki W oranının artması kesme kuvvetlerinin artmasına neden olurken, Cu oranlarının artışı ise kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olmuştur. Sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte kesme kuvvetlerinin arttığını söylemek mümkündür. Çünkü artan sinterleme sıcaklığı üretilen WCu kompozit numunelerinin sertliğinin artmasına neden olmuştur. 1100°C'de sinterlenen numunelerde elde edilen kesme kuvveti değerleri 1000°C'de

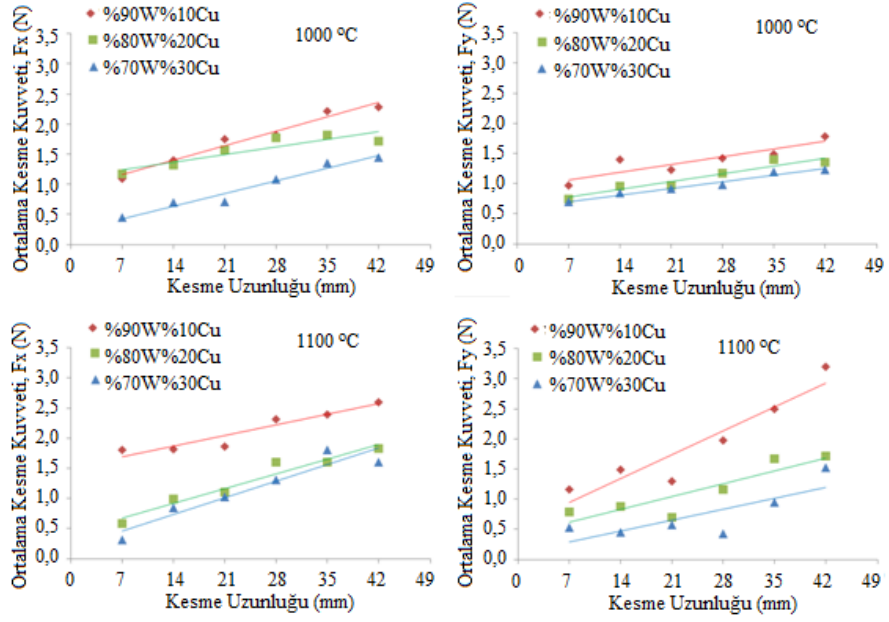
elde edilen kuvvet değerlerinden ortalama olarak % 29 daha yüksektir. Kesme kuvvetlerinin yüksek olmasının altında yatan diğer bir unsur ise, kompozit yapı içerisindeki W ile Cu'nun 1100°C'de daha iyi bir bağ oluşturmasıdır. 1100°C'de sıvı sinterleme olmasının da etkisiyle taneler arasındaki bağ daha kuvvetli olup, kesilmeye karşı daha yüksek bir direnç oluşturmaktadır. Artan kesme mesafesiyle birlikte hem Fx hem de Fy kuvvetlerinin lineer bir artış gösterdiğini söylemek mümkün. İlk kanal (7 mm lik kesme mesafesi sonunda) için elde edilen Fx kuvveti ile, son kanal sonunda (42 mm lik kesme mesafesi) elde edilen Fx kuvveti arasında %101 kadarlık bir fark vardır. Bu fark Fy kuvveti için %81 olarak gerçekleşmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığında ise bu artış Fx için %123 iken Fy için %159 olarak elde edilmiştir.

3.4. Kesici Takım Aşınması (Cutting Tool Wear)

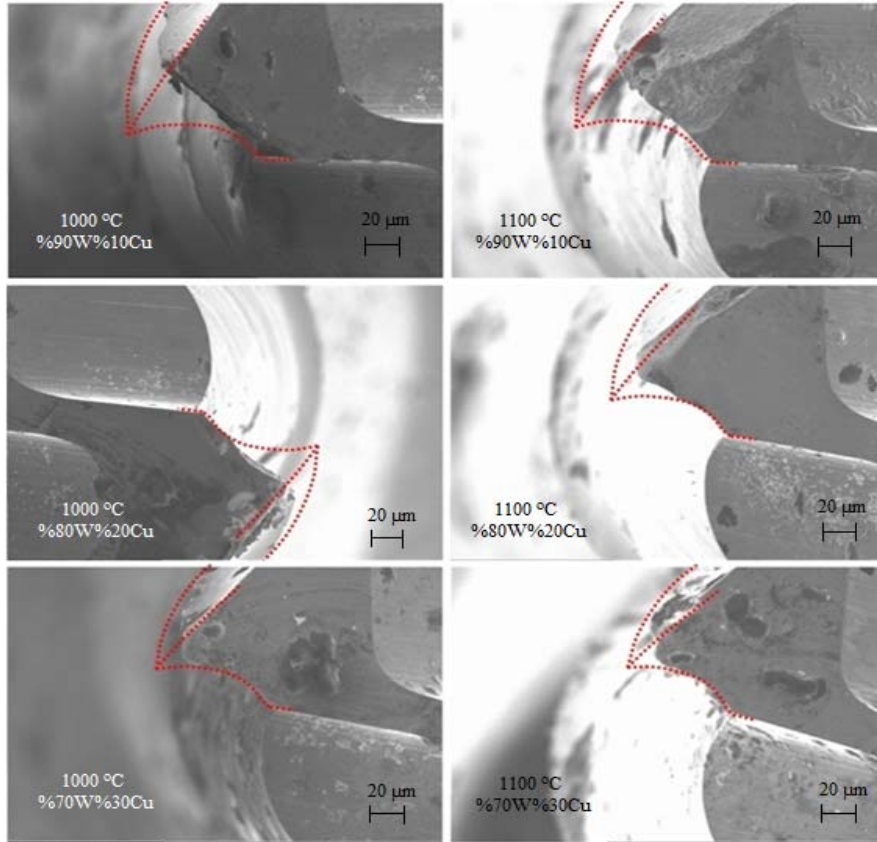
1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında sinterlenmiş WCu kompozit numunelerin frezelenmesi sonrasında takım

aşınmasına etkisini gözlemlemek amacıyla takımların SEM analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Mikro frezeleme

işleminde devir sayısının yüksek olması takım aşınma hızının artmasına neden olur. Mikro kesici takımlarda kenar



Şekil 6. 1000°C ve 1100°C'de sinterlenen numunelerin mikro frezelenmesi esnasında Fx ve Fy kesme kuvvetlerinin değişimi (Variation of cutting forces (Fx and Fy) during micro milling of composite samples sintered at 1000°C and 1100°C)



Şekil 7. 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında sinterlenmiş WCu kompozit numunelerinin mikro frezelenmesi sonrasında takım aşınmasının SEM görüntüleri

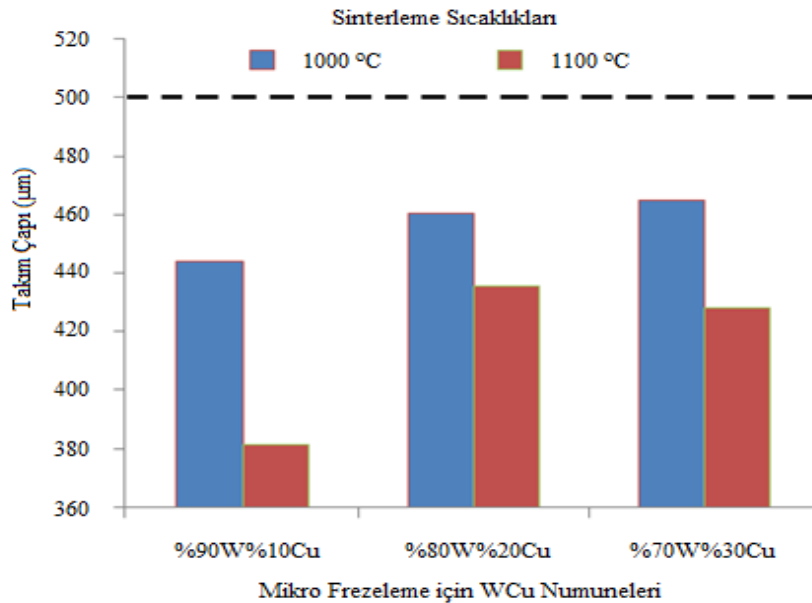
(SEM images of tool wear after micromilling of WCu composite samples sintered at 1000°C and 1100°C temperatures)

ve köşe yarıçapları abrazif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak artar. Böylece kesici takım ağız kesme kabiliyetini kaybeder. Bunun sonucunda, işlenen geometrinin boyutları değişir ve çapak oluşumu artar. Bu çalışmada da, sinterleme sıcaklığının arttığı numunelerin mikro frezelenmesinde kullanılan kesici takımlar daha çok aşınmaya maruz kalmışlardır. Fakat bakır içeriğinin yükselmesiyle birlikte takım aşınmasının da azaldığını söylemek mümkün. Çünkü bakır tungsten malzemeye göre çok daha yumuşak ve işlenmesi kolay bir malzemedir. Artan bakır içeriğine paralel olarak kesme kuvvetleri ve takım aşınması da azalmıştır. Maksimum takım aşınması WCu-4 kompozit malzemenin frezelenmesinde gözlemlenmiştir. Takım aşınmasında baskın olan mekanizma ise abrazif aşınma mekanizmasıdır. Fakat W içeriğinin yüksek olduğu ve yüksek sinterleme sıcaklığında üretilen %90 ve %80 W içeren numunelerin frezelenmesinde kırılma türü hasarında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 7'de dikkati çeken diğer bir unsur da talaş yapışmasıdır. Artan Cu oranı, talaş yapışmasının da artmasına neden olmaktadır. Tungsten oranının %90 ve %80 olduğu durumlarda kesici ağızda meydana gelen abrazif aşınma ve kırılma, kesici geometrisinin tamamen bozulmasına, pozitif olan talaş açısının negatife dönmesine neden olmuştur. Negatif talaş açısı, takımın iş parçasına dalmasını zorlaştırırken, talaşın kesme bölgesinden daha zor uzaklaştırılmasına neden olur. Bu iki unsur kesme kuvvetinin de artmasına zemin hazırlamıştır. Tungsten oranının %70 olduğu durumda, takım geometrisi tam olarak bozulmamıştır. Abrazif aşınmanın etkisiyle kenar yarıçapı artmıştır. Elbette artan kenar yarıçapı negatif talaş açısı etkisi oluşturacaktır. Fakat bu etki daha yüksek W içeren numunelerdeki kadar olmayacaktır. Mikro frezelemede abrazif aşınma ve kırılma türü hasarlar mikro takım geometrisinin bozulmasında önemli rol oynar. Kesici takımda meydana gelen çevresel

aşınma, takım çapının küçülmesine ve kenar yarıçapının büyümesine neden olur. Bunun sonucunda işlenen geometrinin boyutlarında da değişim meydana gelir. Şekil 8'de WCu kompozit numunelerinin mikro frezelenmesi sonrası takım çapı değerlerindeki değişim verilmektedir. Deney öncesinde her bir takımın çapı ölçülmüştür. Ortalama bir takım çapı 500µm olduğundan grafikteki kesik çizgi, kullanılmamış takım çapını ifade etmektedir. Sinterleme sıcaklığının yüksek olduğu numunelerde takım çapındaki azalma maksimumdur. Bununla birlikte Cu oranının artması ise takım çaplarındaki aşınmayı azaltmıştır. W oranının ve sinterleme sıcaklığının artışı malzemenin sertliğini arttırdığından, kesici takımdaki aşınma da maksimum düzeyde gerçekleşmiştir. Şekil 8'de dikkati çeken bir unsur da; %20 nin üzerinde bir Cu ilavesinin takım çapına olumlu bir katkı sağlamadığıdır. Bununla birlikte %20 ve üzerinde Cu ilavesi, sinterlemenin sıcaklığının etkisinin de azalmasına neden olmaktadır. Bu etkinin azalmasına, artan bakır oranıyla mikro frezeleme esnasında takıma bakırın daha fazla sıvanması ve talaş yığılmasının meydana geldiği gösterilebilir (Şekil 7). Takım çapındaki değişim açısından bakıldığında, kompozit malzemenin sertliğinden çok ödün vermeden, tercih edilebilecek Cu oranı %20 ve sinterleme sıcaklığının da 1100°C olması tavsiye edilebilir.

3.5. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

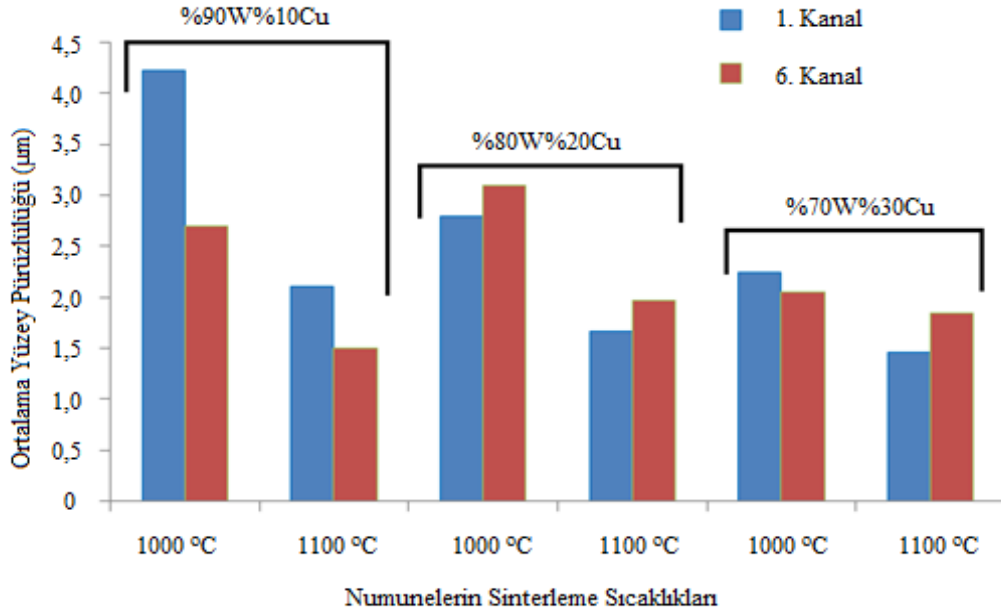
1000°C ve 1100°C'de sinterlenen ve 3 farklı kompozisyona sahip WCu kompozit malzemenin mikro frezelenmesi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'da ilk kanalın girişinden alınan Ra değerleri ile son kanalın çıkışından alınan Ra değerlerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. 1100°C'de sinterlenmiş numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 1000°C'de sinterlenmiş numunelere göre daha düşüktür.



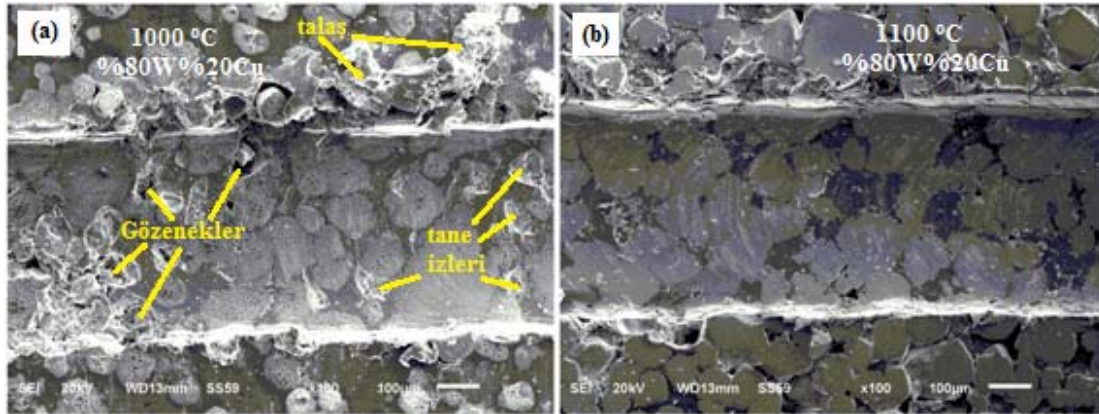
Şekil 8. WCu numunelerinin mikro frezelenmesi sonrası takım çaplarındaki değişim (Variation of tool diameter values after micromilling of WCu composite samples)

Yüksek sinterleme sıcaklığı Cu tozlarının erimesine ve sıvı faza geçmesine neden olmuştur. Böylece W ile Cu taneleri arasında daha iyi bir bağ oluşmuş ve kompozit malzemenin sertliği artmıştır. Bilindiği üzere, sertliği yüksek olan malzemenin işlenmesi sonrasında genellikle daha düşük bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilir [21, 28]. Şekil 9'dan da görüleceği üzere WCu 90/10 numunesinde elde edilen Ra değerleri daha büyüktür. Özellikle 1000°C'de sinterlenen numunede ilk kanal ile son kanal arasında Ra farkı daha fazladır. %90W içeren kompozit malzemenin sertliği daha yüksek olduğundan, abrazyif aşınma mekanizmasının etkisiyle kesicinin geometrisi daha çabuk bozulmuş ve kenar yarıçapı da arttığından son kanalda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri daha küçüktür. Bilindiği üzere konvensiyonel kesme işleminde kenar yarıçapı (r) ile Ra arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Benzer bir durumu 1100°C de sinterlenen numunede de görmek mümkündür.

Fakat 1000°C'de sinterlenen numunede sıvı faz oluşmadığından W ile Cu arasında bağ mukavemeti daha düşüktür. WCu 90/10 numunesinde bakır oranının az ve sinterleme sıcaklığının bakırın ergime sıcaklığının altında olması nedeniyle W taneleri arasındaki bağ diğer numunelere göre oldukça zayıftır. W ile Cu arasında boyun oluşmadığından/çok az oluştuğundan yapı daha çok gözenekli bir formdadır (Şekil 10(a)). Bunun sonucunda kesme esnasında özellikle W taneleri koparak/dökülerek kesici takım ile iş parçası arasına girmiş ve işlenen yüzeye sıvanmıştır. Bu da işlenen yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmuştur (Şekil 10(a)). Sinterleme 1100°C'de yapıldığında Cu ve W taneleri birbiri ile yeterli bir bağ oluşturduğundan hem daha sert bir yapı oluşturulmuştur hem de kesme esnasında taneler kopmaya değil kesilmeye zorlanmıştır. Bu da daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesine neden olmuştur (Şekil 10(b)). Yüzey kalitesi



Şekil 9. İşlenen kanallara ait ortalama yüzey pürüzlülüğünün Cu oranı ve sinterleme sıcaklığı ile değişimi (Variation of average surface roughness of machined slots depending on Cu ratio and sintering temperature)



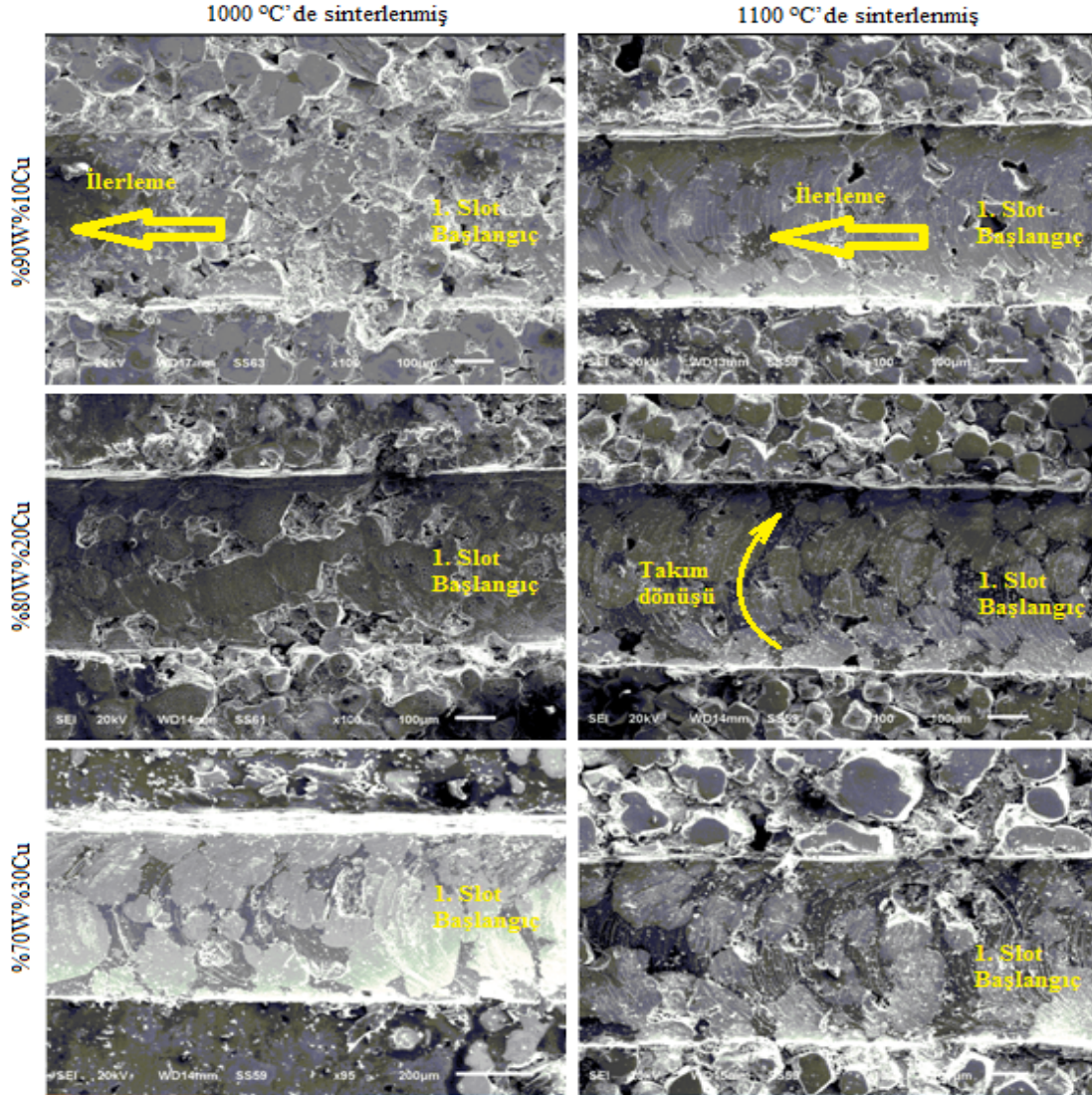
Şekil 10. 1000°C ve 1100°C'de sinterlenen numunelerin işlenmiş kanallarına ait SEM görüntüleri (SEM images of machined slots for 1000°C and 1100°C)

açısından değerlendirildiğinde, %10 veya %20 Cu ilavesinin yeterli olduğu ve sinterleme sıcaklığının da 1100°C olması gerektiği sonucu çıkarılabilir.

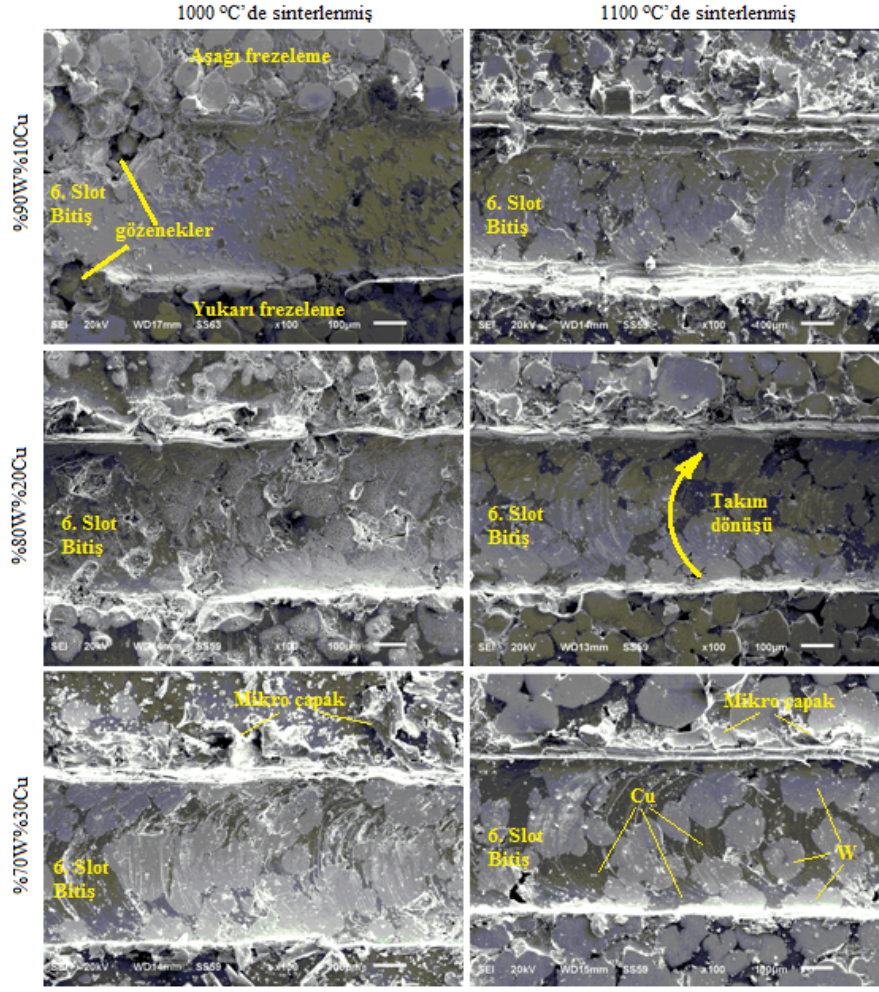
3.6. Mikro Çapak Oluşumu (Micro Burr Formation)

Slot başlangıç ve bitiş bölgelerinde oluşan mikro çapaklara ait SEM görüntüleri Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmektedir. 6. kanalların bitişinde çapak oluşumu bütün numuneler için maksimum seviyededir. Buradan kesme uzunluğunun artışının çapak oluşumunda artışa neden olduğu anlaşılmaktadır. Aşağı yönlü frezelenmiş kenarda yukarı yönlü frezelenmiş kenara göre daha geniş çapak oluşumu gözlemlenmektedir. Mikro frezeleme ile ilgili benzer bir çalışma bu görüşü desteklemektedir [17]. İşlenen numunelerin bakır oranı arttıkça çapak oluşumu da artmıştır. Öyle ki, maksimum çapak genişliği %30 Cu bakır içeren numunelerin frezelenmesinde, minimum çapak genişliği ise %10 Cu içeren numunelerin frezelenmesinde oluşmuştur. Şekil 13'te farklı sinterleme sıcaklığı ve bakır oranındaki

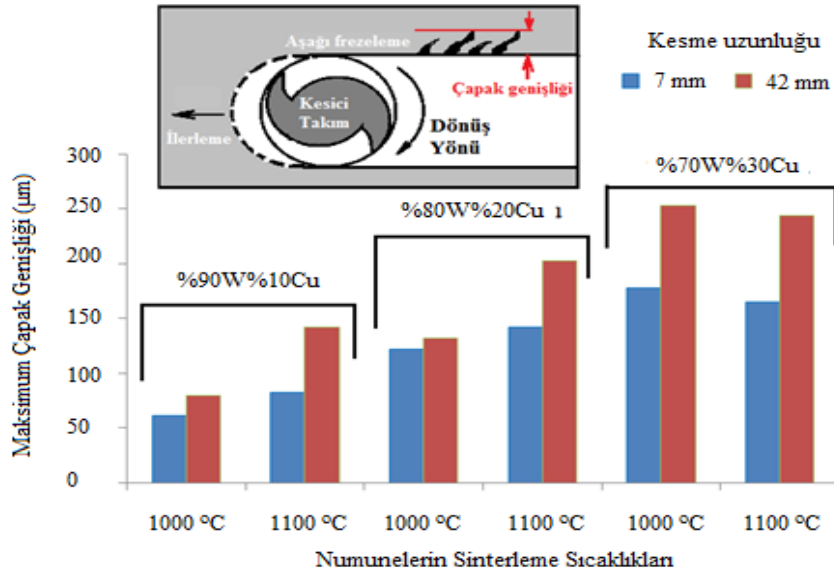
değişim ile ortalama çapak genişliğinin değişimi verilmektedir. Bakır oranının artması, kompozit malzemenin sertliğinin azalmasına ve daha sünek bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte maksimum çapak yüksekliğinin en yüksek bakır oranına sahip WCu numunelerinde elde edilmiştir. Bu da artan Cu oranı ile birlikte yapının sünek olmasından kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten, 1. kanalın başlangıcındaki mikro çapak 6. kanalın sonundakinden daha küçüktür. Çapak yüksekliği kesme uzunluğuyla artmaktadır. Bunun da nedeni, kesme zamanına bağlı olarak takım geometrisinde meydana gelen bozulmadır. Özellikle de kenar yarıçapının artması ve negatif talaş açısının oluşması, takımın kesme kabiliyetini yitirmesine neden olur ki bu da çapak oluşumunu artırır. Şekil 13'te dikkati çeken bir unsur da %70W%30Cu içeren kompozit malzemede elde edilen çapak boyutudur. Bu oranlarda sinterleme sıcaklığının bir etkisinin olmadığını söylemek mümkün. Çünkü hem 1000 °C'de hem de 1100 °C'de sinterlenen numunelerde elde edilen çapak boyutları birbirine çok yakın.



Şekil 11. 1000°C ve 1100°C numuneler için 1. kanala ait SEM görüntüleri (SEM images of 1. slots for 1000°C and 1100°C samples)



Şekil 12. 1000°C ve 1100°C numuneler için 6. kanala ait SEM görüntüleri (SEM images of 6. slots for 1000°C and 1100°C samples)



Şekil 13. Sinterleme sıcaklığı ve bakır oranına bağlı olarak maksimum çapak genişliklerindeki değişimler (Variation of maximum top burr width depending on sintering temperatures and Cu ratio)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tungsten-bakır kompozitlerinin mikro frezelenmesinde kesme performansı üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada bakır ilavesinin ve sinterleme sıcaklığının takım aşınması, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çapak boyutu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öne çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

WCu numunelerinin mikro frezeleme deneyleri esnasında maksimum kesme kuvveti değeri WCu-4 kompozit malzemesinde, en düşük kesme kuvveti ise WCu-3 kompozit numunesinde elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ve bakır oranının azalması kesici takımların aşınmasını arttırmıştır. Takım aşınma mekanizması temelde abrazif aşınmadır. Fakat W oranının yüksek olduğu numunelerde küçük kırılmalara rastlanmıştır.

%30 Cu içeriğine sahip numunelerin mikro frezelenmesinde daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Bu numunelerde kullanılan takımların uç yarıçaplarındaki azalma oranı da minimum olarak ölçülmüştür. Daha az aşınmış kesici takımlar yüzey kalitesini olumlu etkilemiştir. İşlenen numunenin bakır oranının artışıyla mikro kanallarda oluşan çapak genişliklerinde de artış gerçekleşmiştir. Maksimum çapak genişlikleri zıt yönlü frezeleme yönünde ve özellikle bakır oranının yüksek olduğu numunelerde elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesinin 14.FEN.BİL.39 ve 213M572 nolu TÜBİTAK projesince desteklenmiştir. SEM analizleri Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarınca gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sepulveda J., Valenzuela L., Brush Wellman advances Cu/W technology, *Metallic Powder Review*, PM Special Feature, 24–27, 1998.
2. İbrahim A., Abdallah M., Mostafa S.F., Hegazy A.A., An experimental investigation on the W-Cu composites, *Materials and Design*, 30, 1398-1403, 2009.
3. Chen P., Shen Q., Luo G., Wang C., Li M., Zhang L., Li X., Zhu B., Effect of interface modification by Cu-coated W powders on the microstructure evolution and properties improvement for Cu–W composites, *Surface & Coatings Technology*, 288, 8-14, 2016.
4. Güler Ö., Evin E., The investigation of contact performance of oxide reinforced copper composite via mechanical alloying, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1286-1290, 2009.
5. Erçetin A., Aslantaş K., Production of WCu electrical contact material via conventional powder metallurgy method: Characterization, mechanical and electrical properties, *Turkish Journal of Nature and Science*, 37-42, 2017.
6. Xu L., Srinivasakannan C., Zhang L., Yan M., Peng J., Xia H., Guo S., Fabrication of tungsten-copper alloys by microwave hot pressing sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 658, 23-28, 2016.
7. Zhang X.Q., Peng Y.H., Ruan X.Y., Simulation and fracture prediction for sintered materials in upsetting by FEM, *Journal of Materials Processing Technology*, 105 (3), 253–257, 2000.
8. Bhalla A.K., Williams J.D., Comparative assessment of explosive and other methods of compaction in the production of tungsten–copper composite, *Powder Metall.*, 1, 31–37, 1976.
9. Merrick H.F., Effect of heat treatment on the structure and properties of extruded P/M alloy 718, *Metallurgical Transactions A*, 7 (4), 505-514, 1976.
10. Radavich J.F., Meyers D.J., Thermomechanical processing of P/M alloy 718, 5th Int. Symp. on Superalloys, Warrendale, PA, 347–356, 1984.
11. Kim D-G., Kim G-S., Suk M-J., Oh S-T., Kim Y-D., Effect of heating rate on microstructural homogeneity of sintered W-15 wt.% Cu nano composite fabricated from W–CuO powder mixture, *Scr. Mater.*, 51, 677–681, 2004.
12. Li S.B., Xie J.X., Processing and microstructure of functionally graded W/Cu composites fabricated by multi-billet extrusion using mechanically alloyed powders, *Compos. Sci. Technol.*, 66 (13), 2329-2336, 2006.
13. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Faustino M., Paulo Davim J., Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials.*, 28 (2), 221-227, 2010.
14. Erçetin A., Aslantaş K., The effect of different cutting parameters on cutting force, tool wear and burr formation in micro milling WCu composite material fabricated via powder metallurgy, *Turkish Journal of Nature and Science*, 1-5, 2016.
15. Uysal A., Investigation of cutting temperature in minimum quantity lubrication milling of ferritic stainless steel by using multi wall carbon nanotube reinforced cutting fluid, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 645-650, 2017.
16. Ucu I., Aslantaş K. and Bedir F., An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy, *Wear*, 300 (1-2), 8-19, 2013.
17. Aslantaş K., Hopa H.E., Percin M., Ucu I., Çiçek A., Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti₆Al₄V alloy, *Precision Engineering*, 45, 55-66, 2016.
18. Karagüzel U., Bakkal M., Budak E., Modelling thermally induced deformations on tool during turn-milling, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 865-875, 2017.
19. Kacal A., Yildirim F., Determining the Effects of CBN Cutting Insert's Cutting Performance on Surface Roughness and Tool Wear at Turning of PMD 23 Steel,

- Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University, 31 (1), 181-189, 2016.
20. Tekaut İ., Demir H., The Effects Of Cutting Tool Coating and Machining Parameters in Drilling of Steel AISI H13 and AISI D2, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 289-296, 2015.
 21. Uhlmann E., Piltz S. and Schauer K., Micro milling of sintered tungsten-copper composite materials, Journal of Materials Processing Technology, 167 (2-3), 402-407, 2005.
 22. Filiz S., Conley C.M., Wasserman M.B., Ozdoganlar O.B., An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (7-8), 1088-1100, 2007.
 23. Liu J., Li J., Ji Y., Xu C., Investigation on the effect of SiC nanoparticles on cutting forces for micro-milling magnesium matrix composites, ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, vol. 2, Corvallis, Oregon-USA, June 13-17, 2011.
 24. Samuel J., Devor R.E., Kapoor S.G., Hsia K.J., Experimental investigation of the machinability of polycarbonate reinforced with multiwalled carbon nanotubes, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128 (2), 465-473, 2006.
 25. Liter S.G., Kaviany M., Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 428-4311, 2001.
 26. Johnson J.L., German R.M., Phase equilibria effects on the enhanced liquid phase sintering of tungsten-copper, Metallurgical Transactions A, 24 (11), 2369-2377, 1993.
 27. Ardestani M., Rezaie H.R., Arabi H., Razavizadeh H., The effect of sintering temperature on densification of nanoscale dispersed W-20-40%wt Cu composite powders, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 27 (5), 862-867, 2009.
 28. Chou Y.S., Barash M.M., Review on hard turning and CBN cutting tools, SME Technical Paper, Proc. First Int. Machining and Grinding Conf., 951-962, 1995.

