



## Fatigue performance of tungsten carbide cobalt (WC-Co) hardmetal materials after shot peening process

M. Burak Toparlı

NORM Cıvata R&D Center, I.A.O.S.B. Çiğli, İzmir, Türkiye

### Highlights:

- Fatigue performance of hardmetal samples were investigated.
- Shot peening was applied to obtain fatigue life improvement.
- Owing to hardness increase after shot peening, fatigue life enhancement was achieved.

### Keywords:

- Hardmetals
- Metal ceramic composite
- Shot peening
- Fatigue

### Article Info:

Research Article  
Received: 10.03.2021  
Accepted: 03.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.894192

### Acknowledgement:

This study, conducted at Norm Cıvata San. ve Tic. A.S. Turkey, was supported by TUBITAK in TEYDEB 1501 Program with 316082 project number. The author would like to thank to Umut İnce, Cenk Kılıçaslan, Barış Tanrikulu, Sezgin Yurtdaş, Prof. Dr. Mustafa Güden and Buğra Karahan.

### Correspondence:

Author: M. Burak Toparlı  
e-mail: burak.toparli@norm-fasteners.com.tr  
phone: +90 232 376 7610

### Graphical/Tabular Abstract

Shot peening process, preferred in automotive and aerospace industries for fatigue life improvement, was applied to WC-Co hardmetals used in various sectors including cold forging dies and inserts used in machining. Despite surface roughness increase after the process, fatigue life was increased by employing shot peening owing to hardness increase. Schematic representation of this study can be seen in Figure A.

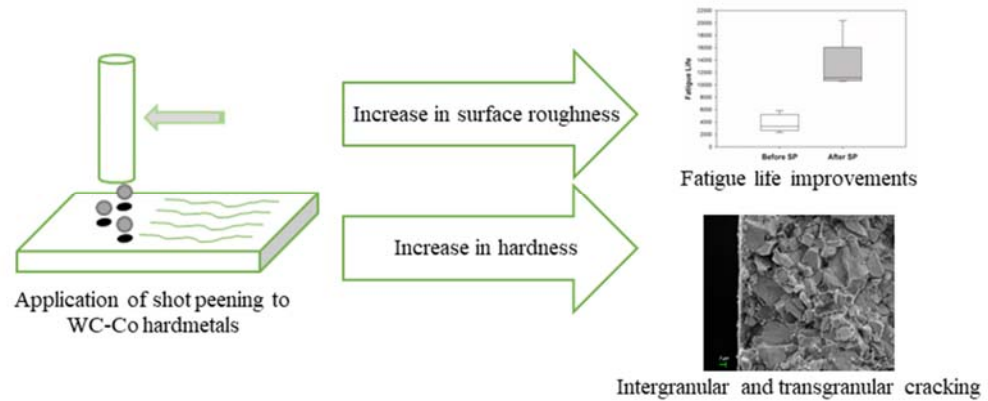


Figure A. Schematic representation of this study

**Purpose:** In this study, fatigue life of WC-Co hardmetals was investigated. Shot peening, one of the mechanical surface treatment techniques, was employed to improve fatigue performance of metal ceramic composite samples.

**Theory and Methods:** WC-Co hardmetal samples were shot peened to have better fatigue life. Material characterization tests including surface roughness and hardness were carried out. Fatigue life experiments were conducted to assess the effect of shot peening on metal ceramic composite samples. Fractured samples were investigated in detail by employing scanning electron microscopy to reveal the fatigue fracture mechanisms of the samples.

**Results:** According to surface roughness measurements,  $R_a$  and  $R_z$  values were increased by 112% and 83%, respectively, due to shot peening process. Increase in macro and micro hardness of about 5% and 13% were obtained on the surface. The effective depth of shot peening process in terms hardness was found as around 300  $\mu\text{m}$  from the shot peened surface. Hardness increase after shot peening was associated with strain hardening due to bombardment of steel media. According to fatigue life experiments, 248% increase in fatigue performance was achieved. Fracture surface analysis revealed that shot peening led to cracking on tungsten carbide particles. In addition, it was shown that intergranular and transgranular cracking was observed at fracture surfaces.

**Conclusion:** Based on the experimental work carried out in this study, it was shown that hardness increase after shot peening led to fatigue life enhancement despite surface roughness increase. Fracture surface examinations proved that fatigue crack initiation and propagation was observed as for brittle materials. No significant fatigue striations, found in fracture surfaces of ductile materials, were observed.



## Bilyalı dövme işlemi sonrası Tungsten Karbür-Kobalt (WC-Co) sertmetal malzemelerin yorulma performansının incelenmesi

M. Burak Toparlı\*

NORM Cıvata Ar-Ge Merkezi, İ.A.O.S.B. Çiğli, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İmalat sanayinde kullanılan sertmetal malzemelerin yorulma performansı incelenmiştir
- Yorulma ömründe iyileşme elde edebilmek için bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır
- Elde edilen sertlik artışı sayesinde malzemelerin yorulma performansında iyileşme elde edilmiştir

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 10.03.2021  
Kabul: 03.02.2022

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.894192

#### Anahtar Kelimeler:

Sertmetal,  
metal seramik kompozit  
malzeme,  
bilyalı dövme,  
yorulma

#### ÖZ

Bu çalışmada, soğuk dövme kalıpları ve takım ucu gibi imalat sektörü açısından önemli alanlarda kullanılan tungsten karbür-kobalt (WC-Co) sertmetal malzemeler ele alınmıştır. İlgili metal-seramik kompozit malzemelerin yorulma ömrünün artırılması için özellikle havacılık ve otomotiv sanayinde kullanılan bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Malzeme karakterizasyon testleri sonrası yorulma ömürleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda, bilyalı dövme işlemi sonrası malzeme Ra ve Rz değerlerinde sırasıyla %113 ve %83'lük artışlar gözlenmiştir. Sertlik ölçümleri neticesinde, yüzeyde %13'lük bir artış olduğu ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen derinlik profiline göre sertlik artışından etkilenen bölge derinliğinin yaklaşık 300 µm olduğu saptanmıştır. Yorulma testleri sonucunda bilyalı dövme işlemi sayesinde sertmetal numunelerin yorulma performansında iyileşme elde edilmiştir. Malzemedeki yorulma ömrü artışının bilyalı dövme sonucu elde edilen sertlik artışı sayesinde olduğu belirlenmiştir. Sertlik artışının plastik deformasyon sonucu gerinim sertleşmesi neticesinde olduğu ortaya konmuş, kobalt fazında herhangi bir kristal yapı değişikliği saptanmamıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri yorulma testleri sonrasında taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Yorulma testi sonrasında gözlenen kırılmaların çoklu çatlak başlangıcı sonucu olduğu tespit edilmiştir. Tungsten karbür tanelerin hem bilyalı dövme hem de yorulma testi sonucunda kırıldığı gözlenmiştir. Kırılma esnasında hem taneler arası hem de Taneçi çatlak ilerleme mekanizmalarının kırılmalara neden olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, incelenen kırılma yüzeylerinde sünek malzemelerde görülen yorulma yivciklerine rastlanmamıştır.

## Fatigue performance of tungsten carbide cobalt (WC-Co) hardmetal materials after shot peening process

### H I G H L I G H T S

- Fatigue performance of hardmetal samples were investigated
- Shot peening was applied to obtain fatigue life improvement
- Owing to hardness increase, fatigue life enhancement was achieved

#### Article Info

Research Article  
Received: 10.03.2021  
Accepted: 03.02.2022

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.894192

#### Keywords:

Hardmetals,  
metal ceramic composite,  
shot peening,  
fatigue

#### ABSTRACT

In order to increase fatigue life of metal-ceramic composite samples, shot peening process, preferred in aerospace and automotive industry, was applied. In addition to fatigue experiments, material characterization tests were performed. According to surface roughness measurements, Ra and Rz values were increased by 113% and 83%, respectively. An increase of 13% in hardness was obtained at the surface of shot peened samples. The depth of hardened region was found as about 300 µm. Fatigue experiments revealed an improvement in the fatigue performance of the hardmetal samples owing to shot peening. It was concluded that fatigue life increase was due to hardness increase after shot peening. Strain hardening after shot peening-induced-plastic deformation was found to be the main hardening mechanism. There was no crystal structure transformation that could be associated with cobalt phase, leading to hardness increase. Fracture surfaces of the samples were examined by SEM. Multi-site cracking was found to trigger fatigue failures. It was also found that tungsten carbide grains were fractured due to shot peening and fatigue testing. Transgranular and intergranular cracking was observed after fatigue experiments. No significant fatigue striations were found as in ductile materials.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : burak.toparli@norm-fasteners.com.tr / Tel: +90 232 376 7610

## 1. Giriş (Introduction)

Literatürde sertmetaller (İng. hardmetals) sınıfına giren tungsten karbür-kobalt (WC-Co) metal-seramik kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar 20. yüzyılın başından itibaren yapılmaktadır [1]. Sert ve aşınmaya dirençli tungsten karbür parçacıkların daha sünek kobalt matrisi ile beraber toz şeklinde karıştırılıp sinterlenerek üretilmesi sonucu elde edilen sertmetaller farklı sektörlerde kullanılmaktadır [2, 3]. İlk uygulamalarda yüksek aşınmaya maruz kalan ve malzeme sertliğinin önemli olduğu kesici takım uçlarında kullanılan sertmetaller, mikroyapı ve bileşenlerinin optimize edilmesiyle yorulmanın daha baskın olduğu alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır [2, 4, 5]. Özellikle yüksek sertlik ve yorulma direnci gereksinimlerinin kritik olduğu soğuk şekillendirme kalıplarında tungsten karbür-kobalt sertmetaller kullanılmaktadır. Ekstrüzyon, redüksiyon, kafa şişirme gibi soğuk şekillendirme operasyonlarında kullanılan kalıplarda uygulamaya göre farklı tungsten karbür-kobalt malzemeler tercih edilmektedir. Dolayısıyla, artan kullanım alanları sayesinde tungsten karbür-kobalt sertmetal malzemelerin imalat sektöründeki önemi artmaktadır. Ancak, yapılan literatür araştırmasına göre tungsten karbür - kobalt malzemeler ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu ve özellikle yorulma performansının artırılmasına yönelik çok fazla çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir.

Tungsten karbür içeren sertmetal malzemelerde bağlayıcı seçimi nihai ürün performansını ciddi şekilde etkilemektedir. Nikel gibi farklı bağlayıcılar kullanılarak da üretilen sertmetaller arasında kobalt en çok tercih edilen bağlayıcı malzemedir. Tungsten karbür parçacıkların matris içindeki ıslanabilirliğinin yüksek olması, düşük yüzey enerjisine sahip olmaları ve katı halde üstün mekanik yapılaşma sağlaması sayesinde, kobalt sertmetallerde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır [6]. Belirtilen özellikler sertmetallerin boşluksuz olarak üretilmesi ve yapısal bütünlüğünün sağlanması için çok önemlidir. Boşluklu malzemelerde yük altında erken ve ani kırılmaların gözlenebileceği ve yorulma ömürlerinin düşük olacağı bilinmektedir.

Tüm mühendislik malzemeleri düşünüldüğünde en çok karşılaşılan hasar mekanizması olan yorulma, sertmetaller açısından da kritik öneme sahiptir [7, 8]. Alüminyum alaşımları ve çeliklere göre sertmetallerde görülen yorulma davranışı malzeme yapısı gereği daha farklıdır. Sertmetallerin yorulma davranışını inceleyen çalışmaların özellikle son 20 yılda malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi sayesinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Sertmetallerin yorulma performansının incelenmesi açısından S-N grafiklerinin deneysel olarak çıkarılması ve yorulma çatlakları ilerlemesinin incelendiği çalışmalar öne çıkmaktadır [9, 10]. Yapılan çalışmalarda incelenen diğer bir husus ise sertmetal üretiminde kullanılan bileşenlerin metalürjik ve mikroyapı özellikleri ve hasar mekanizmasına olan etkileridir [11, 12]. Yapılan çalışmalarda kırılmaların sünek kobalt fazından başlayıp ilerlediğini gösteren çalışmalara rastlanmaktadır [1]. Çatlak başlangıç konularını incelendiğinde özellikle malzeme kusurları (boşluk, topaklanma vb.) veya tungsten karbür tanecik sınırlarının altı çizilmiştir [13]. Tungsten karbür toz parçacıklarının morfolojisinin ve büyüklüklerinin yorulma direnci açısından çok önemli olduğu belirtilmiştir [14]. Özellikle yorulma direncini artırmak için tungsten karbür malzemelerin tane büyüklüklerinin artırılması tavsiye edilmektedir [15]. Kobalt ile üretilen sertmetallerde dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da kobaltın sıcaklık ve deformasyon ile kristal yapı değişikliği yaşamasıdır [5, 16]. Hegzagonal sıkı paket yapısına sahip allotropu göz önünde bulduğunda, kobalt malzemelerde içyapı ve kristal yapısına bağlı olarak kırılma bir kırılma davranışı gözlenebilmektedir. Ülkemizde bilya püskürtme veya bilyalı dövme (İng. shot peening) olarak bilinen işlem özellikle havacılık ve otomotiv sanayinde tercih edilen ve başta alüminyum alaşımları ve

çeliklere uygulanan lazerli dövme, ultrasonik darbe prosesi gibi mekanik yüzey işlemlerin başında gelmektedir [17, 18]. Özellikle uygulandıkları malzemenin yorulma ömrünü artırmak için kullanılan bu prosesin, malzemelerin balistik performansını artırmaya yönelik uygulama alanları da bulunmaktadır [19]. Bu yöntem ile yüksek basınçlı hava ile çelik veya seramik malzemeden elde edilen bilyalar numune yüzeyine püskürtülmektedir [20]. Bilyaların malzeme yüzeyinde yol açtığı plastik deformasyon sonucu gerinin sertleşmesi sayesinde sertlik artışı elde edilebilmektedir [21]. Ayrıca, proses sonunda basma kalıntı gerilmeler işlenen malzeme yüzeyine yakın bölgede oluşmaktadır [22]. Ancak, püskürtülen bilyalar nedeniyle malzemede yüzey pürüzlülüğü artışı da gözlenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, malzemelerdeki sertlik artışı ve elde edilen bası kalıntı gerilmeler sonucu malzeme yorulma performansında artışlar elde edilebildiği ortaya konmuştur [23].

Soğuk dövme yöntemi gibi kalıp ile üretim yapılan tesislerde, kalıp ömrü hem maliyet hem de verimlilik açısından çok önemli bir konudur. Çalışma ömrü düşük kalıplarla yapılan üretimlerde kalıp sarf maliyetleri artmaktadır. Ayrıca, daha sık kalıp değişikliği ihtiyacı ortaya çıktığı için duruşlar yaşanmakta ve proses verimliliğinde ciddi kayıplar gözlenmektedir. Bu nedenle, kalıp kullanılarak yapılan üretimlerde kalıp ömrünün artırılması çok önemli bir konudur. Bu çalışmada, özellikle cıvata, somun, perçin gibi bağlantı elemanı kalıplarında kullanılan ve %25 oranında kobalt içeren tungsten karbür-kobalt sertmetal malzemeler incelenmiştir. Soğuk şekillendirme kalıplarının yorulma direncinde iyileşme elde edilebilmesi için bilyalı dövme işlemi ele alınmıştır. Malzemelerin yorulma performansı ile beraber mikroyapı, sertlik, yüzey pürüzlülük ve kristal yapıları karşılaştırılmıştır. Yorulma deneyleri sonucu kırılan numuneler taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiş ve kırılma karakteristikleri konusunda detaylı çalışmalar yapılmıştır.

## 2. Malzeme (Material)

Bu çalışmada tungsten karbür-kobalt metal seramik kompozit malzeme sınıfına giren sertmetaller kullanılmıştır. İlgili malzeme üretimi için tungsten karbür bileşenler toz halinde tedarik edilmektedir. Matris malzeme olarak seçilen kobalt toz halinde kullanılmakta ve tungsten karbür parçacıkları ile karıştırılmaktadır. Karıştırma işlemi ile homojen dağılımları sağlanan malzemelerin ufalama sonrasında toz parçacık boyutları küçültülmekte ve preslenmeye hazır hale getirilmektedir. İstenen nihai ürün formu göz önünde bulundurularak presleme işlemi gerçekleştirilmekte ve sinterleme öncesi bu forma işlenmektedir. Yaklaşık 1300°C ve 100 bar basınç altında özel fırınlarda yapılan sinterleme işlemi ile ürün şekillendirme prosesi tamamlanmaktadır. Sinterleme sonrası, ürün formuna bağlı olarak talaşlı imalat ile ürün nihai forma getirilmektedir. Tungsten karbür ve kobalt ile üretimi yapılan sertmetallerde kontrol edilebilecek önemli iki parametre bulunmaktadır. Bunlar, iki fazın yüzdesel oranları ve tungsten karbür toz malzemenin tane boyutudur. İlgili sertmetal kullanım alanına göre ve beklenen performans kriterleri çerçevesinde bu iki parametre için optimum değerler belirlenmelidir. Malzemenin yüksek aşınmaya maruz kaldığı uygulamalarda sertlik değerini artırmak için kobalt oranının azaltılmasıyla beraber daha küçük tane büyüklüğüne sahip tungsten karbür tozlar kullanılmaktadır. Yorulma altında çalışan bileşenlerde ise kobalt oranı artırılarak daha büyük tane büyüklüğüne sahip karbür malzeme tercih edilmektedir.

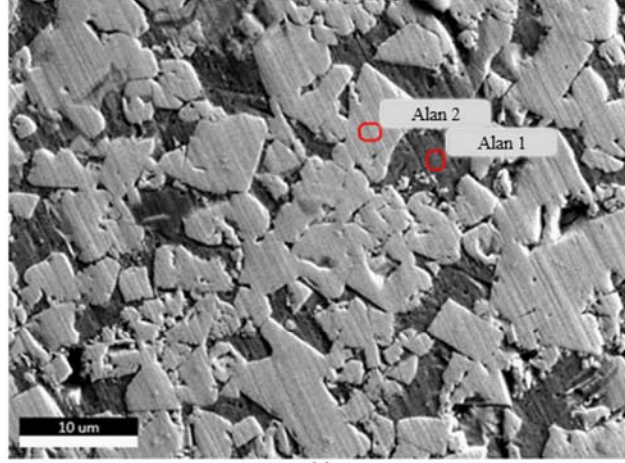
Bu çalışma kapsamında seçilecek malzemenin soğuk şekillendirme kalıplarında kullanılacak olmasından dolayı yüksek aşınma ve tokluk değerlerine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle %25 kobalt içeren ve büyük tungsten karbür tane yapısına sahip bir sertmetal seçilmiştir. Kullanılan malzemeye ait özellikler Tablo 1 ile verilmiştir.

Çalışmalarda kullanılan tungsten karbür-kobalt malzemesine ait taramalı elektrom mikroskobu ile elde edilmiş mikroyapı ve SEM EDX analiz sonuçları Şekil 1 ile verilmiştir. İlgili deneyler Carl Zeiss

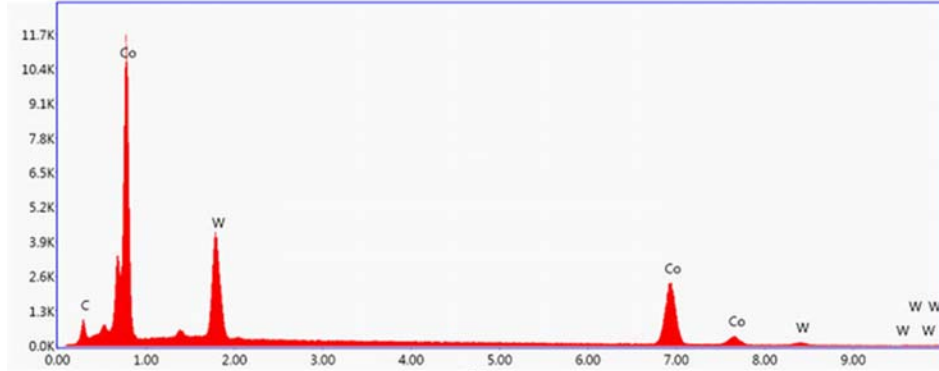
300VP SEM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde farklı şekil ve boyutlardaki açık gri tungsten karbür tanelerinin koyu gri kobalt matrisi içinde dağıldığı gözlenmiştir.

**Tablo 1.** Bu çalışmada kullanılan WC-Co malzemesine ait elemental, fiziksel ve mekanik özellikler  
(Elemental, physical and mechanical properties of WC-Co material used in this study)

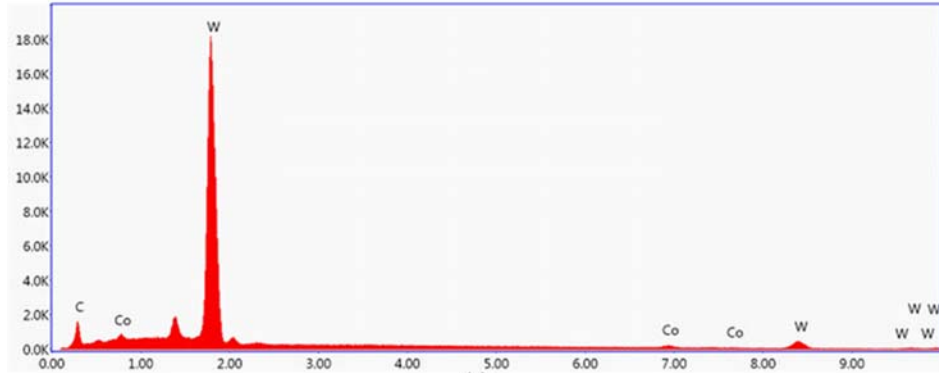
Malzeme	Co Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Tane Büyüklüğü	Elastisite Modülü (GPa)	Enine Kırılma Dayanımı (MPa)	Kırılma Tokluğu (MPa*m <sup>1/2</sup> )
WC-Co Sertmetal	25	13.15	Ekstra kaba (>6 µm)	450	2700	27



(a)



(b)



(c)

**Şekil 1.** WC-Co malzemesine ait taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiş (a) mikroyapı görseli. Mikroyapı görselinde belirtilen (b) Alan 1 ve (c) Alan 2'den elde edilen EDX sonuçları. ((a) Microstructure of WC-Co material obtained by scanning electron microscopy. EDX results of (b) Area 1 and (c) Area 2 shown in the microstructure image.)

İncelenen WC-Co numunelerde beklendiği gibi boyutları 6  $\mu\text{m}$ 'den büyük taneler olmasına rağmen daha küçük ve farklı morfolojide taneciklere de rastlanmıştır. Kesit alımı sırasında taneciklerin taşlandığı göz önünde bulundurulduğunda taneciklerin bir kısmı bu nedenle küçük elde edilmiştir. Tungsten - karbon faz diyagramına göre tungsten karbür içeren malzemelerde karbon oranının çok dar bir bantta olması gerekmektedir. Karbon miktarının stokiometrik oranın altında olması durumunda mikroyapı içerisinde dağımik şekilde  $\eta$ -fazı; stokiometrik oranın üstünde olması durumunda ise grafit oluşabilmektedir. Belirtilen iki durumda da malzeme tokluk değerlerinde düşüş olacaktır. Çalışma kapsamında incelenen numunelerde mikroyapı içerisinde  $\eta$ -fazına veya grafitte rastlanmamıştır. Yapılan EDX analizlerinde, karbon, tungsten ve kobalt elementlerine ait pikler elde edilmiş olup farklı iki bölgeden yapılan ölçüm sonuçları Şekil 1 ile verilmiştir. Alan 1 kobalt fazından, Alan 2 ise tungsten karbür parçacıktan yapılan ölçümler olduğu için Alan 1' de elde edilen kobalt faz oranı %66,38, Alan 2 ölçümünde ise tungsten oranı %92,00 olarak elde edilmiştir. Alan 1 içerisinde elde edilen tungsten ve karbon pikleri X-ışınlarının kobalt içerisinde penetre ederek incelenen alanın altından ve çevredeki parçacıklardan gelmektedir. Tungsten ağır metal sınıfında bir element olduğundan X-ışınlarının penetresi çok daha sınırlıdır. Bu nedenle pikler yaklaşık %98 oranında tungsten ve karbondan elde edilmiştir.

Yorulma testlerinde kullanılacak yükleme koşulları ve numune geometrisi için uygun standartlar taranmıştır. Öncelikle, bu çalışmada kullanılan malzemelerin çok sert olmasından dolayı konvansiyonel yorulma testleri yerine yorulma eğmesinin tercih edildiği literatür araştırması sonucu ortaya konmuştur [24-26]. Uygulanacak yorulma testleri kapsamında ISO 3327:2009 numaralı "Sinterlenmiş karbür malzemelerin enine kırılma dayanımı" (İng. Hardmetals - Determination of transverse rupture strength [27]) standardına göre "B Tipi" numune geometrisi olarak belirlenmiş ve numune ölçüleri 20 mm, 6,5 mm ve 5,25 mm olacak şekilde üretilmiştir. İlgili numuneler sinterleme sonrasında taşlanarak yorulma testlerine hazır hale getirilmiştir.

### 3. Deneysel Metot (Experimental Method)

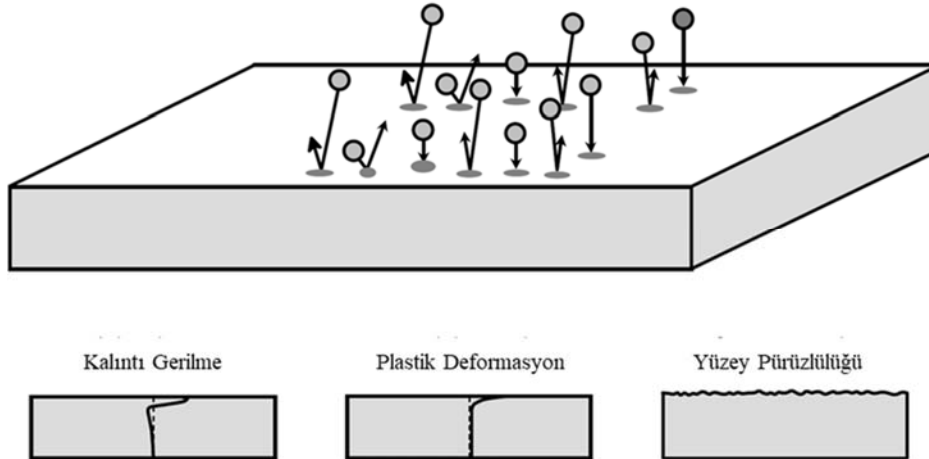
Sinterlenerek üretilen numuneler taşlama işleme sonrasında bilyalı dövme işlemine maruz bırakılmıştır. Bilyalı dövme işleminin malzeme yüzeyinde yarattığı etkiyi ve çalışma mekanizmasını gösteren şematik görsel Şekil 2 ile verilmiştir. Yüksek basınçlı hava ile bombardıman edilen bilyalar malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olmakta ve sertlik artışı elde edilmektedir. Bu sayede malzemenin yüzeye yakın bölgelerde kırılmaya neden

olabilecek çatlakların oluşması geciktirilmekte ve malzemenin yorulma direncinde artış elde edilmektedir. Bu çalışmada bilyalı dövme işlemi otomatik bir sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme işlemi numunelerin sadece bir yüzeyine uygulanmıştır.

Yorulma deneylerinde sinterlenerek üretilen ve sonrasında bilyalı dövme işlemine maruz bırakılan numunelerin karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo Surftest SJ-400 kullanılarak  $R_a$  ve  $R_z$  olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri üç kere tekrarlanarak bilyalı dövme öncesi ve sonrası yüzey dağılımının homojenliği de incelenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü testlerinin ardından makro ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Makro sertlik ölçümleri BMS Digirock, mikro sertlik ölçümleri ise KB 30S cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Makro sertlik testleri, herhangi bir yüzey hazırlığı olmadan yapılmıştır. Bu sayede, bilyalı dövme işleminden etkilenen yüzeye yakın bölgenin yüzey hazırlığı neticesinde bozulması engellenmiştir. İlave olarak, detaylı sertlik incelemesinin yapılabilmesi için mikro sertlik yöntemi ile yüzeyden ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, numuneler kesilerek parlatılmış ve mikro sertlik cinsinden derinlik profilleri çıkarılmıştır.

Bilyalı dövme işlemi sonrasında kobalt fazında herhangi bir kristal yapı değişikliği olup olmadığını ortaya çıkarmak için X-ray ışınları kırınım yöntemi kullanılmıştır. Panalytical Empyrean XRD cihazı ile yapılan deneylerde anot olarak Cu  $K\alpha$  tercih edilmiştir. Tarama işlemi, kırınım açısı ( $2\theta$ )  $40^\circ$  ile  $70^\circ$  derece arasında olacak şekilde ve  $0.013^\circ$ 'lik adımlarda yapılmış ve sayım değerleri kayıt altına alınmıştır. Deneylerde hem kobalt hem de tungsten karbür fazından kırınımlar elde edilmiştir. Test sonrası elde edilen ham veriler Pseudo-Voigt fit fonksiyonu kullanılarak işlenmiş ve elde edilen dorukların kırınım açıları elde edilmiştir. Yorulma testleri yüksek frekanslı Zwick Roel 250 kN yorulma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune geometrisine uygun testlerin yapılabilmesi için özel çene ve aparatlar tasarlanarak üretilmiştir. Yorulma testlerinde ön statik yük – 7,6 kN, dinamik yük ise 4,6 kN olarak uygulanmıştır. Bilyalı dövme işleminin etkisini ortaya koymak için işlenmiş yüzeyler yükün uygulandığı yüzeyin karşısında kalacak şekilde numuneler yerleştirilmiştir. Bu sayede test esnasında bilyalı dövme ile işlenmiş yüzeyde çeki gerilmelerinin oluşması sağlanmış ve bilyalı dövme prosesinin etkisi incelenmiştir. Yorulma testleri, taşlanmış ve taşlama sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler kullanılarak iki set halinde gerçekleştirilmiştir. Her set için 6 adet yorulma testi yapılmıştır.

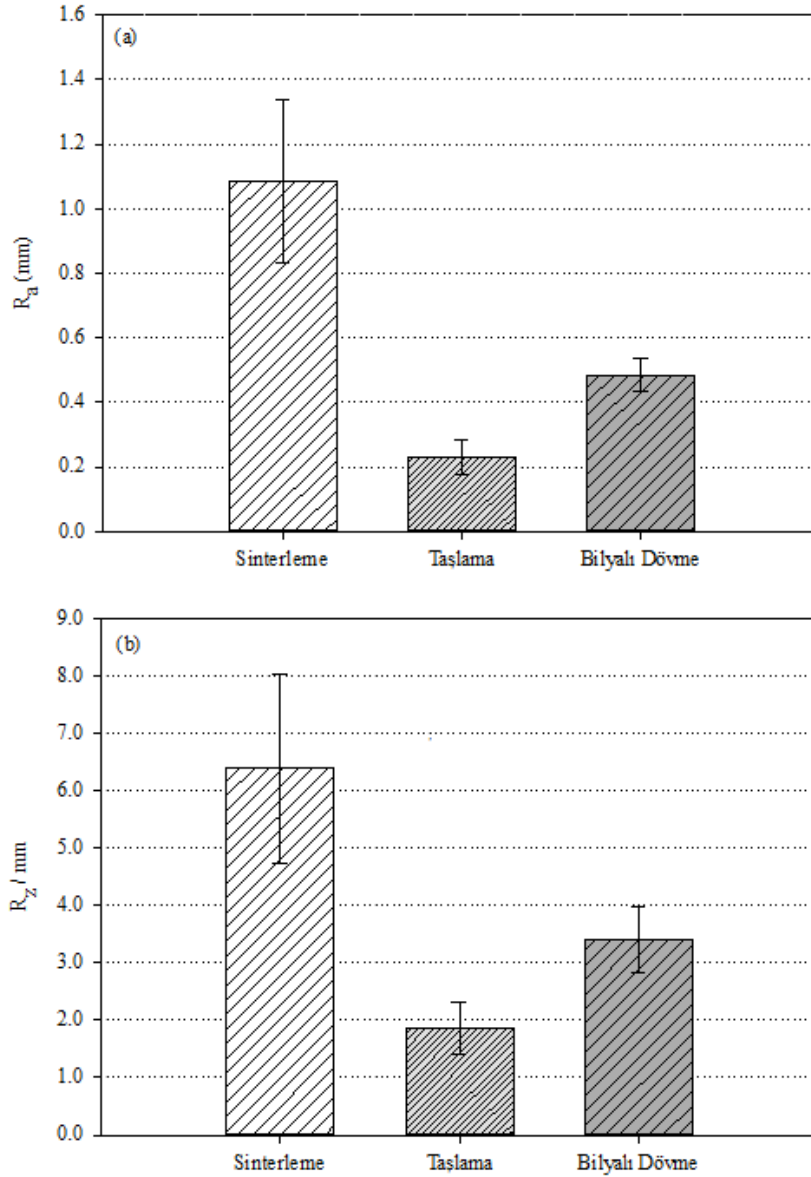


Şekil 2. Bilyalı dövme işleminin şematik görüntüsü [17] (Schematic representation of shot peening process [17]).

#### 4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Sinterleme, taşlama ve bilyalı dövme işlemleri sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları Şekil 3 ile verilmiştir. Sinterleme sonucu elde edilen yüksek yüzey pürüzlülük değerleri taşlama işlemi sayesinde  $R_a$  ve  $R_z$  için sırasıyla %79 ve %71 oranında azaltılarak bilyalı dövme işlemine hazır hale getirilmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile yüksek basınçlı hava kullanılarak malzemeye yönlendirilen bilyaların yüzeye çarparak çukurlar oluşturduğu ve bu çukurların malzeme yüzey pürüzlülük değerlerinde artışa neden olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerde,  $R_a$  ve  $R_z$  değerlerinde taşlama sonrası elde edilen yüzey ile karşılaştırıldığında sırasıyla %112 ve %83 artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Yorulma açısından bakıldığında yüzey pürüzlülük değerlerinin artması nedeniyle çatlak başlama bölgelerinde artış olabileceği ve malzemenin yorulma direncinde düşüşün yaşanabileceği literatürde sıkça tartışılmıştır [13]. Ancak, bilyalı dövme sonrası elde edilen

sertlik artışı sayesinde, yüzey pürüzlülük değerlerindeki artışa rağmen yorulma değerlerinde iyileşme elde edilebilmektedir. Bu çalışmada işlenen malzemenin sertlik değerlerinin yüksek olması nedeniyle alüminyum veya çelik malzemelere nispeten yüzey pürüzlülük değerinde daha az artış meydana gelmiştir. Bilyalı dövme sonrası alüminyum Al6061-T651 malzeme yüzey pürüzlülük değerinde %780'e kadar artış elde edildiği çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda %112'lik artışın daha sınırlı olduğu ortaya konmuştur [19]. Yüzey pürüzlülük değerleri ile beraber ölçüm sonuçları sonrası elde edilen standart sapma değerleri de incelenmiştir. Taşlama sonrası standart sapma değerlerinde düşüş elde edilmiştir. Ayrıca, bilyalı dövme öncesi ve sonrasında elde edilen standart sapma değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. Bu durum, bilyalı dövme işleminin homojen bir şekilde yapıldığını gösterir niteliktedir. Bilyalı dövme işlemi sonrası taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen yüzey morfolojisine ait görüntü Şekil 4 ile verilmiştir. Yüzeyde bilya bombardmanı sonrası oluşmuş çukurlar



Şekil 3. Sinterleme, taşlama ve bilyalı dövme işlemleri sonrası (a)  $R_a$  ve (b)  $R_z$  yüzey pürüzlülük değerleri ((a)  $R_a$  and (b)  $R_z$  surface roughness values after sintering, grinding and shot peening processes)

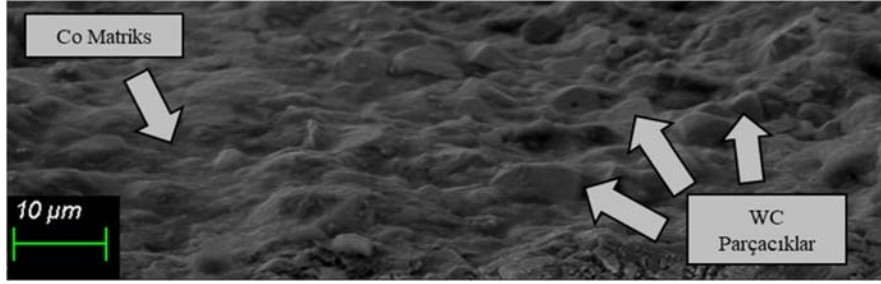
net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, yüzeye yakın yerlerde farklı büyüklükte tungsten karbür parçacıklarına rastlanmaktadır.

Bilyalı dövme işlemi öncesi ve sonrası HRC cinsinde elde edilen makro sertlik değerleri Şekil 5 ile verilmiştir. Sinterleme ve taşlama sonrası yapılan makro sertlik ölçümlerinde yaklaşık %2'lik bir fark ortaya çıkmış olup standart sapma değerleri göz önüne bulundurulduğunda taşlama sonrası ciddi bir sertlik değişimi olmadığı sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme sonrası numune yüzeyinden ölçülen makro sertlik artışı yaklaşık %5 olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir yüzey işleme ihtiyaç olmadan ölçümlerin yapılabilmesine olanak sağladığı için öncelikle makro sertlik yöntemi tercih edilmiştir. Ancak, makro sertlik ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması için mikro sertlik yöntemi ile ilave ölçümler yapılmıştır. HV10 cinsinden yapılan yüzey mikro sertlik ölçümlerinde sertlik değeri 841 HV olarak elde edilmiştir. Daha sonra, bilyalı dövme işleminden etkilenmiş bölgeyi belirleyebilmek için numunelerden bir tanesi kesilerek parlatılmış ve derinlik profili çıkarılmıştır. HV2 cinsinden elde edilen sertlik profili Şekil 6 ile verilmiştir. Derinlik profili göz önünde bulundurulduğunda sertlik değerlerinde kademeli bir azalma elde edilmiş ve yaklaşık 742 HV civarında sabitlemiştir. Derinlik profili ile elde edilen dataların yüzeye ekstrapolasyon yapılması sonucu yüzeyde elde edilen sertlik değeri, yüzeyden HV10 mikro sertlik test sonucunda elde edilen ölçüm sonucu ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bilyalı dövme sonrası

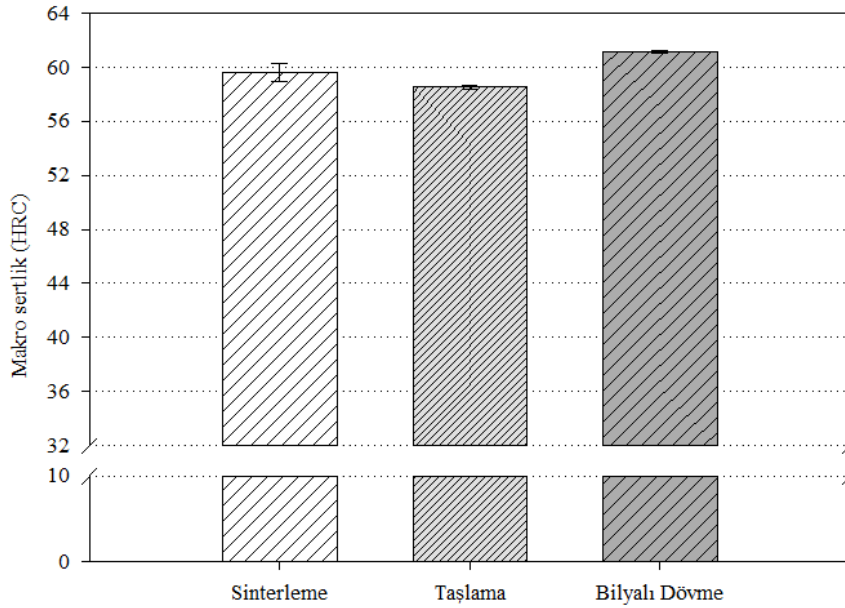
malzeme yüzeyinde yaklaşık %13'lik bir mikro sertlik artışı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yüzeyde yaklaşık 841 HV olarak elde edilen mikro sertlik değeri yüzeyden yaklaşık 300 µm derinlikte 742 HV değerine ulaşmıştır.

Bilyalı dövme sonucu elde edilen sertlik artışı nedenlerinin ortaya çıkarılması için kobalt fazı detaylı incelenmiştir. Kobalt fazında oluşabilecek sertlik artışı iki ana mekanizma sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki bilyalı dövme prosesi sonucu elde edilen plastik deformasyon ve gerinim sertleşmesi sonucu kobalt matrikte sertlik artışı elde edilmesidir. Bir diğeri de farklı allotropları olan kobalt fazının yüzey merkezli kübik kristal yapısından mekanik deformasyon sonucu hegzagonal sıkı paket yapısına dönüşmesidir [24]. Kristal yapıda elde edilen bu değişim sonucu etkin sekme dizgesinde azalma elde edilerek dislokasyon hareketinde sınırlama ve plastik deformasyon olma limitinde yükselme sonucu sertlik artışı elde edilmektedir. Bilyalı dövme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük artışı malzeme yüzeyine yakın bölgede plastik deformasyon olduğunu ispatlamaktadır. Bu durum, gerinim sertleşmesinin bilyalı dövme sonrası sertlik artışına neden olduğunu göstermektedir.

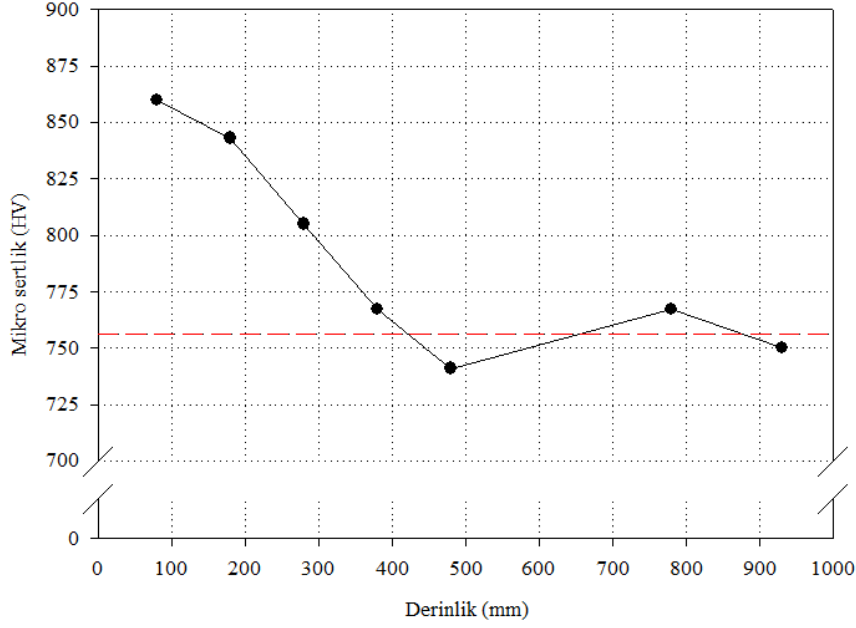
Bilyalı dövme işlemi sonrası kobalt fazında olası kristal yapı değişikliğini ortaya çıkarmak için yapılan ve X-Işınları kırınım yöntemi kullanılarak elde edilen sayım-kırınım açısı sonuçları Şekil 7 ile verilmiştir. WC-Co sertmetaller, toz numunelerden sinterlenerek



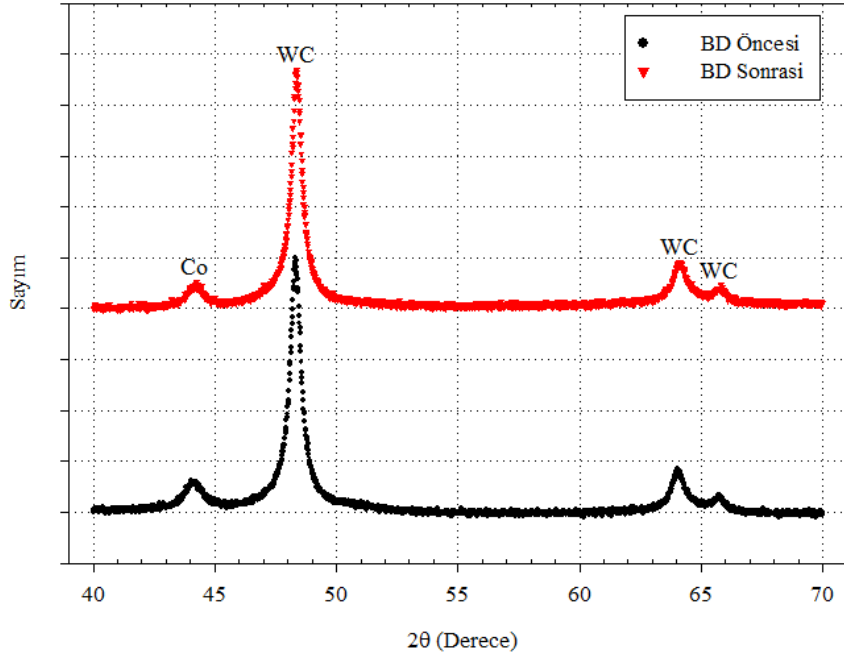
Şekil 4. Bilyalı dövme işlemi sonrası taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen yüzey morfolojisi (Surface morphology after shot peening process obtained by scanning electron microscopy)



Şekil 5. Sinterleme, taşlama ve bilyalı dövme işlemleri sonrası makro sertlik (HRC) değerleri (Macro hardness (HRC) values after sintering, grinding and shot peening processes)



Şekil 6. Bilyalı dövme sonrası elde edilen mikro sertlik (HV) derinlik profili (Micro hardness (HV) depth profile obtained after shot peening)

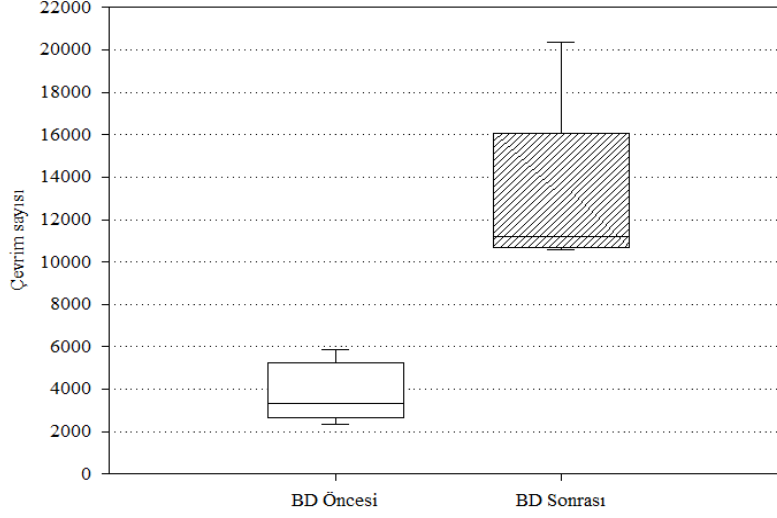


Şekil 7. WC-Co numunelere ait Bilyalı Dövme (BD) öncesi ve sonrası X-Işınları kırınım grafiği (X-ray diffraction pattern of WC-Co samples before and after shot peening)

üretilmektedir. Proses öncesinde kobalt fazında yüzey merkezli kristal ve hegzagonal sıkı paket yapıları beraber gözlenirken karıştırma ve sinterleme sonrası çoğunlukla yüzey merkezli kristal yapının elde edildiği bilinmektedir [6]. Bu nedenle, kobalt fazında olası kristal yapı değişikliğini ortaya çıkarmak için hegzagonal sıkı paket yapısına ait dorukların varlığı ve/veya doruklardaki değişiklikler incelenmiştir. Öncelikle, bilyalı dövme uygulanmamış numune için kırınım açısı  $40^\circ$  ile  $70^\circ$  arasında olacak şekilde test gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kobaltın yüzey merkezli kristal yapısında görülen (111) düzlem ailesine ait doruk elde edilmiştir. Beklendiği gibi

hegzagonal sıkı paket yapısına ait herhangi bir doruk gözlenmemiştir. Bilyalı dövme sonrası X-Işınları kırınım testi tüm parametreler aynı olacak şekilde tekrarlanmıştır. Testler sonucunda, bilyalı dövme öncesi gözlenen benzer bir doruk yapısı elde edilmiş ancak bilyalı dövme işlemi sonrası doruklarda bir miktar kayma tespit edilmiştir [29]. Özellikle kırınım açısı yaklaşık  $42^\circ$  olduğunda hegzagonal sıkı paket yapısına sahip kobalttan güçlü bir doruk beklenmektedir [30]. Ancak, bilyalı dövme sonrası elde edilen sonuçlarda (100) düzlem ailesine sahip ilgili doruğun gözlenmemesi numunelerde kayda değer bir hegzagonal sıkı paket yapısı veya değişimi olmadığını ortaya





**Şekil 8.** Bilyalı dövme (BD) öncesi ve sonrası numunelerin yorulma test sonuçları (Fatigue life results of samples before and after shot peening (SP))

çıkarmıştır. Sonuç olarak bilyalı dövme işlemi sonrası elde edilen sertlik artışının gerinim sertleşmesi sonucu elde edildiği ortaya konmuştur.

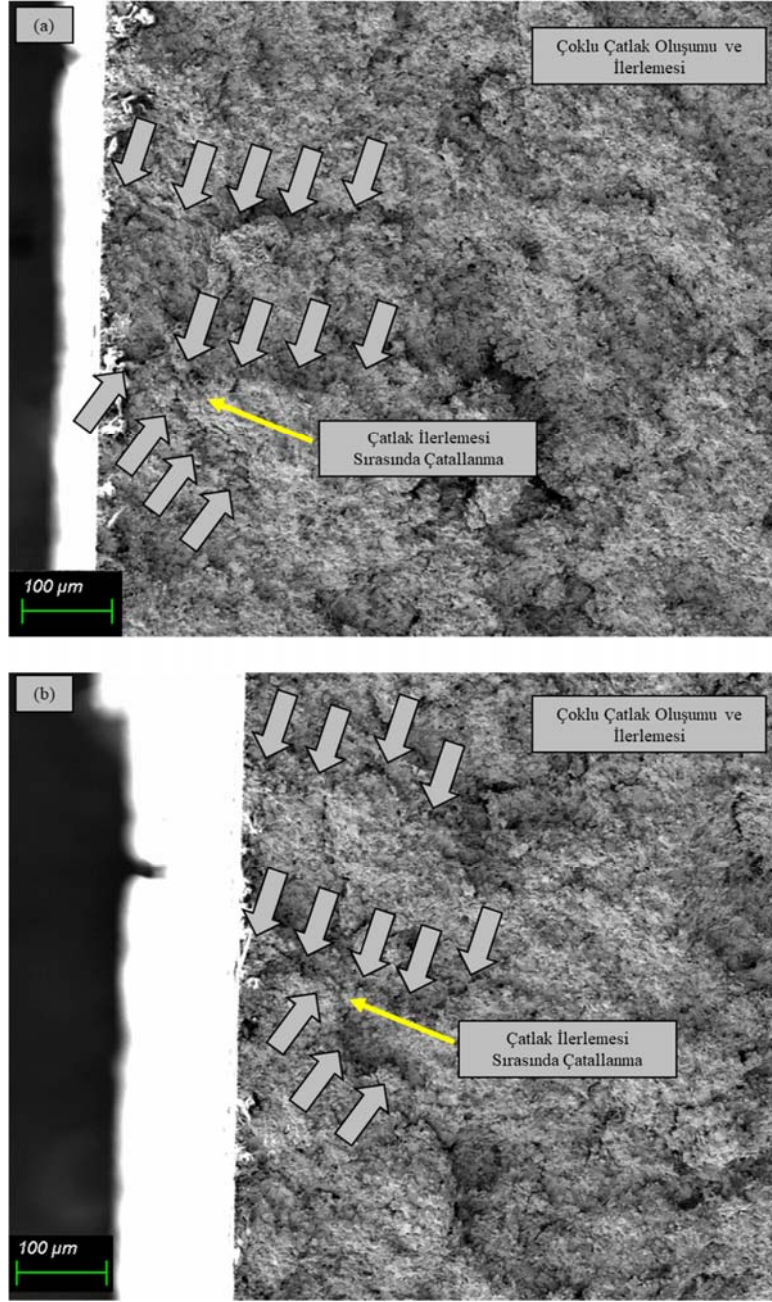
Malzeme karakterizasyon testlerinin ardından bilyalı dövme ile işlenmiş ve işlenmemiş numuneler kullanılarak yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylere göre elde edilen yorulma deney sonuçları Şekil 8 ile verilmiştir. Şekilde barlar içerisindeki çizgi medyan değerini, verilen barlar standart sapma ile belirlenmiş yorulma ömürlerini ve barların altında ve üstünde görülen çizgiler de testler sonucu elde edilen yorulma ömür aralığını göstermektedir. Öncelikle, yorulma testlerinde minimum-maksimum yorulma ömür aralığı yüksek elde edilmiştir. Bu durumun en önemli nedeni sertmetaller gibi çok sert malzemelerin yorulma testi ile çevrimli yük maruz kalması durumunda yüzeydeki boşluk ve inklüzyon gibi malzeme kusurlarının çatlak başlangıç alanları gibi davranarak erken ve ani kırılmalara yol açmasıdır. Bu nedenle sertmetaller gibi sertlik değeri yüksek malzemelerin yorulma testleri sonuçlarında yüksek değer aralığı beklenebilir. Deneyler sonucu elde edilen minimum-maksimum yorulma ömür aralığı bilyalı dövme işlemi sonrasında daha fazla elde edilmiştir. Bu durum, bilyalı dövme sonrası artan yüzey pürüzlülük değerleri ve olası çatlak başlama alanlarının artması ile açıklanabilir. Ortalama yorulma değerleri göz önüne alındığında incelenen sertmetal numunelerde bilyalı dövme işlemi sonrası %248'lik iyileşme elde edilmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğüne rağmen yorulma ömründeki artış sertlik miktarındaki iyileşmenin daha baskın olduğunu göstermektedir. Çatlakların yüzeyden başlayarak ilerlediği göz önünde bulundurulduğunda bilyalı dövme sonucu özellikle yüzeye yakın bölgede elde edilen sertlik artışının yorulma ömrünü artırdığı ortaya konmuştur. Özellikle daha az sünek olan ve çatlak ilerleme evresinin daha kısa olduğu malzemelerde yorulma ömrünün artırılması için özellikle çatlak başlamasının geciktirilmesi gerekmektedir. Yüzeye yakın bölgede elde edilen bilyalı dövme kaynaklı sertlik artışı sayesinde çatlak başlangıç evresi uzatılarak malzemenin yorulma ömründe artış elde edilmiştir.

Yorulma testlerinin ardından taramalı elektron mikroskobu ile detaylı mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme yapılmamış ve yapılmış numunelerden yüzeye yakın yerden kesit olarak elde edilen kırılma yüzey görüntüsü Şekil 9 ile verilmiştir. Bilyalı dövme uygulanmış numelerde yapılan incelemelerde, yorulma çatlaklarının farklı noktalardan başladığı ve ilerlediği tespit edilmiştir. Çatlak ilerlemesi sırasında oluşan yüklem koşullarındaki değişim ve

malzeme mikroyapı değişkenliklerinden dolayı çatlak ilerlemesi sırasında çatallanmalar gözlenmiştir. Kırılma esnasında hem taneler arası hem de Tane içi çatlak ilerleme mekanizmalarının kırılmalara neden olduğu saptanmıştır. Bunun yanında, incelenen numunelerde sünek malzemelerde gözlenen belirgin yorulma yivcilerine rastlanmamıştır. Bilyalı dövme uygulanmamış numunelerde de benzer çatlak oluşumları ve ilerleme mekanizmaları gözlenmiştir (Şekil 9).

Kırılma yüzeyindeki tungsten karbürler incelendiğinde bazı parçacıkların kırıldığı tespit edilmiştir. Yapılan detaylı incelemelerde farklı mekanizmalar sonucunda parçacıkların kırıldığı anlaşılmıştır. Öncelikle, bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerden elde edilen yüzeye yakın bölgelerde bazı parçacıkların yorulma neticesinde kırıldığı belirlenmiştir (Şekil 10). Ayrıca, yapılan incelemelerde bazı parçacıkların bilyalı dövme işlemi sonucunda kırıldığı ortaya çıkarılmıştır. Bu kapsamda, bilyalı dövme işlemi uygulanan alanlarda incelemeler yapılmış ve yüzeydeki bazı parçacıkların tekrarlı bilya bombardımanı neticesinde kırıldığı tespit edilmiştir. Şekil 11 ile verilen yüzeydeki parçacık görüntüsünde de görüldüğü gibi bilyalı dövme sonrası farklı yönlerde çatlaklar oluşmuştur. Görüntü bilyalı dövme yapılmış yüzeyden elde edilmiştir. Bu durum, bilyalı dövme işlemi sırasında rastgele yüzeye çarpan bilyaların oluşturduğu yüklem koşulu neticesindedir. Kırılmaların yaşandığı kesitten yapılan incelemelerde yüzeye yakın bazı tungsten karbür parçacıkların da kırıldığı anlaşılmıştır. Yüksek basınçlı bilyaların oluşturduğu bombardımana maruz kalan yüzeydeki parçacıklar, kendilerine gelen yükleri çevrelerindeki parçacıklara kobalt matriks üzerinden veya direk temas yoluyla aktarmaktadır. Bu aktarım sırasında parçacık köşelerine denk gelen kısımlarda gerilme birikmesi sonucu kırılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum sonucu kırılan örnek parçacık görseli Şekil 12 ile verilmiştir. Görüntü kırılma yüzeyinden elde edilmiştir. Bu mekanizma sonucu kırılan parçacıklarda, kırılma morfolojisi, yüklem koşulları ve parçacık geometrisine bağlıdır. Dolayısıyla, farklı yönlerde benzer çatlak oluşumları malzeme içyapı incelemelerinde görülmüştür. Özellikle Şekil 12 ile verilen iki adet çatlak ve bu çatlakların başlama ve ilerleme yönleri bu durumu kanıtlar niteliktedir.

Çevrimli yük maruz kalan numunelerde Tane içi çatlak ilerlemesi sonucu tungsten-karbür parçacıkların kırıldığı ortaya çıkarılmıştır (Şekil 13). Bilyalı dövme yapılmış ve yapılmamış yüzeylere yakın bölgelerde bu tipe kırılan parçacıklar gözlenmiştir. Bu durum, ilgili kırılmaların bilyalı dövme işlemi sonucunda oluşmadığını ortaya

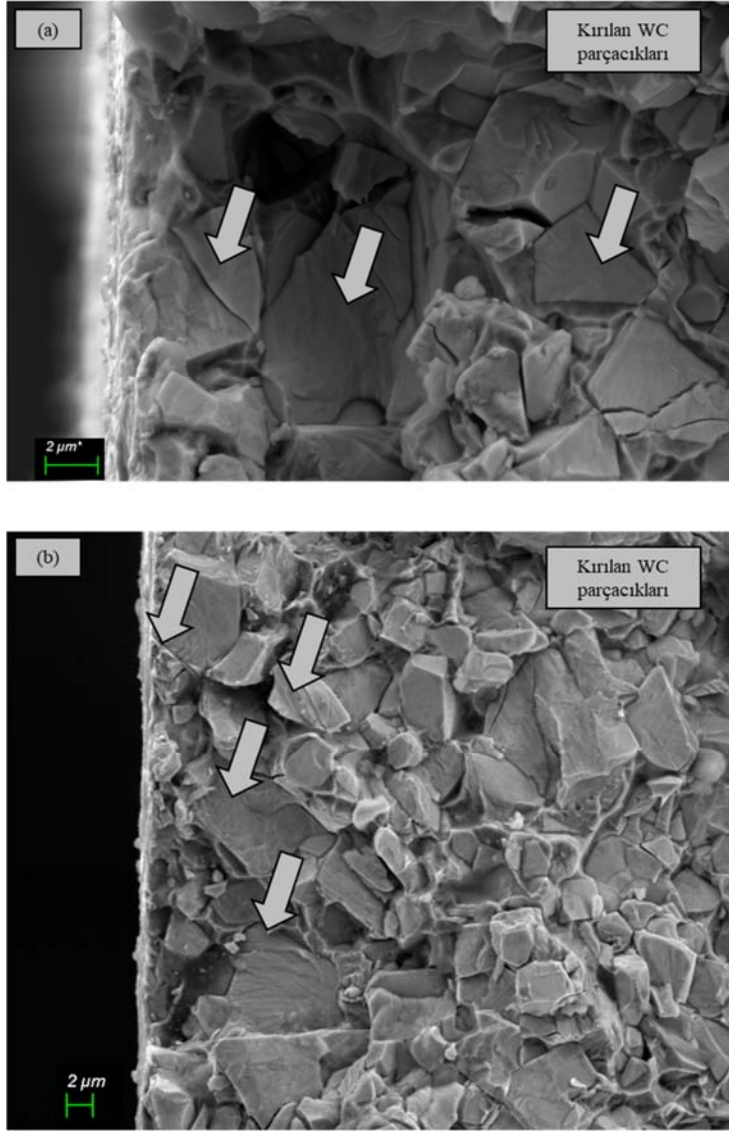


**Şekil 9.** (a) Bilyalı dövme işlemi öncesi ve (b) bilyalı dövme işlemi sonrası yorulma çatlaklarını gösteren kırılma yüzey görüntüleri (Fracture surface images (a) before shot peening and (b) after shot peening process showing fatigue cracks)

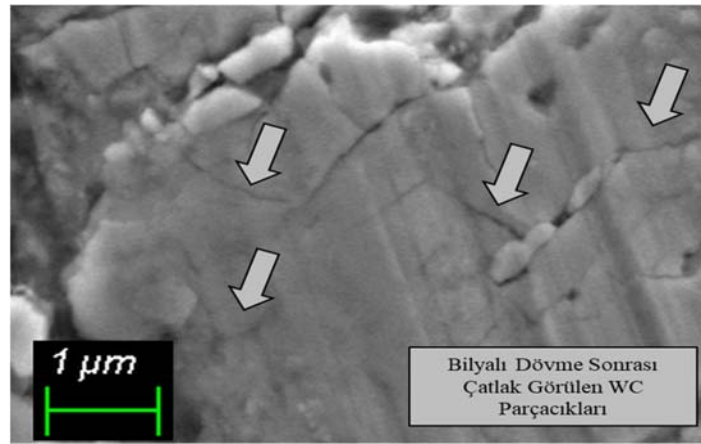
koymaktadır. Kırılan parçacıkların bazılarında yivciklere benzer oluşumlara rastlanmıştır. Bu tür yivcik benzeri yapılar incelendiğinde kırılma ve farklı yönlerde ilerleme tespit edilmiştir. Bu durum, parçacıkların rastgele konumlanması ve farklı morfolojiye sahip olmaları nedeniyle çatlak ilerlemesi ile oluşan kompleks ve dinamik yüklemeye koşulu ve buna bağlı oluşan gerilme dağılımı sonucudur. Yapılan detaylı karakterizasyon testleri göz önünde bulundurulduğunda literatürde belirtildiği gibi bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü ve yüzeye yakın bir bölgede sertlik artışı elde edildiği ortaya konmuştur. X-ışınları kullanılarak yapılan deneylerde kobalt fazında kayda değer kristal yapı değişikliğine rastlanmıştır. Sonuç olarak, yorulma testlerinde elde edilen ömür iyileşmelerini sağlayan ana mekanizmanın gerilim sertleşmesi sonucu görülen

sertlik artışı olduğu belirlenmiştir. Özellikle bilyalı dövme, lazerli dövme gibi mekanik yüzey işlemlerinde sertlik artışının olduğu literatürde belirtilmiştir [18, 19]. Yorulma testleri sonucu oluşan kırılma yüzeyleri üzerine detaylı incelemeler gerçekleştirilmiştir.

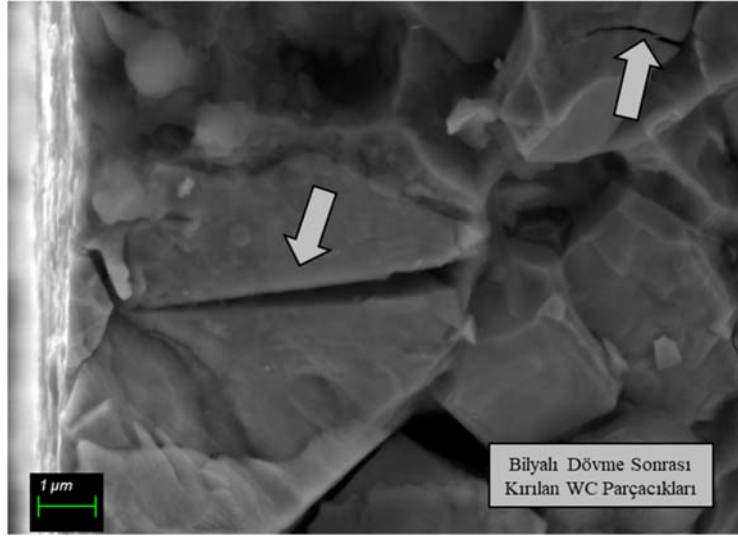
Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüler neticesinde, yorulma sonucu gözlenen kırılmalara neden olan çatlakların farklı konumlardan başladığı ve yüklemeye koşulu ile mikroyapı dağılımına göre çatallanarak ilerleyebildiği tespit edilmiştir. Çatlak ilerlemesi açısından yapılan analizlerde hem tanelerarası hem de tane içi çatlak ilerlemelerine rastlanmıştır. Ayrıca, tungsten karbür parçacıkların hem bilyalı dövme sonrası hem de yorulma sonucu kırıldığı ortaya konmuştur.



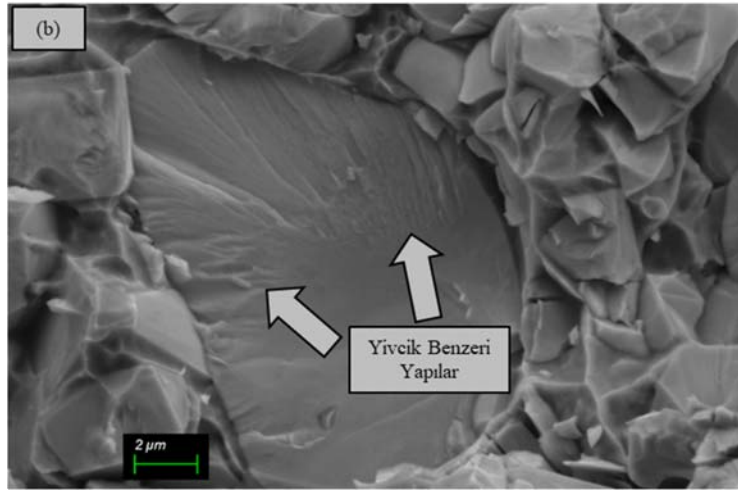
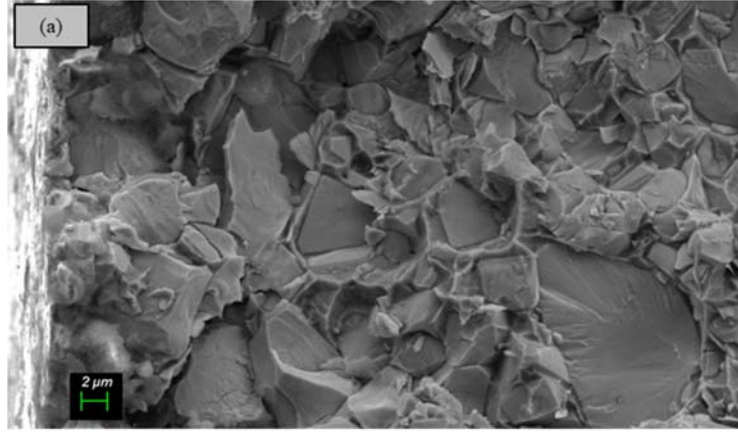
Şekil 10. (a) Bilyalı dövme işlemi öncesi ve (b) bilyalı dövme işlemi sonrası yüzeye yakın kesitten elde edilen kırılma yüzey görüntüsü (Near-surface fracture surface images (a) before shot peening and (b) after shot peening process)



Şekil 11. Bilyalı dövme uygulanan yüzeyde kırılan tungsten karbür parçacıkları (Fractured tungsten carbide particles after shot peening)



Şekil 12. Bilyalı dövme işlemi sonucu kırılan tungsten-karbür parçacıkları.  
(Fractured tungsten carbide particles after shot peening)



Şekil 13. (a) Tane içi çatlak ilerlemesi sonucu kırılan tungsten karbür parçacıkları ve (b) kırılan parçacık içerisindeki yivcik benzeri yapı  
(a) Fractured tungsten carbide particles due to intergranular crack propagation and (b) striation-like features at the fractured particle)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, kapsamında yapılan incelemeler sonucunda tungsten karbür – kobalt tozlarından üretilen sertmetal malzemelerde bilyalı dövme işlemi sonrasında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış elde edilmiştir. Ancak, ilgili artışın malzeme yorulma performansında iyileşme elde edilmesini engelleyecek boyutta olmadığı belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrasında elde edilen numunelerde sertlik artışı olduğu ortaya konmuştur. Sertlik artışının kobalt malzemede yaşanan gerinim sertleşmesi sonucu elde edildiği yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. Kobalt fazında sertlik artışına neden olacak belirgin bir kristal yapı değişikliği gözlenmemiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrası incelenen malzemelerin yorulma ömürlerinde sertlik artışı neticesinde iyileşme elde edilmiştir. Ortalama ömürler göz önüne alındığında %248'lik bir yorulma ömür artışı tespit edilmiştir. Bilyalı dövme sonrasında yorulma ömür dağılımında artış gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde tungsten karbür parçacıkların hem bilyalı dövme işlemi nedeniyle hem de kırılma esnasında farklı mekanizmalar sonucunda kırıldığı anlaşılmıştır. Kırılma yüzeyleri değerlendirildiğinde çoklu çatlak başlaması sonucunda tanelerarası ve tane içi çatlak ilerlemesi nedeniyle kırılmaların yaşandığı gözlenmiştir. İncelenen numunelerde sünek malzeme yorulma çatlak ilerlemesinde görülen yorulma yivcilerine rastlanmamış, kırılan tungsten parçacıklarda dinamik yüklenme koşulları sonucunda farklı yönlerde benzer oluşumlar gözlenmiştir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Norm Cıvata San. ve Tic. A.Ş. tarafından yürütülmüş olup Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 316082 numaralı TEYDEB1501 projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazar, desteklerinden dolayı Umut İnce, Cenk Kılıçaslan, Barış Tanrıkulu, Sezgin Yurtdaş, Prof. Dr. Mustafa Güden ve Buğra Karahan'a teşekkür eder.

## Kaynaklar (References)

- Jiang, K., Bezold, A., Broeckmann, C., Numerical modeling of the progressive damage in the microstructure of WC-Co hardmetals under fatigue loading, *Procedia Structural Integrity*, 23, 451-456, 2019.
- Yang, J., Odén, M., Johansson-Jöesaar, M.P., Llanes, L., Grinding Effects on Surface Integrity and Mechanical Strength of WC-Co Cemented Carbides, *Procedia CIRP*, 13, 257-263, 2014.
- Yılmaz O., Samet K., Kocak H., Karataş Ç., An investigation of manufacturing of assembled part by using chromium interace in powder injection molding process, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 621-634, 2019.
- Yang, J., Roa, J.J., Schwind, M., Odén, M., Johansson-Jöesaar, M.P., Llanes, L., Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WC-Co cemented carbides, *Materials Characterization*, 134, 302-310, 2017.
- Yang, Q., Deng, D., Li, J., Chen, L., Guo, S., Liu, J., Chen, H., Fabrication and mechanical properties of WC-10Co cemented carbides with plate-like WC grains, *Journal of Alloys and Compounds*, 803, 860-865, 2019.
- Tran, S., Microstructure investigations of WC-Co cemented carbide containing Eta-phase and Cr, Uppsala University, Master Thesis, 2018.
- Llanes, L., Torres, Y., Anglada, M., On the fatigue crack growth behavior of WC-Co cemented carbides, kinetics description, microstructural effects and fatigue sensitivity, *Acta Materialia*, 50 (9), 2381-2393, 2002.
- Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, 2001.
- Tarragó, J.M., Coureaux, D., Torres, Y., Jiménez-Piqué, E., Schneider, L., Fair, J., Llanes, L., Strength and reliability of WC-Co cemented carbides, Understanding microstructural effects on the basis of R-curve behavior and fractography, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 71, 221-226, 2018.
- Torres, Y., Anglada, M., Llanes, L., Fatigue mechanics of WC-Co cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 19 (4), 341-348, 2001.
- García, J., Collado Ciprés, V., Blomqvist, A., Kaplan, B., Cemented carbide microstructures: a review, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 40-68, 2019.
- Tarragó, J.M., Coureaux, D., Torres, Y., Casellas, D., Al-Dawery, I., Schneider, L., Llanes, L., Microstructural effects on the R-curve behavior of WC-Co cemented carbides, *Materials & Design*, 97, 492-501, 2016.
- Kanagarajan, D., Sivaraj, P., Seeman, M., Seetharaman, R., Evaluation of the reliability on WC-40%Co composites through Weibull analysis, *Materials Today: Proceedings*, 22, 519-524, 2020.
- Torres, Y., Tarrago, J.M., Coureaux, D., Tarrés, E., Roebuck, B., Chan, P., James, M., Liang, B., Tillman, M., Viswanadham, R.K., Mingard, K.P., Mestra, A., Llanes, L., Fracture and fatigue of rock bit cemented carbides: Mechanics and mechanisms of crack growth resistance under monotonic and cyclic loading, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 45, 179-188, 2014.
- Tanrıkulu, B., Karakuzu, R., Ince, U., Kılıncdemir, E., Grain Size Effect on Fatigue Life of WC-Co40 Mainly Used in Cold Forging Tools. Paper presented at the THERMAM 2016 - International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials, Izmir, Turkey, 1-3 September, 2016.
- Benson, M.L., Liaw, P.K., Choo, H., Brown, D.W., Daymond, M.R., Klarstrom, D.L., Strain-induced phase transformation in a cobalt-based superalloy during different loading modes, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (18), 6051-6058, 2011.
- Ruiz, A., Nagby, P.B., SAW dispersion measurements for ultrasonic characterization of surface-treated metals, *Instrumentation Measure Metrologie*, 3 (3), 59-85, 2003.
- Karahan, B., Ince, U., Bilya Püskürtmenin (Shot Peening) Teknik-Teknolojideki Yolculuğu ve Soğuk Dövme Prosesine Adaptasyonu, *Derin, Ekim*, 74-90, 2015.
- Toparlı, M.B., Effect of Shot Peening on Ballistic Limit of Al6061-T651 Aluminium Alloy Plates. *Experimental Techniques*, 44 (1), 37-47, 2020.
- Al-Obaid, Y.F., Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis, *Mechanics of Materials* 19 (2), 251-260, 1995.
- Gerin, B., Pessard, E., Morel, F., Verdu, C., Influence of surface integrity on the fatigue behaviour of a hot-forged and shot-peened C70 steel component, *Materials Science and Engineering: A*, 686, 121-133, 2017.
- Dülek E., Orman Ş., Karataş Ç., Sarıtaş S., Effects of Shot Peening on Fatigue Strength of AISI 1020 Steel and Investigation of Created Residual Stresses by Layer Removal Technique, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 20 (3), 289-295, 2005.
- Chang, S.-H., Lee, S.-C., Tang, T.-P., Effect of Shot Peening Treatment on Forging Die Life, *Materials Transactions*, 49 (3), 619-623, 2008.
- Tarragó, J.M., Ferrari, C., Reig, B., Coureaux, D., Schneider, L., Llanes, L., Mechanics and mechanisms of fatigue in a WC-Ni hardmetal and a comparative study with respect to WC-Co hardmetals, *International Journal of Fatigue*, 70, 252-257, 2015.
- Tarragó, J.M., Roa, J.J., Valle, V., Marshall, J.M., Llanes, L., Fracture and fatigue behavior of WC-Co and WC-CoNi cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 184-191, 2015.
- Klünsner, T., Morstein, M., Marsoner, S., Deller, M., Marklein, B., Fatigue life equality of polished and electrical discharge machined WC-Co hard metal achieved solely by wet blasting, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 59, 61-66, 2016.
- ISO 3327:2009, *Hardmetals - Determination of transverse rupture strength*, 2009.
- Withers, P.J., Buschow, K.H.J., Robert, W.C., Merton, C.F., Bernard, I., Edward, J.K., Subhash, M., Patrick, V., *Residual Stresses Measurement by Diffraction*, *Encyclopedia of Materials Science and Technology*, 8158-8169, Elsevier, 2001.
- Meng, Q., Guo, S., Zhao, X., Veintemillas-Verdaguer, S., Bulk metastable cobalt in fcc crystal structure, *Journal of Alloys and Compounds*, 580, 187-190, 2013.

