



Farklı Miktarlarda Vanadyum, Titanyum ve Niyobyum İçeren Sıcak Haddelenmiş Mikro Alaşımlı Çelik Profillerin İç Yapı Özellikleri ve Mekanik Özellikleri

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans

Metehan Doğan

ORCID 0000-0003-1175-9277

Tez Danışmanı: Doc. Dr. Hüsnügül Yılmaz Atay

OCAK 2023

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Metehan Doğan** tarafından hazırlanan **Farklı Miktarlarda Vanadyum, Titanyum ve Niyobyum İçeren Sıcak Haddelenmiş Mikroalaşımli Çelik Profillerin İÇyapı Özellikleri ve Mekanik Özellikleri** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Doc. Dr. Hüsnügül Yılmaz Atay**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Tez Eş-danışmanı:

Jüri Üyeleri:

Doc. Dr. Hüsnügül Yılmaz Atay
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Doc. Dr. Onur Ertuğrul
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır Uyulgan
Dokuz Eylül Üniversitesi

Savunma Tarihi: 18.01.2023

Yazarlık Beyanı

Ben, **Metehan Doğan**, başlığı **Farklı Miktarlarda Vanadyum, Titanyum ve Niyobyum İçeren Sıcak Haddelenmiş Mikroalaşımli elik Profillerin İçyapı Özellikleri ve Mekanik Özellikleri** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans / Doktora derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi alışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

İmza:

Tarih:

Farklı Miktarlarda Vanadyum, Titanyum ve Niyobyum İçeren Sıcak Haddelenmiş Mikro Alaşımli Çelik Profillerin İçyapı Özellikleri ve Mekanik Özellikleri

Özet

Mikro alaşımli çelikler, çelik türleri arasındaki en rekabetçi ürünler olarak dünya çelik üretiminde önemli bir yere sahiptir. Mikro alaşım elementleri ihtiva eden çelikler yapı sektöründe çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sıcak haddeleme, dövme gibi yöntemlerle üretilen bu çeliklere küçük miktarlarda vanadyum, niyobyum ve titanyum ilave edilmesi ile soğuma esnasında çökme sertleşmesi ile ince taneli yapı elde edilmesi sağlanabilir. Ayrıca, östenit tane büyümesini engelleyerek karbür, nitrür ve karbonitrürler oluşturarak ince taneli yapılar oluşmasını sağlarlar. Bu sayede, ısı işlem ile elde edilebilen bu özellikler ısı işlem prosesi ve maliyeti ortadan kaldırılarak sağlanmış olur. Kontrollü soğutularak istenilen yüksek mukavemet değerlerine ulaşılan bu çelikler, enerji sektöründe, yüksek mukavemete ihtiyaç duyulan kritik ekipmanlarda ve yapı sektöründe kullanılmaktadır. Bu çalışma, sürekli döküm sonrası sıcak haddelenmiş mikro alaşımli çeliklerde vanadyum, niyobyum ve titanyumun mekanik özelliklere ve iç yapıya etkisinin incelenmesi çalışmalarını içermektedir. Farklı miktarlarda vanadyum, titanyum ve niyobyum gibi mikro alaşım elementlerini ihtiva eden çelikler sürekli döküm ve sıcak haddeleme prosesleri ile üretilmiştir. Birçok döküm ve haddeleme prosesi takip edilerek numuneler alınmıştır. Sıcak haddeleme sonrası üretilen ürünlerden alınan numunelere bir dizi test işlemi yapılmıştır. Numuneler kimyasal analiz, çekme testi, darbe testi, sertlik ölçümü, optik inceleme ve SEM analizi gibi testlere tabi tutulmuşlardır. Temel kimyasal kompozisyonu benzer fakat farklı miktarlarda vanadyum, titanyum ve niyobyum mikro alaşım elementi ihtiva eden çeliklerin mukavemet özellikleri ve iç yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak; her

bir elementin kullanım miktarına göre mukavemet ve mikro yapı özelliklerine farklı etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Mikro alaşımlı çelik, Vanadyum, Titanyum, Niyobyum, İç yapı, Mekanik Özellikler

Internal Structure Properties and Mechanical Properties of Hot Rolled Micro Alloy Steel Profiles Containing Different Amounts of Vanadium, Titanium and Niobium

Abstract

Micro-alloyed steels have an important place in world steel production as the most competitive products among steel types. Brands containing micro-alloy rudiments have a wide range of uses in the construction assiduity. By adding small amounts of vanadium, niobium and titanium to these steels produced by methods such as hot rolling and forging, a fine-grained structure can be obtained by precipitation hardening during cooling. In addition, they prevent austenite grain growth and form carbide, nitride and carbonitrides, allowing the formation of fine-grained structures. In this way, these properties, which can be obtained by heat treatment, are provided by eliminating the heat treatment process and cost. These steels, which reach the desired high strength values by controlled cooling, are used in the energy sector, critical equipment where high strength is required, and in the construction sector. This study includes studies on the effects of vanadium, niobium and titanium on the mechanical properties and internal structure of hot rolled micro-alloyed steels after continuous casting. Steels containing different amounts of micro alloying elements such as vanadium, titanium and niobium were produced by continuous casting and hot rolling processes. Samples were taken by following many casting and rolling processes. A series of tests were carried out on the samples taken from the products produced after hot rolling. The samples were subjected to tests such as chemical analysis, tensile test, impact test, hardness measurement, optical examination and SEM analysis. The strength properties and internal structures of steels with similar basic chemical composition but containing different amounts of vanadium, titanium

and niobium microalloy elements were investigated. As a result; It has been observed that each element has different effects on strength and microstructure properties according to the amount of use.

Keywords: Micro alloy steel, Vanadium, Titanium, Niobium, Internal structure, Mechanical Properties

Hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, yapmış olduğum çalışmada bilgi ve deneyimleriyle bana büyük katkılar sağlayan Sayın Doc.Dr. Hüsnügül Yılmaz Atay hocama ve çalışmada bana tüm teknik imkanların kullanımını sağlayan Özkan Demir Çelik sorumlu amirlerine ve çalışanlarına

Teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı	ii
Özet	iii
Abstract	v
Teşekkür	vii
Şekiller Listesi.....	x
Tablolar Listesi.....	xii
Kısaltmalar Listesi	xiii
Semboller Listesi.....	xv
1 Giriş.....	1
2 Mikro Alaşımli Çelikler.....	2
2.1 Mikroalaşımli Çeliklerin Üretim Aşamaları.....	2
2.2 Mikroalaşım Elementleri	4
2.2.1 Karbon	5
2.2.2 Azot.....	5
2.2.3 Titanyum.....	6
2.2.4 Vanadyum.....	6
2.2.5 Niyobyum	7
2.2.6 Alüminyum	7
2.2.7 Fosfor	8
2.2.8 Mangan	8
2.2.9 Silisyum	8
2.3 Mikroalaşımli Çeliklerin Metalurjisi.....	9
2.3.1 Ferrit ve Perlit Yapısı.....	10
2.3.2 Çökelme	13
2.3.3 Östenit Tane Boyutunun Kontrolü.....	16

2.4 Mikroalaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması	17
2.4.1 Vanadyum İçeren Mikroalaşımli Çelikler	17
2.4.2 Niyobyum İçeren Mikroalaşımli Çelikler.....	19
2.4.3 Vanadyum – Niyobyum İçeren Mikroalaşımli Çelikler	20
2.4.4 Vanadyum – Azot İçeren Mikroalaşımli Çelikler.....	20
2.4.5 Titanyum – Niyobyum İçeren Mikroalaşımli Çelikler	20
2.4.6 Titanyum İçeren Mikroalaşımli Çelikler	21
2.4.7 Niyobyum-molibden İçeren Mikroalaşımli Çelikler	22
3 Materyal ve Yöntem.....	23
3.1 Testlere Tabi Tutulacak Numunelerin Üretim Aşaması.....	24
3.2 Deneyler ve Gözlem	25
3.2.1 Optik Emisyon Spektrometre Analizi.....	26
3.2.2 Çekme Testi	28
3.2.3 Çentik Darbe Testi	30
3.2.4 Sertlik Testi.....	33
3.2.5 Mikroyapı İncelemesi	35
4 Bulgular ve Tartışma	37
4.1 Mikroyapı İncelemesi.....	37
4.1.1 Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi.....	37
4.1.2 SEM/EDS İncelemesi	48
4.2 Çekme Testi ve Sonuçları	53
4.3 Çentik Darbe Testi ve Sonuçları	54
4.4 Sertlik Testi ve Sonuçları	56
5 Sonuçlar	59
Kaynaklar	61
Özgeçmiş	64

Şekiller Listesi

Şekil 2.1	Kontrollü haddelemenin şematik gösterimi	3
Şekil 2.2	Çeliğe mikroalaşım elementlerinin etkileri	4
Şekil 2.3	Mikro alaşımlandırılmış çeliklerin tane büyüme davranışları.....	9
Şekil 2.4	Mikroalaşımli karbür ve nitrürlerin çözünürlük ilişkisi	14
Şekil 3.1	Çalışma yapılan numunelerin C-Fe diyagramındaki yeri.	23
Şekil 3.2	Numune alınan mamüllerin üretim şeması.....	25
Şekil 3.3	Optik emisyon spektrometre analizi için kullanılan cihaz	27
Şekil 3.4	Çekme testi yapılan cihaz.....	29
Şekil 3.5	Çekme testi için hazırlanan numunenin teknik resmi	29
Şekil 3.6	Çentik darbe deneyinin yapıldığı cihaz.....	31
Şekil 3.7	Çentik darbe testi için hazırlanan numunelerin teknik resmi	31
Şekil 3.8	Charpy çentik darbe deneyi şematigi	32
Şekil 3.9	Metallerin kırılma enerjisi ve sıcaklık eğrileri	33
Şekil 3.10	Brinell Sertlik testi cihazı.....	33
Şekil 3.11	Brinell sertlik deneyi prensibi	34
Şekil 3.12	Mikroyapı incelemesi için bakalit kaplama yapılan numuneler.....	35
Şekil 3.13	Mikroyapı incelemesinde kullanılan mikroskop.....	36
Şekil 4.1	1-T31 numunesinin X yönü mikroyapısı	38
Şekil 4.2	1-T31 numunesinin Y yönü mikroyapısı	38
Şekil 4.3	5-T25 numunesinin X yönü mikroyapısı	39
Şekil 4.4	5-T25 numunesinin Y yönü mikroyapısı	39
Şekil 4.5	3-V25 numunesinin X yönü mikroyapısı	40
Şekil 4.6	3-V25 numunesinin Y yönü mikroyapısı	40
Şekil 4.7	9-V22 numunesinin X yönü mikroyapısı	41
Şekil 4.8	9-V22 numunesinin Y yönü mikroyapısı.....	41
Şekil 4.9	6-N13 numunesinin X yönü mikroyapısı	42
Şekil 4.10	6-N13 numunesinin Y yönü mikroyapısı.....	43
Şekil 4.11	7-N15 numunesinin X yönü mikroyapısı	43
Şekil 4.12	7-N15 numunesinin Y yönü mikroyapısı	44
Şekil 4.13	2-V14T17 numunesinin X yönü mikroyapısı.....	45
Şekil 4.14	2-V14T17 numunesinin Y yönü mikroyapısı.....	45

Şekil 4.15	4-T10N09 numunesinin X yönü mikroyapısı.....	46
Şekil 4.16	4-T10N09 numunesinin Y yönü mikroyapısı.....	46
Şekil 4.17	8-V11N11 numunesinin X yönü mikroyapısı	47
Şekil 4.18	8-V11N11 numunesinin Y yönü mikroyapısı	47
Şekil 4.19	1-T31 numunesinde TiN görüntüsü	49
Şekil 4.20	1-T31 numunesinde EDS raporu.....	49
Şekil 4.21	4-T10N09 numunesinin TiN görüntüsü	50
Şekil 4.22	4-T10N09 numunesinin EDS raporu.....	50
Şekil 4.23	2-V14T17 numunesinde VC görüntüsü	51
Şekil 4.24	2-V14T17 numunesinde EDS raporu	51
Şekil 4.25	6-N13 numunesinde NbC görüntüsü.....	52
Şekil 4.26	6-N13 numunesinde EDS raporu	52
Şekil 4.27	Brinell sertlik testi sonuçları	57

Tablolar Listesi

Tablo 3.1 Testlere tabi tutulan numunelerin ortalama kimyasal kompozisyonu.	23
Tablo 3.2 Numune kodları.	28
Tablo 4.1 Çekme testi sonuçları.....	53
Tablo 4.2 Çekme testi sonuçları.....	53
Tablo 4.3 Çentik darbe testi sonuçları.....	55

Kısaltmalar Listesi

MA	Mikroalaşım
HSLA	Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı
Nb	Niyobyum
V	Vanadyum
Ti	Titanyum
TiN	Titanyumnitrür
TiC	Titanyumkarbür
VC	Vanadyumkarbür
VN	Vanadyumnitrür
NbN	Niyobyumnitrür
NbC	Niyobyumkarbür
N	Azot
C	Karbon
ITAB	Isının tesiri altında kalan bölge
Al	Alüminyum
AlN	Alüminumnitrür
Fe ₃ C	Sementit
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
HMK	Hacim Merkezli Kübik
VC	Vanadyumkarbür
VN	Vanadyumnitrür
NbN	Niyobyumnitrür
Mo	Molibden
Si	Silisyum
Mn	Mangan

Cr	Krom
S	Kükürt
Cu	Bakır
B	Bor
Ni	Nikel
P	Fosfor
ppm	Milyonda bir birim
EN	Avrupa Standartları
TS	Türk Standartları
CK	Çeşitkenar Köşebent
WF	Geniş lama
HRB	Brinell sertlik değeri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
SED	İkincil Elektron Dedektörü
BSE	Geri Saçılan Elektron Dedektörü
KE	Kırılma Enerjisi

Semboller Listesi

μm	Mikron
μ	Sürtünme katsayısı
α	Ferrit
σ_y	Akma gerilmesi
F	Kuvvet
$^{\circ}C$	Sıcaklık
σ_o	Sürtünme gerilmesi
σ_i	Tane sınırlı yapıda dislokasyon hareketi için gerekli sürtünme gerilmesi
d	Ferrit/perlit tane boyutu
D	Östenit tane boyutu
f_p	% perlit miktarı
n_p	Ölçüm çizgisi tarafından kesilen perlit tanelerinin toplam sayısı
ΔL	Boydaki uzama
L	Boy
β	Salınım açısı
h	Yükseklik

1 Giriş

Malzeme gruplarının mühendislikte kullanımı göz önüne alındığında, çeliğin kayda değer bir önemi olduğu söylenebilir. Çeliğe, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra deniz-hava- kara taşıt araçları, enerji santralleri, boru hatları ve derin deniz üstü yapılar, savunma sanayi ve benzeri sektörler için ihtiyaç ve talep artmıştır. Bu sektörlerdeki talep artışı çeliklerde yüksek mukavemet ve dayanımın artırılması üzerine çalışmaları tetiklemiştir. Daha küçük kesitte ve ağırlıkta, yüksek dayanımlı çelikler ihtiyaç duyulmuştur. İşletmeler daha küçük ölçekte daha yüksek mukavemet gösterebilecek mikroalaşım çeliklerin üretilmesi sayesinde tasarım kolaylığı sağlamışlardır. Ayrıca üretim ve işletme giderlerinin birim maliyetini azaltılmıştır. [1]

Düşük miktarlarda niyobyum, vanadyum, titanyum veya adı geçen elementlerin alaşımından meydana gelen mikroalaşımli çelikler 1960'lı yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. Yüksek mukavemetli düşük alaşım (HSLA) veya mikroalaşımli çelikler, karbonitrürler veya kararlı karbür oluşturarak olumlu yönde mekanik özellikler meydana getirirler. [2].

%0,05 ve %0,20 aralığında titanyum (Ti), vanadyum (V) ve niyobyum (Nb) bulunduran çelikler; mikroalaşımli çelikler özelinde sınıflandırılabilir ve ayrıca düşük sünek, korozyona dayanıklılık, gevrek geçiş sıcaklığı, yüksek tokluk, mükemmel kaynaklanabilirlik, yüksek dayanım gibi çeşitli özellikleri barındıran bu malzeme grubu, çeşitli sertleştirme mekanizmaları, uygun termomekanik ve kontrollü haddeleme işlemleri ile bu üstün özelliklere sahip olabilmektedir. [1]

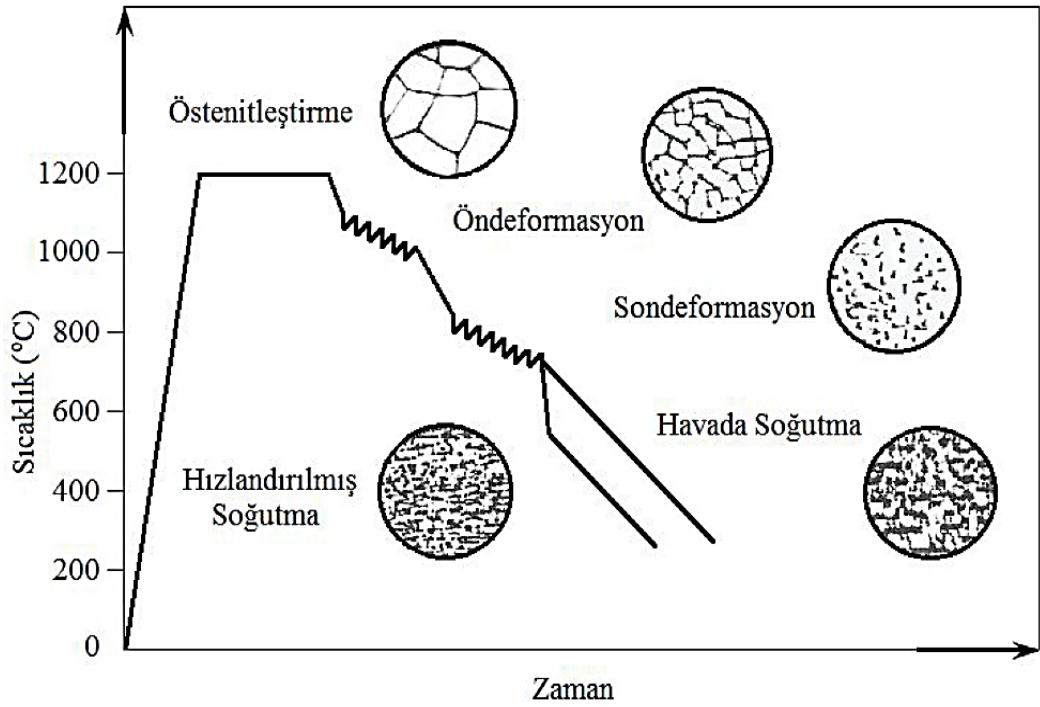
2 Mikro Alaşımli Çelikler

2.1 Mikro Alaşımli Çeliklerin Üretim Aşamaları

Döküm, Östenitleme (çözündürme tavlama), haddeleme (sıcak plastik deformasyon) ve soğutma aşamalarından meydana getirilen mikroalaşımli çeliklerin üretiminde en kayda değer öneme haiz olan aşamalar çözündürme tavlama ve haddeleme olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikroalaşımli çeliklerin mukavemetinin arttırılabilmesi için kaynak edilebilirlik ve talaşlı şekillendirilebilirlik özellikleri kayba uğramadan, tane küçültme sertleşmesi ve çökme mekanizmaları kullanılarak fosfor ve karbon gibi elementlerin oranları düşük tutulmaktadır. Çeliğin katılaşması sırasında oluşan mikroalaşım elementleri; karmaşık karbon-nitrür, karbür ve nitrür yapıları mekanizmanın çalışabilmesi için önemlidir. [3, 4]

Mikroalaşımli çeliklerin alaşım elementlerinin en önemli özelliği belli bir fazı kararlı hale getirmektir veya oluşumunu geliştirmek. Alaşım elementleri; nitrür, ferrit ve östenit oluşturuçulardan meydana gelmektedir. Tavlama aslen çeliği yeniden östenitleştirme evresidir. Haddeleme prosesi aşamasına gelmeden kütük tavlamasında başkalaşım tespit edilebilir. Çelik-içi bütün mikroalaşım elementlerinin östenit parçasının gelişmesine olanak tanımadan çözündürmesi için katılaşma sırasında meydana gelen niyobyum, titanyum ve vanadyum karbürlerinin tesirini en iyi düzeyde kullanmak gereklidir. Çözünme evresinde sıcaklık, tane büyümesine neden olmayacak kadar da düşük ve mikroalaşım elementlerinin çözünmesine izin verecek kadar yüksek olması gerekmektedir. [5] Östenitin tekrar kristalleşmediği sıcaklık değerlerinde yapılan düşük sıcaklıktaki haddeleme olurken, östenitin tekrar kristalleştiği sıcaklık değerlerinde yapılan yüksek sıcaklıklarda deformasyon yapılmaktadır. Düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde haddeleme bekletilmeden son işlem yani nihai ürüne ulaşılan dek sürekli deformasyona tabi tutuluyorsa işlem sıcak haddeleme, işlem süresiz ve belli deformasyon evrelerinde belli sıcaklıklara ulaşması hedefleniyorsa kontrollü haddeleme denir. Yüksek tokluk ve yüksek mukavemet gerçekleştirmek kontrollü haddeleme ile olasıdır. [4]

Kontrollü haddeleme, gerek duyulan sıcaklıkta malzemenin tavllanmasıyla oluşmaktadır. Deformasyon esnasında deformasyon ve sıcaklık kontrol edilir, haddelemenin ardından belirli bir hızda soğutma ile haddeleme işlemi tamamlanır. Kontrollü haddeleme ve soğuma kontrolü östenit yapının daha ince bir ferrit yapıya dönüşmesi için yapılır. Düşük karbonlu çeliğin mukavemet ve tokluk kontrolü östenitin ferrite dönüşürken oluşan tane yapılarıyla sağlanır. [4] Şekil 2.1'de kontrollü haddelemenin şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Kontrollü haddelemenin şematik gösterimi [6]

Kontrollü haddeleme istenen özellikler, maliyet ve olanaklar çerçevesinde üç değişik yöntem ile yapılmaktadır [6].

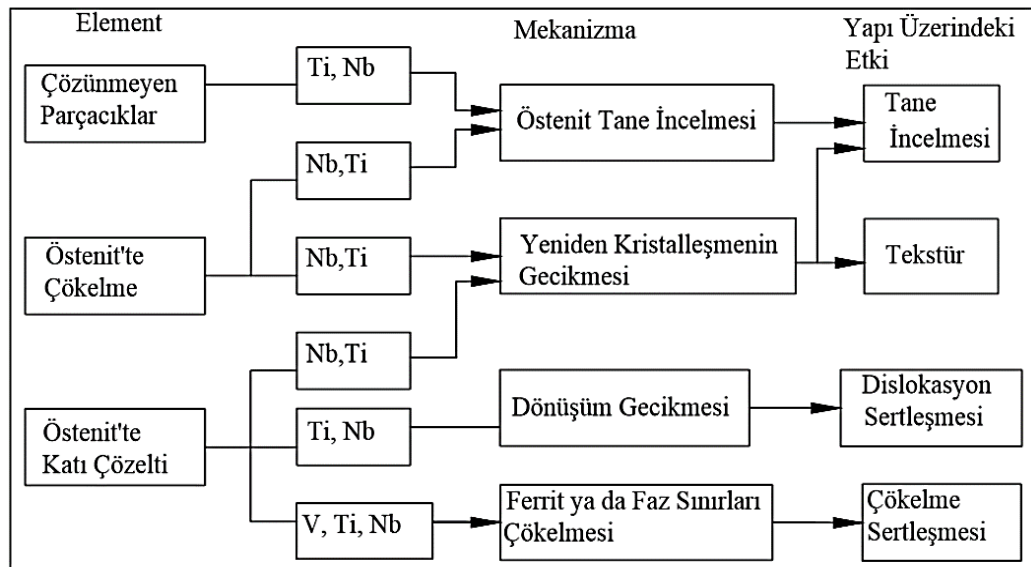
1. Konvansiyonel kontrollü haddeleme,
2. Yeniden kristalleşmeli kontrollü haddeleme,
3. Östenit/ ferrit eş fazlı sahada kontrollü haddeleme.

Tekrar eden kristalleşmeli bir ön haddeleme prosesi bu üç farklı metodun tamamı içine alır. Yeniden kristalleşmeli ön haddeleme 1100-1200 °C sıcaklıklarda sürekli haddeleme ve yeniden kristalleşme ile olabildiğince östenit fazda tane boyutunu

etkileyip büyümesinin önüne geçilmelidir. Yani çeliğin soğuma hızıyla ferrit fazındaki tane boyutu ters orantılıdır. Ek olarak tekrar eden kristalleşmeyi mümkün mertebe ağırlaştırdığı malum olan vanadyum ve titanyum elementlerinin mikroalaşım düzenleri bu çeşit kontrollü haddelemeden dolayı kimyasal kompozisyona katılır. N %0,010 aralığındaki kontrollü ihtivası çoğu zaman tane büyümesini engelleyen ve östenit fazında çözünmeyen ince dağılmış TiN oluşumunu meydana getirir. Bu oluşum ferrit fazında VN'un çökmesi ile mukavemeti iyileştirir. [4]

2.2 Mikro Alaşım Elementleri

Mikroalaşımli çelikler karbon elementi dışında farklı miktarlarda alaşım elementleri içerirler. Çeliklerde bu sayede başta dayanım olmak üzere bazı özellikleri iyileştirir. MA çeliklerinin bir başka deyişle HSLA çeliklerinin üretilmesinde ise mikroalaşım elementi olarak genellikle titanyum, vanadyum, niyobyum ve alüminyum kullanılmaktadır. Çelik içerisinde oluşan mikro yapılar üzerinde her bir element farklı tesir yapar iken, çeliğin özellikleri ve prosesleri üzerine etkileri de aynı değildir. Bu elementlerinin esas etkisi tane boyutunu azaltmak, yeniden kristalleşmeyi engelleyerek çökelti sertleşmesini sağlanmaktadır. Şekil 2.2'de mikroalaşım elementlerinin tesirleri belirtilmiştir.



Şekil 2.2: Çeliğe mikroalaşım elementlerinin etkileri [7]

MA elementlerinin oluşturduğu karbonitrür çökeltileri tane sınırı hareketine ve yeniden kristalleşmeye etkisi vardır. Çökeltiler soğuma esnasında oluşan veya östenitte çözünmeden kalabilir. Plastik deformasyonun artışı, çökelme hızı ile doğru orantılıdır.

2.2.1 Karbon

Çeliğin temel alaşım elementlerinden biri karbondur. Çeliğin içerisindeki derişime bağılı olarak mekanik özellikleri en çok etki eden elementlerden biridir. Çeliklerin içerisinde bulunan karbon elementinin miktarının artması sertliğini ve dayanımını önemli oranda artırmıştır. Karbon elementi, çeliğin yüzde uzamasını, esnekliğini, dövülebilirliğini, şekillendirme ve kaynak edilme özelliğini azaltır iken; akma ve çekme mukavemetini pozitif yönde etkiler. Tokluk ve kaynak kabiliyetinin azalması ayrıca perlit yapısının artması çeliğin kimyasal kompozisyonundaki karbon oranının fazla olmasından kaynaklandığı bilinir. Bunun dışında çeliğin akma ve çekme dayanımını atırmaktadır. Martenzit ve beyitik yapının oluşması çelikteki yüksek oranlarda karbon derişimi olduğu durumlarda görülmektedir. Mikroalaşım çeliklerde azami karbon derişimi %0,2 oranlarına yakındır ve bu oran sıcak haddeleme şartları altında geçerlidir. Mikro alaşımlı çeliklerde sadece kontrollü soğutma mekanizması ile çalışan otomotiv sanayisinde kullanılan dövme parçalarında karbon miktarı %0,25'in üstündedir [8].

2.2.2 Azot

Azot ihtivası çökelme sertleşmesi sağladığından dolayı etkilidir. V/N çeliklerde, VC'ye göre östenit dahilinde az miktarda çözünürlüğü bulunmasından dolayı çok daha kayda değer önemde olmasına imkân sağlamaktadır. N elementi mikroalaşımlı çeliklere %0,005 seviyesinde sınırında kullanılmaktadır. Kuvvetli östenit yapıcı özelliğinin yanı sıra, azot yüksek sıcaklık aralığındaki tane büyümesini engelleyebilmek için yüksek kromlu ya da az karbonlu çeliklerde de kullanılmaktadır. Ayrıca gevrekliğe sebebiyet verir. Bu nedenle eğme özelliklerini negatif yönde tesir etmektedir [9].

2.2.3 Titanyum

Titanyum elementi niobyum, wolfram, vanadyum ve molibden elementlerine benzer şekilde kuvvetli nitrür ve karbür yapıcı olduğu bilinmektedir. Titanyumun çelik içerisinde ince karbürlerin oluşmasında etkili bir element olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çeliğin mikroyapısının oluşmasını ve mekanik özelliklerinin iyileşmesini olumlu yönde etkiler. Çeliğin üretimi esnasında TiN yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır. Plastik deformasyon sırasında nitrürlerin etkisiyle östenit tane büyümesinin engellendiği görülmüştür. Titanyum genel olarak çelikte tane incelmeye sebep olur. ITAB bölgesinin en sıcak kısmında partikülleri çözünmeden kalabildiği görülen TiN'in, ITAB'ın kaba taneli mikro oluşumunu ince taneli mikro oluşuma dönüştüren en kayda değer mikroalaşım çökeltilerden birisi olduğu bilinmektedir. Ti elementinin etkili olması için çelik katılaşmanın ardından derhal 25 ve 35 °C/dak hızında soğutma gerçekleştirilmelidir. [2, 10].

2.2.4 Vanadyum

Vanadyumun oluşturduğu çökeltiler östenitin sertleşme yeteneğini artırırken, ferrit tane düzeyi küçülmüştür. Ferrit içerisinde ince çökeltilerin meydana gelmesine ve ferrit-perlit ara yüzeyinde de çökelti oluşmasına neden olduğu gözlemlenmekle birlikte vanadyum ferrit içerisinde yer alan titanyum ve niobyum gibi elementlerin çözünürlüğünü azalttığı görülmüştür. Vanadyumun östenit fazındaki çözünürlüğü titanyum ve niobyuma göre çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [11].

Kontrollü haddeleme öncesi normalize uygulanmış çeliklerde, VC/VN çökelti olarak haddeleme sırasında yüksek mukavemet ve dayanım gerektiren çeliklerin oluşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra vanadyum çeliğin akma dayanımını artırır. Artan vanadyum miktarına bağlı olarak akma dayanımı daha da yükselmektedir. Vanadyum tane incelmeye etkisi az olması sebebiyle tokluğa tesiri azdır. Östenit tane sınırında ve östenit tane içerisinde ferrit oluşmasını temin eder ve ITAB bölgesinin tokluğunun yükselmesine etki eder. HSLA çeliklerin vanadyumun %0,01 ile %0,015 arasında bulunması çeliğin akma dayanımını yükseltirken, darbe direnci ve kaynak edilme yeteneğini fazla bir etkisi olmadığı söylenebilir [9, 12].

2.2.5 Niyobyum

Niyobyum (Nb) çelik içerisinde yaygın olarak kullanılan elementlerden bir tanesidir. Nb çeliğin iç yapısının küçük taneli olmasına ve A3 sıcaklık eğrisinin eğiminin artmasına sebep olmaktadır. Ferritin ara yer içeriğinin azalmasına niyobyumun karbür oluşturması neden olmaktadır. Niyobyum elementinin oluşturduğu karbonitrürler tavlama sıcaklığında çözülmediği görülmüştür. Çeliğin mekanik özelliğine büyük etkisi olan Nb elementi çeliğin akma gerilmesinin 70-100 MPa artmasını %0,02 Nb ilavesi ile sağlanmaktadır. Katı eriyik ile çökelme sertleşmesi ve bunun yanında önemli miktarda tane küçülmesi çeliğin akma gerilmesini artırmaktadır. Al ilavesi ile çeliğin darbe direncindeki azalmayı ve geçiş sıcaklığındaki artma önlenir. Bu durumun oluşması karbon oranının mümkün mertebe düşürülmesi ile büyük oranda giderilebilir. Nb elementi en etkili mikro alaşım elementidir. Mikro alaşımlı çeliklerin dövme, kontrollü haddeleme ve soğumayla çeliğin mekanik ve iç yapı özelliklerinin iyileştirilmesi için çelik içinde ihtiva edilmektedir. Niyobyum elementi tek başına veya Ti elementi ile birlikte paslanmaz çeliklerde de kullanılır. [13]

2.2.6 Alüminyum

Alüminyum elementinin ferrit-martenzit ara yüzeyinde karbür meydana gelmesini engeller. Ferritin sünekliliği alüminyum elementinin karbon elementini aktive etmesi ile artar. Dönüşüm sıcaklığını yükseltmesi ile beraber A₃ sıcaklık eğrisinin eğimini yükselterek ısı işlem alanını büyütür. Alüminyum ferrit fazındaki azotu AlN şeklinde bağlayarak küçük taneli yapıların oluşmasını sağlamaktadır. Alüminyum çeliğin darbe direncini yükseltir. Geçiş sıcaklığının azalmasını sağlar ve akma gerilmesini tane küçültücü etkisinden dolayı artırmaktadır. Akma gerilmesinin azalması ve ferritin dayanımı AlN oluşması ile ferrit yapıda bulunan serbest haldeki azot atomlarının azalmasından kaynaklanır. Akma dayanımının artmasına AlN çökeltilerinin dislokasyon hareketlerine engel olmasının bir neticesidir. Çeliğe alüminyumun ilavesi ile yukarıda bahsedilen üç vakadan herhangi birisinin baskın olması durumunda etki o minvalde gerçekleşecektir. [10, 14]

2.2.7 Fosfor

Fosfor ve bakır birlikte kullanıldığında çeliğin korozyon dayanımını önemli ölçüde artırır ve ek olarak katı çözültü sertleştirilmesinde, ferrit içerisinde etkilidir. Çeliğin içerisinde %0,05'den az bulunan fosfor östenit tane sınırında oluşan segragasyonların kırılma direncine sebep olduğu görülmüştür. Çelikte %0,07 ile %0,12 oranları arası varolan fosfor çeliğin kesme yeteneğini iyileştirdiği bilinmektedir. Fosforun çeliğe yüksek oranlarda eklenmesi, sünekliğini düşürürken soğuk şekillendirme sırasında çeliğin kırılmasına ve çatlamasına sebep olduğu görülmüştür [14].

2.2.8 Mangan

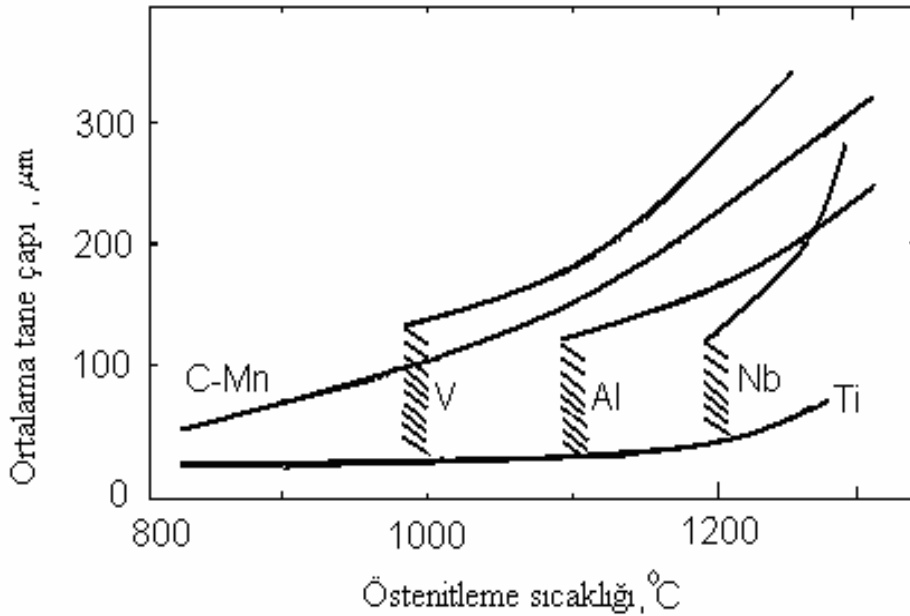
Mangan çeliğe ilave edildiğinde A_1 ve A_3 sıcaklığını azaltır ve dönüşüm ürünlerinin tane boyutunu inceltir. Çelik içindeki mangan derişimi malzemenin sertliğini, dayanımını, kaynak kabiliyetini, dövülebilirlik ve su verme derinliğini olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca korozyona ve paslanmaya karşı dayanımını artırır. Deformasyon yaşanmasının gecikmesine sebep olan ince karbür dağılımı çelikteki mangan oranının artmasının bir sonucu olduğu belirtilmiştir. Çelikteki manganın %1,8 değerinin üzerinde var olması çeliğin sünekliğinin azalmasına benzer dezavantaja neden olur. Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelikler yaklaşık %1,5 oranında mangan derişimi vardır [9].

2.2.9 Silisyum

Çelik üretimi prosesinde silisyum oksijen giderici olarak kullanılan önemli elementlerden bir tanesidir. Kimyasal kompozisyonundaki silisyum derişimi, çeliğin üretim şekline göre farklılık göstermektedir. Çeliğin akma dayanımı, çekme dayanımını ve sünekliğini artıran silisyum elementinin tesiri mangan elementine göre daha az olduğu bilinir. Silisyum dönüşüm sıcaklığını artırmakta bu sebepten dolayı tavlama işleminde ferrit tanelerinin irileşmesine sebep olmaktadır. Çeliğin dayanım-süneklik ilişkisinin gelişmesi ilave edilen silisyumun katı eriyik sertleşmesine katkıda bulunmasının bir sonucu olduğu görülmüştür. Silisyumun, çeliğin soğuk deformasyonu sırasında yüksek deformasyon sertleşmesine sebep olduğu bilinmektedir [2, 15].

2.3 Mikro Alaşımli Çeliklerin Metalurjisi

Her geçen gün gelişmiş ülkelerde mikro alaşımli çeliklere ihtiyaç duyulmakta ve üretimi artmaktadır. Endüstriyel otomotiv parçalarında ve dövme üretimlerde uygulamanın gün geçtikçe arttığı gözlemlenebilir. Mikro alaşımli çeliklerin birçok üretim şekli vardır. Bu yöntemler içinde daha sık rastladığımız prosesler östenitleştirme, çözündürme tavlaması ve haddeleme işlemleridir. Hadde öncesi tavlama işlemi, bir östenitleştirme işlemidir. Niyobyum, vanadyum ve titanyum karbürleri katılma sırasında meydana gelir ve bunların tesirlerinden azami boyutta faydalanabilmek için bütün mikro alaşım elementlerini, östenit tane gelişimine olanak tanımadan çözündürmek elzemdir. Söz konusu durumda sıcaklık, tane büyümesi yaratmayacak kadar düşük seviyede ve mikro alaşım elementlerinin çözünmesine meydan bırakacak kadar da yüksek tutulmalıdır. Tane büyümesini önleyen şey, ısıtılma sürecinde çeliğin çökelmiş karbonitrür parçalarının hassas yayılımlarının östenit tane sınırlarının kilitlemesi durumudur. Yine de gerektiği kadar uzun sürede ve/veya gerektiği kadar yüksek sıcaklıklarda çözülen parçacıklar, kabalaşarak tane sınır kilit etkisini zayıflatır ve tane kabalaşması oluşur. Şekil 2.3' de Bazı mikro alaşımlandırılmış çeliklerin tane büyümesine etkisi görülmektedir [14]



Şekil 2.3: Mikro alaşımlandırılmış çeliklerin tane büyüme davranışları [14, 16]

Sürekli haddelemeden ayrıışan bu kontrollü haddeleme süreci iki veya üç basamak bulundurabilmektedir. Bu basamaklar ise şu şekilde ifade edilebilir; düşük sıcaklıkta haddeleme serisi (700-800°C) “finishing”, “roughing” veya yüksek sıcaklıkta haddeleme (1100-1200°C). Ferrit tane boyutunun küçültülmesi ve mukavemetinin arttırılması için haddeleme sonrası soğutma yapılmaktadır. Sıcak haddeleme olarak isimlendirilen işlem yüksek sıcaklıkta sürekli olarak meydana gelir. Öte yandan yüksek sıcaklıkta süreksiz yapılan haddeleme kontrollü haddeleme olarak karşımıza çıkmaktadır. [3, 14]

Genel olarak düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerde poligonal ferrit matrisi yaklaşık %20 safhalarında homojen biçimde ayrılmış perlit bulunduran yapı barındırır. Öte yandan yüksek miktarda perlit barındıran yapılar yüksek karbonlu çelikler de görülmektedir. Çelik içerisinde %0.40 C ve %1.5 Mn ihtiva ettiği durumda, östenit sahasından havada soğutulduğunda %80’den fazla perlit yapı görülebilir. Östenitlenme sıcaklığı arttıkça küçük kesitli bölgelerde perlit oranında kayda değer artışa rastlanmaktadır. Yani orta ve yüksek karbonlu mikro alaşımlı çeliklerde ferritik-perlitik mikro yapı mekanik özellikleri etkilemektedir [17].

2.3.1 Ferrit ve Perlit Yapısı

Demirde kübik ve hacim merkezli yapıda bulunan ferrit (α -demir), ara yer katı eriyiğı olarak asgari orandaki karbonun erimesi ile meydana gelmektedir. Çözülebilen azami karbon oranı %0.008 olan ferrit çelikteki en yumuşak faz olma özelliğı göstermektedir ve ek olarak demir-karbon denge diyagramında “ α ” sembolü ile belirtilmektedir.

Perlit’in % 0.83 karbon bulunduran ötektoid yapısına karşılık, sementit (Fe_3C) % 6.67 karbon bulunduran demir karbürden meydana gelmektedir. Sementit, kırılğan ve sert özelliklerini taşıması ile beraber çeliğın içerisindeki en sert faz olarak değerlendirilmektedir. Ağ şeklinde ve iğneli olarak bulunduğu yapıda, basma mukavemeti yüksek ve çekme dayanımı düşük olarak ifade edilebilir.

Ferrit ve sementit fazlarının çelik içerisindeki karışımı ile meydana gelen yapı perlit olarak ifade edilmektedir. Çeliğın çok yavaş soğuması ile östenit yapıdan 723 °C altındaki sıcaklıkta meydana gelmektedir. Yapıda yuvarlak taneli veya lamelli bir

mikroyapıya sahiptir. Perlitin taneli türü, 723 °C sıcaklıkta tavlama ve çok yavaş soğutma ile oluşabilmekte, lamelli türü ise havada soğutma ile biçimlenmektedir. [18]

Ferrit ve perlitin tane boyutu ve miktarı çeliğin direk olarak mekanik özelliklerine etki etmektedir.

Hall-Petch tarafından akma gerilmesi ve tane boyutu arasında deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır [19, 20]. Bu çalışmalar neticesinde tane boyutunun akmaya etkisi Formül 2.1. görüldüğü gibi formülize edilmiştir

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (2.1)$$

Bu formülde;

σ_y = Akma gerilmesi

σ_i = Tane sınırlı yapıda dislokasyon hareketi için gerekli sürtünme gerilmesi

k_y = Malzeme sabiti

d = Ferrit tane boyutu

Formülde görüldüğü gibi tane boyutu artışı akma gerilmesini düşürmektedir. Tane boyutunun küçülmesi akmaya etki ettiği gibi tokluğa da önemli etkisi vardır. Tane küçülmesinin akmayı olumlu etkilediği gibi tokluğuda benzer şekilde etkiler.

Küçük taneli yapının oluşması için önemli faktörler;

- Ferrit tane büyümesini geciktirmek
- Ferrit çekirdeklesmesini arttırmak.
- Yeniden kristallesmeyi geciktirmek
- Östenitleştirme sıcaklığında tane büyümesini engellemek.

Perlit yapılarının mukavemete etkisi incelenecek olursa en önemli etkenlerden biri yine tane boyutudur. Tane boyutu Formül 2.2'de yine bir Hall-Petch formülü dönüşümü ile hesaplanabilir.

$$\sigma_y = \sigma_o + k_s L^{-1/2} \quad (2.2)$$

Formülde σ_y , akma gerilmesinin σ_o , sürtünme gerilmesini k_s malzeme sabitini ve L ise lameller arası mesafeyi temsil etmektedir.

Tane küçülmesi tabii ki tek başına mekanik özelliklere etki etmez. MA çeliklerinde çökeltmenin de önemli bir rolü vardır. Bu katı eriyikler tane boyutu ile birlikte mukavemete etki eder. Bu etki Gladman tarafından Formül 2.3 de gösterildiği gibi Hall-Petch denkleminin geliştirilmesiyle gösterilmiştir. [21]

$$\sigma_y = \sigma_i + \sigma_{ss} + \sigma_p + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (2.3)$$

Formülde, σ_{ss} , katı eriyik sertleşmesini, σ_p çökelti sertleşmesini ifade etmektedir.

Tüm bunların yanında σ_i ve σ_o olarak gösterdiğimiz tane sınırlı yapıda dislokasyon hareketi için gerekli sürtünme gerilmesine etki eden bazı faktörler vardır. Kristallografik, çökeltme sertleşmesi, sıcaklık, katı eriyik sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi, deformasyon oranı faktörlerden meydana gelen bu yapı ayrıca ferritin tane boyutu direk olarak östenit tane boyutu ile alakalıdır.

Tane boyutunun hesaplanmasında en yaygın yöntem ortalama kesme metodudur. Bu metod haddeleme yönüne 45° açı yapacak şekilde bir ölçüm çizgi belirlenir. Bu çizginin tane boyutlarını bölme veya teğet geçme durumlarına göre sabitler belirlenir ve Formül 2.4 te gösterildiği gibi ferrit tane büyüklüğü bulunur.

$$i_\alpha = \frac{L(1-f_p)}{n_\alpha} \quad (2.4)$$

i_α = Ferrit tane büyüklüğü (μ m)

L = Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu

f_p = % perlit miktarı

n_α = ölçüm çizgisi tarafından kesilen ferrit tanelerinin toplam sayısı (belirlenen sabit)

Benzer formül perlit içinde kullanılır. Formül 2.5'te görüldüğü gibi perlit tane boyutuda hesaplanabilir.

$$i_p = \frac{L \cdot f_p}{n_p} \quad (2.5)$$

i_p = Perlit tane büyüklüğü (μm)

L = Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu

f_p = % perlit miktarı

n_p = Ölçüm çizgisi tarafından kesilen perlit tanelerinin toplam sayısı (belirlenen sabit)

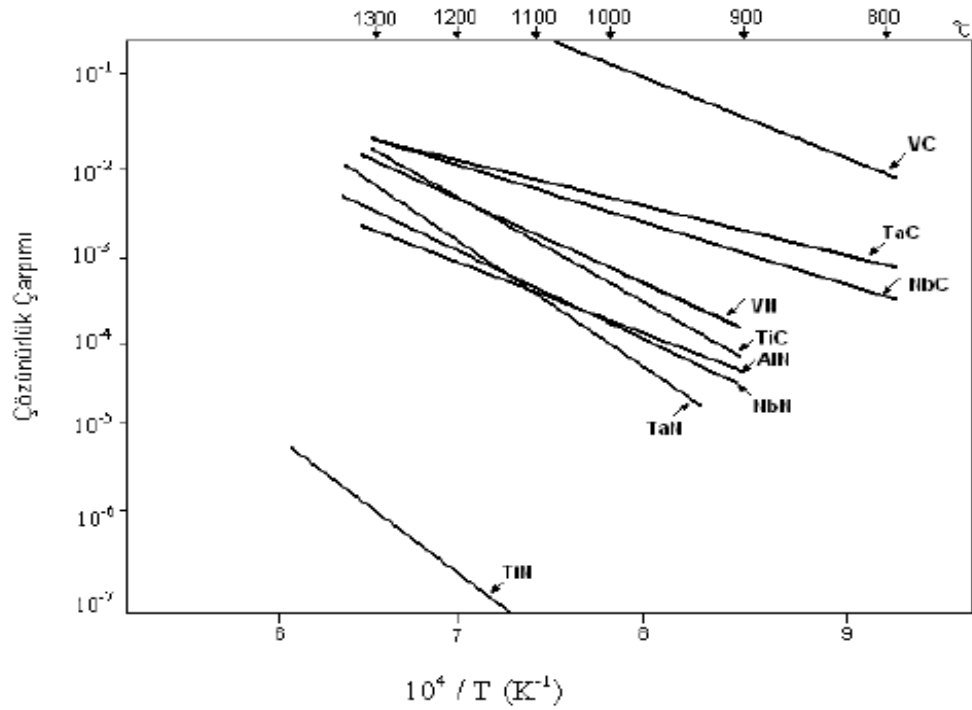
Ferrit veya perlit toplam nokta sayısının sayılan toplam nokta sayısına oranı bize ferrit ya da perlitin çelik içerisindeki hacimsel oranını verir. Gladman ve Woodhead tarafından ifade edilmiş olan metalografik nokta sayım metodu olarak da isimlendirilmektedir. [21, 22]

2.3.2 Çökelme

Mikroalaşımli çeliklerde çoğunlukla kullanılan vanadyum, niyobyum ve titanyum çelik içerisinde yüzey merkezli kübik yapıda karbürler ve nitürler oluşmasına neden olurlar. Latis noktalarına her birine birer tane olmak üzere karbon/nitür ve metal atomlarından oluşan iç içe geçmiş yapı YMK'dır ve kristal yapıyı meydana getirir. İçerisinde mevcut bir boşluğun var olmadığı durumda kimyasal formülü TiC (titanyumkarbür), NbC (niyobyumkarbür) ve VC (vanadyumkarbür) olarak ifade edilmesine karşın latis noktalarında boşluk gözlenebilir. Eşit sayıda karbon ve metal atomlarının olmadığı durumda stokiometrik formülasyon yapılabilmektedir. Karbürlerde görüldüğü kadar fazla olmamakla birlikte nitür yapıda eşit olmayan boşluklar stokiometrik formülasyonda sapma yaratabilmektedir.

Benzer latis parametresi gözlemlenen karbür ve nitürlerdeki yapının kendi içlerinde tamamına yakınının çözülebildiği söylenebilir. Karbonitür olarak görülen bileşikler vanadyum ve niyobyum barındıran çeliklerde bulunmaktadır. Yapıdaki karbon ve azot miktarına göre karbonitürün bileşiminde farklılık gözlenmektedir. Karbonitürdeki azot oranını arttıran yüksek N/C miktarıdır. Değişen sıcaklıklarda meydana gelen karbonitür bileşimi, çözünebilirlik tarafından etkilenmektedir.

Çözünürlüğü karbürlerden aşağıda olan nitrürlerin yüksek sıcaklık oranında meydana gelen bileşiklerde azot oranları daha fazladır. Söz konusu durumun aksine ise titanyum barındıran alaşımlarda rastlamak mümkündür. TiC'ün çözüldüğü yüksek sıcaklık seviyesinde meydana getirilen TiN çözünme göstermez. Bu sebeplerden dolayı daha düşük sıcaklık seviyesinde meydana gelen TiC içerisinde azot bulundurmaz ve sıvı fazda TiN meydana gelerek bileşim içerisinde azotla bileşik oluşturur. Bileşik meydana getiren elementlerin çeliklerdeki çözünürlüğü alakalı çözünürlük ürünleriyle eşdeğerdedir. Şekil 2.4 de karbonitrür çözünürlükleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Mikroalaşımli karbür ve nitrürlerin çözünürlük ilişkisi [17, 23]

Farklı bileşikteki nitrür ve karbürlerin çözünürlük ve çözünürlük sınırları ile alakalı çalışmalar Gladman, Pickering ve Irvın tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu denklemler;

$$\text{Log } 10 (\text{Al}) (\text{N}) = - 6770 / T + 1.03 \quad (2.6)$$

$$\text{Log } 10 (\text{V}) (\text{N}) = - 8330 / T + 3.46 \quad (2.7)$$

$$\text{Log } 10 (\text{Nb}) (\text{C}) = - 6770 / T + 2.26 \quad (2.8)$$

$$\text{Log } 10 (\text{Ti}) (\text{C}) = - 6770 / T + 1.03 \quad (2.9)$$

Burada; T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. [21]

Çözünen bileşikler mercek altına alındığında, bileşiği meydana getiren elementlerin sayısı arttıkça bileşiği çözeltilmeye alma sıcaklık oranının arttığı ifade edilebilmektedir. Söz konusu durum karbür yapıcı elementlerin oranlarında sınırlama yapma gerekçemizi ortaya çıkarmaktadır, şöyle ki Mikroalaşımli çeliklerde mukavemeti arttırabilmek için bu sınırlandırma gereklidir. Örneğin; 1100°C’de 0.025 C içeren çelikte çözünen Nb’un miktarı % 0.8 iken, 0.1 C içeren çelikte % 0.02 kadardır ve ek olarak 1100°C’de çözünen vanadyum derişimi % 0,02 N içeriğinde yaklaşık % 0,15 iken %0,04 N içeriğinde %0,1’in daha düşük olmaktadır. Titanyumnitrür, TiN, NbC ve VN göz önüne alındığında en kararlı bileşik olarak karşımıza çıkmaktadır. En az çözünebilen karbonitrür ise östenit’tir. Yüksek sıcaklıklarda östenit tane büyümesinin önüne geçer ve soğuma sırasında östenit fazında çökme olmasına neden olur. Deformasyonun olmadığı aşırı yavaş soğuma hızlarında dahi oluşmayan TiN östenit fazındaki bu çökme yavaştır. Çeliğin mukavemet artışına katkısı az bulunan östenit fazındaki çökelmeler hızlı meydana gelir ve büyür. Bu da mukavemete olumlu yansımaktadır. [14]

Çözünürlüğün ferrit fazında çok az olması nedeniyle aşırı doymuş ferritte çökme oluşmaktadır. Söz konusu çökelmeyi yaratan iki etken bulunmaktadır. Çökelmelerin dislokasyonlar üzerinde de meydana geldiği değerlendirilmektedir ve bir diğeri ise ferrit/östenit ara yüzeyi boyunca oluşan ve arkasında kalan parçacıkların levha düzeni aldığı dizidir.

Yüksek sıcaklıkta meydana gelen poligonall ferritte çökme fazı çoğunlukla ara yüzeyde gerçekleşmektedir buna karşın iki çeşit çökme gözlemlenmektedir. İğnesel ferritte faz sınırlarında çökelmeye rastlanmamaktadır ve düşük sıcaklıkta genel çökme gerçekleşir. Faz sınırlarındaki çökme genel çökelmeye göre daha küçük tanelidir. Azalan levhalar arasındaki uzaklık ve dönüşüm sıcaklığının düşmesi sonucu faz sınırlarındaki çökmede mukavemet artmaktadır.

Makul kompozisyon ve deformasyon süreçleri ile ferrit fazında çökme gerçekleştirmek için östenit fazında çökelmenin artması, ferrit’teki potansiyeli azaltır ve mukavemeti istenmeyen bir şekilde etkiler. [17]

2.3.3 Östenit Tane Boyutunun Kontrolü

Karbonitrür yapıların çökmesi ve deformasyon süreci östenit tane boyutun kontrolüne yardım eder. Alüminyum ile deokside edilmiş çeliklerde ilk tane boyutunun kontrol edildiği yapıda yetebilecek mevcutta azot bulunduğunda yeterli oranda alüminyum nitür (AlN) meydana gelir. Bu yapı tane sınırlarına çökelen partiküller tanelerin büyümelerini önlemektedir. Fakat belirli bir çökelti boyutunun üzerinde tane büyümesini önlenemez. Bu kritik değer büyümesi engellenen tanenin ilk boyutunun partiküllerin hacim oranıyla ilişkilidir. Küçük taneli çelikler ısıtıldığında, partikül boyutlarında artış görülür. Partiküllerin çözünmesiyle birlikte partikül hacim oranı azalır. Belirli bir sıcaklıkta partikül boyutu kritik boyuta eşitlenmektedir bu durum iki faktörün bir aradaki etkisi sonucu oluşur. Bundan dolayı çelikle tane büyümesi gözlemlenebilmektedir.

Alüminyumnitür bütünüyle de-okside edilmiş çeliklerde bilinen ve kullanılan tane incelticidir. Mikroalaşımli çeliklerde meydana gelen nitür ve karbürlerden tane küçültücü olarak faydalanmak yarı de-okside edilmiş çeliklerde alternatif bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıkta kararlı olan niyobyum barındıran bileşikler, östenitleme sıcaklıklarında tane büyümesini önlerler. Vanadyum karbürler düşük sıcaklıklarda çözüldüğü için tercih edilmezler ancak daha yüksek azot miktarlarında çözünme sıcaklıkları artmasına sebep olur. NbC ile aynı çözünme niteliklerine sahip TiC tane küçültücü olarak kullanıldığında problem teşkil etmemektedir. TiN 'de yeterince özenle gerçekleştirilmelidir. Genel olarak %0.01-%0.015 arasında Ti tane küçültücü TiN meydana gelmesi için yeterli bir miktardır. Kararlı yapısı ve yavaş büyümesinden dolayı titanyumnitrür, sıcak işlem öncesi yüksek sıcaklıklara ısıtılan alaşımda tane büyümesini engellemektedir. Çeliğe aşırı oranda titanyum takviyesi gerçekleştirilirse TiN fazla büyür ve meydana çıkan östenit tanelerinin büyümesini önlemede sonuçsuz kalır. [17]

2.4 Mikro Alaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması

İçerdikleri alaşım elementlerine göre mikroalaşımli çeliklerin sınıflandırılması şu şekildedir;

- Vanadyum ihtiva eden MA çelikleri
- Niyobyum ihtiva eden MA çelikleri
- Vanadyum-niyobyum ihtiva eden MA çelikleri
- Vanadyum-azot ihtiva eden MA çelikleri
- Titanyum ihtiva eden MA çelikleri
- Niyobyum-titanyum ihtiva eden MA çelikleri
- Vanadyum-titanyum ihtiva eden MA çelikleri
- Niyobyum-molibden ihtiva eden MA çelikleri [24]

2.4.1 Vanadyum İçeren Mikro Alaşımli Çelikler

Çoğunlukla % 0.10 miktarına kadar V barındıran sıcak haddelenmiş mikroalaşımli çeliklerin yanı sıra vanadyum barındıran çelikler kontrollü haddelenmiş, temperlenmiş, su verilmiş, normalize edilmiş zamanlarda da kullanılmaktadırlar. Sıcak haddelemenin ardından soğuma esnasında vanadyum ferrit içerisinde 5 – 100 nm çapında V(CN) tipi küçük çökelti partikülleri meydana getirerek mukavemeti olumlu taraftan etkilemesi istenmektedir. Vanadyum çökeltileri niyobyum çökeltilerine oranla kararlı değildir. Vanadyum çökeltilerinin normal haddeleme sıcaklıklarında çözültide oldukları oluşumları soğuma hızına dayanmaktadır. Niyobyumun oluşturduğu çökeltiler ise yüksek sıcaklıklarda kararlı olup, ince taneli ferrit oluşmasını sağlarlar. [25]

Sıcak haddelemenin ardından soğuma hızına, kesit kalınlığına ve karbon içeriğine dayanarak ağırlıkça %0.01 V mukavemetinde 5 ile 15 MPa yükselme görülür. Haddeleme sıcaklığı ve kesit kalınlığı ile tespit edilen soğuma hızı, %0.15 V

barındıran bir çelikte çökeltme sertleşmesinin seviyesine etki eder. Soğuma hızının yaklaşık 170 °C/dk olduğu durumlarda çökeltme sertleşmesi görülebilir ve ayrıca düşük değerdeki soğuma hızlarında V(CN) çökeltmeleri daha kabalaşır. Bu durumda mukavemeti yükseltmede negatif yönlü tesiri olur. Yüksek soğuma hızlarında daha çok V(CN) çözelti içerisinde kalır ve küçük oranda V(CN) partikülleri çökeltir dolayısıyla mukavemet düşme görülür. Belirlenmiş kesit kalınlığında ve soğuma ortamında, soğuma hızının artışı veya azalışı; soğuma öncesi sıcaklığın azaltılması veya arttırılmasıyla elde edilebilir. [17]

Büyük östenit tane boyutu sıcaklığın arttırılması neden olurken sıcaklığın azaltılması haddelenmeyi şartlarını olumsuz etkiler. Manganez içeriği de Vanadyum mikroalaşımli çeliklerinin mukavemetini manganez içeriği de tesir eder. Vanadyumlu çeliklerde mangan östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığını azaltarak yapıda ufacık taneli çökeltmelerin meydana getirebilir ve mukavemeti iyileştirir.

Vanadyum içeren çeliklerinin mukavemetini etkileyen üçüncü faktörde ferrit tane boyutu olup östenitleme sıcaklığından soğuma sonrasında oluşur. Nispeten ufak taneli ferrit yüksek akma mukavemeti sağlar. Tokluk ve süneklikte artışa sebep olur. Küçük taneli ferrit düşük östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığı ile veya dönüşüm öncesi meydana gelen küçük östenit tane boyutu ile oluşturulabilir. Çökeltme sertleşme derecesini etkileyen dönüşüm sıcaklığının azaltılması, alaşım ilavesi ve/veya soğuma hızlarının yükseltilmesi ile veya azaltılması ile kontrol edilebilir. Belirli bir soğuma hızında, ferrit tane boyutunda daha fazla küçülme haddelenme sırasında östenit tane boyutunun küçültülmesiyle sağlanabilir. Östenit tane boyutu sıcak haddelenmiş çeliklerde haddelenme esnasında östenitin tane büyümesiyle ve yeniden kristalleşmeyle belirlenebilir.

Geleneksel haddelenme haricinde kontrollü tekrardan kristalleşme haddelenmesi de sıcak haddelenmiş vanadyum çelikleri için gerçekleştirilebilmektedir. Vanadyum çeliklerinde geleneksel haddelenme nihayetinde ortaya çıkan mukavemetin kayda değer bir kesimi çökeltme sertleşmesinden az miktardaki kesimi ise tane küçülmesinden oluşmaktadır. Akma mukavemeti seviyesi en iyi düzeye çıkarılmak için sıcak haddelenmiş vanadyumlu mikroalaşımli çeliklere kontrollü haddelenme teknikleri uygulanabilir. Kontrollü haddelenme esnasında yeniden kristalleşmenin

oluştugu vanadyumlu çeliklerde östenit tane büyümesini önleyebilmek için Ti ilave edilerek küçük taneli TiN çökeltilerinin meydana gelmesi sağlanabilir. [17]

2.4.2 Niyobyum İçeren Mikro Alaşımli Çelikler

Çökelme sertleşmesi aracılığıyla akma mukavemetinin arttıran niyobyum elementi, çökelen karbürlerinin boyutuna ve oranına ile ilişkili olarak artışın büyüklüğü farklılık arz edebilir. Niyobyum elementi vanadyum elementi ile karşılaştırdığımızda, daha etkili bir tane küçültücü element olduğu görülür ve önemli bir mukavemet arttırıcı olduğu görülür. Çelik üretiminde niyobyum eklenmesi normal vanadyum eklenmesi miktarının üçte biri kadarı ile benzer kazanımlar elde edilebilir. Genel olarak %0.02 ile %0.04 arasında niyobyum derişimi görülür. [17]

%0.01 oranında niyobyum eklenmesi 35-40 MPa mukavemette yükseliş gösterir. Niyobyum kuvvetli bir mukavemet arttırıcı element olmasıyla birlikte tokluğuda düşürmektedir. Bunu engelleyebilmek için mahsus bir haddeleme prosesi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak karbon oranı düşürülerek üst beynit meydana gelmesinden uzaklaşılır. Niyobyum ihtiva eden MA çeliklerde yüksek sıcaklık da yapılan haddeleme işlemi yapıldığı takdirde değişken büyüklükte taneler görülebilir veya Widmanstätten ferrit oluşumuna ve böylece de malzemenin tokluğun azalmasına sebebiyet verir. Niyobyum ihtiva eden çelikler kontrollü haddeleme, kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi, hızlı soğutma ve doğrudan su vermeye meydana getirilir. Niyobyum elementi içeren çeliğe yapılan kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi titanyum olmadan da istenilen mekanik özellik sağlayacak şekilde üretilebilir fakat vanadyumlu mikroalaşımli çeliklerde tane boyutunu küçültmek için titanyuma ihtiyaç duyulur. Niyobyum barındıran çeliğe, niyobyum oranı azaltılmasının gerekli olduğu durumda çeliğe titanyum eklendiği gözlenmektedir. Kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesinin yapılabilmesi, niyobyum-titanyum içeren çeliklerin daha yüksek sıcaklara getirilmesi ile mümkündür. [25]

2.4.3 Vanadyum – Niyobyum İçeren Mikro Alaşımlı elikler

Hem vanadyum hem niyobyum ihtiva eden çeliklerde bilinen sıcak haddelenmeyle, bu elementlerden sadece bir tanesi ile mevcut olandan daha yüksek akma mukavemetleri sağlanabilir. Sıcak haddelenme yapılarak niyobyum vanadyum çelikleri yüksek mukavemetinin bütününü kkelme sertleşmesinden sağlar. kkelme sertleşmesi sayesinde yüksek sünek-gevrek geçiş sıcaklığına sahip olurlar ve eğer elik kontrollü haddelendiye, niyobyum ve vanadyumun birlikte bulunması tane küçülmesiyle mukavemetin yükselmesi ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığında düşüşe sebep olur. Çoğunlukla, niyobyum-vanadyum eliklerindeki karbon oranları az miktarda olup 0.10% civarındadır. Düşük karbon oranı perlit oranını azaltarak alaşımın kaynaklanabilirliğini, tokluğunu ve sünekliliğini pozitif yönde etki eder. [25]

2.4.4 Vanadyum – Azot İçeren Mikro Alaşımlı elikler

kkelme sertleşmesinin kayda değer miktarda yükselmesine neden olan durum V ihtiva eden yüksek mukavemetli çeliklere azot eklenmesidir. VN keltilerine neden olan durum ise niyobyum ve vanadyuma göre azotla nispeten kolay bileşik oluşturmasıdır. entik darbe dayanımını kkelme sertleşmesi olumsuz yönde etkiler. entik darbe dayanımındaki düşüşe ancak karbon miktarının azaltması yoluyla nlem alınabilir. Tane oranının küçülmesi VN kkelmesinin en kayda değer etkisi olarak gözükmektedir. Azotu 9,5 mm kalınlığın üstündeki kontrollü soğutulmuş ürünlerin kkelme sertleşmesini sağlamak için kullanılabilir. Azot ısı etkisi altındaki bölgenin tokluğuna olumsuz etkide bulunduğundan dolayı kaynak edilecek çelikler için kullanımı uygun değildir. [25]

2.4.5 Titanyum – Niyobyum İçeren Mikro Alaşımlı elikler

Malum olduğu üzere mekanik niteliklerinde farklılaşma olması ve tokluk anlamında sınırlı olması, kkelme sertleştirmesi ile mukavemeti yükseltelen titanyum barındıran çeliklerde yaygındır. Ancak bütün özelliklerde iyileşme sağlanabilmesi için düşük karbonlu niyobyum çeliklerine titanyum eklenmelidir. Ti elik içerisindeki azotu TiN olarak bağlamakta ve bu şekilde NbN oluşumunu önleyerek alaşımdaki niyobyumun verimini yükseltmektedir. Sonuç olarak niyobyumun stenitdeki znrlğ

yükselterek ferrit fazında Nb(C,N) çökmesinde artış olur. Sıcak haddelenmiş niyobyum ve titanyum ihtiva eden çeliklerde ferrit-perlitik yapıda akma mukavemeti iyileştirmektedir. Bu alaşımlara vanadyum veya molibden eklenmesi akma mukavemetini daha da artırır. [26]

2.4.6 Titanyum İçeren Mikro Alaşımlı Çelikler

Çökme sertleşmesi ve tane küçülmesi kontrolü sağlayacak çok sayıdaki bileşik düşük karbonlu çeliklerde titanyum sayesinde meydana getirilebilmektedir. Bilindiği gibi Ti güçlü bir deoksidandır. Döküm esnasında vakum yapılması Ti elementinin özelliklerini göstermesinde önem arz eder. Bundan dolayı titanyum, alüminyum ile deoksidede yapılmış çeliklerle bir araya getirilmeye uygundur.

Niyobyum, vanadyum veya her ikisini birden ihtiva eden çeliklerde olduğu gibi, titanyum elementi de mikroalaşımlı çeliklerde de tane küçülmesi ve çökme sertleşmesi mekanizmalarında etkilidir. Mukavemet artışına etki eder. Mekanik özelliklerdeki iyileşme ilave edilen miktara ve uygulanan üretim prosesiyle değişiklikler gösterir. Sürekli döküm veya yeniden tavlama yoluyla üretilen çeliklerde, küçük miktarda kullanılan titanyum tane küçültmede etkilidir. Tane irileşmesi östenit fazında titanyum nitrür oluşumuyla gerçekleşir. Çelik içerisindeki %0,025 ve altındaki titanyum derişimi kontrollü tekrardan kristalleşme haddelenmesinde kayda değerdir. Şöyle ki TiN tekrardan kristalleşmiş östenitin tane irileşmesinin gecikmesini sağlar. Titanyum geleneksel kontrollü haddelenme prosesinde orta derece tane küçültücü olmasına karşın vanadyumdan daha fazla fakat niyobyumdan daha az tane küçültücü etkisi vardır. [26]

Titanyum karbür meydana getirmek için, çökme sertleşmesi esnasında için %0,025 derişim oranından daha fazla titanyum gerekmektedir. Çünkü öncelikli olarak TiN oluşturur, sıvı fazda oluşan bu çökelti kaba olduğu için östenit tane büyümesini önler. Fakat çökme sertleşmesi üzerinde küçük bir tesiri bulunmaktadır. Ti miktarı artırıldığında önce titanyum barındıran manganez sülfür esaslı inklüzyonların oluşumunu (Mn, Ti)S, sonra büyük yapıda karbosülfürlerin $Ti_4C_2S_2$ oluşumunu sağlar. Bu oluşum kükürtlü inklüzyonlarda şekil kontrolünü sağlar. $Ti_4C_2S_2$ oluşumunu, düşük karbonlu çeliklerde çökme sertleşmesi için kullanılabilen titanyum karbür (TiC) oluşumunun ardından oluşur. Çözünmeyen kaba taneli

titanyum nitrürler, çökelme sertleşmesine katılmayan karbosülfürler, toplam titanyum bileşimi çökelme sertleşmesi sağlayabilmek için hesaplanmalıdır.

MA çeliklerde titanyum miktarının ayarlanması önemlidir. Titanyum kullanımı, titanyum karbür vanadyum ve niyobyuma göre daha fazla çökelme sertleşmesi artırır. Tane boyutunda küçültme yapılması tokluk ve çökelme sertleşmesinde azalmaya neden olmaması için önemlidir. Vanadyum, titanyum ve niyobyuma göre orta seviyede tane küçültücüdür. Yüksek seviyedeki mukavemet artışı çökelme sertleşmesi nihayetinde elde edilen tokluk ile azalmaya fayda sağlamaktadır. Yalnızca titanyum kullanılması özellikle yüksek mukavemetli sıcak haddelenmiş ürünlerde mekanik özelliklerde olumsuz bir kararsızlığa sebebiyet verebilmektedir. [17]

2.4.7 Niyobyum-Molibden İçeren Mikro Alaşımli Çelikler

İğnesel ferrit mikroyapısı veya perlit-ferrit mikroyapısı görülmektedir. Ferrit – perlit niyobyum çeliklerinde, molibden eklenmesi çekme ve akma mukavemetleri 0% dan 0.27% Mo aralığında her %0.1 için yaklaşık 25 MPa arttığı görülür. Perlitin üst beyniti ve morfolojisini değiştirmek molibdenin mikroyapı üzerindeki tesirinin perlitin yerine almasına tesir etmesi sonucu meydana gelmektedir. Fakat, beynit ve perlitin tek başına mukavemet değerleri yakın olduğu için mukavemetteki artışın molibden-niyobyum etkileşimin sonucu katı-eriyik sertleşmesine ve Nb(CN) çökelme sertleşmesine bağlıdır. Çökelme sertleşmesindeki artış molibdenin eklenmesi ile gözlenmektedir, niyobyum ve molibden arasındaki etkileşim de bununla ilişkilidir. Söz konusu artış östenitdeki çözünürlüğün artması, karbon aktivitesindeki azalış ve molibdenin çelik içerisinde yer alması bu çökelenin azalması ile açıklanabilir. Sonuç olarak ferrit fazında daha fazla çökelme meydana gelecek bu durumda mukavemette yükselişe tesir yaratacaktır. [25]

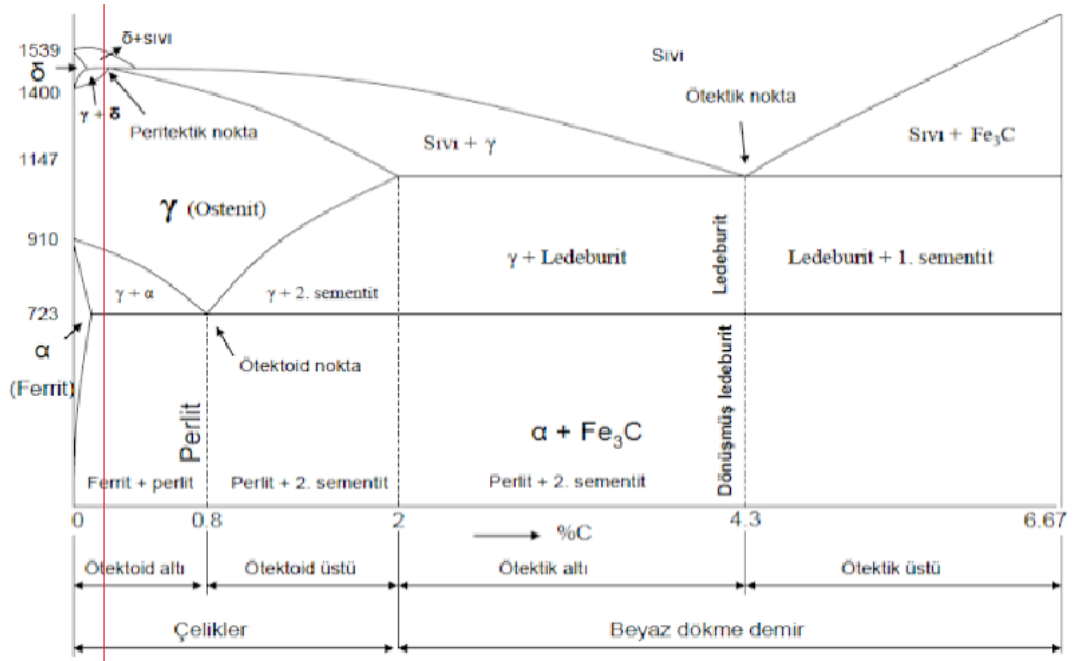
3 Materyal ve Yöntem

Belirlenen analizlerde yapılan dökümler, haddeleme prosesleri ve deneylerin birçoğu Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş. firmasının tesislerinde ve laboratuvarlarında yapılmıştır. SEM analizi İzmir Katip Çelebi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada benzer kompozisyonda fakat farklı miktarlarda V,Ti ve Nb ihtiva eden çelik profilin mekanik özellikleri ve içyapısı incelenmiştir. Profillerin ortalama kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1’ de belirtildiği şekildedir.

Tablo 3.1: Testlere tabi tutulan numunelerin ortalama kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Analiz														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Nb	Ti	B	N
(%)														(ppm)
0,15	0,25	1,15	0,01	0,01	0,1	0,1	0,4	0,015	?	0,025	?	?	0	100

Şekil 3.1’ de kırmızı çizgi ile gösterildiği gibi demir-karbon denge diyagramında çalışmayı yaptığımız bölge yaklaşık olarak belirtilmiştir.



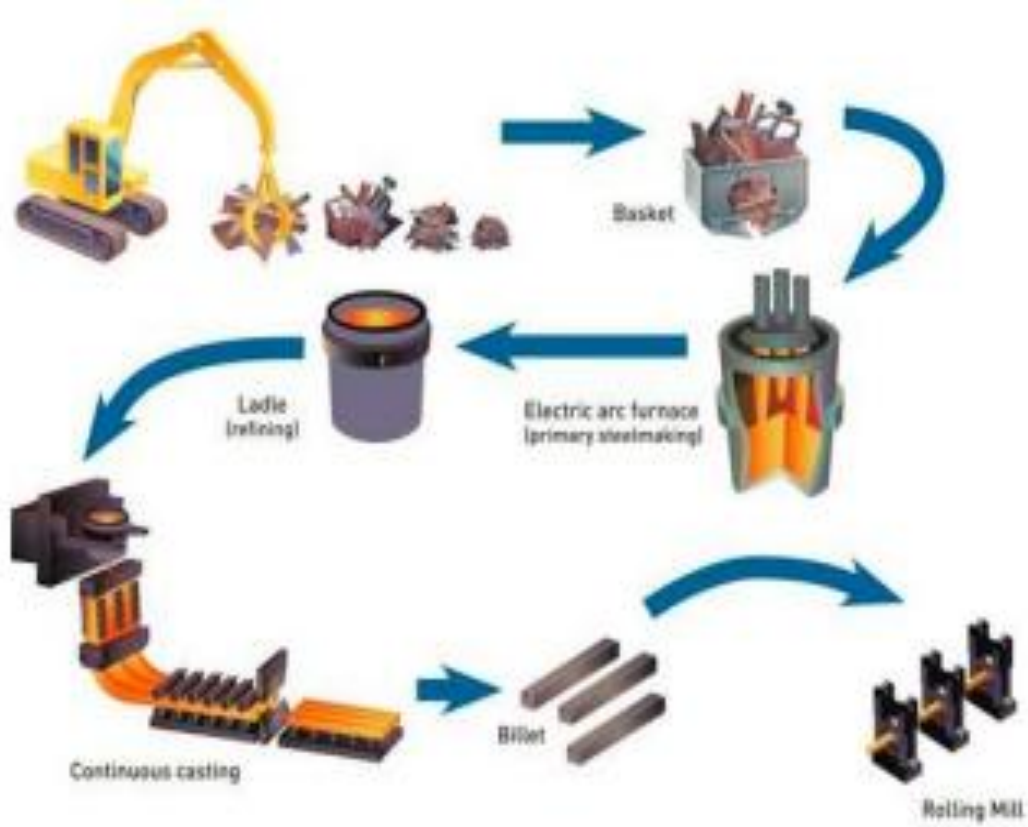
Şekil 3.1: Çalışma yapılan numunenelerin C-Fe diyagramındaki yeri.

3.1 Testlere Tabi Tutulacak Numunelerin Üretim Aşaması

Hammadde olarak kullanılan hurda ark ocağında ergitilir. Potalarda alaşımlama işlemi yapılır. Yaptığımız çalışmada V,Ti ve Nb elementleri parçacık olarak yani 20-60 mm boyutlarında belli geometrisi olmayan taşa benzer formda çeliğe verildi. Vanadyum birincil alaşım malzemeleri ile birlikte verilirken niyobyum ve titanyum pota işlemi sonunda verilir. Kullanılan bileşiklerde vanadyum % 75 , Niyobyum ve titanyum % 60 saflıktadır ve çeliğe geçiş verimi % 85 civarındadır. Bileşikte bu elementlerden sonra en yüksek oran demir elementidir. Al,Si,Ta,P ve C elementleri de azda olsa kimyasal kompozisyonda vardır. Alaşımlama işlemi tamamlandıktan sonra Sıvı çelik sürekli döküm prosesine tabi tutulur. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra yarı ürün olarak adlandırdığımız çelik kütüklerden numuneler alınarak kimyasal kompozisyonu kontrol edilir.

Kütüklerin kontrollü soğuması gerçekleştirilir. Soğuyan kütüklere haddeleme prosesinin gerektirdiği değerler (çesitkenar için EN 10056 ve lamalar için EN 10059) doğrultusunda tav ocağında istenilen sıcaklıklara tavladıktan sonra haddeleme işlemini gerçekleştirilir. Şekil 3.2’de testlere tabi tuttuğumuz profillerin üretim akışı gösterilmiştir.

Uygulanan bu proseslerin ardından profillerden 500 mm. uzunluğunda numuneler alınıp testler için hazırlandı. Numunelere önce spektrometrede kimyasal kompozisyon belirlemek amaçlı analiz yapıldı. Yapılan analizin ardında çekme, sertlik, çentik darbe testleri ve mikroyapı incelemesi için numuneler hazırlandı.



Şekil 3.2: Numune alınan mamüllerin üretim şeması.

3.2 Deneyler ve Gözlem

Deneyler farklı ebatların mamüllerinden alınan numuneler ile yapıldı. Seçilen ebatlar Çeşitkenar 125*75*8, Çeşitkenar 100*75*7 ve Lama 203,2*9,53 ebatlarıdır. Ebat seçiminde dikkat edilen bazı durumlar;

- Döküm şartlarının aynı olması.
- Mamül ezme oranlarının denk veya yaklaşık olarak aynı olması.
- Tavlama ve haddeleme prosesleri gerçekleşirken sıcaklık değişkeninin 3 ebat içinde aynı olması.
- Haddeleme süresinin eşit olması.

Bu etmenlere dikkat edilmesinin nedeni ise yapılacak olan testlere direk etki etmesidir. Vanadyum, titanyum ve niyobyum elementlerinin çelik içerisindeki

derişimlerinin etkisini daha net irdelemek için diğer alaşım elementlerinin derişimini ve üretim prosesinde ki değişkenleri en mümkün seviyede sabit tutulması gereklidir.

Çalışma yapılan üç ebadın yaklaşık ezme oranları 15'tir. Ezme oranı olarak adlandırdığımız terim ise çıkan profil kesitinin haddeleme yapılan kütük kesitine oranıdır.

Mamüller sürekli döküm prosesi vakumsuz bir şekilde gerçekleştikten sonra kontrollü soğutulmuştur. Her üç ebat içinde kütükler tav ocağında 1190 °C sıcaklığına kadar tavlanaştır. Tavlama işlemleri tamamlandığında yarı mamül olarak adlandırdığımız kütüklerin haddeleme prosesine başlanmıştır. Haddeleme prosesi kontinü olarak gerçekleştirilmiş olup hadde finiş hızı 3,25 m/s olarak ölçülmüştür. Haddeleme prosesi tamamlandığı andaki mamül sıcaklığı 980 °C olarak ölçülmüştür. Yani kütük tavlanaştırak östenit fazına getirildi ve haddeleme prosesi boyunca östenit fazında idi. Her bir mamülün toplam haddeleme süresi 185 saniyedir.

3.2.1 Optik Emisyon Spektrometre Analizi

Optik emisyon spektrometre cihazı ile analizi sürekli döküm gerçekleştikten sonra üretilen kütüklere ve kütük haddelendikten sonra oluşan nihai ürünlere yapıldı. Spektrometre analizi metal malzemelerin kimyasal kompozisyonun ne olduğu ölçmek ve belirlemede kullanılır.

Var olan bütün elementlerin değişken niteliklerde ışığa yaydığı bir durum olarak elektrik akımına maruz kaldıkları durum söz konusudur. Bu değişken ışılarda her bir elementin kendine has spektrum çizgisine sahip olduğu spektrometre cihazı ölçümleri sayesinde anlaşılmaktadır. Bu belirleyici nitelikler aracılığıyla metalik malzemenin miktarları ve elementleri tespit edilebilir. Analiz için kullanılan optik emisyon spektrometre cihaz Thermo Arl markadır ve cihaz Şekil 3.3 'de belirtilmiştir.



Şekil 3.3: Optik emisyon spektrometre analizi için kullanılan cihaz

Nihai ürünün kimyasal kompozisyonuna göre numunelere kodlamalar yapıldı. Kodlama yapılırken ihtiva ettikleri vanadyum, titanyum ve niyobyum elementlerinin miktarları ve numune alma sırası dikkate alınarak belirlendi. Örneğin, 5-T25 kodunu açıklayacak olursak sadece % 0,025 oranında titanyum ihtiva eden numune için ihtiva ettiği elementin baş harfinin yanına binde kaç derişimi var ise yazıldı. Bu kodun önüne de araya “-“ işareti konularak numune numarası yazıldı. İki adet element ihtiva ediyorsa her iki elementin baş harfi ve binde derişimi yazıldı. Tablo 3.2 ’de tüm numunelerin kodlaması gösterildi.

Tablo 3.2: Numune kodları

Numune Numarası	EBAT	İhtiva Ettiği Element ve % Miktarı	Numune Kodu
1	CK 100*75*7	% 0,031 Ti	1-T31
2	CK 100*75*7	0,014 V ve 0,017 Ti	2-V14T17
3	CK 100*75*7	0,025 V	3-V25
4	CK 125*75*8	0,010 Ti ve 0,09 Nb	4-T10N09
5	CK 125*75*8	0,025 Ti	5-T25
6	CK 125*75*8	0,013 Nb	6-N13
7	WF 203,2*9,53	0,015 Nb	7-N15
8	WF 203,2*9,53	0,011 V ve 0,011 Nb	8-V11N11
9	WF 203,2*9,53	0,022 V	9-V22

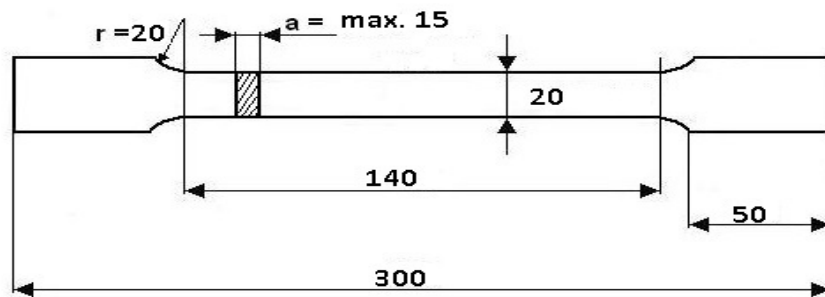
3.2.2 Çekme Testi

Çekme testi Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş. laboratuvarların da gerçekleştirildi. Mamülden alınan numune TS EN 6892-1 standartlarına uygun şekilde testere ve frezede işlendi. İşlenen numuneler Instron marka çekme testi cihazında çekme testine tabi tutuldu. Cihazın resmi Şekil 3.4'te belirtilmiştir.



Şekil 3.4: Çekme testi yapılan cihaz

Oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri çekme testidir ve malzemelerin mekanik niteliklerini tespit etmek için elverişlidir. Söz konusu deneyde yavaş ve statik olarak gerçekleştirilen yük vermeye malzemenin dayanıklılığı ölçülebilmektedir. Şekil 3.5'te teknik resimde belirtildiği gibi hazırlanan numuneler universal test makinesine konulur ve numuneye kuvvet verilir. Numunenin kalınlık kesiti ürünün kendi kesitiyle aynıdır. Yük hücresi kullanılarak uygulanan kuvvet, ekstensometre kullanılarak malzemedeki uzama oranı ölçülmektedir. Söz konusu ölçümler ile gerilim- gerilim eğrisine ulaşılmaktadır. Malzemenin mukavemeti, rijitliği ve sünekliği çekme deneyi ile tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.5: Çekme testi için hazırlanan numunenin teknik resmi.

Eğme ve basma deneylerini gerçekleştirmek de universal test cihazı ile olası bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Malzemenin başka kuvvetler etkisinde ne tür bir davranış sergilediği, malzemenin seçimi ve kalite kontrolü herhangi bir uygulama için elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile gelecek çalışmalarda faydalı bir tahmin için kullanılabilir. Doğrudan deneyden çıkarılan bilgiler ise alandaki azalma, maksimum çekme gerilmesi ve uzamadır. Poisson oranı, pekleşme, Young katsayısı ve akma mukavemeti gibi özellikler bu veriler aracılığıyla değerlendirilebilir. Makineye konan numune kopana kadar çekme kuvvetine maruz bırakılarak test gerçekleştirilir. Standart kesitteki uzama miktarı kuvvetin uygulanma süresi boyunca uygulanan kuvvete orantılı şekilde kayda geçirilir. Aşağıdaki denklem aracılığıyla uzama miktarındaki veriler mühendislik deformasyonunu (ϵ) tespit etmekte kullanılmaktadır:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

ΔL boydaki uzama, L_0 başlangıç uzunluğu ve L de son uzunluktur. Aşağıdaki denklemle de kuvvet verileri kullanılarak mühendislik gerilmesi, σ hesaplanır:

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (3.2)$$

F kuvveti, A da standart kesit alanını göstermekle birlikte, makine, kuvvet arttıkça bu hesaplamaları yapar ve bu verilerden bir gerilme-deformasyon eğrisi çıkarır. [27, 28]

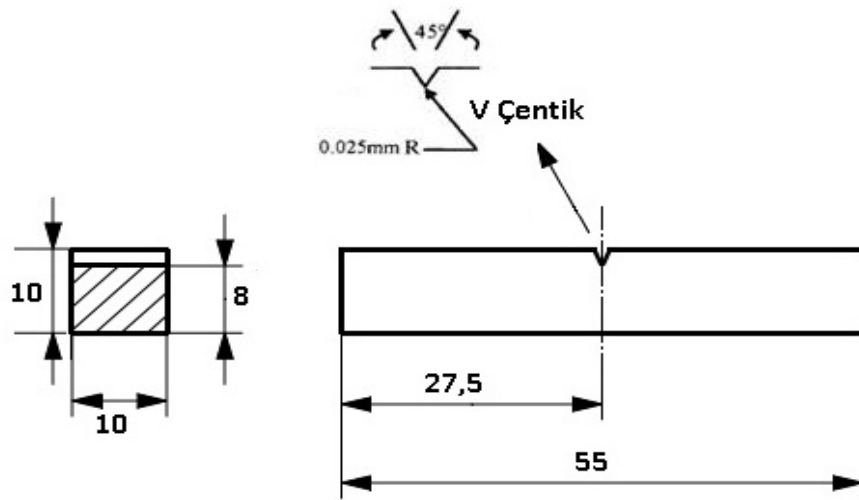
3.2.3 Çentik Darbe Testi

Çentik darbe testi Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş. laboratuvarların da gerçekleştirildi. Mamülden alınan numune TS EN 6892-1 standartlarına uygun şekilde testere ve frezede işlendi. İşlenen Numuneler Instron marka çentik darbe testi cihazında çentik darbe testine tabi tutuldu. Test cihazı şekil 3.6 'da gösterilmiştir. Testler numuneleri 0°C ve -20 0 °C sıcaklıklarına soğutulup yapıldı. Testler için hazırlanan numuneler üretimden alınan her bir numuneden 3 set olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.6: Çentik darbe deneyinin yapıldığı cihaz

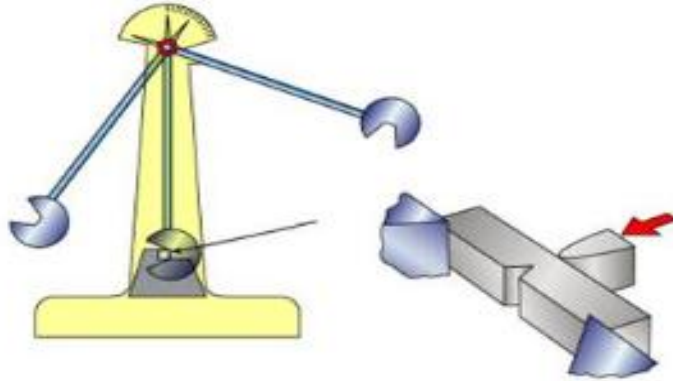
Prensip olarak iki tip çentik darbe deneyi vardır. Biri bizim deneylerde de kullandığımız numunenin iki taraflı mesnetlendiği charpy çentik darbe deneyidir. Diğeri ise işlenen numunenin tek taraflı mesnetlendiği izod darbe deneyidir. Charpy çentik deneyide çentik şekline göre sınıflandırılabilir. Deneylerde kullandığımız Şekil 3.7’de görüldüğü gibi “V” şeklinde çentik açılarak yapılarak Carpy çentik deneyidir.



Şekil 3.7: Çentik darbe testi için hazırlanan numunelerin teknik resmi

Basit ve yatay kiriş halinde 2 mesnete dayandırılan örneğin çentik tabanında oluşturulan çok yönlü gerilimler etkisi, çentik tabanına sarkacın ucundaki çekiçle darbe oluşturulması ile gerçekleştirilir. Bu durum örneğin kırılması için meydana çıkan enerjiyi belirleme işlemi olarak deneyde karşımıza çıkmaktadır. Deneyin çalışma prensibi ve cihazın şematiği Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Belirli bir h_1 yüksekliğinden örneği kırması için serbest bırakılan Bir l uzunluğundaki sarkacın uç noktasındaki G ağırlığındaki çekicinin serbest kalmadan önce potansiyel enerjisi $G.h_1$ iken örneğin kırılmasının ardından belli bir h_2 yüksekliğine çıkan çekicinin potansiyel enerjisi $G.h_2$ olarak gözlemlenmektedir. Bu durumda Kırılma Enerjisi (K.E.) $=G.h_1 - G.h_2$ olarak belirtilebilir. Bu durumda;

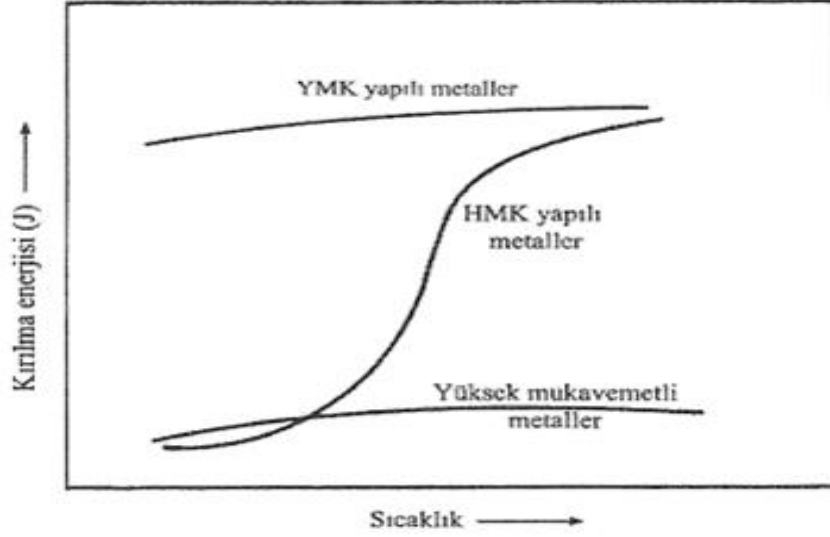
$K.E.=G(h_1-h_2)=G.l.(Cos\beta-Cos\alpha)$ olarak gösterilir. Burada l sarkaç boyudur. Buradan, β salınım açısı ve h_2 yükseklik ne kadar az gerçekleşirse kırılan o malzemenin ne kadar çok darbe direnci ya da yüksek tokluk gösterdiği anlaşılabilir.



Şekil 3.8: Charpy çentik darbe deneyi şematiği

Çekme deneyinin sonuçlarının faydalarından biri ise metallerin mekanik özellikleri hakkında fikir veriyor oluşudur. Bu deney ile ulaşılan sonuçlarda statik veya dinamik yüklere plastik şekil değiştirme ile karşı koyacağı diğer bir deyişle gerilme – şekil değiştirme (% uzama) diyagramında iyi bir uzama gösteren metalin sünek olacağı tahmin edilebilir. Çoğunlukla hekzagonal sistemdeki metaller (demir dışı metallerin çoğu, östenitik çelikler vb.) veya YMK için bu tahminler doğrudur. Ancak, HMK sistemindeki metallerde (ferritik çelikler) bazen darbe deneyi sonuçları ile çekme deneyi sonuçları arasında uyum olmayan bir durum gözlemlenmektedir. Çentik darbe deneyinde gevrek davranış gösteren malzeme, çekme deneyinde sünek davranış gösterir. Oda sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerinde bu tarz vakalara

çok sık rastlanmakta olduğu söylenebilir. Şekil 3.9’da YMK ve HMK yapıli metalleri ile yüksek mukavemetli metalleriin değişik sıcaklıklarda yapılan darbe deneylerine ait kırılma enerjisi – sıcaklık eğrileri verilmektedir. [27, 28]



Şekil 3.9: Metalleriin kırılma enerjisi ve sıcaklık eğrileri

3.2.4 Sertlik Testi

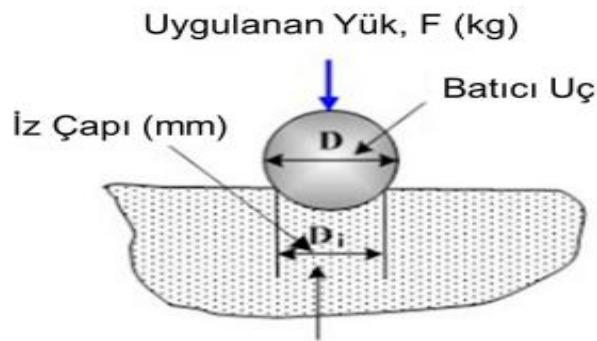
Sertlik testleri Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş. firmasının laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Numunelerden alınan parçalar deney cihazına uygun şekilde testere ve frezede işlendi. Numunelere Şekil 3.10’da gösterilen brinell sertlik cihazı ile sertlik ölçümleri yapıldı.



Şekil 3.10: Brinell Sertlik testi cihazı

Malzemeler çoğunlukla mekanik deneyler arasında sertlik deneyine tabi tutulurlar. Bunun başlıca sebepleri arasında ise malzemeye hasar vermemesi ve basit olması yatmaktadır. Bunun yanında malzemenin mekanik nitelikleri ve sertliği bağlamında paralel bir ilişki mevcuttur. Örneğin; çekme mukavemeti, çeliklerde sertlik değeri ile doğru orantılıdır. Bu sebeplerden dolayı malzemenin mukavemet değeri sertlik deneyi ile elde edilebilir. Malzemelerin; çizilmeye, sürtünmeye, plastik deformasyona ve kesilmeye karşı direnci sertliği tanımlamaktadır. Başka bir deyişle malzemenin dislokasyon hareketine direnci olarak da karşımıza çıkmaktadır. Küresel veya konik standart bir ucun malzemeye batırılması sonucu gözlemlenen direncin ölçülmesi ile sertlik ölçme gerçekleştirilir. Çoğunlukla bilinen sert ölçme deneyleri şu şekildedir; Mikro-sertlik, Brinell, Rockwell ve Vickers. Birbirinden ayrılma nedenleri ise yükün uygulanma şekli ve batıcı uçtaki farklılıklardır. Ölçüler arasında matematiksel ilişki mevcuttur. Tercih edilen yöntem fark etmeksizin örnek üzerinde birkaç ölçüm yapıp, ölçümlerin ortalamasının alınması kabul edilebilir gözükmektedir.

Belirttiğimiz gibi numunelerin sertlik tayininde brinell sertlik testi kullanılmıştır. Belirli çapta bir bilye ile bir malzemenin yüzeyine belirli bir süre bastırmak marifetiyle oluşturulan kalıcı izin büyüklüğü ile ilgili bir değerdir. Şekil 3.11’de gösterildiği gibi birinell sertlik değeri, bilye üzerine uygulanan yükün numune yüzeyi üzerinde elde edilen küresel yüzey alanına bölünerek belirlenir.



Şekil 3.11: Brinell sertlik deneyi prensibi

$$BHN = \frac{F}{2\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.3)$$

Formül 3.3’de belirtilen

F: uygulanan kuvvet (N,kg) D: Bilye çapı (mm²) d: iz çapı (mm²)

Standart deneylerde genellikle 10 mm çapında çelik bilye, 3000 kg yük ve 30 saniye bekleme süresi seçilir. Diğer deney şartları için BSD işaretinin yanına bilye çapı/yük/süre sırasına göre bilgiler eklenir. Örneğin; 60BSD5/500/30 şeklinde bir gösterimde, deneyin 5 mm çapında bir bilye üzerine 500 kg yükün 30 saniye süreyle tatbik edilmesi anlatılmaktadır. Ancak pratikte bu yükler çok büyük olduğu ve yüzeyde büyük ezilmeler yarattığı için daha küçük yük-bilye çapı kombinasyonları kullanılmaktadır. [27, 28]

3.2.5 Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı incelemesi iki farklı cihazda yapılmıştır. Numunelerden alınan örnekler Şekil 3.12 ' de görüldüğü gibi kesilip bakalit kaplama yapılmıştır. Parlatma işlemi yapılan örnekler önce SEM ve EDS analizi yapılmıştır. Ardında dağlanarak mikroskopta iç yapısı incelenmiştir.



Şekil 3.12: Mikroyapı incelemesi için bakalit kaplama yapılan numuneler.

Mikroskop ile inceleme numunenin tane yapısını gözlemlemek için yapılmıştır. Numunelere SEM/EDS analizinin yapılma sebebi ise karbonitrür yapıları görmek. Karbonitrür yapılar 0.5-5µm boyutunda olduğu için mikroskopta tespit edip belirlenmesi SEM VE EDS analizine göre daha zordur. Mikroskop incelemesi Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş. laboratuvarların da Şekil 3.13'te gösterilen mikroskop sisteminde yapılmıştır. SEM/EDS analizi ise İzmir Katip Çelebi Üniversitesinde Zeiss marka elektron taramalı mikroskopta yapılmıştır.



Şekil 3.13: Mikroyapı incelemesinde kullanılan mikroskop

Yüksek enerjiye odaklanmış bir elektron demeti aracılığıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) bir örnek bölgesini büyütmektedir. Örnek vakum altına alınır çünkü havadaki parçacıklarla etkileşmemesi ve elektron ışının odaklanmış kalması gerekmektedir. Elektron demeti numuneye çarptığında, yüzey topografyasına dayalı bir görüntü sağlamak için tespit edilen numuneden ikincil elektronların salınmasına neden olur. Elektronlar, bir görüntü oluşturmak için dedektörle etkileşime girer. Genel olarak kullanılan iki dedektör, Geri Saçılan Elektron (BSE) ve İkincil Elektron Dedektörü (SED)'dür. Elektronlar, bir görüntü oluşturmak için dedektörle etkileşime girer. Yazılım yardımı ile renklendirme metodu kullanılarak tane boyutu hesabı yapılabilir.

Bu güçlü elektron mikroskobu, 500.000 kata kadar büyütme kapasitesine sahiptir. SEM Analizi, yalnızca büyütme gücünün çok artması nedeniyle değil, aynı zamanda alan derinliğindeki artış nedeniyle de optik Mikroskopiden daha güçlüdür.

SEM Analizi ile değerlendirilen numune bölgesi, Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) kullanılarak numune bölgesini oluşturan belirli unsurları belirlemek için de analiz edilebilir. X ışınları, numunede bulunan elementlere özgü benzersiz bir enerji imzası taşıyan numunenin yüzeyinden de salınır. Bu X-ışınları, numune hakkında temel bilgi vermek için EDS dedektörü ile tespit edilir. EDS, numunenin kimyasal bileşimi hakkında veri sağlar ve SEM mikrograflarında gözlemlenen özellikler hakkında ek veriler sağlar.

SEM-EDS Analizi, parçacık boyutlarını ve temel bileşimi belirlemek için harika bir yöntemdir. Aynı zamanda nano karakterizasyonu gerçekleştirmek için analitik bir tekniktir.

4 Bulgular ve Tartışma

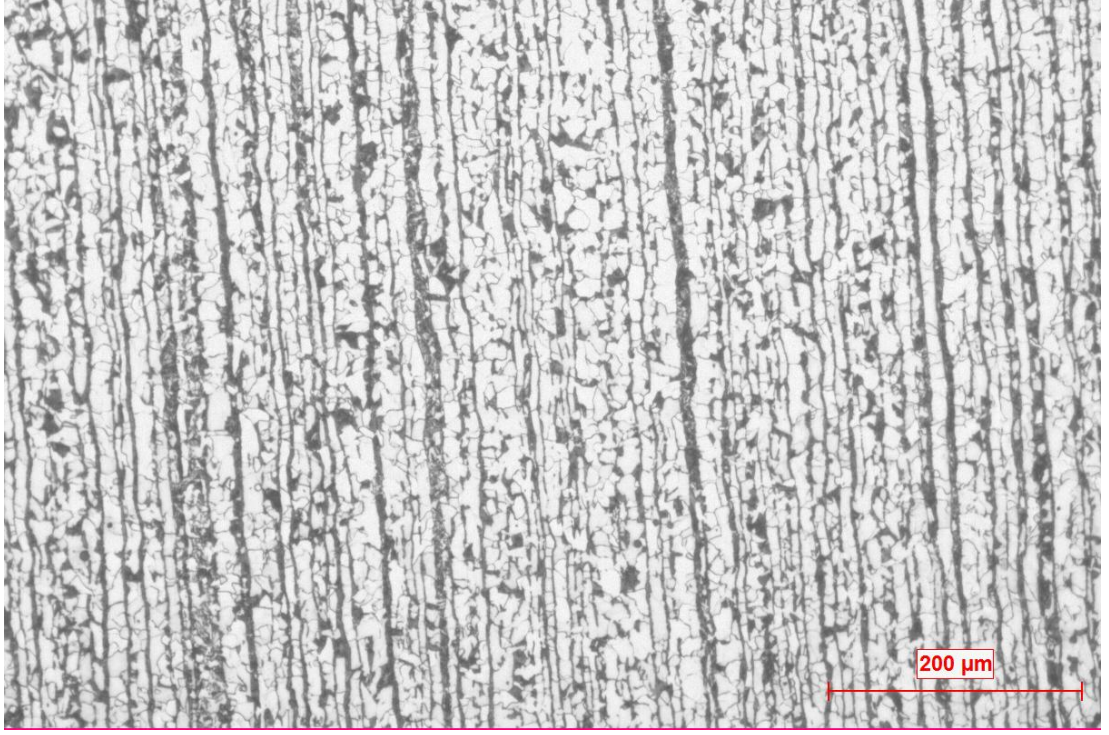
4.1 Mikroyapı İncelemesi

Mikroskop incelemesi önce Sem analizi yapılan aynı numunelere dağlama işlemi yapıldıktan sonra görüntüler alınmıştır. Mikroskop incelenmesinde ise ferrit, perlit gibi çelik faz oluşumları ve tane boyutları incelenmiştir. Bu incelemeler haddeleme yönüne paralel ve dik yönde incelenmiştir. Çalışma yapılırken hadde yönüne dik pozisyon X, hadde yönüne paralel pozisyon ise Y olarak tanımlanmıştır. Renklendirme medotu yazılımı ile tane boyutu hesabı yapılmıştır. Yapılan incelemelerde V,Ti ve Nb elementlerinin çelik iç yapısındaki olan etkileri görülmeye çalışılmıştır.

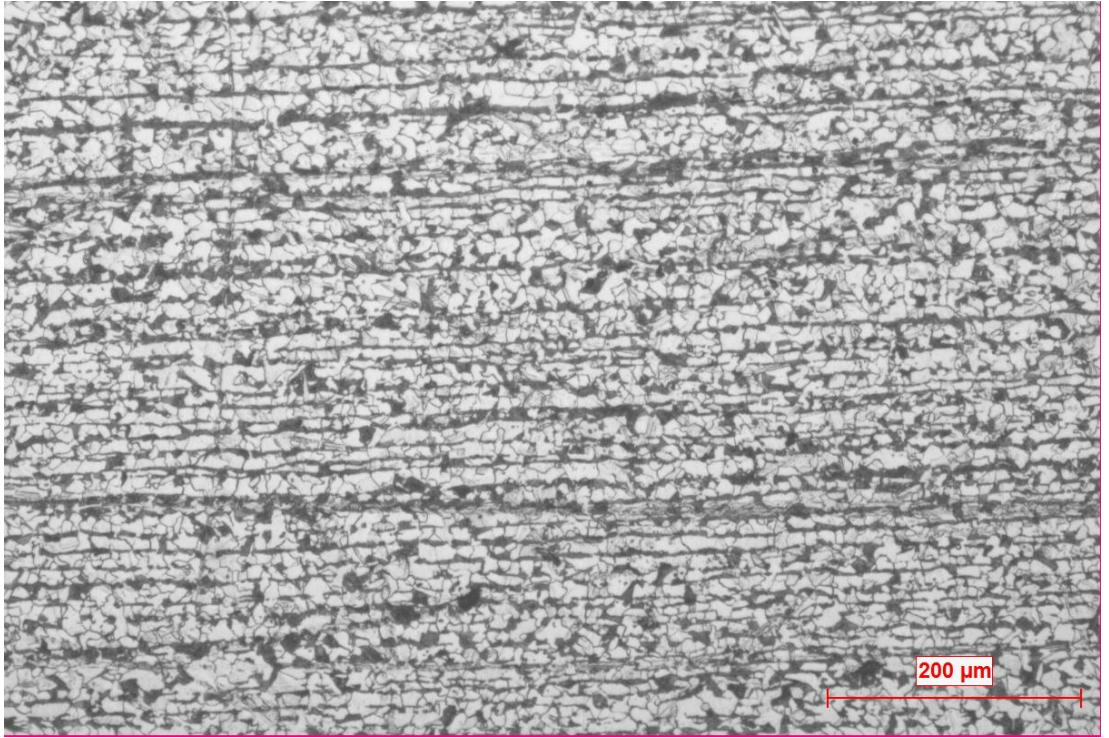
4.1.1 Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi

Titanyum ihtiva eden 1-T31 ve 5-T25 numunelerinden X yönünde mikroskoptaki görünümü Şekil 4.1 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibidir. Ayrıca Şekil 4.2 ve Şekil 4.4’de Y yönünden görüntüleri gösterilmiştir. Görüntüler 200 µm boyutundadır.

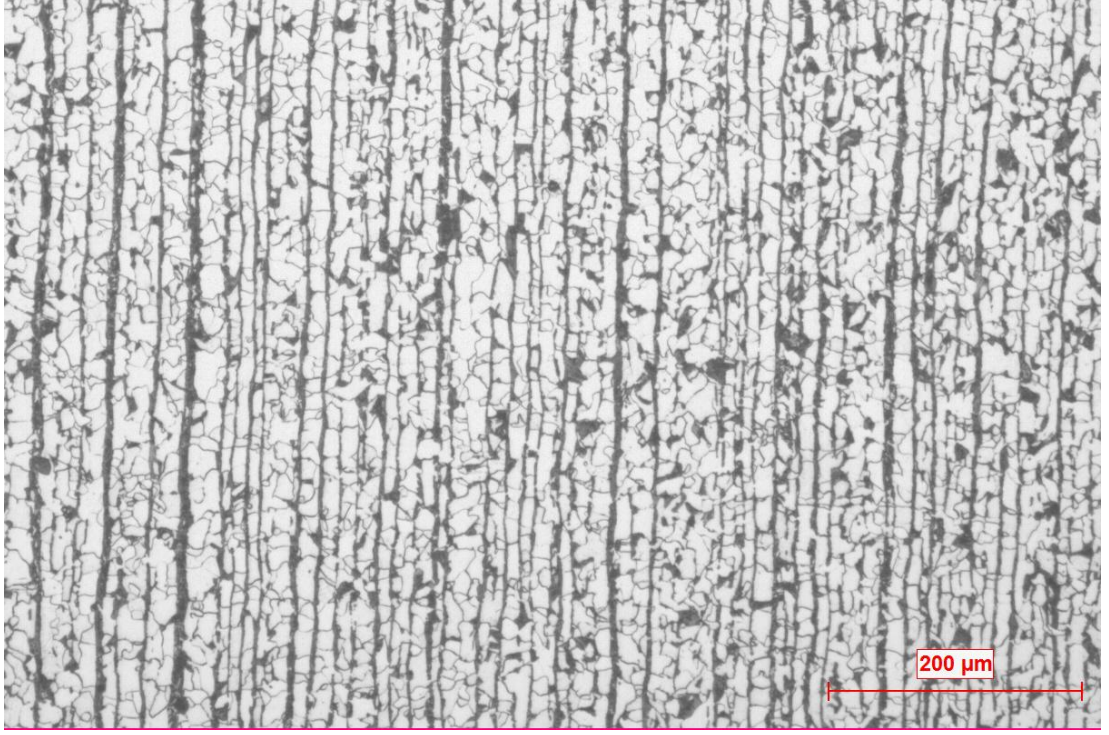
1-T31 numunesi X yönünde tane boyutu 11,5 µm ve Y yönünde tane boyutu 10,5 µm boyutundadır. Her iki yönde de ferrit ve perlit bantlaşması mevcuttur. 5-T25 numunesinde X yönünde 12,1 µm Y yönünde 10,7 µm boyutundadır ve ferrit ve perlit bantlaşması görülmektedir. Ancak Y yönünde bantlaşma zayıftır. Titanyum miktarının artması tane küçültmeye etki etmiştir



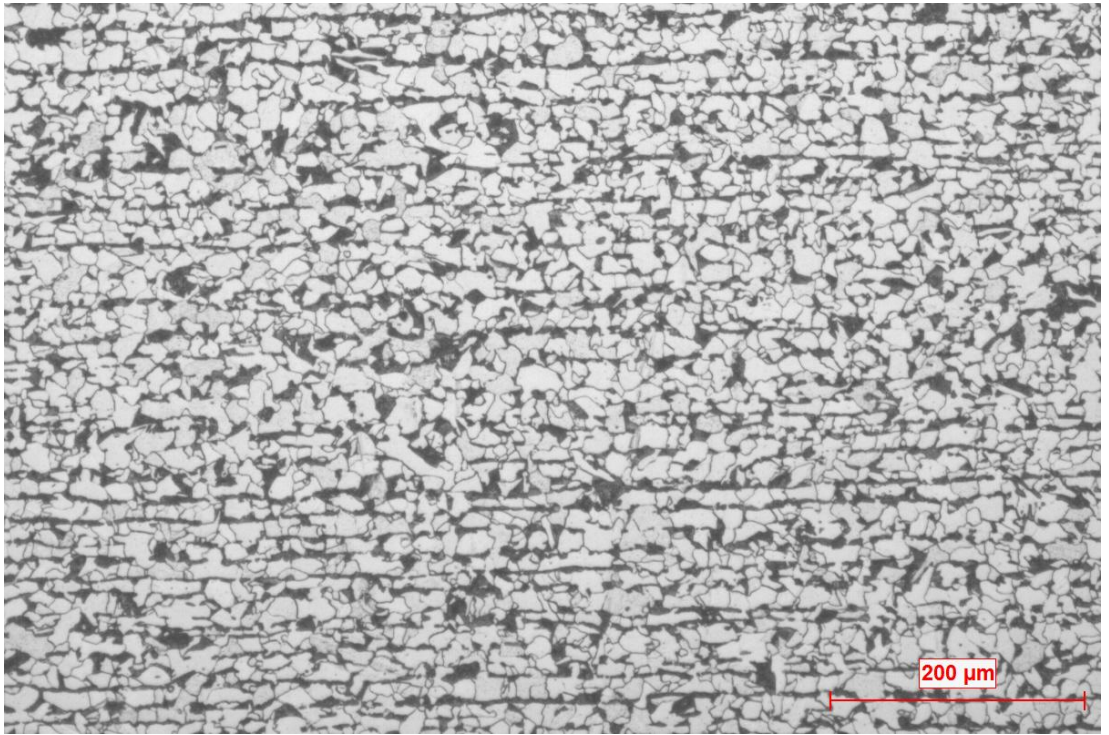
Şekil 4.1: 1-T31 numunesinin X yönü mikroyapısı



Şekil 4.2: 1-T31 numunesinin Y yönü mikroyapısı

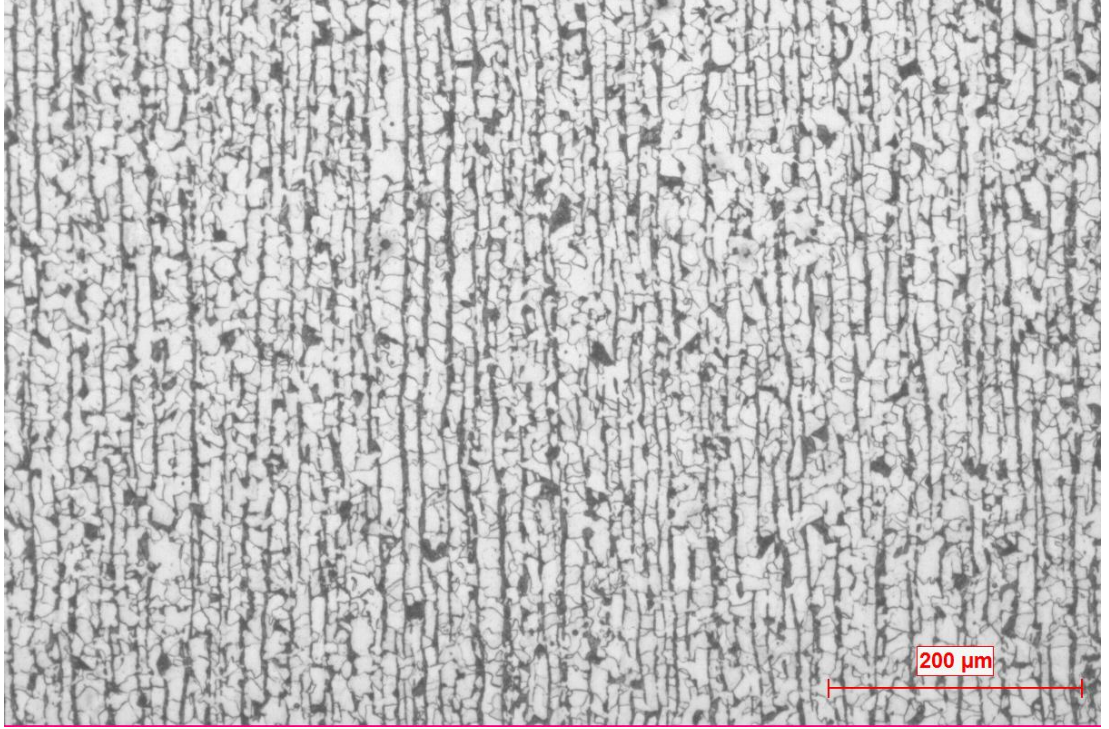


Şekil 4.3: 5-T25 numunesinin X yönü mikroyapısı

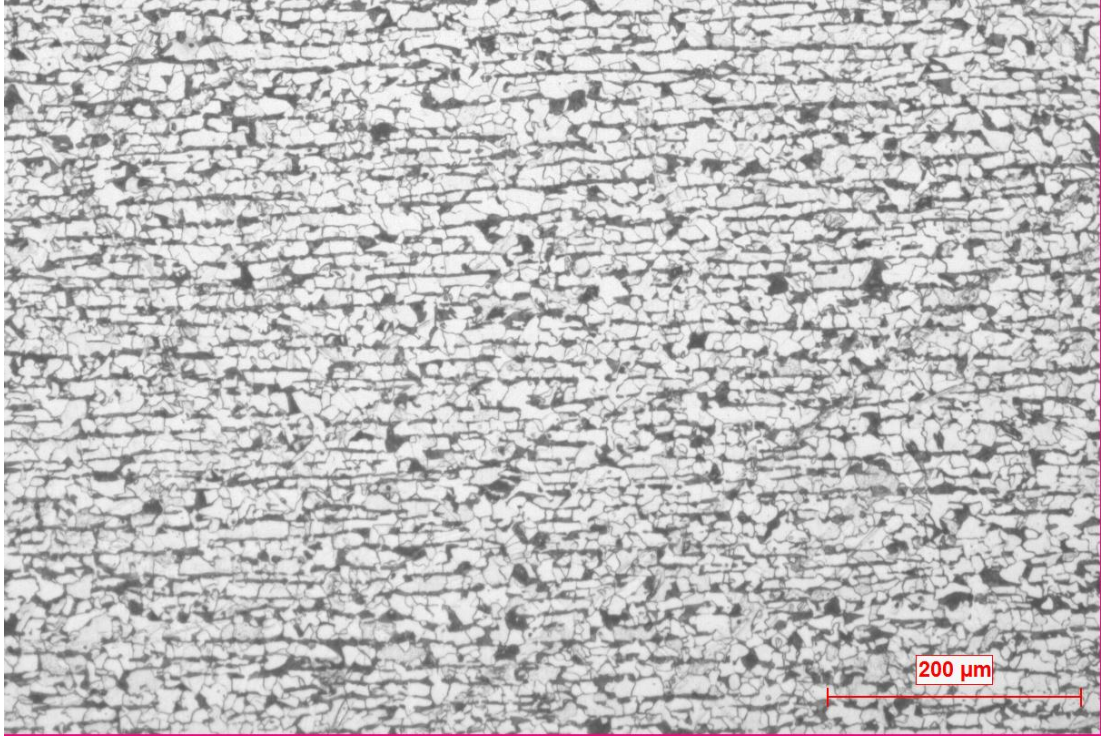


Şekil 4.4: 5-T25 numunesinin Y yönü mikroyapısı

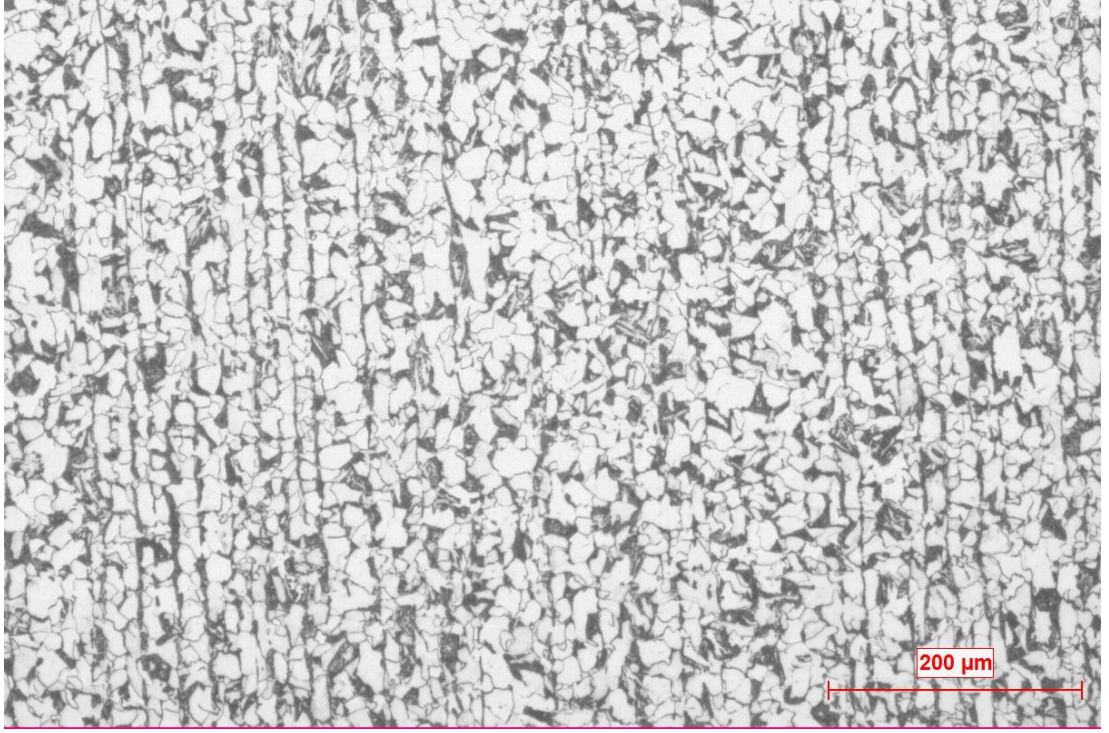
Vanadyum içeren 3-V25 ve 9-V22 numunelerinden X yönünde mikroskoptaki görünümü Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibidir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.8’de ise Y yönünden görünümleri gösterilmiştir. Görüntüler 200 µm boyutundadır. Ferrit ve perlit bantlaşmaları er iki yönde de görülmüştür.



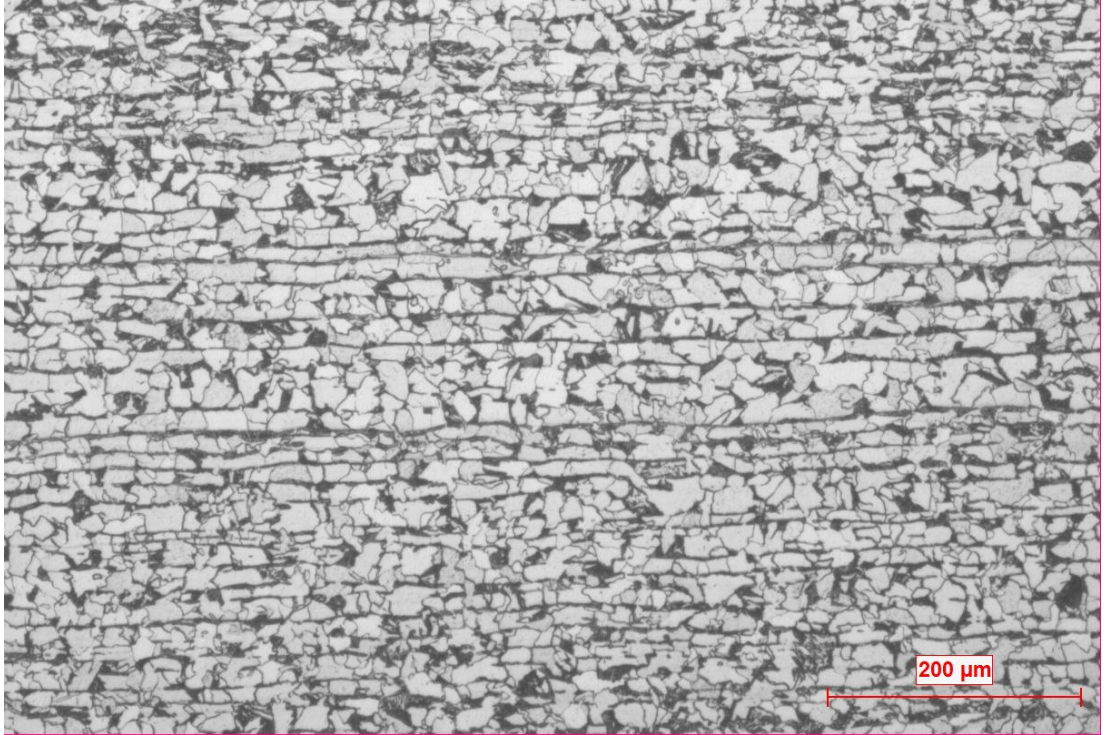
Şekil 4.5: 3-V25 numunesinin X yönü mikroyapısı



Şekil 4.6: 3-V25 numunesinin Y yönü mikroyapısı



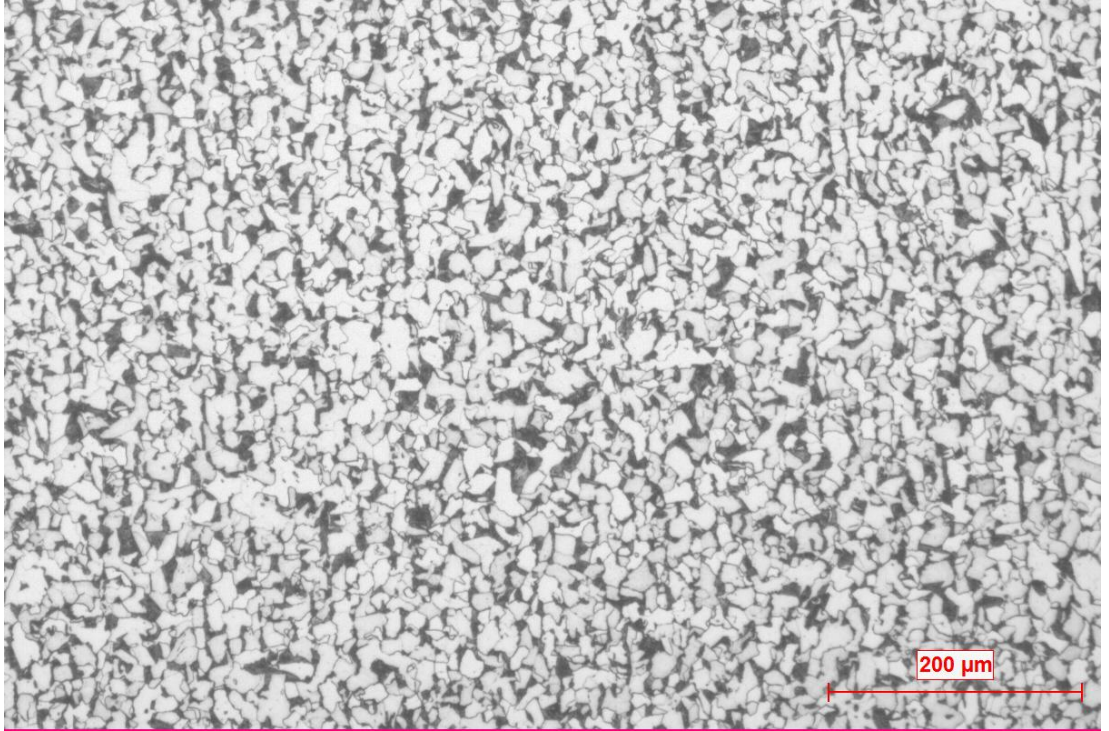
Şekil 4.7: 9-V22 numunesinin X yönü mikroyapısı



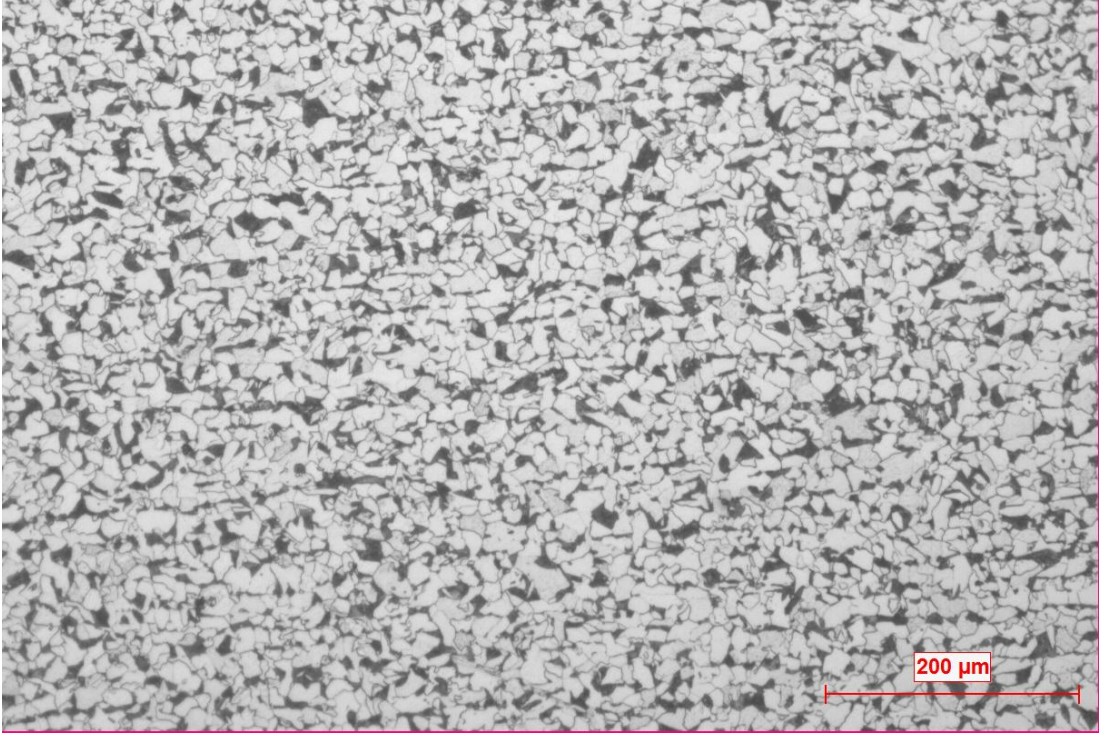
Şekil 4.8: 9-V22 numunesinin Y yönü mikroyapısı

3-V25 numunesinin tane boyutu X yönünde 11,6 μm ve Y yönünde 10,6 μm olduğu, 9-V22 numunesinde tane boyutunun X yönünde 11,7 μm ve Y yönünde 10,6 μm olduğu görülmüş ve hesaplanmıştır.

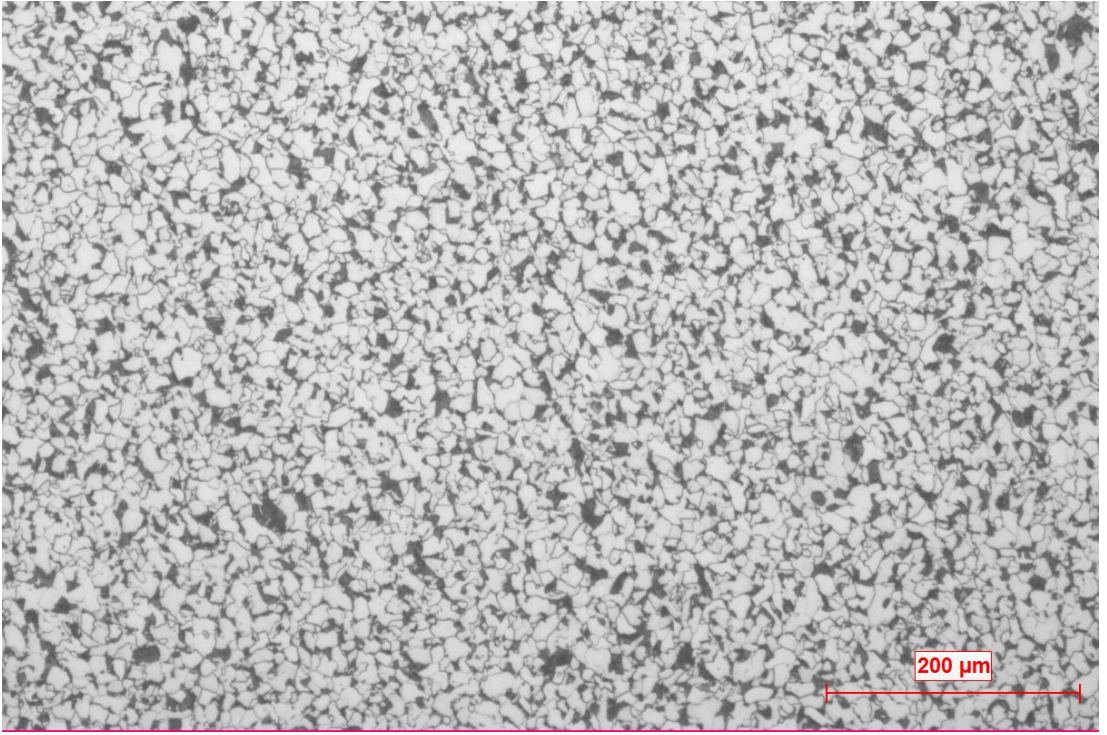
Niyobyum içeren 6-N13 ve 7-N15 numunelerinden X yönünde mikroskoptaki görünümü Şekil 4.9 ve Şekil 4.11’de görüldüğü gibidir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.12’de ise Y yönünden görünümleri gösterilmiştir. Görüntülerde her iki yönde de net bir bantlaşma görülmemektedir. Görüntüler 200 μm boyutundadır.



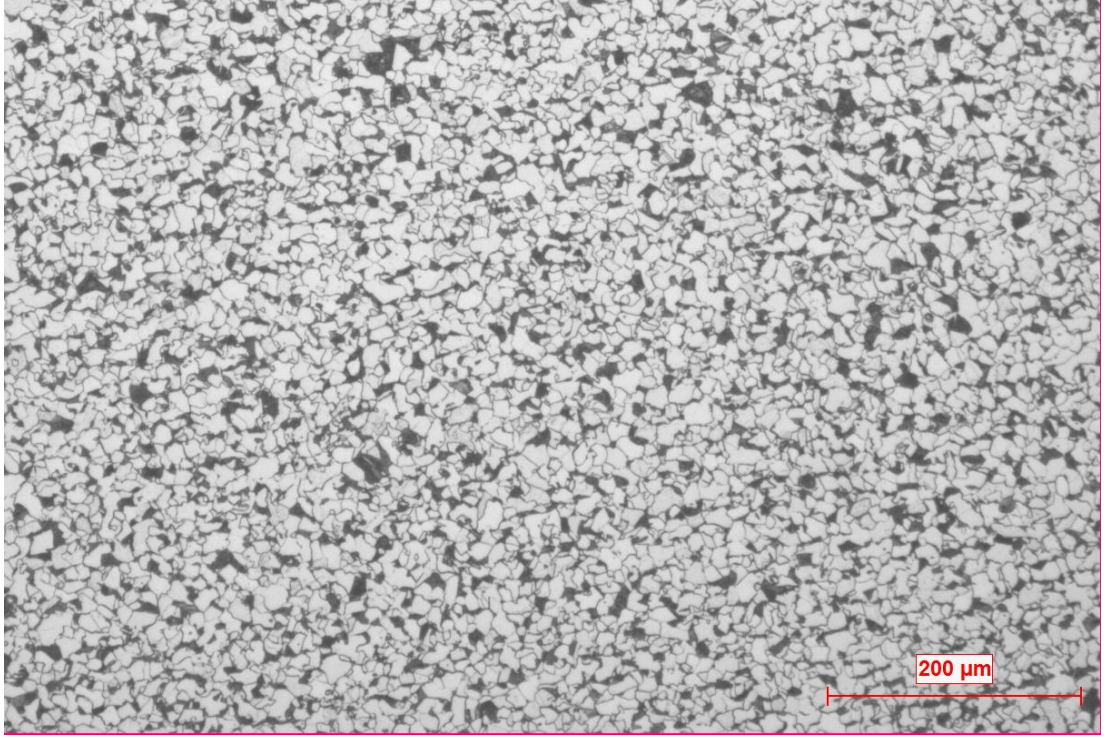
Şekil 4.9: 6-N13 numunesinin X yönü mikroyapısı



Şekil 4.10: 6-N13 numunesinin Y yönü mikroyapısı



Şekil 4.11: 7-N15 numunesinin X yönü mikroyapısı

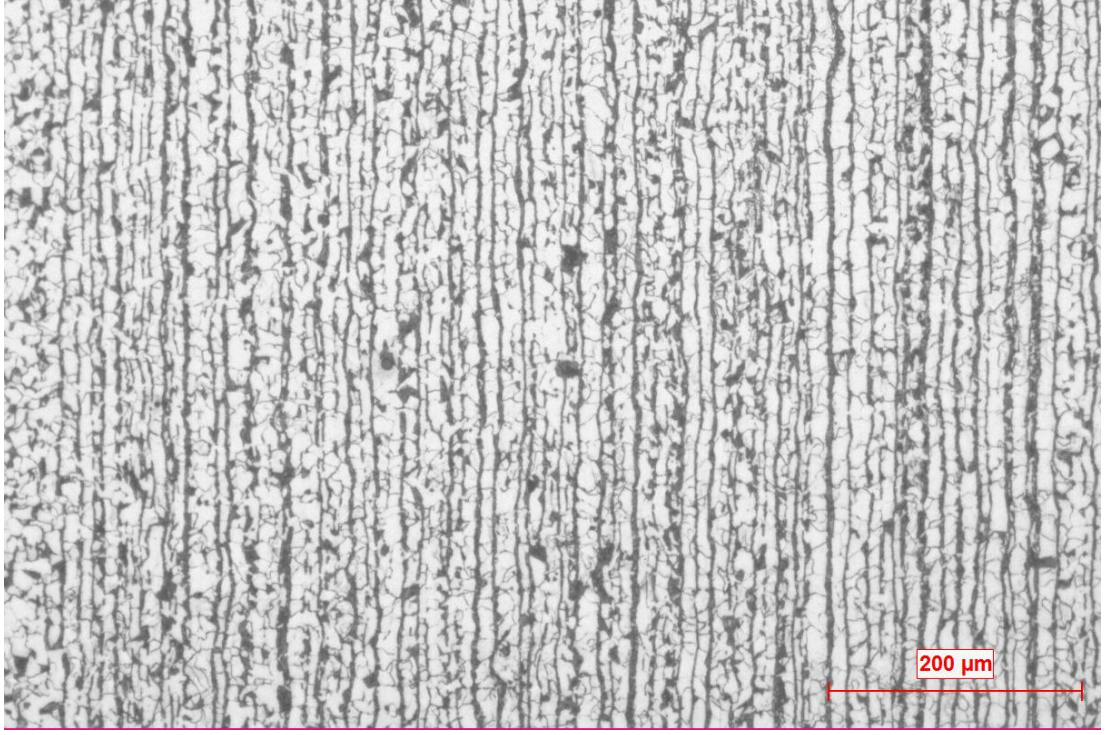


Şekil 4.12: 7-N15 numunesinin Y yönü mikroyapısı

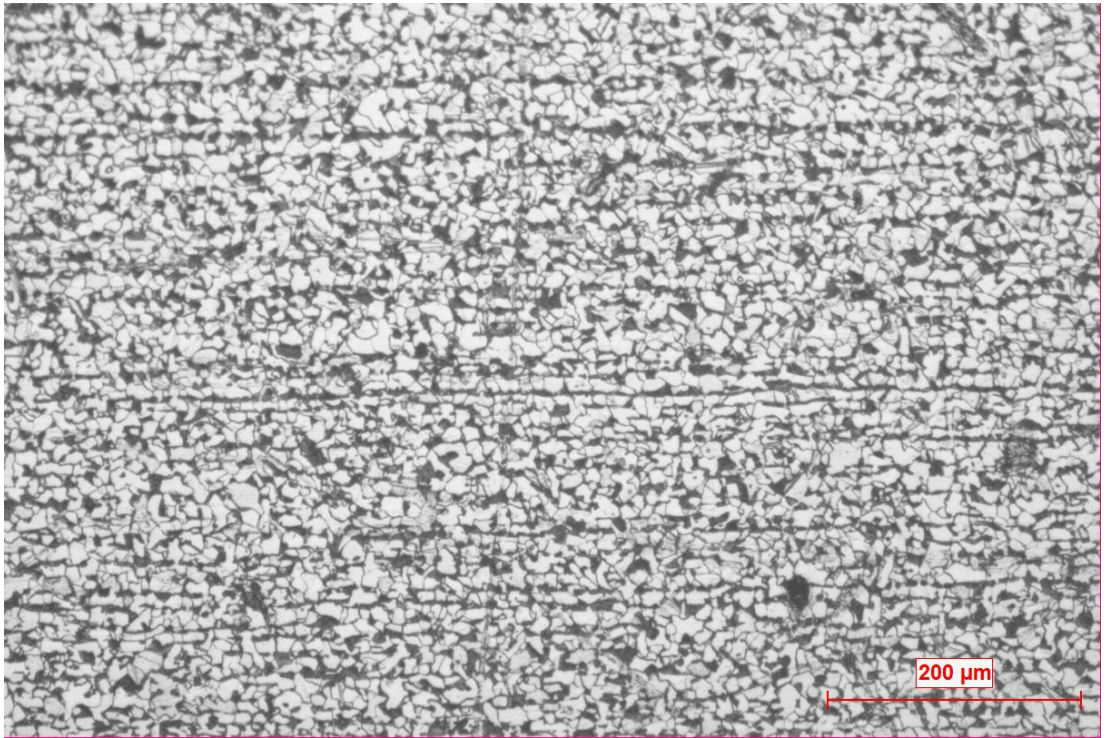
Niyobyum miktarındaki artış daha tanelerin daha küçük yapıda oluşmasını sağlamıştır. Alınan mikroskop görüntülerinin tane boyutu hesaplandığında 6-N13 numunesinin X yönünde tane boyutu 11,2 μm ve Y yönünde ise 10,0 μm olduğu öğrenilmiştir. 7-N15 numunesinde ise tane boyutu X yönünde 11,0 μm ve Y yönünde 9,8 μm olarak hesaplanmıştır.

Ti elementi niyobyuma göre daha düzenli ve bantlaşmış tane yapısı oluşturmaya rağmen tane yapılarındaki küçülmede niyobyum kadar etkili değildir. En küçük tane boyutu niyobyumlu numunelerden alınan görüntülerde hesaplanmıştır. Nb derişimli numunelerde bantlaşma diğer iki elementlerden alınan görüntüler kadar bariz şekilde görülmemiştir. V ve Ti içeren numunelerde ise her iki yönde bantlaşma görülmüştür.

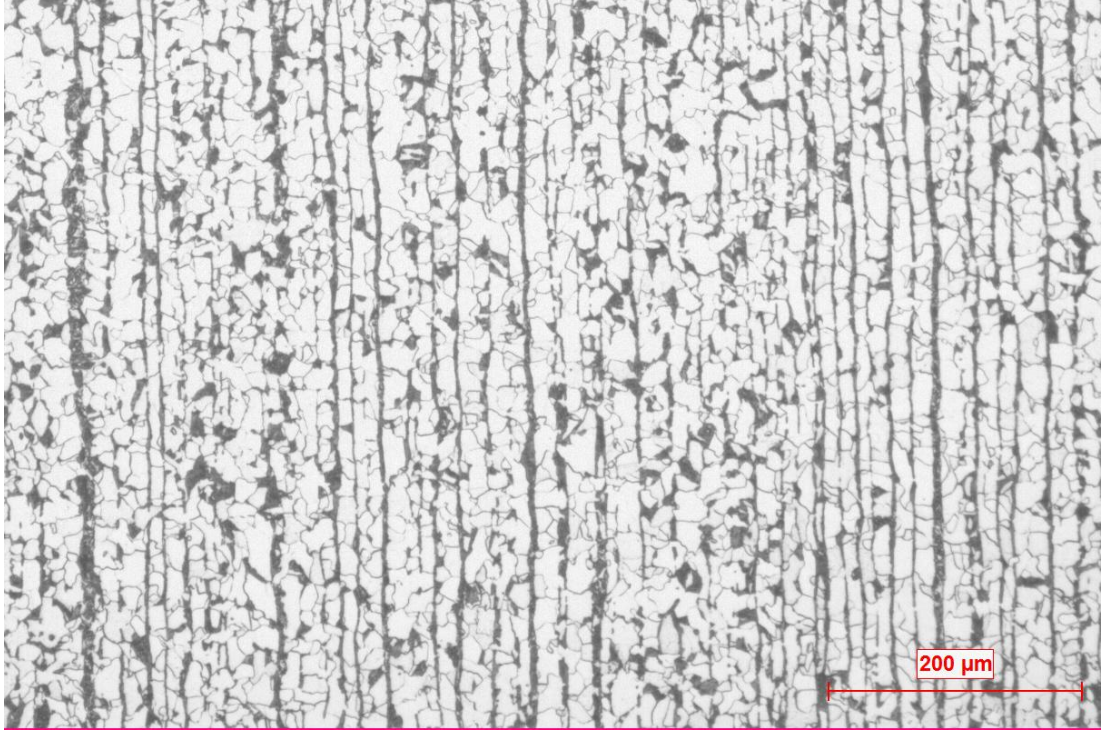
Bu üç elementin ikili kombinasyon şeklinde kimyasal kompozisyona girdiği durumlardaki mikroyapısı incelenmiştir. Bu numuneler de Şekil. 4.13, Şekil. 4.15 ve Şekil 4.17'de X yönünde mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Y yönünde mikroyapı görüntüleri ise Şekil. 4.14, Şekil. 4.16 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



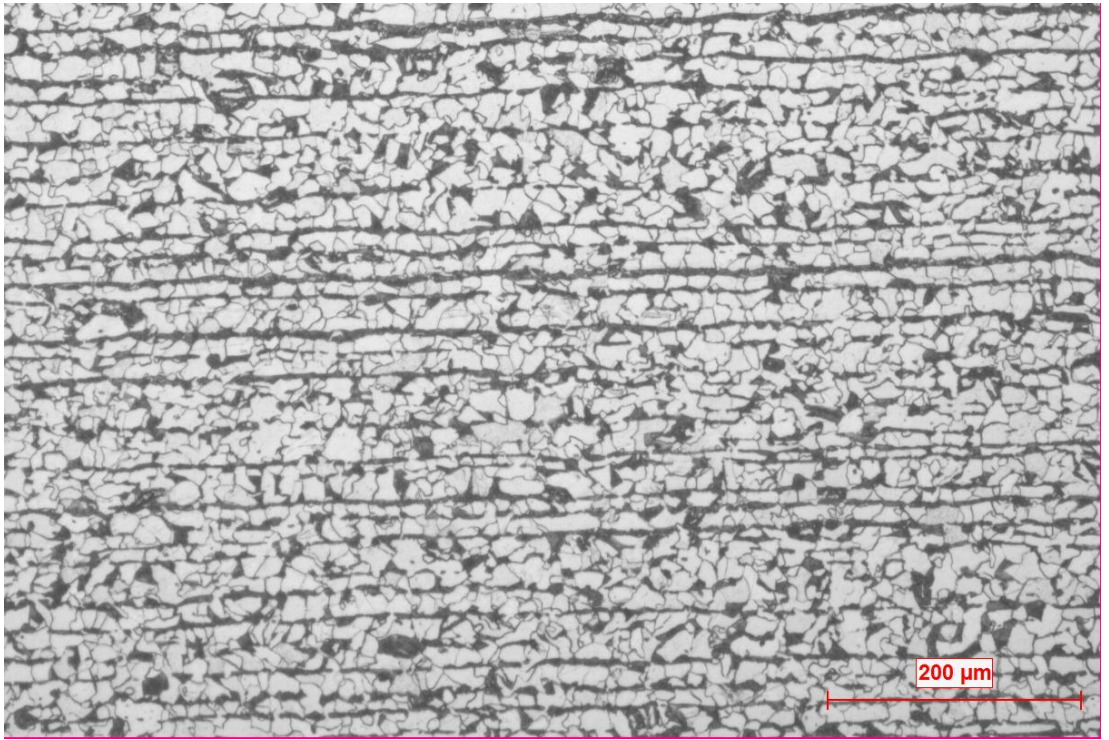
Şekil 4.13: 2-V14T17 numunesinin X yönü mikroyapısı



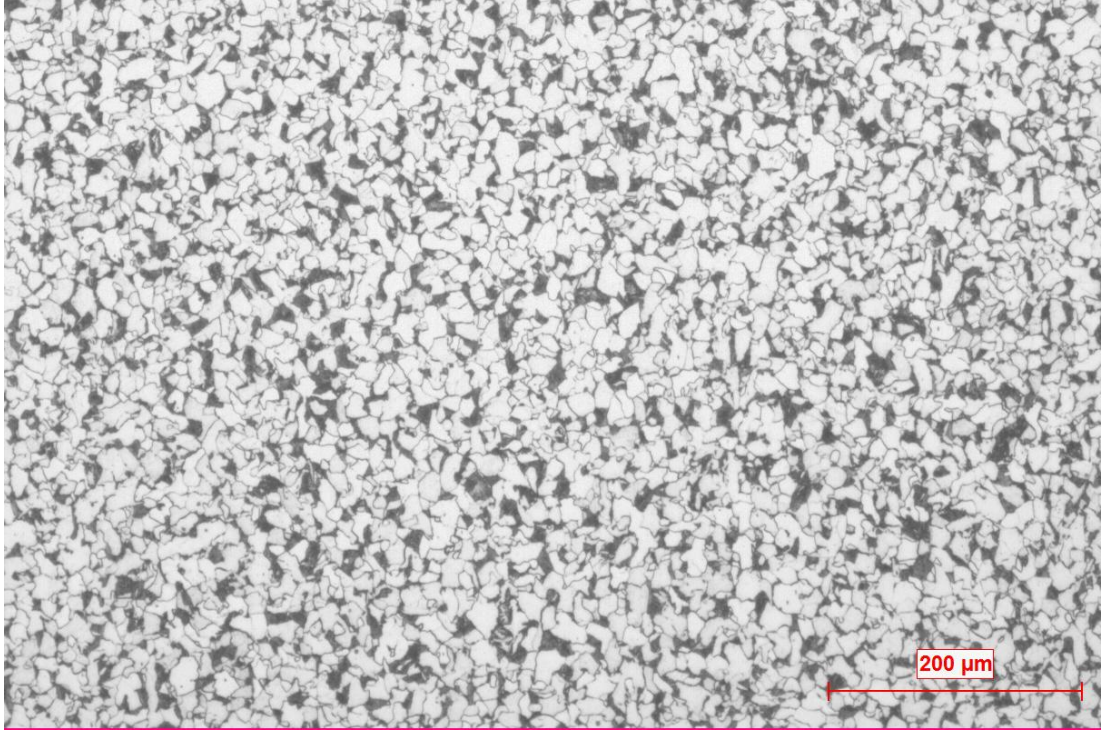
Şekil 4.14: 2-V14T17 numunesinin Y yönü mikroyapısı



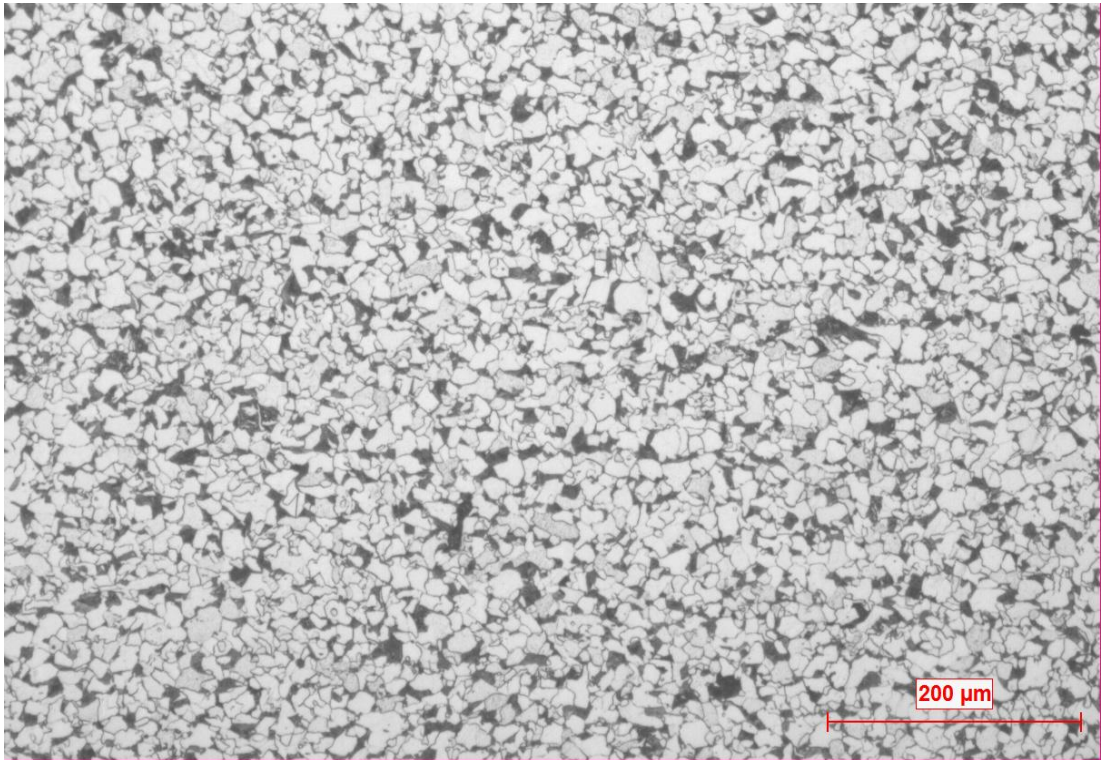
Şekil 4.15: 4-T10N09 numunesinin X yönü mikroyapısı



Şekil 4.16: 4-T10N09 numunesinin Y yönü mikroyapısı



Şekil 4.17: 8-V11N11 numunesinin X yönü mikroyapısı



Şekil 4.18: 8-V11N11 numunesinin Y yönü mikroyapısı

2-V14T14 numunesinin X yönünde tane boyutu $11,8 \mu\text{m}$ ve Y yönünde $10,7 \mu\text{m}$ boyutundadır. 4-T10N09 numunesinin X yönünde tane boyutu $11,7 \mu\text{m}$ iken Y yönünde $10,5 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. 8-V11N11 numunesinde ise X yönünde tane boyutu $11,2 \mu\text{m}$ ve Y yönünde $10,1 \mu\text{m}$ olduğu hesaplanmıştır.

Tüm tane boyutu hesaplarında Y yönü yani hadde yönüne paralel olan taneler X yönüne yani hadde yönüne dik olan tanelere göre 1-1.5 μm kadar daha küçüktür. Bunun sebebi ezmenin X yönünden daha fazla yapılması olabilir. X yönünde yapılan ezme Y yönüne doğru taneleri sıkıştırmaktadır. X yönünde tanelerde ince ve uzun yapılar görülmüştür. Haddeleme esnasında kontinü tezgahların hadde yönüne paralel olarak uygulamış olduğu kuvvetler ve ezmenin de bu yönde dik oluşu nedeniyle X yönünden baktığımızda taneler daha ince ve uzun lamel yapıda olmuştur. Bu durumlar nedeniyle tanelerin her iki yönde boyutlarının çok yakın olmamasını ve oluşan şekilleri etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.

Yapılan benzer çalışmalarda niyobyumun etkili bir tane inceltici olduğu görülmüştür. Atakay'ın [29] "Niyobyumun Sıcak Haddelenmiş Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi" adlı çalışmasında mikroalaşım elementi kullanmadan alınan ve niyobyum kullanılan numuneleri gözlemlemiştir. Bu gözlemlerinde niyobyum derişimi % 0,028 civarında olan numunelerde %35 civarında taneler niyobyum kullanılmayan tanelere göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

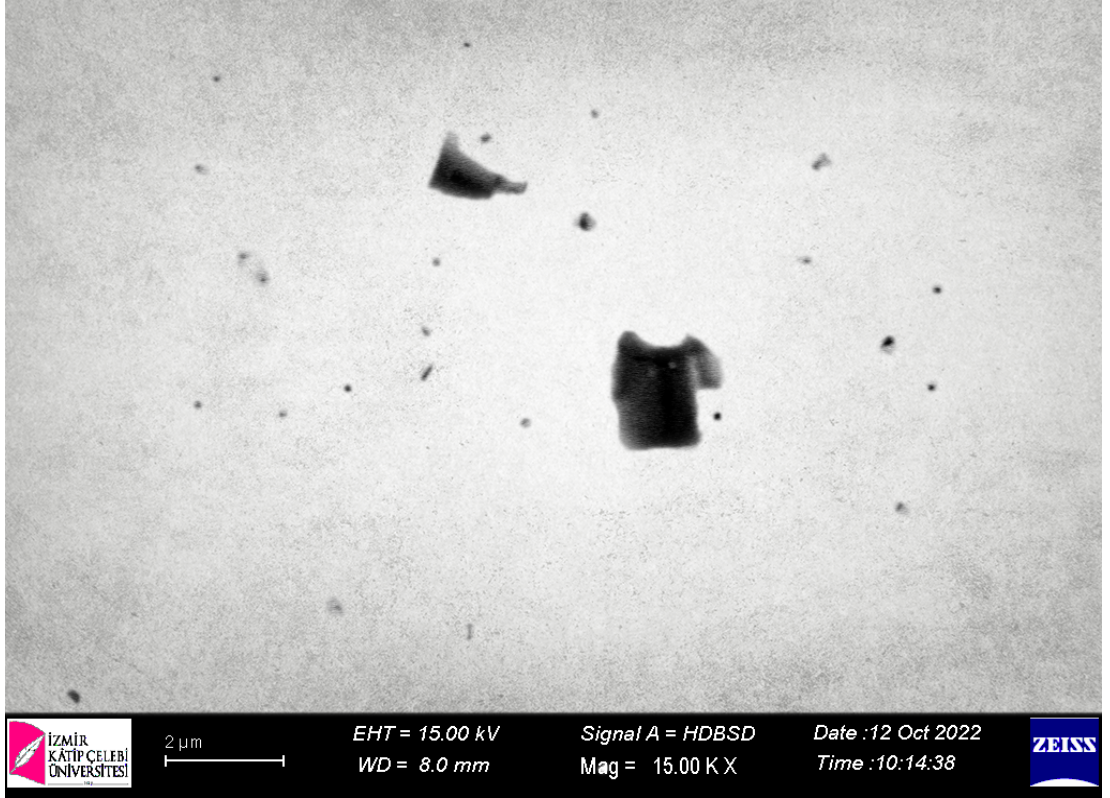
Ayrıca Erden ve arkadaşlarının [30] yayınlamış olduğu makalede %0,05 Nb+V ihtiva eden mekanik alaşımlandırılmış çelik ile yine mekanik alaşımlandırılma ile üretilen ve %0,1 Nb+V ihtiva eden çeliklerin tane boyutu karşılaştırıldığında, %0,05 Nb+V ihtiva eden çeliğin tane boyutu 24,45 μm iken %0,1 Nb+V ihtiva eden çeliğin tane boyutu 26,33 μm olduğu görülmüştür. Çalışmanın genelinde niyobyum ve vanadyum kullanımının tane boyutunu küçülttüğü görülmüştür.

Bizim yaptığımız çalışma bu çalışmaları desteklemektedir. Niyobyum, vanadyum ve titanyumun tane küçülttüğünü gözlemledik. Bu üç element içinde ise en iyi tane incelticinin niyobyum olduğunu gözlemledik.

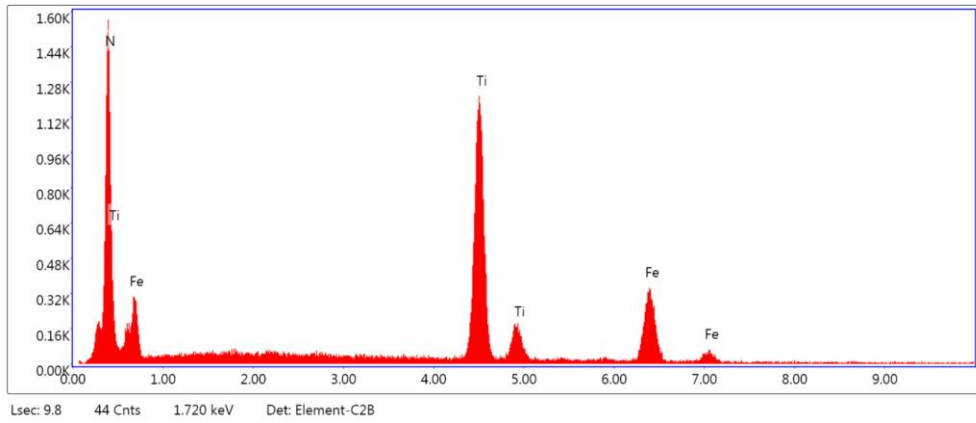
4.1.2 SEM/EDS İncelemesi

Düzenli yapıların oluşumunda ince taneli yapıların oluşmasında ve malzemenin mukavemetine tane sınırlarına çökelen karbonitrürlerin boyutlarının ve oluşma şartlarının etkisi büyüktür. Numunelerdeki karbonitrür yapıları görmek için aynı numunelere parlatma işlemi yapıldıktan sonra SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

SEM analizinde vanadyumkarbür, titanyumnitrür ve niyabyumkarbür yapıları görüldüğü düşünmekte ve bu yapılar incelenmiştir.

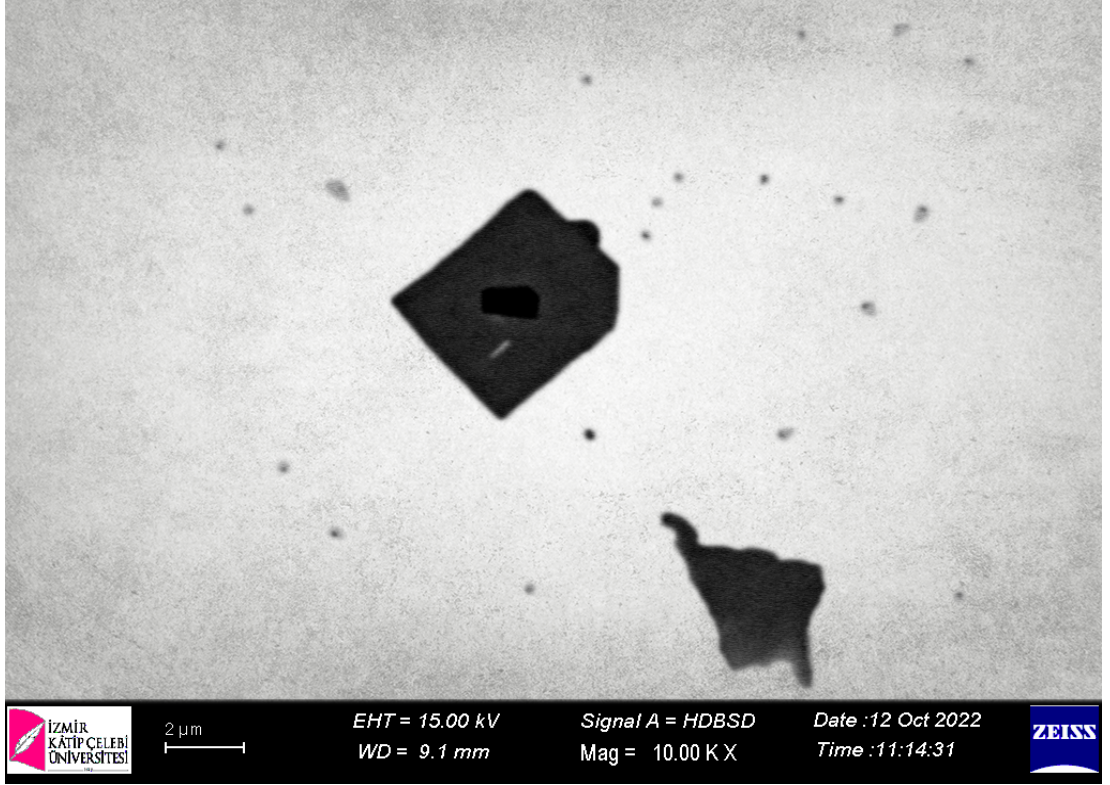


Şekil 4.19: 1-T31 numunesinde TiN görüntüsü

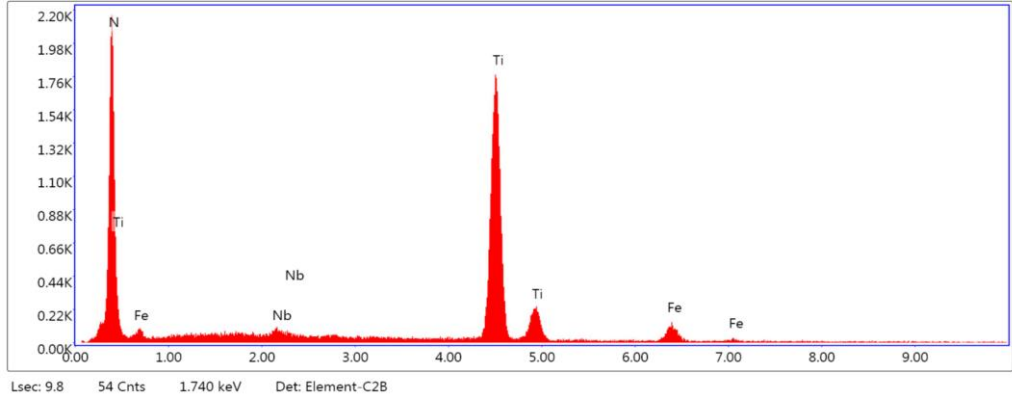


Şekil 4.20: 1-T31 numunesinde EDS raporu

1-T31 numunesinde titanyumnitrür yapıya rastlandığı düşünülmektedir. Bu yapı şekil 4.10 ve Şekil 4.11 gösterilen SEM ve EDS analizleri ile gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 2 µm boyutlarındadır.



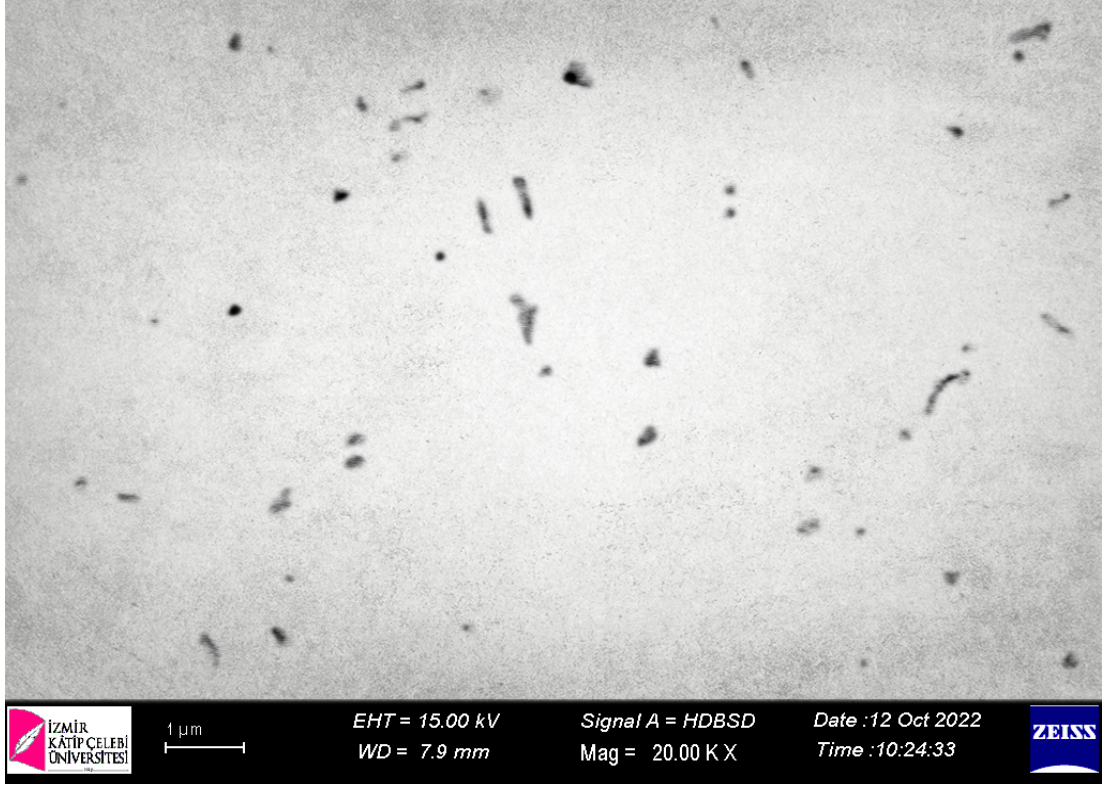
Şekil 4.21: 4-T10N09 numunesinin TiN görüntüsü



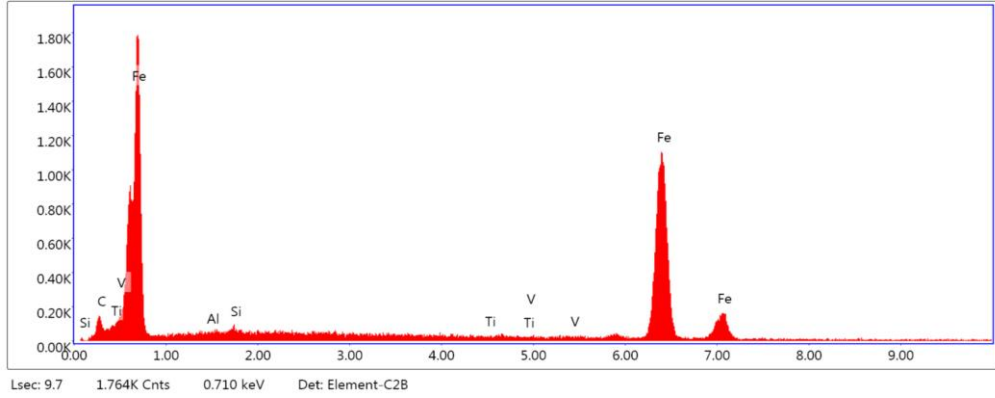
Şekil 4.22: 4-T10N09 numunesinin EDS raporu

4-T10N09 numunesinde 1-T31 numunesindeki gibi titanyumnitrür yapıya rastlanıldığı düşünülmektedir. Bu yapı Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 gösterilen SEM ve EDS analizleri ile gösterilmiştir ve yaklaşık olarak 3 µm boyutlarındadır.

Narita'nın da [31] çalışmasında belirttiği gibi TiN yüksek sıcaklıklarda ve sıvı fazda oluşur. Bizim yaptığımız çalışmada da TiN yüksek sıcaklıklarda oluştuğu ve östenit fazında çözünmediği ve bu nedenle TiN kaba taneli oluşmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.



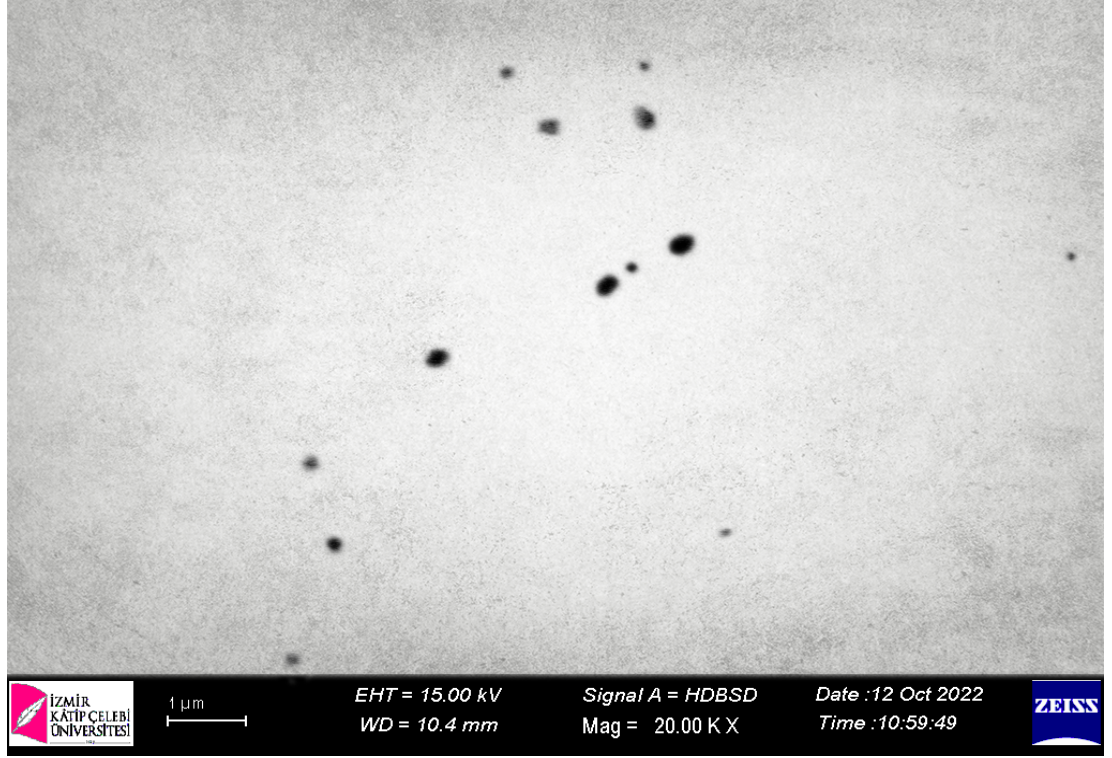
Şekil 4.23: 2-V14T17 numunesinde VC görüntüsü



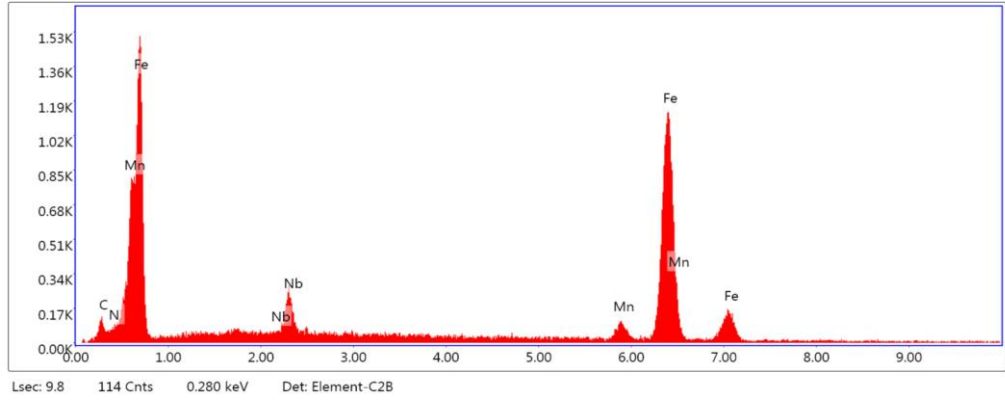
Şekil 4.24: 2-V14T17 numunesinde EDS raporu

Şekil 4.14' te VC yapıları olduğunu düşündüğümüz yapılar SEM analizi yardımı ile görülmektedir. EDS raporu ise Şekil 4.15'te gösterilmiştir. VC gözlemleyebildiğimiz karbonitrür çökeltileri içinde en küçük hacme sahiptir. Yapılan araştırmalarda ve çalışmalarda VC yapıları östenit fazında titanyum ve niyobyumun oluşturdukları karbonitrürlerin aksine çözünebilir. Haddelme esnasında kontrolü mümkündür. Bu nedenle çökelti oluşturarak sertliğe etki etmek amaçlı kullanımlarda vanadyum tercih edilebilir ama sertliği sağlamak için kontrollü haddelemek gerekir [32, 33]. Çalışmamızda elde ettiğimiz mikroyapılara bakacak olursak vanadyum içeren çeliklerin, titanyum ve niyobyum içeren çeliklere nazaran tane inceltme etkisinin az olduğu görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda bu durumu desteklemektedir.

Litaratürde yapılan araştırmalar ve çalışmalarda da vanadyum çökeltileri 1050 °C civarında çözündüğü ve östenit tane büyümesini kontrol edemediğı için tane büyümesini engellemede başarılı olamadığı görülmüştür. [3, 32]



şekil 4.25: 6-N13 numunesinde NbC görüntüsü



şekil 4.26: 6-N13 numunesinde EDS raporu

6-N13 numunesinde NbC yapıları olduğunu düşündüğümüz yapılar gözlemlenmiştir. Bu yapılar şekil 4.16'da görülmektedir. EDS raporu ise şekil 4.17'de verilmiştir.

NbC yapıları östenit fazında çözünmemektedir. Titanyum ve vanadyum çökeltilerine göre daha yüksek sıcaklıklarda çözünmektedir. Döküm esnasında oluşmaktadır. Haddemeleme sıcaklıklarına elik tekrar tavlandığında çözünmediğinden ve kararlı

yapılar oluştur. Mikroyapı incelemesinde görüldüğü gibi en küçük taneli yapıların oluşmasını sağlamıştır.

4.2 Çekme Testi ve Sonuçları

Yapılan çekme testi sonucunda çıkan sonuçlar aşağıdaki tablo gibidir. Tablo 4.1 de bakıldığında niyobyum derişiminin olduğu numuneler vanadyum ve titanyum takviyesi yapılan diğer profillere göre akma ve çekme sonuçları göre daha yüksektir. Başka değişle niyobyum malzemeye vanadyum ve titanyuma göre daha fazla süneklik katmıştır ve mukavemeti yükseltmiştir.

Tablo 4.1: Çekme testi sonuçları

NUMUNE KODU	1-T31	3-V25	5-T25	6-N13	7-N15	9-V22
Çekme Gerilmesi (MPa)	540,36	549,11	523,14	562,5	565,13	546,89
Akma Gerilmesi (MPa)	398,99	402,96	386,48	399,5	404,99	400,75

Kimyasal kompozisyonuna iki element birden olduğu durumlarda ise Tablo 4.2’de görüldüğü gibi niyobyum ve vanadyum ihtiva eden profillerin akma ve çekme dayanımlarının diğer ikili kombinasyonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2: Çekme testi sonuçları

NUMUNE KODU	2-V14T17	4-T10N09	8-V11N11
Çekme Gerilmesi (MPa)	533,6	540,56	559,63
Akma Gerilmesi (MPa)	394,57	398,14	414,51

İç yapı incelemelerinde gördüğümüz gibi tane boyutunun çekme ve akma dayanımı ile ters bir orantısı vardır. Yapmış olduğumuz çalışmada gördük ki tane boyutu

küçüldükçe akma ve çekme dayanımı artar. Bu durum Hall, Petch ve Gladman'ın yapmış olduğu çalışmaları ve geliştirmiş oldukları formülleri destekler. [19, 20, 21] Ayrıca Çapar'ın [14] çalışmasını yapmış olduğu "Dövme Amaçlı Üretilen Mikroalaşım Çeliklerinde Dövme ve Farklı Soğuma Şartlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi" adlı bilim uzmanlığı tezinde kimyasal kompozisyonunda % 0,08 vanadyum içeren numune ile vanadyum yada mikroalaşım elementi içermeyen çelik numuneler incelenmiş. Dövülmeden önce ve dövüldükten sonra kumda ya da havada soğutarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Tüm soğuma şartlarında vanadyum içeren numuneler 120-160 MPa aralığında çekme testleri daha yüksek çıkmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmada vanadyum çekme testlerini olumlu etkilediğini görmekteyiz. Fakat çalışmamızda alaşımsız çelik kullanmadığımız için tam bir kıyaslama yapamasak bile titanyuma göre daha iyi sonuçlar aldığımızı görmekteyiz ve artan vanadyum miktarı test sonuçlarını artırmıştır.

Niobyumun varlığı tane küçülmesiyle birlikte çeliklerin akma ve çekme dayanımını da artırdığını görmekteyiz. İç yapı gözlemlerinde belirttiğimiz gibi Atakay'ın [29] çalışmasında tane boyutu çalışması dışında yapılan çekme testinde %0,028 niobyum içeren numuneye yapılan çekme testinde 705 MPa çekme ve 551 MPa akma gerilmesi görülmüştür. Buna karşılık niobyum ve diğer mikroalaşım elementi içermeyen numunelerde 596 MPa çekme ve 477 MPa akma gerilmesi görülmüştür. Yaptığımız çalışmada mikroalaşım elementlerini barındıran numunelerde testler gerçekleştirdik. Aldığımız sonuçlar ise N15 (%0,015 Nb içeren çelik) numunede yapılan çekme testinde 565 MPa çekme ve 404,99 MPa akma mukavemeti görülmüştür. N13 numunesinde ise 562 MPa çekme ve 399 MPa akma mukavemeti görüldü. Ayrıca diğer mikroalaşım elementlerinin artırıldığı durumlarda ve ikili kombinasyonlarda derişimin daha az olduğu numunelere göre test sonuçlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Tüm bu çalışmalar artan mikroalaşım elementi miktarının çekme ve akma testine olumlu etkilemiştir.

4.3 Çentik Darbe Testi ve Sonuçları

Alınan sonuçlar neticesinde niobyum derişiminin yüksek numunelerin vanadyum ve titanyum derişimli numunelere göre tokluğa etkisi negatif yönlü olduğu görülmüştür. En yüksek değerler ise Ti ihtiva eden numunelerde görülmüştür.

Tablo 4.3: Çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE KODU	0 °C Yapılan Çentik (Joule)	0 °C Yapılan Çentik Standart Sapması	-20 °C Yapılan Çentik (Joule)	-20 °C Yapılan Çentik Standart Sapması
1-T31	66,26 68,11 66,45	1,85	58,22 48,93 50,69	9,29
2-V14T17	68,84 58,25 52,90	15,94	43,42 42,67 44,49	1,82
3-V25	52,43 57,47 51,38	6,09	33,09 31,11 29,53	3,56
4-T10N09	56,70 56,64 61,71	5,07	29,64 26,27 44,68	18,41
5-T25	67,91 61,40 66,45	6,51	38,37 36,45 59,35	22,9
6-N13	46,09 34,35 45,53	11,74	29,41 19,71 31,86	12,15
7-N15	48,87 28,41 57,41	20,46	17,06 14,05 19,27	5,22
8-V11N11	50,86 51,76 43,42	8,34	23,32 12,97 21,30	10,35
9-V22	36,75 36,37 42,31	5,94	20,12 21,19 22,67	2,55

Taş'ın [33] yapmış olduğu çalışmada bahsettiği gibi titanyumun tane küçültme etkisi niyobyum ile vanadyum arasındadır. Bu durumda tane küçülmesi ve sertlik arasındaki ilişki ters orantılıdır. Çalışmamız da görüldüğü tane yapısı en küçük olan niyobyumda en düşük darbe sonuçları alınmıştır.

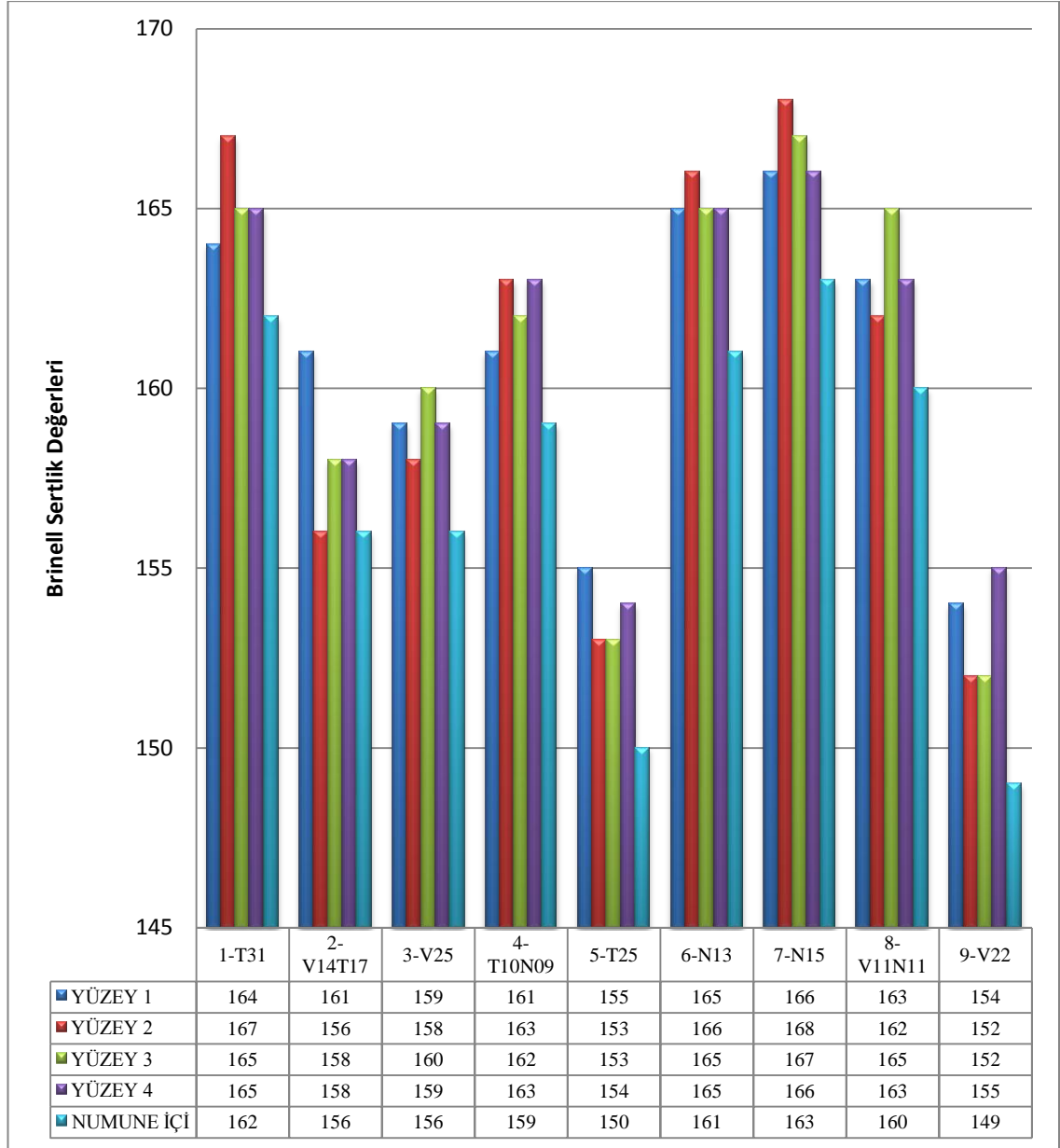
Vanadyum ihtiva eden numunelere 3 set yapılan testlerde değerlerin birbirine daha yakın olduğu ve kararlı sonuçlar alındığı tespit edilmiştir ve artan vanadyum miktarı test sonuçlarına olumlu etkisi görülmektedir. Titanyumlu numunelerde ise en yüksek test sonuçlarının aldığı fakat 3 set yapılan testlerde çıkan sonuçların en düşük ve en yüksek değerler arasındaki farkın vanadyuma göre daha fazla olduğu görülmüştür.

5-T25 bakılacak olursa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de yapılan teste 23 joule kadar bir fark vardır. Titanyum derişimi arttıkça daha kararlı sonuçlar alındığı tespit edilmiştir. 1-T31 numunesinin test sonuçlarına bakıldığında farkın 10 joule kadar fark vardır. Bu farkların sebebi oluşan iri yapılı TiN bileşiklerinin oluşturduğu dislokasyonlar olabilir. Çelik içerisinde artan titanyum derişimi tokluğu artırmakta ve kararlı hale getirmektedir. Titanyum çeliğe tokluk olarak vanadyum ve niyobyuma göre daha olumlu etki sağladığı gözlemlenmiştir. İkili kombinasyonlarda ise vanadyum-titanyum ihtiva eden profillerin tokluğu daha yüksektir ve kararlıdır.

4.4 Sertlik Testi ve Sonuçları

Sertlik testi Brinell sertlik ölçme metodu ile yapılmıştır. Numunelerin sertlik ilişkileri irdelendiğinde büyük farklar görülmemesinin sebebi soğuma şartlarını aynı olmasıdır. Sertlik için en önemli faktör sağumadır. Soğuma havada yapılmış ve hızı $30\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{d}$ civarındadır. Numunenin ortasından yani iç kısmından yapılan testler 3-4 brinell sertlik değeri daha düşük çıkmıştır. Çünkü iç bölgeler yüzeye göre daha yavaş soğumaktadır.

Tablo 4.4 'te görüldüğü üzere niyobyumun dayanıma çekme testindeki gibi etkisi sertlikte de görülmektedir. Sertliği en yüksek olan numuneler niyobyum ihtiva eden numunelerdir. Bunun dışında 1-T-31 ve 4-T10N09 numunesinin sertlik değerleri de niyobyumlu numunelere yakındır. Özellikle 1-T-31 ile 6-N13 numunelerinin sertlikleri çok yakındır. Bunun sebebi iri taneli çökelti (TiN) oluşumu östenitin soğuması esnasında oluşturduğu dislokasyon enerjisi olarak görülebilir.



Şekil 4.27: Brinell sertlik testi sonuçları

S.G. Hong ve arkadaşlarının [5] yapmış oldukları çalışmada niyobyum, titanyum ve vanadyum çökeltileri incelenmiştir. Bu çalışmada 1000 °C civarındaki yeniden kristallendirme işleminin ardından vanadyum çökeltileri çözündüğü için yapıda görülmemiştir. Niyobyum ve titanyum ise daha yüksek sıcaklıklarda çözündüğü için yapıda görülmüştür. Yaptığımız çalışma bu çalışmayı destekler niteliktedir. Biliyoruz ki bu oluşan çökeltiler mekanik özelliklere direkt etki etmektedir. Bizim çalışmış olduğumuz haddeleme sıcaklıklarında ise vanadyum küçük tanelide olsa oluşmuştur ve vanadyum çözünme sıcaklığında çalışılmıştır. Vanadyumun sertliğe olan etkisini artırmak için haddeleme esnasında özel termomekanik işlemler gereklidir. Şartlar sağlandığı takdirde çökelti oluşumu ile en iyi sertlik performansını vanadyum

elementinden alabiliriz. Çalışmada vanadyum çökeltileri çözünmüş, titanyum ve niyobyum çökeltileri ise çözünmemiş olduğu düşünülmektedir. SEM analizinde görüldüğünü düşündüğümüz TiN ve NbC çökeltileri tane sınırlarına ilerleyerek tane küçülmesini sağlamış olduğunu ve sertliği pozitif yönde etkilemiş olduğunu düşünülmektedir.

5 Sonuçlar

Çalışmanın amacı vanadyum, titanyum ve niyobyum mikroalaşım elementlerinin çeliğe etkilerini incelemek. Bu incelemede yaptığımız mekanik testler ve iç yapı gözlemlenmeleri sonucunda elde ettiğimiz sonuçlar;

1) Niyobyum elementi, titanyum ve vanadyum elementlerine göre çeliklerin tane boyutunu küçültmede daha etkili bir elementtir. Çünkü niyobyum ve niyobyum esaslı bileşikler diğer iki elemente göre elik içerisinde yüksek sıcaklıklarda dahi znmez. Buda stenit fazında tane küçülmesine sebep olur. Niyobyum ihtiva eden 6-N13, 7-N15, V11N11 ve T10N09 numunelerin iç yapı görüntüsü incelendiğin de artan niyobyum miktarına göre tane boyutu küçüldüğü görülmüştür.

2) Numunelere yapılan çentik darbe testlerinin sonucunda titanyum derişimli numunelerin çentik darbe direnci daha fazla olduğu görülmüştür. En yüksek değerler 1-T31, 2-V14T17 ve 5-T25 numunelerinde görülmüştür. entik darbe testleri 3 set olacak şekilde numuneler 0 C ve -20 C 'ye soğutularak yapıldı. Titanyumlu numunelerde 0 C yapılan testlerde 3 değerde alınan sonuçlar birbirine yakın ve daha az sapma görüldü. Fakat -20 C yapılan testlerde titanyum derişimi azalıka 3 değerin birbirine olan yakınlığı artmakta ve sapma artmaktadır. Vanadyumun ise özelikle -20 C sıcaklığında yapılan test sonuçları oldukça birbirine yakındır. Yapılan bir mühendislik tasarımımda hem sonuçlarda sapmanın az olduğu hem de yüksek değerler hedefleniyorsa titanyum ve vanadyum birlikte kullanılabilir. Bu durum için bir çalışma yapılabilir. Niyobyum ise malzemenin tokluğunu iyileştirmede vanadyum ve titanyuma göre etkisiz olduğu görülmüştür.

3) Yapılan ekme testi sonuçlarında en yüksek değerler 6-N13, 7-N15 ve V11N11 numunelerinde görülmüştür. Niyobyum elementi tane inceltici etkisiyle birlikte çekme ve akma gerilmelerini ykseltebilmekte olduğu düşünülmektedir. Tane boyutu küçüldükçe çekme ve akma gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Alınan değerlere göre vanadyum elementi niyobyum elementine göre mukavemete etkisi düşüktür. Fakat titanyum elementine göre daha iyileştirici olduğu görülmüştür.

4) eliğe etkisini araştırdığımız  elementte elik içerisinde karbonitrür yapılar oluşturur. Bu yapıların çeliğe etkisini incelediğimizde, uygulanan haddeleme şartları

doğrultusunda öncelikle titanyum elementinin yüksek sıcaklıklarda oluşturduğu kararlı ve zor çözünen TiN bileşimini SEM ve EDS yardımı ile görebildik. 2-3 μm boyutunda karbonitrürler oluşturmuştur. Bu boyut karbonitrür yapı için iri bir yapıdır. Bu iri yapılar çeliğin döküm aşamasında oluşmuş olduğu ve bu nedenle yeniden tavlama ve haddeleme prosesinde çözünmeden kaldığı düşünülmektedir. Niyobyumlu çeliklere yakın tane küçülmesine sebebiyet vermiştir ve mukavemete etkisi olmuştur. Bu bileşimin iri olması yapıda dislokasyon oluşturarak sertliği arttırmıştır. Bunun yanında diğer numunelerde NbC ve VC yapıları olduğunu düşündüğümüz yapılar SEM analizi yardımı ile görülmüştür. Bu yapılar 0,5 μm boyutuna yakın olup VC partiküllerinin daha küçük yapıda olduğu görülmüştür. VC haddeleme sıcaklıklarında çözünürken NbC çözünmediği için daha küçük taneli yapılar oluşturduğu mikroyapı incelemesine dayanarak düşünülmektedir. İncelemesini yaptığımız yapıları baz aldığımızda niyobyumkarbür ve vanadyumkarbür, titanyumnitrür kadar iri taneler oluşturmamıştır.

Kaynaklar

- [1] Özdemirler D, Gündüz S, Erden M. A, Karabulut H, Türkmen M, Farklı Sıcaklıklarda Sinterlenen Nb Katılmış TM Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2016; no. 87-91.
- [2] Özlü B, Sıcak Dövme Uygulanan Mikroalaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, (Doktora Tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
- [3] Çeviker I, Dövme Mamulleri İçin Gerçekleştirilen Mikroalaşımli Çeliklerde Mikroyapısal Karakterizasyon ve Mikroyapı-Mekanik Özellikler İlişkisi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 1991.
- [4] Çiftçi K, Mikroalaşımli Çeliklerin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Talaşlı İşlenebilirliğe Etkisinin incelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi; 2005.
- [5] Hong S, Jun H, Kang K, Park C, Evolution of precipitates in the Nb–Ti–V microalloyed HSLA steels during reheating, Scripta Materialia 2006; sayı 48: 1201–1206.
- [6] Topateş T, Mikroalaşımli çeliklerin termomekanik işlemi sırasında değişen proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 1995.

- [7] Kaynar A, Orta karbonlu alaşımsız ve mikroalaşımli çeliklerde sıcak deformasyon ve soğuma şartlarının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması,(Yüksek Lisans Tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2013.
- [8] M. Handbooks, Properties and Selections, ASM International, cilt 1, 1994, pp. 378-432.
- [9] Topbaş M.A, Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, Prestij Yayıncılık; 1998.
- [10] Koltuk F, Mikroalaşımli çeliklerin ikincil sıcak şekillendirilmesinde özelliklerin optimizasyonunun incelenmesi, (Doktora Tezi). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji Ana Bilim Dalı; 1996.
- [11] Üler E, Alaşımsız çelik saclarda çift fazlı mikroyapı olusturulması, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2006.
- [12] Sage, A. M, (1992) HSLA Steels Processing, Properties and applications, (ed. Tither,G. Shouhua, Z.) TMS.
- [13] Aydın H, Çelik sacların çift faz ısıl işlemi sonrası mekanik ve mikroyapı özelliklerinin değişimi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2006.
- [14] Çapar A, Dövme amaçlı üretilen mikroalaşım çeliklerinde dövme ve farklı soğuma şartlarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, (Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2005.

- [15] Çarboğa C, Düşük karbonlu çeliklerde bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi, (Doktora Tezi). Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2010.
- [16] Repas P.E, Metallurgical Fundamentals for HSLA Steels, Microalloyed HSLA Steels Proceeding of Microalloying, ASM Int. Publ., 1988; 3-14.
- [17] Özcan M, Mikroalaşım ve Sementasyon Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2005.
- [18] https://www.academia.edu/35197753/Çelikler_ve_Isıl_İşlemler.
- [19] Hall E.O, Proc. Phys. Soc. Series B, 1951.
- [20] Petch N.J., J. Iron Steel Inst., 1953.
- [21] Gladman T, The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, 1st edn, 341, The Institute of Materials, London; 1997
- [22] British Standards Institutions, B S EN 10 002-1 ; 1990
- [23] Aronsson B. Steel Strengthening Mechanisms, Climax Molybdenum; 1969
- [24] Leslie W.C, The Physical Metallurgy Of Steel, 1982; 189-210.
- [25] <https://www.ispatguru.com/microalloyed-steels>

- [26] Priestne R, Zhou C, The Evolution of Precipitates in Nb-Ti Microalloyed Steels during Solidification and Post-solidification Cooling, ISIJ International, Vol. 36, 1996; 1397-1405.
- [27] Özkan Demir Çelik Eğitim Notları.
- [28] Erciyes Üniversitesi Malzeme Bilimi Ders ve Laboratuvar Notları.
- [29] Atakay Ö, Niyobyumun Sıcak Haddelenmiş Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, (Yüksek lisans Tezi). Hatay: İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
- [30] Erden M.A, Yılmaz A, ve Şen N.Ş, Nb-V Mikroalaşım Çeliğinde Mekanik Alaşım Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları 2020; 42-54.
- [31] Narita K, Physical Chemistry of the Groups IVa (Ti, Zr), Va (V, Nb, Ta) and the Rare Earth Elements in Steel, Transactions ISIJ, Vol. 15, 1975, pp. 245-252.
- [32] Hannane, N., Einfluß der Prozeßparameter bei der thermomechanischen Behandlung mikroligierter Stähle für Flachprodukte, Dissertation , RWTH Aachen, 1989.
- [33] Taş Z, Yüksek Dayanımlı Düşük Alasımlı Çeliklerde Metalürjik Mukavemet Artırma, Tas. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi; 2012; 28(2): 97-101.

Özgeçmiş

Adı Soyadı: Metehan Doğan

Eğitim Bilgileri:

2012–2016 - Kayseri Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Lisans

2019–2022 - İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Yüksek Lisans