

3 VE 5 KROMLU ÇELİKLERDE TANTALYUM VE KROM İLAVESİNİN MİKROYAPIYA VE ÇENTİK DARBE DİRENCİNE ETKİSİ

Gökhan ARICI¹, Mustafa ACARER², Mesut UYANER³

¹Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya
Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye
garici@ktun.edu.tr, macarer@selcuk.edu.tr, muyaner@erbakan.edu.tr

Özet

Krom molibden (tungsten) [Cr-Mo (W)] çelikleri yüksek sıcaklık ve basınçlı buharın geçtiği petrokimya endüstrisindeki, enerji santrallerindeki vb. kullanılan borularda tercih edilmektedir. Bu şartlarda gerekli mukavemetin sağlanması çelikteki alaşım elementlerine bağlıdır. Alaşım elementlerinin kompozisyonlarının değişmesi çeliğin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bu çalışmada, daha önce üretimi yapılan Cr-Mo (Cr-W) çeliklerine alternatif olabilecek, ağırlıkça % 3, % 5 Cr ve % 3 W ana alaşım elementlerini içeren düşük Cr'lu çelikler döküm yolu ile üretilip sıcak olarak haddelenmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda Cr ve Ta içeren çeliklerin mikroyapıları ve çentik darbe dirençleri incelenmiştir. 3 Cr'lu alaşımlarda mikroyapıda ferrit ve beynit gözlemlenirken, 5 Cr'lu alaşımlarda mikroyapıda beynit ve martenzit gözlemlenmiştir. Ayrıca, Cr ve Ta ilaveleri alaşımların sünekliklerinde azalmaya sebep olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Cr-W Çelikleri, Çentik Darbe Direnci, Tantalum, Krom

THE EFFECT OF TANTALUM AND CHROMIUM ADDITION ON MICROSTRUCTURE AND NOTCH IMPACT STRENGTH IN 3 AND 5 CHROMIUM STEELS

Abstract

Chromium molybdenum (tungsten) (Cr-Mo (W)) steels are widely used for the high pressure and temperature use in pipes in petrochemical industry and power plants.

Providing the required strength under these conditions depends on the composition of the steel. The change in the ratio of alloying elements changes the microstructural and mechanical properties of steel. In this study, low chromium steels containing 3% and 5% Cr and 3% W as major alloying elements, which may be alternative to Cr-Mo (Cr-W) steels currently being produced, were produced by casting and hot rolled. In this study, microstructure and the notch toughness of steels which contain different amounts of Cr and Ta were investigated. The results showed that 3 Cr steels have a microstructure consist of bainite and ferrite, whereas 5 Cr steels have a microstructure consist of bainite and martensite. The addition of Cr and Ta cause a decrease in ductility of the alloys.

Keywords: Cr-W Steels, Notch Toughness, Tantalum, Chromium

1. Giriş

Ekonomik ve çevresel kaygılar bilim insanlarını çevreye duyarlı (CO₂ salınımı az) yeni enerji kaynaklarının bulunması ve bununla birlikte enerji verimliliğinin artırılması konusunda araştırmalara yöneltmiştir. Enerji santralleri en önemli enerji üretim tesisleridir. Daha yüksek verim daha yüksek çalışma sıcaklıklarına dolayısıyla daha yüksek buhar basınçları ve sıcaklıklarına bağlıdır. Geleneksel enerji santrallerindeki verim yaklaşık % 30 mertebelerinde iken gelişmiş enerji santrallerinde ise bu verim % 45 mertebelerindedir. Verimdeki bu artış buhar sıcaklıklarının ve basınçlarının artırılması ile sağlanmaktadır. Enerji santrallerinde verimliliğin daha yüksek olması gerekliliği bu tesislerdeki kazan ve buhar hatlarında kullanılan malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Krom molibden (Cr-Mo) çelikleri enerji santrallerinde, petrokimya endüstrilerindeki yüksek sıcaklığa sahip ve basınçlı buharın geçtiği borularda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu boruların yüksek sıcaklık, basınç, korozyon, aşınma gibi çalışma şartlarına dayanabilmesi Cr, Mo, V gibi elementlerde alaşımlandırmalar yapılmaktadır. Zaman içerisinde artan sıcaklık ve basınç ile orantılı olarak ağırlaşan şartlar ile birlikte, bu şartlara dayanacak çelik üretimi için çelikteki mevcut alaşım elementlerinin miktarlarında değişiklikler yapılmaktadır. Genel olarak, Mo yerine periyodik tabloda aynı sütunda yer alan ve benzer özellik gösteren W kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü W'in atom çapının Mo'e göre daha büyük olması ve atom ağırlığının Mo'in yaklaşık iki katı olması yapıda difüzyon hızına ve dolayısıyla bozunma hızına

yavaşlatıcı etki yapması ve Lawes fazlarının büyümesini yavaşlatması bilim insanlarını bu elementi kullanmaya teşvik etmiştir [1, 2]. 1980'lerin başlarında füzyon reaktörlerinde kullanılan bu çeliklerde radyasyonla bozunma dirençlerinin artırılması için yeni alaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır [3, 4]. Daha önceleri Cr-Mo çeliklerinde kullanılan Nb yerine periyodik tabloda aynı sütunda yer alan Ta kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü Ta'un bozunmaya karşı direnci daha yüksektir. W'in de radyasyon kaynaklı bozunmaya karşı yüksek dirençli olduğu bilinmektedir [5, 6].

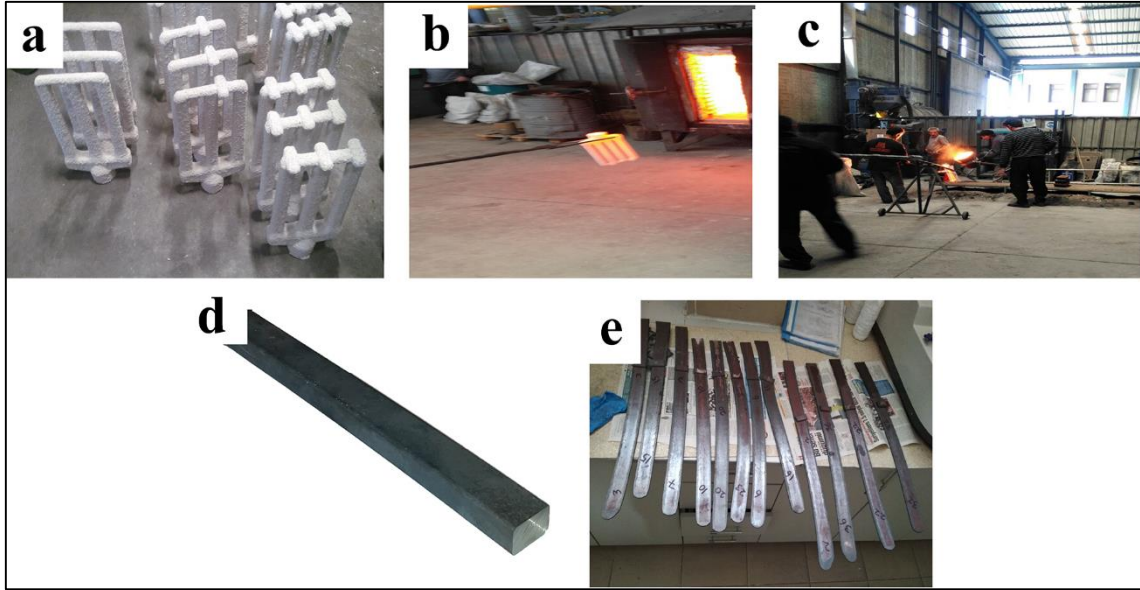
İlk zamanlarda düşük kroma sahip olarak (2,25 Cr'lu) üretilen Cr-Mo çelikleri daha sonraları yüksek kroma sahip 9 Cr'lu olarak üretilmeye başlanmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte 3 Cr'lu ve 5 Cr'lu yeni nesil düşük kromlu çelikler de üretilmeye başlanmıştır. Yeni geliştirilen bu çelikler diğer üretilen Cr-Mo çeliklerine göre hem daha yüksek tokluk ve hem de benzer mukavemet değerleri göstermesi nedeniyle bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve bu yöndeki çalışmaların hızlarının artmasını sağlamıştır [7, 8].

Bu çalışmada, döküm yolu üretilip daha sonra haddelenen 3Cr-3W ve 5Cr-3W çeliklerinin mikroyapısına ve çentik darbe direncine alaşım elementi olarak ilave edilen Ta'un etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında kullanılan alaşımlar seramik kalıba (Şekil 1a) hassas döküm yöntemi ile üretilmiştir. Döküm yapılmadan önce seramik kalıplar 1000 °C'ye ısıtılmıştır (Şekil 1b) ve daha sonra döküm işlemine geçilmiştir. Döküm işlemi açık atmosferde yaklaşık 1600 °C'de gerçekleştirilmiştir (Şekil 1c). Döküm sonrası elde edilen nihai ürün 17x26x275 mm ebatlarında çubuk şeklindedir (Şekil 1d).

Döküm ile elde edilen çubuklarda muhtemel meydana gelebilecek kusurların minimuma indirilmesi için çubuklara sıcak haddeleme yapılmıştır. Sıcak haddeleme işlemi yaklaşık olarak 1150 °C'de yapılmıştır. Haddeleme sonrasında 17 mm olan numune kalınlığı 3.5-4 mm'ye düşürülmüştür. Sıcak haddelemeden sonra elde edilen ürünler Şekil 1e'de görülmektedir.



Şekil 1. Alaşımların üretim aşamaları a) Hazırlanan seramik kalıplar b) Seramik kalıpların ısıtılması, c) Döküm işlemi, d) Döküm sonrası elde edilen nihai, e) Haddelene sonrası elde edilen ürünler

Analizler yapılmadan önce haddelene işlemi ile elde edilen numunelere tavlama ve temperleme ısıl işlemleri yapılmıştır. Literatür çalışmalarına göre, numunelere 1100 °C’de 1 saat tavlama işlemi yapıldıktan havada su verilmiştir ve ardından 710 °C’de 2 saat temperleme işlemi yapılmıştır.

Alaşımlardaki Cr ve Ta’un mikroyapılara etkilerinin incelenmesi için numunelere optik mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Bu sebeple yapılan ısıl işlemlerden sonra numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Numune hazırlama aşamasından numuneler 180 mesh zımparadan başlanarak kademeli olarak 2000 mesh zımparaya kadar zımparalanmış ve ardından 3 µm elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Tavlama, havada su verme ve temperleme işleminden sonra parlatılan numuneler % 5’lik pikral (5 gr pikrik asit, 100 ml etil alkol) ile tavlama ve havada su verme işlemlerinden sonra parlatılan numuneler ise LePera renkli dağlayıcı ile dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin mikroyapı analizi için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Optik mikroyapı analizleri Nikon MA 100 Eclipse marka mikroskop kullanılarak yapılmıştır.

Alaşımlardaki Cr ve Ta’un kırılma enerjilerine etkilerinin araştırılması için Charpy çentik darbe testi yapılmıştır. Çentik darbe deneyleri Alşa ZBC 2000 marka 300 J kapasiteli darbe test cihazı ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Haddelenmiş numune

kalınlıkları standart numune ölçülerinden küçük olması sebebiyle, ölçüm sonuçları birim alana düşün enerji olarak hesaplanarak kıyaslanmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Numune Bileşimleri

Üretilen numunelere ait ağırlıkça % kimyasal bileşimler Çizelge 1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre alaşımların istenen bileşim aralıklarında olduğu görülmektedir.

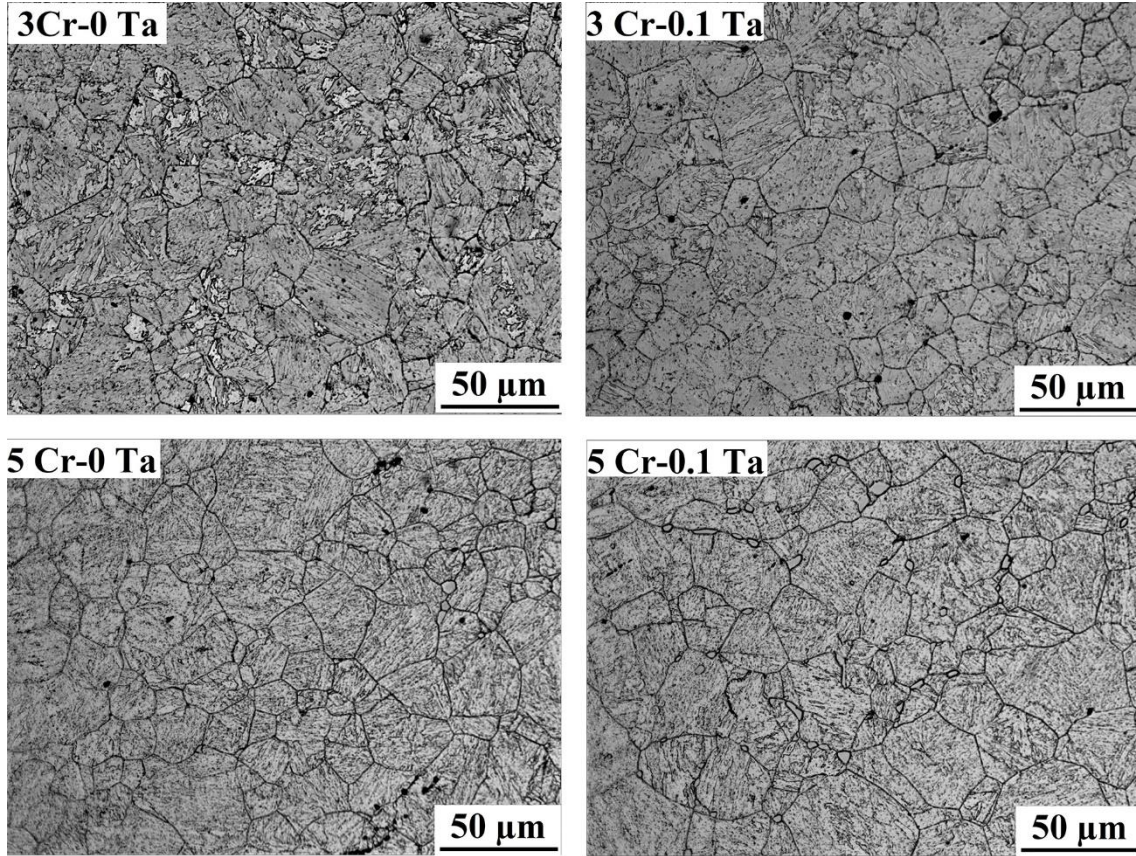
Çizelge 1. Numunelerin ağırlıkça % kimyasal bileşimleri

Alaşım türü	C	Cr	W	V	Si	Mn	Ta
3 Cr-3 W-0 Ta	0.01-0.07	2.94-3.08	2.95-3.22	0.23-0.29	0.08-0.11	0.33-0.49	0
3 Cr-3 W-0.1 Ta							0.1
5 Cr-3 W-0 Ta	0.04-0.07	4.60-4.87	2.85-3.07	0.23-0.25	0.19-0.28	0.40-0.48	0
5 Cr-3 W-0.1 Ta							0.1

3.2. Optik Mikroyapı Analizleri

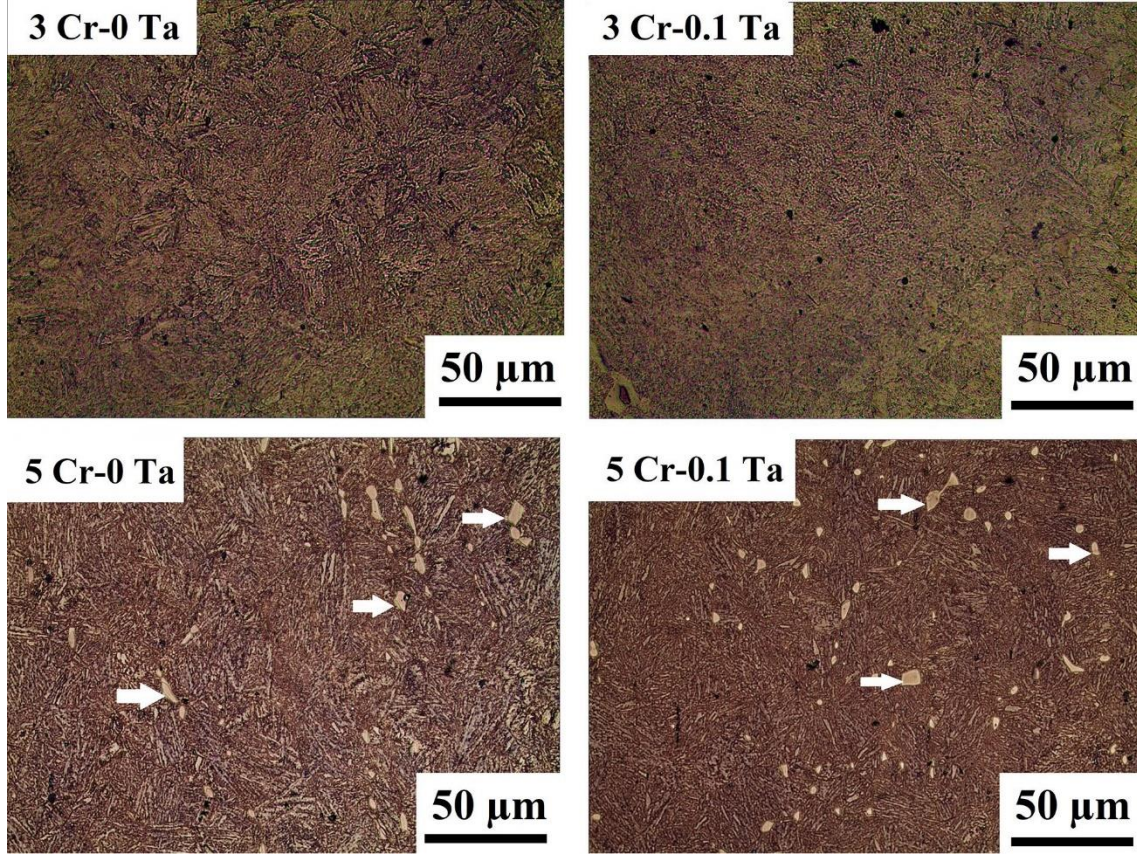
Pikral ile dağlanan tavlanmış, havada su verilmiş ve temperlenmiş numunelere ait optik mikroyapı görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.

3 Cr’lu Ta içermeyen alaşımda mikroyapıda tane sınırlarında çökelen allotriomorfik ferrite, tane içlerine doğru uzanan beynitik ferrite, beynit çıtalarına ve birincil östenit tane sınırlarına rastlanmaktadır. Alaşıma Ta ilavesi yapıldığında allotriomorfik ferrit oranının azaldığı bariz şekilde görülmektedir. Aynı zamanda Ta ilavesi birincil östenit tane boyutunun azaldığı görülmüştür. 5 Cr’lu alaşımların mikroyapı analizlerinde temperlenmiş martenzite temperlenmiş beynite rastlanmaktadır. Ferrit oranı 3 Cr’lu aynı bileşimdeki ve aynı ısıl işlem yapılmış numuneye göre oldukça azdır. Alaşımdaki Cr miktarının artması ile ferrit oranında azalma olmuştur. 3 Cr’lu alaşıma Ta ilavesi ile ferrit hacim oranında azalma olmuştur. 5 Cr’lu alaşıma Ta ilavesi martenzit hacim oranı artmasına neden olmuştur.



Şekil 2. Numunelere ait mikroyapı görüntüleri

Temperlenmiş beyniti ve temperlenmiş martenziti optik mikroyapıya bakarak ayırt etmek pek mümkün değildir. Yapıda martenzit varlığının tespiti için tavllanmış ve ardından su verilmiş ancak temperlenmemiş numunelerin LePera ile renkli dağlaması yapılarak yapıda temperlenmemiş martenzitin olup olmadığı tespit edilmiştir. Lepera renkli dağlayıcı ile dağlanan tavllanmış ve ardından havada su verilmiş numunelere ait optik mikroyapı görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. 3 Cr'lu Ta içeren ve içermeyen numunelere bakıldığında yapıda temperlenmemiş martenzite rastlanmamıştır. Ancak 5 Cr'lu numunelere bakıldığında yapıda temperlenmemiş martenzitin var olduğu görülmektedir (okla gösterilen açık renkli bölgeler). Cr oranının % 3'ten % 5'e yükselmesi sonucunda yapıda martenzit görülmeye başlanmıştır. 5 Cr'lu Ta'lu ve Ta'suz numuneler incelendiğinde Ta oranının artması ile yapıda görülen martenzit hacim oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 3. LePera ile dağlanan numunelere ait mikroyapı görüntüleri

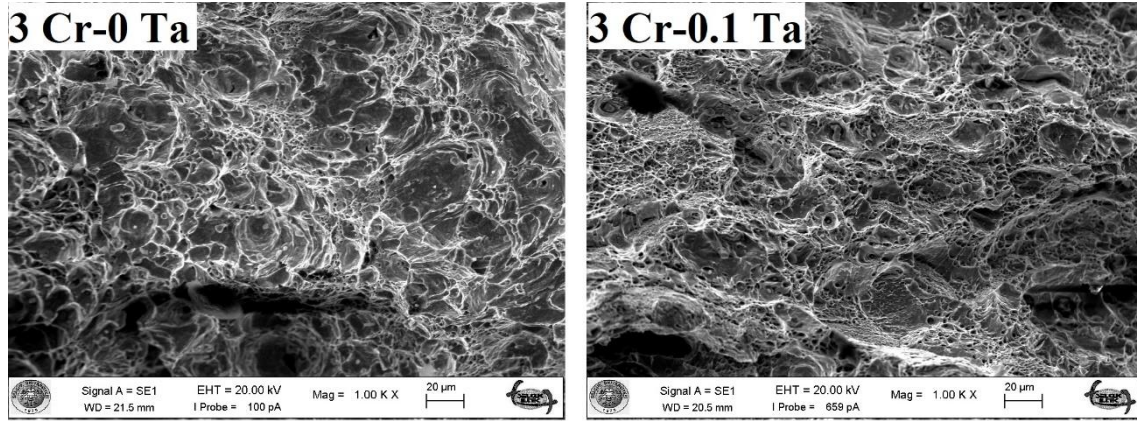
3.3. Charpy Çentik Darbe Deneyleri

3 Cr'lu ve 5 Cr'lu alaşımların ölçülen kırılma enerjileri Çizelge 2'de verilmektedir. 3 Cr'lu alaşımlarda Ta içermeyen alaşım en yüksek darbe direncine sahiptir. Alaşıma Ta ilavesi darbe enerjisinin ciddi oranda düşürmüştür, yani alaşım gevrekleşmiştir. 5 Cr'lu alaşımlarda da 3 Cr'lu alaşımlarda olduğu gibi Ta ilavesi kırılma enerjisinin ciddi oranda düşürmüştür. 3 Cr'lu ve 5 Cr'lu alaşımların kırılma enerjileri karşılaştırıldığında Cr oranının artması ile kırılma enerjisinin azaldığı yani yapının gevrekleştiği görülmektedir.

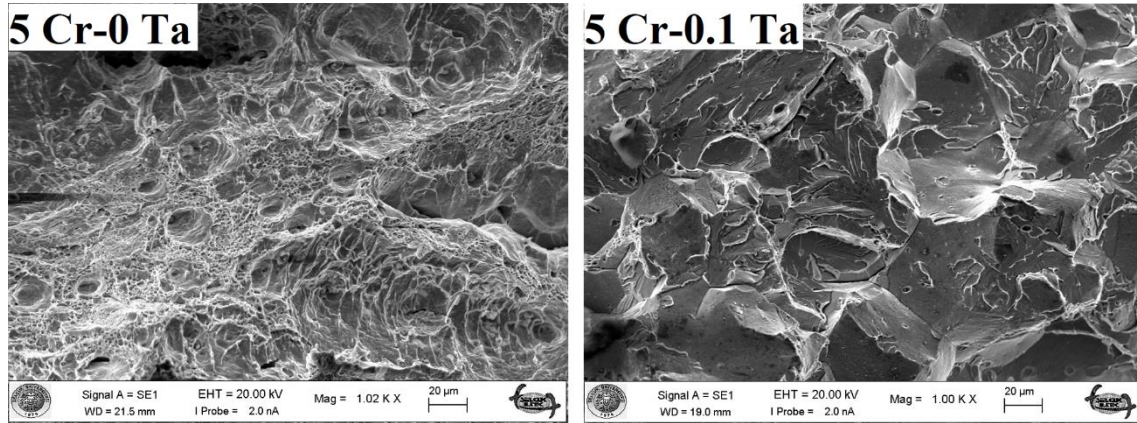
Çizelge 2. Numunelere ait kırılma enerjileri değerleri

Alaşım türü	Kırılma Enerjisi (J)
3 Cr-3 W-0 Ta	85,18
3 Cr-3 W-0.1 Ta	58,04
5 Cr-3 W-0 Ta	74,41
5 Cr-3 W-0.1 Ta	33,98

Çentik darbe testi yapılan numunelerin kırık yüzey morfolojisinin incelenmesi ve yorumlanması için kırık yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Kırık yüzey SEM görüntülerine bakarak kırılmaların gevrek ve/veya sünek oldukları hakkında yorumlar yapılabilmektedir. 3 Cr'lu alaşımlara ait kırık yüzey SEM fotoğrafları Şekil 4'te ve 5 Cr'lu alaşımlara ait kırık yüzey SEM fotoğrafları ise Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. 3 Cr'lu alaşımlara ait kırık yüzey SEM fotoğrafları



Şekil 5. 5 Cr'lu alaşımlara ait kırık yüzey SEM fotoğrafları

3 Cr'lu alaşımların kırık yüzeyleri incelendiğinde Ta içermeyen alaşımda kırılma sırasında tanelerin uzadığı ve sünek bir davranış gösterdikleri söylenebilir. Alaşıma Ta ilavesi ile tanelerin küçüldüğü ve daha az uzamayıp koptukları yani daha az sünek davranış gösterdikleri söylenebilir.

5 Cr'lu alaşımların kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde Ta içermeyen alaşımda kırılma sırasında tanelerin uzadığını yani sünek bir davranış gösterdiğini söylenebilir. Alaşıma Ta ilavesi yapıldıktan sonra mikroyapıdaki sünek davranışın

kaybolduğu ve yapıda meydana gelen kırılmanın tane içi ve taneler arası gevrek kırılma olduğu görülmektedir.

4. Tartışma

4.1. Mikroyapı

Nükleer santrallerde Cr-Mo (W) çeliklerinde kimyasal aktivasyonu (radyolojik etkiyi) azaltmak için Nb yerine Ta kullanılmaya başlanmıştır [3, 9]. Ta ince ve güçlü karbür yapıcı bir elementtir tavlama sırasında yapıda çözünmeden kalabilen Ta karbürler tane irileşmesine kısıtlayarak olarak Ta içermeyen alaşıma göre daha ince birincil östenit tanelerinin oluşmasına yol açar [1, 10]. Ta'un bu etkisi ile birincil östenit tane boyutunda azalma olmuştur.

Alaşım elementleri sürekli soğuma eğrilerine etki ederler. Ta ve Cr gibi alaşım elementleri karbonun γ latiste difüzyonunu yavaşlatmakta ve $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümünü geciktirmektedir. Bu durum da sertleşebilirliği arttırmakta yani TTT eğrisini sağa kaymasına yol açmaktadır. Bu oluşum mekanizması günümüzde hala tam olarak anlaşılamamaktadır ancak etki şu şekilde düşünülebilir: eğer alaşım elementlerinin γ fazı içerisine olan difüzyonu aktif ise bu durum soğuma sırasında entropiyi artırır ve γ fazını termodinamik olarak kararlı yapar. Bu da γ fazından α fazına dönüşümü geciktirir [11-14]. TTT eğrisinin sağa kayması neticesinde aynı soğutma şartlarında mikroyapılarda görülen fazların oranlarının değişmektedir. TTT eğrisinin sağa kayması ile ferrit bölgesinin kesilme ihtimalini azalmaktadır ve beynit ve martenzit bölgesine girilme ihtimali artmaktadır. Bu nedenle 3 Cr'lu alaşımına Ta ilavesi ilavesinden sonra 3 Cr'lu alaşımın mikroyapısında görülen ferritin hacim oranı azalmıştır ve beynitin hacim oranı artmıştır. 5 Cr'lu alaşımlarda görülen martenzitin hacim oranının artması da bu nedendir. Cr, alaşımlarda Ta'a benzer etki göstermektedir. Aynı bileşime sahip 3 Cr'lu alaşımdaki ferrit hacim oranının 5 Cr'lu alaşıma göre daha çok olmasının ve 3 Cr'lu alaşımların mikroyapısında görülmeyen martenzitin ve 5 Cr'lu alaşımlarda görülmesi aynı etki sebebiyledir [15, 16].

4.2. Çentik Darbe Enerjisi

3 Cr'lu ve 5 Cr'lu alaşımlarda Ta içermeyen alaşımların Ta içeren alaşımlara göre daha yüksek darbe dirençlerine sahip oldukları görülmektedir. Alaşıma Ta ilavesi darbe enerjisinin ciddi oranda düşürmüştür, yani alaşım gevrekleşmiştir. Ta ilavesi ile

mikroyapıda 3 Cr'lu çeliklerde ferrit hacim oranının azalıp beynit hacim oranının arttığı; 5 Cr'lu çeliklerde beynit hacim oranının azalarak martenzit hacim oranını arttırdığı görülmektedir. Ferrit beynite göre daha sünek, beynit de martenzide göre daha sünektir. Bu nedenle Ta ilavesi yani sünek fazların azalması yapıyı gevrekletirmiştir diye yorum yapılabilir. Bunun yanı sıra inklüzyon incelemesinde yapıda oluşan inklüzyonların yüksek oranda Ta içermesi ile inklüzyon kaynaklı gevrekleşme de olabilmektedir. [11, 17]. Ayrıca TaC'lerin sert ve gevrek bir yapıya sahip olması neticesinde bu fazların yapıyı gevrekletirmesi kırılma enerjisinin düşmesine neden olabilmektedir.

5 Cr'lu alaşımların darbe enerjilerinin aynı bileşime sahip 3 Cr'lu alaşımların darbe enerjileri ile karşılaştırıldığında daha düşük darbe direncine sahip olduğu Çizelge 2'de görülmektedir. Alaşıma Cr ilavesi ile mikroyapıda 3 Cr'lu alaşımlarda sünek faz ferrit azalmış ve daha gevrek olan beynit artmıştır. 5 Cr'lu çeliklerde ise daha sünek beynit azalmış ve daha gevrek martenzit oranı artmıştır. Bunun sonucunda yapı gevrekleşmiştir. Aynı zamanda Cr da karbür yapıcı bir elementtir ve oluşan karbürler sert ve gevrek bir yapıya sahiptir. Bunun yanı sıra çeliklere Cr ilavesi tane sınırlarındaki P, Sn, Sb, and As gibi emprütelerin oranını arttırarak temper gevrekliğine sebep olabilmektedir [11].

5. Sonuçlar

Bu çalışmada düşük kromlu çelik grubuna giren 3 Cr'lu ve 5 Cr'lu alaşımların mikroyapısına ve çentik darbe dirençlerine Ta'un etkileri araştırılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tavlama, havada su verme ve temperleme ısıl işlemleri sonrasında 3 Cr'lu alaşımların mikroyapılarında ferrit ve beynit görülürken, 5 Cr'lu alaşımların mikroyapılarında beynit ve martenzit fazları görülmektedir. Ta ve Cr alaşım elementlerinin alaşımların TTT diyagramına etki etmesi neticesinde fazlarda farklılıklar görülmektedir. Ta'un oluşturduğu ince karbürler mikroyapıda çekirdekleyici görevi görerek birincil östenit tane sınırlarının incelmelerini sağlamıştır.

Alaşımlara Ta ilavesi alaşımların çentik darbe dirençlerini düşürmüştür, yani alaşımlar gevrekleşmiştir. Alaşıma Ta ilavesi ile tanelerin küçüldüğü ve daha az uzayıp koştukları yani daha az sünek davranış gösterdikleri görülmüştür. 3 Cr'lu ve 5 Cr'lu

alaşımın kırılma enerjileri karşılaştırıldığında Cr oranının artması ile de kırılma enerjisinin azaldığı, yani yapının gevrekleştiği görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Gökhan ARICI'nın Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütülen "Düşük Kromlu Çeliklerde Kobalt Miktarının Mikroyapıya ve Tokluğa Etkisi" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir. Aynı zamanda bu çalışma, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 17101001 numaralı tez projesi tarafından desteklenmektedir. Katkılarından dolayı Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Klueh RL. Elevated temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors. *International Materials Reviews*. 2005;50:287-310.
- [2] Acarer M, Arıcı G, Acar FK, Keskinilic S, Kabakci F. Toughness of 2, 25Cr-1Mo steel and weld metal. *AIP Conference Proceedings: AIP Publishing*; 2017. p. 090003.
- [3] Klueh RL, Maziasz PJ. The Microstructure of Chromium-Tungsten Steels. *Metallurgical Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*. 1989;20:373-82.
- [4] Klueh RL, Maziasz PJ, Alexander DJ. A comparison of low-chromium and high-chromium reduced-activation steels for fusion applications. *Oak Ridge National Lab., TN (United States)*; 1996.
- [5] Jayakumar T, Mathew M, Laha K. High temperature materials for nuclear fast fission and fusion reactors and advanced fossil power plants. *Procedia Engineering*. 2013;55:259-70.
- [6] Wang L. Development of Predictive Formulae for the A1 Temperature in Creep Strength Enhanced Ferritic Steels: *The Ohio State University*; 2010.
- [7] Klueh RL, Alexander DJ, Maziasz PJ. Bainitic chromium-tungsten steels with 3 pct chromium. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*. 1997;28:335-45.
- [8] Arıcı G. Düşük Kromlu Çeliklerde Kobalt Miktarının Mikroyapıya ve Tokluğa Etkisi [PhD]: *Selçuk Üniversitesi*; 2019.

- [9] Yan W, Wang W, Shan YY, Yang K. Microstructural stability of 9–12%Cr ferrite/martensite heat-resistant steels. *Frontiers of Materials Science*. 2013;7:1-27.
- [10] Mori T, Tokizane M, Okamoto K. The Effect of Niobium and Tantalum on Grain Size of Steel. *Tetsu-to-Hagane*. 1969;55:485-96.
- [11] Totten GE. *Steel heat treatment: Metallurgy and Technologies*: CRC Press; 2006.
- [12] Bhadeshia HKDH. Martensite and bainite in steels: transformation mechanism & mechanical properties. *Le Journal de Physique IV*. 1997;7:C5-367-C5-76.
- [13] Grange R. Estimating the hardenability of carbon steels. *Metallurgical Transactions*. 1973;4:2231-44.
- [14] Mae Y. Correlation of the Effects of Alloying Elements on the Hardenability of Steels to the Diffusion Coefficients of Elements in Fe. *International Journal of Materials Science and Applications*. 2017;6:200.
- [15] Raghavan V. *Physical metallurgy: principles and practice*: PHI Learning Pvt. Ltd.; 2015.
- [16] Bhadeshia HKDH. Mechanical Properties of Martensite in Heat-resistant Steels. *Proceedings of Ultra-Steel*. 2000.
- [17] Yan W, Wang W, Shan Y, Yang K, Sha W. *9-12Cr Heat-Resistant Steels*, 2015.