



## NB-V-ALAŞIMLI BORU ÇELİKLERİNDE MİKROYAPI - MEKANİK ÖZELLİKLER İLŞKİSİ

Zakir TAŞ\*

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Gebze, KOCAELİ

### ÖZET

Mukavemet ve tokluk özellikleri açısından büyük çaplı borulara olan talep son yıllarda yükselmiştir. Termomekanik haddelenmiş mikroalaşımli çeliklerden üretilen bu borular mekanik özellikler bakımından yüksek mukavemet, düşük darbe geçiş sıcaklığı ve iyi kaynaklanabilme özellikleri ile kullanım esnasında çalışma şartlarına oldukça dayanıklı malzemeler konumuna gelmişlerdir. Bu çalışmada birbirinden farklı kimyasal bileşime sahip dört boru çeliğinde mikroyapı mekanik özellikler ilişkisi araştırılmıştır. Mekanik özellikler çekme, çentik darbe ve üç nokta eğme deneyleri ve sertlik ölçümleri ile belirlenirken, mikroyapılar optik ve tarama elektron mikroskopunda incelenmiştir. Ferit tane büyüklükleri ortalama tane çapı belirleme yöntemiyle, hacim oranları ise lineer kesişim yöntemiyle belirlenmiştir. Ferit tane boyutunun küçülmesi ve hacim oranının yükselmesiyle mekanik özelliklerde iyileşmeler kaydedilmiştir. Elde edilen malzeme büyüklükleri arasında bağıntılar kurulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Boru çelikleri, Mikroyapı, Mekanik özellikler.

### CORRELATION BETWEEN MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NB-V- ALLOYED PIPE LINE STEELS

#### ABSTRACT

In recent years the steels with larger diameter have been used in pipe lines in large amounts, where the higher strength and toughness required. These steels became strength materials because of their good mechanical characteristics in operating conditions. The present article is intended the relationships between microstructure and mechanical properties of thermo mechanical treated pipe line steels which have different micro alloyed elements.

The mechanical characteristics of steels are determined by tensile, notch bend impact, three point bending tests and hardness measurements and the microstructures are characterized by optical and scanning electron microscope. Volume fractions were determined by linear cutting techniques and grain sizes were determined by average grain size techniques. The mechanical characteristics improve with an increase in the ferrite volume fraction and a decrease in ferrite grain sizes. The relation is found between these material sizes.

**Keywords:** Pipe line steels, Microstructure, Mechanical properties.

\*E-posta: [tas@gyte.edu.tr](mailto:tas@gyte.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Petrol taşımacılığının yanında doğalgaz kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, doğalgaz taşımacılığı da öncelikli bir sektör haline gelmiştir. Bu sektörde işletmecilik yanında, yüksek basınçlı şartlar altında uzak mesafelerden geniş çaplı borularla yapılan bu taşımacılıkta kullanılan malzemelerin gerek emniyet ve maliyeti gerekse üretim ve montajı dikkatleri üzerinde toplamıştır. Buna istinaden yassı mamullerden üretilen kaynaklı büyük çaplı boru üretimi tüm dünyada artmıştır. Bu borulardan yüksek mukavemet ve tokluk özellikleri yanında, iyi kaynaklanabilme özelliği de aranmaktadır.

Kaynaklanabilirliğin iyileştirilmesi için karbon oranının düşürülmesiyle az perlitli çelikler grubu oluşmuş; aynı zamanda tokluk kazancına ulaşılabilmiştir. Kayda değer bir tokluk artışı modern metalürjik önlemlerle mümkün olmuştur. Kükürt oranının düşürülmesiyle yüksek tokluğa sahip çeliklerin üretimi mümkün olabilmektedir. Son olarak da termomekanik haddelemenin kullanımıyla boru çeliklerinin özelliklerinin iyileştirilmesi imkanlarından daha da istifade edilmektedir [1]. Termomekanik haddelenmiş çeliklerde mikroyapıda istenen özelliklerin sağlanması haddeleme prosesi ile çok ilgilidir. Mikroyapıda, çelik özelliklerinde istenen yüksek mukavemet, süneklik ve kaynaklanabilirlik için ferrit tane boyutunu küçültmek en etkili yöntemdir [2].

Bu çalışmada birbirinden farklı dört tip boru çeliğinin mekanik özellikleri ile mikroyapıları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Elde edilen mekanik özellikler ile mikroyapı büyüklükleri arasında bağıntılar kurulmaya çalışılmıştır.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmalarda standart karşılığı (American Petroleum Institute) API 5L Gr X65 olan iki tip (Sollac ve Kosice) Nb-V alaşımlı çelik malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeler Mannesmann Boru fabrikasından temin edilmiştir. API 5L Gr X60 ve API 5L Gr X52 Nb-V alaşımlı çelikler de karşılaştırma amacıyla deneyisel çalışmalara dahil edilmiştir.

Çeliklerin mekanik özellikleri ilgili standartlara göre çekme, çentik darbe, üç nokta eğme ve sertlik deneyleri ile belirlenmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin kimyasal analizleri spektrometre analiz cihazında yapılmıştır. İncelenen çeliklerin numunelerinin yüzeyleri kabadan inceye doğru zımparalanmış ve daha sonra parlatılmıştır. Metallografik inceleme için numunelerin bir kısmı dağlanmışır.

Çelik malzemelerinin mikroyapısı (ferrit tane boyutu, kalıntıların tipi ve dağılımı) optik görüntü alınarak belirlenmiştir. Kalıntıların tipi ve dağılımlarının belirlenmesi için parlatılmış numuneler; mikroyapı incelemeleri için ise dağlanmış numuneler kullanılmıştır. Dağlama işleminde % 3'lük Nital kullanılmıştır. Alınan mikroyapı resimleri üzerinde ortalama tane çapı belirleme yöntemi kullanılarak ferrit tane büyüklükleri ve liner kesişim yöntemiyle de [3] perlit hacim oranları tespit edilmiştir. Ayrıca, metalografi numuneleri ve kırılma yüzeyleri, tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Perlit lamel mesafesi, lamel kalınlığı ile kalıntıların şekli, büyüklüğü ve noktasal kimyasal analizleri SEM çalışmaları ile belirlenmiştir.

## 3. BULGULAR

Malzemelerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1de; deneyler, ölçümler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen mekanik özelliklere ait değerler Tablo 2'de verilmiştir. Dağlanmış haldeki numunelerden alınan mikroyapı resimleri yardımıyla tane büyüklükleri ve faz miktarları belirlenmiş, bulunan mikroyapı büyüklükleri Tablo 3'de [4] verilmiştir. İncelenen çeliklerin hesaplanan perlit hacim oranlarının, Tablo 1'de verilen spektroanaliz sonuçlarındaki karbon oranlarıyla karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** İncelenen çeliklerin spektral analiz sonuçları.

Kimyasal Bileşim										
API 5L	C	Mn	Si	Nb	V	P	S	Cr	Cu	Al
X65 (S)	0.043	1.03	0.177	0.053	0.056	0.012	0.0044	0.023	0.017	0.032
X65 (K)	0.066	1.44	0.185	0.046	0.026	0.010	0.0042	0.014	0.009	0.037
X60	0.096	1.33	0.174	0.044	0.022	0.013	0.0062	0.034	0.020	0.025
X52	0.106	0.91	0.24	0.020	0.0017	0.013	0.007	0.017	0.021	0.039

Tablo 2. Çeliklerin mekanik özellikleri.

Çelik Tipi	Çekme Mukavemeti, $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Mukavemeti, $R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	Sertlik (HV)	Kırılma Tokluğu, $J_i$ (N/mm)	Çentik Darbe Tokluğu, $a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )
X65 (S)	620	555	221 ± 4	184	287 ± 3
X65 (K)	640	526	216 ± 2,3	179	265 ± 3
X60	568	480	207 ± 5,2	137	203 ± 5
X52	496	358	150 ± 2,5	102	168 ± 6

Tablo 3. İncelenen çeliklerin ortalama tane büyüklükleri ve faz oranları.

Çelik Tipi	Ortalama Tane Çapı $d_m$ (µm)	Ferrit Oranı $f_a$ %	Perlit Oranı $f_p$ %
X65 (S)	5,7 ± 1,6	93	7 ± 2,8
X65 (K)	6,5 ± 3,5	88,5	11 ± 3
X60	9,2 ± 3,2	85,4	14,6 ± 3,3
X52	12 ± 2,6	83,5	16,5 ± 6

#### 4. TARTIŞMA ve SONUÇ

İncelenen çelik malzemelerinin parlatılmış haldeki mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Kalıntıların dağılımlarının homojen olmadığı görülmektedir.



a) X65 (S) x100



b) X65 (K) x100



c) X60 x100

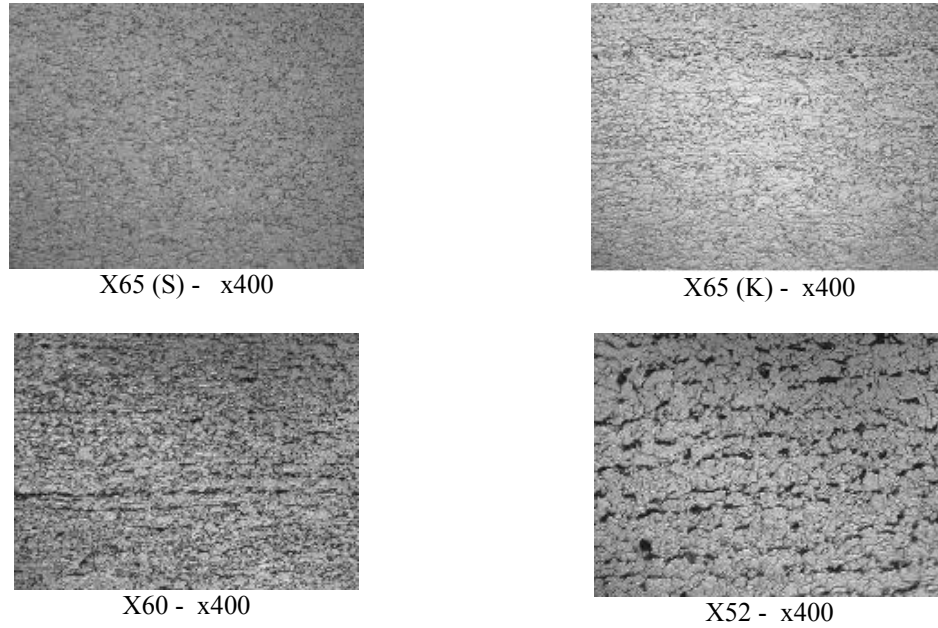


d) X52 x100

Şekil 1. İncelenen çeliklere ait kalıntı görüntüleri.

İncelenen çeliklerin mikroyapıları, düşük perlit oranlarına sahip ferritik matriksten oluşmaktadır. X52 tipi çelikte haddeleme prosesi esnasında hadde yönünde bir ferrit-perlit satırlanması ortaya çıkmıştır (Şekil 2). Bu satırlanma diğer çeliklerde nispeten daha az olmuştur. Satırlanma, sıcak haddeleme sırasında östenitin ayrışması sırasında karbon ve diğer alaşım elementlerinin, özellikle manganezin, belli bölgelerdeki segregasyonundan kaynaklanmakta ve mekanik özelliklerde anisotropiye neden olmaktadır [5].

Gerek parlatılmış yüzeylerde, gerekse kırılma yüzeylerinde tarama elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerde kalıntıların şekillerinin çoğunlukla küreselliğe yakın olduğu görülmüştür. Şekil 3’de X52 çeliği örneğinde SEM yardımıyla alınmış kırılma yüzeyi resmi, cüruf kalıntısının şekli, büyüklüğü ve kimyasal bileşimi verilmiştir. Kalıntıların büyüklükleri 1 µm ile 35 µm, kalıntılar arası uzaklık ise 5 µm ile 50 µm arasında değişmektedir. Yapılan noktasal kimyasal analizler neticesinde çeliklerde en sık rastlanan kalıntıların Mn, Al, Mg, S, P ve Ca bileşikleri içeren curuf kalıntıları olduğu görülmüştür. Kalsiyum ilavesi ile kalıntılar modifiye edilmektedir; köşeli kalıntıların yüzeyi CaS şeklinde kaplanıp yumru haline getirilerek çelik içerisinde çentik gibi etki etmesi önlenmektedir.

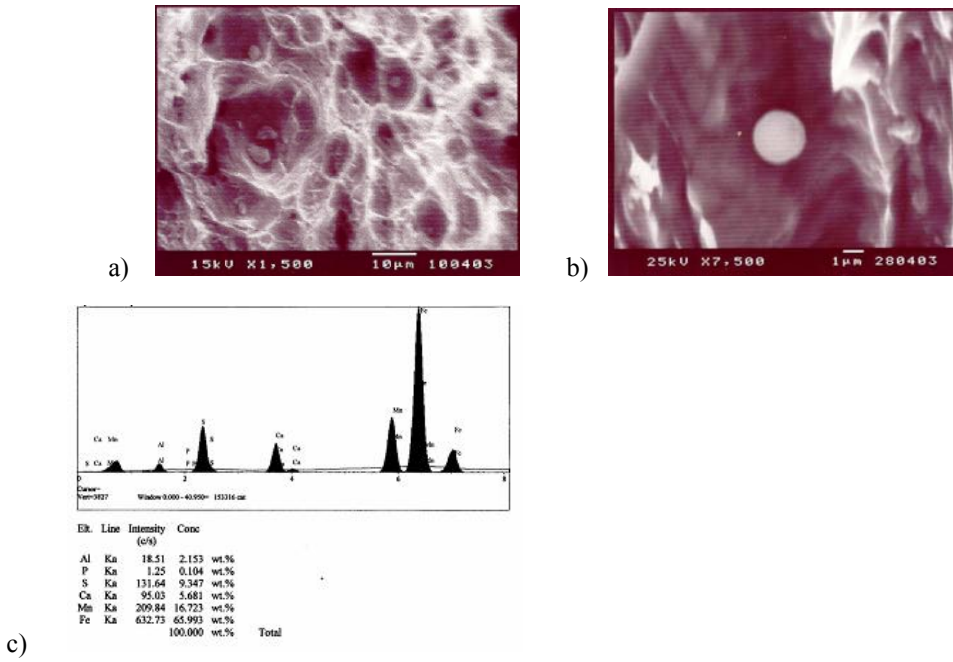


Şekil 2. Çeliklerin numune kalınlığı yüzeyindeki mikroyapı görüntüleri (Satırlanma).

Kükürt oranının % 0.008’in altında olması durumunda, artık manganezsülfürler tespit edilememekte, aksine yüzeylerinde az miktarda kükürt bulunan küresel kalsiyum ve alüminyum oksit kalıntıları tespit edilmektedir [6]. Kükürt eksikliği ve böylece de MnS eksikliğiyle kalıntıların sayısı önemli oranda azalmakta ve kalıntılar arası uzaklık büyümektedir. Bu yolla boşluk oluşumu ve boşluk birleşmesine yol açan noktaların sayısının azalması ve uzaklıklarının artması tokluk özelliklerine pozitif etki etmektedir [7]. X65 tipi çeliklerdeki kükürt miktarı X60 ve X52 çeliklerine göre % 50 daha az ve metalik olamayan kalıntıların arasındaki mesafe ise daha büyüktür. Böylece boşlukların birleşmesi ve çatlak oluşabilmesi için daha yüksek genleşmeye gereksinim olmakta ve daha uzun zaman almaktadır. Bu da mekanik özellikleri iyileştirmektedir.

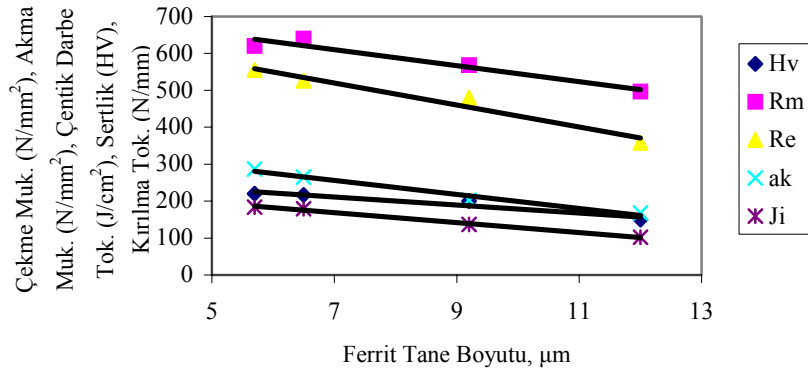
Şekildeki kırılma yüzeyi görüntüsünde metalik olmayan kalıntılardan kaynaklanan büyük çukurcuklar ve bunların aralarında çökelti etrafında oluşmuş boşluk büyüklüklerinden dolayı ortaya çıkmış küçük çukurcuklar görülmektedir. Bundan dolayı kırılma yüzeyi peteksi bir görünüm [8] arz etmektedir. Kalıntı dağılımının yoğun ve kalıntılar arası uzaklıkların kısa olduğu yüzeyler daha ince bir petek yapısı göstermektedir. Çelikten çeliğe farklılık göstermesine rağmen çukurcukların büyüklüğü ~ 0.5 µm civarında olup, çökelti ortalamada büyüklük ve mesafeleri hakkında bir fikir vermektedir. Çökelti gerek tane içlerinde, gerekse tane sınırlarında çok ince bir şekilde dağılmıştır; öyle ki çökelti oluşturan bileşiklerin analizini yapmak mümkün olmamıştır. Ancak çeliklerin içerdikleri mikroalaşım elementleri dikkate alındığında, Nb veya V karbonitrür çökelti olması muhtemeldir.

Şekil 4’de ferrit tane boyutunun incelenen çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi gösterilmiştir. Ferrit tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti, çentik darbe ve kırılma tokluğu ile sertlik değerleri artmaktadır. Akma ve çekme mukavemetindeki artış, tane boyutunun küçülmesi sonucunda tane sınırlarının yoğunluğunun artarak dilokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmaktadır.



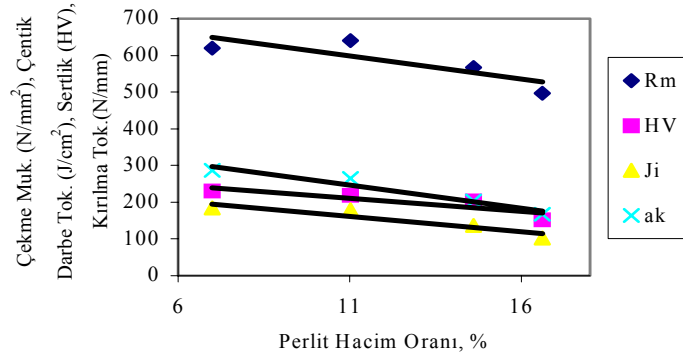
Şekil 3. X52 çeliğinde kırılma yüzeyi görüntüsü (a), cüruf kalıntısı (b) ve noktasal analizi (c) (SEM).

Ferrit tane boyutunun artmasıyla malzemelerin sertliğindeki düşüş, tane boyutunun mukavemet üzerine etkisi ile uyumludur.



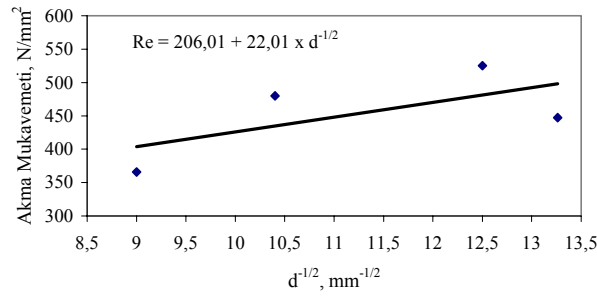
Şekil 4. Ferrit tane boyutunun mekanik özelliklere etkisi.

Şekil 5'de Mekanik özelliklerin perlit hacim oranına göre değişimi verilmiştir. Azalan perlit oranıyla tokluk değerleri yükselirken, düşmesi gereken çekme ve sertlik değerlerinde de artış görülmektedir. Bu uyumsuzluk, mikroalaşım elementlerinin çökelti oluşumuyla karbonu bağlaması ve çökelti sertleştirme yoluyla da çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Perlit oranı ve tane boyutu büyüdükçe çentik darbe tokluğu düşmektedir. Çentik darbe tokluğu üzerine en önemli etkiyi tane boyutunun yaptığı çeşitli çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu durum, tane boyutunun küçülmesi neticesinde tane sınırları yoğunluğunun artması ve dislokasyon hareketlerinin engellenmesiyle [9] açıklanmıştır.



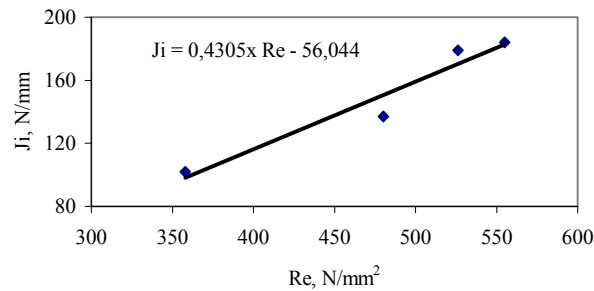
Şekil 5. Mekanik özellikler ile perlit hacim oranı arasındaki ilişki.

Şekil 6'da akma mukavemeti ile tane boyutu arasındaki Hall-Petch ilişkisi gösterilmiştir. Burada, tane sınırı direnci ile ilgili malzeme sabiti  $k_y = 22 \text{ N.mm}^{-3/2}$  olarak bulunmuştur. Literatürde  $14\text{-}24 \text{ N.mm}^{-3/2}$  arasında değişen  $k_y$  değerleriyle karşılaştırıldığında [10] uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Hall-Petch ilişkisi.

Ferritik-perlitik mikroyapılarda mekanik özellikler tane büyüklüğü [11] yanında, ferrit-perlit oranına, perlit lamel mesafesine ve perlit lamel kalınlığına [12] bağlıdır. Tane boyutunun küçülmesi ve ferrit oranının yükselmesi [13] tokluğu ve mukavemeti iyileştirmektedir. Tane boyutuyla ferrit oranının karşılaştırılması durumunda, tane boyutunun daha baskın olduğu görülmektedir.



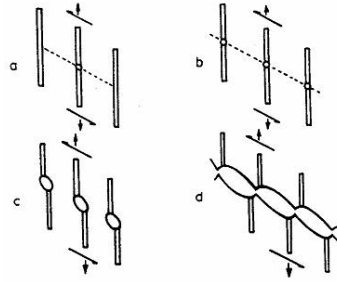
Şekil 7. Akma mukavemeti ile kırılma tokluğu arasındaki ilişki.

Tane boyutunun küçültülmesi tokluk, mukavemet ve kaynaklanabilirlik için en etkili yöntemdir. Şekil 7'de akma mukavemeti ile kırılma tokluğu arasındaki ilişki verilmiştir. Genelde mukavemetin artmasıyla tokluk değerleri

kötüleşmektedir, ancak burada ferrit oranı ve özellikle de tane boyutu önemli rol oynamaktadır. Tane büyüklüğünün düşmesiyle plastik deformasyon başlangıcı daha yüksek gerilimlere ötelenmektedir. Dislokasyon kaynağı olarak görev yapan tane sınırlarının küçük tane büyüklüğünde daha homojen ve daha ince dağılmış olması, söz konusu tokluk iyileşmesi için bir başka sebep olarak gösterilmektedir. Hem geçiş sıcaklığını düşüren hem de akma mukavemetini artıran tek mekanizma tane boyutunun küçültülmesidir [14].

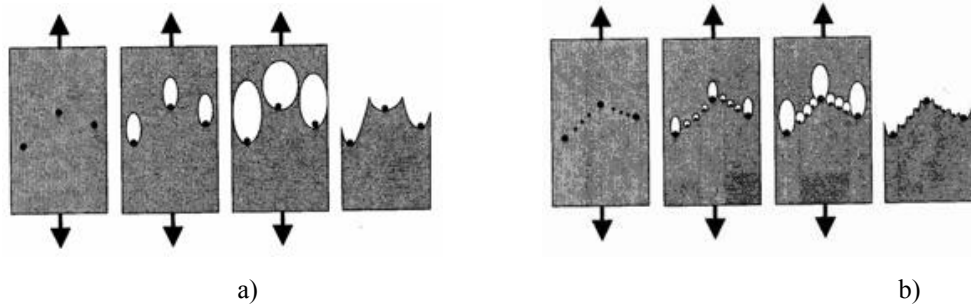
Perlit lamel mesafesinin etkilerinin araştırılması için tarama elektron mikroskopunda perlit lamellerinin resimleri çekilmiş ve lameller arası mesafe belirlenmiştir. Perlit lamel mesafesi ve lamel kalınlıkları karşılaştırıldığında; X52 ve X60 tipi çeliklerde 0,1 - 0,3  $\mu\text{m}$  lamel mesafesi ve 0,2  $\mu\text{m}$  lamel kalınlığıyla birbirine yakın değerler ölçülmüştür. X65 tipi çeliklerde ise lamel mesafesi 0,1 - 0,2  $\mu\text{m}$  ve lamel kalınlığı 0,2  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Perlit lamelleri genellikle birbirine tamamen paralel değildir, lamellerin konumunun numene yüzeyine dik olmaması durumunda da gerçek lamel mesafesinin belirlenmesi güçleşmektedir. Bundan dolayı lameller arası mesafenin belirlenmesi çoğunlukla hatalı olmaktadır.

Perlit lamellerinde meydana gelen kopma perlit kümeciklerinde mikroçatlaklar oluşturmaktadır; bunlar boşluk oluşumuna ve bu yolla sünek kırılmaya yol açmaktadır (Şekil 8). Lamel mesafesinin kısalması tokluk özelliğini negatif etkilemektedir; ancak artan ferrit oranı ve düşen perlit oranıyla, mümkün olabilecek boşluk oluşumunda bir azalma ve bu yolla toklukta iyileşme meydana gelmektedir. Artan ferrit hacim oranı ve böylece de azalan perlit hacim oranıyla kırılma özellikleri iyileşmektedir. Ferritteki bir çatlakın ilerlemesi perlitte nazaran daha zordur [15].



Şekil 8. Perlitte çatlak oluşum modeli [15].

Sünek kırılmaya yol açan mekanizmaların boşluk oluşumu, boşluk büyümesi ve boşluk birleşmesi şeklinde üç safhaya ayrılabilceği hususunda literatürde genel bir mutabakat vardır. Boşluklar öncelikli olarak metalik olmayan kalıntılar etrafında meydana gelmektedir. Bağ kuvvetleri partiküller ile bunların etrafını çevreleyen ferritik matriks arasındaki teması sağlamaktadır. Malzemenin yüklenmesi esnasında matriks ile partikül arasındaki deformasyon uyumsuzlukları boşluk oluşumuna yol açmaktadır [8]. Partikülün şekli ve deforme edilebilirliğine göre, boşluk oluşumundan partikülün matriksden ayrılması ve partikülün kırılması mekanizmaları sorumludur [16].



Şekil 9. Metal olmayan kalıntılar etrafında (a) ve çökeltiler ve metal olmayan kalıntılar etrafında (b) boşluk oluşumu, boşluk büyümesi ve birleşmesiyle sünek kırılma modeli [16].

Karbürler etrafındaki boşluk oluşumları sadece büyük boşlukların birleşmesine katkıda bulunurken, kalıntılar etrafındaki boşluklar kırılmayı belirleyici olmaktadır. Şekil 9'da kalıntı ve karbürlerin dahil edildiği kırılma modelleri gösterilmiştir. Büyüyen boşluklar birleşmekte ve boşluk hacminde hızlı bir artış meydana gelmektedir. Bu esnada ortaya çıkan, kırılma yüzeyinde görülebilen peteklerin büyüklüğü, esas alınan partiküllerin mesafeleri ve büyüklükleriyle bağıntılıdır. Yapılan SEM çalışmaları sonucunda, incelenen çeliklerin matriksinde ince dağılmış partiküllerin mevcut olduğu görülmüştür; ancak çeliklerin mikroyapı ve kırılma yüzeyi görüntüleri, karbürlerin birleşme mekanizmalarındaki rolünü belirgin olarak açıklayamamaktadır.

İncelenen Nb-V alaşımlı çeliklere ait mikroyapı çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Küçülen ferrit tane boyutu ve artan ferrit hacim oranıyla mekanik özellikler iyileşmektedir.
2. Hall-Petch ilişkisi;  
 $R_e = 206 + 22 \times d^{-1/2}$   
 şeklinde bulunmuştur.
3. Kırılma tokluğu ile akma mukavemeti arasında  
 $J_i = 0,4305 \times R_e - 56,044$   
 ilişkisi bulunmuştur.

Pahalı alaşım elementleri yerine, Nb-V gibi mikroalaşım elementlerinin kullanımı ve modern metalürjik yöntemlerle kombinasyonu sonucu enerji tasarrufu sağlanmakta, çevre daha az kirletilmekte, çok iyi mekanik özelliklere sahip çeliklerin üretimi daha ucuza mümkün olabilmektedir. Kırılma tokluğunun belirlenmesi uzun zaman alan, zor ve maliyetli bir çalışmayı gerektirmektedir; tane boyutu veya akma mukavemetinin belirlenmesi halinde kırılma tokluğunun makro düzeyde bilinmesi, bu çelikler ile yapılacak tasarımlarda zaman ve maliyet tasarrufu açısından önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Engl, B., Fuchs, A., Möglichkeiten einer zusaetzlichen Zaehigkeitssteigerung an TM-gewalzten Warmbreitband für Grossrohre, Stahl u. Eisen, 25-30, 1981
2. Bıyıklı, M., et al., Erdemir'de Yüksek Mukavemetli Mikro Alaşımlı Boru Malzemelerin (API 5L X65) Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Belirlenmesi, I. Demir-Çelik Sempozyumu, 3-5 Ekim 2001, Zonguldak, 615-621, 2001
3. Schumann, H., Metallographie s. 608, VEB- Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1980
4. Taş, Z., Termomekanik İşlem Görmüş Mikroalaşımlı Çeliklerin Kırılma Mekanikliği –Kırılma Tokluğu- Açısından İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004
5. Dahl W., et al., Praktikum Werkstoffkunde, s. 425, Band 1: Grundlagen, RWTH, Aachen, 1992
6. Strassburger, C., Entwicklungen der Festigkeitssteigerung der Staehle, s. 90, Verlag Stahleisen, Duesseldorf, 1976
7. Pardun, M., Bruchmechanische Untersuchungen von mikrolegierten Staehlen mit mittleren Kohlenstoffgehalt nach TMB, Dissertation, RWTH Aachen, 1998
8. Gross, D., Seeling, Th., Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik, s. 316, Springer Verlag, Berlin, 2001
9. Hagedorn, K. E., Kaspar, R. ve Kleine, R., Untersuchungen zum Einfluss des Gefüges auf bruchmechanische Kennwerte, steel research 61, No:10,: 510-517, 1990
10. Österle, W., Microstructure-Strength Relationships for LC and HSLA Steels, Steel Research, 65, No. 8, 338-344, 1994
11. Askeland, D. R., Materialeigenschaften, Grundlagen, Übungen, Lösungen, s. 412, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1996
12. Huchtemann, B., Schüler, V., Entwicklungstand der AFP\_Staehle mit Vanadinzusatz, Thyssen Tech. Berichte, 16.Band, Heft 1:3-11, 1990
13. Kaspar, R., et al., Eigenschaftspotential von mikrolegierten Staehlen für Gesenkschmieden, Stahl u. Eisen 120, Nr. 10, : 95-102, 2000



14. Hulka, K., et al., Metallurgical concept and full-scale testing of a high toughness, H<sub>2</sub>S resistant 0,03 %C – 0,10 % Nb steel, Niobium Technical Report, 16/90, 1990
15. Miller, L. E., ve Smith, G. C., Tensile fractures in carbon steels, J. Iron Steel Inst. 208 : 998-1005, 1970
16. Schwalbe, K.-H., Bruchmechanik metallischer Werkstoffe, s. 847, Carl Hanser Verlag, München, 1980