



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Düşük karbonlu yapı çeliklerinde Nb alaşım elementinin mekanik özelliklere etkisinin EBSD ile incelenmesi

Investigation of the effect of Nb alloying element on the mechanical properties of low carbon steel structures using EBSD

Yazar(lar) (Author(s)): Zeynep ERPEK¹, Nil TOPLAN²

ORCID¹: 0000-0002-2093-8501

ORCID²: 0000-0003-4130-0002

To cite to this article: Erpek Z. and Toplan N. “Düşük Karbonlu Yapı Çeliklerinde Nb Alaşım Elementinin Mekanik Özelliklere Etkisinin EBSD ile İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 28(5): 1461-1467, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Erpek Z. ve Toplan N. “Düşük Karbonlu Yapı Çeliklerinde Nb Alaşım Elementinin Mekanik Özelliklere Etkisinin EBSD ile İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 28(5): 1461-1467, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1648120

Düşük Karbonlu Yapı Çeliklerinde Nb Alaşım Elementinin Mekanik Özelliklere Etkisinin EBSD ile İncelenmesi

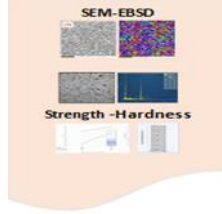
Investigation of the Effect of Nb Alloying Element on the Mechanical Properties of Low Carbon Steel Structures Using EBSD

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Niyobyumun çeliğin mekanik özelliklerine etkisi / The effect of the Nb alloying element on the mechanical properties of steel.
- ❖ Niyobyumun mikroyapı ve tane boyutuna etkisi / The effect of niobium on microstructure and grain size
- ❖ SEM-EBSD analizleri ile tane yapısı, kristalografik özelliklerin incelenmesi / Investigation of grain structure and crystallographic properties by SEM and EBSD analyses

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, düşük karbonlu yapı çeliğinde niyobyum katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkileri EBSD yöntemiyle incelenmiştir. / The present work, the effects of niobium addition on the mechanical behavior of low-carbon structural steel were investigated using the EBSD method.



Şekil. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklerin SEM EBSD Analizleri ve Mekanik Testler /Figure. SEM EBSD Analysis and Mechanical Tests of 0Nb and 12Nb Grade Steels

Amaç (Aim)

Düşük karbonlu yapı çeliğinde niyobyum katkısının mekanik özelliklere etkilerinin EBSD yöntemiyle incelenmesidir. / It is aimed to study the effects of niobium addition on the mechanical properties of low carbon steel structures using the EBSD method

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kimyasal bileşim (%ağ.), akma ve çekme (MPa) ile sertlik (Hv) değerleri ölçülmüş, mikroyapısal incelemeler ise optik mikroskop, SEM ve EBSD ile yapılmıştır. / The chemical composition (%wt.), yield strength, tensile strength (MPa), and hardness (Hv) were measured, and microstructural analysis was performed using optical microscopy, SEM, and EBSD.

Özgünlük (Originality)

Niyobyumun çelikteki mekanik özelliklere etkisi, EBSD yöntemi kullanılarak mikroyapı analizi ile incelenmiştir. / The effect of niobium on the mechanical properties of steel was investigated through microstructure analysis using the EBSD method.

Bulgular (Findings)

Nb katkısının tane boyutunu küçültme yoluyla mukavemeti arttırdığı belirlenmiştir. Mikroyapı, tane yapısı ve kristal yönelimleri EBSD ile analiz edilerek, niyobyumun çelik üzerindeki etkileri açık bir şekilde gözlemlenmiştir. / The results demonstrate that the addition of Nb increases strength by reducing grain size. The microstructure, grain structure, and crystal orientations were analyzed using EBSD, clearly revealing the effects of niobium on the steel.

Sonuç (Conclusion)

Düşük karbonlu yapı çeliğinde Nb katkısı tane boyutunu küçültme yoluyla mukavemetin artmasını sağlamıştır. / The addition of Nb to low carbon structural steel has enhanced the strength by reducing the grain size.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Düşük Karbonlu Yapı Çeliklerinde Nb Alaşım Elementinin Mekanik Özelliklere Etkisinin EBSD ile İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Zeynep ERPEK^{1*,2}, Nil TOPLAN¹

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya

²Çolakoğlu Metalurji, Dilovası Organize San. Böl. 1. Kısım Mah., Göksu Cad. No:16,41455 Dilovası/Kocaeli

(Geliş/Received : 27.02.2025 ; Kabul/Accepted : 14.08.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 24.08.2025)

ÖZ

Çalışma kapsamında; niyobyum katkısız ve maksimum ağ. %0,012 Nb içeriğine sahip çelik numunelerde tane yapısı, kristalografik özellikler, çekme ve sertlik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Numunelerin mikro yapısal özellikleri, optik mikroskop ve yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu sisteme bağlı EBSD (Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu) detektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çeliğin kimyasal bileşimi optik emisyon spektrometresiyle çıkarılmıştır. Çalışmada kullanılan çelikler, alternatif akımlı (AC tip) elektrik ark ocağı ile üretilmiş, pota vakum işlemlerinin ardından slab döküm makinesinde slab haline getirilmiştir. Daha sonra slablar sıcak sac haddehanesinde tav fırınına şarj edilerek hadde sıcaklığına çıkarılmış ve nihai haddeleme sonrası bobin olarak üretilmiştir. Üretilen bobinlerin haddeleme parametreleri sabit tutulmuştur. Özellikle niyobyumun çelikte tane boyutuna etkisi EBSD yöntemi kullanılarak tane sınırı karakterizasyonu, doku analizi ve dislokasyon yoğunluğu dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Nb ilavesinin tane boyutunu küçültmekle birlikte mukavemeti artırdığını ve çeliklerin mekanik performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Literatürde Nb içeren düşük karbonlu çelikler üzerine çeşitli çalışmalar bulunsun da EBSD tekniği ile yapılan detaylı incelemelerin sınırlı olması nedeniyle bu çalışma literatüre önemli katkı sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Düşük karbonlu çelik, Niyobyum (Nb) alaşımlama, EBSD (Elektron geri saçılım difraksiyonu), Tane küçültme mekanizması

Investigation of the Effect of Nb Alloying Element on the Mechanical Properties of Low- Carbon Structural Steels by EBSD

ABSTRACT

This work aims to investigate the relationship between grain structure, crystallographic properties, tensile strength, and hardness in low-carbon structural steels both without niobium (Nb) and with Nb additions up to 0.012 wt.%. The microstructure of the samples was examined through optical microscopy, SEM, and EBSD techniques incorporated within the SEM setup. Additionally, chemical composition analysis of the steel samples was conducted via optical emission spectroscopy. The steel samples were produced as slabs through a slab casting process, following the ladle vacuum treatment conducted with an AC type electric arc furnace. Subsequently, the slabs were placed into the hot sheet rolling mill's annealing furnace, heated to rolling temperatures, and processed into coils after the final rolling stage. The rolling parameters of the produced coils were kept constant. Specifically, to assess the impact of niobium on grain refinement in steel, the grain boundary characteristics, texture analysis, and dislocation density distributions were examined using the EBSD. The results show that Nb increases the yield strength by reducing the grain size and improving the steels' mechanical performance. Although Nb-added low-carbon steels have been the subject of various studies, comprehensive EBSD-based microstructural examinations are few. Therefore, this thesis enhances the understanding of Nb-alloyed low-carbon structural steels by presenting a thorough EBSD-focused study of their crystallographic and mechanical performance.

Keywords: Low-carbon steel, Niobium (Nb) alloying, EBSD (Electron backscatter diffraction), Grain refinement mechanism

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük karbon miktarına sahip çelikler, üstün kaynaklanabilirlik özellikleri sebebiyle farklı mühendislik sahalarında yaygın kullanıma sahiptir. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla mikro-alaşımlama, çelik üretiminde tercih edilen ve etkinliğiyle dikkat çeken yaygın bir yöntemdir ve bu teknik, iyi

kaynaklanabilirlik özelliklerine ilaveten, mekanik olarak yüksek mukavemet ve tokluk avantajlar sunmaktadır. Niyobyum (Nb), mikro-alaşımlı çeliklerde genellikle mukavemet arttırmak için kullanılır. Belirli bir miktarda Niyobyum (Nb) ilavesinin tokluğu düşürmeden mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği bilinmektedir. Niyobyum bu etkisini iki yolla göstermektedir. Birincisi; Niyobyumun Nb karbür (NbC) olarak çökmesi sonucu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : zeynep.erpek@ogr.sakarya.edu.tr

tane sınırı hareketini sınırlayarak tane büyümesini engellemesi, ikincisi; Niyobyumun atom olarak çeliğin yeniden kristalleşmesini geciktirmesi sayılabilir [1]. Mikro alaşımlı çeliklerde mukavemet artışı, çoğunlukla iki temel mekanizmanın etkisiyle sağlanmaktadır. Bunlardan biri dispersiyon sertleştirilmesi, diğeri ise tane boyutunun küçültülmesidir. Dispersiyon sertleştirmesinde, dislokasyon hareketinin engellenmesi yoluyla mukavemet artırılır. Tane inceltme yönteminde, çeliğin tane sınırlarında meydana gelen ikincil faz çökeltileri, üretim aşamasında mukavemetin artmasına yardımcı olur. Bu süreçler neticesinde, çeliğin tokluk ve şekil alabilme özellikleri de belirgin şekilde iyileşir [2]. Nb içeren çeliklerin en önemli avantajlarından biri tane küçültme mekanizmasıdır. Hall-Petch ilişkisine göre, tane boyutundaki küçülme malzemenin akma dayanımını artırır. Burada σ_y akma dayanımı, σ_0 malzemenin içsel dayanımı, k_y tane küçültme katsayısı ve d ise tane boyutudur.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d}$$

Tane inceltme süreci hem çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirirken hem de sünek-gevrek geçiş sıcaklığını düşürmekte etkili bir rol oynamaktadır [3]. Mikro-alaşım elementleri olarak bilinen niyobyum (Nb), titanyum (Ti) ve vanadyum (V), yüksek mukavemetli çeliklerin üretiminde çokça kullanılan bir yöntemdir. Bu elementlerin ana fonksiyonu, katı eriyik sürüklenmesi etkisi ile haddeleme sırasında östenitin yeniden kristalleşmesini engellemektir [1,4-6]. Bu, yeniden kristalleşmenin meydana gelmediği bir aralıkta haddeleme işlemini mümkün kılar ve ince taneli ferrit oluşumuna yardımcı olur. Aynı zamanda, bu elementlerin karbürleri de tane sınırı hareketini engelleyici bir vazife görerek tane irileşmesine engel olur ve yeniden kristalleşmeyi geciktirir [4-6]. Mikro alaşım elementleri içerisinde östenitin statik ve dinamik yeniden kristalleşmesini en fazla geciktiren elementin Nb olduğu literatürde belirlenmiştir [4,7,8]. Zhou ve arkadaşlarının, çelikteki Nb içeriğinin çeliğin yüksek sıcaklık mukavemeti üzerine etkisini araştırdıkları çalışmasında, sırasıyla ağı. %0.005, %0.03, %0.051 ve %0.064 Nb içeren dört farklı çelik kullanılmış ve yaptıkları çekme testlerinde, Nb oranı en düşük olan çelikte, akma mukavemetinin farklı sıcaklıklarda diğer örneklerden daha düşük seviyelerde olduğu saptanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde, genel mikroyapının martenzit-beynit-ferrit karışımı olduğu, farklı boyutlarda (Ti, Nb) (C, N) çökeltilerinin olduğu ve Nb içeriği en yüksek olan çelik numunesinde, en ince taneli mikroyapının olduğu gözlemlenmiştir [9]. Yulong Yang ve arkadaşlarının, Nb'suz ve %0,027 ve %0,048 Nb içeren 3 farklı çelik kullanarak yapmış oldukları çalışmada; Nb içeriğinin artmasıyla tane boyutunun küçüldüğü ve beynit miktarının kademeli olarak arttırdığı belirlenmiştir. Yapılan çekme testlerinde en düşük akma mukavemetinin 452 MPa ile Nb içermeyen kalitede, en yüksek akma mukavemetinin 502 MPa ile %0,048 Nb içeren kalitede olduğu belirlenmiştir [10].

Bu tip çeliklerin mikroyapı analizleri, temel olarak optik mikroskop ve elektron mikroskobu teknikleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Ancak, çeliğin kristal yapısını ve tane sınırlarının ayrıntılı biçimde karakterize edilebilmesi amacıyla Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu (EBSD) tekniği, daha gelişmiş bir yaklaşım sunmaktadır. EBSD yöntemi, çeliklerin mikroyapısal yapısını daha kapsamlı incelemeye olanak verir ve böylece kristal yönelimleri, tane sınırları ve faz yapıları gibi kritik parametreler hakkında kapsamlı bilgi sağlar. EBSD tekniği mikroyapı, texture gibi kristalografik özellikleri analiz etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. EBSD analizleri ile martenzit, ferrit, beynit, granuler beynit vb. gibi yapılar ayırt edilebilmektedir. Özetle; faz tanımlama, faz dağılımı, tane boyutu verileri, sınır karakterizasyonu, doku (kristalografik tercih edilen yönelimin derecesi), yerel gerinim değişimi gibi malzeme özellikleri gelişmiş malzeme karakterizasyon tekniklerinden olan EBSD ile incelenerek mikroyapı ve mekanik özellikler etkileşim ortaya konabilir [10-12].

Deneyisel çalışmada kullanılan çelikler, hurdadan ikincil üretim yöntemiyle elde edilmiştir. Elektrik Ark Fırını (EAF), sadece standart çelik üretiminde değil, aynı zamanda farklı alaşımlı ve özel kalite çeliklerin üretiminde de sıklıkla tercih edilmektedir. Elektrik ark fırını, çeliğin bileşenlerinin özel bir şekilde ayarlanmasını sağlayarak, çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara uygun malzemelerin üretimini mümkün kılar.

Yapılan literatür taramaları, Nb içermeyen ve değişen oranlarda Nb katkılı mikroalaşımlı çeliklerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine çok sayıda araştırmanın yapıldığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmalarda, mikroyapının incelenmesi için genellikle optik mikroskop ve SEM yöntemleri temel analiz teknikleri olarak kullanılmaktadır. Ancak Elektron Geri Saçılma Difraksiyonu (EBSD) yöntemi, çeliklerin kristal yapısını ve mikroyapı özelliklerini daha ayrıntılı biçimde değerlendirmeye olanak vermektedir. EBSD, özellikle kristal yönelimleri (tekstür), tane sınırlarının yapısı ve diğer kristalografik özelliklerin analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Üstelik, bu yöntem sayesinde ferrit, martenzit, beynit ve granüler beynit gibi çeşitli fazlar rahatlıkla tanımlanabilmektedir. Söz konusu çalışmada ise, düşük karbonlu yapı çeliklerine eklenen niyobyumun mekanik özellikler üzerindeki etkisi EBSD yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Optik Emisyon Spektroskopisi Çalışmaları (Optical Emission Spectroscopy Studies)

Deneyisel çalışmalar için DIN EN 10025 standardına uygun yapı çelikleri kullanılmıştır. Bu standartla üretilen çeliklerde izin verilen niyobyum miktarı maksimum %0,05'dir. Numunelerin kodlanmasında alfabetik harfler kullanılmıştır. 0Nb kodu ile verilen çelik Nb katkısız, 12Nb kodu ile verilen çelik ise ağı. %0,012 Nb katkılıdır. Sürekli döküm işlemine kadar, ark ocağından başlayarak

her döküm aşamasında sıvı çelik numunelerinin yüzeyleri zımparalanmıştır ve ardından ARL 4460-978 model optik emisyon spektroskopu (OES) cihazı ile kimyasal bileşim analizi yapılmıştır. Cihazın

kalibrasyonu ve doğrulama işlemleri, döküm işleminden önce gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan çeliklerin kodları ve kimyasal bileşimleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan çeliklerin kodları ve kimyasal bileşimleri (ağ. %) (Codes and Chemical Compositions (wt.%) of the Steels Used in Experimental Studies)

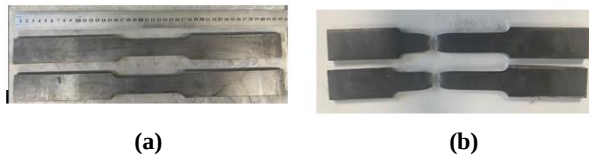
Standart Kalite	Numune Kodu	C	Mn	Si	P	Nb	Cu	Cr+Ni+Mo	Diğer
S 235 JR	0Nb	0,07	0,50	0,02	0,012	0,000	0,225	0,180	0,330
S 235 JR	12Nb	0,06	0,57	0,03	0,011	0,012	0,220	0,180	0,300

Bu kimyasal kompozisyonlarla üretilen 0Nb ve 12Nb kodlu çeliklerin haddeleme işlem parametreleri birbirine benzerdir. Tabloda belirtilen çelikler, haddeleme işleminden önce, 1200°C civarında, 2 saat boyunca yürüyen tabanlı bir ısıtma fırınında homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece Niyobyumun östenit fazında tamamen çözünmesi sağlanmıştır.

2.2. Mekanik Testler (Mechanical Tests)

2.2.1. Çekme testi (Tensile test)

Sıcak haddeleme ile bobin olarak üretilen çeliklerden, mekanik testler için bobinin en son sargısından yaklaşık 3 metre uzunluğunda bir parça kesilmiş ve numune alınmıştır. Bu kesilen parçalar, DIN EN 10002-1 normlarına uygun şekilde, 0,0067 1/s çekme hızında haddeleme yönüne dik olacak şekilde çekme testi için Zwick/Roell Z600 marka cihazda test edilmiştir. Cihazın maksimum yük kapasitesi 600 kN'dir. Çekme testi cihazında, % uzama ölçümleri için bir ekstansometre bulunmaktadır ve test için her bobinden 2 adet numune alınmıştır. Çekme testi numunelerinin kalınlığı 8 mm'dir. Tüm numuneler, bobinlerdeki haddeleme yönüne dik bir şekilde alınarak giyotin makasla kesilmiş ve sonrasında CNC freze ile işleme tabi tutulmuştur. Şekil 2.1'de, oda sıcaklığında gerçekleştirilen S235 JR kalite çelik çekme testi numunelerinin görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. (a). Çekme testi öncesi ve (b). sonrası numunelerin makro görüntüleri, (a) Macro images of the specimens before tensile testing and (b). after tensile testing.)

2.2.2. Sertlik testi (Hardness test)

S235JR kalite çelik numunelerinin Vickers sertlik testleri, Future-Tech marka FM-8138 model cihazda gerçekleştirilmiştir. Testler, 1 kg'lık bir yük altında ortalama 20 s bekletilerek yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinin doğruluğunu sağlamak için, her numunenin kesitinden beş ayrı bölgeden alınan ölçümler kullanılarak ortalama sertlik hesaplanmıştır.

2.3. Mikroyapısal İnceleme (Microstructural Examination)

2.3.1. Optik mikroyapı analizi (Optical microstructure analysis)

S235JR kalite çelik numunelerinin içyapısını incelemek amacıyla optik mikroskop analizleri, Nikon Eclipse

MA200 marka cihaz ve Clemex görüntü analiz sistemi desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemeler için, çekme testi uygulanan numunelerden, haddeleme yönündeki yüzeyler seçilmiş ve sırasıyla numune alma, bakalit ile kaplama, zımparalama, parlatma, dağlama ve mikroskobik analiz işlemleri uygulanmıştır. Dağlama işlemi, mikroyapı fazlarını ortaya çıkarmak amacıyla %2 oranında nitrik asit içeren Nital çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bakalitleme işlemi, Struers CitoPress-1 cihazı ile 180°C'de 6,5 dakikada yapılmıştır. Numune yüzeyleri, sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800 ve 1200 numara silisyum karbür zımpara kağıtları ile Struers TegraPol-21 cihazı ile zımparalanmış, ardından 9-6-3 ve 1µ'luk elmas pasta kullanılarak Struers Tegra Doser-5 cihazında parlatma işlemi yapılmıştır. Son olarak, 0.05 mikron koloidal silika ile parlatma işlemi tamamlanmıştır.

2.3.2. SEM EBSD Analizleri (SEM EBSD analysis)

A Zeiss Gemini Sigma 300 – FEG sistemi ile In-lens, SE, BSE ve EDS detektörleri kullanılarak elektron mikroskopu incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Analiz öncesinde tüm numuneler iletken bakalit ile gömülmüştür. EBSD analizleri için Zeiss Merlin FEG-SEM cihazı tercih edilmiş ve analiz için HKL yazılımı kullanılmıştır. Numunelerdeki tane boyutu ölçümleri ve genel mikroyapı görüntü analizlerinde elektron mikroskopunun In-Lens ve SE görüntüleme modları kullanılmıştır. Mikroyapıda yer alan alaşım elementlerinin ve oluşan fazların tespit edilmesi amacıyla EDS detektörü kullanılmış; elektron geri saçılım difraksiyonu (EBSD) yöntemiyle numunelerdeki kristal yapısal özellikler, alt tane yapısı, tane sınırı özellikleri ve tane yönelimleri incelenmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (Experimental Results and Discussion)

3.1. Mekanik Test Sonuçları (Mechanical test results)

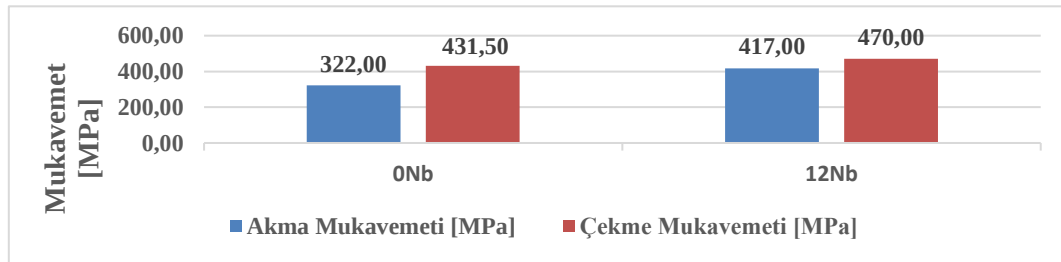
Üretilen S235JR kalite çeliklerine ait çekme testi sonuçları, Şekil 6'da karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Grafikte, Nb içeriğinin artışıyla birlikte akma mukavemetinin 320 MPa'dan 417 MPa'ya yükseldiği, çekme mukavemetinin ise 427-430 MPa aralığından 470 MPa'ya kadar arttığı gözlemlenmektedir. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlar, Nb içeriğinin çeliğin akma mukavemeti ve kopma dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. %0,012 Nb içeren çelik numunelerinin akma dayanımı, Nb içermeyen numunelere kıyasla yaklaşık %20 oranında

artış göstermiştir. Bu durum, Nb katkısının çökeltme sertleşmesi mekanizmasıyla akma ve çekme dayanımlarını artırmasının yanı sıra, dislokasyon hareketini sınırlaması ve mikroyapıyı stabilize etmesiyle ilişkilidir [13-14]. Literatürdeki benzer çalışmalar, Nb katkısının çeliklerin tane küçültme mekanizması aracılığıyla akma mukavemetini artırdığına dair önemli bulgular sunmaktadır. Örneğin, Yang ve arkadaşlarının çalışmasında %0,027 ve 0,048 Nb içeren çeliklerde, Nb oranı arttıkça akma dayanımının yükseldiği, özellikle tane küçültme etkisinin daha belirgin hale geldiği ifade edilmiştir [10]. Zhou ve arkadaşları, Nb miktarındaki artışın çeliğin yüksek sıcaklık çekme ve akma dayanımında önemli iyileşmelere yol açtığını ifade etmiştir. Özellikle, %0,03 Nb içeriği ile çeliğin yüksek sıcaklık dayanım performansının arttığına dikkat çekmişlerdir [9]. Park B.C ve arkadaşlarının çalışmasında, Nb elementinin östenit tane büyümesini nasıl sınırladığı ve NbC'nin tane sınırlarında çökeltmek tane büyümesini nasıl sınırladığı detaylandırılmıştır. Bu çalışmada, Nb katkısının tane sınırlarında çökeltmek yeniden kristallenmeyi geciktirdiği ve bununla çeliklerin mekanik özelliklerine doğrudan katkı sağladığı belirtilmiştir [15]. Mohrbacher ve çalışma arkadaşlarının araştırmasına göre, Nb ilavesinin artırılmasının, düşük karbonlu çeliklerin haddelenmiş hallerinde akma dayanımını artırdığı ve aynı zamanda tokluğu

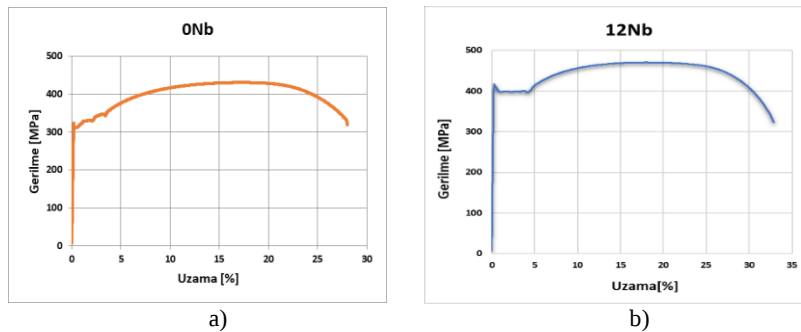
iyileştirdiği gözlemlenmiştir [16]. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çekme testi sonuçları Tablo 2 ve Şekil 2'de; 0Nb ve 12Nb kodlu çeliklere ait Gerilme-Uzama grafikleri ise Şekil 3'de sunulmuştur. Akma ve çekme dayanımlarındaki artışa paralel olarak, uzama değerlerinde de belirgin bir iyileşme görülmüştür. Literatürde, Nb katkılı çeliklerde östenit yeniden kristalleşme sürecinin daha etkili gerçekleştiği ve bunun da sünekliği olumlu etkilediği ifade edilmektedir [17]. Çalışmada mekanik özelliklere Nb katkısının etkisinin belirlenmesi amacıyla üretilen S235JR kalite çeliklerin sertlik ölçümü de gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.3 sertlik testine ait bulguları içermektedir. Sonuçlar Nb içeriğinin sertlik üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Nb içermeyen 0Nb kodlu numunede ortalama sertlik değeri 130 HV1 %0,012 Nb içeren 12Nb kodlu numunede ise ortalama sertlik değeri 145HV1 olarak ölçülmüştür. Burada Nb içermeyen çelik numunesinde mikroyapı ferrit + kaba perlit iken; Nb içeriğinin artmasıyla ferrit+ince perlit ve/veya beynite dönüşmesi sebebiyle sekillendirilebilirlikte iyileşmiştir. Bu sonuçlar, Feng Cai ve arkadaşlarının Nb içeren düşük karbonlu çeliklerde yaptığı çalışmayla uyumludur. Onların çalışmasında, Nb'in çökeltme sertleşmesi mekanizmasıyla dislokasyon hareketini engellediği ve böylece sertliği artırdığı belirtilmiştir [18].

Tablo 2. S235JR kalite çeliklerin çekme testi performans sonuçları (Tensile Test Results of S235 Grade Steels)

Standart Kalite	Numune Kodu	Numune Kalınlığı (mm)	Çekme Yönü	İkmal Sıc. (°C)	Sarılma Sıc. (°C)	Akma mukavemeti MPa	Çekme mukavemeti MPa	% Uzama
S 235 JR	0Nb	8,02	Enine	848,00	610,00	322,00	431,50	27,90
S 235 JR	12Nb	8,02	Enine	860,00	605,00	417,00	470,00	32,85



Şekil 2. S235JR kalite çeliklerin çekme testi performans sonuçları (Tensile Test Results of S235JR Grade Steels)



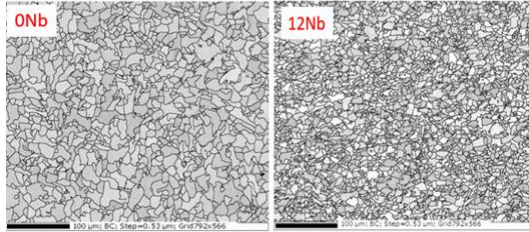
Şekil 3. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklere ait Gerilme-Uzama grafikleri (Stress-Strain Curves of 0Nb and 12Nb Grade Steels)



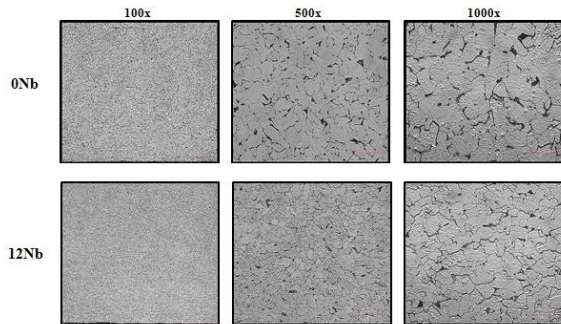
Şekil 4. 0Nb ve 12Nb kalite Çeliklerin sertlik sonuçları (Hardness Results of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

3.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (Microstructure Evaluation Results)

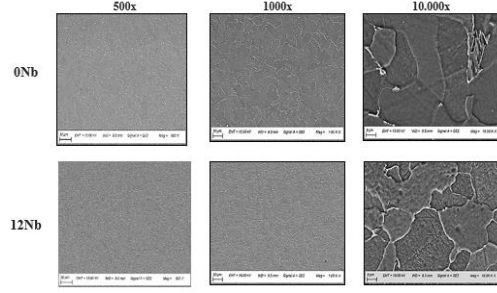
Şekil 5. Nb içermeyen 0Nb kalite ve %0,012 Nb içeren 12 Nb kalite çeliklerin SEM Band kontrast incelemelerine ilişkin görüntüleri göstermektedir. Şekil 6'da; S235 JR stardandına sahip 0Nb ve 12Nb kodlu çeliklerin farklı büyütme oranlarında çekilen optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Mikroyapı analizlerinden özellikle 500 ve 1000X büyültmelerde optik görüntülerde, Nb içeriği daha yüksek olan 12Nb çeliğinin tane yapısı, diğer numuneye kıyasla daha ince tanelerden oluşmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla numunelerin mikroyapısı incelenmiş ve EDS teknikleriyle analiz edilmiştir. Şekil 7'de 0Nb ve 12Nb kalite çeliklere ait 500x, 1000x ve 10.000x büyültmelerde SEM mikroyapı görüntüleri verilmiştir. 12Nb kalite çeliğinde, mikroyapılardan da görüldüğü üzere daha küçük taneli bir yapı ile birlikte, Nb katkılı çeliklerde tane sınırlarında karburlu yapıların varlığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklerin SEM Band kontrast görüntüleri (SEM Band Contrast Images of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

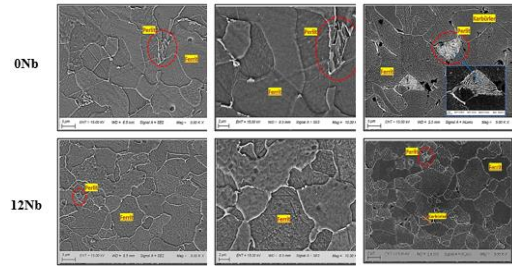


Şekil 6. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklerin karşılaştırmalı Optik Mikroskop Görüntüleri (Comparative Optical Microscopy Images of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

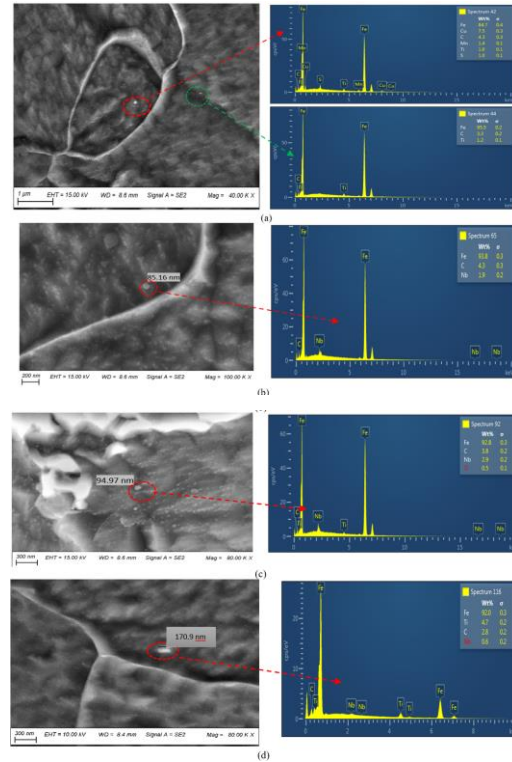


Şekil 7. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklere ait karşılaştırmalı SEM mikroyapı görüntüleri (Comparative SEM Microstructure Images of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

Şekil 8'de 0Nb ve 12Nb kalite çeliklere ait karşılaştırmalı SEM mikroyapı görüntülerinden, Nb katkısız kalite çeliğinin mikroyapısı, büyük ölçüde ferrit ve perlit fazları baskın olarak gözlemlenmektedir. Nb katkılı kalite çeliğinde ise ferrit fazı ile birlikte ince taneli dağılmış karbür yapısının hakim olduğu gözlemlenmektedir.



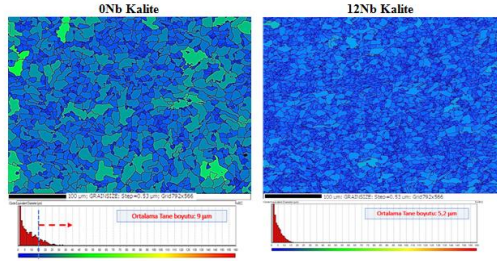
Şekil 8. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklerine ait karşılaştırmalı SEM görüntüleri (Comparative SEM Images of 0Nb and 12Nb Grade Steels)



Şekil 9. 12Nb kalite çeliklere ait SEM-EDS analizleri (SEM-EDS Analysis of 12Nb Grade Steels)

3.2.1 Karşılaştırmalı SEM -EBSD görüntüleri (Comparative SEM-EBSD Images)

Araştırmada, 0Nb ve 12Nb kalitesine sahip çeliklerin tane boyutu EBSD analiziyle ortaya konmuş ve sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.

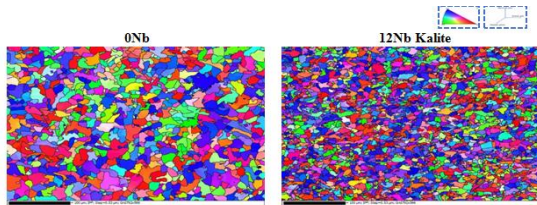


Şekil 10. 0Nb ve 12Nb kalite çeliklere ait karşılaştırmalı tane boyutu dağılımı (Comparative Grain Size Distribution of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

EBSD analizlerinden elde edilen tane boyutu ölçümleri, Nb içeriği arttıkça tane boyutunun küçüldüğünü göstermektedir. Nb içermeyen 0Nb kalite çelikte ortalama tane boyutu 9 µm iken; %0,012Nb içeren 12Nb kalite çeliğinde ortalama tane boyutu 5,2 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlıdır. Özellikle, Webel ve arkadaşlarının çalışmasında, Nb elementinin yüksek sıcaklıkta tane sınırlarında çökerek tane irileşmesini engellediği ve böylece tane boyutunun küçüldüğü belirtilmiştir [4]. Luo ve arkadaşları, Nb içeren çeliklerde tane incelmesinin Hall-Petch ilişkisinden kaynaklanan mukavemet artışına yol açtığını ifade etmişlerdir [19].

3.2.2. Ters kutup figürü (IPF) (Inverse pole figure (IPF))

Şekil 11'de paylaşılan 0Nb ve 12Nb kodlu çelik kalitelerine ait verilen IPF haritalarında, her iki çelikte de belirgin bir tekstür yönelmesi gözlemlenmemiştir.



Şekil 11. 0Nb ve 12Nb kodlu çelik kalitelerine ait IPF haritaları (IPF Maps of 0Nb and 12Nb Grade Steels)

Bu durum, her iki çeliğinde homojen bir kristal yönelim sergilediğini ve belirgin bir tekstür gelişiminin olmadığına işaret etmektedir. Cho, Hyung-Jun ve arkadaşlarının Nb içermeyen ve 0,02 ile 0,078 arasında Nb içeriğine sahip çelikler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada; EBSD IPF haritalarında benzer kristalografik yönelimlerin ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Nb katkısının artması, NbC'nin tane sınırlarında çökmesiyle tane boyutunun büyümesini engelleyerek çeliğin mekanik özelliklerinde iyileşmelere yol açmaktadır. Yüksek Nb içeriğine sahip çeliklerde, daha küçük tane boyutları gözlemlenmiş ve bu da çeliğin akma ve çekme dayanımında belirgin artışlar sağlamıştır. Bu sonuçlar, niyobyumun tane küçültme mekanizması

yoluyla çeliklerin mukavemetini artırdığını ortaya koymaktadır. [20]. NbC gibi nanometrik karburlu çökeltilerin tane sınırlarında "Zener pinning" etkisi yaratarak tane sınırlarının hareketini sınırlandırdığı ve tane boyutunun küçüldüğü, ince taneli yapının, Hall-Petch etkisiyle mukavemeti artırdığı, ayrıca çözülmüş NbC fazlarının çökeltme sertleşirmesi ile de mukavemet artışına destek sağladığı yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [21-23].

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (RESULTS and SUCCESSION)

Çalışmanın sonunda ortaya çıkan önemli veriler aşağıda sunulmaktadır.

- Artan Nb katkısının S235 kalite çeliğin akma, çekme dayanımı ve sertlikte artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu artışta ağırlıklı olarak tane boyutu incemesi ve oluşan karburlu çökeltilerin etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Mikroyapı incelemesi sonucunda yapının büyük ölçüde ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Tane boyut ölçüm sonucunda ortalama tane boyutunun %0,012 Nb artışıyla belirgin şekilde incelendiği (9µm'den 5.2 µm'ye) belirlenmiştir.
- EBSD analizleri, her iki çeliğin de homojen kristal yönelimine sahip olduğunu ve belirgin bir tekstür oluşumu göstermediğini ortaya koymuştur. Bu durum, mikroyapının dengeli bir dağılım sergilediğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak; Nb'nin düşük karbonlu çeliklerin tane boyutuna ve dolayısıyla mekanik özelliklerine etkisini EBSD ile incelemek, çeliğin mikroyapısı, tane yapısını ve kristal yönelimleri doğrudan gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, niyobyum katkısının çelikteki rolü daha net ve kapsamlı biçimde ortaya konabilir. Bu araştırma, Nb katkısının düşük karbonlu çeliklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini EBSD analizleri eşliğinde inceleyen nadir çalışmalardan biridir. Elde edilen bulgular, daha önceki araştırmalarla yüksek derecede uyum içindedir ve Nb katkısının tane boyutunu küçültme mekanizmasıyla mukavemeti artırdığı açıkça ortaya konmuştur. Genel olarak, bu çalışma Nb elementinin çeliklerin mekanik performansını geliştirmedeki etkisini mekanik deneysel sonuçlarla da desteklemektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya sundukları katkılar ve sağladıkları laboratuvar imkanlarından dolayı Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zeynep ERPEK: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz ederek yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Nil TOPLAN: Çalışmanın planlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin gözden geçirilmesi.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Benedito, A. V., et al. "Effects of Niobium Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Microalloyed Steels: A Review." *Buildings*, 14(5), 1462, (2024).
- [2] Altuna, M. A., Iza-Mendia, A., & Gutiérrez, I. "Precipitation of Nb in ferrite after austenite conditioning. Part II: Strengthening contribution in high-strength low-alloy (HSLA) steels." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43, 4571–4586, (2012).
- [3] Liang, G., et al. "Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel." *Journal of Materials Science*, 56, 3995–4005, (2021).
- [4] Webel, J., et al. "Tracing microalloy precipitation in Nb-Ti HSLA steel during austenite conditioning." *Metals*, 10(2), 243, (2020).
- [5] Zhang, Y. C., et al. "Effect of Nb content on the hot deformation behavior of S460ML steel." *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 32, 526–534, (2019).
- [6] Zhang, Y., & Ma, Y. "Research Progress on Titanium–Niobium Micro-Alloyed High-Strength Steel." *Materials*, 18(2), 325, (2025).
- [7] Sanz, L., Pereda, B., & López, B. "Effect of thermomechanical treatment and coiling temperature on the strengthening mechanisms of low carbon steels microalloyed with Nb." *Materials Science and Engineering: A*, 685, 377–390, (2017).
- [8] Liu, X., et al. "Effect of Solution and Precipitation of Nb on Microstructure and Strengthening Mechanism of High-Strength Anti-seismic Rebar." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–13, (2024).
- [9] Zhou, J., et al. "Effect of Nb Content on High-Temperature Strength and Precipitates of Nb-Containing Steel." *Processes*, 11(1), 209, (2023).
- [10] Yang, Y., et al. "Effect of Nb on microstructure and mechanical properties between base metal and high heat input coarse-grain HAZ in a Ti-deoxidized low carbon high strength steel." *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2399–2412, (2022).
- [11] Çolakoğlu Metalurji A.Ş. *EBS D kullanımı iş talimatı*. — (Kurumsal doküman olduğu için dergi/kitap formatı uygulanmadı).
- [12] Kestens, L. A. I., et al. "Texture Observation and Control in Metal Manufacturing: Theory and Practice." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1121(1), (2021).
- [13] Sun, L., et al. "Effect of V–Nb Composite Microalloying on Microstructure and Properties of Non-Quenched and Tempered Forged Steel." *Steel Research International*, 94(8), 2300029, (2023).
- [14] Zhang, N., et al. "Improving strength-toughness of low carbon bainitic microalloyed steel via tailoring isothermal quenching process and niobium microalloying." *Materials Science and Engineering: A*, 901, 146515, (2024).
- [15] Park, B. C., et al. "Effect of Nb on Austenite Grain Growth in 10Cr-3Co-2W Martensitic Heat-Resistant Steel." *Metals and Materials International*, 1–9, (2024).
- [16] Mohrbacher, H. "Metallurgical effects of niobium and molybdenum on heat-affected zone toughness in low-carbon steel." *Applied Sciences*, 9(9), 1847, (2019).
- [17] Lian, S. *Hot ductility of Nb-V microalloyed steels*. (2009).
- [18] Cai, F., et al. "Comparative study of the role of niobium in low-carbon ferritic and bainitic steels." *Materials Science and Engineering: A*, 851, 143579, (2022).
- [19] Luo, L., et al. "Effects of Partially Replacing Mo with Nb on the Microstructure and Properties of High-Strength Low-Alloy Steel during Reverse Austenization." *Metals*, 14(8), 896, (2024).
- [20] Cho, H. J., et al. "Effects of Nb addition on resistance to hydrogen embrittlement in SA 372 steels used for hydrogen-gas storage containers." *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 224–235, (2024).
- [21] Gao, W. L., Leng, Y., Fu, D. F., & Teng, J. "Effects of niobium and heat treatment on microstructure and mechanical properties of low carbon cast steels." *Materials & Design*, 105, 114–123, (2016).
- [22] Nakagawa, Y., Tada, M., Kojima, K., & Nakamaru, H. "Effect of Nb contents on size of ferrite grains and Nb precipitates in ultra-low carbon steel for cans." *ISIJ International*, 56(7), 1262–1267, (2016).
- [23] Tan, F., et al. "Study of austenite grain growth and recrystallization behavior in pipeline steels containing niobium." *Materials Research Express*, 11(10), 106513, (2024).