

# Nano Beynitik Çelikler

Ömer Faruk MURATHAN<sup>a</sup>, Volkan KILIÇLI<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Teknikokullar, Ankara

<sup>b</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06500, Teknikokullar, Ankara

(Geliş / Received : 04.05.2015 ; Kabul / Accepted : 25.06.2015)

## ÖZ

Bu çalışmada, son yıllarda geliştirilen nano beynitik çelikler detaylı literatür araştırması yapılarak incelenmiştir. Fe-C alaşımlarında östenitten beynite dönüşüm ile ilgili araştırmalar artarak devam etmektedir. Sunulan bu çalışmada nano beynitik çeliklerin kimyasal kompozisyonları, üretimi, mikroyapı ve mekanik özellikleri verilerek dönüşüm mekanizmaları incelenmiştir. Nano beynitik çelikler pahalı alaşım elementleri ve mekanik işlemlere gerek kalmadan, yüksek mekanik özelliklerde (dayanım, sertlik, kırılma tokluğu vb.) üretilebilmektedirler. Nano beynitik çelikler, basit ısı işlemlerle düşük maliyetle üretilebilmekte olup, zırh çelikleri ve maryaşlandırma çeliklerine alternatif olmasından dolayı bilim ve endüstride büyük öneme sahiptirler.

**Anahtar Kelimeler:** Beynit, Östemperleme, Karbür İçermeyen Beynit, Nano Beynit, Alt Beynit, Üst Beynit.

# Nano Bainitic Steels

## ABSTRACT

In this study, nano bainitic steels examined which were developed recent years with respect to detailed literature survey. Researches are increasingly continuing related to transformation of austenite to bainite in Fe-C alloys. In the presented study, chemical compositions, production, microstructures and mechanical properties of nano bainitic steels are provided and the transformation mechanisms are also investigated. Nano bainitic steels having higher mechanical properties (strength, hardness, fracture toughness etc.) can be produced by without expensive alloying elements and mechanical treatments. Nano bainitic steels can be obtained by simple heat treatments with low cost. Moreover it is alternative to armor steels and maraging steels hence has great importance of science and industry.

**Keywords:** Bainite, Austempering, Carbide Free Bainite, Nano Bainite, Lower Bainite, Upper Bainite.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ötektoid dönüşüm sıcaklıklarından östenitin perlitte ve martensite dönüşümü sıcaklıkları arasında eşsiz bir mikroyapı oluşmaktadır. Bu ara sıcaklıklarda oluşan yapıyı Davenport ve Bain [1] optik mikroskopla ilk olarak görüntülemişlerdir. Perlit ve martensitten çok farklı olan bu yapı, Edgar C. Bain onuruna meslektaşları tarafından “beynit” olarak adlandırmıştır.

1920’lerin sonlarında östenitin izotermal sıcaklıklarda dönüşümü araştırılırken, martensit ve ince perlit oluşumu bilinmekteydi. 1930 yılında Davenport ve Bain [2] yeni bir mikroyapı keşfetti. Keşfettikleri bu mikroyapı martensit ve perlitte benzememekteydi. Araştırmacılar ilk başta bu yapıyı “asiküler koyu topluluk” (acicular dark aggregate) şeklinde tanımladı. O yıllarda bu mikroyapıya “martensite-troostite” adı verildi. Çünkü bu yapının oluşumu temperlenmiş martensit’te karbür çökmesi ile oluşan yapıya çok benzemektedir [2]. Martensite göre bu yeni yapı daha hızlı dağlanıyordu fakat ince perlitte göre dağlanma hızı düşüktü. Martensit başlama ( $M_s$ ) sıcaklığının hemen üstünde oluşan bu yapının optik mikroskopta martensite göre görünüşü farklıydı. Yapı olağandışı ve gelecek vadeden mekanik

özellikler sergiledi. Temperlenmiş martensitten daha fazla tokluk elde edildi [2]. Bu durum Amerikan Çelik Laboratuvarlarında (United States Steel Corporation Laboratory, Pittsburgh) büyük heyecan uyandırdı.

1934 yılında çalışma arkadaşları bu mikroyapıya Dr. Edgar Collins Bain onuruna “Bainite” adını verdi. Beynit ismi hemen hafızalara ve literatüre yerleşmedi bu sebeple yapılan araştırmalarda ve basılan kitaplarda farklı terminolojiler kullanıldı. Çizelge 1’de beynitin keşfinden itibaren kullanılan adlandırmalar listelenmiştir. 1936 yılında Vilella, Guellich ve Bain [2] beynitik yapıdan “isimsiz, koyu dağlanmış, martensite benzeyen asiküler topluluk” (unnamed, dark etching, acicular aggregate somewhat similar to martensite) şeklinde bahsedilmiştir. 1939 yılında Davenport [2] “hızlı dağlanan asiküler yapı” (a rapid etching acicular structure) şeklinde ifade etmiştir. 1940 yılında Greninger ve Trouin [2] “östemperlenmiş yapılar” şeklinde ifade etmişlerdir. 1942’de basılan ve 1947’de yeni baskısı basılan Gregory ve Simmons kitaplarında “beynit” ifadesine hiç yer vermemişlerdir. Üst mesafe ve alt mesafe olarak sınıflandırılan beynitik yapılar 1939 yılında Mehl [2] tarafından “üst beynit” ve “alt beynit” olarak adlandırılmıştır ve günümüzde halen bu terimler kullanılmaktadır. 1942 yılında Smith ve Mehl [2] yüksek sıcaklıkta tane sınırlarında plaka demetleri şeklinde fazlaca oluşan üst beynit’e “tüy şeklinde beynit”

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta:vkilicli@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.2 115-128

Çizelge 1. İlk araştırmalarda beynit için kullanılan farklı adlandırmalar [2] (Table 1. Different terms of bainite used in early researches)

No	Beynit keşfedildiğinde kullanılan adlandırmalar	İsmlendirenler (Yıl)
1	Unnamed, dark etching, acicular aggregate somewhat similar to martensite (İsimsiz, koyu dağlanmış, martensite benzeyen asiküler topluluk)	Vilella, Guellich ve Bain (1936)
2	A rapid etching acicular structure (Hızlı dağlanan iğnemi yapı)	Davenport (1939)
3	Austempered structures (Östemperlenmiş yapılar)	Greninger ve Trouin (1940)
4	Feathery bainite (Üst Beynit)	Smith ve Mehl (1942)
5	High Range Bainite (Üst Beynit)	Bain ve Davenport (1937)
6	Low Range Bainite (Alt Beynit)	Bain ve Davenport (1937)

(feathery bainite) tanımladı. Ancak bu tanım sık olarak kullanılmadı.

Çeliklerde beynit'in keşfinden yaklaşık 70 yıl sonra Bhadeshia ve arkadaşları [2] düşük sıcaklıklarda uzun süre izotermal bekletme sonucu oluşan "nano beynit" terimini ortaya attılar. Nano beynitik çelikler çok yüksek mekanik özellikler sergilemesi (2000-2500 MPa çekme dayanımı) nedeniyle ileri yüksek dayanımlı çelikler (advanced high strength steel-AHSS) sınıfında yer almaktadır. Nano beynitik çeliklerde dönüşüm mekanizmasının anlaşılması ve mekanik özelliklerin izotermal ısı işlemlerle geliştirilebiliyor olması bu çelikleri araştırmacılar için cazip kılmaktadır.

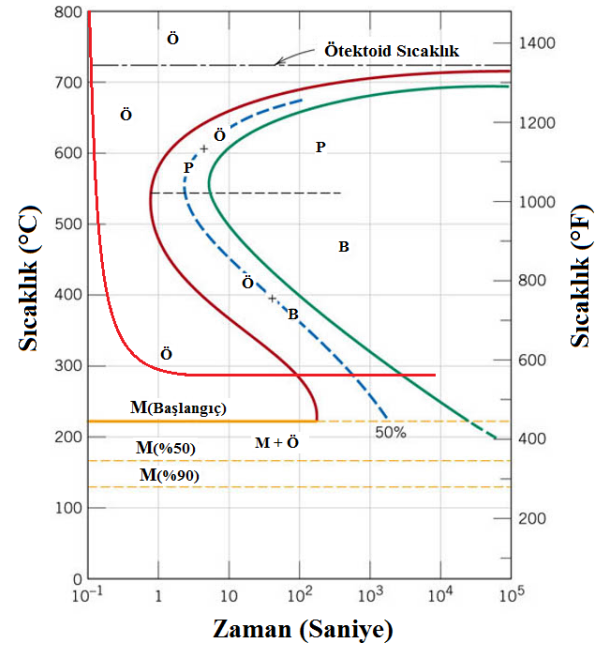
Bu çalışmada, beynitik dönüşüm ve son beş yılda üzerinde yoğun bilimsel araştırmalar yapılan nano beynitik çelikler ile ilgili detaylı literatür incelemesi yapılmış olup bu çeliklerin kimyasal kompozisyonu, üretimi, mikroyapı ve mekanik özellikleri geniş bir şekilde anlatılmaya çalışılmıştır.

## 2. BEYNİT (BAINITE)

Beynit tanım olarak, ferrit ve lamelli olmayan sementitin ( $Fe_3C$ ) karışımından oluşan oldukça tok ve sünek bir yapıdır [4]. Beynit, perlit burnunun altında izotermal sıcaklıkta östenitin dönüşümü sonucu oluşan bir yapıdır. Östenitin bozunması sırasında soğuma difüzyon kontrollüdür ve bu esnada perlitin oluşmasına imkân yoktur. Ayrıca soğuma yeterli miktarda yavaş olduğu için martensit oluşumunu da engellemektedir [5]. Şekil 1.'de verilen Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Time-Temperature-Transformation-TTT) diyagramında perlit ve martensit oluşum sıcaklıkları arasında beynit oluşumu için gerekli olan soğutma ve izotermal bekleme koşulları görülmektedir [1].

### 2.1. Östenitten Beynite Dönüşüm (Transformation of Austenite to Bainite)

Östenitin beynite dönüşümü ferrit çekirdeklenmesinin iki farklı şekilde olduğuna dair bilimsel alanda görüş farklılıkları vardır. Görüşlerden biri, ilk oluşmuş ferrit difüzyonsuz kayma (diffusionless shear) veya martensit dönüşümü ile oluşmaktadır. Diğer görüş ise ilk oluşmuş ferrit çıkıntı tipinde (ledge-type) çekirdeklenir ve büyür bu esnada kısa mesafeli demir atomu ferrit östenit çıkıntıları arasında yeniden düzenlenir [1].



Şekil 1. Ötektoid çelikte zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramında beynitik dönüşümün şematik gösterimi [6] (Figure 1. Schematically representation of bainite transformation on TTT diagram of eutectoid steel)

Fakat düşük sıcaklıklarda beynit oluşumu sırasında demir atomlarının difüzyonu sınırlandırılmaktadır. Alaşım elementlerinin beynit başlangıç sıcaklığını ( $B_s$ ) önemli ölçüde etkilediği ampirik formül ile gösterilmiştir. Çeliklerin ısı işleminde beynitik dönüşüm büyük önem arz etmektedir. Alaşım çeliklerinde perlit ve beynitik dönüşümler birbirinden ayrılmaktadır. Bu durum TTT diyagramında körfez bölgesi (bay region) oluşumuna neden olmaktadır. Alaşım elementleri ferrit veya ferrit-östenit ara yüzeylerini ayırarak beynitik ferrit oluşumunu yavaşlatmaktadır.

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de beynit başlangıç sıcaklığının ( $B_s$ ) alaşım elementlerine bağlı ampirik formülü verilmiştir [1]. Karbon östenit içinde yüksek çözünürlüğe sahiptir ve güçlü bir östenit dengeleyicidir ve bu da reaksiyon kinetiğini yavaşlatmaktadır. Çelikte bulunan en son mikroyapıda karbon miktarının artması ile karbürlerinde arttığı tespit edilmiştir [7].

Sertleştirilebilir ve düşük alaşımlı 0,1 - 0,55 % C içeren çelikler için;

$$B_s(^{\circ}C) = 830 - 270 C - 90 Mn - 37 Ni - 70 Cr - 83 Mo \quad E\text{ş.1}$$

Düşük karbonlu ve alaşımlı 0,15 - 0,29 % C içeren çelikler için;

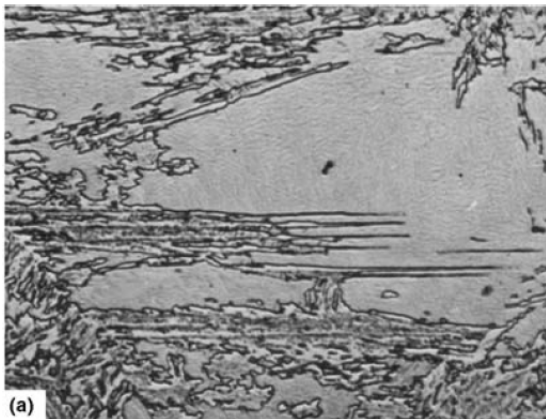
$$B_s(^{\circ}C) = 844 - 597 C - 63 Mn - 16 Ni - 78 Cr \quad E\text{ş.2}$$

## 2.2. Beynit'in Türleri (Types of Bainite)

### 2.1.1. Üst Beynit (Upper Bainite)

Ötektoid çeliklerde üst beynit (350°C - 550°C) arasında izotermal ısıl işlem sonucu elde edilmektedir [3,7]. Şekil 2'de üst beynitin optik mikroskopta gözlenen tipik mikroyapısı verilmiştir. Üst beynit kalınlığı 0,2 µm ve uzunlukları yaklaşık 10 µm olan ince ferrit plakalarından oluşmaktadır. Plakalar kümeler halinde oluşmaktadır ve bu yapı demet olarak bilinmektedir. Her bir demette plakalar birbirine paraleldir ve her bir plakanın kendine has kristal dizilimi vardır. Demet içerisinde ayrı bulunan plakalara beynitin alt birimi olarak adlandırılır. Beynit alt birimleri genellikle sementit parçacıkları veya düşük düzensiz sınırlar tarafından ayrılır.

Üst beynit birbirinden farklı iki aşamada oluşur. İlk aşamada, karbon çözünürlüğünün çok düşük olduğu (ağırlıkça % 0,02) beynitik ferrit oluşur. Ferrit oluşuktan sonra kalan östenit karbonca zenginleşir ve sonunda sementit parçacıkları geri kalan östenit katmanlarındaki

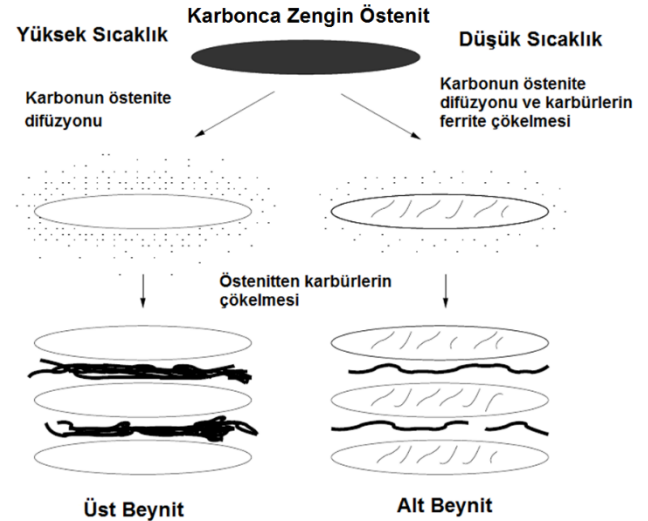


Şekil 2. AISI 4360 çeliğinde üst beynitin mikroyapısı; a) 495°C ve b) 410°C'de izotermal dönüşüm X750, Dağlama: Pikral [1] (Figure 2. The microstructure of upper bainite in AISI 4360 steel isothermally transformed at a) 495°C and b) 410°C, X750, Etchant: Picral [1])

ferrit alt birimlerine çöklerler. Sementit miktarı alaşımdaki karbon miktarına bağlıdır. Yüksek karbon miktarı ile oluşan sementit tabakaları artar. Yeterli miktarda alaşım elementleri eklenmesi sonucu (Si veya Al gibi), çelik içerisinde sementit oluşumu baskılanmaktadır.

Şekil 3'de alt ve üst beynitin karbonca zengin östenitten dönüşümü şematik olarak verilmiştir. Düşük izotermal sıcaklıklarda ferrit içerisinde ince karbürler çöklerken yüksek izotermal sıcaklıklarda ferrit içerisinde karbür gözlenmez. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında üst beynit oluşmaktadır. İlk aşamada oluşan beynitik ferrit karbonca fakirdir. Ferrit oluşumu tamamlandıktan sonra karbon dönüşmemiş östenite difüze olur ve östenit karbonca zenginleşir ve karbür oluşturur. Karbürler ferrit

katmanları arasında çökler. Düşük östemperleme sıcaklıklarında alt beynit oluşmaktadır. Her iki yapı arasındaki büyük ayırım, üst beynitten farklı olarak alt beynitte sementit parçacıklarının ferrit içine çökelmiş olmasıdır.

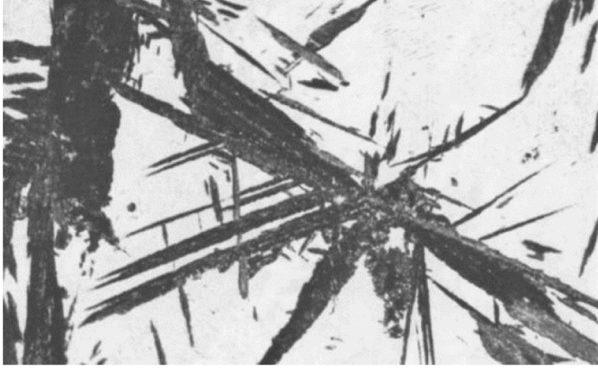


Şekil 3. Alt ve üst beynitik dönüşümün şematik gösterimi [2] (Figure 3. Schematically representation of lower and upper bainitic transformation)



### 2.1.2. Alt Beynit (Lower Bainite)

Ötektoid çelikte 250°C - 350°C'ler arasında izotermal bekleme sonucu oluşan alt beynit mikroyapısı ve kristalografik olarak üst beynite çok benzemektedir. Her iki yapı arasındaki büyük ayırım, üst beynitten farklı olarak alt beynitte sementit parçacıkları ferrit içine çökelmiş olmasıdır. Bu nedenle iki farklı sementit çökmesi olmaktadır, beynitik ferrit plakalarını ayıran; karbonca zengin östenitten çökelen sementit ve aşırı doymuş ferritten çökelen sementit olarak çökler [7]. Şekil 4'te Optik mikroskopta gözlenen alt beynitin tipik mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 4. AISI 4360 çeliğinde 300°C'de izotermal dönüşüm sonrası alt beynitin mikroyapısı, X750, Dağlama: Pikral [1] (Figure 4. The microstructure of lower bainite in AISI 4360 steel isothermally transformed at 300°C, X750, Etchant: Picral)

Ferrit içerisinde oluşan karbürler her zaman sementit olmak zorunda değildir, kimyasal kompozisyon ve dönüşüm sıcaklıkları etki etmektedir. Örnek olarak silisyumca zengin ( $Si > \%1,5$  ağırlıkça) yüksek karbonlu çeliklerde sementit çökmesi yüksek silisyumdan dolayı yavaşlamaktadır bu nedenle beynitik ferrit içinde epsilon karbür sıklıkla çökelebilmektedir.

Alt beynitteki karbürler aşırı incedirler, sadece birkaç nanometre kalınlığında ve yaklaşık 500nm uzunluğundadırlar. Üst beynitik mikroyapı ile kıyaslandığında, daha az ve daha ince sementit parçacıkları ferrit plakaları arasında çöker. Sonuç olarak alt beynitik mikroyapı, üst beynitik mikroyapıya göre daha fazla tokluk sergilemektedir. Bunun nedeni; üst beynitteki kaba sementit parçacıkları yarılma (cleavage) çatlakları ve mikro boşluklara (micro voids) neden olmaktadır [7].

## 2.2. Beyniti Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Bainite)

Çeliklerde beynitik yapılar, geniş çapta dayanım ve süneklik sunmaktadırlar. Yüksek karbonlu alt beynitik mikroyapıya sahip bir çelik; 1400 MPa çekme dayanımına ve 55 HRC sertliğe ulaşabilmektedir. Bu dayanımlar, ince ferrit plakalarına, yüksek dislokasyon yoğunluğuna ve ince sementit dağılımları ile elde edilir.

Dönüşüm sıcaklığı düştükçe, beynitik ferrit daha ince karbür dağılımına sahip olur. Bu durumda beynitik ferrit daha yüksek sertlik ve dayanım sağlamaktadır. Su verilmiş ve temperlenmiş çelikler ile kıyaslandığında, östemperlenmiş çelikler benzer sertlik ancak daha yüksek tokluk sergilemektedir (Çizelge 2). Su verme sonrası oluşan martensit oldukça sert ve kırılmandır. Bu nedenle su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin tokluğu östemperlenmiş çeliklere göre oldukça düşüktür (Çizelge 2).

Beynitik çeliğin mikroyapısı, çeliğin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Araştırmacılar [1-4,6,7], üst beynitik mikroyapıya sahip bir çeliğin alt beynitik çelik ile kıyaslandığında daha düşük tokluk ve sünekliğe sahip olduğunu bildirmektedir [1].

## 2.3. Ticari Beyniti Alaşımlar (Commercial Bainitic Alloys)

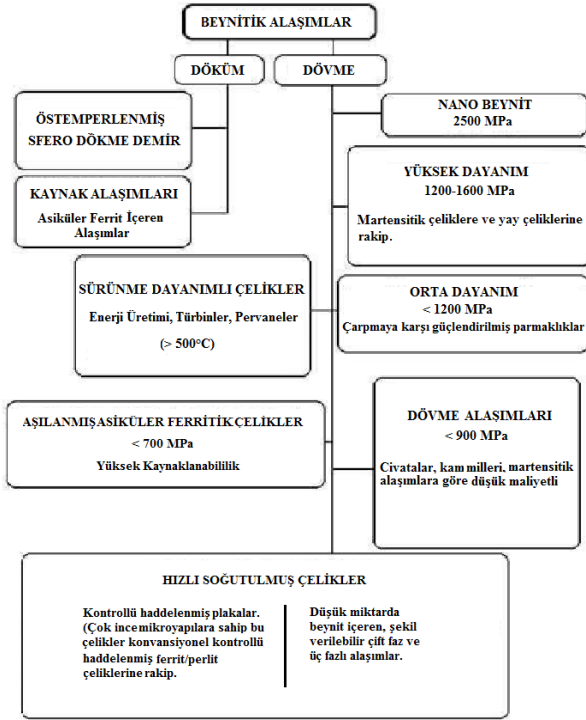
Ticari olarak kullanılan beynitik alaşımlar Şekil 5'te gösterilmiştir [7]. Çok yüksek dayanıma sahip çeliklerde (Ultra High Strength Steels) beynitik ferrit, martensit ve kalıntı östenit bulunmaktadır. Yüksek dayanımlı bu çeliklerin yapısında bulunan Mn, Cr ve Ni bu çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmaktadır. Yapıda bulunan yüksek Si ( $Si > \%1,5$ ) sementit çökmesini engellemektedir. Yüksek dayanıma sahip çeliklerde kirlilik (impurity) ve çökelti (inclusion) oldukça düşüktür. Bu sebeple sementit oluşumu için bir engel bulunmamaktadır.

Orta dayanıma sahip çelikler benzer mikroyapıya sahip olup, alaşım elementleri oranı bir miktar düşüktür. Otomobil endüstrisinde kullanılan bu çelikler, çarpmaya karşı güçlendirilmiş parçaların yapımında kullanılmaktadır [7].

Benzer şekilde, beynitik dövme alaşımlar otomobil sektöründe kam milleri yapımında kullanılmaktadır. Sürünme dayanımlı çelikler 1940'lı yılların başından itibaren enerji jeneratörlerinde kullanılmaktadır. Cr, Mo içeren bu çeliklerin sertliği yüksektir. İçerisindeki alaşım elementleri ve ısı işlemlerle karbürler çökelmektedir. Bu karbürler sürünme dayanımını arttırmaktadır. Asiküler ferrit içeren çelikler yüksek kaynaklanabilirliğe sahip olup petrol boru hatlarında ve olumsuz hava şartlarında kullanılmaktadır. Haddeme sonrası hızlı soğutulan beynitik çelikler, iyi şekillendirilebilirliğe sahiptir [7].

Çizelge 2. Farklı ısı işlemler uygulanmış AISI 1095 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [8] (Table 2. Mechanical properties of heat treated AISI 1095 steel)

Isıl İşlem	Sertlik (Rockwell C)	Tokluk (J)	Toplam Uzama (%)
Su verme + temperleme	53,3	16,43	0
Su verme + temperleme	52,5	19,17	0
Martemperleme	53,0	31,50	0
Martemperleme	52,8	32,87	0
Östemperleme	52,0	61,64	11
Östemperleme	52,5	54,79	8



Şekil 5. Ticari olarak kullanılan beynitik alaşımlar [7] (Figure 5. Commercially used bainitic alloys)

### 3. NANO BEYİNİT (NANO BAINITE)

Karbonca zengin östenitik matriste 20-40 nm kalınlığında çok ince beynitik ferrit plakalarından oluşan

beynitik çelik elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, beynit oluşumu, dönüşüm sıcaklığı minimum 125°C 'de yüksek karbon ve yüksek silisyum içeren bir çelikte ele edilmiştir. Oluşan beynit tabakaları çok ince yapıda olmakla beraber yüksek dayanım ve kabul edilebilir bir süneklik göstermektedir. Oluşan aşırı ince beynit yapısı maryaşlandırma çelikleri ile kıyaslandığında 19 kat daha düşük maliyetli olması ve benzer oranlarda tokluk ve dayanım göstermesi dikkat çekmektedir [5].

Bhadeshia [11], 2005 yılında yapmış olduğu bir çalışmada "Bulk nano crystalline steel" başlığı altında nano beynitik çelik elde ettiğini ve bu yapıdan aynı zamanda "hard bainite" olarak bahsetmiştir. Yaptığı bu çalışmada, östenitin kısmi dönüşümü sırasında karbon nanotüpler ile kıyaslanacak kadar ince ferrit plakaları mikroyapıda görülmüştür. Yapının bu kadar ince olması sıra dışı dayanım, sertlik ve tokluk sağlamaktadır. Pahalı alaşım elementleri ve mekanik işlemler gerektirmeden 2500 MPa çekme dayanımı, %5-30 uzaman 30-40 MPa.m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu ve 700 HV sertlik basit bir ısıl işlem çevrimi ile (950°C östenitleme sonrası 200°C 10 gün izotermal bekleme) elde edilmiştir [11].

Çizelge 3'te, literatür çalışmalarında kullanılan nano beynit terimleri, tanımları ve yazarlar verilmiştir. Tablodan görülebileceği üzere, literatürde nano beynit ile ilgili bir terim karmaşası varmış gibi görünse de, karbür içermeyen beynit, sert beynit, süper beynit, nano kristal çelik ve nanobain gibi terimler "nano boyuttaki yüksek karbonlu östenit ve beynitik ferrit plakalarından" oluşan "nano beyniti" ifade etmektedir.

Çizelge 3. Nano beynit için kullanılan terimler (Table 3. The terms used for nano bainite)

No	Terim	Tanım	Kaynak
1	"Düşük Sıcaklıkta Oluşan Yüksek Tokluğa Sahip Beynit"	Beynitik ferrit, karbonca zengin kalıntı östenit ve bir miktar martensit içeren çelik.	5
2	"Yüksek Dayanımlı Beynitik Çelik"	Karbür içermeyen beynitik çelik	13
3	"Sert Beynit"	20 nm kalınlığında uzun ince ferrit kristallerine sahip beynit	14
4	"Nano Beynitik Çelikler"	Çok ince beynitik ferrit çitaları (~50 nm) arasında bulunan kalıntı östenit filmleri	15
5	"Östemperlenmiş Silisyum Alaşımli Çelik"	Beynitik ferrit ve kalıntı östenit (ösferrit) içeren çift fazlı çelik	16
6	"Nano Beynit" "Nano Metal"	Isıl işlem ile yüksek yoğunluklu ara yüze sahip demir alaşımlarında, karbonca zengin östenitin içine gömülü olan çok ince plakalara sahip beynitik ferrit (20-40 nm)	17
7	"Nano Kristal Çelik"	Alt beynitik ferrit ve karbonca zengin kalıntı östenite sahip çelik	18
8	"Karbür İçermeyen Beynitik Çelikler"	Dönüşmemiş ince kalıntı östenit filmlerinde iç içe bulunan ferrit çitalarına sahip çelik	19
9	"Gelişmiş Beynitik Çelikler" "Nanobain"	20-40 nm kalınlığında ince kristal ferritli çelik	20
10	"Maryaşlandırma Çelikleri ile Kıyaslanabilir Yeni Geliştirilmiş Beynitik Çelik"	İnce plakalara sahip karbür içermeyen beynitik ferrit ve ince film şeklinde kalıntı östenit'e sahip beynit	21
11	"Süper Beynit"	Karbür içermeyen, aşırı ince beynitik yapıya yüksek miktarda kalıntı östenite sahip yapı	22

yapılar "nano beynit" olarak adlandırılmaktadır. Nano beynitik çelikler mukavim, sünek ve hatta kabul edilebilir tokluk değerlerine sahip olabilmektedirler. [9, 10]. Düşük sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek kadar yüksek tokluk değerleri vermesi dikkat çekmektedir [9].

2002 yılında Bhadeshia ve Caballero [5] "Very strong low temperature bainite" başlıklı çalışmalarında nano

Yüksek tokluğa sahip, büyük ve geniş boyutlarda malzemelere sahip olabilmek için mekanik işlemler veya hızlı soğutmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özelliklere sahip malzemeler için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

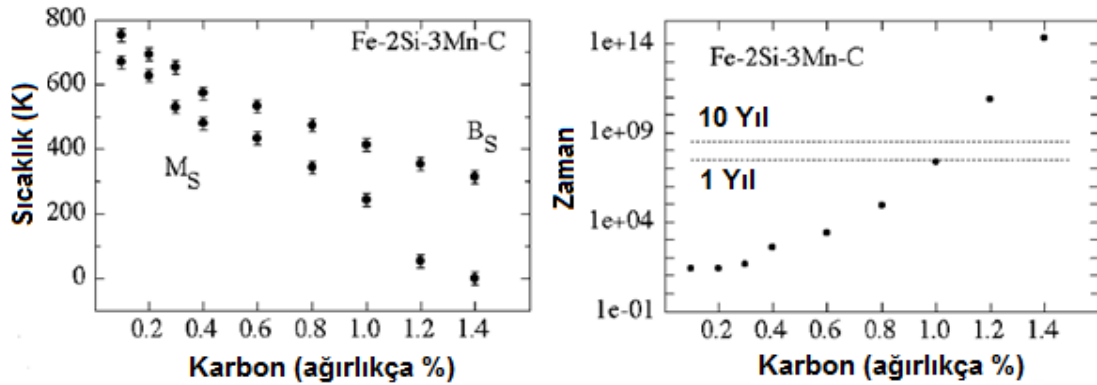
- Dayanım için, yüksek yoğunlukta hatalar bulunmalıdır. Örnek olarak tane sınırları ve dislokasyonlar gibi. Fakat

malzemenin şekli sınırlandırılmamışsa bu hatalar deformasyon ile oluşmamalıdır.

- Hatalar faz dönüşümleri ile oluşturulabilir. Fakat bu hataları gidermek için faz dönüşümü gerekmektedir ki buda aşırı soğuma gerektirmektedir (fazla serbest enerji değişimi).

Karbür içermeyen beynite dönüşen çelikler yukarıdaki şartları sağlamaktadırlar. Beynit ve martensit oluşumu östenitin yer değiştirme mekanizması (displacive) ile oluşur [11]. Dönüşüm sırasında çözünen alaşım elementleri hapsolür ve yüksek gerinim söz konusudur. Bu sebeple dönüşüm ısısı düşmektedir. Bağımsız plakaların oluşumu her iki dönüşümde de hızlıdır fakat martensite nazaran beynit oluşumu sırasında genel reaksiyon hızı daha küçüktür. Bunun nedeni beynit oluşumu sırasında dönüşüm alt birim mekanizması ile yayılır, yayılım hızı çekirdeklenme tarafında kontrol edilir ve bu da yeniden ısınmayı tetikler [9].

Karbür içermeyen beynit oluşumu için alt sıcaklık limiti bulunmamaktadır. Hatta oda sıcaklığında bile beynit elde edilebilir, fakat bunun için binlerce yıl gerekmektedir. Pratik açıdan 10 günlük bir süre kabul edilebilir (Şekil 6). Dönüşüm sıcaklığı düştükçe beynit plaka kalınlığı düşmektedir ve buda mekanik özellikleri arttırmaktadır. Karbonca zengin östenitte dağılan beynitik ferrit plakaları 20-40 nm kalınlığında olup çatlak ilerlemesini engellemektedirler. Oluşan bu yapı nano beynit olarak adlandırılmaktadır [14].



Şekil 6. a) Fe-2Si-3Mn çeliği için karbon miktarına bağlı olarak hesaplanmış dönüşüm sıcaklıkları b) Beynitik dönüşümün başlaması için hesaplanmış zaman grafiği [9] (Figure 6. (a) Calculated transformation start temperatures in Fe-2Si-3Mn steel as a function of the carbon concentration. (b) The calculated time required to initiate bainite)

Nano beynitik çeliklerde, beynit oluşumu çıta şeklinde olan alt beynitten oluşmaktadır. Yapıda birbirine paralel ve çıta şeklinde bulunan ferrit daha yüksek darbe tokluğuna sahip olup, taneli beynit içinde bulunan eş eksenli ferrit ve birbirinden ayrı adacıklar şeklinde martensit ve östenitli mikroyapıya göre daha yüksek olduğu görülmüştür [15].

### 3.1. Kimyasal Kompozisyon (Chemical Composition)

Nano beynitik çelik üretmek için, çelik içerisinde C (0,7 – 1,00 %) , Mn (0,77 – 2,00 %) , Si (1,5 – 3,00 %) ve Cr (0,9 – 1,50) bulunması gerekmektedir. Çelik içerisindeki Si miktarı, nano beynitik çeliklerin mekanik özelliklerini

etkilemektedir. İçerisinde ağırlıkça %1,5'tan daha fazla silisyum içeren çeliklerde izotermal bekleme sırasında sementit çökmesi baskılanır ve bu sebeple karbür çökmesi neredeyse hiç gözlenmez [1-2, 7, 23-34]. Çelik içerisindeki silisyum miktarı östenit içindeki karbon miktarının zenginleştirilmesinde de rol oynamaktadır.

Çizelge 4'te literatürde nano beynitik mikroyapı elde edilen çeliklerin kimyasal kompozisyon aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4. Araştırmalarda kullanılan nano beynitik çeliklerin kimyasal kompozisyonları (Table 4. Chemical compositions of nano bainitic steels which were used in researches)

Alaşım Elementi	Miktar (ağırlıkça %)
C	0,7 - 1,00
Mn	0,77 - 2,00
Si	1,5 - 3,00
Cr	0,9 - 1,50
Mo	0,25 - 1,48
Al	0,03 - 0,97
Co	1,37 - 1,60
V	0,09

### 3.1.1. Alaşım elementlerinin etkisi (Effect of Alloying Elements)

Yüksek miktarda Si ve C içeren nano beynitik çeliklerde, beynit plaka kalınlığı ve kalıntı östenitin miktarı akma dayanımını etkilediği tespit edilmiştir. Yüksek karbonlu

kalıntı östenit miktarındaki artış, sünekliği de arttırmaktadır. Yapıda bulunan Si, aşınma direncini standart nano beynitik bir çeliğe göre arttırdığı tespit edilmiştir [35].

Belirli bir miktarda Si bulunması karbür ( $Fe_3C$ ) çökmesini engelleyerek mekanik özellikleri geliştirmektedir. Çelikte bir miktar Cr bulunması malzemenin sertliğini arttırmaktadır [36].

Nano beynitik çeliklerde Si miktarının artırılması, çeliğin termal kararlılığını arttırdığı görülmüştür. Yüksek Si miktarı ( $Si > 1,5$ ) yüksek sıcaklıklarda ( $\sim 500^\circ C$ ) sementit çökmesini geciktirdiği için östeniti kararlı hale

getirmektedir. Yüksek Si miktarı yüzey işlemlerinde (galvaniz kaplama gibi) sorun oluşturmaktadır. Bu yüzden Si miktarının azaltılması ve Al miktarının artırılması yüksek sıcaklıklarda kararlılık sağlarken, yüzey işlemlerine engel olmamaktadır [37].

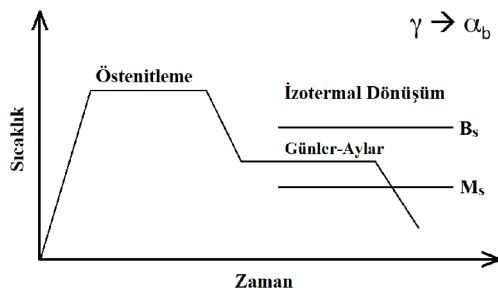
Nano beynitik çeliğe süneklik ve dayanım kazandırmak ve beynitik dönüşümü hızlandırmak için Co ve Al eklenmesi, araştırmalarda uygulanan yollardan birisidir [34, 38]. Östenit tane boyutunun küçültülmesi de aynı etkiyi yaratmaktadır. Yapılan bu değişiklikler daha ince taneli mikroyapı, beynitik ferrit miktarını ve sertliği arttırdığı görülmüştür [38]. Fakat Co maliyeti ve çok yüksek dayanımlı çeliklerde (ultra high strength steels), Al ile çelik temizliğinde uyumsuzluk yarattığı için endüstriyel olarak bu yol pek tercih edilmemektedir. Co ve Al eksikliğini kapatmak için çelik içindeki Mn ve Cr miktarını azaltmak gerekmektedir. Bu yöntemler yerine, nano beynitik çelik üretimi için minimum gerekli olan %1,5 Si miktarını %3 olacak şekilde Si eklendiğinde, kalıntı östenitin miktarını azaltmaktadır [39].

Düşük sıcaklıkta östemperlenmiş yüksek karbonlu Si ve Al bakımından zengin bir çeliğe Co yerine Al eklenmesi sonucunda, beynitik dönüşümü hızlandırmakla birlikte karbür çökmesini engellemektedir [40].

V ilavesi sonucunda birincil östenit tane boyutu inceltirilerek, beynit için daha çok çekirdeklenme bölgeleri oluşturulmaktadır. Mikroyapıda daha ince beynitik yapının bulunması sonucunda toklukta artış görülmüştür. Bunun nedeni ise bu yapının kırılma esnasında oluşan çatlak yönünü değiştirmesidir [41].

### 3.2. Üretimi (Production)

Sıcaklık ve izotermal bekleme süresi faz dönüşümlerini ve kalıntı östenitte bulunan karbon miktarını doğrudan etkilemektedir. Karbon miktarındaki değişim mekanik özellikleri değiştirmektedir. Çok uzun süreli izotermal dönüşüm, karbür çökmesine neden olmaktadır. Bu durum, östeniti kararsız hale getirmektedir. Çelik içerisindeki yüksek Si miktarı, östeniti karbonca zenginleştirmektedir. Bununla birlikte TRIP etkisine (gerinim altında östenitin martensite dönüşmesi) neden olmakta ve ferriti katı eriyik mukavemetlenmesiyle sertleştirmektedir. Dönüşüm sıcaklığının artırılmasıyla, kalıntı östenit içerisindeki karbon miktarı azalmaktadır ve buda akma dayanımını düşürmektedir [42].



Şekil 7. Nano beynitik dönüşüm için ısıl işlem çevrimi [43] (Figure 7. Heat treatment cycle for transformation of nano bainite)

İçerisinde minimum ağırlıkça %1,5 Si içeren orta-yüksek karbonlu çeliklerde nano beynit üretimi basit ısıl işlem çevrimleri ile mümkündür. Her çelik için farklı ısıl işlem çevrimlerine gerek duyulsa da ortalama olarak 900°C'de 30 dakika östenitleme sonrası 200°C'de 10 gün izotermal bekletilmesi sonucunda istenilen mikroyapı elde edilmektedir (Şekil 7).

Nano beynitik çeliklerde, ısıl işlem sonrası soğuma hızının ve kalıntı östenit miktarının çarpılma üzerine belirgin etkisi olduğunu tespit edilmiştir. Özellikle mikroyapısı martensit ve yüksek miktarda kalıntı östenitten meydana gelen çeliklerde ısıl işlem sonrası yüksek miktarda çarpılma görülmektedir. Soğuma hızı çarpılmayı önemli derecede etkilemektedir. Isıl işlem sonrası soğuma hızı düşürülürse çarpılma göz ardı edilebilecek kadar azalmaktadır. Beynitik dönüşüm sırasında oluşan çarpılma ihmal edilecek kadar düşüktür [44].

Nano boyutta beynitik ferrit ve karbonca zengin kalıntı östenite sahip çeliğin çok uzun süreli izotermal ısıl işlemi sonucu karbonca zengin östenitten sementit çökmesi meydana gelmiştir. Çok uzun süreli izotermal ısıl işlem sonrası soğuma sırasında östenit, martensit dönüşümü için kararlılığı kaybetmemişken, beynitik ferrit etkilenmemiştir [45].

Nano beynitik çeliklerin temperlenmesi sırasında, östenit / ferrit ara yüzeyinde sistem dengeye gelmeden kalıntı östenit çözünmektedir [46].

Östemperleme sırasında 350°C altında, reaksiyon hızı yavaş olmasına rağmen, içinde aşırı doymuş karbon çözültüsü beynitik ferrit oluşumuna neden olmaktadır. Dönüşüm sıcaklığı yükseltildiğinde, karbon difüzyonu hızlanmakta ve buda karbonca aşırı doymuş ferrit içerisinde bulunan karbon miktarını azaltmaktadır. Açığa çıkan karbon yapıdaki östenite veya ferrit içinde karbür oluşturmak sureti ile çökeltmektedir. Karbon miktarındaki süreksizlikler yüksek veya düşük sıcaklıklarda beynit oluşturma mekanizmasını etkilememiştir. Beynit oluşumu aslında martensit oluşumunun doğası ile aynı olduğu gözlemlenmiştir [47].

Östenitin hacimsel oranı ve östenit içindeki karbon miktarı beynitik dönüşüm sıcaklığı ile değişmektedir. Düşük östemperleme sıcaklıklarında belirli bir süre tutulduktan sonra östenit dönüşümü tamamlanmaktadır. Östemperleme sıcaklığı artırıldığında beynitik ferrit miktarı azalmaktadır ve buda beynitik ferrit içindeki karbon miktarını azaltmaktadır. X ışını kırınım sonuçlarında beynitik ferrit oluşumu sırasında karbon heterojen olarak dağıldığı için iki tür östenit oluşmaktadır; düşük karbonlu östenit (birincil östenit) ve yüksek karbonlu östenit olarak (beynitik ferritin alt birimi ve çıta aralarında) oluşmaktadır [17].

Nano beynit; çelik soğuk deformasyon uğratılarak östenitin hızla soğutulması ve düşük sıcaklıkta östemperlenmesi ile elde edilmektedir. Deformasyon, martensit başlangıç sıcaklığı (Ms) düşürmektedir ve bu da daha düşük sıcaklıklarda östemperleme yapılmasına olanak sağlamaktadır [48].

Östenitleme sıcaklığının artırılması ile yüksek karbon ve düşük alaşımlı çeliklerde beynit oluşturma sıcaklığını düşürmüştür ve daha kısa süreler izotermal bekleme imkânı sağlamıştır. 980°C’de östenitleme ve izotermal bekleme sonrası en yoğun beynit miktarı elde edilmiştir. Bunu sonucunda en yüksek sertlik elde edilmiştir (810 HV). Beynitik plakalar 10 nm kalınlığa sahip olup ince ferrit plakalar içermektedir [49].

### 3.2.1. Toz metalurjisi ile üretilen nano beynitik çelikler (Nano bainitic steels produced by powder metallurgy)

Toz metalurjisi ile üretilen nano beynitik çelikte karbonca zengin östenitten oldukça küçük tane boyutu elde edilmiştir. Östenit tane boyutunun küçülmesi martensit başlangıç sıcaklığını baskılayarak düşük sıcaklıkta nano boyutta plaka şeklinde beynitik ferritin dönüşümü için zaman kazandırmıştır. Yüksek karbonlu östenit, düşük karbonlu östenite göre daha kararlı olduğu için yüksek karbonlu östenit içeren yapıda dislokasyon ve nano ikizlemelerin varlığı tespit edilmiştir [50].

Nano beynitik çeliklerde beynitik dönüşümün hızlı olması istenmektedir. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen nano beynitik çeliklerde östenit tane boyutunu küçültmenin beynitik dönüşümü hızlandırdığı görülmüştür. Büyük toz parçacıkları öğütme sırasında yeterli boyutlara indirilmez ise yapıda mikro gözenekler oluşturmakta ve buda mekanik özellikleri olumsuz

fazında azalma görülmektedir. Mikroyapı farklılıklarının yanı sıra, izotermal bekleme sıcaklığı arttıkça çeliklerin sertlikleri azalmaktadır [14].

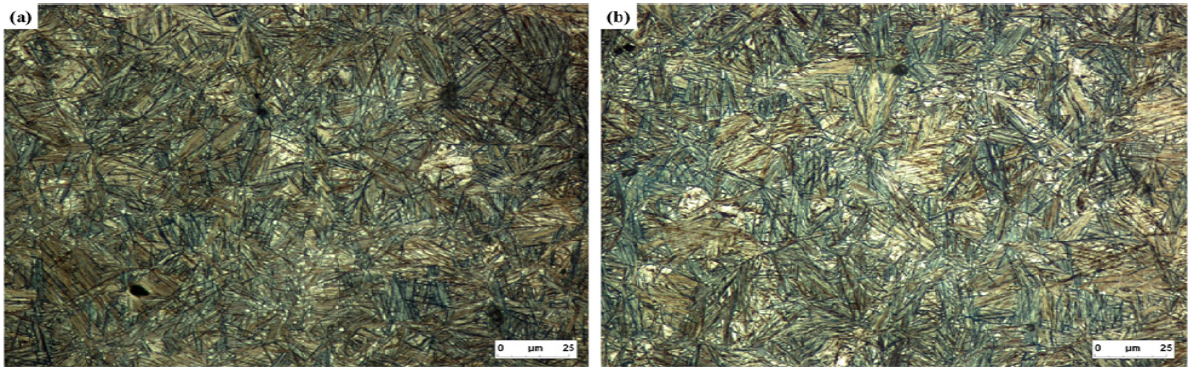
Östenitleme sonrası, 200 - 300°C’de izotermal dönüşümde  $M_s$  sıcaklığı 264°C olan 0,66 C ve 0,69 Mn içeren çelikte,  $M_s$  altında martensit oluşumunun engellendiği SEM ve dilatometrik analizler ile tespit edilmiştir. Martensit oluşumunun engellenmesi,  $M_s$  sıcaklığı altında östenitin izotermal olarak dönüşüme devam etmesi neden gösterilmektedir. Beynit oluşumu,  $M_s$  sıcaklığının üstünde östenitin dönüşmesi ile gerçekleşmektedir ve bu çalışmada da  $M_s$  sıcaklığı altında östenit, beynite dönüşebilmektedir [52].

X ışını kırınımı analizleri sonucu,  $M_s$  sıcaklığı altında izotermal dönüşüm sırasında beynit oluşumu görülmektedir. İzotermal dönüşüm sırasında yavaş gelişen birimler beynitik ferrit, hızlı oluşan birimler martensit olarak belirlenmiştir [53].

Düşük karbonlu çeliğin dilatometrik analiz ile  $M_s$  sıcaklığı altında izotermal dönüşüm sonrası mikroyapıda beynit ve temperlenmiş martensit varlığı tespit edilmiştir [54].

### 3.3. Mikroyapıları (Microstructures)

Şekil 8’de “0,98 C – 0,77 Mn – 2,9 Si – 0,45 Cr – 0,21 Cu – 0,16 Ni – 0,016 – P 0,014 S” nano beynitik çeliğinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir [39].



Şekil 8. Nano beynitik çeliğinin optik mikroyapıları; a) 220°C/22 saat, b) 250°C/16 saat [39] (Figure 8. Optical micrographs of nano bainitic steel, a) a) 220°C/22h, b) 250°C/16h)

etkilemektedir [51].

### 3.2.2. $M_s$ sıcaklığının altında beynit oluşumu (Bainite formation below $M_s$ temperature)

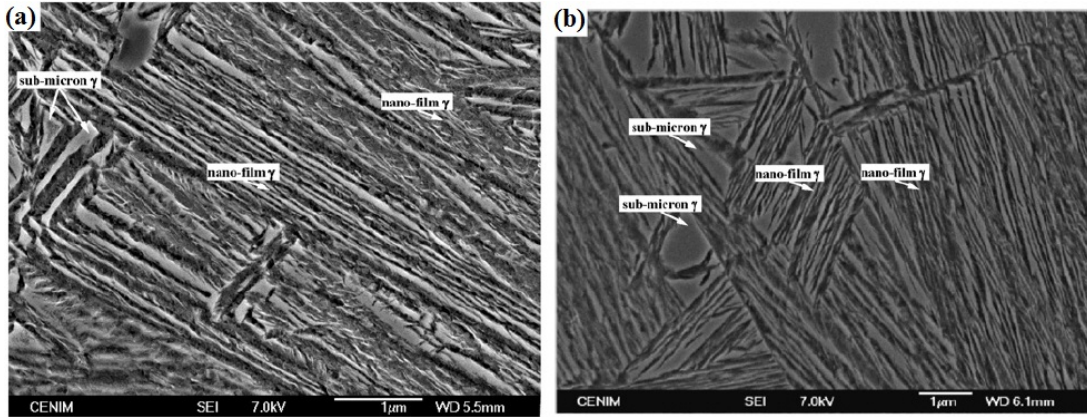
Nano beynitik çelikler beynit başlangıç ( $B_s$ ) ve martensit başlangıç ( $M_s$ ) sıcaklıkları arasında izotermal olarak bekletilmesi sonucu elde edilmektedir. Yapılan çalışmalarda, martensit başlangıç ( $M_s$ ) sıcaklığı altında üretilen nano beynitik çeliklerin morfoloji ve mekanik özelliklerinde farklılıklar olduğu görülmüştür.

Cruz Junior [23], üç farklı  $M_s$  sıcaklığı (200°C, 220°C ve 270°C) altında ticari yay çeliği olan AISI 9254 ( $M_s$ : 278°C) çeliğinde martensit, beynitik ferrit ve kalıntı östenit fazları tespit edilmiştir. İzotermal bekleme sıcaklığı  $M_s$  sıcaklığına yaklaştıkça, beynitik ferrit, kalıntı östenit fazlarında artış görülmekteyken, martensit

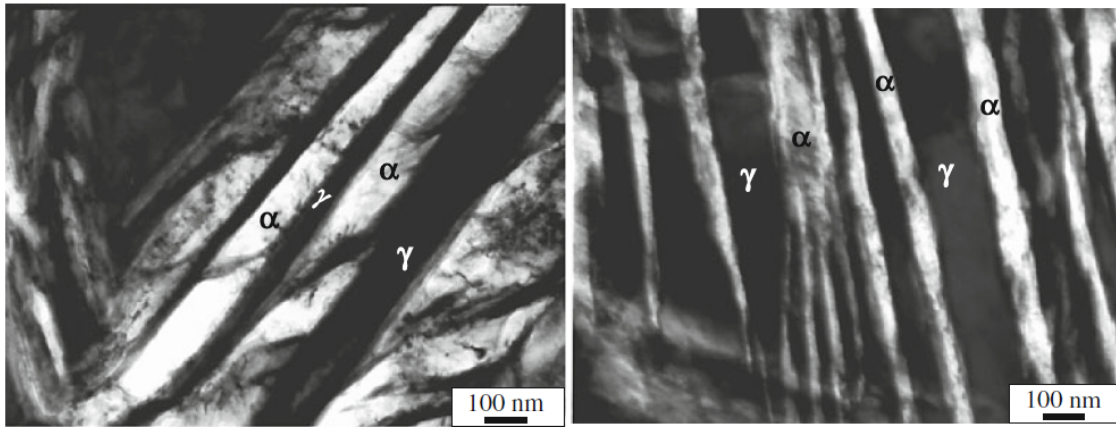
Mikroyapılar temperlenmiş martensite benzemekte olup aslında nano beynitik mikroyapıya sahiptirler. İzotermal bekleme sıcaklığı düştükçe, nano beynitik yapının (beynitik ferrit ve yüksek karbonlu kalıntı östenit) oluşması için daha uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 9’da nano beynitik çeliğin tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Mikroyapının oldukça ince olduğu açıkça gözükmektedir. Yüksek karbonlu östenit ve beynitik ferrit çıtalari belirgin olarak gözükmektedir. Azalan izotermal bekleme sıcaklığı ile yapının daha ince bir yapı olduğu ve bununda mekanik özellikleri (çekme dayanımı, tokluk, sertlik gibi) olumlu olarak etkilediği bilinmektedir.





Şekil 9. Nano beynitik çeliğinin SEM mikroyapıları; a) 220°C/22 saat, b) 250°C/16 saat [39] (Figure 9. SEM micrographs of nano bainitic steel, a) 220°C/22h, b) 250°C/16h)



Şekil 10. Nano beynitik çeliğinin TEM mikroyapıları, 200°C-240 saat [55] (Figure 10. TEM micrographs of nano bainitic steel, a) 220°C/22h, b) 250°C/16h)

Şekil 10'da nano beynitik çeliğin TEM görüntüleri verilmiştir. Yüksek karbonlu kalıntı östenitin ve beynitik ferrit çıtalarının kalınlığı 30 - 50 nm arasında değişmektedir.

### 3.4. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Nano beynitik çelikler mukavim, sünek ve hatta kabul edilebilir tokluk değerlerine sahip olabilmektedirler [9]. Ortalama olarak çekme dayanımı 1600-2500 MPa, %5-30 süneklik, 30-40 MPa.m<sup>1/2</sup>'dan fazla kırılma tokluğu ve 700HV sertliğe sahiptirler [11]. Düşük sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek kadar yüksek tokluk değerleri vermesi dikkat çekmektedir [9]. Nano beynitik çeliklerin aşınma direnci, benzer sertlikteki beynitik çeliklerden daha üstün olduğu belirlenmiştir [56].

Nano beynitik çeliklerde, beynitik ferrit miktarı ve kalıntı östenit miktarı, çeliğin dayanımını ve sünekliğini etkilemektedir. Beynitik ferrit miktarı, dayanım doğru orantılı, kalıntı östenit miktarı süneklik ile doğru orantılıdır. Östenitin gerilme ve gerinme altında martensite dönüşme eğilimi (TRIP etkisi), malzemenin sünekliğini sınırlamaktadır [57].

Nano beynitik çeliklerin tokluğunu etkileyen parametreler; kimyasal kompozisyon, dönüşüm sıcaklığı, beynitik ferrit ve kalıntı östenit hacim oranı, mikroyapıda bulunan fazların morfolojisi olarak belirlenmiştir.

Mikroyapıda bulunan fazların hacimsel oranı ve morfolojisi sünekliği etkilemektedir. Yüksek miktardaki "adacık" şeklinde östenit yerine "çıtı" gibi film şeklinde östenit bulunması sonucunda, malzemenin kırılma tokluğu yüksek olmaktadır. Mikroyapıda daha ince beynitik yapının bulunması sonucunda toklukta artış görülmüştür. Bunun nedeni ise bu yapının kırılma esnasında oluşan çatlak yönünü değiştirmesidir [41].

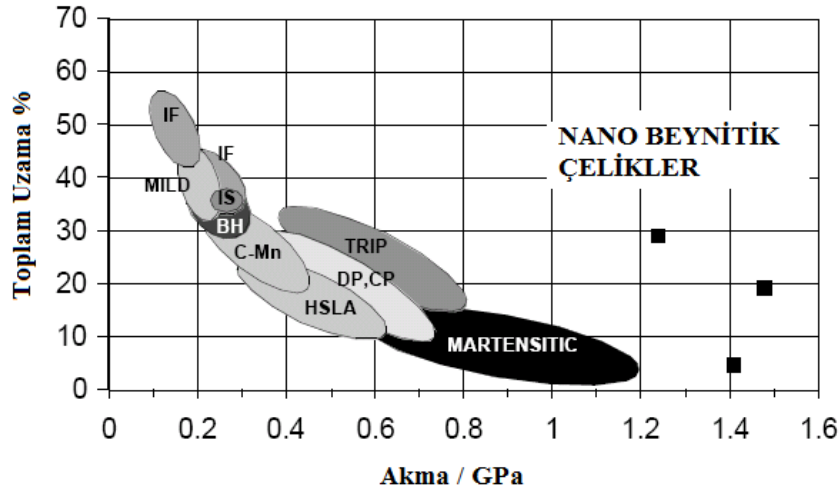
Sementit içermeyen nano beynitik çeliklerde beynit oluşumu, çıtı şeklinde olan alt beynitten oluşmaktadır. Tane şeklinde beynit, çatlak ilerleme hızına karşı düşük direnç göstermektedir. Buna ek olarak, kaba martensit ve östenit taneleri erken çatlak çekirdeklenmesine neden olduğu düşünülmektedir [15].

Orta karbonlu çeliklere çok aşamalı izotermal beynitik dönüşüm sonucunda martensit ve kalıntı östenitin boyutlarını ve beynit plaka boyutlarını küçültürken mekanik özellikler geliştirilmiştir [58].

Çizelge 5'te ısı işlem parametrelerine göre nano beynitik çeliklerin mekanik özellikleri (akma, çekme dayanımı ve sertlik değerleri) verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan çeliklerde yüksek karbon (ağırlıkça % 0,77 - 1,02) ve yüksek silisyum (> %1,5) oranına sahiptir. Yüksek mekanik özelliklere sahip nano beynitik çelikler; 1400 MPa - 2000 MPa aralığında akma dayanımı, 1700 MPa

– 2500 MPa aralığında çekme dayanımı ve 600 – 650 HV aralığında sertliğe sahiptir. Nano bey nitik çelikler yüksek dayanım ile birlikte %5 - %30 aralığında değişen toplam uzama değerlerine sahiptirler.

artış, toplam uzama ile ters orantılıdır. Nano bey nitik çeliklerde ise yüksek akma değerleri (1,2-1,5 GPa) ile birlikte yüksek toplam uzama elde edilmektedir. Yüksek mekanik özellikler, nano bey nitik çeliklerin



Şekil 11. Nano bey nitik çeliklerin yüksek dayanımlı ticari çelikler ile mekanik özelliklerinin kıyaslanması. BH- fırında sertleşebilen çelik, CMn- karbon-mangan çeliği, CP- karmaşık fazlı çelik, DP- çift fazlı çelik, IF- arayer elementi içermeyen çelik, IS- izotropik, HSLA-yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelik, TRIP- dönüşümün neden olduğu plastisite çeliği [59] (Figure 5. Comparison of strength versus total elongation of conventional steels and nano bainitic steels. BH- bake hardenable, CMn-carbon manganese, CP-complex phase, DP- dual phase, IF-interstitial free, IS-isotropic, HSLA-High strength low alloy steel, TRIP- Transformation induced plasticity)

Şekil 11’de nano bey nitik çelikler ile ticari olarak kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin akma ve toplam uzama değerleri kıyaslanmıştır. Akma dayanımındaki

mikroyapısında bulunan 20-40 nm kalınlığında bey nitik ferrit ve nano boyutta film şeklindeki yüksek karbonlu kalıntı östenit çitalarına atfedilmektedir.

Çizelge 5. Nano bey nitik çeliklerin mekanik özellikleri (Table 5. The mechanical properties nano bainitic steels)

No	Kimyasal Kompozisyon	Isıl İşlem	Mekanik Özellikler	Kaynak
1	1.94 Mn - 1.59 Si - 1.33 Cr - 0.30 Mo - 0.02 Ni - 0.11 V	1000°C 15 dak östenitleme, 190°C 2 hafta izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1959 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2500 MPa Sertlik: 648 (HV30)	5
2	0.98 C - 1.89 Mn - 1.46 Si - 1.26 Cr - 0.26 Mo - 0.09 V	950°C östenitleme, 200°C 10 gün izotermal bekletme	$\sigma_{Çekme}$ : 2500 MPa Sertlik: 700 HV	13
3	0.77 C - 0.36 Mn - 2.36 Si - 0.27 Mo - 0.021 P - 0.011 S - 0.023 Ti - 0.039 V	930°C 60 dak östenitleme, 240°C 60 dak izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1820 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2050 MPa Sertlik: 52 HRC	64
4	0.79C-1.98Mn- 1.56Si -1.01Cr-0.24Mo - 1.51Co-1.01Al	200°C ‘de izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1410 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2260 MPa Sertlik: 690 HV	65
5	0.22 C - 0.28 Mn - 1.57 Si - 0.01 Mo - 2.95 Ni	<sup>a</sup> 900°c 300 sn östenitleme, 400°c 198 sn izotermal bekletme <sup>b</sup> 900°C 300 sn östenitleme, 475°C 72 sn izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 934 MPa <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 1095 MPa  <sup>b</sup> $\sigma_{Akma}$ : 587 MPa <sup>b</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 827 MPa	66
6	0.9 C - 1.94 Mn - 1.51 Si - 1.14 Cr - 0.25 Mo - 2.61 Ni 0.09 V - 1.37 Co - 0.59 Al - 0.01 Cu	900°C 30 dak östenitleme, 200°C 72 saat izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 2000 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2200 MPa	41

7	0.98 C - 0.77 Mn - 2.90 Si - 0.016 P - 0.014 S - 0.45 Cr - 0.16 Ni - 0.21 Cu	<sup>a</sup> 950°C 60 dak östenitleme, 250°C 16 saat izotermal bekletme <sup>b</sup> 950°C 60 dak östenitleme, 220°C 22 saat izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1698 MPa <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2068 MPa <sup>a</sup> Sertlik: 613 (HV10) <sup>b</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1704 MPa <sup>b</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2287 MPa <sup>b</sup> Sertlik: 664 (HV10)	39
8	0.56 C - 0.58 Mn - 1.43 Si - 0.47 Cr	<sup>a</sup> 900°C 5 dak östenitleme, 200°C 1 gün izotermal bekletme <sup>b</sup> 900°C 5 dak östenitleme 270°C 1 gün izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1900 MPa <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2100 MPa <sup>a</sup> Sertlik: 685 HV <sup>b</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1600 MPa <sup>b</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 1500 MPa <sup>b</sup> Sertlik: 510 HV	23, 67
9	0.25 C - 2.50 Mn - 1.50 Si - 1.50 Cr	400°C 40 dak izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1097 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 1758 MPa Sertlik: 505 (HV5)	15
10	0.99 C - 0.76 Mn - 1.58 Si - 0.46 Cr - 0.02 Mo	250°C 16 saat izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1834 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2205 MPa Sertlik: 652 (HV30)	35
11	1.01 C - 0.82 Mn - 1.51 Si - 0.46 Cr - 0.10 Mo	<sup>a</sup> 250°C 16 saat izotermal bekletme <sup>b</sup> 220°C 22 saat izotermal bekletme <sup>c</sup> 200°C 64 saat izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1852 MPa <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2164 MPa <sup>a</sup> Sertlik: 659 (HV30) <sup>b</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1883 MPa <sup>b</sup> Sertlik: 707 (HV30) <sup>c</sup> $\sigma_{Akma}$ : 2019 MPa <sup>c</sup> Sertlik: 751 (HV30)	35
12	1.02 C - 0.76 Mn - 1.53 Si - 0.46 Cr - 0.02 Mo - 0.02 Nb	<sup>a</sup> 220°C 22 saat izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1798 MPa <sup>a</sup> Sertlik: 714 (HV30) <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2278 MPa	35
13	0.61 C - 0.76 Mn - 1.45 Si - 2.42 Cr	250°C 12 saat izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1582 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2030 MPa Sertlik: 589 (HV30)	35
14	0.90 C - 0.79 Mn - 1.65 Si - 0.48 Cr - 0.01 Mo	<sup>a</sup> 220°C 40 saat izotermal bekletme <sup>b</sup> 250°C 22 saat izotermal bekletme	<sup>a</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1931 MPa <sup>a</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2329 MPa <sup>a</sup> Sertlik: 710 (HV30) <sup>b</sup> $\sigma_{Akma}$ : 1910 MPa <sup>b</sup> $\sigma_{Çekme}$ : 2213 MPa <sup>b</sup> Sertlik: 659 (HV30)	43
15	0.99 C - 0.74 Mn - 2.47 Si - 0.97 Cr - 0.03 Mo - 0.12 Ni - 0.17 Cu - 0.02 Al	250°C 6 saat izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1646 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2072 MPa Sertlik: 658 (HV30)	68
16	0.53 C - 0.79 Mn - 1.64 Si - 0.18 Cr - 0.08 Ni - 0.1 Cu - 0.016 Al - 0.024 P - 0.027 S	850°C 30 dak östenitleme, 350°C izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1500 MPa Sertlik: 48-50 HRC	69
17	0.78 C - 2.02 Mn - 1.6 Si - 1.01 Cr - 0.25 Mo - 1.37 Al - 3.83 Co	950°C 30 dak östenitleme, 220°C 3 gün izotermal bekletme	$\sigma_{Akma}$ : 1775 MPa $\sigma_{Çekme}$ : 2210 MPa Sertlik: 636 (HV50)	70

### 3.5. Aşınma Davranışı (Wear Behavior)

Nano beynitik çeliklerin aşınma direnci, benzer sertlikteki beynitik çeliklerden üstün olduğu görülmüştür. Ek olarak çok ince mikroyapıdan dolayı, aşınma testi sırasında yüzey sertleşmesi (pekleşme) meydana gelmektedir. Bunun sonucunda, aşınma oranı azaltılmaktadır diğer bir deyimle, yüksek aşınma direnci sağlanmaktadır. Yüzey sertliğinin nedeni, gerinim

altında östenitten martensite dönüşümün (TRIP etkisi) gerçekleşmesidir [56].

Nano beynit, ince perlit ve martensit 'in aşınmaları kıyaslanması sonucunda en sert faz olan martensitin aşınma direnci yüksek çıkmıştır. Beynitin aşınmaya gösterdiği tepki aşınan yüzeyde kanal açma ve ufak çukurcuklar oluşturma şeklinde olmuştur, martensit fazında ise kesme şeklinde aşınma bölgesi oluşmuştur. [60].

### 3.6. Nano Beynitik Çeliklerin Kaynaklanabilirliği (Weldability of Nano Bainitic Steels)

Nano beynitik çelikler, yüksek karbon içermektedir bu yüzden kaynaklanabilirliği problem oluşturmaktadır. Kaynak sonrası soğuma esnasında kırılğan martensitik yapının oluşması sonucunda yüksek darbe tokluğu elde edilememektedir [18].

Nano beynitik çeliğin kaynaklanabilirliğinin düşük olması, bu çelikler için bir eksiklik olarak değerlendirilmiştir. Fakat tek başlarına düşük sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek kadar yüksek tokluk değerleri vermesi dikkat çekmiştir [9].

Yüksek karbon miktarından dolayı nano beynitik çeliklerin kaynaklanması sonucunda, kaynaklanan bölgede çatlaklar oluşmaktadır. Bu yüzden nano beynitik çelikler kaynak yapılamamaktadır. Bunun nedeni kaynak sonrası soğuma esnasında östenitin kırılğan martensite dönüşmesidir. Bu dönüşümü engellemek için, kaynak sonrası soğuma sırasında çelik beynit başlangıç sıcaklığına ulaştığın anda, ısıtım işlemi uygulanmalıdır. Fırın sıcaklığı beynit başlangıç ve martensit başlangıç sıcaklığı arasında olmalıdır. Isıtım işlemi yeniden beynitik dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Uygulanan bu yöntem, metalurjik olarak ana malzemeye uyum sağlamalıdır [61].

### 3.7. Nano Beynitik Çeliklerin Korozyon Direnci (Corrosion Resistance of Nano Bainitic Steels)

Nano beynitik çeliklerde karbonca zengin kalıntı östenitte korozyon görülmektedir. 200°C 'de oluşan nano beynit, 350°C 'de oluşan nano beynite göre daha yüksek korozyon direnci göstermiştir. Bunun nedeni 350°C 'de oluşan kalıntı östenit miktarının hacimsel ve boyutsal olarak 200°C 'de oluşan kalıntı östenite göre daha fazla olmasıdır [62].

Klorür çözeltisi kullanılarak, nano beynitik çeliklerin, martensitik çeliklere nazaran daha yüksek korozyon direnci gösterdiği yapılan elektrokimyasal deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Martensitik çelikte taneler arası korozyon görülmekte iken, nano beynitik çelikte kalıntı östenitin olduğu belirli bölgelerde çözünme görülmüştür. Buna neden olarak, mikroyapı farklılığı gösterilmektedir [63].

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_R$ ) filmleri ve 20-40 nm kalınlığında çok ince beynitik ferrit ( $\alpha_b$ ) plakalarından oluşan yapılar "nano beynit" olarak adlandırılmaktadır. Nano beynitik çelik ilk olarak 2002 yılında Caballero ve Bhadeshia tarafından üretilmiştir. Pahalı alaşım elementlerine ve mekanik işlemlere gerek kalmadan, basit ısıtım çevrimleri ile üretilebilen nano beynitik çelikler bu özelliği ile bilimsel ve endüstriyel alanda dikkat çekmektedirler.

İçerisinde minimum ağırlıkça %1,5 silisyum bulduran yüksek karbonlu çeliklerde elde edilebilen bu yapı maryaşlandırma çelikleri ile kıyaslandığında 19 kat daha düşük maliyetli olması ve benzer oranlarda tokluk (30-40

MPa m<sup>1/2</sup>) ve dayanım göstermesi (2500 MPa çekme dayanımı, %5-30 uzama, 700 HV sertlik) dikkat çekmektedir.

Her çelik için farklı östenitleme sıcaklıkları olsa da ortalama olarak 900°C'de östenitleme sonrası beynit başlangıç sıcaklığı ( $B_s$ ) ve martensit başlangıç sıcaklığı ( $M_s$ ) arasında 10 gün izotermal olarak bekletilmesi sonucu nano beynitik çelik üretimi mümkündür. Çelikteki yüksek karbon miktarı izotermal bekleme sırasında kalıntı östenitin içerisinde çözünerek mekanik özellikleri arttırmaktadır. Bunun yanı sıra, yüksek silisyum miktarı karbür çökmesini engellemekle birlikte östenit içindeki karbon miktarının zenginleştirilmesinde rol oynamaktadır.

Halen üzerinde yoğun bilimsel araştırmalar yapılmakta olan nano beynitik çelikler sağladıkları yüksek mekanik özellikler ve ekonomik olmaları nedeniyle endüstriyel uygulamalar için gelecek vaat etmektedirler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Krauss, G. *Steels: Processing, Structure, and Performance*, ASM International, (2005).
2. Bhadeshia, H.K.D.H. *Bainite in Steels*, Institute of Metals, UK, (1992).
3. Sinha, A. K. *Ferrous Physical Metallurgy*, Butterworth, USA, (1989).
4. Smith W.F. (Çev.: Erdoğan, M.) *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri*, Nobel Yayın, Ankara, (2000).
5. Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H., Mawella, K.J.A., Jones, D.G., & Brown, P. Very Strong Low Temperature Bainite, *Materials Science and Technology*, 18(3): 279-284, (2002).
6. Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Wiley, New York, USA, (2007).
7. Bhadeshia, H.K.D.H. & Honeycombe, R. *Steels: Microstructure and Properties*, 3<sup>rd</sup> edition, Butterworth-Heinemann, USA, (2006).
8. Davis, J. R., Mills, K. M., & Lampman, S. R. Metals Handbook, vol. 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA, (1990).
9. Bhadeshia, H.K.D.H. The first bulk nano structured metal, *Science and Technology of Advanced Materials*, 14(1): 1-7, (2013).
10. Edmonds, D., Matlock, D., & Speer, J. The Recent Development of Steels with Carbide-Free Acicular Microstructures Containing Retained Austenite, *La Metallurgia Italiana*, 1: 41-49, (2011).
11. Bhadeshia, H.K.D.H. Bulk nano crystalline steel, *Ironmaking & Steelmaking*, 32(5): 405-410, (2005).
12. Caballero, F.G., Miller, M.K., Garcia-Mateo, C., & Cornide, J. New experimental evidence of the diffusionless transformation nature of bainite, *Journal of Alloys and Compounds*, 577: 626-630, (2013).
13. Caballero, F.G., & Bhadeshia, H.K.D.H. Very strong bainite, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3): 251-257, (2004).

14. Bhadeshia, H. K. D. H. Hard Bainite, *Solid Solid Phase Transformations*, 1: 469-484, (2005).
15. Caballero, F.G., Allain, S., Cornide, J., Velásquez, J.P., Garcia-Mateo, C., & Miller, M.K. Design of cold rolled and continuous annealed carbide-free bainitic steels for automotive application, *Materials & Design*, 49: 667-680, (2013).
16. Beladi, H., Adachi, Y., Timokhina, I., & Hodgson, P. D. Crystallographic analysis of nano bainitic steels, *Scripta Materialia*, 60(6): 455-458, (2009).
17. Chen, X., & Vuorinen, E. In situ x-ray observation of bainitic transformation of austempered silicon alloyed steel, *Journal of Materials Research*, 24(04): 1559-1566, (2009).
18. Bhadeshia, H.K.D.H. Nanostructured Bainite, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466, 3-18, (2010).
19. Caballero, F. G., Miller, M.K., & Garcia-Mateo, C. Carbon supersaturation of ferrite in a nanocrystalline bainitic steel, *Acta Materialia*, 58(7): 2338-2343, (2010).
20. Cornide, J., Garcia-Mateo, C., Capdevila, C., & Caballero, F.G. An assessment of the contributing factors to the nano scale structural refinement of advanced bainitic steels, *Journal of Alloys and Compounds*, 577: 43-47, (2013).
21. Wang, Y.H., Zhang, F.C., & Wang, T.S. A novel bainitic steel comparable to maraging steel in mechanical properties. *Scripta Materialia*, 68(9): 763-766, (2013).
22. Rose, A.J., Mohammed, F., Smith, A.W.F., Davies, P.A., & Clarke, R.D. Superbainite: Laboratory Concept to Commercial Product, *Materials Science and Technology*, 30(9): 1094-1098, (2014).
23. Cruz Junior, J.A., & Santos, D.B. Effect of tempering temperature on isothermal decomposition product formed below Ms, *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2): 93-99, (2013).
24. Hofer, C., Leitner, H., Winkelhofer, F., Clemens, H., & Primig, S. Structural characterization of carbide-free bainite in a Fe-0.2 C-1.5 Si-2.5 Mn steel, *Materials Characterization*, 102: 85-91, (2015).
25. Zhang, X., Xu, G., Wang, X., Embury, D., Bouaziz, O., Purdy, G. R., & Zurob, H.S. Mechanical Behavior of Carbide-free Medium Carbon Bainitic Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(3): 1352-1361, (2014).
26. Timokhina, I. B., Beladi, H., Xiong, X.Y., Adachi, Y., & Hodgson, P.D. Nanoscale microstructural characterization of a nanobainitic steel, *Acta Materialia*, 59(14): 5511-5522, (2011).
27. Rakha, K., Beladi, H., Timokhina, I., Xiong, X., Kabra, S., Liss, K.D., & Hodgson, P. (2014). On low temperature bainite transformation characteristics using in-situ neutron diffraction and atom probe tomography, *Materials Science and Engineering A*, 589: 303-309.
28. Martis, C.J., Putatunda, S.K., Boileau, J., & Spray, J.G. The static and dynamic mechanical properties of a new low-carbon, low-alloy austempered steel, *Materials Science and Engineering A*, 589: 280-287, (2014).
29. Long, X.Y., Kang, J., Lv, B., & Zhang, F.C. Carbide-free bainite in medium carbon steel, *Materials & Design*, 64: 237-245, (2014).
30. Kim, K.H., & Lee, J. S. On microstructure and properties of Si modified 100Cr6 bearing steels. *Materials Science and Technology*, 28(1): 50-54, (2012).
31. Jezierska, E., Dworecka, J., & Roźniatowski, K. Nanobainitic Structure Recognition and Characterization using Transmission Electron Microscopy, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(4): (2014).
32. Yoozbashi, M.N., & Yazdania, S. Acceleration of Bainitic Transformation in Nanostructured, Low Temperature Bainitic Steels by Using of Thermodynamic Model, *Solid State Phenomena*, 172: 214-220, (2011).
33. Mandal, D., Ghosh, M., Pal, J., De, P.K., Chowdhury, S.G., Das, S.K., Das, G., & Ghosh, S. Effect of austempering treatment on microstructure and mechanical properties of high-Si steel, *Journal of Materials Science*, 44(4): 1069-1075, (2009).
34. Caballero, F.G., Chao, J., Cornide, J., Garcia-Mateo, C., Santofimia, M.J., & Capdevila, C. Toughness deterioration in advanced high strength bainitic steels, *Materials Science and Engineering A*, 525(1): 87-95, (2009).
35. Sourmail, T., Caballero, F.G., Garcia-Mateo, C., Smanio, V., Ziegler, C. Kuntz, M., Elvira, R., Leiro, A., Vuorinen, E., Teeri, T., Evaluation of potential of high Si high C steel nano structured bainite for wear and fatigue applications, *Materials Science and Technology*, 29(10): 1166-1173, (2013).
36. Sidhu, G., Bhole, S.D., Essadiqi, E., Chen, D.L. (2013). Characterization of Isothermally Heat-Treated High Carbon Nano bainitic Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(10): 3070-3076.
37. Hulme-Smith, C.N., Lonardelli, I., Peet, M.J., Dippel, A.C., Bhadeshia, H.K.D.H. Enhanced thermal stability in nano structured bainitic steel, *Scripta Materialia*, 191-194, (2013).
38. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., & Bhadeshia, H.K.D.H. Acceleration of low-temperature bainite, *ISIJ International*, 43(11): 1821-1825, (2003).
39. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., Sourmail, T., Kuntz, M., Cornide, J., Smanio, V., & Elvira, R. Tensile behaviour of a nano crystalline bainitic steel containing 3wt% silicon, *Materials Science and Engineering A*, 549: 185-192, (2012).
40. Yang, J., Wang, T. S., Zhang, B., & Zhang, F. C. Microstructure and mechanical properties of high-carbon Si-Al-rich steel by low-temperature austempering, *Materials & Design*, 35: 170-174, (2012).
41. Avishan, B., Yazdani, S., & Nedjad, S.H. Toughness variations in nanostructured bainitic steels. *Materials Science and Engineering A*, 548: 106-111, (2012).
42. Mohamed Y. Sherif, Characterisation and Development of Nano structured, Ultrahigh Strength, and Ductile Bainitic Steels, *Ph.D.Thesis*, (2006).
43. Garcia-Mateo, C., Sourmail T., Caballero F.G., Smanio V., Kuntz M., Ziegler C., Leiro A., Vuorinen E., Elvira R., and Teeri T. Nanostructured Steel Industrialisation: Plausible Reality, *Materials Science and Technology*, 30(9): 1071-1078, (2014).
44. Amey, C.M., Huang H., and Rivera-Díaz-del-Castillo P.E.J. Distortion in 100Cr6 and nano structured bainite. *Materials&Design*, 35: 66-71, (2012).

45. Avishan, B., Garcia-Mateo, C., Yazdani, S., & Caballero, F.G. Retained austenite thermal stability in a nanostructured bainitic steel, *Materials Characterization*, 81: 105-110, (2013).
46. Caballero, F. G., Miller, M.K., Garcia-Mateo, C., Capdevila, C., & Babu, S.S. Redistribution of alloying elements during tempering of a nanocrystalline steel, *Acta Materialia*, 56(2): 188-199, (2008).
47. Caballero, F.G., Miller, M.K., Garcia-Mateo, C., Cornide, J., & Santofimia, M.J. Temperature dependence of carbon supersaturation of ferrite in bainitic Steels, *Scripta Materialia*, 67(10): 846-849, (2012).
48. Zhang, M., Wang T.S., Wang Y.H., Yang J., and Zhang F.C. Preparation of nano structured bainite in medium-carbon alloy steel. *Materials Science and Engineering A*, 568: 123-126, (2013).
49. Kong, D., Liu, Q., and Yuan L. Effect of Austenitizing Temperature on Formation of Hard Bainite, *Metal Science and Heat Treatment*, 56(7-8): 444-448, (2014).
50. Lonardelli, I., Bortolotti, M., Van Beek, W., Girardini, L., Zadra, M., & Bhadeshia, H.K.D.H. Powder metallurgical nanostructured medium carbon bainitic steel: Kinetics, structure, and in situ thermal stability studies, *Materials Science and Engineering A*, 555: 139-147, (2012).
51. Lonardelli, I., Girardini, L., Maines, L., Menapace, C., Molinari, A., & Bhadeshia, H.K.D.H. Nano structured bainitic steel obtained by powder metallurgy approach: structure, transformation kinetics and mechanical properties, *Powder Metallurgy*, 55(4): 256-259, (2012).
52. Van Bohemen, S.M.C., Santofimia, M.J., & Sietsma, J. Experimental evidence for bainite formation below Ms in Fe-0.66 C, *Scripta Materialia*, 58(6): 488-491, (2008).
53. Kolmskog, P., Borgenstam, A., Hillert, M., Hedström, P., Babu, S. S., Terasaki, H., & Komizo, Y. I. Direct Observation that Bainite can Grow Below Ms, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(13): 4984-4988, (2012).
54. da Silva, E.P., Xu, W., Föjler, C., Houbaert, Y., Sietsma, J., & Petrov, R.H. Phase transformations during the decomposition of austenite below Ms in a low-carbon steel, *Materials Characterization*, 95: 85-93, (2014).
55. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., Miller, M.K., & Jiménez, J.A. On measurement of carbon content in retained austenite in a nanostructured bainitic steel. *Journal of Materials Science*, 47(2): 1004-1010, (2012).
56. Leiro, A., Vuorinen, E., Sundin, K.G., Prakash, B., Sourmail, T., Smanio, V. Caballero, F.G., Garcia-Mateo, C., Elvira, R. Wear of nano-structured carbide-free bainitic steels under dry rolling-sliding conditions, *Wear*, 298: 42-47, (2013).
57. Avishan, B., Garcia-Mateo, C., Morales-Rivas, L., Yazdani, S., & Caballero, F.G. Strengthening and mechanical stability mechanisms in nanostructured bainite. *Journal of Materials Science*, 48(18): 6121-6132, (2013).
58. Wang, X.L., Wu, K.M., Hu, F., Yu, L., Wan, X.L. Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel. *Scripta Materialia*, 74: 56-59, (2014).
59. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., & Bhadeshia, H.K.D.H. Mechanical properties of low-temperature bainite, *Materials Science Forum*, 500: 495-502, (2005).
60. DasBakshi, S., P. H. Shipway, and H.K.D.H. Bhadeshia. Three-body abrasive wear of fine pearlite, nano structured bainite and martensite, *Wear*, 308(1): 46-53, (2013).
61. Fang, K., Yang, J.G., Liu, X.S., Song, K.J., Fang, H.Y., & Bhadeshia, H.K.D.H. Regeneration technique for welding nano structured bainite, *Materials & Design*, 50: 38-43, (2013).
62. Kazum, O., Kannan, M.B., Beladi, H., Timokhina, I., Hodgson, P., & Khoddam, S. Selective Dissolution of Retained Austenite in Nano structured Bainitic Steels, *Advanced Engineering Materials*, 16(4): 442-444, (2014).
63. Kazum, O., Kannan, M. B., Beladi, H., Timokhina, I. B., Hodgson, P. D., & Khoddam, S. Aqueous corrosion performance of nanostructured bainitic steel. *Materials & Design*, 54: 67-71, (2014).
64. Chen, X., & Li, Y. Effects of Ti, V, and rare earth on the mechanical properties of austempered high silicon cast steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(11): 3215-3220, (2006).
65. Bhadeshia, H.K.D.H. Properties of fine-grained steels generated by displacive transformation, *Materials Science and Engineering A*, 481: 36-39, (2008).
66. Bleck, Wolfgang, and Florian Gerdemann, Improved mechanical properties by control of bainite transformation, *Materials and Manufacturing Processes*, 43-50, (2011).
67. Cruz Junior, J.A., Rodrigues, T.F.M., Viana, V.D.C., Abreu, H., & Santos, D.B. Influence of temperature and time of austempering treatment on mechanical properties of SAE 9254 commercial steel, *Steel Research International*, 83(1): 22-31, (2012).
68. Rementeria, R., Morales-Rivas, L., Kuntz, M., Garcia-Mateo, C., Kerscher, E., Sourmail, T., & Caballero, F.G. On the role of microstructure in governing the fatigue behaviour of nanostructured bainitic Steels, *Materials Science and Engineering A*, 630: 71-77, (2015).
69. Barbacki, A., & Mikołajski, E. Optimization of heat treatment conditions for maximum toughness of high strength silicon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 78(1): 18-23, (1998).
70. Hasan, H.S., Peet, M.J., Avettand-Fènoël, M. N., & Bhadeshia, H.K.D.H. Effect of tempering upon the tensile properties of a nanostructured bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 615: 340-347, (2014).