



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Suni yüzey kusuru içeren 50CrV4 çeliğinin yorulma dayanımına bilyalı dövme prosesinin etkileri

Effects of shot peening process on fatigue strength of 50CrV4 steel containing an artificial surface defect

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih BARIŞ¹, Nurşen SAKLAKOĞLU², Simge İRİZALP³

ORCID¹: 0000-0001-6273-1042

ORCID²: 0000-0002-6651-7542

ORCID³: 0000-0002-0339-5699

To cite to this article: Barış F., Saklakoğlu S. ve İrizalp S., “Suni Yüzey Kusuru İçeren 50CrV4 çeliğinin yorulma dayanımına bilyalı dövme prosesinin etkileri”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Barış F., Saklakoğlu S. ve İrizalp S., “Suni Yüzey Kusuru İçeren 50CrV4 çeliğinin yorulma dayanımına bilyalı dövme prosesinin etkileri”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1099953

Suni Yüzey Kusuru İçeren 50CrV4 Çeliğinin Yorulma Dayanımı Bilyalı Dövme Prosesinin Etkileri

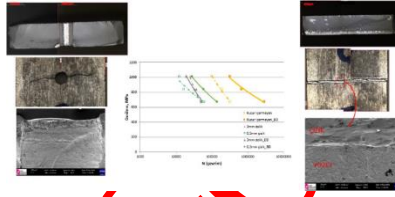
Effects of Shot Peening Process on Fatigue Strength of 50CrV4 Steel Containing an Artificial Surface Defect

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Suni kusur ve bilyalı dövme etkisinde çeliğin yorulma performansı araştırıldı. /The fatigue performance of steel under the effect of the artificial defect and shot peening was investigated.
- ❖ Talaşlı işleme ile delik ve çizik şeklinde kusurlar elde edilmiştir./Defects in the form of holes and scratches were obtained by machining.
- ❖ Yorulma davranışı, yorulma mukavemeti ve yorulma ömrü cinsinden değerlendirilmiştir./Fatigue behavior was evaluated in terms of fatigue strength and fatigue life.
- ❖ Sonuçlar, yorulma ömrünü iyileştirmek için bilyalı dövmenin rolünü kanıtlamaktadır./The results prove the role of shot peening to improve fatigue life.
- ❖ Zararlı bir yüzey kusurunun etkisi, bilyalı dövme ile azaltulabilir. /The effect of a detrimental surface defect can be reduced by shot peening

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bilyalı dövme prosesi yüzey özelliklerini ve yorulma dayanımını iyileştiren mekanik bir yüzey işlemidir. (The shot peening process is a mechanical surface treatment to enhance surface properties and fatigue strength.)



Şekil. BD sonrası suni kusur içeren malzemelerde yorulma davranışı /Figure. Fatigue behavior in materials with artificial defects after SP

Amaç (Aim)

Bu makalenin amacı, bilyalı dövmenin yüzey kusuru içeren 50CrV4 çeliğinde yüzey tabakası özellikleri ve yorulma performansı üzerindeki etkisini araştırmaktır. / The purpose of this article is to investigate the effect of shot peening on the surface layer properties and fatigue performance of 50CrV4 steel with surface defects.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Hem yüzey kusuru içeren hem içermeyen çeliklerin yorulma performansı, 3 noktadan eğme numunelerinde $R=0$ ve 45 Hz frekansta test edildi ve sonuçlar bilyalı dövme uygulanmış ve uygulanmamış koşulları ile karşılaştırıldı. / The fatigue performance of steels, both with and without surface defects, was tested on 3-point bending specimens at a frequency of $R=0$ and 45 Hz, and the results of shot peened and unpeened samples were compared.

Özgünlük (Originality)

Yazarların bilgisine göre, bu makale, yüksek mukavemetli 50CrV4 çeliğinde iki tür suni yüzey kusurunun (çizikler ve delikler) yorulma performansına olan etkilerini bilyalı dövme sonrası karşılaştıran ilk makedir. / To the authors' knowledge, this is the first article to compare the effects of high-strength 50CrV4 steel with two types of artificial surface defects (scratches and holes) on fatigue performance after shot peening.

Bulgular (Findings)

Bilyalı dövme çizik içeren numunenin yorulma mukavemetini %126 artırırken, delik içeren numune üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi olmamıştır. / While shot peening increased the fatigue strength of the scratched sample by 126%, it had almost no effect on the hole-containing sample.

Sonuç (Conclusion)

Bu sonuçlara dayanarak, bilyalı dövme yöntemi ile 3 mm delik ve 2 mm çizik kusurlarının tamamen zararsız hale getirilemeyeceği sonucuna varılabilir. / Based on these results, it can be concluded that the 3 mm hole and 2 mm scratch defects cannot be completely rendered harmless by the ball forging method.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Suni Yüzey Kusuru İçeren 50CrV4 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Bilyalı Dövme Prosesinin Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Fatih BARIŞ, Nurşen SAKLAÇOĞLU, Simge İRİZALP*

Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 07.04.2022 ; Kabul/Accepted : 17.07.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 16.05.2023)

ÖZ

Yüzey kusurlarının mühendislik malzemeleri üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu iyi bilinmektedir. Bilyalı dövme prosesi yüzey özelliklerini ve yorulma dayanımını iyileştiren mekanik bir yüzey işlemidir. Bu çalışmada 50CrV4 yay çeliğinin yorulma mukavemetine yüzey kusurlarının ve bilyalı dövme prosesinin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Numune boyunca yarım daire şeklinde 0,2 mm derinliğinde çizik ve 3 mm çapında delik içeren numuneler S230 çelik bilyalar ile dövülmüştür. Kusur içeren ve içermeyen numunelere 3-nokta eğme yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Kusurlar çatlak gibi davranmış ve delik veya yarım-daire çizik içeren numunelerin yorulma mukavemetini sırasıyla (672 MPa için) %85 ve %80 oranında azaltmıştır. Bilyalı dövme çizik içeren numunenin yorulma mukavemetini %126 arttırırken, delik içeren numune üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi olmamıştır. Bilyalı dövme çizik içeren numunenin yorulma mukavemetini arttırmasına rağmen, kusurlu numunenin yorulma mukavemetine ulaşamamıştır. Bu sonuçlara dayanarak, bilyalı dövme yöntemi ile 3 mm delik ve 0,2 mm çizik kusurlarının tamamen zararsız hale getirilemeyeceği sonucuna varılabilir.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı dövme, suni yüzey kusuru, yorulma.

Effects of Shot Peening Process on Fatigue Strength of 50CrV4 Steel Containing an Artificial Surface Defect

ABSTRACT

It is well known that surface defects have a very significant effect on the fatigue strength of engineering materials. The shot peening process is a mechanical surface treatment to enhance surface properties and fatigue strength. In this study, it is aimed to investigate the effects of surface defects on the fatigue strength of 50CrV4 spring steel and the effect of shot peening process effects. Samples including a semicircular slit sized 0,2 mm or a hole sized 3 mm throughout the sample were shot-peened by S230 steel balls. 3-point bending tests were performed on defected and non-defected samples. It was found that the defects acted as a pre-existent crack and samples with hole and semicircular slit significantly reduced the fatigue strength by 85% and 80% (for 672 MPa), respectively. While shot peening enhanced the fatigue strength of the semi-circular slitted sample by 126%, it had almost no effect on the holed sample. Although shot peening increased the fatigue strength of the semi-circular slotted sample, it could not reach that of the non-defected sample. According to the results, it can be concluded that 3 mm hole and 0,2 mm scratch defects cannot be made harmless by the Shot Peening method.

Keywords: Shot peening, artificial surface defect, fatigue.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

50CrV4 çeliği yüksek yüklerde yüksek aşınma direncine sahip olması gereken parçalar için elverişlidir. Bu çelik, en çok otomotiv debriyaj diyaframı için kullanılan, yüksek mukavemet, yüksek yorulma mukavemeti ve iyi sertleşme kabiliyetine sahip bir tür yay malzemesidir [1]. Döküm, dövme ve kaynak gibi imalat işlemleri, montaj ve servis sırasında yabancı madde hasarları nedeniyle küçük yüzey kusurları ve çizikler üretilebilir. Bu parçalar yüksek yüklerde çevrimsel gerilmelere maruz kaldığında, yorulma çatlakları bu yüzey kusurlarından başlayabilir ve yayılabilir [2-3]. Ayrıca, çevrimsel yükleme sırasında büyümeye meyilli olan mikro çatlaklar, boşluklar ve gözenekler, yorulma dirençlerini azaltır [4].

Kusurların, yerel gerilim konsantrasyonlarına neden olduğu bilinmektedir. Bir bileşenin yorulma mukavemeti ile ilgili olarak bu küçük kusurların önemi; malzeme tipi, kusur boyutu, kusurların yeri ve birbirine yakınlıkları gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Kusurlar birbirine yakınsa, birbirleriyle etkileşime girebilir ve bu nedenle yorulma sınırı üzerinde kesin bir etkisi olabilir. Küçük yüzey kusurlarının, metallerin yorulma davranışına olan etkileri pek çok araştırmada gösterilmiş ve genel olarak yorulma mukavemetinin kusurların boyutuna ve özelliklerine bağlı olduğu sonucu ortaya konulmuştur [5-7].

Örneğin, yaklaşık 50 µm boyutuna kadar olan kusurlar, hatasız bir malzemeye kıyasla yumuşak çeliklerin [8] yorulma mukavemetini düşürmezken, birkaç mikron

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : simge.gencalp@cbu.edu.tr

boyutundaki metalik inklüzyonlar zararlı olabilir [9]. Çizilmiş bir metal eğilme yorulma döngüsüne maruz kaldığında, performans esas olarak çizik kök yarıçapı tarafından belirlenir [10]. Ishii ve Takahashi [11] yay çeliği numunelerinde derinlikleri 30 ila 400 µm arasında değişen yarım daire biçimli kusurlar oluşturup daha sonra $R=-2$ ila 0,4 arasında değişen gerilme oranlarında yorulma testleri gerçekleştirmiştir. Yorulma testi sonuçları, çizik derinliğindeki artışla yorulma sınırının azaldığını göstermiştir. Ayrıca, yorulma sınırında azalmaya neden olan maksimum kusur boyutu, R değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu kusurların yorulma ömrü üzerindeki olumsuz etkilerini anlamak ve bunları önlemek mühendislik tasarımında çok önemlidir [12]. Yüksek dayanımlı çeliklerde yüzey ve yüzeyaltı kusurlarının o çeliğin yorulma sınırının azaltılmasında önemli rolü vardır. Bu çeliklerde, indüklenen kalıntı gerilme alanı düşük mukavemetli çeliklere göre komponentin ömrü boyunca daha karardır [13].

Bilyalı dövme (BD) prosesi malzemelerin yorulma dayanımının artırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [14-15]. Son zamanlarda yalnızca kusursuz malzemeler için değil aynı zamanda yüzeyde bulunan çizik, oyuk gibi kusurların ya da dekarbürizasyon tabakasının etkisizleştirilmesi için de BD prosesi önerilmektedir. BD prosesinde sert metal bilyalar yüksek hızlarda malzeme yüzeyine fırlatılarak yüzeyde deformasyon sertleşmesi oluşturur. Bunun yanında basma tipi kalıntı gerilmeler oluşturmaları, dislokasyon yoğunluğunu artırması, tane inceltme vb etkilerle yüzeyde sertlik artar ve yorulma dayanımı gelişir [16]. Yasuda ve Takahashi [17] yüksek mukavemetli çelik üzerinde çeşitli derinliklerde kusurlar oluşturup bilyalı dövme ile zararsız hale getirilebilecek çatlak boyutunu araştırmışlardır. BD numunelerinin yorulma limitleri, BD olmayan numunelere kıyasla %50~100 artmış ve derinliği 0,2 mm'ye kadar olan kusurlar zararsız hale getirilmiştir. Saklakoglu vd. [18] 50CrV4 yay çeliğinde 0,2-0,4-0,6 mm derinliğinde ve eğrilik yarıçapı 0,585 ve 0,895 mm olan suni kusurlar oluşturmuş ve BD uygulayarak bu kusurların etkisizleştirilmesi üzerine çalışmıştır. Söz konusu çalışmada BD'nin 0,895 mm eğrilik yarıçapında suni kusur içeren numuneler üzerindeki etkisi dikkat çekicidir. Kusursuz malzeme 320.600 çevrim sonunda ve BD yapılmış kusursuz malzeme 2.891.960 çevrim sonunda kırılırken, 0,2-0,4 ve 0,6 mm derinlikte suni kusur içeren numuneler sırasıyla 1.089.717, 1.076.757 ve 1.259.612 çevrim sonunda kırılmıştır. 0,585 mm eğrilik yarıçapında kusur içeren numunelerde BD sonrası yorulma ömründe %40 mertebesinde bir iyileşme meydana gelmiştir.

Literatürde BD'nin kusurları etkisizleştirilmesi ile ilgili

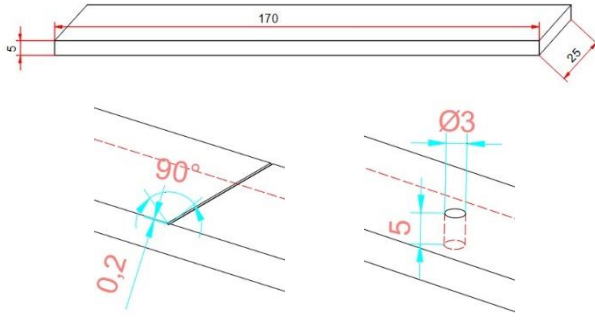
Çizelge 1. Bilyalı dövme proses parametreleri (Table 1. Shot peening process parameters)

Nozul ve numune arası mesafe	50 cm
Nozul açısı	40°
Bilya malzemesi	S230 çeliği
Bilya sertliği	40-51 HRC
Bilya çapı	0,6 mm
BD süresi	30 s
Türbin basıncı	4,8-5,8 bar

sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bunlar genellikle kısa çizikler veya çukurları kapsamaktadır. Bu çalışmanın amacı numune boyunca çizik veya delik bulunması durumunda BD'nin etkisinin araştırılmasıdır. Mikrosertlik trendi, yorulma mukavemeti ve ömrü açısından sonuçların kritik bir tartışması yapılarak, kusur boyutunun etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, BD'nin malzemenin yorulma davranışını iyileştirmek için oynadığı önemli rolün değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Bu çalışmada yüksek gerilmelerde iyi aşınma direnci ve yorulma dayanımına sahip olması gereken parçalar için uygun bir malzeme olan DIN 50CrV4 çeliği kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal kompozisyonu (ağırlık %): C(0,47-0,55), Si(maks. 0,4), Mn(0,7-1,1), P(maks. 0,035), S(maks. 0,03), Cr(0,9-1,2), V(0,1-0,2)'dir. 3-nokta eğme tipi yorulma test numunesi Şekil 1'de verilmiştir. DIN 50CrV4 çeliği 900 °C'de kamaralı elektrikli meneviş fırınında 10L/dk debide azot salınan azot atmosferinde östenitlenmiş, yağda soğutulmuş ve elektrikli çan tipi fırında yine aynı azot atmosferinde 400 °C'de 180 dk temperlenmiştir. Isıl işlemten sonra özel olarak üretilmiş uç kullanılan matkap ile $\phi 3$ mm delik ve ayrıca EDM ile numunenin kesiti boyunca 2 mm derinliğinde çizik açılmıştır. Bu makale boyunca numune üzerinde oluşturulan bu suni kusurlar "delik" ve "çizik" kısaltmaları ile anılacaktır. Hem kusur içermeyen ve hem de suni kusurlar açılmış numuneler BD işlemine tabi tutulmuştur. BD prosesi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Numunelerin BD işlemi öncesi ve sonrasında yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik ölçümleri Vickers mikrosertlik cihazında 50gf altında 10s süresince gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri 20 kN Sincotek 3-nokta eğme yorulma test makinesinde $R=0$ ve 45 Hz frekansta yapılmıştır. Gerilme genliği akma gerilmesinin %50-70 aralığında seçilmiştir. Kırık yüzeylerin morfolojileri SM (Nikon SMZ 745T) ve SEM (Zeiss 300VP) kullanılarak gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Testlerde kullanılan numune ölçüleri (a) kusursuz numune, (b) 0,2 mm derinliğinde 90° açıda çizilmiş numune, (c) 3 mm çaplı delik içeren numune (Figure 1. Sample dimensions used in tests (a) non-defected sample, (b) sample defected at 90° angle with a depth of 0,2 mm, (c) sample defected a hole with a diameter of 3 mm)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Isıl işlemden sonra numunelerin Vickers mikrosertliği, çekme ve %0.2 akma mukavemeti sırasıyla 210 HV,

göre daha büyük olduğu yani sertliğin daha düşük olduğunu açıkça göstermektedir ki bu durum yüzeydeki dekarbürizasyona işaret etmektedir.

BD öncesi ve BD sonrası numunelerin görüntüleri Şekil 3’ de sunulmuştur. BD işlemi sonrası gelişen çukurcuklu yapı ile daha mat bir yapı oluştuğu dikkati çekmektedir. Şekil 4’ de numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, BD işleminde metal bilyaların yüzeye etkisinin bir sonucu olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen çukurcuklardan dolayı yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Yüzey pürüzlülüğü yorulma dayanımına etki eden önemli parametrelerden biridir. Pürüzlü alanlar çatlak başlangıcı için lokal gerilim konsantrasyonlarını temsil eder [21]. Yorulma, artan yüzey pürüzlülüğü ile daha düşük gerilmeler değerlerinde başlar [22-23]. Bunun yanı sıra, BD işlemi sonucu artan yüzey sertliği, oluşan basma kalıntı gerilmeleri, alt-tanelerin meydana gelmesi, tanelerin küçülmesi, dislokasyon yoğunluğunda artış yorulma performansı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır [14-15]. Yüzey pürüzlülüğünün ya da yüzeyde meydana gelen sertleşmenin hangisi daha etkin hale geliyorsa,

Çizelge 2. Bilyalı dövme uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin yüzeyden çekirdeğe doğru mikrosertlik değişimi (Table 2. Microhardness variation along the subsurface of shot-peened and unpeened specimens)

Mesafe (mm)		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
Mikrosertlik (HV0.05)	BD uygulanmamış	340,4	360,7	419,5	420	410,1	405,7	412,1	415,4	408,6
	BD uygulanmış	365	391,1	422,6	415,3	418,7	419,8	410	412,7	415
Mesafe (mm)		0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,85	0,90	0,95
Mikrosertlik (HV0.05)	BD uygulanmamış	410	407,3	402,3	408	420	410	405	415,1	405,7
	BD uygulanmış	421,6	413,2	419,1	415,7	420,5	408,3	416,2	408,8	405,9

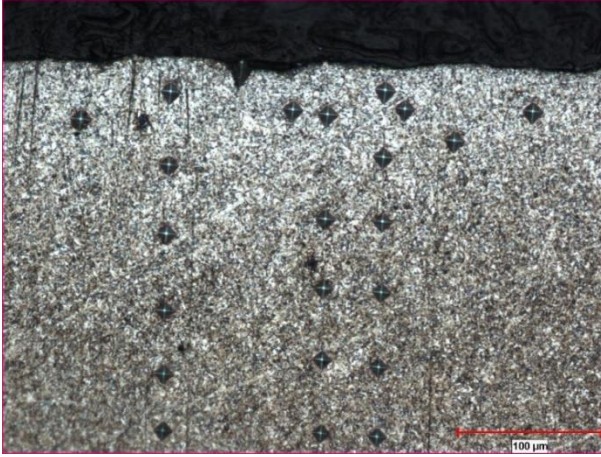
1342 MPa ve 1262 MPa olarak bulunmuştur. Isıl işlem uygulanmış, yüzeye BD uygulanmış ve hiçbir işlem yapılmamış (alındığı gibi) numunelere ait mikrosertlik sonuçları Tablo 2’ de verilmiştir. Buna göre, malzemenin alındığı koşullarda ortalama 206 HV sertliğe sahip olduğu görülürken ısıtıl işlem sonrası 340 HV sertlik elde edilmiştir. Ancak yüzeyde yaklaşık 150 µm’ den sonra sertlikte artış meydana gelerek yaklaşık 420 HV değerine ulaşmıştır. Bu durum, ısıtıl işlem sırasında, yüzeyde dekarbürizasyon meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. BD işlemi dekarbürizasyon etkisi ile yüzeyde meydana gelen sertlik kaybını bir ölçüde gidermiştir. Dekarbürizasyon meydana gelmesi, çizik, inklüzyon vb süreksizlikler gibi gerilim konsantrasyonuna neden olmasa da, yüzey sertliğini azaltmasından kaynaklı yorulma ömrünü zayıflatıcı bir etkidir [19-20].

BD ile artan yüzey sertliği parçanın yorulma ömrünü artırmakta ve çatlak başlamasını geciktirmektedir. Şekil 2’ de verilen mikroyapı görüntüsü literatürde de beklendiği üzere temperlenmiş martenzit yapıyı göstermektedir. Aynı şekilde, yüzeyden yaklaşık 150 µm’ ye kadar olan mesafede daha aydınlık görünen bölgenin sertlik izlerinin 150 µm’ den sonraki bölgeye

malzemenin yorulma dayanımı buna göre belirlenecektir. Uygun yapılmış bir BD prosesinde bilyalarla sağlanan tekrarlı darbeler aşırı plastik deformasyona neden olur ve bu sırada oluşan makro ve mikro kayma bantları tane ve alt tane incelmesinde önemli rol oynar. BD prosesi özellikle alt tanelerde kristalografik rotasyona neden olarak yeniden kristalleşmeyi tetiklediğinden tane incelmeleri meydana gelmektedir [24]. Yorulma dayanımının malzemenin akma dayanımı ile doğrudan bir ilişkisi olduğu aşıkardır. Buna göre, tane boyutunun ve dislokasyon yoğunluğunun malzemenin mukavemetine olan etkileri Hall-Petch (eşitlik (1)) [25] ve Taylor (eşitlik (2)) [26] eşitlikleri ile ortaya konulabilir:

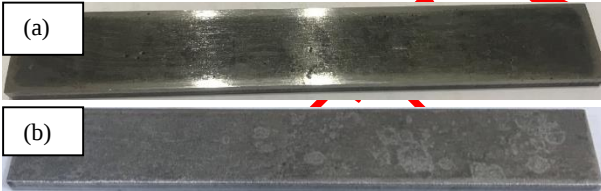
$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (2)$$

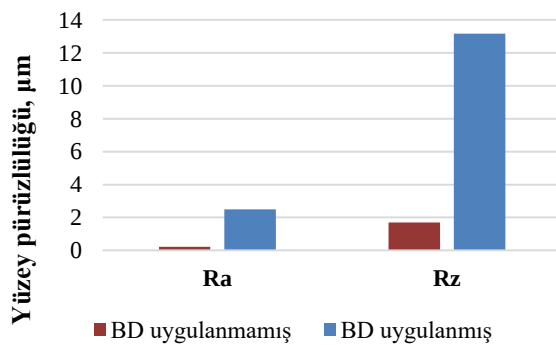


Şekil 2. Bilyalı dövme uygulanmış numunede sertlik izi görüntüleri-HV50 (Figure 2. Traces of microhardness on shot peened sample-HV50)

Eşitliklerde σ malzemenin akma dayanımını, σ_o dislokasyon hareketine gösterilen direnci; yani dislokasyonları harekete geçirmek için uygulanması gereken gerilim miktarını, k malzemeye özgü mukavemet sabitini, D ise malzemenin ortalama tane boyutunu ifade ediyor. Bu eşitlikte ρ dislokasyon yoğunluğunu ve α ise malzeme özelliğini vermektedir. Öte yandan, BD prosesinin malzeme yüzeyinde basma tipi kalıntı gerilmeler oluşturduğu bilinmektedir. Çatlak başlangıcı açısından bakıldığında, BD prosesi çatlak bölgesinde çekme tipi gerilmeleri düşürerek çatlak başlangıcını geciktirmektedir. Çatlak ilerleme sürecinde ise basma tipi kalıntı gerilmelerin varlığı gerilim şiddet faktörünü düşürerek çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktadır [27].



Şekil 3. BD işlemi öncesi (a) ve BD işlemi sonrası (b) numune görüntüleri (Figure 3. Sample images before (a) and after (b) SP treatment)

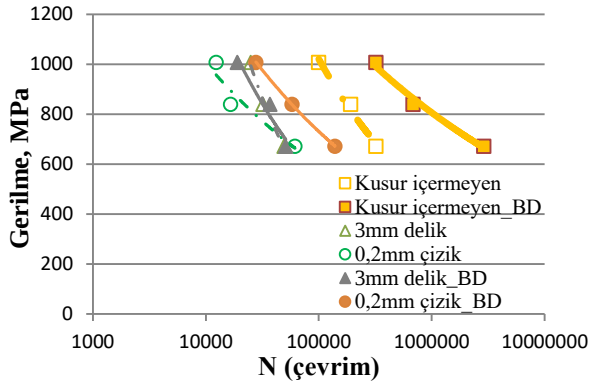


Şekil 4. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü (Figure 4. Surface roughness before and after shot peening)

İşlenmemiş numunelere kıyasla BD uygulamasından sonra yorulma ömrü sonuçlarının incelenmesi Şekil 5' de gösterilmektedir. BD uygulanmamış numunelerin yorulma ömürleri ile ilgili olarak, aynı gerilme genliğinde kırılmaya karşı test edilen toplam ömür çok daha uzundur. BD suni yüzey kurusu içermeyen numunenin ömrünü %800'den fazla artırmıştır. Fragoudakis vd. [28] kusur içermeyen 56SiCr7 yay çeliğine uyguladıkları BD işlemi sonrası yorulma ömründe yaklaşık %400 artış elde etmişlerdir. Enine çizik suni kusuru ve boydan delik suni kusuru içeren numunelerin yorulma ömrü kusur içermeyen numuneye göre önemli ölçüde azalmıştır. Test gerilme miktarı 672 MPa olan sonuçlar değerlendirildiğinde, kusur içermeyen numuneler 320.600 çevrimde kırılırken, enine çizik içeren numune 61.565 çevrimde ve boyuna delik içeren numunede 49.230 çevrimde kırılarak hasara uğramıştır. Yorulma ömründeki azalma %80-85 mertebesinde olduğu görülmektedir. BD işlemi sonucunda, enine çizik içeren numune için çevrim sayısı 139.271 ve boyuna delik içeren numune için 50.969 çevrim sayısı değerine ulaşılmıştır. Enine çizik içeren numunenin ömrü BD ile %125 artarken, boyuna delik numunenin ömründe BD ile %4 civarı artış olabilmektedir. Ancak söz konusu iyileşmenin kusur içermeyen numunelerin yorulma ömrüne ulaşmaktan hala çok uzak olduğu açıktır. Yani, BD işlemi enine çizik ve boyuna delik içeren numunelerin yorulma ömrünü artırsa da, kusur içermeyen numunenin yarı ömrüne bile ulaşamamıştır. Boyuna delik bulunması yorulma ömrü üzerinde daha zararlı bir etki oluşturmuştur. BD işlemi bu zararlı etkileri gidermekte yetersiz kalmıştır.

Şekil 6'da kusur içermeyen numunede kırık yüzey görüntüsü verilmiştir. Tipik yorulma kırılması göstermektedir. Şekil 7'de boydan delik içeren numunelerin kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 7(a) ve (b)'de verilen yüzeyden ve kesitten kırık yüzey görüntüleri kırılmanın delikten ve çift taraflı olarak başladığını göstermektedir. Şekil 8(a)'da numunenin kırık yüzey görüntüsü BD sonrasında da kırılmanın delikten başladığını göstermektedir. Şekil 8(b) BD' nin çatlak başlangıcına önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Şekil 8(c) ve (d)' de BD uygulanmış numunenin kırılma yüzeyinin kesitten ve üstten SEM görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, BD izleri yüzeyde belirgin bir şekilde görülürken, yüzeyden delik içine doğru malzeme akışıyla birlikte 200-300 µm kadar katlanma oluşmuştur. Ancak, yorulma testi sonuçları

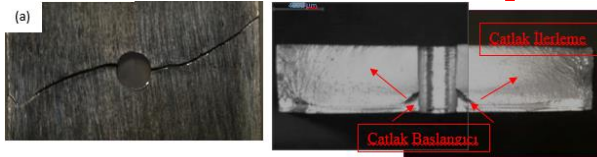
BD' nin 3 mm çapında delik içeren malzemede neredeyse hiç etkisinin olmadığını ortaya koymuştur.



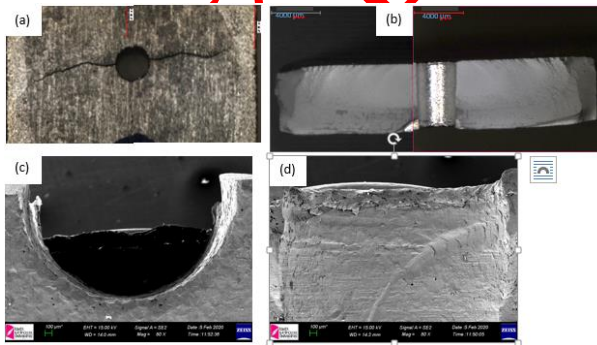
Şekil 5. Bilyalı dövme sonrası kusurlu ve kusursuz malzemeler için yorulma ömrü ve bilyalı dövülmemiş numunelerle karşılaştırma (Figure 5. Fatigue life for defected and non-defected materials after shot peening and comparison with unpeened)



Şekil 6. Kusur içermeyen numunede kesitten SM kırık yüzey görüntüsü (Figure 6. SM fracture surface from cross-section in non-defected sample)



Şekil 7. Ø3 mm delik içeren ve bilyalı dövülmemiş numunede SM kırık yüzey görüntüleri (a) üstten görünüş, (b) kesitten görünüş (Figure 7. SM fracture surface images in a Ø3 mm hole and unpeened sample (a) top view, (b) cross-sectional view)



Şekil 8. Ø3 mm delik içeren ve bilyalı dövülmüş numunede kırık yüzey görüntüleri (a) SM üstten görünüş, (b) SM kesitten görünüş, (c) SEM üstten görünüş, (d) SEM kesitten görünüş (Figure 8. Fracture surface images in a Ø3 mm hole and shot-peened sample (a) SM top view, (b) SM cross-sectional view, (c) SEM top view, (d) SEM cross-sectional view)

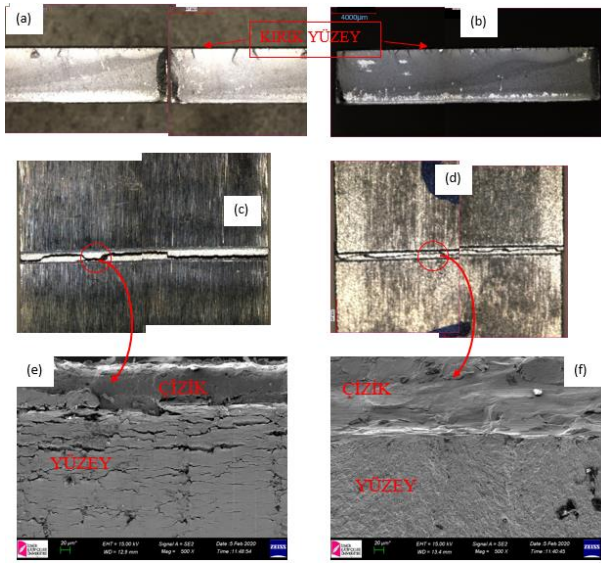
Enine çizilmiş numunelerde çizik bölgede farklı noktalardan başlayan birden çok çatlak oluşumu

görülmektedir (Şekil 9a). Kırılan numunenin yüzeyinden bakıldığında (Şekil 9b) çatlak sayısı ile orantılı dalgalanmaya sahip bir çatlak ilerleme paterni gözlenmektedir. BD uygulanmış numunede ise çok sayıda ancak daha kısa çatlaklar gözlenmektedir (Şekil 9d) olup, yüzeyden çatlak ilerlemesi daha az dalgalanma sergilemektedir (Şekil 9e). BD uygulanmamış malzemede çizik bölgenin yanında bulunan yüzeyde çok sayıda mikro-çatlak gözlenirken (Şekil 9c), BD uygulanmış malzemede aynı bölgede çatlak bulunmamaktadır ve BD' nin atış izleri görülmektedir (Şekil 9f). Yüksek kinetik enerjiye sahip bilyalar yüzey altında büyük deformasyona neden olur. Bu da, BD ile yüzeyde sağlanan plastik deformasyonun çatlak oluşumunu geciktirdiğini göstermektedir [29]. Öte yandan basma kalıntı gerilmelerinin oluşumunun da çatlak oluşumunu baskınladığı bilinmektedir. Çatlak ucunun altında kalan mukavemeti artmış bölge çatlak ilerlemesini durdurmaktadır [30]. Saklakoğlu vd. [18] aynı malzeme üzerine, aynı koşullarda yapılan BD' nin yüzeyde $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° doğrultularında sırasıyla -470,4 MPa, -501,1 MPa ve -487,4 MPa büyüklüklerinde kalıntı gerilme oluşturduğunu göstermiştir. Görüldüğü gibi, BD dövme prosesi malzeme yüzeyinde oldukça yüksek basma gerilmeleri oluşturmuştur. Bu gerilmelerin farklı yönlerde homojen olarak meydana gelmesi, BD prosesinin çekme tipi gerilmeleri basma tipine anizotropik karakterde dönüştürdüğünü göstermektedir ki bu da prosesin etkinliğinin göstergesi olarak ifade edilebilir. Saklakoğlu vd. [18] 0,2-0,4-0,6 mm derinliğinde 0,895 mm eğrilik yarıçapına sahip suni kusurların BD ile tamamen etkisizleştirilebilmesinin yanı sıra kusursuz malzemeye göre 3 kat ömür artışı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yüzey plastik deformasyonundan sonra yorulma mukavemetinin iyileştirilmesi üç temel faktöre bağlanabilir: makroskopik artık gerilme, yüzey kalitesi ve mikroyapısal değişiklikler. Bu faktörlerin etkisi orijinal yapıya, güçlendirme yöntemine ve uygulanan strese bağlıdır. Ve plastik deformasyonun etkisi sonucu gelişen bu üç faktör yüzeyde sertliği artmış ve dövme etkisinin derinliğe bağlı azalması için düşüş gösteren bir trend ile kendini gösterir. Daha yüksek artık değerlerde ve daha derin plastik olarak deforme olmuş yüzey katmanlarında, çevrimsel yükleme sırasında artık gerilimin daha az zayıflaması meydana gelir. Açık ki, dekarbürizasyon gibi yüzeyde yumuşak-sertliği düşüş göstermiş bir tabakanın varlığı yorulma performansını negatif etkileyecektir. Dalaci vd. [31] dekarbürize tabakaya sahip ve referans numunelere bilyalı dövme uygulamışlar ve bilyalı dövme sonrası referans malzemede daha büyük mertebede basma tipi kalıntı gerilme elde ederlerken, dekarbürize çelikte de yüksek büyüklükte basma tipi kalıntı gerilme elde etmişlerdir. Kalıntı gerilmenin derinliğine bakıldığında dekarbürizasyon işleminden etkilenmediği görülmüştür. Dekarbürize tabakada göreceli daha düşük basma kalıntı gerilme oluşmasının sebebi ise başlangıç akma dayanımının düşük olmasıdır. Bilindiği gibi bir

malzemede oluşan kalıntı gerilmeler o malzemenin akma dayanımı ile ilişkili olarak gelişir. Bilyalı dövme, bilyalı dövme yoğunluğu çok yüksek olduğunda, düşük mukavemetli malzemelerde yapısal hasara neden olabilir, ancak basma artık gerilmeleri, bu hasarın neden olduğu zararlı etkinin üstesinden gelir [32].

Suni yüzey kusuru içermeyen BD uygulanmamış ve BD uygulanmış numuneler için, çatlaklar yüzeyden başlamıştır. Ancak, suni yüzey kusuru içeren numuneler için çatlaklar delik ve çiziklerden başlamıştır. Bu çalışma kapsamında, çizik içeren numunelerin BD ile etkisizleştirilemediği görülse de, BD uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin yorulma ömürleri karşılaştırıldığında BD uygulanmış numune uygulanmamış numuneye göre 2,2 kat ömür artışı sağlaması önemli bir katkı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 9. Enine çizik içeren numunelerin yorulma testi sonrası kırık yüzey görüntüleri (a) bilyalı dövülmemiş numunenin kesit görüntüsü, (b) bilyalı dövülmemiş numunenin yüzey görüntüsü, (c) bilyalı dövülmemiş numunenin yüzeyden SEM görüntüsü, (d) bilyalı dövülmüş numunenin kesit görüntüsü, (e) bilyalı dövülmüş numunenin yüzey görüntüsü, (f) bilyalı dövülmüş numunenin yüzeyden SEM görüntüsü, (Figure 9.

Fracture surface images of samples containing transverse scratches after fatigue test (a) cross-sectional image of unpeened sample, (b) surface image of unpeened sample, (c) SEM image from the surface of unpeened sample, (d) Cross-sectional image of shot peened sample, (e) Surface image of shot peened sample, (f) SEM image from the surface of shot peened sample)

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında yüzeyinde 3 mm çapında boyuna çizik ve 0,2 mm derinliğinde enine çizik içeren numunelerde BD uygulanmasının etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar:

1. Bu malzemelere endüstriyel şartlarda ısıtma işlemi yapılmıştır ve bu şartlar altında malzeme yüzeylerinde sertliğin azalmasına neden olan dekarbürizasyon tabakası oluşmaktadır. BD bu sertlik azalmasının bir kısmını giderebilmektedir.

2. BD suni kusur içermeyen numunede 672 MPa gerilme genliğinde %800 ömür artışı sağlamıştır.

3. Delik ve çizik kusurları içeren numunelerin yorulma ömrü sırasıyla %80 ve 85 azalmıştır. En düşük gerilme seviyesinde BD prosesi delik içeren malzemelerde %4 kadar iyileşme sağlarken, çizik içeren numunelerde %126 ömür artışı sağlamıştır. Her iki kusur içeren malzeme de BD sonrası kusur içermeyen malzemenin yorulma dayanımına ulaşamamış yani kusurların etkisi giderilememiştir. Ancak çizik malzemede sağladığı ömür artışı da oldukça dikkat çekicidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje kodu:2018-039). Yazarlar Dönmez Debriyaj (İzmir) firmasına numunelerin hazırlanmasına katkılarında dolayı teşekkür eder.

YAZAR KATKI BEYANI (AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT)

Fatih Barış: Deneylerin yapılması, sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında katkı sağlamıştır. **Nurşen Saklakoğlu:** Fikrin oluşturulması, literatür taraması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması aşamalarında katkı sağlamıştır. **Simge İrizalp:** Sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması aşamalarında katkı sağlamıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Li H.Y., Han M.S., Li D.W., Li J., and Xu, D.C., "Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of 50CrV4 steel", *J Cent South Univ*, 22(2): 409-415 (2015).
- [2] Nishimura Y., Yanase K, Ikeda Y, Tanaka Y, Miyamoto N, Miyakawa S, Endo M., "Fatigue strength of spring steel with small scratches", *Fatigue Fract Eng M*, 41:1514–1528 (2018).
- [3] Lin B., Zabeen S., Tong J., Preuss M., Withers P.J., "Residual stresses due to foreign object damage in laser-shock peened aerofoils: simulation and measurement", *Mech Mater*, 82:78–90 (2015).
- [4] Al Mangour B., Yang J.M., "Integration of heat treatment with shot peening of 17-4 stainless steel fabricated by direct metal laser sintering" *JOM*, 69:2309–2313 (2017).

- [5] Tan L., Yao C., Zhang D., Ren J., Zhou Z., Zhang J. "Evolution of surface integrity and fatigue properties after milling, polishing, and shot peening of TC17 alloy blades" *Int J Fatigue*, 136:105630 (2020).
- [6] Javidi A., Rieger U., Eichlseder W. "The effect of machining on the surface integrity and fatigue life" *Int J Fatigue*, 30:2050–2055 (2008).
- [7] Schönbauer B.M., Mayer H. "Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels" *Int J Fatigue*, 127:362–375 (2019).
- [8] Murakami Y., "Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions", *Met Fatigue*, Elsevier, UK, (2002).
- [9] Karr U., Schuller R., Fitzka M., Schönbauer B., Tran D., Pennings B., Mayer H., "Influence of inclusion type on the very high cycle fatigue properties of 18Ni maraging steel". *J Mater Sci* 52:5954–5967 (2017).
- [10] Shingai K., "Study on elastic-plastic strain behavior of notched specimen (5. Consideration on fatigue life and cyclic strain behavior of steel under cyclic tensile load)", Reports, Nagasaki University, Faculty of Engineering (1998).
- [11] Ishii T. and Takahashi K., "Prediction of fatigue limit of spring steel considering surface defect size and stress ratio", *Metals*, 11, 483 (2021).
- [12] Yanase K., Endo M., "Multiaxial high cycle fatigue threshold with small defects and cracks" *Eng Fract Mech*, 123:182–196 (2014).
- [13] Fernández-Pariente, I., Bagherifard, S., Guagliano, M., and Ghelichi, R. "Fatigue behavior of nitrided and shot peened steel with artificial small surface defects", *Eng Fract Mech*, 103, 2-9 (2013).
- [14] Zhang J., Li H., Yang B., Wu B., Zhu S., "Fatigue properties and fatigue strength evaluation of railway axle steel: effect of micro-shot peening and artificial defect" *Int J Fatigue*, 132:105379 (2020).
- [15] Yang S., Zeng W., Yang J., "Characterization of shot peening properties and modeling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel" *Int J Fatigue* 137:105621. (2020).
- [16] Webster G.A., Ezeilo A.N., "Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes" *Int J Fatigue* 23:375–383 (2001).
- [17] Yasuda, J., and Takahashi, K., "Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High-Strength Steel Containing a Crack-Like Surface Defect: Influence of Stress Ratio", ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 9, Rudy Scavuzzo student paper symposium and competition, Toronto, Ontario, Canada, July 15-19, (2012).
- [18] Saklakoglu N., Bolouri A. Gencalp Irizalp S., Baris F., Elmas A., "Effects of shot peening and artificial surface defects on fatigue properties of 50CrV4 steel", *Int J Adv Manuf Tech*, 112, 2961–2970 (2021).
- [19] Calitz, J., Kok, S., and Delport, D., "The effect of decarburization on the fatigue life of overhead line hardware", *J S Afr I Min Metall*, 121(10), 537-542 (2021).
- [20] Zhang, K., Chen, Y., Sun, Y., and Xu, Z., "Effect of H₂O (g) on decarburization of 55SiCr spring steel during the heating process", *Acta Metall Sin-Engl*, 54(10), 1350-1358 (2018).
- [21] Fargas, G., Roa, J. J., and Mateo, A. "Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels", *Mat Sci Eng A-Struct*, 641, 290-296 (2015).
- [22] Suraratchai M., Limido J., Mabru C., Chieragatti R., "Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminum alloy" *Int J Fatigue*, 30(12), 2119-2126 (2008).
- [23] Li X., Zhang J., Yang B., Zhang J., Wu M., Lu L. "Effect of micro-shot peening, conventional shot peening and their combination on fatigue property of EA4T axle steel", *J Mater Process Tech*, 75:116320 (2020).
- [24] Pereira F.G.L., Lourenço J.M., Nascimento R.M., Nicolau Apoen Castro, Fracture Behavior and Fatigue Performance of Inconel 625, *Mat Res*, 21(4) (2018).
- [25] Trško L., Fintová S., Nový F., Bokřivka O., Jambor M., Pastorek F., Florková Zuzana and Oravcová M., "Study of relation between shot peening parameters and fatigue fracture surface character of an AW 7075 aluminium alloy", *Metals*, 8(2), 111, (2018).