



## The effect of tempering and strain aging processes on the mechanical properties of AISI H10 hot work tool steel

Demet Taştëmür<sup>ID</sup>, Süleyman Gündüz\*<sup>ID</sup>

Department of Manufacturing Engineering, Karabük University, Karabük, 78050, Türkiye

### Highlights:

- The effect of tempering on AISI H10 hot work tool steel
- Dynamic strain aging behavior of AISI H10 hot work tool steel
- Analysis of microstructure and mechanical properties

### Keywords:

- Hot work tool steels
- Dynamic strain aging
- Mechanical properties

### Article Info:

Research Article  
Received: 07.10.2019  
Accepted: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.630497

### Acknowledgement:

This work was supported by Scientific Research Projects Coordination Unit of Karabük University. Project Number: KBU-BAP-16/2-YL-072.

### Correspondence:

Author: Süleyman Gündüz  
e-mail:  
sgunduz@karabuk.edu.tr  
phone: +90 505 503 3620

### Graphical/Tabular Abstract

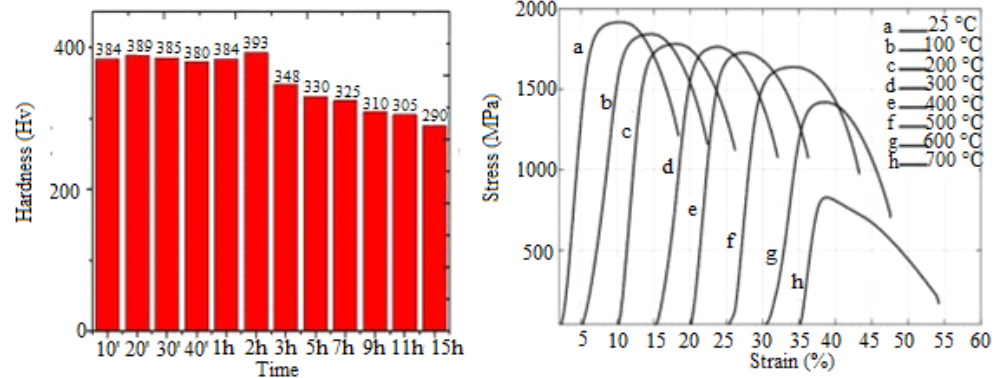


Figure A. Change in mechanical properties of H10 hot work tool steel at different tempering times and dynamic strain aging behavior

**Purpose:** This study aims to investigate the changes in the microstructure and mechanical properties of AISI H10 hot work tool steel which is used in many fields of the industry as a result of different tempering times and dynamic strain aging based on optimum tempering time.

### Theory and Methods:

Austenitization and tempering processes were carried out to examine the structural change of AISI H10 hot work tool steel. The experimental steel was quenched after austenitizing treatment at the specified temperature and then tempered at different times. After the process, microstructure and mechanical properties of the material were examined and optimum tempering time was selected for the dynamic strain aging process. Dynamic strain aging was performed at different test temperatures for a determined deformation rate.

### Results:

Increasing the tempering time at 550 °C from 10 minutes to 2 hours resulted in a gradual increase in hardness. The highest hardness was obtained as 393 Hv<sub>1</sub> in samples tempered for 2 hours. This is due to the presence of finer precipitates particles in the samples. However, the lowest hardness value was obtained as 290 Hv<sub>1</sub> in the samples tempered for 15 hours due to the presence of coarse precipitate particles. According to hot tensile test results which were obtained for the samples tempered at 550 °C for 2 hours, the strength values showed a decrease in the test temperature range of 25-400 °C, however the strength values increased when the test temperature was raised from 200 °C to 300 °C. This indicated that dynamic strain aging takes place in the tempered samples.

### Conclusion:

Dynamic strain ageing and secondary hardening occur in the AISI H10 hot work tool steel under tempered condition which showed an increase in YS and UTS at temperatures 300°C and 400°C corresponding to dynamic strain ageing region. It was also noticed that elongation remained constant as the testing temperature increased from 25 °C to 400 °C. Above 400 °C, tempered samples showed a sharp decrease in strength but a slight increase in elongation. It can be concluded that mechanical properties of AISI H10 hot work tool steel become so poor under tempered condition after tensile testing above 400 °C.



## AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerine temperleme ve yaşlanma işlemlerinin etkisi

Demet Taştemür<sup>ID</sup>, Süleyman Gündüz\*<sup>ID</sup>

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- AISI H10 sıcak iş takım çeliğine temperleme işleminin etkisi
- AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin dinamik deformasyon yaşlanma davranışı
- Mikroyapı ve mekanik özelliklerin analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.10.2019

Kabul: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.630497

### Anahtar Kelimeler:

Sıcak iş takım çelikleri,  
dinamik deformasyon  
yaşlanması,  
mekanik özellikler

### ÖZ

Bu çalışmada, 1050°C'de 1 saat östenitleme işlemi uygulandıktan sonra suda soğutulan ve ardından 550°C'de farklı zaman aralıklarında temperlenen AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca optimum parametrelerin elde edildiği 550°C'de 2 saat temperlenen numunelerin dinamik deformasyon yaşlanma davranışları araştırılmıştır. Yaşlandırma işleminde çekme deneyleri 25-700°C sıcaklık aralığında ve  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon oranında gerçekleştirilmiştir. Çekme sonucu kopan numunelerin kırık yüzeyleri incelenerek dinamik deformasyon yaşlanmasının kırılma davranışına etkisi tespit edilmiştir. Çekme sonuçları temperlenmiş numunelerin dinamik deformasyon yaşlanması ile tutarlı olarak 200°C ve 300°C'de akma dayanımında ve maksimum çekme dayanımında bir artış olduğunu, ancak % uzama değerlerinin sabit kaldığını göstermiştir. AISI H10 sıcak iş takım çeliğinde dislokasyonlar ile arayer atomları (C veya N) veya yer alan atomları (Cr veya Mo) arasındaki etkileşim nedeniyle dinamik deformasyon yaşlanmasının farklı sıcaklıklarda meydana geldiği düşünülmektedir.

## The effect of tempering and strain aging processes on the mechanical properties of AISI H10 hot work tool steel

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

- The effect of tempering on AISI H10 hot work tool steel
- Dynamic strain aging behavior of AISI H10 hot work tool steel
- Analysis of microstructure and mechanical properties

### Article Info

Research Article

Received: 07.10.2019

Accepted: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.630497

### Keywords:

Hot work tool steels,  
dynamic strain aging,  
mechanical properties

### ABSTRACT

In this study microstructure and mechanical properties of AISI H10 hot work tool steel austenitised at 1050°C for 1 hour and then cooled in water followed by tempering at 550°C for different time intervals were investigated. In addition, the dynamic strain aging behavior of the samples tempered at 550°C for 2 hours, where optimum parameters were obtained, was investigated. In the aging process, tensile tests were carried out at a temperature range of 25-700°C and at a strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . SEM analyzes were performed on the fractured samples after the tensile test in order to determine the effect of dynamic strain ageing on fracture behavior. The tensile test results indicated that tempered samples showed an increase in yield strength (YS) and ultimate tensile strength (UTS) but elongation remained constant at 200° C or 300°C consistent with dynamic strain aging. It is believed that dynamic strain ageing occurs in AISI H10 hot work tool steel at different temperatures because of interaction between dislocations and interstitial solute atoms (C or N) or substitutional atoms (Cr or Mo).

\*Sorumlu Yazar / Yazarlar / Corresponding Author / Authors : demettastemur@karabuk.edu.tr, \*sgunduz@karabuk.edu.tr /

Tel: +90 505 503 3620

1388

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sıcak iş takım çelikleri, AISI sınıflandırma sisteminde grup H olarak adlandırılırlar ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Bu çelikler ısı, basınç ve aşınma gibi ağır yüklemelere karşı dayanımlarını korumaları için özel olarak üretilen takım çeliği grubudur. Sıcak iş takım çeliklerinin en temel özellikleri, yüksek sıcaklık dayanımı, süneklik, tokluk, ısıl iletkenlik, sürtünme dayanımı, temper direnci ve aynı zamanda düşük termal genleşme düzeyine sahip olmalarıdır [1, 2].

Sıcak iş takım çelikleri, Cr, V ve Mo gibi karbür oluşturu elementlerle alaşımlanmışlardır. Bu çelikler yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında karbür oluşturu elementlerin varlığı önemli bir rol oynamaktadır, çünkü bu tip elementler çeliğin sadece yumuşamasını geciktirmekle kalmayıp aynı zamanda mukavemetini arttıran ince alaşım karbürleri halinde çökeller [3]. Sıcak iş takım çeliklerinin sertleşebilirliği yüksektir ve farklı alaşım elementlerinin varlığından etkilenir. Örneğin, Mo, çelikte %1 veya daha fazla miktarda mevcutsa, sertleştirilebilirlik büyük oranda artar. W sertleşebilirliğe az katkıda bulunurken, V elementi C'ü indirgeyerek VC şeklinde çökeltip sertleşebilirliği artırır. Temperleme sırasında ikincil sertleşme elde etmek için, östenitleme işlemi mikroyapıda anormal tane büyümesinden ve aşırı miktarda kalıntı östenit oluşumundan kaçınarak mümkün olduğu kadar çok miktarda alaşım ve C içeriğine sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır [4, 5].

Sıcak iş takım çeliklerinin östenitleme işlemi karbon çelikleri için kullanılan 750-850°C aralığının oldukça üstünde yapılmaktadır. Bunun nedeni, ötektoid altı karbon çeliklerinin, östenitin homojen olarak oluşturulmasıyla matris içerisinde sementitin hızla çözülmesidir. Bu nedenle, karbon çeliklerinde A<sub>3</sub> sıcaklığının 50°C üstünde östenitleştirme işlemi yaygın bir uygulamadır ve mikroyapı tamamen östenitik olacaktır. Sıcak iş takım çeliklerinin karbon çeliklerinden farkı, çözünmeyen birincil ve ikincil karbürlerin yapıda bulunmasıdır. Bu karbürler sıcaklık arttıkça kademeli olarak çözünüp östenitte daha fazla karbon ve alaşım elementlerinin katı eriyik içerisinde bulunmasına neden olmaktadır [6]. Östenitleme sonrası yapılan soğutma işleminde ortam olarak yağ ve hava kullanılmaktadır. Fakat literatürde yapılan araştırmalarda yağda soğutma veya havada soğutma işlemlerinin tane sınırlarında karbür oluşumuna yol açabileceği ve bunun da takım çeliğini taneler arası kırılmaya duyarlı hale getireceği ifade edilmektedir. Taneler arası kırılmanın da takım çeliklerinin kırılma direncini düşürerek çatlamlara neden olduğu gösterilmektedir [7, 8]. Tane sınırlarında bu karbür çökeltilerinin oluşumunu engellemek için daha yüksek soğuma hızına sahip suda soğutma işlemi sıcak iş takım çeliklerinin soğutulmasında kullanılmaktadır [9]. Su verme ile sertleştirme işleminde malzemenin sıcaklığı hızlı bir şekilde düşer. Çelik, sertleştirme işleminde yeterince hızlı bir şekilde soğutulursa, karbon atomlarının, östenitten ferrite dönüşmesi için kendilerini yeniden konumlandırarak zamanı

olmayacaktır. Böylelikle karbür oluşumu engellenerek karbon katı eriyik içerisinde serbest halde bulunur ve bunun sonucunda sert bir faz yapısı olan martenzit oluşur. Çelik sertleştiğinde, matris tamamen martenzite dönüşmez ve yapısında kalıntı östenit bulunur. Su verme işleminin de tabii ki riskleri vardır. Örneğin su verme işlemi ile çeliğin çatlama eğilimi artabilir ve uygun teknik kullanılmadığı takdirde malzeme yapısında sertleşmemiş bölgeler bulunabilir. Bu nedenle su verme işlemi sonrasında çatlama riskini en aza indirmek için malzeme temperlenmelidir [9, 10].

Sıcak iş takım çeliklerinin sahip olduğu mikroyapılar, temperli martenzitten ve karbür çökeltilerinden oluşmaktadır. Bu durum sıcak iş takım çeliklerinde dinamik deformasyon yaşanması davranışının oluşabileceğine bir işarettir. Çünkü dislokasyonlar ile katı eriyik içerisinde bulunan arayer atomları veya çökeltiler arasındaki elastik etkileşim deformasyon yaşanmasının ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir [11]. Deformasyon yaşanması, eğer yaşanma süreci plastik deformasyondan sonra oluşuyorsa statik deformasyon yaşanması, plastik deformasyon sırasında oluşuyorsa dinamik deformasyon yaşanması olarak adlandırılmaktadır. Dinamik deformasyon yaşanması, negatif deformasyon hızı duyarlılığına neden olabilmekle beraber plastik deformasyon sırasında soğuk ve ılık bölgelerde deformasyon sınırlanmasına da neden olabilmektedir. Bu nedenle deformasyon şekline ve mekanik özelliklere dinamik deformasyon yaşanmasının etkisi metal şekillendirme işleminin doğru tasarımı için önemlidir [12].

Yapılan literatür araştırmalarında sıcak iş takım çeliklerinde ısıl işlem şartlarına bağlı olarak mikroyapı ve mekanik özelliklerde oluşan değişim incelenmekle [13-16] birlikte dinamik deformasyon yaşanması olayının mekanik özelliklere etkisinin detaylı olarak araştırılmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle çalışmada AISI H10 sıcak iş takım çeliğinden elde edilen numuneler, östenitleme ısıl işlemi sonrası suda soğutulmuş ardından 550 °C'de farklı zaman aralıklarında temperlenmiştir. Suda soğutma işlemi östenitleme sonrası soğutma esnasında karbür oluşumunu engellemek ve daha fazla karbonu katı eriyik içerisinde serbest halde bırakmak için yapılmıştır. Yağ ve havada soğutma işlemi suda soğutma işlemine nazaran daha yavaş olduğu için yukarıda tartışıldığı gibi soğutma sırasında tane sınırlarında karbür oluşumuna neden olarak çeliği taneler arası kırılmaya duyarlı hale getirebilmektedir. Mevcut çalışmada suda soğutma ve ardından uygulanan temperleme işlemi çatlama riskini minimum düzeye düşürmek için bir arada kullanılmıştır. Daha sonra temperlenen numunelere 25-700°C sıcaklık aralığında çekme testi uygulanarak bu numunelerin dinamik deformasyon yaşanması davranışı sergileyip sergilemediği detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneysel çalışmalarda Tablo 1'de kimyasal kompozisyonu verilen AISI H10 kalite sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. 2 adet AISI H10 çeliği Ø20 mm çapında ve 1000 mm

uzunluğunda ticari olarak temin edilmiştir. Temin edilen bu çelikten ana malzeme, suda soğutma ve temperleme işlemlerinde kullanılmak üzere Ø20x10 mm boyutlarında 12 adet numune kesilmiştir.

**Tablo 1.** AISI H10 çeliğinin kimyasal bileşimi  
(Chemical composition of AISI H10 steel)

Kimyasal Bileşim								
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Ağırlıkça (%)	0,31	0,25	0,30	0,017	<0,001	3,19	2,73	0,50

Tablo 2’de numunelere uygulanan ısıl işlem parametreleri verilmiştir. Numuneler östenit bölgesi sıcaklığı olan 1050°C’de 1 saat östenitleme işleminden sonra suda soğutulmuştur. Ardından 550°C’de farklı sürelerde temperlenmiştir. Ana malzeme, suda soğutulan ve suda soğutma işleminden sonra temperlenen numunelerin mikrosertlik ölçümleri Shimadzu marka sertlik cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 1 kg yük altında (HV<sub>i</sub>) gerçekleştirilmiştir. Her numuneden 5 adet sertlik ölçümü yapıldıktan sonra ortalama değer bulunarak mikro sertlik değeri belirlenmiştir. Farklı temperleme süreleri sonrasında malzemenin sertlik ve mikroyapısal değişikliği göz önüne alınmış ve optimum parametre değeri olarak 2 saat temperleme süresi seçilmiştir [17].

**Tablo 2.** Numunelere uygulanan ısıl işlem parametreleri  
(Heat treatment parameters applied to samples)

Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östenitleme Süresi (dk.)	Temperleme Sıcaklığı (°C)	Temperleme Süresi
			10 min.
			20 min.
			30 min.
			40 min.
			1 h.
			2 h.
1050	60	550	3 h.
			5 h.
			7 h.
			9 h.
			11 h.
			15 h.

Sıcak çekme deney numuneleri TS EN ISO 6892-2 normlarına göre hazırlanmıştır. İlk önce Ø20 mm çapında ve 70 mm uzunluğunda kesilen numuneler 1050°C’de 1 saat tavlandıktan sonra suda soğutulmuş ve ardından 550°C’de 2 saat temperlenmiştir. Temperlenen numuneler torna tezgahında sırasıyla alın tornalama, hassas boyuna işleme ve diş çekme işlemlerinden sonra 30 mm çekme uzunluğunda ve 5 mm çapında standartlara uygun hale getirilmiştir. Daha sonra çekme numunesi boyutlarında hazırlanan numuneler 25°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C’de sıcak çekme testine tabi tutulmuştur. Bu işlemde her bir test sıcaklığı için 2 adet olmak üzere toplamda 16 adet deney numunesi kullanılmıştır. Şekil 1’de standartlara uygun olarak hazırlanmış sıcak çekme deney numunesi gösterilmektedir.



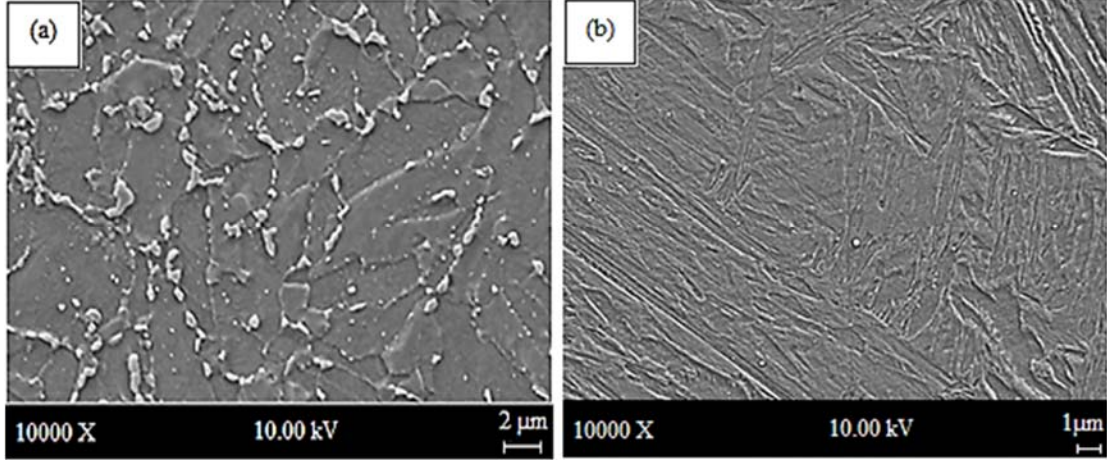
**Şekil 1.** Çekme deney numunesi (Tensile test specimen)

Sıcak çekme deneyleri, MTS (100 kN Servohidrolik Test Cihazı) marka test cihazı kullanılarak 25°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C sıcaklıklarında,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon oranında gerçekleştirilmiştir. Her test sonrası gerilme-uzama diyagramları elde edilerek, bu diyagramlardan farklı sıcaklıklarda çekme testine tabi tutulan her numune için maksimum çekme dayanımı, akma dayanımı (%0,2), yüzde uzama (%) ve deformasyon sertleşmesi oranı ( $\delta y$ ) belirlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri, X50-X1000 büyütme kapasitesine sahip Nikon Epiphot marka, Clemex yazılımıyla desteklenen optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numunenin farklı bölgelerinden değişik büyütme oranlarında görüntüler alınarak mikroyapıda meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Geleneksel numune hazırlama yöntemleri kullanılarak hazırlanan numuneler metanol içerisinde %3 nitrik asit konularak elde edilen Nital çözeltisinde dağlanmıştır. Ayrıca SEM mikroyapı incelemesinde de kullanılmış çekme numunelerinin kırık yüzey incelemesi Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile donatılmış Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 25°C, 200°C, 400°C ve 700°C’de çekme testi uygulanan temperlenmiş numunelerin kırık yüzey ve mikroyapı görüntüleri alınarak dinamik deformasyon yaşlanmasının AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin kırılma davranışını ve mikroyapısını nasıl etkilediği incelenmiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 2a ve Şekil 2b ana malzeme ve 1050°C’de 1 saat östenitleme işlemi yapıldıktan sonra suda soğutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekil 2a’da verilen ana malzemenin mikroyapısı, ferrit matrisi içerisinde dağılmış olan alaşım karbürlerinden oluşmaktadır. Suda soğutulmuş numunelerin mikroyapısı ise Şekil 2b’de görüldüğü gibi martenzit fazından meydana gelmiştir. Ayrıca, Şekil 2b detaylı olarak incelendiğinde martenzit fazı içerisinde dağılmış az miktarda küresel çökeltilerin olduğu görülmektedir.

Martenzitik yapı hızlı soğuma neticesinde difüzyonsuz dönüşüm ile oluşan çok sert ve gevrek bir yapıdır. Soğuma hızı artırılıp, belirli bir değerin üzerine çıkarıldığında karbon atomları difüzyon ile katı çözeltilen ayrılmak için yeterli zaman bulamazlar. Demir atomları bir miktar hareket etseler



**Şekil 2.** (a) Ana malzemenin ve (b) 1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan numunenin mikroyapı resimleri. (Microstructure images of (a) As-received sample, (b) As-quenched sample after austenitizing at 1050°C for 1 hour.)

bile, karbon atomları çözelti içerisinde hapsedildiklerinden kafes yapısı HMK yapıya dönüşmez ve farklı bir yapı oluşur. Hızlı soğuma sonucunda oluşan bu yapıya “martenzit” adı verilir. Martenzit, karbon ile aşırı doymuş hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya sahip bir katı çözüldür [18].

1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan ve ardından 550°C’de 10 dakika, 30 dakika, 1 saat, 2 saat 5 saat ve 11 saat temperlenen numunelerin mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 3a-Şekil 3f’de görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi su verme işlemi sırasında oluşan martenzit 550°C’de yapılan temperleme zamanının 10 dakikadan 2 saate çıkması ile tetragonal yapısını kaybederek  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) tip karbürler ile düşük karbonlu martenzite dönüşmüştür. Bu karbürlerin çökmesi özellikle AISI H10 sıcak iş takım çeliklerinde sertliğin artmasına neden olmaktadır. Çökelen karbürler temperleme süresinin 3 saat-15 saat aralığına çıkması durumunda kabalaştığı görülmüştür. Bu durum çeliğin metalografik yapısında geniş ferrit alanlarının oluşmasına neden olmuştur [19].

Tablo 3, ana malzeme, 1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan ve suda soğutma işlemi sonrası 550°C’de farklı zaman aralıklarında temperlenen numunelerin sertlik değerlerini göstermektedir. Ana malzemenin sertlik değeri 202  $HV_1$  iken su verilen numunenin sertlik değeri artarak 369  $HV_1$  olarak ölçülmüştür. Bu durum su verilen numunelerde martenzit fazının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Çeliklerde su verme işlemi ile elde edilen martenzitik yapı sert ve gevrek. Ayrıca, martenzitik dönüşüm çelik içerisinde iç (kalıntı) gerilmelerin oluşmasına da yol açar [20].

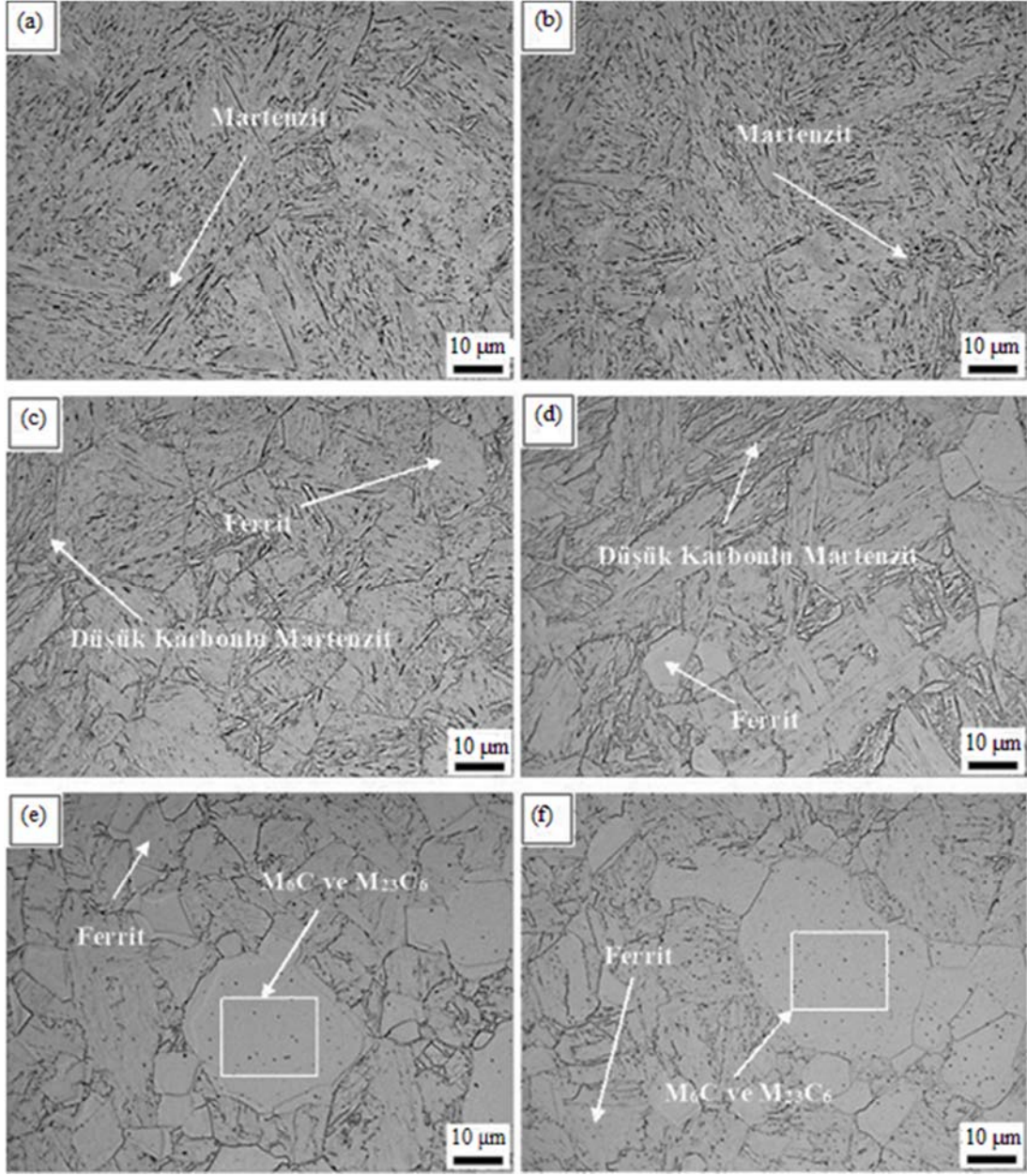
550°C’de yapılan temperleme süresinin 10 dakikadan 2 saate çıkması sertliğin kademeli olarak artmasına neden olmuştur. En yüksek sertlik 2 saat temperlenen numunelerde 393  $HV_1$  olarak elde edilmiştir. Sertliğin yüksek olması temperleme esnasında  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) gibi karbürlerin çökmesinden kaynaklanmaktadır [21]. Bu karbürlerin

çökmesi, özellikle AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin sertliğinde artışa neden olmuştur.

550°C’de yapılan temperleme süresinin 2 saatten 15 saate çıkması sertliğin kademeli olarak düşmesine neden olmuştur. Temperleme işlemi ile martenzitik yapıya enerji verildiğinde karbon karbür olarak çökler, demir ise hacim merkezli kübik yapıya dönüşür. Temperleme sıcaklığı arttıkça veya sabit sıcaklıkta temperleme süresi arttıkça karbonun difüzyon hızı artar ve  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) gibi karbürler hızla büyüyerek birleşirler. Kabalaşan karbürler dislokasyonların hareketini engelleyemez ve bunun sonucunda sertlik düşer [21]. 550°C’de 15 saat temperlenen numunelerin en düşük sertlik değerine sahip olması kabalaşmış karbürlerin bu numunelerde bulunmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek sertlik değeri 550°C’de 2 saat temperlenen numunelerde elde edilmiştir. Bu numuneler 25-700°C sıcaklık aralığında sıcak çekme testine tabi tutulmuştur. Test sonrası elde edilen maksimum çekme dayanımı, %0,2 akma dayanımı ve % uzama değerleri Tablo 4’de verilmiştir. 2 saat süre boyunca temperlenen numunelerin maksimum çekme dayanımı ve akma dayanımı (%0,2) sırasıyla 1918 MPa ve 1588 MPa’dır. 100-400°C test sıcaklığı aralığında ise numunelerin maksimum çekme dayanımında ve akma dayanımında (%0,2) az miktarda bir düşüş meydana gelerek sırasıyla 1728 MPa and 1430 MPa değerleri seviyesine inmiştir.

Ayrıca, test sıcaklığının 200°C’den 300°C’ye çıktığı durumda numunelerin maksimum çekme dayanımında ve %0,2 akma dayanımında bir artış gerçekleşirken, 400-700°C sıcaklık aralığında devamlı bir düşüşün olduğu görülmüştür. Numunelerin % uzama değeri 25-600°C sıcaklık aralığında fazla bir değişim göstermezken, 600°C sonrası sıcaklıkla beraber artış göstermiştir. Dayanım değerlerinin 25-400°C test sıcaklığı aralığında minimum düşüş göstermesi, ayrıca test sıcaklığının 200°C’den 300°C’ye çıktığında dayanım değerlerinin artması temperlenen numunelerde dinamik deformasyon yaşlanmasının oluştuğunu göstermektedir.



**Şekil 3.** 1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan ve ardından 550°C’de (a) 10 dakika, (b) 30 dakika, (c) 1 saat, (d) 2 saat (e) 5 saat, (f) 11 saat temperlenen numunelerin mikroyapı görüntüleri.  
(Microstructure images of the samples that quenched after austenitizing at 1050°C for 1 hour and then tempered at 550°C for (a) 10 min., (b) 30 min., (c) 1 h., (d) 2 h., (e) 5 h., (f) 11 h.

Benzer sonuçlar Keller vd. [22] yapmış olduğu çalışmada da görülmektedir. Yazarlar çalışmalarında T91 martenzitik çeliğin dinamik deformasyon yaşlanma davranışlarını farklı sıcaklık ve deformasyon oranlarında araştırmışlardır. T91 martenzitik çelikte dinamik deformasyon yaşlanmasının bütün deformasyon oranlarında ve 150-450°C sıcaklık aralığında oluştuğunu göstermişlerdir.

Ayrıca, bu çalışmayı gerçekleştiren yazarlar başka bir çalışmalarında AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin dinamik yaşlanma özelliklerini ana malzeme ve suda soğutma şartları için araştırmışlardır [23]. Yaptıkları çalışmada ana malzeme

ve 1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan numuneler 25-700°C sıcaklıklarında,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon oranında sıcak çekme testine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar bu çalışma ile karşılaştırıldığında temperlenen numunelerde dayanım düşüşü ana malzeme ve suda soğutulan numunelere oranla minimal seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu etki temperleme sonrası malzeme yapısında bulunan alaşım karbürleriyle doğru orantılı olsada dinamik deformasyon yaşlanması bu dayanım direncine 100-400°C sıcaklık aralığında katkı sağlamıştır. 400°C üzeri test sıcaklığına çıkıldığında temperlenen numunelerin çekme dayanımdaki düşüşün suda soğutulan numunelere göre daha

az olduğu görülmüştür. Bu durum temperlenen numunelerde 400-700°C test sıcaklığı aralığında Cr, Mo veya V karbonitrürlerin oluştuğunu ve çeliğin çekme dayanımını su verilen numunelere göre daha yüksek tuttuğunu göstermektedir.  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) gibi karbürlerin sıcak iş takım çeliklerinde oluşması bu çeliklerin yüksek sıcaklık dayanımını arttırmaktadır [3].

**Tablo 3.** Ana malzeme, 1050°C'de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulan ve suda soğutma işlemi sonrası 550°C'de farklı zaman aralıklarında temperlenen numunelerin sertlik değerleri. (Hardness values of as-received, as-quenched and tempered samples at 550°C for different time periods)

Zaman	Sertlik (HV <sub>1</sub> )
Ana malzeme	202
Su verilen	369
10 min.	384
20 min.	389
30 min.	385
40 min.	380
1 h.	384
2 h.	393
3 h.	348
5 h.	330
7 h.	325
9 h.	310
11 h.	305
15 h.	290

**Tablo 4.** Temperlenen numunelerin sıcak çekme test sonuçları. (Hot tensile test results of tempered samples)

Test Sıcaklığı (°C)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
25	1918	1588	14
100	1843	1701	13
200	1723	1415	14
300	1739	1445	13
400	1728	1430	14
500	1638	1348	15
600	1420	1256	14
700	829	738	19

Şekil 4'de 25-700°C sıcaklık aralığında  $1 \times 10^{-3} s^{-1}$  deformasyon oranında gerçekleştirilen temperlenmiş numunelerin gerilme-uzama diyagramları verilmiştir. 25-700°C sıcaklık aralığında yapılan test sonuçları incelendiğinde gerilme-uzama diyagramlarının herhangi bir belirgin akma ve testere dışı davranış göstermediği tespit edilmiştir. Testere dışı davranış arayer atomlarının dislokasyonlara yayılması ile onların hareketlerini engellemesiyle oluşmaktadır [24, 25]. Bu engelleme arayer

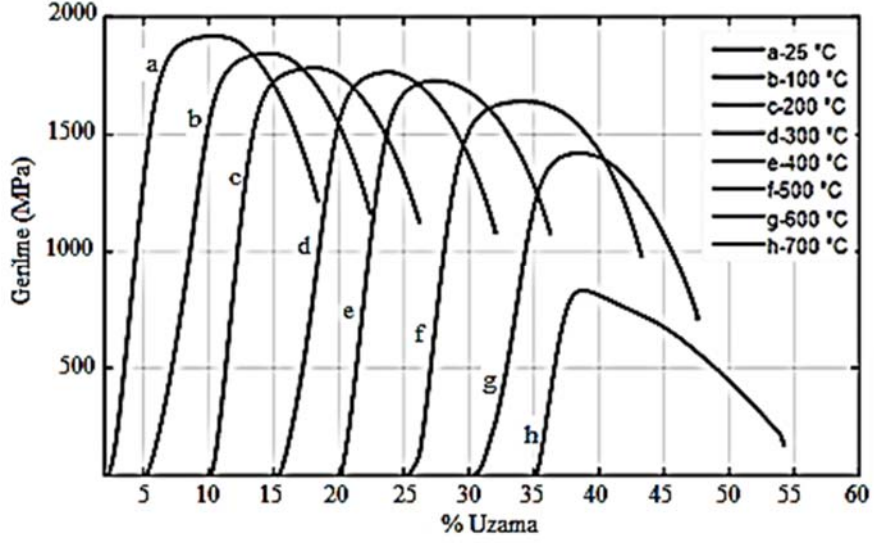
atomlarının ve dislokasyonların sıcaklığın yüksek olmasından dolayı hareket halinde olması durumunda gerçekleşmektedir [23]. Fakat dinamik deformasyon yaşlanması, malzemelerde testere dışı davranış görülmeden de oluşabilir ve literatürde testere dışı davranış göstermeden oluşan dinamik deformasyon yaşlanması ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [27, 28].

Ayrıca yapılan bu çalışmada, dinamik deformasyon yaşlanma sertleşmesinin oluşup oluşmadığını anlayabilmek için temperlenen numunelerde oluşan deformasyon sertleşmesi oranı da ( $\delta y$ ) hesaplanmıştır.  $\delta y$  değerinde artış dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluştuğunu gösteren en önemli parametrelerden biridir.  $\delta y$  değeri, 25-700°C sıcaklık aralığında test edilen bütün numunelerin maksimum çekme dayanımıyla %0,2 akma dayanımı arasındaki farktır. Şekil 5, temperlenen numunelerin sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan ( $\delta y$ ) değerlerini göstermektedir. Şekil 5'den görüldüğü gibi temperlenen numunelerin  $\delta y$  değerleri 200-400°C test sıcaklığı aralığında düşmeden sabit bir değerde kalmıştır. Bu sonuçlar suda soğutulduktan sonra temperlenen numunelerin dinamik yaşlanma sertleşmesinden etkilendiğini göstermektedir. Gündüz [29] yapmış olduğu çalışmada niyobyum mikroalaşım çeliğinde dinamik yaşlanma sertleşmesi olayını ana malzeme, havada ve paslanmaz çelik tüp içerisinde soğutma şartları için incelemiştir. Bu amaçla, farklı şartlar için hazırlanan numuneler, 25-450°C sıcaklık aralığında test edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda 200-400°C sıcaklık aralığında numunelerin deformasyon sertleşmesi üstü değerlerinde artış görülmüş olup bu sıcaklık aralığında dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluştuğu ifade edilmiştir.

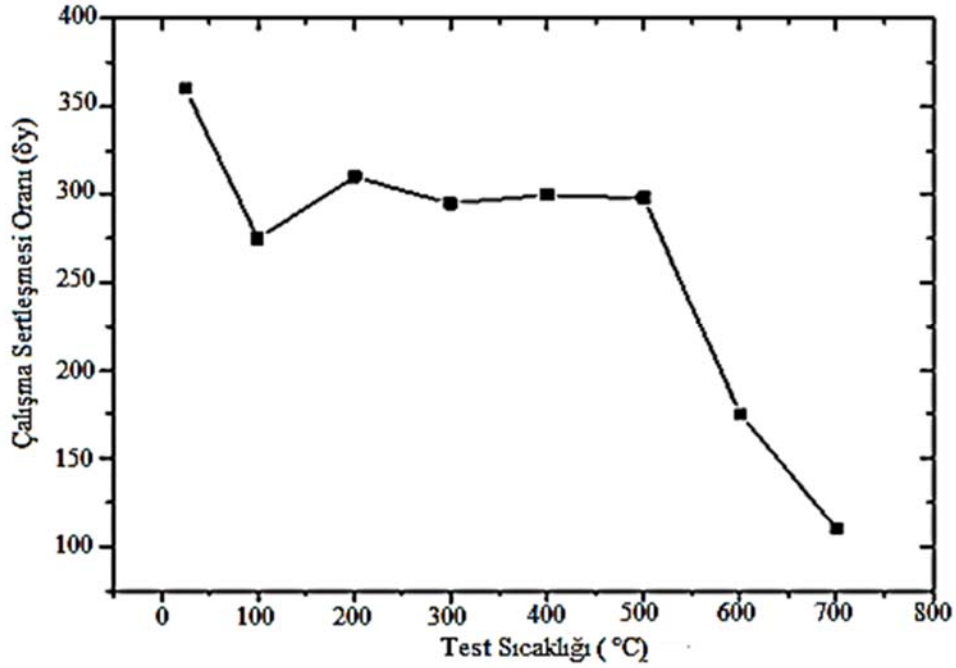
Şekil 6, 1050°C'de 1 saat östenitleme işlemi yapıldıktan sonra suda soğutulan ve ardından 550°C'de 2 saat temperlenen numunelerin farklı sıcaklıklarda çekme testi sonrası elde edilen SEM görüntüleri yer almaktadır. 2 saat temperleme işlemi sonucu yapı temperlenmiş martenzit, ferrit ve alaşım karbürlerinden oluşmaktadır. Sertleştirme ve bunu takiben temperleme işlemi martenzitik yapının dönüşmesine ve birincil karbürlerin oluşmasına neden olmuştur.

Şekil 6a-6d'de görüldüğü gibi su verme işlemi sırasında oluşan martenzit, 550°C'de 2 saat temperlendiğinde tetragonal yapısını kaybederek  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) tip karbürler ile düşük karbonlu martenzite dönüşmüştür. Bu karbürlerin çökmesi özellikle AISI H10 sıcak iş takım çeliklerinde dayanımın artmasına neden olmaktadır. Çökelen karbürler çok küçük olduklarından ancak elektron mikroskopunda görülebilir [19]. Mevcut çalışmada görülen bu karbürler, özellikle temperlenen numunelerin 100-400°C sıcaklık aralığında test edildiğinde en yüksek %0,2 akma dayanım ve maksimum çekme dayanım değerlerine sahip olmasına neden olmuştur.

Şekil 6e'de 400°C'de test edildikten sonra suda soğutulan ve ardından 550°C'de 2 saat temperlenen numunenin farklı noktalarından (1-3) alınan EDS analiz sonuçları



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanan temperlenmiş numunelerin gerilme-uzama diyagramları.  
(Tensile stress-strain curves of the tempered samples tested at different temperatures)

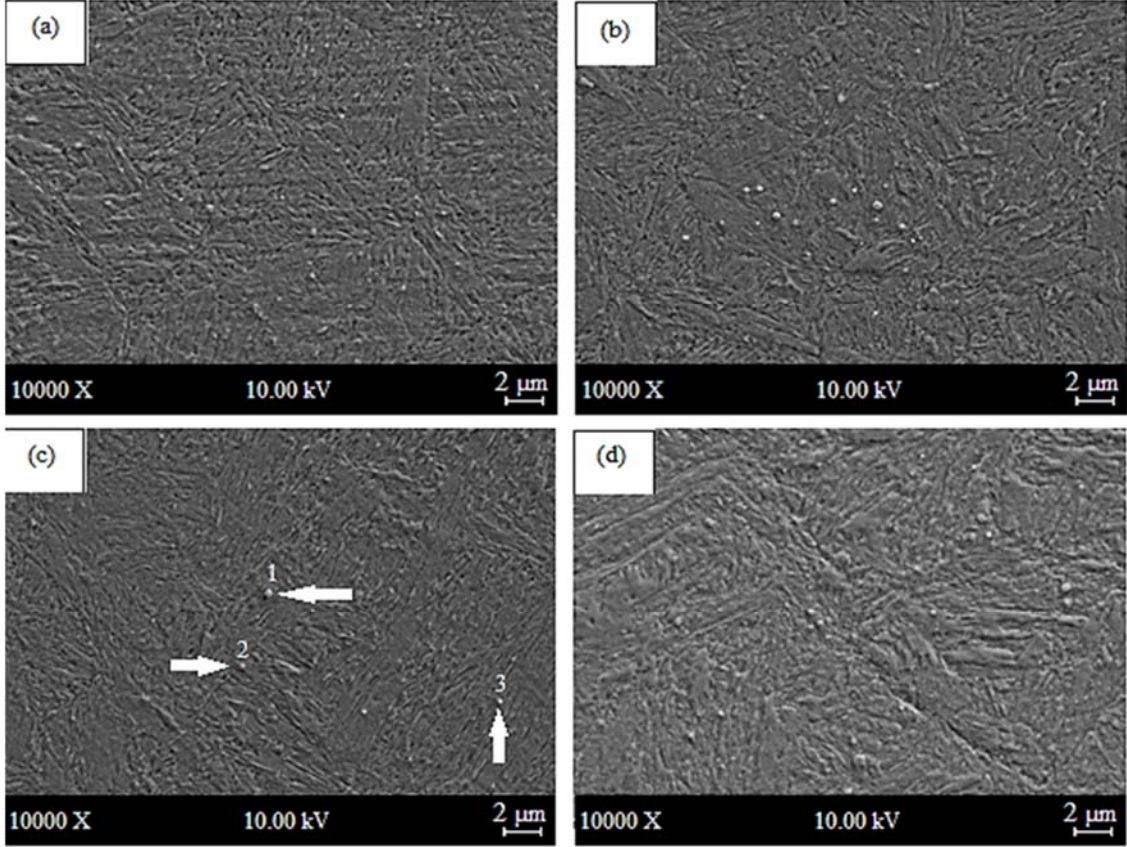


Şekil 5. Temperlenen numunelerin farklı test sıcaklıklarında elde edilen deformasyon sertleşmesi oranı ( $\delta y$ ) değerleri  
(Workhardening rate ( $\delta y$ ) of the tempered samples tested at different temperatures)

görülmektedir. 1 noktası Mo ve C, 2 noktası Fe ve C içerirken 3 noktası Fe, C ve V içerdiği tespit edilmiştir. 400°C'de test edilen temperlenmiş numune bu elementlerin varlığı,  $M_2C$  ( $Mo_2C$ ),  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve MC (VC) gibi karbür çökeltilerinin oluştuğunu göstermektedir. AISI H10 sıcak iş takım çeliğinde temperleme esnasında  $M_2C$  ( $Mo_2C$ ),  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve MC (VC) ince yapıli karbür oluşumu gerçekleşmektedir [30]. Temperlenen H10 takım çeliği matrisindeki ince yapıli ikincil karbürler, MC ve  $M_2C$

türünde olabilmektedir. Şekil 7, 25°C, 200°C, 400°C ve 700°C'de test edilen temperlenmiş numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verilmektedir. 25°C, 200°C ve 400°C'de test edilen temperlenmiş numunelerin ayrılma düzlemleri ve petekli yapıdan oluşan kısmen sünek kısmen de gevrek bir kırılma davranışı sergilediği görülmüştür. Bu durum, arayer atomları veya çökeltiler ile hareketli dislokasyonlar arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır [30]. Kısmen sünek ve kısmende gevrek



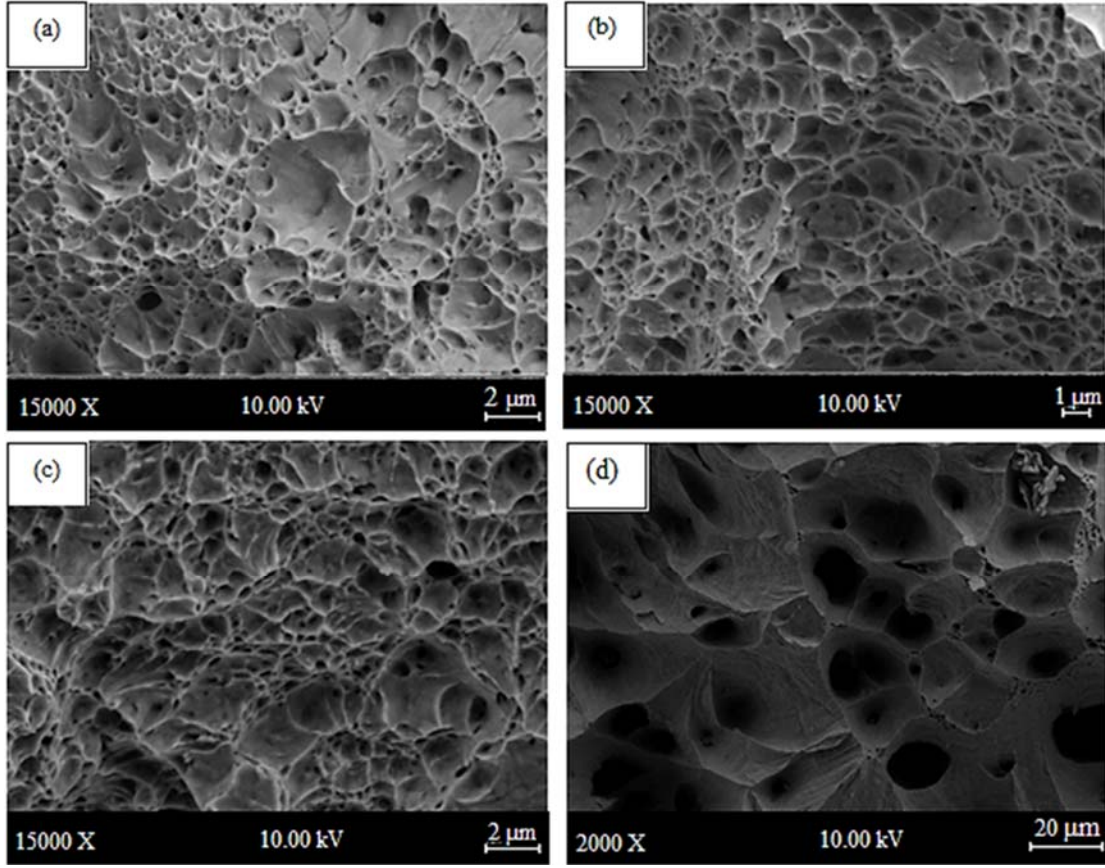


Spektrum	Kütle Yüzdesi (%)							
	C	Si	P	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	3.80	0.57	0.00	1.50	4.08	0.72	75.70	13.64
2	3.86	0.29	0.00	0.53	3.62	0.24	87.53	3.93
3	4.05	0.45	0.00	5.39	3.43	0.36	79.28	7.04
Ortalama Değer	3.90	0.44	0.00	5.39	3.43	0.36	79.28	7.04
Sigma	0.13	0.14	0.00	2.57	0.34	0.25	6.07	4.96
Ortalama Sigma	0.08	0.08	0.00	1.48	0.19	0.14	3.50	2.86

**Şekil 6.** Temperlenmiş numunelerin a) 25°C, b) 200°C, c) 400°C ve d) 700°C'de test edildikten sonra elde edilen SEM görüntüleri ve e) 400°C'de test edilen numuneden alınan EDS analiz sonuçları. (SEM images of the tempered samples tested at (a) 25°C, (b) 200°C, (c) 400°C (d) 700°C and (e) correspondig EDS of the indicated particles in samples tested at 400°C)

bir davranışın görülmesi özellikle 200°C ve 400°C test edilen temperlenmiş numunelerde dinamik deformasyon yaşanma sertleşmesinin oluştuğunu göstermektedir. Mukherjee ve Sellars [31], %0,87-%11,7 oranında Cr ihtiva eden temperlenmiş martenzit yapısına sahip Fe-Cr-C çeliklerinde dinamik deformasyon yaşanma davranışını araştırmışlardır. Bu çeliklerde dinamik deformasyon yaşanmasının, 400°C test sıcaklığına kadar Cr-C elementlerinin katı eriyik içerisinde serbest halde veya çökelti halinde bulunması durumunda dislokasyon hareketini engellemesi ile oluştuğunu görmüşlerdir. Test sıcaklığının 700°C'ye çıkması ile petekli yapı bütün yüzeyi kaplayarak % uzama ve kesit daralmasının artmasına neden olmuştur. Bu durum, mikroboşlukların çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi

ile sünek bir kırılma moduna işaret etmektedir [32]. Kırılma yüzeyinde bulunan küçük çukurlarda bazı çökelti oluşumları temperlenmiş numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca 25°C'de çekme testine tabi tutulan numunelerde transgranüler (tane içi) kırılma tipi gözlenmiştir. Test sıcaklığının 200°C, 400°C ve 700°C'ye çıkması ile kırık yüzeyde derin çukurcuklar oluşarak intergranüler (taneler arası) kırılma meydana gelmiştir. Metallerde kırılma tipi sıcaklık arttıkça transgranüler kırılmadan intergranüler kırılmaya doğru geçiş göstermektedir. Transgranüler kırılmada klivaj düzlemleri veya kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıf olduğunda kırılma tane içindeki uygun kayma düzlemleri ve klivaj düzlemleri boyunca olur. İntergranüler kırılmada ise



Şekil 7. Temperlenmiş numunelerin a) 25°C, b) 200°C, c) 400°C ve d) 700°C’de test edildikten sonra elde edilen kırık yüzey SEM görüntüleri  
(SEM images of fracture surfaces for tempered samples tested at a) 25°C, b) 200°C, c) 400°C ve d) 700°C)

tane sınırlarının daha zayıf olması sebebi ile kırılma tane sınırı boyunca gerçekleşir [33].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AISI H10 sıcak iş takım çeliğinden elde edilen numuneler 1050°C’de 1 saat östenitlendikten sonra suda soğutulularak 550°C’de farklı zaman aralıklarında temperlenmiştir. Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği 2 saat temperlenen numunelerin dinamik deformasyon yaşlanma davranışları, 25-700°C test sıcaklığı için  $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ ’lik bir deformasyon oranında yapılan çekme testi sonrası incelenmiştir. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Su verme işlemi sonrası AISI H10 sıcak iş takım çeliği martenzitik yapı göstermiştir. Fakat, 550°C’de yapılan temperleme zamanının 10 dakikadan 2 saate çıkması ile martenzit tetragonal yapısını kaybederek  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) tip karbürler ile düşük karbonlu martenzite dönüşmüştür. Çökelen karbürlerin temperleme süresinin 3 saat-15 saat aralığına çıkması durumunda kabalaştığı görülmüştür. Bu durum çeliğin metalografik yapısında geniş ferrit alanlarının oluşmasına neden olmuştur.
- 550°C’de yapılan temperleme süresinin 10 dakikadan 2 saate çıkması sertliğin kademeli olarak artmasına neden olmuştur. En yüksek sertlik 2 saat temperlenen numunelerde 393 HV<sub>1</sub> olarak elde edilmiştir. Sertliğin yüksek olması temperleme esnasında  $M_6C$  ( $Mo_6C$ ) ve  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ) gibi karbürlerin çökmesinden kaynaklanmaktadır. Temperleme süresinin 3 saat-15 saat aralığına çıkması sertliğin kademeli olarak düşmesine neden olmuştur. Bu durum martenzitin özelliğini kaybederek yapıda geniş ferrit alanlarının oluşmasının ve karbürlerin kabalaşmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.
- Temperlenen H10 sıcak iş takım çeliğinde dinamik deformasyon yaşlanması ve ikincil sertleşme, dinamik deformasyon yaşlanma bölgesine karşılık gelen 200°C ve 400°C sıcaklık aralığında oluşmaktadır. Bu sıcaklık aralığında test edilen temperlenmiş numunelerin akma ve çekme dayanımları artış gösterirken % uzama değerleri sabit kalmıştır. 400°C’nin üzerindeki test sıcaklıklarında ise dayanım değerleri düşmüştür.
- 25°C, 200°C ve 400°C’de test edilmiş suda soğutulan ve ardından temperlenen numunelerin kırık yüzeylerinde, petekli yapı ve ayrılma düzlemleri (klivaj düzlemi) birarada görülmüştür. Elde edilen bu sonuç 200°C ve 400°C’de test edilen numunelerin % uzama değerlerinin

sabit kalması ile paralellik göstermektedir. Test sıcaklığının 700°C'ye çıkmasıyla birlikte % uzama artmış ve kırılma yüzeyinde petekli yapı tekrar gözlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: KBU-BAP-16/2-YL-072.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ASM International Handbook Committee, Casting. In: Metals Handbook 9th ed., Cilt 15, Editör: Sully LJD, ASM International, Ohio, 1988.
2. ASM International Handbook Committee, ASM Speciality Handbook: Tool Materials, Editör: Davis J.R., ASM International, Ohio, 1995.
3. Sjöström J., Chromium martensitic hot-work tool steels, Ph. D Thesis, Karlstad University, Department of Materials Engineering, Karlstad, 2004.
4. Roberts G., Krauss G., Kennedy R., Tool Steels 5th ed., ASM International, Ohio, 1998.
5. Arain A., Heat treatment and toughness behavior of tool steels (D2 and H13) for cutting blades, M. Sc. Thesis, Toronto University, Department of Metallurgy and Materials Science, Toront, 1999.
6. Mesquita R.A., Tool Steels Properties and Performance, CRC Press, Abingdon, 45-46, 54-56, 102-105, 140-145, 2016.
7. Arain A., Heat treatment and toughness behavior of tool steels (D2 and H13) for cutting blades, M. Sc. Thesis, Toronto University Department of Metallurgy and Materials Science, Toront, 16-17, 1999.
8. Sato T., Nishizawa T. and Murai K., Study on carbides in commercial special steels by Electrolytic isolation (v) on carbides in several cold-working die steels, Tetsu-to-Hagane, 44 (1958), 565-570, 2009.
9. Böhrer Uddeholm Czech Republic, Heat treatment of tool steel 8nd ed., Uddeholms AB, Werkzeuge, 5-7, 2012.
10. Szumera J. A., The Tool Steel Guide, Industrial Press Inc., New York, 58-59, 66-67, 2003.
11. Medvedeva A., Bergström J., Gunnarsson S., Andersson J., High-temperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels, Mater. Sci. Eng., A, 523 (1-2), 39-46, 2009.
12. Kohandehghan A.R., Sadeghi A.R., Akhgar J.M., Serajzadeh S., Investigation into dynamic strain aging behaviour in high carbon steel, Ironmaking Steelmaking, 37 (2), 155-160, 2010.
13. Zhou Q., Wu X., Shi N., Li J. and Min N., Microstructure evolution and kinetic analysis of DM hot-work die steels during tempering, Mater. Sci. Eng., A, 528, 5696-700, 2011.
14. Leskovšek V., Šuštaršič B., Jutriša G., The influence of austenitizing and tempering temperature on the hardness and facture toughness of hot worked H11 tool steel; J. Mater. Process. Technol., 187, 328- 334, 2006.
15. Qamar S.Z., Effect of Heat Treatment on mechanical properties of H11 tool steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 35 (2), 115-120, 2009.
16. Okuno T., Effect of microstructure on the toughness of hot work tool steels, AISI H13, H10, and H19., Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 27 (1), 51-59, 1987:
17. Taştemür D., AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin dinamik deformasyon yaşlanma özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018.
18. Savaşkan T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitapevi, İstanbul, 2009.
19. Honeycombe R. W. K., Bahadreshia H. K. D. H., Steels Microstructure and Properties 2 ed., Editör: Arnold E., London, 1995.
20. Kayalı S., Çimenoglu H., Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, Bilim Teknik Yayınları, İstanbul, 1995.
21. Gladman T., The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, CRC Press, London, 1997.
22. Keller C., Margulies M.M., Guillot I., Experimental analysis of the dynamic strain ageing for a modified T91 martensitic steel, Mater. Sci. Eng., A, 536, 273-275, 2012.
23. Taştemür, D., Gündüz S., The Effect of Heat Treatment on Dynamic Strain Aging Behaviour of AISI H10 Hot Work Tool Steel, Mater. Res., 21(1), 1-10, 2018.
24. Beukel, V.D.A., Theory of the effect of dynamic strain ageing on mechanical properties, Phys. Status Solidi A, 30, 197-206, 1975.
25. Lou S., Northwood D. O., Elevated temperature mechanical properties and dynamic strain aging in pressure vessel quality steel plate, Can. Metall. Q., 131, 225-229, 1992.
26. Mulford R.A., Kocks U.F., New observations on the mechanisms of dynamic strain ageing and of jerky flow, Acta Metall., 27,1125-1134, 1979.
27. Baird J.D., The effect of strain ageing due to interstitial solutes on the mechanical properties of metal, Metallurgical Reviews, 16, 1-18, 1971.
28. Eisenhüttenleute V. D., Steel: A Handbook for Materials Research and Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
29. Gündüz S., Dynamic strain ageing effects in niobium microalloyed steel, Ironmaking Steelmaking, 29, 341-346, 2002.
30. Smith W.F., Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill, New York, 1981.
31. Mukherjee T., Sellars C.M., Tensile properties of tempered chromium steels in the temperature range 0°C to 700°C, Metall. Trans. B, 3 (4), 953-962, 1972.
32. Callister W.D., Rethwisch D.G., Materials Science and Engineering 8th Ed., John Wiley and Sons, New York, 2011.
33. Dieter G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, New York, 1988.

