



The effects of Niobium and Vanadium on the mechanical properties and microstructure of high-carbon steel wire rods and cold-drawn steel wires

Onur Meydan^{1,2*} , Mustafa Akçil¹ 

¹Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Sakarya Applied Science University, Serdivan, 54187, Sakarya, Türkiye

²Emirates Steel part of EMSTEEL, Abu Dhabi Industrial City (ICAD) Musaffah, Abu Dhabi, UAE

Highlights:

- Nb and V refined the grains by reducing the pearlite lamellar spacing.
- Microalloying increased both tensile strength and ductility.
- Nb contributed to solid-solution strengthening, while V enhanced precipitation strengthening

Keywords:

- Wire Rod
- Microalloyed Steel
- Material Characterization
- Evaluation of Texture
- Cold Drawing

Article Info:

Research Article
Received: 10.03.2025
Accepted: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1655210

Correspondence:

Author: Onur Meydan
e-mail:
onrmydn@hotmail.com
phone: +971 52 275 5178

Graphical/Tabular Abstract

Purpose: To quantitatively determine the effects of Nb (0.010–0.050%) and V (0.010–0.050%) microalloying on the mechanical properties, pearlite lamellar spacing, texture, and dislocation behavior of high-carbon wire rod (13 mm) and cold-drawn wire (5.25 mm). Figure A presents the measured pearlite lamellar spacing.

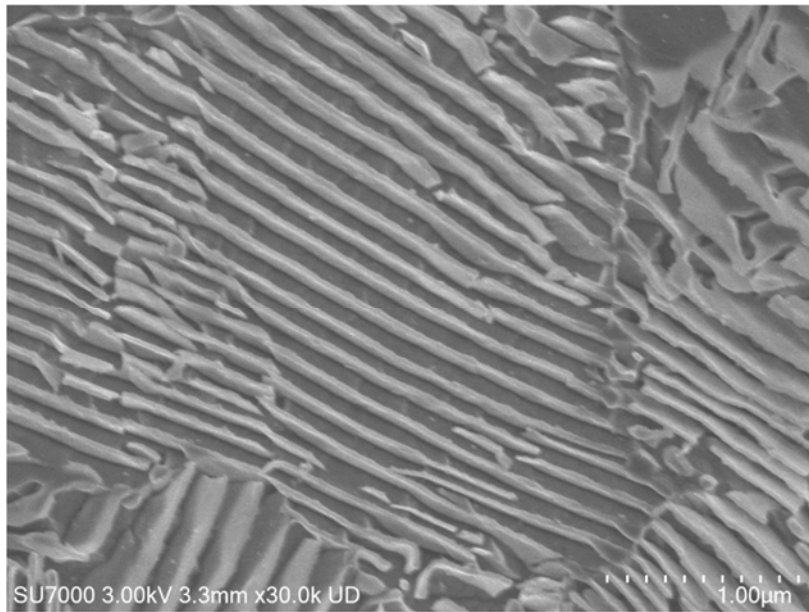


Figure A. Measurement of cementite lamella

Theory and Methods:

The microalloying effect is modeled via grain refinement, precipitation/solid-solution strengthening, and reduction of pearlite lamellar spacing. Specimens were hot-rolled under identical conditions; lamellar spacing was measured by SEM, texture (BCC $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$) by EBSD pole figures, and dislocation maps by WBV. Tensile tests were conducted on a Zwick 1600 kN machine in accordance with ISO 6892-1.

Results:

Wire rod UTS (MPa): V: 1174–1201 (avg. 1185); Nb: 1210–1235 (avg. 1223). %RA: V: avg. 32.85; Nb: avg. 39.59 ($\approx +6.75$ points). Lamellar spacing: Nb: avg. 65.2 nm; V: avg. 86 nm (≈ -20.8 nm). Cold-drawn wire: Nb is $\approx +70$ MPa higher than V at every drawing block. EBSD/WBV: With increasing draw, V shows stronger texture and more widespread dislocation density; Nb shows controlled texture and more localized dislocation accumulation.

Conclusion:

Nb addition further refines lamellar spacing, increasing strength while preserving ductility, thus offering an advantage in cold drawability. V promotes stronger texture and higher dislocation density, yielding higher strength but limiting formability. Application-wise, Nb suits wires requiring a strength–ductility balance, whereas V suits cases where maximum strength is prioritized.



Niobyum ve Vanadyumun yüksek karbonlu çelik filmaşın ve soğuk çekilmiş çelik telin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri

Onur Meydan^{1,2*} , Mustafa Akçil¹ 

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Serdivan, 54187, Sakarya, Türkiye

²Emirates Steel EMSTEEL Kuruluşu, Abu Dhabi Industrial City (ICAD) Musaffah, Abu Dhabi, BAE

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Nb ve V, perlit lamel aralığını daraltarak tane incelmeye katkı sağlamıştır
- Mikroalaşımlama, hem mukavemeti hem sünekliği artırmıştır
- Nb katı çözelti, V ise çökelti sertleşmesiyle toplam dayanımı güçlendirmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 10.03.2025

Kabul: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1655210

Anahtar Kelimeler:

Tel Çubuk,
mikro alaşımlı çelik,
malzeme karakterizasyonu,
tekstür yapısı değerlendirme,
soğuk çekme

ÖZ

Niobyum (Nb) ve Vanadyum (V) mikroalaşım elementleri, yüksek karbonlu çelik tel çubukların ve soğuk çekilmiş tellerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Bu elementler, perlit lamel aralığını daraltarak tane incelmeye katkı sağlar, karbür oluşumunu teşvik eder ve böylece hem çekme mukavemetini hem de sünekliği artırır. Bu çalışma, farklı Nb (0.010%–0.050%) ve V (0.010%–0.050%) seviyelerinin 13 mm tel çubuklar ve 5.25 mm soğuk çekilmiş teller üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tel çubuklar, kütük üretimi sonrası geleneksel haddeleme yöntemiyle üretilmiş olup, mikroyapısal analizler Zeiss optik mikroskobu, Hitachi SU7000 SEM ve Oxford EBSD sistemi ile gerçekleştirilmiştir. EBSD kutup figürleri ve Ağırlıklı Burgers Vektörü (WBV) yöntemleri kullanılarak doku yoğunluğu ve dislokasyon davranışı değerlendirilmiştir. Mekanik testler ise ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak Zwick 1600 kN cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sementit lamel aralığının azaldığını, dislokasyon dağılımının daha homojen hale geldiğini ve kesit daralmasının arttığını göstermiştir. Bu bulgular, Nb ve V mikroalaşımlarının yüksek karbonlu çeliklerde mikroyapı iyileştirmesi ve mekanik performans artışı sağladığını doğrulamaktadır. Sonuç olarak, Nb–V mikroalaşımlı teller, yüksek dayanım ve süneklik gerektiren zorlu mühendislik uygulamaları için uygun bir malzeme seçeneğidir.

The effects of Niobium and Vanadium on the mechanical properties and microstructure of high-carbon steel wire rods and cold-drawn steel wires

H I G H L I G H T S

- Nb and V refined the grains by reducing the pearlite lamellar spacing
- Microalloying increased both tensile strength and ductility
- Nb contributed to solid-solution strengthening, while V enhanced precipitation strengthening

Article Info

Research Article

Received: 10.03.2025

Accepted: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1655210

Keywords:

Wire rod,
microalloyed steel,
material characterization,
evaluation of texture,
cold drawing

ABSTRACT

Niobium (Nb) and Vanadium (V) microalloying elements significantly affect the mechanical and microstructural properties of high-carbon steel wire rods and cold-drawn wires. By reducing pearlite lamellar spacing and promoting carbide formation, these elements refine the grain structure and enhance tensile strength and ductility. This study evaluates the effects of Nb (0.010%–0.050%) and V (0.010%–0.050%) additions on 13 mm wire rods and 5.25 mm cold-drawn wires. The wire rods were produced through conventional hot rolling after billet casting, and microstructural characterization was performed using a Zeiss optical microscope, a Hitachi SU7000 SEM, and an Oxford EBSD system. Texture and dislocation behavior were examined through EBSD pole figures and the Weighted Burgers Vector (WBV) method. Mechanical properties were measured with a Zwick 1600 kN tensile machine in accordance with ISO 6892-1. The results indicate a reduced pearlite lamellar spacing, a more uniform dislocation distribution, and an increased reduction of area, demonstrating improvements in strength and ductility. These findings confirm that Nb and V enable effective microstructure refinement, strengthen texture development, and improve dislocation behavior and performance in high-carbon steels. Consequently, Nb–V microalloyed wires are suitable for demanding applications requiring a balanced combination of strength and ductility.

1. Giriş (Introduction)

Yüksek karbonlu çelik teller, otomotiv endüstrisi, çelik kord, demiryolu sanayi, yay teli endüstrisi, halat teli, piyano telleri, yüksek mukavemetli halatlar, galvanizli teller ve asma köprülerde yüksek çekme mukavemeti, sertlik ve aşınma direncinin mükemmel kombinasyonu nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Niyobyum (Nb) ve Vanadyum (V) gibi mikroalaşım elementleri, yüksek karbon ötektoid çeliklerin soğuk çekme sürecinde mukavemetini artırmaktadır. Niyobyumun kullanımı, soğuk çekilebilirlik ve şekillendirilebilirlik üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ancak, düşük karbonlu çeliklere kıyasla niyobyumun yüksek karbonlu çeliklerdeki çözünürlüğü sınırlıdır. Niyobyum, perlit dönüşümünü geciktirdiği için sementit lamelleri arasındaki mesafeyi azaltır ve bu da mekanik özellikleri iyileştirir. Küçük miktarlarda bile bu elementler, tane inceltme, sementit lamelleri arasındaki mesafenin azalması ve karbür çökmesini teşvik etme yoluyla çeliğin mekanik performansı ve mikroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [3-5]. Yüksek karbonlu çeliklerin soğuk çekme süreci için gereken temel özellikler yüksek mukavemet, süneklik ve çekilebilirliktir. Soğuk çekilmiş yüksek karbonlu çelik teller, ön gerilmeli beton halatlarında kullanılır. Kimyasal bileşim, indirgeme oranı ve kalıp geometrisi, soğuk çekilmiş perlitik tellerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini belirleyen faktörlerdir. Soğuk çekilmiş tellerde yaklaşık 1800 MPa çekme mukavemeti beklenmektedir. Bu mukavemet aralığında, karbon oranı kesit daralmasını olumsuz etkilemektedir [1]. Mikroalaşımlama, Niyobyum ve Vanadyum eklenmesiyle perlit yapısının incelmeye, ferrit ve sementit arasındaki lameller arası mesafenin azalmasına neden olur. Böylece, çelik mukavemeti artırılırken süneklik belirgin şekilde azalmaz [6]. Niyobyum, sıcak haddeleme sırasında tane sınırlarını sabitleyen karbürler (NbC) oluşturarak tane büyümesini önler ve mukavemet ile tokluk değerlerini artırır [7]. Benzer şekilde, Vanadyum, soğuma ve soğuk çekme sırasında ince Vanadyum karbür (VC) çökeltileri oluşturarak dislokasyon hareketini engeller ve malzemenin genel mukavemetini artırır [8].

Soğuk çekme işlemi, çelik tellerin mukavemetini daha da artırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Soğuk çekme sırasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi, sementit lamellerinin daha da incelmeye neden olarak çekme mukavemetini artırırken sünekliği makul seviyede tutar [9]. Sonuç olarak, bu mikroalaşım çelikler, yüksek mukavemet ve yorulma direncinin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte, soğuk çekilmiş yüksek karbonlu çeliklerin metalurjisinde hâlâ tanımlanmamış etkiler ve zorluklar bulunmaktadır. Kimyasal bileşim ve mikroyapı kontrol edilerek yüksek mukavemet ile birlikte istenen sünekliği elde etme çalışmaları devam etmektedir. Günümüzde, soğuk çekilmiş tellerin hedeflenen çekme mukavemeti, halatlar için 2.0 GPa ve otomobil lastiklerinde 4.0 GPa seviyelerine ulaşmıştır [10]. Bu çalışmada, farklı oranlardaki Niyobyum ve Vanadyum içeriğinin yüksek karbonlu çelik tel çubukların ve soğuk çekilmiş tellerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Gelişmiş mikroskopi teknikleri kullanılarak mikroyapı analizleri yapılmış, standartlara uygun mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma, mikroalaşım elementlerinin yüksek karbonlu çeliklerin performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde anlamayı amaçlamaktadır. Çalışmadan elde edilen veriler, yüksek mukavemetli çelik tellerin endüstriyel üretimi ve uygulamalarını optimize etmek için önemli bilgiler sağlayacaktır.

Krom, Vanadyum ve Niyobyum gibi elementler, yüksek karbonlu çeliklere mukavemet kazandırmak için eklenmektedir. Her bir elementin çelik mikroyapısı üzerinde kendine özgü etkileri bulunmaktadır. Çelik mikroyapısındaki değişiklikler, perlitin

incelmesi, sementitin mukavemetinin artırılması ve çökeltme sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır [11]. Perlit tanelerinin incelmeye ve sementit lamelleri arasındaki mesafenin azalması, çelik mukavemetini artıran en önemli sertleşme mekanizmalarından biridir. Lameller arası mesafe, perlitik çeliklerde sünekliği kontrol etmek için en uygun parametrelerden biridir. Hipoötektoid çeliklerde lameller arası mesafenin azalmasının nedeni, uygulanan üretim yöntemi ve kimyasal bileşimin sementit kalınlığını azaltmasıdır. Sementit lamelleri arasındaki mesafenin azaltılması, sıcak haddeleme sürecinin, soğutma ve termal kontrolün optimize edilmesiyle sağlanmaktadır [12]. Soğuk çekme işlemi, çelik tel çubukların veya çubukların çapını düşürmek için oda sıcaklığında kalıptan çekilmesi işlemidir. Bu işlem, malzemede önemli plastik deformasyon oluşturarak sertleşmeye neden olur. Niyobyum (Nb), Vanadyum (V) ve Titanyum (Ti) gibi mikroalaşım elementlerinin varlığı, soğuk çekme sırasında deformasyon sertleşme davranışını önemli ölçüde etkileyebilir [9].

Soğuk çekme işlemi, çelikteki dislokasyon yoğunluğunu artırır. Mikroalaşım elementlerinin varlığı, bu dislokasyonların birbirleriyle ve çökeltilerle nasıl etkileşime girdiğini etkiler [13]. İnce çökeltiler, dislokasyon hareketini engelleyen bariyerler oluşturarak sertleşme etkisini artırır. Artan dislokasyon yoğunluğu ve çökeltilerle etkileşimi, önemli deformasyon sonrası dahi yüksek mukavemet seviyelerinin korunmasını sağlar [14, 15]. Toplam redüksiyon oranının artırılması ile çekme mukavemeti de artmaktadır. Deformasyon sertleşmesini optimize etmek, perlit mikroyapısının optimum kesit daralmasını sağlamak, tel çubuk soğutma koşullarını kontrol etmek, mikroalaşım elementleri eklemek, tel çekme sürecini tasarlamak ve soğuk çekme hızını ayarlamak bu gelişime katkıda bulunan faktörlerdir [11].

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada, 150 mm x 150 mm x 12000 mm boyutlarında ve iki farklı kimyasal bileşime sahip çelik kütükler üretilmiştir. Kütükler, geleneksel haddeleme koşullarına uygun olarak üretilmiş ve her iki tip çelik tel çubuğu, mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak analiz edebilmek amacıyla aynı üretim koşullarında haddelenmiştir. Birinci tip tel çubuklar aşağıdaki kimyasal bileşime sahiptir: %0.78-0.84 Karbon (C), %0.15-0.40 Silisyum (Si), %0.50-0.90 Mangan (Mn), %0.15-0.40 Krom (Cr) ve %0.01-0.05 Vanadyum (V). İkinci tip tel çubuklar ise benzer bir bileşime sahip olup, Vanadyum yerine Niyobyum (Nb) eklenmiştir. Böylece, ikinci tip tel çubukların kimyasal bileşimi şu şekilde olmuştur: %0.78-0.84 C, %0.15-0.40 Si, %0.50-0.90 Mn, %0.15-0.40 Cr ve %0.01-0.05 Niyobyum (Nb). İki farklı kimyasal bileşime sahip çelik kütükler önce 13 mm çapında tel çubuk üretmek için kullanılmıştır. Daha sonra, bu 13 mm çapındaki çubuklar, 5.25 mm çapında soğuk çekilmiş tel üretimi için işlenmiştir. Soğuk çekme işlemi, 9 bloklu bir tel çekme makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen tüm ürünler üzerinde çekme testi, mikroyapı incelemeleri ve EBSD analizleri yapılmıştır. Bu analizler, çelik tel çubukların ve soğuk çekilmiş tellerin mekanik özelliklerini değerlendirmek, mikroyapısal karakteristiklerini incelemek ve kristalografik doku yapısını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Çekme Testi (Tensile Testing)

Niyobyum ve Vanadyum içeren 13 mm çapındaki tel çubuklar üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir mikroalaşım çelik tel çubuk türünden onar numune test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, minimum, ortalama ve maksimum değerler olarak raporlanmış ve her tel çubuk türünün çekme özelliklerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla Tablo 1'de sunulmuştur.

Niyobyum ve Vanadyum içeren 5.25 mm çapındaki soğuk çekilmiş teller üzerinde de çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir tel çubuk türünden ve farklı mikroalaşım elementleri içeren numunelerden onar adet test edilmiştir. Her bir soğuk çekme bloğu için testler yapılmış ve sonuçlar, her soğuk çekilmiş tel türünün çekme özelliklerini detaylı olarak değerlendirmek amacıyla ortalama değerler şeklinde Tablo 2'de verilmiştir. Çekme testleri, metal malzemelerin test edilmesine yönelik ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2. Mikroyapı İncelemeler (Microstructure Examination)

Bu çalışmada, Niyobyum ve Vanadyum içeren 13 mm çapındaki tel çubuklardan ve 5.25 mm çapına çekilmiş tellerden hazırlanan numuneler kullanılmıştır.

3.2.1. Sementit Lamelleri arası mesafenin Ölçümü (Measurement of cementite lamella distance)

13 mm çapındaki tel çubuk numunesinin dağlama işlemi sonrasında sementit lamelleri arasındaki mesafe, taramalı elektron mikroskobu

ile incelenmiştir. Sementit lamelleri arasındaki mesafe, 10 farklı sementit lameli üzerinde yapılan ölçümler sonucunda aritmetik ortalama hesaplanarak belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen sementit lamellerine ait görüntüler Şekil 1'de gösterilmiş, ölçüm sonuçları ise Tablo 3'te verilmiştir.

3.2.2. Tekstür Analizi (Texture Analysis)

Her bir mikroalaşım çelik türü için tel çubuk, 1. blok çekilmiş tel, 5. blok çekilmiş tel ve 9. blok çekilmiş tel numuneleri hazırlanmış ve EBSD yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu numunelerin doku yapısını anlamak amacıyla kutup figürleri oluşturulmuştur. Tel çubuk ve soğuk çekilmiş tel numunelerine ait kutup figürleri, Şekil 2 ile Şekil 9 arasında gösterilmiştir. Fe-BCC kristal yapısına karşılık gelen $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ yönlerinde doku oluşumu gözlemlenmiştir.

3.2.3. Dislokasyon Analizi (Dislocation Analysis)

Her bir mikroalaşım çelik türü için tel çubuk, 1. blok çekilmiş tel, 5. blok çekilmiş tel ve 9. blok çekilmiş tel numuneleri hazırlanmış ve EBSD yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 1. Tel Çubukların Çekme Test Sonuçları (Tensile testing result of Wire Rod)

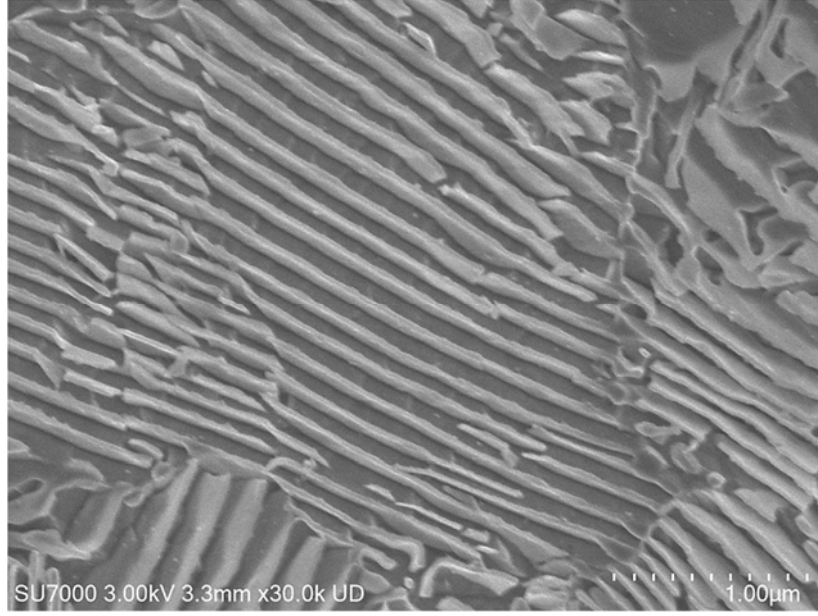
Özellikler	Mikroalaşım Elementi	Min	Ortalama	Maks
Çekme Mukavemeti (MPa)	V	1174	1184.6	1201
	Nb	1210	1223.1	1235
% Kesit Daralması	V	30.33	32.845	34.52
	Nb	37.69	39.593	41.22

Tablo 2. Soğuk Çekilmiş Tellerin Çekme Test Sonuçları (Tensile testing result of cold drawn wire)

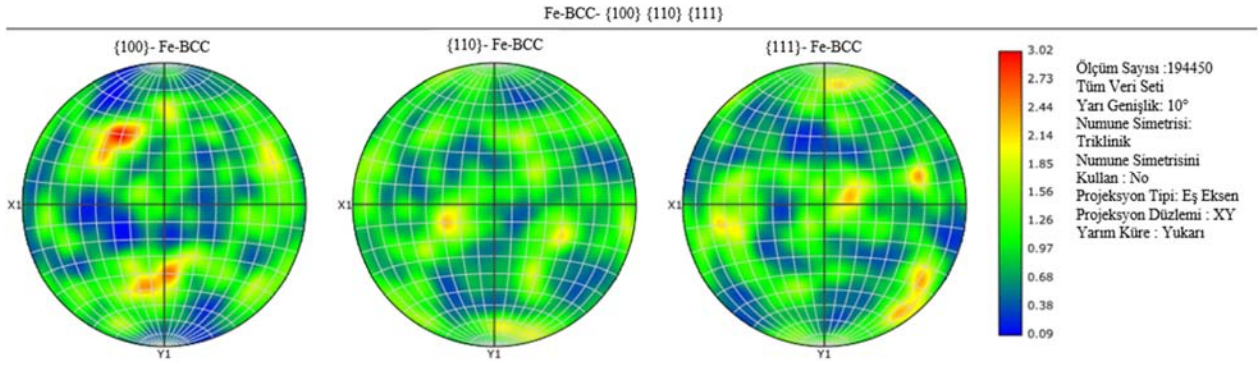
Tel Çubuk Çapı (mm)	Mikroalaşım Elementi	Soğuk Çekme Basamağı	Soğuk Çekilmiş Tel Çapı (mm)	Gerinim Seviyesi	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Kesit Daralması
13	V	1 Blok	11.52	0.24	1360	45.25
13	V	2 Blok	10.22	0.48	1436	44.66
13	V	3 Blok	9.13	0.71	1516	43.98
13	V	4 Blok	8.18	0.93	1597	41.43
13	V	5 Blok	7.37	1.14	1650	40.81
13	V	6 Blok	6.63	1.35	1708	37.55
13	V	7 Blok	6.01	1.54	1803	36.40
13	V	8 Blok	5.51	1.72	1860	36.11
13	V	9 Blok	5.25	1.81	1927	31.8
13	Nb	1 Blok	11.52	0.24	1408	46.94
13	Nb	2 Blok	10.23	0.48	1539	46.71
13	Nb	3 Blok	9.13	0.71	1590	44.94
13	Nb	4 Blok	8.18	0.93	1660	44.38
13	Nb	5 Blok	7.37	1.14	1718	43.23
13	Nb	6 Blok	6.67	1.33	1783	42.25
13	Nb	7 Blok	6.04	1.53	1880	41.42
13	Nb	8 Blok	5.54	1.71	1922	41.05
13	Nb	9 Blok	5.26	1.81	1989	39.08

Tablo 3. Sementit Lamelleri arası Mesafelerin Ölçüm Sonuçları (Measurement result of distance of cementite lamella)

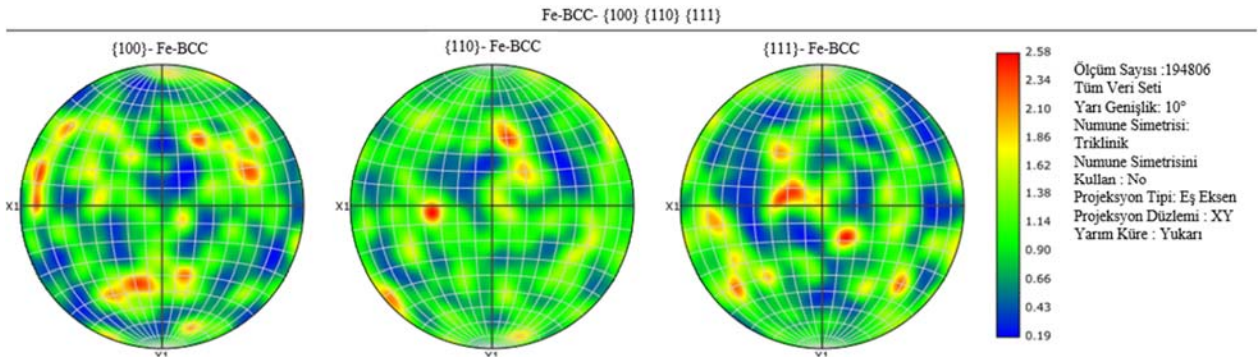
Mikroalaşım Elementi	Numune Numarası	Çap (mm)	Lameller arası mesafe (nm)
Nb	1	13	60
Nb	2	13	62
Nb	3	13	67
Nb	4	13	73
Nb	5	13	64
V	1	13	91
V	2	13	80
V	3	13	82
V	4	13	89
V	5	13	88



Şekil 1. Sementit Lamellerine ait Görüntüler (Microstructural image showing measurement of distance of cementite lamella)



Şekil 2. 13 mm Vanadyum ilaveli tel çubuk numunesi-Kutup figürü (13 mm Vanadium-alloyed wire rod sample – Pole figüre)

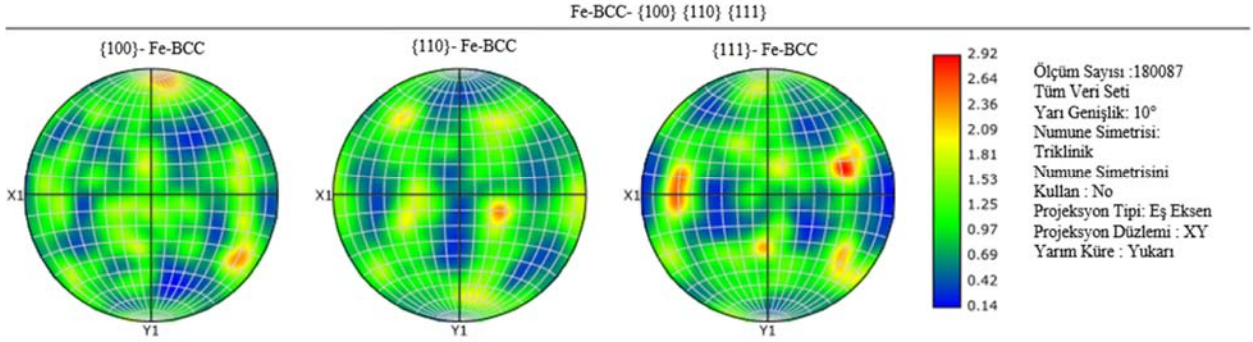


Şekil 3. 13 mm Niyobyum ilaveli tel çubuk numunesi-Kutup figürü (13 mm Niobium-alloyed wire rod sample – Pole figüre)

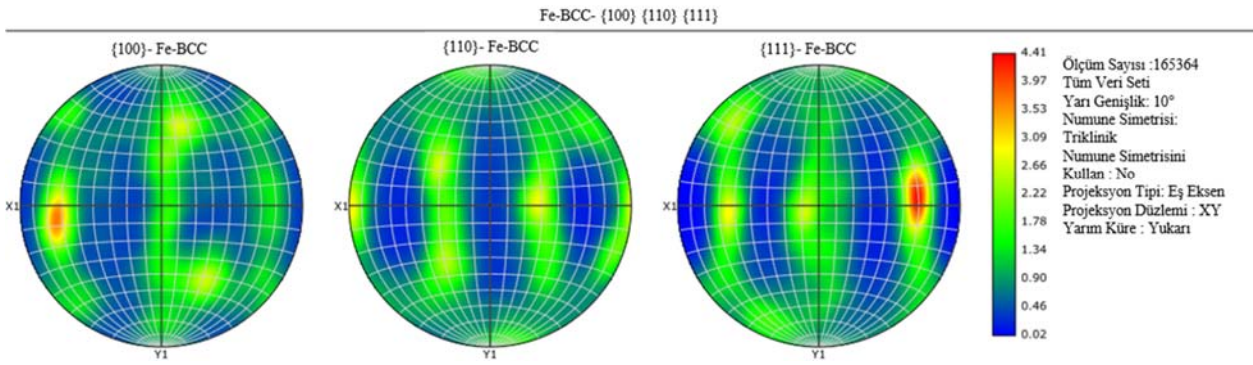
Bu numunelerin dislokasyon mekanizmasını anlamak amacıyla Ağırlıklı Burgers Vektörü (WBV) haritaları oluşturulmuştur.

Tel çubuk ve soğuk çekilmiş tel numunelerine ait Ağırlıklı Burgers Vektörü (WBV) figürleri, Şekil 10 ile Şekil 17 arasında verilmiştir.

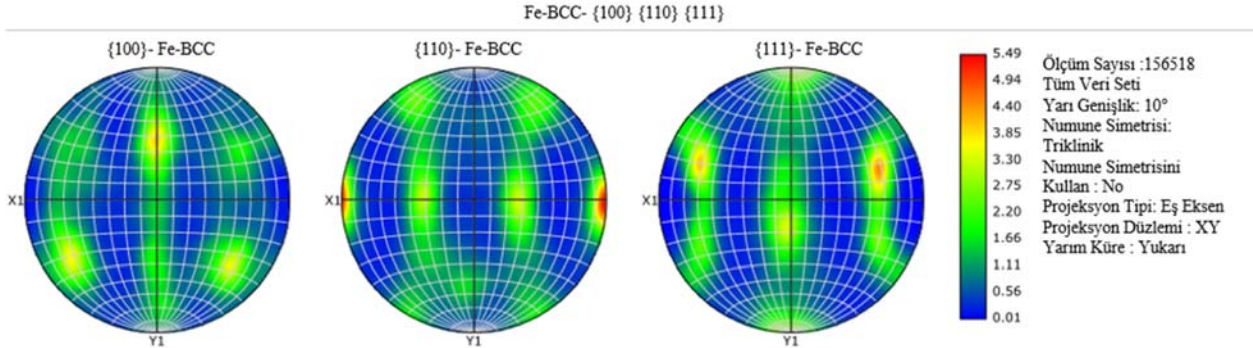
Sonuçlar, hem üst hem de alt dislokasyon mekanizmalarının varlığını göstermektedir. Yerel yanlış yönelimlerin daha yüksek olduğu dislokasyonlar üst dislokasyonlar olarak sınıflandırılırken, daha düşük yanlış yönelimlere neden olan dislokasyonlar alt dislokasyonlar olarak kabul edilmiştir.



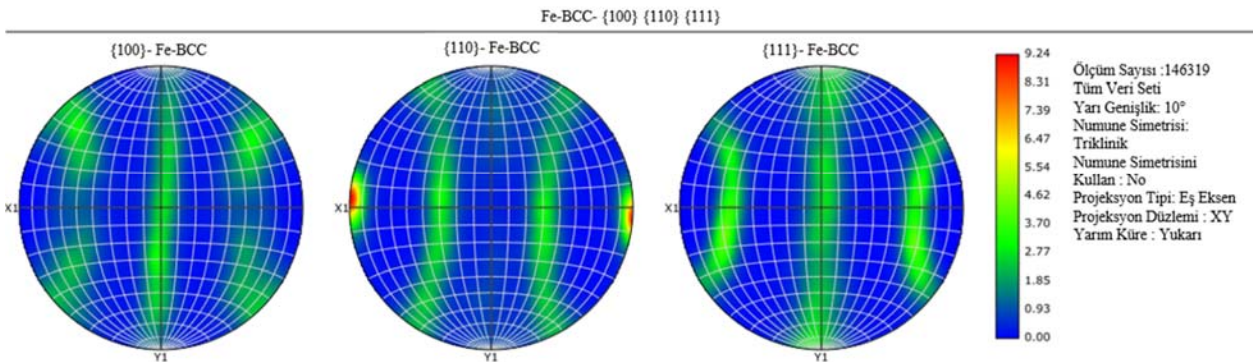
Şekil 5. 1. Blok soğuk çekilmiş Niyobyum ilaveli çelik numune- Kutup figürü
(1st block cold-drawn Niobium-alloyed steel sample – Pole figure)



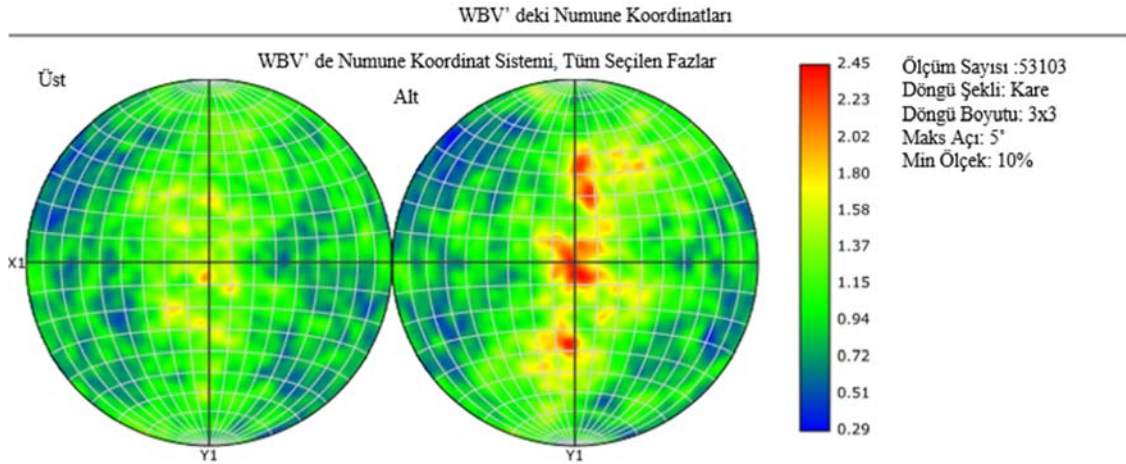
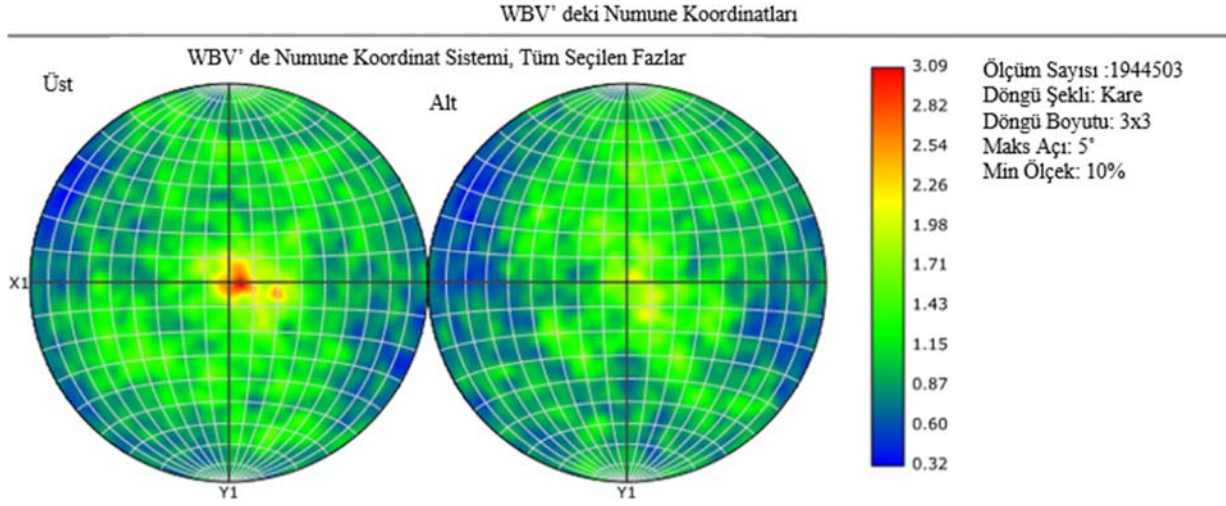
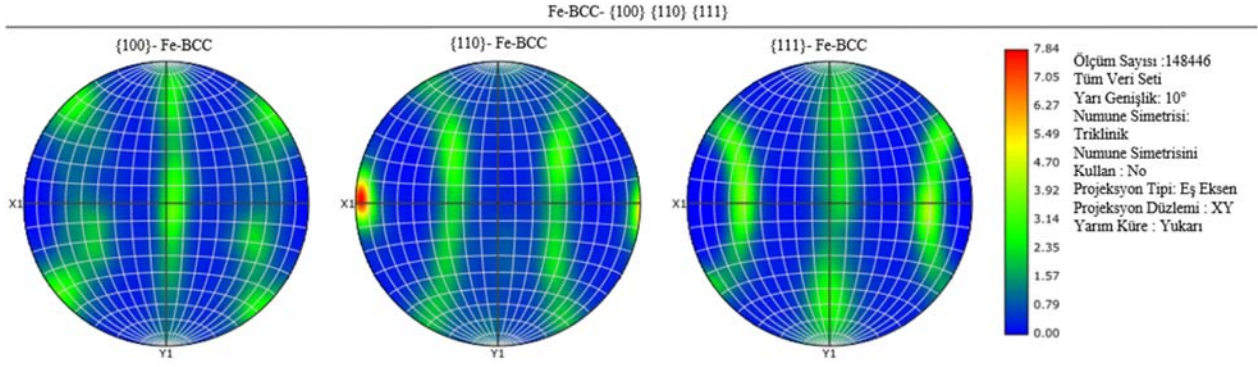
Şekil 6. 5. Blok soğuk çekilmiş Vanadyum ilaveli çelik numune- Kutup figürü
(5. block cold-drawn Vanadium-alloyed steel sample – Pole figure)

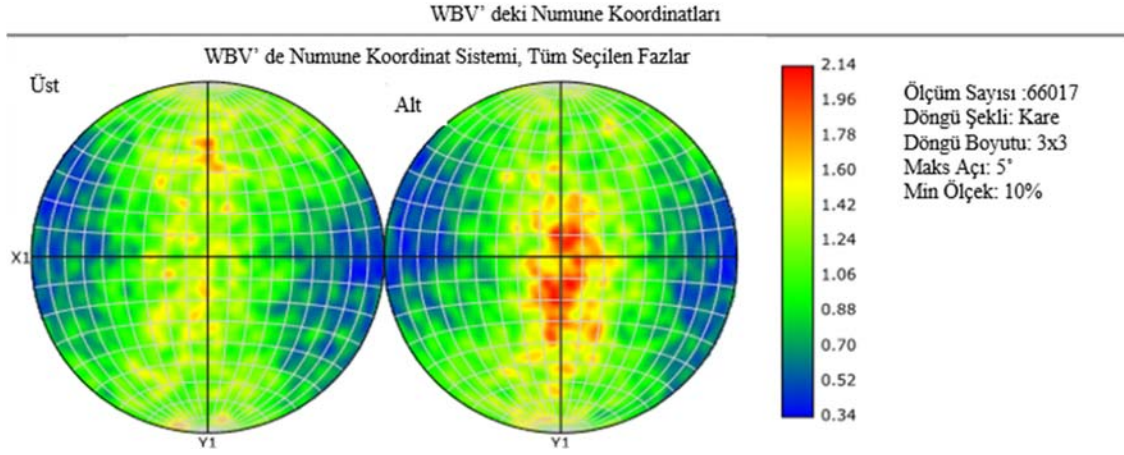


Şekil 7. 5. Blok soğuk çekilmiş Niyobyum ilaveli çelik numune- Kutup figürü
(5. block cold-drawn Niobium-alloyed steel sample – Pole figure)

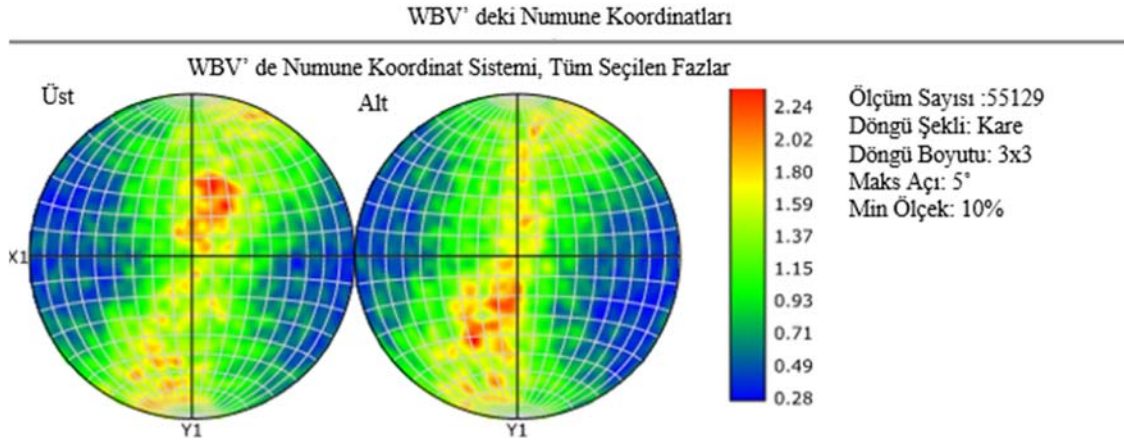


Şekil 8. 9. Blok soğuk çekilmiş Vanadyum ilaveli çelik numune- Kutup figürü
(9. block cold-drawn Vanadium-alloyed steel sample – Pole figure)

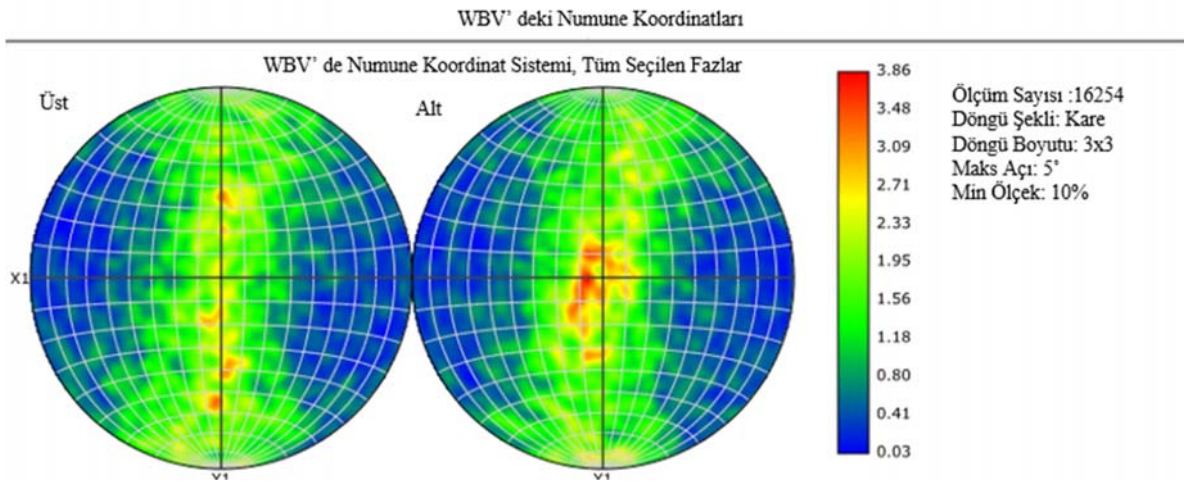




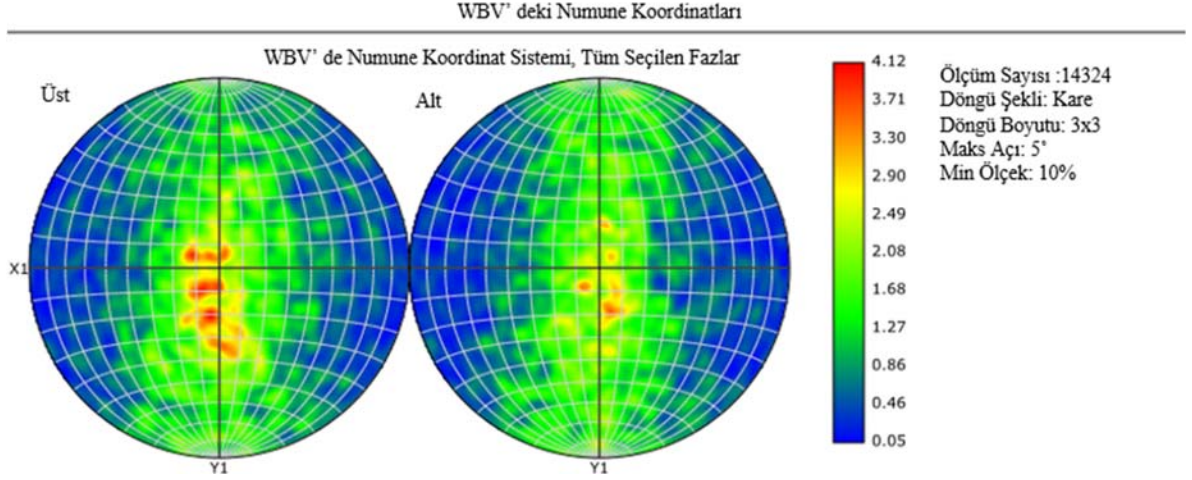
Şekil 12. 1. Blok soğuk çekilmiş Vanadyum ilaveli çelik numune-WBV
(1. block cold-drawn Vanadium-alloyed steel sample – WBV)



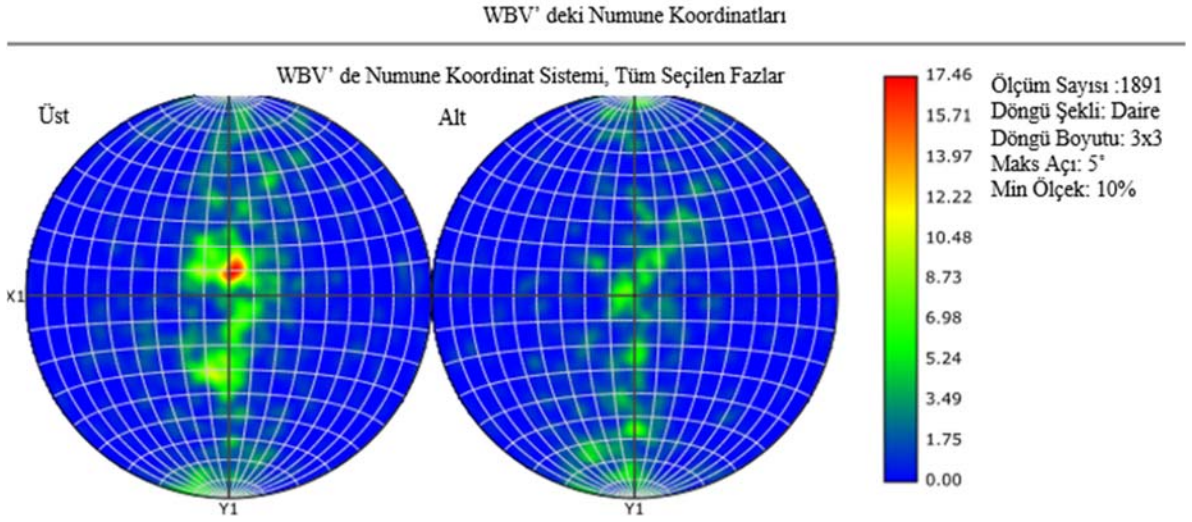
Şekil 13. 1. Blok soğuk çekilmiş Niyobyum ilaveli çelik numune – WBV
(1. block cold-drawn Niobium-alloyed steel sample – WBV)



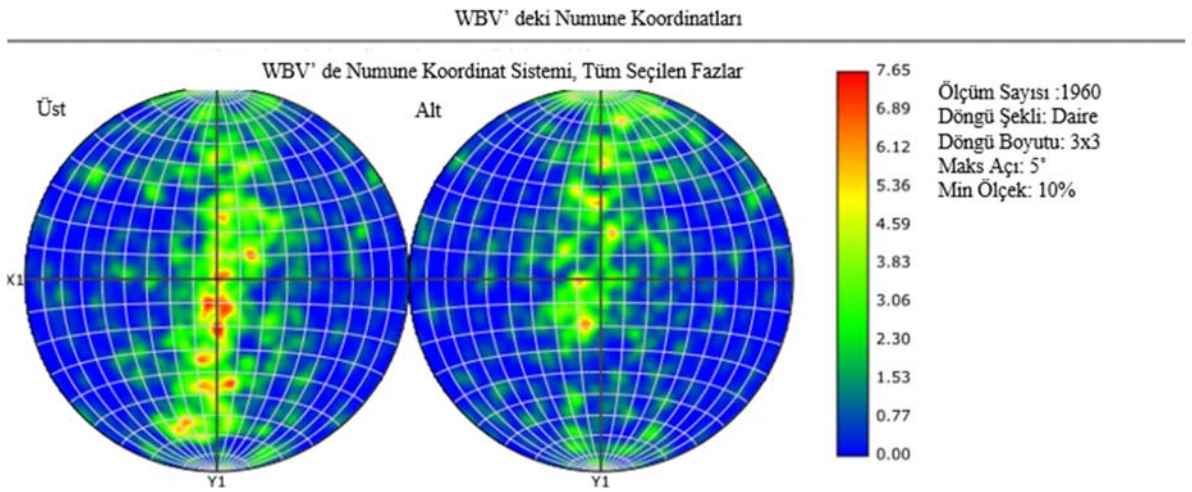
Şekil 14. 5. Blok soğuk çekilmiş Vanadyum ilaveli çelik numune – WBV
(5. block cold-drawn Vanadium-alloyed steel sample – WBV)



Şekil 15. 5. Blok soğuk çekilmiş Niyobyum ilaveli çelik numune – WBV (5th block cold-drawn Niobium-alloyed steel sample – WBV)



Şekil 16. 9. Blok soğuk çekilmiş Vanadyum ilaveli çelik numune – WBV (9th block cold-drawn Vanadium-alloyed steel sample – WBV)



Şekil 17. 9. Blok soğuk çekilmiş Niyobyum ilaveli çelik numune – WBV (9th block cold-drawn Niobium-alloyed steel sample – WBV)

3.3. Tartışmalar (Discussionrs)

3.3.1 Mekanik Özelliklerin ve Perlit Lamelleri arası Mesafenin Değerlendirilmesi

(Evaluation of Mechanical Properties and Interlamellar Spacing of Pearlite)

Tel çubuklara uygulanan çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda, Vanadyum ilaveli 13 mm tel çubukların çekme mukavemetinin 1174 MPa ile 1201 MPa arasında değiştiği ve ortalama çekme mukavemetinin 1185 MPa olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, Niyobyum ilaveli 13 mm tel çubukların çekme mukavemeti 1210 MPa ile 1235 MPa arasında değişmiş olup, ortalama çekme mukavemeti 1223 MPa olarak ölçülmüştür.

Tel çubukların kesit daralması testi sonuçları değerlendirildiğinde, Niyobyum ilaveli 13 mm tel çubuklarda kesit daralmasının %37.69 ile %41.22 arasında değiştiği ve ortalama olarak %39.59 olduğu belirlenmiştir. Karşılaştırıldığında, Vanadyum ilaveli 13 mm tel çubukların kesit daralmasının %30.33 ile %34.52 arasında değiştiği ve ortalama %32.84 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, yüksek karbonlu çeliklerde eşit miktarda Vanadyum ve Niyobyum ayrı ayrı kullanıldığında, Niyobyum ilaveli tel çubukların kesit daralma oranının, Vanadyum ilaveli tel çubuklara kıyasla ortalama %6.75 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tel çubuklara ait çekme testi sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Çekme mukavemetindeki ve kesit daralmasındaki iyileşme, Niyobyum ilaveli çelik tel çubuklarda sementit lamelleri arasındaki mesafenin azalmasına bağlıdır. Sementit lamelleri arası mesafenin karşılaştırılması Şekil 18'de gösterilmiştir.

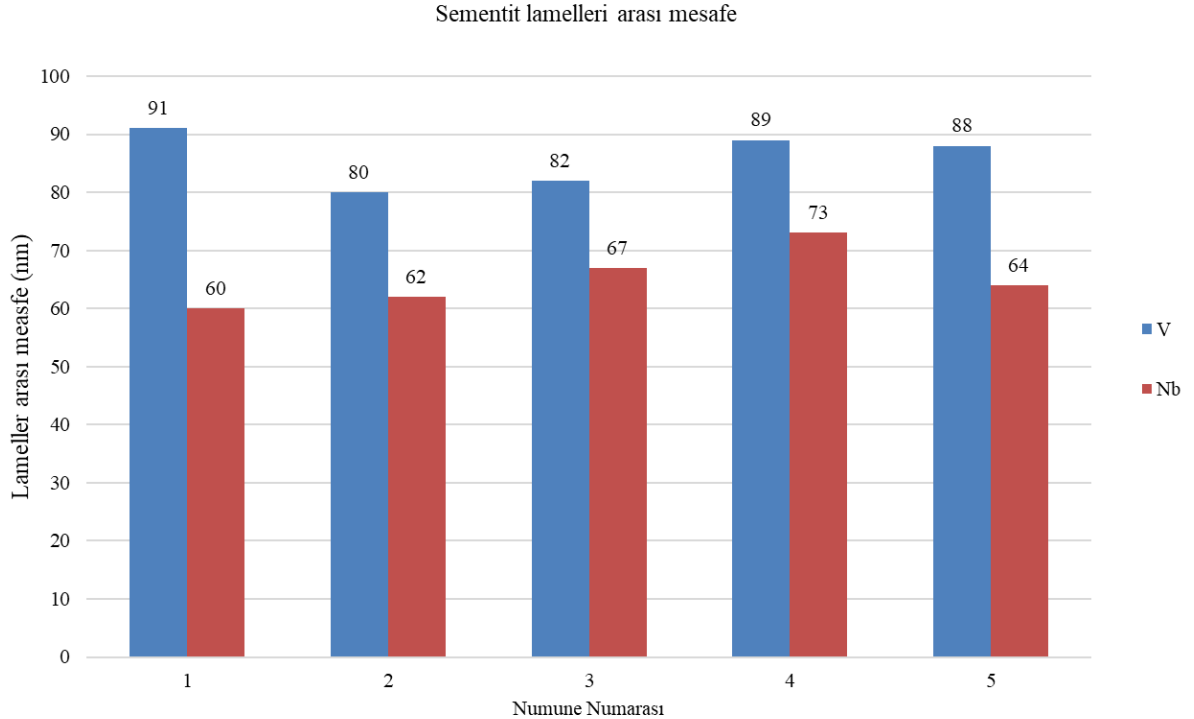
Sementit lamelleri arasındaki mesafenin değerlendirilmesi sonucunda, Niyobyum ilaveli 13 mm tel çubuklarda lameller arası mesafenin 60 nm ile 73 nm arasında değiştiği ve ortalama 65.2 nm

olduğu belirlenmiştir. Vanadyum ilaveli 13 mm tel çubuklarda ise bu mesafenin 80 nm ile 90 nm arasında değiştiği ve ortalama olarak 86 nm olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen verilere göre, yüksek karbonlu çeliklerde eşit miktarda Vanadyum ve Niyobyum ayrı ayrı kullanıldığında, Niyobyum içeren tel çubuklarda sementit lamelleri arasındaki mesafenin Vanadyum içeren tel çubuklara kıyasla 20.8 nm daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır.

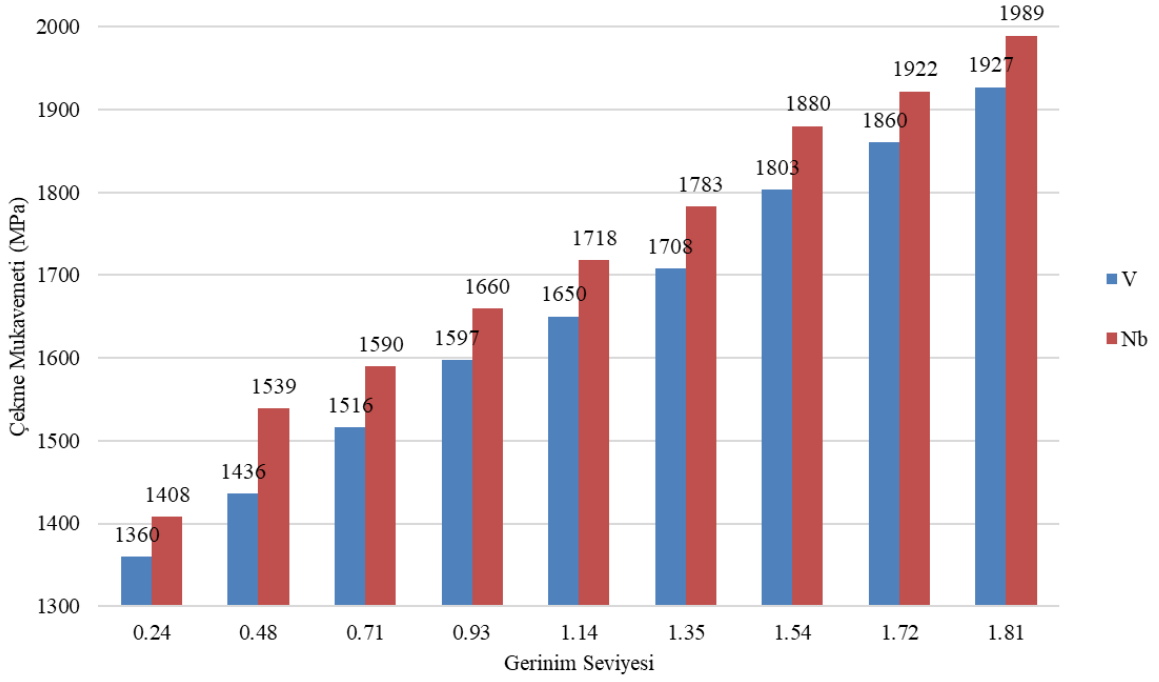
Sonuçlara dayanarak, Niyobyum ilavesinin çelikte Vanadyum ilavesine kıyasla daha yüksek mukavemet sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek karbonlu çeliklerden beklenen yüksek kesit daralma değerleri, Niyobyum ilaveli çelik tel çubuklarda elde edilmiştir. Niyobyum ilaveli çelik tel çubukların, Vanadyum ilaveli çelik tel çubuklara kıyasla daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, yüksek kesit daralma değerlerinin sementit lamelleri arasındaki mesafenin azaltılmasıyla sağlandığı gözlemlenmiştir.

Soğuk çekilmiş tellerin her blok arasından alınan numunelerin test sonuçlarına göre, Niyobyum ilaveli soğuk çekilmiş tellerin çekme mukavemetinin Vanadyum ilaveli soğuk çekilmiş tellerden yaklaşık 70 MPa daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Soğuk çekilmiş tellerin çekme mukavemeti ve gerinim seviyelerinin karşılaştırılması Şekil 19'da sunulmuştur. Niyobyum ilaveli çeliklerin daha yüksek mukavemete sahip olmasına rağmen, sünekliliği gösteren önemli kesit daralma oranlarının korunması ve bu daralma oranının soğuk çekilmiş tellerde %40'a kadar sürdürülebilmesi, soğuk çekilebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Kesit daralma ve gerinim seviyesi arasındaki ilişki Şekil 21'de gösterilmiştir. Bu avantaj, Niyobyum ilaveli çeliklerde sementit lamelleri arasındaki mesafenin daha kısa olmasıyla açıklanabilmektedir.



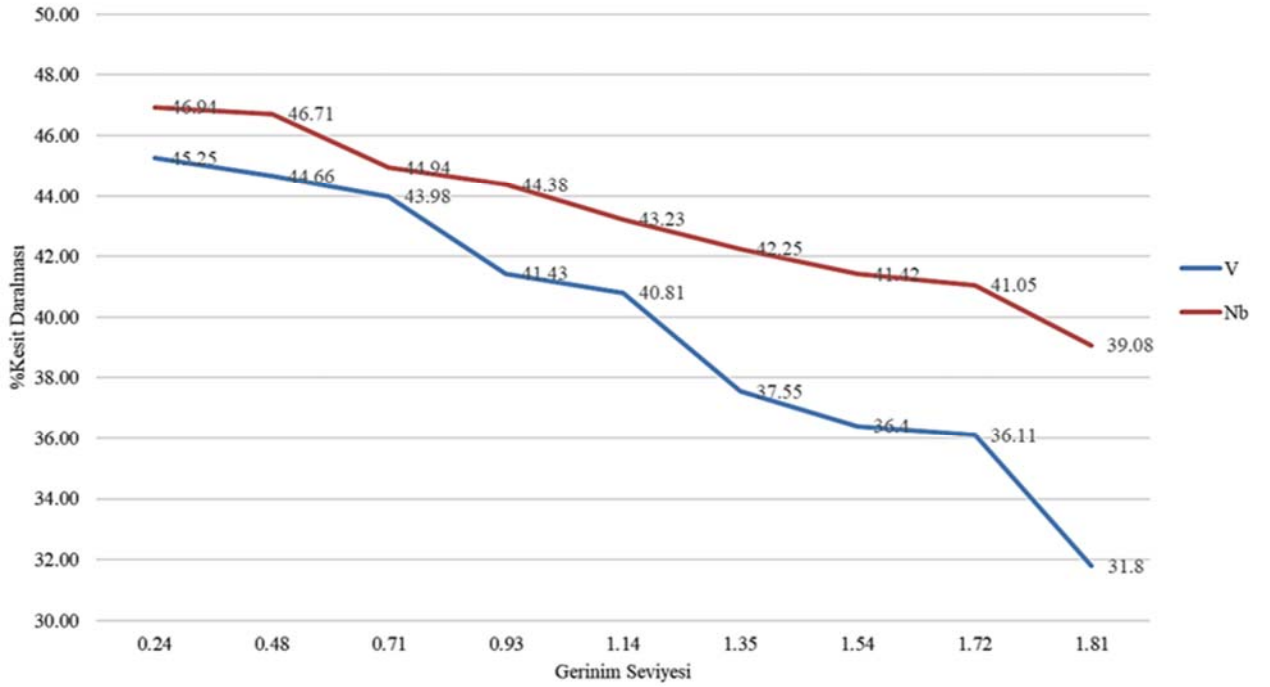
Şekil 18. Sementit lamelleri arası mesafe (Distance between cementite lamella)

Soğuk Çekilmiş Teller Çekme Mukavemeti ve Gerinim Seviyesi



Şekil 19. Soğuk çekilmiş tellerin çekme mukavemetleri ve gerinim seviyesi (Tensile strengths and strain levels of cold-drawn wires)

Soğuk Çekilmiş Teller Kesit Daralması ve Gerinim Seviyesi



Şekil 20. Soğuk çekilmiş tellerin kesit daralması ve gerinim seviyesi (Reduction of area and strain levels of cold-drawn wires)

3.3.2. Kutup Figürlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of pole figures)

Niyobyum ilaveli tel çubuğun kutup figürlerinin değerlendirilmesi sonucunda, tel çubuk aşamasında (önemli bir deformasyon gerçekleşmeden önce) zayıf bir doku yapısı gözlemlenmiştir. Kutup figürlerinde düşük yoğunluklu noktalar dağınık bir şekilde yer almakta olup, maksimum yoğunluk yaklaşık 2.58 seviyesindedir. Bu durum, doku yapısının bu aşamada göreceli olarak rastgele dağıldığını göstermektedir. Bu zayıf başlangıç dokusu, sonraki çekme işlemi sırasında daha iyi şekillendirilebilirlik sağlamaktadır [12].

Vanadyum ilaveli tel çubuğun kutup figürlerinin değerlendirilmesi, Niyobyum ilaveli tel çubuk ile benzer şekilde zayıf bir doku yapısı sergilediğini göstermektedir. Maksimum yoğunluk değeri (~3.02) düşük olup, kutup figürlerindeki noktalar daha yaygın bir dağılım göstermektedir. Belirgin bir tercihli yönelim oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, Vanadyum ilaveli tel çubuğun da bu aşamada yüksek şekillendirilebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir [13].

Niyobyum ve Vanadyum ilaveli tel çubuklar karşılaştırıldığında, her iki mikroalaşım tel çubuğun da zayıf doku yapısına ve düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek şekillendirilebilirlik sağlamaktadır. Bu başlangıç aşamasında iki alaşım elementi arasında önemli bir fark gözlemlenmemekle birlikte, çekme işlemi ilerledikçe doku gelişiminin farklılaştığı görülmektedir.

Niyobyum ilaveli 1. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri değerlendirildiğinde, <100> ve <111> düzlemlerinde orta seviyede doku gelişimi olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum yoğunluk değeri 2.92'ye ulaşmıştır. Kutup figürlerinde yerel yoğunluk noktalarının varlığı, tanelerde bir miktar yönelme olduğunu, ancak doku yapısının hala nispeten zayıf kaldığını göstermektedir. Bu durum, Niyobyum'un mikro yapıyı etkilemeye başladığını, kontrollü bir mukavemet artışı sağlarken şekillendirilebilirliği koruduğunu göstermektedir [14].

Vanadyum ilaveli 1. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri, Niyobyum ilaveli tele kıyasla daha güçlü bir doku gelişimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Maksimum yoğunluk değeri 3.42'ye ulaşmış olup, <111> düzlemi üzerinde belirgin bir doku hizalanması gözlemlenmiştir. Bu durum, Vanadyum'un erken aşamada daha fazla tane yönelimi teşvik edebileceğini göstermektedir. Daha belirgin bir doku yapısı, daha erken deformasyon sertleşmesine yol açarak şekillendirilebilirliği bir miktar azaltabilir.

Niyobyum ve Vanadyum ilaveli 1. blok soğuk çekilmiş teller karşılaştırıldığında, Vanadyum ilaveli tel, özellikle <111> düzleminde daha güçlü bir doku gelişimi göstermektedir. Buna karşın, Niyobyum ilaveli tel daha izotropik bir yapı sergileyerek daha iyi şekillendirilebilirlik sağlamaktadır. Vanadyum, daha belirgin doku gelişimi nedeniyle erken mukavemet artışı sağlayabilir.

Niyobyum ilaveli 5. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri değerlendirildiğinde, <110> ve <111> düzlemlerinde daha güçlü bir doku gelişimi olduğu tespit edilmiştir. Maksimum yoğunluk değeri yaklaşık 5.49'a ulaşarak daha belirgin bir tane yönelmesi gösterilmiştir. Bu doku yapısı, Niyobyum'un belirli tane yönelimlerini stabilize etmeye yardımcı olduğunu ve böylece kontrollü mukavemet artışı sağladığını göstermektedir [15].

Vanadyum ilaveli 5. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri değerlendirildiğinde, maksimum yoğunluk değeri 7.65'e ulaşarak, <110> düzleminde çok daha belirgin bir doku gelişimi gözlemlenmiştir. Bu durum, Vanadyum'un çok daha güçlü bir doku

hizalanmasını teşvik ettiğini ve bunun da daha yüksek çekme mukavemeti sağlarken, artan deformasyon sertleşmesi nedeniyle şekillendirilebilirliği önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Daha yüksek dislokasyon yoğunluğu, malzemenin daha fazla deformasyona karşı dirençli hale gelmesine ve muhtemelen gevrekleşmesine neden olabilir [16].

Niyobyum ve Vanadyum ilaveli 5. blok soğuk çekilmiş teller karşılaştırıldığında, Niyobyum ilaveli tel, daha kontrollü bir doku gelişimi sağladığı için şekillendirilebilirliği korunurken, Vanadyum ilaveli tel, çok daha yüksek dislokasyon yoğunluğu ve doku yoğunluğu göstererek mukavemeti artırmakta ancak deformasyona uğrama kapasitesini azaltmaktadır.

Niyobyum ilaveli 9. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri değerlendirildiğinde, maksimum yoğunluk değeri 7.21'e ulaşmış olup, <110> ve <111> düzlemlerinde iyi gelişmiş bir doku yapısı gözlemlenmiştir. Bu yoğunlaşmış doku yapısı, Niyobyum'un lokalize mukavemet artışını teşvik ettiğini ancak aşırı sertleşmeyi engellediğini göstermektedir. Bu durum, malzemenin şekillendirilebilirliğini bir miktar korunurken daha yüksek çekme mukavemeti elde etmesini sağlamaktadır.

Vanadyum ilaveli 9. blok soğuk çekilmiş telin kutup figürleri değerlendirildiğinde, maksimum yoğunluk değeri 17.46'ya ulaşmıştır. Özellikle <110> düzlemi üzerinde güçlü bir doku gelişimi ve belirgin bir tane hizalanması gözlemlenmiştir. Bu güçlü doku yapısı ve dislokasyon yoğunluğu, çok yüksek çekme mukavemeti sağlamakta ancak şekillendirilebilirlik pahasına gerçekleşmektedir. Bu aşamada, Vanadyum ilaveli tel kırılmağa daha yakın hale gelmiş olup, ileri şekillendirme işlemleri için daha az uygun hale gelmiştir [15].

Niyobyum ve Vanadyum ilaveli 9. blok soğuk çekilmiş teller karşılaştırıldığında, Niyobyum kontrollü doku gelişimini sağlayarak belirli bir şekillendirilebilirlik seviyesini korunurken, Vanadyum çok güçlü bir doku gelişimi teşvik ederek maksimum mukavemeti sağlamış ancak şekillendirilebilirliği minimum seviyeye indirmiştir. Niyobyum ilaveli tel, mukavemet ve süneklik arasında bir denge sağlarken, Vanadyum ilaveli tel yüksek mukavemet sağlamakla birlikte ileri işleme sırasında çatlama riski taşımaktadır [14].

Genel değerlendirme olarak, Niyobyum daha kontrollü bir doku gelişimi sağlayarak mukavemet ve şekillendirilebilirlik arasında denge oluştururken, Vanadyum doku oluşumunu hızlandırarak hızlı çekme mukavemeti artışı sağlamaktadır. Ancak, bu durum şekillendirilebilirlik kaybına neden olarak Vanadyum ilaveli telleri ileri işleme sırasında kırılmağa hale getirebilmektedir. Bu nedenle, Vanadyum ilaveli teller sünekliğin daha az önemli olduğu yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için daha uygun olmaktadır.

3.3.3. Dislokasyon analizlerinin ve wbv (ağırlıklı burgers vektörü) değerlendirilmesi (Evaluation of Dislocation and WBV)

Niyobyum ve Vanadyum ilaveli tel çubuklar karşılaştırıldığında, tel çubuk aşamasındaki WBV (Weighted Burgers Vector) grafikleri, daha sonraki çekme bloklarına kıyasla nispeten daha düşük maksimum yoğunluklar göstermektedir (Niyobyum ilaveli teller için 2.45, Vanadyum ilaveli teller için 3.09). Bu durum, bu aşamada daha düşük genel dislokasyon yoğunluklarına işaret etmektedir. Tel çubuk aşaması, genellikle önemli bir çekme kaynaklı deformasyonun birikmediği erken bir işlem aşaması olduğu için WBV değerlerinin düşük olması beklenmektedir. Bu aşamada hem Niyobyum hem de Vanadyum göreceli olarak ılımlı etkiler sergilemekte olup, Vanadyum'un genel olarak biraz daha yüksek bir dislokasyon yoğunluğu gösterdiği görülmektedir [17].

Niobyum ve Vanadyum ilaveli 1. blok soğuk çekilmiş teller kıyaslandığında, her iki telde de WBV grafikleri orta derecede yoğunluk göstermektedir (maksimum yoğunluk her iki durumda da yaklaşık 2.46). WBV haritalarında hem üst hem de alt yarımkürelerde dağılan yoğunluk noktaları görülmektedir. Her iki durumda da dislokasyonların nispeten homojen bir dağılım gösterdiği, ancak belirli bölgelerde (kırmızı noktalar) dislokasyon yoğunluğunun arttığı tespit edilmiştir. Vanadyum ilaveli telin dislokasyon dağılımının daha yaygın olduğu ancak Niobyum ilaveli tele kıyasla daha az yoğunluk gösterdiği belirlenmiştir. Bu ilk bloklarda elde edilen bulgular, her iki alaşım elementinin de işlem sırasında dislokasyon oluşumunu etkilediğini, ancak dislokasyon dağılımlarının farklılaştığını göstermektedir.

Niobyum ve Vanadyum ilaveli 5. blok soğuk çekilmiş teller kıyaslandığında, WBV grafiklerinde 1. blok ile karşılaştırıldığında önemli bir yoğunluk artışı görülmektedir. Özellikle Vanadyum ilaveli telde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Vanadyum ilaveli telin maksimum WBV değeri 7.65'e ulaşarak çok daha yüksek bir dislokasyon yoğunluğunu göstermektedir. Niobyum ilaveli telde de dislokasyon yoğunluğu artmış olsa da, maksimum değer Vanadyum ilaveli tele kıyasla daha düşük seviyededir. Niobyum ilaveli telde, belirli kristalografik düzlemler içinde dislokasyonları stabilize eden kırmızı noktalar şeklinde yüksek dislokasyon yoğunluğu bölgeleri görülmektedir. Bu süreç, Vanadyum'un tel çekme işlemi sırasında dislokasyon yoğunluğunu artırmada daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, iki alaşım elementinin taneler arası sınır sabitleme veya yeniden kristalleşme davranışındaki farklılıklardan kaynaklanabilir [18].

Niobyum ve Vanadyum ilaveli 9. blok soğuk çekilmiş teller kıyaslandığında, dislokasyon yoğunluğunun arttığı ancak çözümlenmiş 5. blok ile benzer olduğu görülmektedir. Vanadyum ilaveli tel, maksimum WBV değeri 17.46'ya ulaşarak çok yüksek bir dislokasyon yoğunluğunu göstermektedir. Buna karşılık, Niobyum ilaveli telin maksimum yoğunluk değeri yaklaşık 6.89 olup, daha düşük ancak daha lokalize bir dislokasyon yoğunluğu sergilemektedir. 9. bloktaki dislokasyonların gelişimi, Vanadyum'un tel çekme işlemi ilerledikçe dislokasyon birikimini önemli ölçüde teşvik ettiğini, Niobyum'un ise dislokasyon dağılımını daha etkili bir şekilde lokalize edip kontrol ettiğini göstermektedir [17].

4. Sonuçlar (Conclusions)

Niobyum, kontrollü doku (tekstür) oluşumu ve lokalize dislokasyon birikimine katkıda bulunarak mukavemet ve süneklik arasında bir denge sağlar. Dislokasyonların kontrollü gelişimi, aşırı deformasyon sertleşmesini önlemeye yardımcı olur ve bu durum, Niobyum ilaveli tellerin soğuk çekme ve şekillendirme işlemleri sırasında çatlama riski olmadan işlenebilir olmasını sağlar. Ayrıca, sementit lamellerinin incelenmesi, mekanik özelliklerin iyileşmesine katkıda bulunarak telin performansını daha da artırır.

Vanadyum, daha güçlü doku hizalaması ve daha yaygın dislokasyon birikimi sağlayarak daha yüksek çekme mukavemeti kazandırırken, şekillendirilebilirliği (formabiliteyi) azaltır. Daha yaygın dislokasyon dağılımı, erken aşamada gerilim sertleşmesine (strain hardening) yol açarak malzemenin daha fazla deformasyona uğramasını

kısıtlayabilir. Vanadyum ilaveli teller, süneklik ve daha ileri şekillendirme gereksinimlerinin daha az önemli olduğu yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için daha uygundur.

Niobyum'un dislokasyon davranışını ve doku gelişimini kontrol etme rolü, onu hem mukavemet hem de süneklik gerektiren uygulamalar için daha avantajlı bir alaşım elementi haline getirirken, Vanadyum ise daha yüksek mukavemet sağlarken sünekliği daha az önemli olan uygulamalarda tercih edilmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Jaretta D.D., Niobium Micro-Alloyed High Carbon Steel Wires: Innovative Solution for Bridges and Infrastructure, 2015.
2. Tarui J., Takahashi H., Tashiro H., Maruyama N., Nishida S., Microstructure Control and Strengthening of High-carbon Steel Wire, Nippon Steel Technical Report, No. 91, 1-8, Ocak 2005.
3. Jansto S.G., Metallurgical Mechanism and Niobium Effects on Improved Mechanical Properties in High Carbon Steels, HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015, 75-82, 2015.
4. Gladman T., The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, Maney Publishing, London, 2002.
5. Bhadeshia H.K.D.H., Pearlite in Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, 50A (3), 987-1002, 2019.
6. Pickering F.B., Microalloyed Steels: Process, Microstructure, and Properties, International Materials Reviews, 29 (1), 1-24, 1984.
7. Zhao G., Effects of Nb on Pearlite Structure in High Carbon Steel, Journal of Materials Processing Technology, 211 (2), 324-330, 2011.
8. Harris Z.D., Precipitation of Vanadium Carbides in High Carbon Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, 49A (9), 4362-4371, 2018.
9. Ohba H., Tarui T., Sugimoto M., High-Performance Wire Rods Produced with DL Process, Nippon Steel Technical Report, No. 96, 45-52, Temmuz 2007.
10. Yongqing Z., Aimin G., Jansto S.G., Quanli W., Application Research of Nb Microalloying on Medium and High Carbon Long Products, HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015, 225-232, 2015.
11. Ghosh S., Lee Y., Solid Solution Strengthening in Steels, Materials Science and Engineering: A, 743, 350-359, 2019.
12. Li M., Ghosh S., Effects of Microalloying on Steel Phase Transformations, Metallurgical and Materials Transactions A, 48 (6), 2723-2733, 2017.
13. Sahu V.K., Gupta S., Gurao N.P., Effect of Initial Texture on the Evolution of Microstructure and Texture During Rolling of Commercially Pure Titanium at Room and Cryogenic Temperature, Journal of Materials Research and Technology, 9 (4), 8972-8984, 2020.
14. Rajan K., Representations of Texture in Orientation Space, Acta Materialia, 48 (5), 1071-1082, 2000.
15. Yang J.R., Chen Y.W., Rehr J., Hebesberger T., Metallurgical Effects of Niobium in Dual Phase Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 29 (12), 7584-7593, 2020.
16. Sun L.Y., Liu X., Xu X., Lei S.W., Li H.G., Zhai Q.J., Review on Niobium Application in Microalloyed Steel, Metals, 12 (8), 1247-1265, 2022.
17. Stormelli G., Tselikova A., Schmidt R., Vargas B.R.R., Zucca G., Di Schino A., The Effect of Vanadium Micro-Alloying on the Microstructure of Welded Joints in High-Strength Structural Steels, Journal of Materials Research and Technology, 26, 1076-1088, 2023.
18. Sobotka E., Kreyca J., Kahlenberg R., Jacob A., Kozeschnik E., Povoden E., Analysis of Recrystallization Kinetics Concerning the Experimental, Computational, and Empirical Evaluation of Critical Temperatures for Static Recrystallization in Nb, Ti, and V Microalloyed Steels, Materials Science and Engineering: A, 879, 146316, 2023.

