

## Farklı ısı işlemlerin takım çeliklerinin yorulma mukavemeti üzerine etkileri

### *The effects of different heat treatments on the fatigue strength of tool steels*

Ruhi YEŞİLDAL\*<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

• Geliş tarihi / Received: 26.04.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 13.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.06.2022

#### Öz

İstenilen kullanım amacına bağlı olarak çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli ısı işlemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada, bir GS 550 banyosunda H13 sıcak iş takım çeliğinin ısı işleme yorulma dayanımının değişimi araştırılmıştır. Birinci ön ısıtma, ikinci ön ısıtma, sertleştirme ve ikinci sertleştirme olmak üzere dört farklı ısı işlem uygulanarak incelenmiştir. Her numune grubu, ısı işleminden sonra oda sıcaklığında döner eğmeli yorulma testine tabi tutulmuştur. Isıl işlem görmemiş numunelerin yorulma dayanımı 470 MPa olarak belirlenmiştir. İkinci sertleştirme yapılmış temperlenmemiş numunelerin (1. Grup) yorulma mukavemeti 610 MPa'ya yükselmiştir. Sertleştirmeden sonra ikinci bir ısı işlem olarak 550°C'de iki saat tavlama olan üçüncü ısı işlemin uygulanmasıyla numunelerin (3. Grup) yorulma dayanımı 720 MPa olarak bulunmuştur. Dördüncü ısı işleme tabi tutulmuş ve sertleştirmeyi takiben 550°C'de iki saat ve ardından 635°C'de iki saat temperlenmiş numunelerin (4. Grup) yorulma mukavemeti 710 MPa olarak belirlenmiştir. Uygulanan tüm ısı işlemlerin H13 sıcak iş takım çeliğinin yorulma mukavemetini olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. Tüm ısı işlemler artan yorulma mukavemeti ile sonuçlanırken, en yüksek yorulma mukavemeti, ilk ön ısıtma ve su verme işleminden sonra çift tavlama ısı işlemi (550 °C ve 610 °C iki saat) ile elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** H13 sıcak iş takım çeliği, Isıl işlem, Yorulma

#### Abstract

Various heat treatments are applied to improve the mechanical properties of steels depending on the intended use. In this study, the variation of fatigue strength of H13 hot work tool steel with heat treatment in a GS 550 bath was investigated. It was investigated by applying four different heat treatments as first preheating, second preheating, hardening and second hardening. Each batch of samples was subjected to rotating bending fatigue test at room temperature after heat treatment. The fatigue strength of the untreated samples was determined as 470 MPa. The fatigue strength of the second hardened untempered samples (Group 1) increased to 610 MPa. The fatigue strength of the samples (Group 2), which were annealed for two hours at 550°C as a second heat treatment after hardening, was measured as 630 MPa. The fatigue strength of the samples (Group 3) was found to be 720 MPa by applying the third heat treatment, which was annealing at 550°C for two hours and at 610°C for two hours. The fatigue strength of the samples (Group 4), which were subjected to the fourth heat treatment and tempered for two hours at 550°C and then at 635°C for two hours after hardening, was determined as 710 MPa. It has been observed that all applied heat treatments positively affect the fatigue strength of H13 hot work tool steel. While all heat treatments resulted in increased fatigue strength, the highest fatigue strength was obtained with double annealing heat treatment (550 °C and 610 °C two hours) after initial preheating and quenching.

**Keywords:** H13 hot-work tool steel, Heat treatment, Fatigue

\*a Ruhi YEŞİLDAL; ryesisil@atauni.edu.tr, Tel: (0506) 515 91 31, orcid.org/ 0000-0001-7677-1600

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Kritik çekme ve akma gerilmelerinin çok altındaki gerilmelerde bile, makine parçaları alternatif gerilme altında kırılabilir. Bu durum, aşınma, yırtılma ve plastik deformasyon gibi diğer mekanizmalarla birleşerek makine parçalarının hizmet ömrünü azaltır (Barraua vd., 2003). Alaşımli çelik ve sıcak metal şekillendirme durumunda tipik bir bileşen olan kalıplar, hem hassasiyet hem de güvenilirlik açısından büyük önem taşıyan kritik bir bileşendir. Kalıplar, aşındırıcı ortamlarda mekanik yüklemeye altında hizmet vermelerinin yanı sıra, oldukça değişken sıcaklık değişimlerine bunun sonucunda mekanik ve termal yorulmaya maruz kalırlar (Wizer vd., 2014). Bu nedenle kalıplar genellikle, mukavemetlerini artırmak, böylece hizmet ömrünü uzatmak, verimliliği artırmak ve maliyetleri azaltmak için sıcak iş çeliğinden imal edilirler (Perssona vd., 2004).

Sıcak iş takım çeliğinin yorulması, tipik olarak, alternatif gerilme altındaki sığ yüzey çatlaklarından başlar (Sun vd., 2004; Akata, vd. 2004). Sıcak iş çeliklerinin yorulması üzerine yapılan araştırmalar, çatlak yayılmasını sınırlayarak veya geciktirerek çalışma ömrünü uzatmaya odaklanmıştır. Sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalar kapsamında, farklı sıcak iş çeliği malzemelerini farklı servis sıcaklıkları, karmaşık geometriler ve yüzey iyileştirme araçları, su verme ve temperleme gibi ısıl işlem aşamaları altında değerlendiren çok sayıda çalışma yapılmıştır (Sun vd., 2004; Akata, vd. 2004; Fares, vd. 2012; Çöl & Koç, 2015; İynen, vd. 2021; Özdemir & Dilipak, 2021).

Özellikle sıcak iş prosesi için, termal yorgunluğa karşı direnci geliştirmek için istenen özellikler arasında, yeterli süneklik ve tokluk, yüksek sürünme mukavemeti ve boyutsal kararlılık, düşük

termal genleşme katsayısı, yüksek termal iletkenlik, yüksek sıcaklık akma mukavemeti, iyi temperleme ve şok direnci özellikleri sayılabilir (Fares vd., 2012), Bununla birlikte, her sıcak iş süreci belirli özellikler gerektirebilir ve farklı malzemelere ve/veya farklı ısıl işlemlere ihtiyaç duyulabilir veya farklı işlemler için uygun olabilir. Örneğin, dört farklı sıcaklık altında östenitlenen ve ardından temperlenen martensitik krom sıcak iş çeliğinde termal yorulma çatlağı büyümesi, östenitleme sıcaklığı ve servis sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilenmiştir. Çeliklerin karmaşık yüklemeye koşulları altındaki davranışını değerlendirdikten sonra (Valey vd., 2006), mikroyapının ve kırılma direncinin östenitleme ve tavlama işlemlerinden etkilendiği bildirilmiştir (Souki vd., 2004). Östenitleme sıcaklığının yorulma direnci üzerinde önemli bir etkisi olmamasına rağmen, temperleme sıcaklığı kırılma tokluğunu ve çatlak yayılmasını önemli ölçüde etkiler. Bu bağlamda, bu çalışma, östenitlemeyi takiben farklı sıralı ısıl işlemlerin oda sıcaklığında hizmet veren H13 çeliğinin yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

AISI H13 tipi çelikler tipik olarak hafif metal sıkıştırma kalıplarında ve ekstrüzyon preslerinde, nitrasyondan sonra kalıp, silindir, besleyici, matris, zimba ve ceket olarak kullanılır. Yüksek tokluğa ve çatlak oluşumuna karşı yüksek dirence sahiptir ve ayrıca yüksek sıcaklıklarda termal iletkenliğini, sertliğini ve aşınma direncini önemli oranda korur. Bununla birlikte, sertleştirme özelliklerini bir dereceye kadar etkileyebilir. Bu çalışmada, nominal kimyasal bileşime sahip (Tablo 1) AISI H13 çeliğinden ASTM-E 466 numuneleri kum saati geometrisinde 9.35mm ana çap ve 6.35mm boyun çapında hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır.

**Tablo 1.** H13 çeliğin kimyasal bileşimi (% Ağırlık)

**Table 1.** Chemical composition of H13 grade steel (W%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	F	S	Al	Co	Cu	Ti	W
Ağırlık(%)	0.47	0.87	0.35	5.22	1.37	0.25	0.85	0.01	0.001	0.02	0.03	0.09	0.005	0.07

Molibden ve krom karbür içeriği, 1010 °C'de bir saatlik östenitlemeden sonra ayrışır, buna karşın vanadyum karbürler (VC) çözülmeden kalır. 550-635 °C'de çift tavlama, kalan osteniti tavlama martensite dönüştürebilir, ilk tavlama artık osteniti martensite dönüştürür ve ikinci tavlama bu yeni martenziti temperlenmiş martensite dönüştürür. H13, nispeten düşük alaşımli, ferrit te dağılmış

alaşımli karbürleri (Mo<sub>6</sub>C, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, VC) %3,5 oranında içerir (Smith vd., 1993).

Bu çalışmada 5 adet işlem parametresi belirlenmiş, her bir işlem şartı için 50 adet ve toplamda 250 adet numune hazırlanmıştır. 1020 °C sıcaklıkta ön ısıtma malzeme deformasyonunu nispeten önlemiştir. H13'ün maksimum tokluğuna ulaşmak için bir GS-550 banyosunda 550'de sertleştirme

işlemi yapılmıştır (Lin vd., 2016). Tokluğu sağlamak için sertleştirmeyi takiben yapılan 3. Tavlama, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplarında yaygın olarak kullanılan bu özelliği sağlamıştır. 4. sırada 635 °C'de üçüncü tavlama yapılmıştır.

Oksit tabakası gibi kalıntıları gidermek için zımparalama (sırasıyla 200, 400, 800 ve 1200 tane büyüklükleri ile) ve çuha üzerine aşındırıcı toz (1 µm) ile polisaj yüzey işlemleri uygulanmıştır. R. R. Moore marka döner eğmeli yorulma test makinesi ile istenilen gerilme değerlerine göre yükleme Denklem 1'deki hesaplamalara göre yapılmıştır (Bannantine vd., 1990).

$$\sigma = 16.W.L / \pi.D^3 \quad (1)$$

$\sigma$  : Minimum kesitte numunenin en dış yüzeyindeki gerilme değeri, W: Uygulanan toplam yük, L: Moment kolu ve D: En küçük çap.

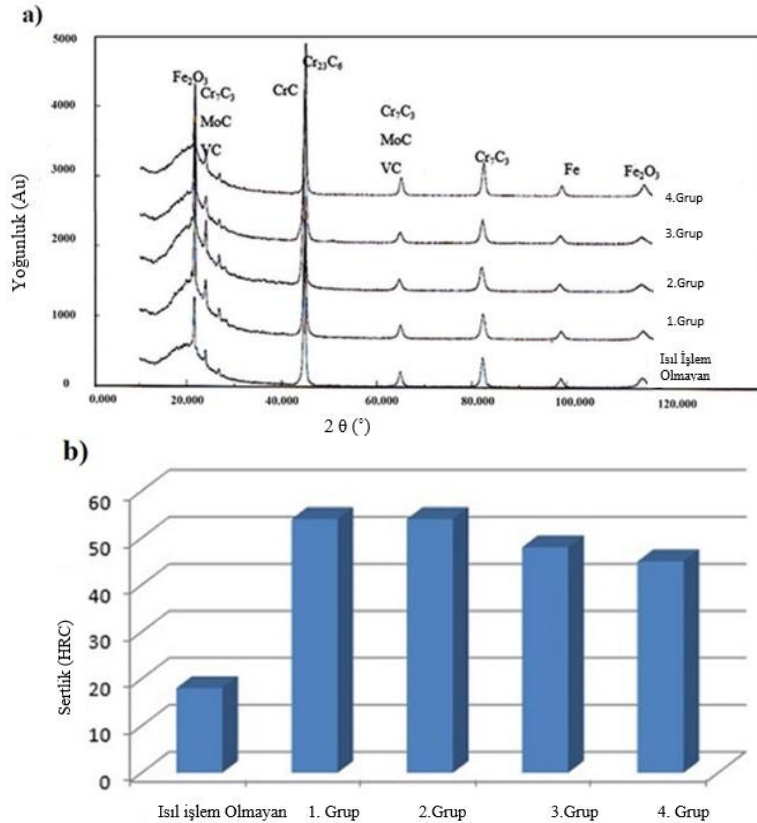
L sabit tutulduğundan, bu denklem belirli bir çap ve gerilim gereksinimi için yalnızca bir W değeri verir.

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

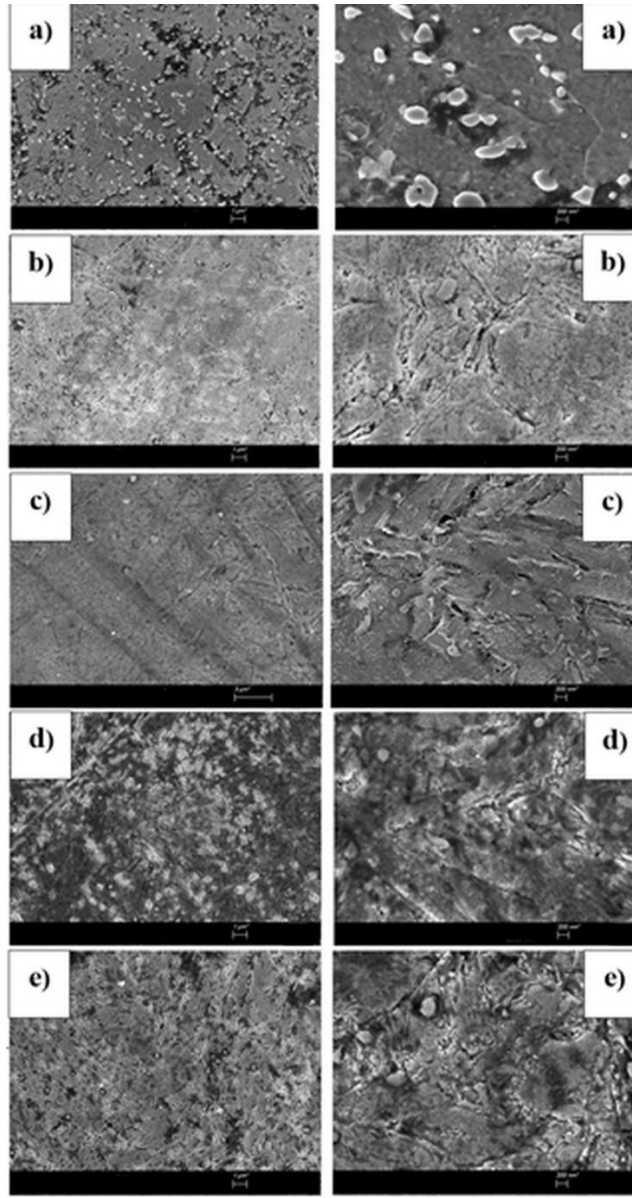
Uygulanan tüm ısıl işlemlerin yorulma mukavemetinde belirgin bir artışa neden olduğu

görülmektedir. Fakat bu artış birinci ve ikinci ısıl işlemler ile üçüncü ve dördüncü ısıl işlemlerin kendi aralarında yaklaşık aynı kalmıştır. Fakat çift temperlemenin yorulma mukavemetinin maksimum değere ulaşmasını sağladığı da açıkça ortaya çıkmıştır. Birinci temperleme sonucu oluşan artık östenitin ikinci temperleme ile temperlenmiş martenzite dönüşmesi yorulma mukavemetinin maksimum değere ulaşmasında önemli rol oynamıştır. Ayrıca ısıl işlemler sonucunda daha homojen ve ince taneli bir iç yapının oluşması yorulma mukavemetini artıran bir diğer etken olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Isıtma işleminde, karbür şeklindeki alaşım elementleri yavaş yavaş östenitik kafese entegre olur (Roux vd., 2013). Literatürden bilindiği gibi ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla alaşım elementlerinin entegrasyonu artmıştır (Souki vd., 2011). Şekil 1 ve 2'de görüldüğü gibi alaşım elementleri martensit yapının sertliğini artırmıştır. Martensitik dönüşüm difüzyonsuz olduğundan, karbon ve alaşım elementleri martensit kafesinde kalır ve sertliği artırır. Şekil 1b'de görüldüğü gibi yapıda CrC ve MoC'nin bulunması özellikle 1. Grup ve 2. Grup'un sertliğini artırmıştır. Şekil 2a, H13'ün orijinal mikro yapısını, 8-10 µm tane boyutuna sahip ferrit içindeki karbürleri ve ayrıca perlit tanelerini göstermektedir.



Şekil 1. Malzeme analizi, a) XRD analizi, b) malzemelerin sertlik analizi

Figure 1. Material analysis, a) XRD analysis, b) the hardness analysis of the materials



**Şekil 2.** Numunelerin mikroyapısı, a) Isıl işlem yok, b) 1. Isı işlem sırası, c) 2. Isı işlem sırası, d) 3. Isı işlem sırası, e) 4. Isı işlem sırası

**Figure 2.** Microstructure of specimen set, a) No heat treatment, b) 1st heat treatment sequence, c) 2nd heat treatment sequence, d) 3rd heat treatment sequence, e) 4th heat treatment seq

Şekil 2b, 1. ısıl işlem dizisi olan su vermenin, martenzit yapı ve östenit taneciklerinin küçük ve tek biçimli olmasıyla tane sınırlarının kaybolmasına ve boyutlarının %50 oranında azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Sertleştirmeden sonra çift tavlamanın, H13 ün yorulma mukavemetini 720 MPa'ya yükselttiği rapor edilmiştir (Smith vd., 1993). Bu çalışmadaki en yüksek değer budur ve kalıntı östenitin uygun sıcaklıkta çift temperleme ile temperlenmiş martensite dönüştürüldüğü maksimum yorulma mukavemeti ile açıklanmaktadır (Guanghua vd., 2010). Ayrıca, çift tavlama ile daha kararlı karbür oluşumu, malzemenin mekanik özelliklerini ve dolayısıyla yorulma mukavemetinin değişimini

açıklayabilir.  $Mo_6C$ ,  $Cr_2C_3$ , VC, önceki çalışmalarla tutarlı karbürler (Kumar vd., 2015). 2. sıra numuneleri ile 1. sıra numuneleri karşılaştırıldığında, taneler daha büyük, daha görünür ve daha net bir şekilde martenzitiktir.  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  ve MC ferrit karbürleri gösteren Şekil 2c'de kalınlaşmış tane sınırlarındaki bir ağ görülmektedir.  $M_6C$  esas olarak Fe, Cr ve Mo alaşımlarının karbürleridir,  $M_{23}C_6$  ve  $M_7C_3$  esas olarak Fe ve Cr ve MC, V ve Mo'dur. VC baskındır (Sjöström vd., 2004). XRD analizinin sonuçları bu bulguyla uyumludur (Smith vd., 1993).

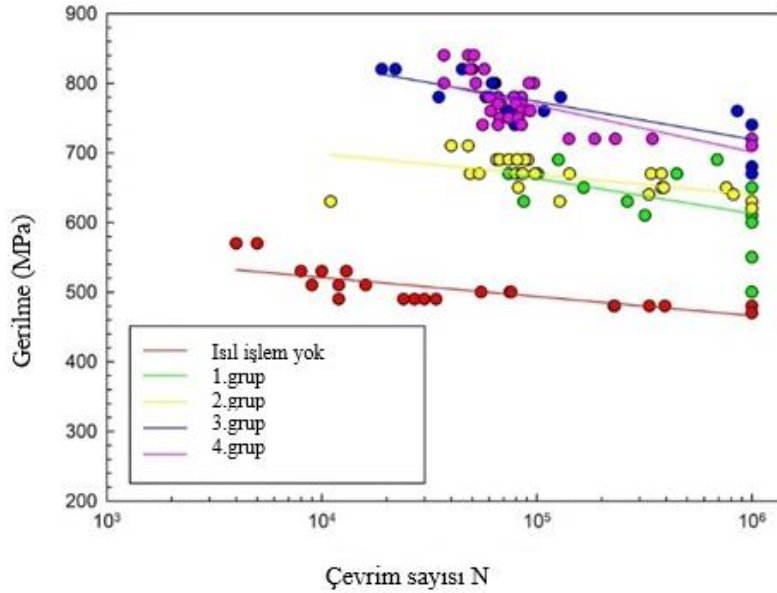
Karbürlerin çoğu, östenitleme sırasında katı çözelti içinde çözülmüştür (Şekil 2d). Mikro yapı, yoğun karbürlerin (östenitleme sırasında çözünmeyen

karbürlerin) dağılımında, ince karbürlerin dağılımıyla (tavlama sırasında çözünmeyi önler) birlikte temperlenmiş martenziti ortaya çıkarır. Kaba karbür parçacıklarının Şekil 1b'de  $M_7C_3$  (örneğin, CrC) olması beklenir. Kaba karbürler, östenit tane büyümesini engelleyerek yüksek aşınma direncine neden olur. Ayrıca, bu karbür parçacıklarının şekli ve dağılımı, anizotropik mekanik özelliklere neden olur. İri karbür parçacıkları arasında  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$  ve  $M_7C_3$  tipi karbürler bulunur. MC tipi karbürler (VC) daha dirençli oldukları ve sertleştikten sonra iç yapıyı sağladıkları için çözünmezler. Kalıntı östenit, martensit ve alaşımlı karbürden oluşur (Shi vd., 2017).

Şekil 2e, 3. ve 4. dizi numunelerinin benzer mikro yapıları sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 2. sıra numuneleriyle karşılaştırıldığında, tane sınırları daha az belirgindir ve ince taneli bir yapı oluşmuştur. Kürlendikten sonra  $M_7C_3$  ( $Cr_7C_3$ ) 550 °C'de çözünür ve ikincil bir sertleşme etkisi

gösterir. Dolayısıyla karbon oranındaki azalmaya rağmen sertlikte azalma olmamıştır. Kalıntı östenit, martensite dönüşmüştür. Martensit düzlemsel değil lineerdir ve karbürlerin ayrışmasından kaynaklanan azaltılmış karbon içeriği nedeniyle oluşur (Shi vd., 2017).

Deneylerde uygulanan maksimum gerilime, literatüre ve buna göre oluşturulan Woehler eğrilerine göre çekme geriliminin %70'i kadardır. Sonsuz ömür değerleri, eğri azalmasının başlangıcından  $10^6$  çevrime ulaşılan kadar küçük artışlarla uygulanan gerilimler artırılarak belirlendi. Woehler eğrileri, uygulanan ısıtma işlemlerin H13'ün yorulma mukavemeti üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Isıtma işlemlerin yorulma mukavemeti üzerindeki etkilerini anlamak ve ısıtma işlem görmemiş numunelerle karşılaştırmak için bulunan 470 MPa' değeri ısıtma işlem sonucu oluşan değerlerle test edildi (Şekil 3).



Şekil 3. Numunelerinin Woehler eğrileri

Figure 3. Woehler curves of all specimen sets

2., 3. ve 4. gruplara göre ısıtma işlem görmüş numunelerin yorulma mukavemeti sırasıyla 630, 720 ve 710 MPa olmuştur. Woehler eğrileri, H13'ün yorulma mukavemetinin ısıtma işlemlerle arttığını, ancak özellikle sıra 1. Grup ile 2. Grup arasında veya 3. Grup ile 4. Grup arasında Cr, Mo ve V karbürlerin daha iyi difüzyonu nedeniyle ısıtma işlemle çeliğin mekanik özelliklerinin arttığını göstermiştir.

550 °C'de iki saat (2. Grup) temperlenen numuneler, sertleştirilmemiş numunelere (1. Grup) yakın olan 630 MPa'lık bir yorulma mukavemetine sahiptir. Burada temperleme, yorulma mukavemetinde çok az iyileşmeye yol (20 MPa)

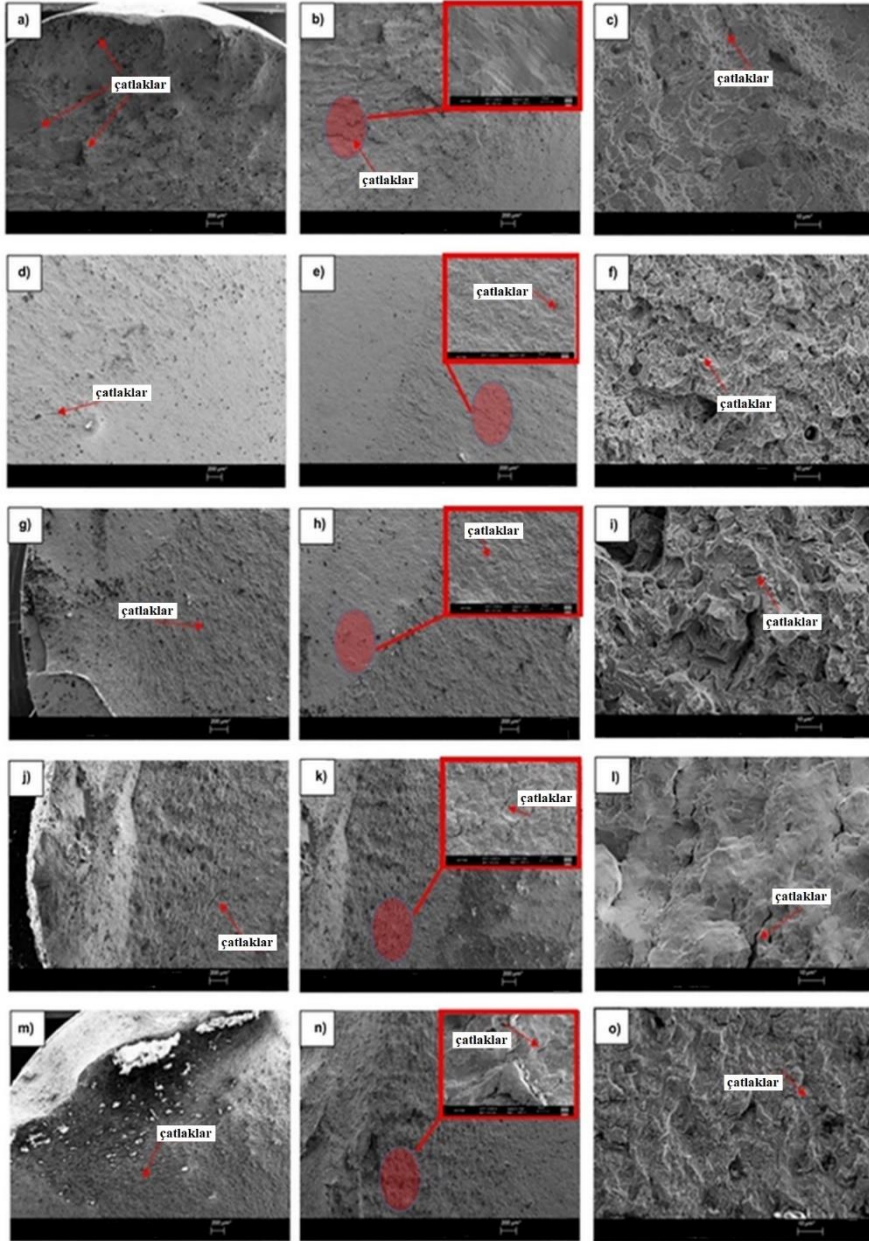
açmıştır. Sertleştirmeyi takiben tek bir tavlama işleminin yorulma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte, tüm gruplar için 550 °C'de iki saatlik ve 610 °C'de iki saatlik ikinci bir tavlama işlemi ile maksimum yorulma mukavemeti (720 MPa) ile en iyi değere ulaşmıştır (Tablo 2). Bu çeliğin uygun sıcaklıklarda çift tavlama, artık östenitin martensite dönüşmesini sağlar (Smith vd., 1993). İkinci tavlama, yeni oluşturulan karbürler, malzemeye geliştirilmiş mekanik özellikler ve dolayısıyla daha iyi yorulma mukavemeti vererek daha kararlı hale gelir (Lin vd., 2016).

**Tablo 2.** Woehler eğrisi Yorulma deney sonuçları**Table 2.** Woehler curve fatigue test results

Numune	Isıl işlem Görmemiş	1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup
Yorulma Limiti (MPa)	470	610	630	720	710
Cevrim sayısı (N)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>

Yorulma deneyleri (n=50), Şekil 3'te verilmiştir. Isıl işlem görmemiş numunelerin en düşük limitte ve çift temperli numunelerin en yüksek olduğu durumlarda, her bir ısıl işlem dizisi, bir miktar yorulma mukavemeti iyileştirmesi sağlamıştır.

(Şekil 3). Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi mikroyapısal özelliklere bağlıdır ve makroyapısal durumda belirleyici bir rol oynar, bu da ısıl işlemin mikro yapı üzerindeki etkisini açıklayarak yorulma direncinin artmasını sağlar (Şekil 4).



**Şekil 4.** Numune kırılma yüzeyi fotoğrafları; a, b, c ısıl işlem yapılmamış, d, e, f 1. Isıl işlem, g, h, i, 2. Isıl işlem j, k, l 3. Isıl işlem, m, n, o 4. Isıl işlem yapılmış numuneler.

**Figure 4.** Breaking point surface images of specimens a, b, c) no heat treatment specimens, d, e, f) 1st heat treatment sequence specimens, g, h, i) 2nd heat treatment sequence specimens, j, k, l) 3rd heat treatment sequence specimens, m, n, o) 4th heat treatment sequence specimens, macro, mezzo, micro respectively.

Kırılmalar, (Şekil 4-a, b ve c) tane sınırlarında yer alan karbürlerin tane sınırlarının çatlaması ile oluşmuş, taneler arası kırılma tipinde çatlaklara neden olmuştur. Şekil 4- (d ve e), daha parlak yorulma bölgesinden kırılma bölgesine geçişi gösteren dairesel bir yayı göstermektedir. Kırık tane sınırları boyunca ilerlemiş, karbür parçacıkları tarafından zayıflatılmış ve taneler arası kırılmaya neden olmuştur (Şekil 4-e ve f). Kırılma alanı, kırılma sırasındaki plastik deformasyonun neden olduğu daha mattır. Karbür tanecikleri tane sınırlarında yer alarak taneler arası kırılmaya ve en zayıf düzlemleri takip ederek ilerlemeye neden olmuştur (Şekil 4-g, h, ve i). Kırılan taneler arasında ilerleyen ve tane sınırındaki karbürler nedeniyle taneler arası kırılmalara yol açan hasar meydana geldiğinde plastik deformasyonu gösteren kırılma yüzeyinde oluşan kesme bölgesini göstermektedir. Ancak kayma bölgesinin I grubundan (1. ısıl işlem dizisi) daha geniş olması sünekliğin arttığını gösterir (Şekil 4-j, k ve l). Şekil 4-(m, n ve o), yorulma bölgesinden ayırt edilen kırılma bölgesi ile taneler arası kırılma tipini göstermektedir.

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Alaşım elementlerinin varlığının, su verme sıcaklığı ile H13'ün sertliğini arttırdığı gözlenmiştir. Uygulanan tüm ısıl işlemler malzemenin yorulma mukavemetini iyileştirmiştir. Sertleştirmeden sonra iki saat boyunca 550 °C'de tek bir tavlama, tek başına sertleşmeye göre yorulma mukavemetini beklenen ölçüde iyileştirmemiştir. İkinci tavlama sıcaklığının 610 °C'den 635 °C'ye yükseltilmesi yorulma mukavemetini etkilememiştir. Maksimum yorulma mukavemeti, ilk ön ısıtma ve su verme işleminden sonra çift tavlama ısıl işlemi (birinci tavlama 550 °C'de iki saat ve ikinci tavlama 610 °C'de iki saat) uygulanarak elde edilmiştir. Tüm gruplarda kırık tipi ve yayılma paterni intergranüler idi. Yükleme frekansı değişmediği ve fazlar yük tekrarına tabi tutulmadığı için kırılma yüzeylerinde yorulma çizgileri görülmemiştir. Maksimum yorulma mukavemetinin elde edildiği 3.Grubun kırılma yüzeyinde, tek bir çatlak cephesi oluşturmak için bir araya gelen birçok çatlaktan oluşan basamak çizgileri görülmüştür. Yorulma çatlağının ilerlemesinden kaynaklanan alan makroskopik olarak düz ve daha parlaktır.

Stabil bir iç yapının meydana gelmesi malzemenin mukavemetini ve dolayısıyla mikro ölçekte özelliklerini birinci derecede etkileyecektir. Isıl işlemler vasıtasıyla alaşım karbürlerinin homojen

dağılması ve tane boyutunun küçülmesi akma mukavemetinin artmasına neden olacaktır. Plastik deformasyon kayma sonucu meydana gelen şekil değişimidir. Plastik deformasyonun artması dislokasyon yoğunluğunu ve bunların noktasal hatalar ve ikincil fazlarla etkileşimini artıracaktır. Tanelerin küçük olması dislokasyonların daha fazla tane sınırı ile etkileşmelerini gerektirecek bu da dislokasyon hareketini zorlaştıracaktır.

Yapılan ısıl işlemlerin hepsi malzemenin yorulma mukavemetini iyileştirmiştir. H13 sıcak iş takım çeliği için en iyi yorulma mukavemetinin sertleştirmeyi takiben 550°C'de birinci menevişleme ve 610°C'de ikinci menevişleme ile 3. Grupta elde edilmiştir. Karbür yapının içinde vanadyum, krom ve molibden tespit edilmiştir. En düşük yorulma mukavemet değeri ikinci sertleştirme yapılmış ve temperlenmemiş 1. Grup numunelerinde elde edilmiştir.

#### Yazar katkısı

*Author contribution*

Çalışmada bir başka yazarın katkısı yoktur.

#### Etik beyanı

*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim. Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### Çıkar çatışması beyanı

*Conflicts of interest*

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### Kaynaklar

*References*

Akata E., Altınbalık T., & Can Y. (2004). Three point application in single tooth bending fatigue test for evaluation of gear blank manufacturing method. *International Journal of Fatigue*, 26, 785–789. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.11.003>

- Bannantine J. A., Comer J. J., & Handrock J. L. (1990). *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis* (1st Ed.), Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Barraua O., Bohera C., Grasb R., & Rezai-Aria F. (2003). Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool steel for forging. *Wear*, 255, 1444–1454. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00280-1)
- Çöl M., & Koç F. G. (2015). Effect of homogenization heat treatment on toughness and wear resistance of plastic mold steel. *Materials Testing*, 57(11-12), 942–946. <https://doi.org/10.3139/120.110807>
- Fares M. L., Moussa A., Khelfaoui Y., & Khetache A. (2012). An investigation into the effects of conventional heat treatments on mechanical characteristics of new hot working tool steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 28, 012–042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/28/1/012042>
- Guanghua Y., Xinmin H., Yanqing W., & Xingguo Q. (2010). Effects of heat treatment on mechanical properties of H13 steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 52(7–8), 393 – 395. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9288-4>
- İynen O., Ekşi A. K., Özdemir M., & Akyıldız H. K. (2021). Experimental and numerical investigation of cutting forces during turning of cylindrical AISI 4340 steel specimens. *Materials Testing*, 63(5), 402–410. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0069>
- Kumar R., Behera R. K., & Sen S. (2015). Effect of Tempering temperature and time on strength and hardness of ductile cast iron. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 75 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/75/1/012015>
- Lin M., Zhao X., Han L., Liu Q., & Gu J. (2016). Microstructural evolution and carbide precipitation in a heat-treated H13 hot work mold steel. *Metallography Microstructure and Analysis*, 5, 520–527. <https://doi.org/10.1007/s13632-016-0318-5>
- Özdemir M., & Dilipak H. (2020). Numerically modeling spring back and spring go amounts and bending deformations of Cr-Mo alloyed sheet. *Materials Testing*, 62(12), 1265–1272. <https://doi.org/10.3139/120.111613>
- Persson A., Hogmark S., & Bergström J. (2004). Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels, *International Journal of Fatigue*, 26, 1095–1107. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.03.005>
- Roux S. L., Medjedoub F., Dour G., & Rézaï-Aria F. (2013). Role of heat-flux density and mechanical loading on the microscopic heat-checking of high temperature tool steels under thermal fatigue experiments. *International Journal of Fatigue*, 51, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.02.004>
- Shi Y.J., Wu X.-C., Li J.-W., & Min N. (2017). Tempering stability of Fe-Cr-Mo-W-V hot forging die steels. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 24(10), 1145–1157. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1505-3>
- Sjöström J., & Bergström J. (2004). Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. *Journal of Material Processing Technology*, 153, 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.158>
- Smith W. F. (1993). *Structure and Properties of Engineering Alloys* (2nd Ed.), McGraw-Hill Science/Engineering/Math, New York, USA.
- Souki I., Delagnes D., & Lours P. (2011). Influence of heat treatment on the fracture toughness and crack propagation in 5% Cr martensitic steel. *Procedia Engineering*, 10, 631–637. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.105>
- Sun Y., Hanaki S., Yamashita M., Uchida H., & Tsujii H. (2004). Fatigue behavior and fractography of laser-processed hot work tool steel. *Vacuum*, 73, 655–660. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2003.12.161>
- Wilzer J., Kuepferle J., Weber S., & Theisen W. (2014). Influence of alloying elements, heat treatment, and temperature on the thermal conductivity of heat treatable steels. *Steel Research International*, 86, 1234–1241. <https://doi.org/10.1002/srin.201400294>
- Velay V., Bernhart G., & Penazzi L. (2006). Cyclic behavior modeling of a tempered martensitic hot work tool steel. *International Journal of Plasticity*, 22, 459–496. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.03.007>