



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN TOZ METAL YÜKSEK
KARBONLU ÇELİK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

Ömer Faruk ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim - 2019

KONYA

Her Hakkı Saklıdır



TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer Faruk ÖZCAN tarafından hazırlanan "*ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN TOZ METAL YÜKSEK KARBONLU ÇELİK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ*" adlı tez çalışması 01/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Murat MAYDA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şaban BÜLBÜL

İmza



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN

FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 191319008 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Ömer Faruk ÖZCAN
Tarih: 01/10/2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN TOZ METAL YÜKSEK KARBONLU ÇELİK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Ömer Faruk ÖZCAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ

2019, 64 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ

Doç. Dr. Murat MAYDA

Dr. Öğr. Üyesi Şaban BÜLBÜL

Bu çalışmada, toz metalurjisi metoduyla üretimi gerçekleştirilen yüksek karbonlu çelik malzemelere farklı sıcaklık ve zaman parametreleri ile östemperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemler sonucunda ortaya çıkan farklı beynitik yapılar ve bunlara bağlı olarak gelişen yüksek karbonlu çeliğe ait darbe tokluğu ve sertlik parametrelerine etkisi incelenmiştir. Malzeme üretiminin ilk aşamasında gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş %99.9 saflıktaki demir tozlarına ağırlıkça %1.2 grafit tozu ilave edilmiş ve homojen yapıdaki kompozisyon oda sıcaklığında çift etkili preste 850Mpa basınç altında sıkıştırılmıştır. Elde edilen ham numuneler 1180°C sıcaklıkta ve 20 dk süreyle sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterleme işleminden hemen sonra potasyumnitrat(KNO₃)-Sodyumnitrat(NaNO₃) karışımı tuz banyosu içerisinde 300°C , 375°C ve 450°C sıcaklıklarında, 30-60-90 ve 120 dakika bekletme sürelerinde östemperleme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Bu ısıl işlemler sonucunda malzemelerin mikroyapılarında üst(kaba) ve alt(ince) beynitik yapılar elde edilmiştir. En

yüksek proses sıcaklığında (450°C) ve uzun bekleme sürelerinde (90-120dk) malzemelerin mikroyapısında oluşan fazın üst beynit olduğu, en düşük tuz banyosu sıcaklığı olan 300°C ve düşük bekleme sürelerinde ise mikroyapıda alt beynitin hakim olduğu SEM görüntülerinde gözlenmiştir. Bu farklı ısıl işlem parametreleriyle beşer adet hazırlanan malzemelerin darbe dayanımlarının tespiti Charpy test metodu ile yapılmıştır. Yapısında üst beynitik fazın baskın olduğu malzemelerin darbe dayanımlarının, alt beynit içeren malzemelere oranla çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Darbe testi sonucunda oluşan kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri incelenmiş ve nispeten sünek kırılma gözlenen yapıların üst beynitik yapıya sahip malzemeler olduğu alt beynit ihtiva eden yapılarda ise daha ziyade gevrek kırılma belirtileri gözlenmiştir. Yüksek karbonlu çeliklerin sertlik testi Brinell sertlik ölçme metodu ile icra edilmiş ve alt beynitik yapılı malzemelerin sertliklerinin üst beynitik yapıya sahip malzemelere oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Artan östemperleme sıcaklık ve süreleriyle %1.2 (ağ.) karbonlu çeliklerin darbe tokluklarında artış bunun tersi bir biçimde sertliklerinde düşüş tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beynit, Mikroyapı, Östemperleme, Toz Metalürjisi, Yüksek Karbon Çeliği

ABSTRACT

MS/PH.D THESIS

EFFECTS OF AUSTEMPERING HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF POWDER METALLURGY HIGH CARBON STEEL MATERIAL

Ömer Faruk ÖZCAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL
ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Hakan Burak KARADAĞ

2019, 64 Pages

Jury

Asst. Prof. Hakan Burak KARADAĞ

Assoc. Prof. Murat MAYDA

Asst. Prof. Şaban BÜLBÜL

In this study, austempering heat treatment, with different time and temperature, is applied to high carbon steel materials which are produced by powder metallurgy method. It is investigated different bainites as a result of heat treatment and its effects on impact toughness and hardness values of high carbon steel material. At the first step of production gas atomized iron powders are used with %99,9 pureness and graphite powder used on %1,2 ratio by weight. Then homogeneous mixed composition pressed under 850 Mpa pressure with double effective press. Green samples are sintered at 1180 °C and 20 minutes. After sintering specimens treated on salt baths which contains half percent KNO₃ and half percent NaNO₃ by weight at 300, 375, 450 °C and 30, 60, 90, 120 minute time values. After these heat treatments in the microstructure of material it is observed that upper and lower

bainite. At the higher level of process temperature which is 450 °C and the longest waiting times 90, 120 minutes upper bainite structure and at the lowest level of temperature 300 C and shortest waiting times 30, 60 minutes lower bainite structures observed by SEM investigation. Impact toughness values calculation of these 5 specimens are done with Charpy impact test method. It is seen that the specimens have much higher impact toughness which are contain upper bainite when compared with the specimens which are contains lower bainite. After impact test fracture faces are investigated by SEM device and seen that upper bainitic specimens show relatively more ductile behavior than lower ones. Lower bainitic specimens are tend to be brittle than upper ones. Hardness test is done with Brinell Hardness Measuring Method and seen that lower bainitic materials are harder than others. By increasing austempering temperature and time it is seen that decreasing on hardness but increasing on impact toughness on %1,2 wt. carbon contained steel material.

Key Words: Bainite, Microstructure, Austempering, Powder Metallurgy, High Carbon Steel

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında yapmış olduğum tüm çalışmalarında maddi ve manevi hiç bir desteğini esirgemeyen hayatımda ve tez çalışmalarında bana yol gösteren abim ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ' a, çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE' ye ve Dr. Öğr. Üyesi Şaban BÜLBÜL' e, bu süreçte her koşulda beni sabır ve destekle karşılayan aileme, tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Ayşe KOÇ' a, Veysel Murat BOSTANCI' ya, Emre KARADAŞ' a, Arş. Gör. Tuğba Selcen ATALAY KALSEN' e, Arş. Gör. Muhammed İhsan ÖZGÜN' e, Hacer TAŞDÖĞEN' e, Ayşe Büşra YILDIZ' a, Serhat Selçuk TOSUN' a, Şakir Emre HINCAL' a, Merve GÖKÇE' ye, Ayşegül SEZGİN' e ve cihaz imkanlarını kullanıma sunan AKKO Makine' ye, Saymak Makine' ye, 191319008 nolu tez projesi ile bu tezi destekleyen Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destek Birimine, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine, Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü ve Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi hocalarıma saygı, sevgi ve en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Ömer Faruk ÖZCAN

KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Toz Metalürjisi	1
1.1.1. Tozların Üretilmesi	4
1.1.1.1. Mekanik Yöntemlerle Toz Üretimi	4
1.1.1.2. Atomizasyon Yöntemleriyle Toz Üretimi	7
1.1.1.3. Gaz Atomizasyonu	7
1.1.2. Tozların Karakterizasyonu	8
1.1.2.1. Parçacık Boyut Analizi	9
1.1.2.2. Parçacıkların Şekil Özellikleri	9
1.1.3. Tozların Sıkıştırılması	11
1.1.3.1. Bazı Yoğunluk Terimleri	12
1.1.4. Tozların Sinterlenmesi	13
1.1.4.1. Sıvı Hal Sinterlemesi	14
1.1.5. Üretilen Parçaların Karakterizasyonu	15
1.2. Isıl İşlem	15
1.2.1. Beynit.....	16
1.2.1.1. Üst (Kaba) Beynit (400-550 °C Sıcaklık Aralığı).....	19
1.2.1.2. Alt (İnce) Beynit (250-400 °C Sıcaklık Aralığı)	19
1.2.2. Östemperleme Isıl İşlemi	20
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Numunelerin Üretilmesi.....	27

3.1.1. Parçacık Boyut Analizi	29
3.1.2. Karışımın Hazırlanması	29
3.1.3. Toz Karışımının Preslenmesi	32
3.1.4. Numunelerin Sinterlenmesi ve Östemperleme Isıl İşlemi	34
3.2. Numunelerin Yoğunluk Ölçümleri	37
3.3. Numunelerin Sertlik Ölçümleri	38
3.4. Numunelerin Darbe Deneyleri	38
3.5. Numunelerin SEM Analizleri	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1. Yoğunluk Ölçümleri	41
4.2. Sertlik Ölçümleri	42
4.3. Charpy Darbe Testi	43
4.4. Mikroyapı Görüntüleri	45
4.4.1. Sinterleme Sonrası Mikroyapı Görüntüleri	45
4.4.2. Östemperleme Sonrası Mikroyapı Görüntüleri	48
4.5. Kırık Yüzey Görüntüleri	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.1. Sonuçlar	59
5.2. Öneriler	61
KAYNAKLAR	62
EKLER	65
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Mühendislik ve günlük alanda kullanılan tozların boyut karşılaştırması [1].	3
1.2 Bir hazne içerisinde hıza bağlı olarak bilyelerin ve parçacıkların değişen davranışları. a) düşük hızlı, b) yüksek hızlı, c) orta (optimum) hızlı [2].	6
1.3 Bir düşey gaz atomizasyon ünitesi örneği [1].	8
1.4 Bazı boyut aralıkları için seçilebilecek parçacık boyutu ölçüm yöntemleri [1].	10
1.5 Parçacıkların sahip olabileceği şekil özellikleri[1].	10
1.6 Tozların sıkıştırılması ve bu esnada meydana gelen kayma ve şekil değiştirme hareketi [1].	11
1.7 Toz yoğunlaştırma basamakları [1].	13
1.8 Sinterizasyon mekanizması ve atomik düzeyde yapının gösterimi [1].	14
1.9 Sıvı hal sinterlemesi ve gerçekleşme basamakları [1].	14
1.10 Perlit beynit ve martenzit yapılarına ait mikroyapı görüntüleri [5].	17
1.11 Alt beynit ve üst beynit yapılarının oluşumunu gösteren izotermal dönüşüm eğrisi [7].	18
1.12 Perlit dönüşüm grafiği [7].	19
1.13 Östemperleme ısı işlemi grafiği.	20
1.14 Demir-Karbon denge diyagramı [7].	21
3.1 Tozlara ait SEM ve başlangıç görüntüleri.	28
3.2 Cilas 1190 Parçacık boyut analiz cihazı.	29
3.3 Tozların tartılması için kullanılan RADWAG marka hassas terazi.	30
3.4 Tozların karıştırılmasında kullanılan FRITSCH marka gezegen tipi karıştırıcı.	31
3.5 Numunelerin preslendiği kalıba ait görüntü.	32
3.6 Pres ve çıkan nihai ürüne ait görseller.	33
3.7 Preslenmiş tozlara ait SEM görüntüsü.	34
3.8 Nevola marka tüp fırına ait görüntü.	35
3.9 Deney numunelerinin sinterlenmesine ve ısı işlem parametrelerine ait diagram.	36
3.10 Atmosfer kontrollü tüp fırının ısınma doğruluğunu gösteren ölçüm.	36
3.11 Yoğunluk ölçümlerinin gerçekleştirildiği micromeritics marka piknometre cihazı.	37

3.12 EmcoTest DuraScan otoamtik sertlik ölçüm cihazı.	38
3.13 Darbe test cihazı görseli.	39
3.14 SU1510 SEM cihazı.	40
4.1 Tokluk değerlerine ait grafik.	43
4.2 Sinterleme sonrası elde edilen perlitik yapı.	45
4.3 Azalan gözenek yapısı ve sürekli sementit ağını gösteren SEM görüntüsü.	46
4.4 Kaba perlit ve ince perlit kıyaslamasını gösteren mikroyapı görüntüsü.	47
4.5 Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.	49
4.6 Tuz banyosunda 375 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.	50
4.7 Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.	51
4.8 Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	53
4.9 Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	54
4.10 Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	55
4.11 Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	56
4.12 Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	57
4.13 Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.	58

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Högånäs ABC100.30 Fe tozuna ait element dağılımı(%).	27
3.2 Tozların karıştırılmasında kullanılan ağırlık değerleri.	31
4.1 Deney numunelerine ait yoğunluk ve standart sapma değerlerini gösteren tablo. ..	41
4.2 Deney gruplarına ait ortalama sertlik değerlerini(HBW) gösterir tablo.	42
4.3 Deney sonucu elde edilen tokluk değerleri.	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

T: Ton

gr: Gram

C: Karbon

mm: Milimetre

cm: Santimetre

Fe₃C: Sementit

ρ_h : Ham yoğunluk

NaNO₃: Sodyum Nitrat

KNO₃: Potasyum Nitrat

ρ_t : Teorik yoğunluk

ρ_g : Görünür yoğunluk

ρ_s : Sinterlenmiş yoğunluk

M_s: Martenzit başlangıç sıcaklığı

A_{cm}: Ötektoid üstü çelikler için östenitleme sıcaklık çizgisi.

kgf: Kuvvet birimi, SI birim sisteminde Newton olarak tanımlanır.

Kısaltmalar

sa: Saat

dak.: Dakika

Si: Silisyum

Al: Alüminyum

TM: Toz metalürjisi

HV: Vickers Sertliği

XRD: X Işını Kırınımı

HBW: Brinnel Sertliği

TEM: Geçirimli Elektron Mikrosbu

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

BSM: Brinnler Sertlik Ölçüm Metodu

EBSD: Elektron Gerisaçılım Difraksiyonu

AISI: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

BİTAM: Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi

1. GİRİŞ

Uzun süredir malzemeler insanların kullanımındadır. Elimizde olan malzemelerle bir çok yönden hayatlarımızı kolaylaştırmaktayız. Bu makine mühendisliği alanına indirildiği zaman büyük çoğunlukta metalik malzemelerden özellikle de çelik alaşımlarından oluşan bir dünyayı kapsamaktadır. Her ne kadar yeni gelişmeler meydana gelip daha hafif ve aynı zaman da daha mukavemetli malzeme tasarımları yapılsa da henüz çelik sağlam yerini korumaktadır. Bunun başlıca sebeplerinden birisi elbette ki ekonomik meselelerdir. En başta bu ve buna benzer sebeplerle insanlar sürekli olarak malzemelerini geliştirmeye yönelik çalışmalar içerisinde bulunmuşlardır. Bu çalışmalar neticesinde giderek yaygınlaşan bir yöntem olan toz metalürjisi(TM) metotları geliştirilmiştir.

TM geleneksel üretim yöntemlerine nazaran bir çok avantaj sağlamaktadır. Bunların en başında mikro yapı kontrolü gelmektedir. Aynı zamanda döküme kıyaslandığında kalıp maliyetinde yüksek miktarda tasarruf sağlamaktadır. Döküm yönteminde bir kere kullanılabilen kalıpların aksine TM yönteminde tek bir kalıp defalarca parça üretiminde kullanılabilir. Bu da en yüksek maliyetlerden birisi olan kalıp maliyetini oldukça azaltmaktadır. demir-çelik alanında da TM yöntemlerinin bu ve daha fazla avantajları sebebiyle her geçen gün kullanımını artırmaktadır.

Çelik malzemeler ya da diğer metalik malzemeler her ne kadar bir çok malzemeyle kıyasla üstün dahi olsalar bazen bu özellikler kullanım alanına yetmemektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için malzemelere çeşitli metotlar uygulanmaktadır. Bunların başında ısıl işlemler gelmektedir. Isıl işlemler çelik malzemelerin bileşimine zarar vermeksizin dağılımı yeniden düzenler ve bu yolla kullanılacak malzemelerin kullanılacakları ortama göre mukavemet kazanmalarına yardımcı olur.

Elbette ki ısıl işlemler geleneksel çeliklere uygulanabilir fakat bazen geleneksel metotlarla üretilmeyen özel uygulamalara ihtiyaç duyan parçalar da karşımıza çıkmaktadır. Bu konuda ısıl işlemlerin TM yöntemleriyle üretilen malzemeler üzerine etkisi iyi bilinmemektedir. Bu etkilerin öğrenilmesi için bu tez konusu araştırılmıştır.

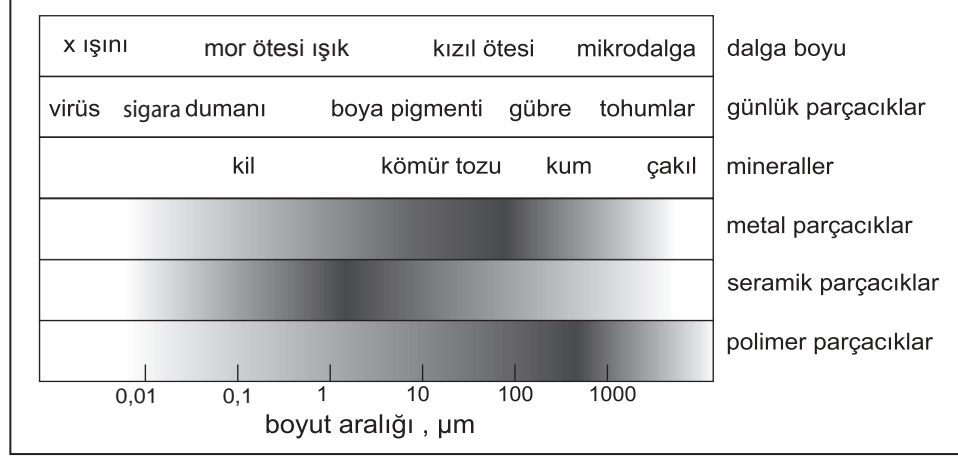
1.1. Toz Metalürjisi

TM yöntemleri çok geniş kapsamda malzeme üretimine izin vermektedir. Sadece düşük sıcaklıkta ergiyen metallere değil birçok malzemeden de dökümde olduğu gibi net şekle sahip parça üretimine olanak sağlar[1, 2]. TM işlemleri, toz metaller, seramikler ve hatta metal dövme işlemlerini de kapsayan sentez bir yöntemdir. Bu tez çeliklerin TM yöntemlerle üretilmesini ele almaktadır. Malzemelerin dayanımlarını mikroyapıları ile doğrudan alakalıdır. TM yöntemleri ile fazların boyut, şekil ve miktarları ile oynanarak isteğe bağlı mikroyapı ve bunun neticesi isteğe bağlı mekanik özellikler TM yöntemleri ile elde edilebilmektedir [1].

TM ile elde edilen bir diğer ayrıcalık ise erime dereceleri birbirinden çok farklı olan ya da birbiri içerisinde hiç çözünmeyen metallerin birlikte kullanılmasını sağlamasıdır. Buna örnek olarak tungsten ve bakır(3400°C - 1083°C) ve de demir ve kurşun (1535°C - 327°C) örnek gösterilebilir [2]. Bu sayede geleneksel metotlarla elde edilemeyen mikro yapılar ve mekanik özellikler elde etmek imkan dahilinde olmaktadır. Bir diğer ilgi çekici özellik ise metallerin içerisine seramik takviyesi yapılabilmesini sağlamaktır. Bu ise bir başka yöntemle gerçekleştirilmesi imkansız bir işlemdir.

TM kullanım alanı genellikle darbe enerjisini emmeye yönelik olan metal köpüklerin tasarımında da önemli bir yer tutmaktadır. Geleneksel köpük metal üretim yöntemlerinin aksine TM ile gözenek yapılandırma işlemler çok daha kolay geliştirmekte ve yukarıda bahsedilen faydalar aynı şekilde köpüklere de uygulanarak geleneksel yöntemlere göre daha üstün malzemelerin üretimi sağlanmaktadır.

TM'nin temelini anlayabilmek için öncelikle bazı tanımlamalar yapmamız gerekmektedir. Bunlardan ilki olan parçacık bir katının küçük ayrı bölümleri olarak tanımlanabilir. TM'de kullanılan parçacıklar $0,1\ \mu\text{m}$ ile $200\ \mu\text{m}$ arasında değişmektedir [1]. Şekil 1.1'de ise mühendislik alanlarında ve gündelik hayatta kullanılan tozlar ile alakalı boyut dağılımları görülmektedir.



Şekil 1.1. Mühendislik ve günlük alanda kullanılan tozların boyut karşılaştırması [1].

TM ile parça üretimi tozların bağlanarak bir katı oluşturması temeline dayanır. Katı oluşumundan sonra tozlar kendi başlangıç özelliklerini kaybederler ve bu sırada tane olarak adlandırılan farklı kristal bölgeler oluştururlar [1]. Bu oluşum sinterleme adı verilen bir mekanizma sayesinde gerçekleşir. Sinterleme parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayan erime derecesi altında gerçekleşen bir ısıl işlemdir.

Sinterleme işleminden önce parçaların bir şekilde birbirlerine bağlanması gerekmektedir. Bütün tozlar gazlar gibi sıkıştırılabilirlik ve akıcılık gösterirler [1]. Bu sebeple tozların birbirine bağlanması işlemi genellikle presleme ile sağlanmaktadır. Bu sıkıştırma işlemi bir bağlayıcı kullanarak ya da kuru olarak gerçekleştirilebilir. Bu halde bulunan henüz sinterlenmemiş numunelere ham ya da yeşil adı verilmektedir.

Sıkıştırma işlemi tozların sertlik değerlerine göre değişkenlik arz etmektedir. Yuvarlak metal tozlarının preslenmesi oldukça kolay iken sertlikleri arttıkça sıkıştırılabilirlik kabiliyetleri azalacaktır. Bu sebeple özellikle seramik parçacıkları kuru olarak preslenemeyip mutlaka bir bağlayıcı kullanılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir [1]

1.1.1. Tozların Üretilmesi

Bilinen bir çok malzemenin toz formunun elde edilmesi mümkündür. Ancak toz üretiminde yöntem, mâliyet, tepkimeler ve elde edilmek istenen özellikler önem arz etmektedir. Tozların nasıl üretildiğini bilmek bize başlangıç özelliklerini, boyut ve şekil özellikleri tahmin edebilme imkanı sağlar. [1, 3]

Tozların karakterize edilmesinde şekil, boyut, dağılım, parçacığın elde ediliş yöntemi ve diğer parametreler oldukça önemlidir. Fakat bu özellikler tek başına karakterizasyon için yeterli gelmeyecektir. Bunlarla birlikte kimyasal özellikler, parçacık boyut dağılımı, görünür yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik kabiliyeti ile kombinasyonları numune özelliklerinin tespitinde dikkate alınmalıdır [2, 3].

Tozların üretiminde bazı temel yöntemler mevcuttur ki bunlar;

- Mekanik öğütme
- Kimyasal tepkime
- Atomizasyon

olarak sıralanabilir [1]. Tozların üretiminden sonra en büyük önem arz eden parametrelerden birisi şekil özelliğidir. Parçacıklar şekil bilgisine göre 3 temel gruba ayrılabilir. İğnemsî şekle sahip parçacıklar; uzunlukları diğer boyutlarından kayda değer ölçüde fazla olan parçacıklardır. Düz, yapraksı şekle sahip parçacıklar; uzunlukları diğer boyutlarından çok daha büyük olan parçacıklardır. Eşksenli parçacıklar; bütün boyutlarının benzer uzunluklara sahip olduğu parçacıklardır [2]. 40 μm -45 μm boyutlarına sahip, düzensiz şekilli, dentritik yapıdaki parçacıklar düşük basınç değerlerinde dahi kolayca sıkıştırılabilmektedir. Genellikle kaba dentritik şekilli tozlardan elde edilmiş parçalar yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bu göstermektedir ki aynı kimyasal kompozisyona sahip olup farklı fiziksel özellikler gösteren tozların işlemleri arasında keskin bir fark görünmektedir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesinde en etkili parametrenin üretim metodu olduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple bazı yaygın üretim metotları bu başlık altında açıklanmıştır [2, 3].

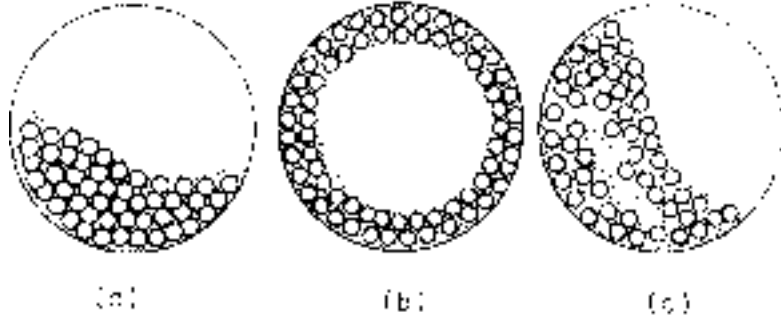
1.1.1.1. Mekanik Yöntemlerle Toz Üretimi

Geniş kapsamda darbe, aşınma, basma ve kesme işlemlerini kapsayan 4 temel mekanik etki mevcuttur. Darbe malzemeye uygulanan hızlı ve anlık kuvvetlerin etkisi altında küçük parçacıkların meydana gelmesini sağlar. Aşınma ise iki aşındırıcı yüzey arasında sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesini sağlayan bir mekanizma rol oynamaktadır. Basma kuvvetleri ile malzemenin kırılma noktasına kadar deformasyona maruz bırakılarak parçacık elde edilmesidir. Kesme yöntemi ise bilhassa talaşlı imalatta da karşımıza çıkan kesme kuvvetlerinin etkisi ile malzemedan talaş kaldırılmasına dayanan bir yöntemdir [1, 3].

Bu yöntemler görece kırılmaya eğilimli olan saf antimon ve bizmut gibi malzemelerin ya da nispeten sert ve gevrek metal alaşımları ve seramikler üzerinde, berilyum ve metal hidrit gibi reaktif malzemelerde, alüminyum ve demir gibi zaman zaman düz şekilli toz formunun istendiği metallerde uygulanmaktadır [3].

Talaşlı imalat yöntemleri metal kütüklerin parçalanmasında oldukça etkili bir yöntem olmasına rağmen TM yöntemlerinin ilk zamanlarında toz üretimi için sahip olduğu yaygınlık artık kalmamıştır [3]. Fakat TM yöntemleri için hâlâ önemli bir ara adım olarak yerini korumaktadır. Elde edilen talaşlar fiziksel ve kimyasal yöntemlerle talaş oluşumu esnasında meydana gelen kirlenmelerden arındırıldıktan sonra öğütme gibi daha etkili toz üretim metotlarıyla toz hale getirilmektedir [1].

Yaygın bir metot olan bilyeli öğütme, sert bilyeler, çubuklar ve çekiçlerin kullanıldığı mekanik darbe etkisi altında çalışan bir sistemdir. Bir haznenin içerisine öğütülecek malzemeyle birlikte yüksek aşınma direncine sahip bilyelerin koyulup döndürülmesiyle bilyeler sürekli olarak malzemelere çarpar ve bu sayede öğütme gerçekleşir. Bu yöntemde tozların özelliklerini etkileyen en kritik parametre haznenin dönme hızıdır. Dönme hızının çok yüksek seçilmesi malzemenin ve bilyelerin merkezi kuvvetler etkisinde kalıp hazne duvarına yapışmasıyla öğütmenin gerçekleşmemesine sebep olur. Bunun aksine çok yavaş seçilen bir dönme hızı ise haznenin yukarısından aşağıya doğru azalan yada tamamen duran etkisiz bir harekete sebep olacaktır ve öğütme bu koşulda da gerçekleşmeyecektir. Optimum hızın seçilmesi koşulunda ise bilyelerin hazne içerisinde belirli bir yüksekliğe çıkıp sonrasında malzeme üzerine düşmesiyle etkili bir öğütmenin gerçekleşmesine olanak sağlayacaktır [1, 3, 2]. Şekil 1.2'de bu durum açıklanmaktadır.



Şekil 1.2. Bir hazne içerisinde hızla bağlı olarak bilyelerin ve parçacıkların değişen davranışları. a) düşük hızlı, b) yüksek hızlı, c) orta (optimum) hızlı [2].

Bu yöntemle genellikle gevrek malzemelerin öğütülmesi etkili sonuçlar vermektedir. Sünek malzemelerin sahip oldukları şekil değiştirmeye olan eğilimleri verimi düşürmektedir. Buna rağmen sünek malzemelerin mutlaka öğütülmesi gerekiyorsa bu malzemelerin öncelikle gevrekleştirilmesi gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için çeşitli malzemelere uygulanan farklı yöntemler mevcuttur [1]. Parçacık boyutunun küçülmesi daha yavaş öğütme davranışını beraberinde getireceğinden çok küçük boyutlara sahip tozların öğütme ile elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bunun sebebi iri parçacıkların öğütülmesi gereken enerjinin ufak parçalar için gereken enerjiden daha az olmasıdır. Öğütme esnasında da parçacıkların boyutlarının azalması gereken darbe enerjisini artıracaktır. Sonuç olarak belirli bir süre sonunda asimptotik bir değere ulaşan öğütücünün daha uzun süre çalışması parçacık boyutunu artık değiştirmeyecektir [1]. Öğütme esnasında enerjinin büyük miktarının ısı ve sese dönüşmesinden dolayı bilyeli öğütme verimsiz kalmaktadır. Buna rağmen en verimli öğütme için bazı koşullar mevcuttur ki bunlar;

- Bilye çapının toz çapının 30 katı kadar olması,
- Bilyelerin hazne hacminin yaklaşık yarısının kaplaması,
- Öğütülecek malzemenin hazne hacminin yaklaşık %25'ini kaplaması,

olarak sıralanabilir. Bunlarla birlikte en uygun dönme hızı değirmen çapının karekökünün tersine bağlı olarak değişmektedir [1]. Tüm bu mekanik yöntemlerde meydana gelen yüksek çarpışma kuvvetleri neticesinde bilyeler zarar görebilir. Bu zararı en düşük seviyede tutmak, ve de öğütülen parçacıkların topaklanmasını ya da soğuk kaynamasını engellemek adına bazı yağlayıcı parçacıklar kullanılabilir [3].

Alüminyum, bakır, bronz, gümüş, altın, paslanmaz çelik tozları ticari olarak öğütme metoduyla üretilen malzemelerdir [3]. Endüstriyel ölçekte kullanılan öğütme cihazları genellikle 50l ile 200l arasında hacme sahip olmaktadır. Fakat tek bir sürücü ile tek bir hazne kullanmak maliyetli olduğundan bir sürücü üzerinde bir kaç hazne ile öğütme yapılmaktadır. Öğütme sonucu elde edilen tozlar zayıf akma dayanımına ve paketleme özelliklerine sahiptirler ve bu sebeple öğütme sonrasında tavlama işlemleri gerekebilir [1].

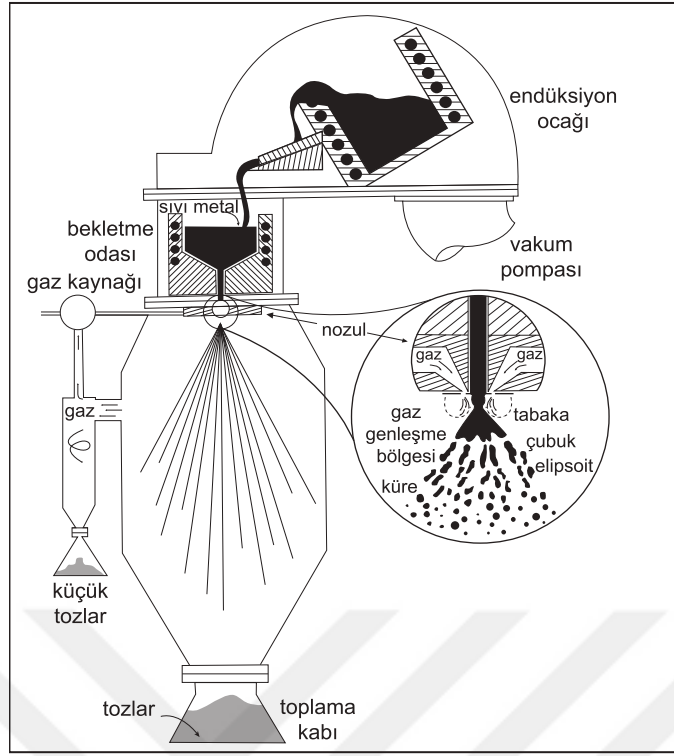
1.1.1.2. Atomizasyon Yöntemleriyle Toz Üretimi

Atomizasyon ergiyiğin parçacıklara ayrılması temeline dayanan, damlacıkların donarak parçacıkları oluşturması yöntemidir [1, 3]. Gaz, su ve santrifüj atomizasyon olarak 3 temel gruptan bahsetmek mümkündür [3]. Esas itibariyle eriyebilen her türlü malzeme akışkan halinin ayrıştırılması ile toz haline getirilebilir (upadhyaya). Bu yöntemler çoğunlukla metaller ve alaşımları ve de inter-metalikler için kullanılsa bile son zamanlar polimer ve seramikler içinde kullanılmaya başlamıştır [1].

1.1.1.3. Gaz Atomizasyonu

Erimiş metali parçalamak için genellikle hava, azot, argon veya helyumun kullanıldığı bir metottur [1, 3]. Sıvı malzemenin nozul çıkışında aniden genişleyen gaz ile karşılaşmasıyla parçacıklara ayrılması ve hızlı bir şekilde katılaşmaları ile toz üretimi gerçekleşir [1].

Çeşitli gaz atomizasyon ünitesi tasarımları bulunmaktadır. Bu tasarımlara ve kullanılan metalden ziyade toz boyutunu etkileyen iki temel parametre mevcuttur ki bunlar eriyik sıcaklığı ve de gazın çıkış hızıdır. Bu değerler ne kadar yükselirse o kadar ince boyutlu tozlar elde etmek mümkün hale gelmektedir. Elbette optimum bir seviyenin üzerine çıkılması da bazı sorunlara sebep olabilir. Şekil 1.3' de bir atomizasyon ünitesi örneği görülmektedir. Bunlar dışında dikkat edilmesi gereken diğer önemli hususlardan birisi geri basınç oluşumunu engellemek için gazın tahliyesi ve parçacıkların katılaşmadan duvarlara çarpmasını engelleyecek bir kule yüksekliğini sağlamaktır [1].



Şekil 1.3. Bir düşey gaz atomizasyon ünitesi örneği [1].

Gaz atomizasyonu haricinde su atomizasyonu ve santrifüj atomizasyon yöntemleri de bulunmaktadır fakat bu tezde kullanılan tozların gaz atomizasyonla üretilmesi ve diğer üretim metotlarının konu dışı olması münasebetiyle bu tezde yer verilmemiştir.

1.1.2. Tozların Karakterizasyonu

Herhangi bir TM uygulamasının başarısı geniş ölçekte metal tozlarının tam bir karakterizasyonu ile mümkündür [3]. Üretilen malzemelerin özellikler doğrudan tozların mekanik ve kimyasal özellikleri ile ilintilidir [1, 3]. Bu sebeple toz karakterinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Her bir toz malzeme üretiminde farklı tepki göstermektedir. Üretimi etkileyen bazı hususlar şu şekilde sıralanabilir;

- Parçacık boyut ve dağılımı,
- Parçacıkların topaklanması,
- Sürtünme,
- Akış ve paketleme,

- Yüzey pürüzlülüğü,
- Presleme basıncı,
- Tozların homojenizasyonu ve kirliliği.

Tozların saklandığı ortam şartları, elde edilen harmanın homojenizasyonu, tozların taşınması sırasında meydana gelebilecek sorunlar üretimi doğrudan etkileyecektir. Örneğin taşıma esnasında meydana gelen titreşim gibi sorunlar parçacıkların büyük olanlarının üst küçük olanlarının ise alt kısımda birikmesine sebebiyet verecektir [3].

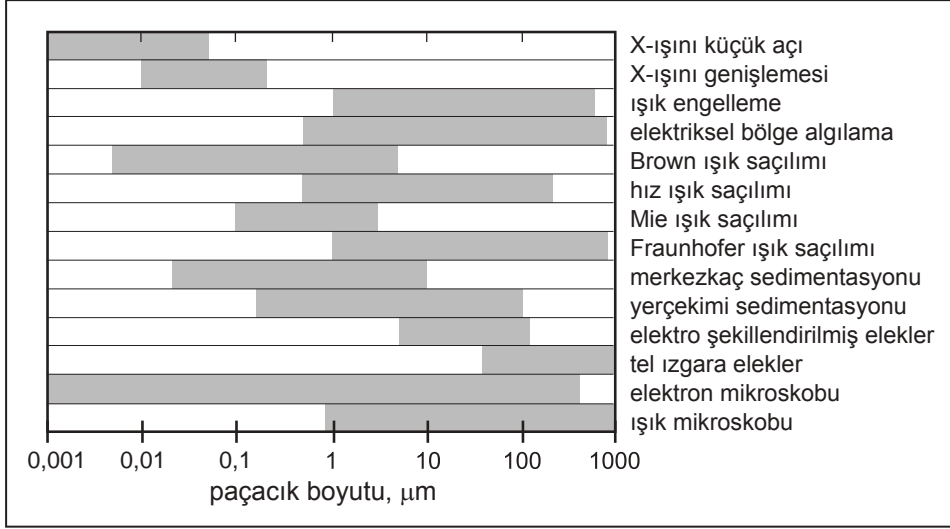
Parçacıkların dağılımı da genel malzeme özelliklerini etkilemektedir. Parçacık boyutunun küçülmesi dağıtımını da zorlaştıracaktır. Genellikle yüzey aktifleştirici sıvılar, mekanik veya ultrasonik çalkalama dağılımını iyileştirebilir. Dağılımı etkileyen bir diğer hususta toplanmanın temel sebeplerinden birisi nemdir. Bu sebeple tozların dağılım kalitesini artırmak için kurutmak önem arz etmektedir [1].

1.1.2.1. Parçacık Boyut Analizi

TM uygulamalarında kullanılan tozlar uygulamalara göre çeşitlilik ve elbette yüksek önem arz etmektedir. Aralarında fazla boyut farkı olan çok büyük ve çok küçük parçacıkların birbiri içerisinde homojen olarak dağılması zor olmaktadır. Bu sebeple toz boyutunun ölçülebilmesi ve uygun aralıktaki tozların seçilmesi işlemi her uygulamada ön şart niteliğindedir. Tozların boyutlarının ölçülmesinde kullanılan yaygın metotlar şunlardır;

- Işık saçılımı ve kırınımı,
- Elektrik alan algılaması,
- Işık engelleme,
- X-Işını teknikleri,
- Elek analizi,
- Mikroskop ile inceleme.

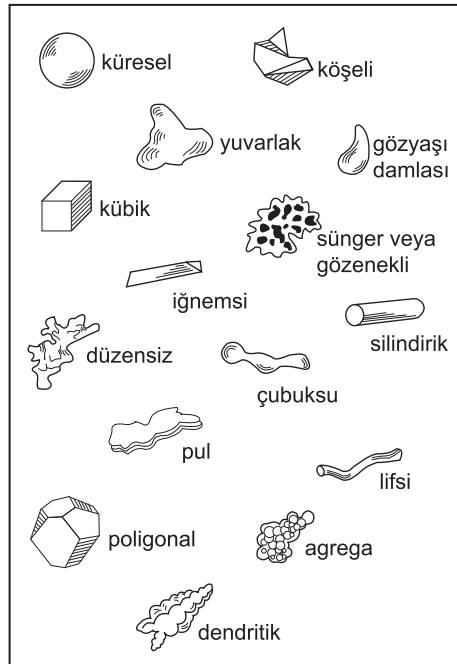
Bu yöntemlerin seçilmesinde etken sebep ölçülmek istenen tozun boyut aralığıdır. Belirli boyut aralıkları için seçilebilecek yöntemleri gösteren diagram Şekil 1.4'de verilmiştir.



Şekil 1.4. Bazı boyut aralıkları için seçilebilecek parçacık boyutu ölçüm yöntemleri [1].

1.1.2.2. Parçacıkların Şekil Özellikleri

Paketleme ve sıkıştırma özellikleri parçacık şekline bağlı olarak değişmektedir. Nitekim parçacık şeklini sayısal olarak ifade etmek son derece güçtür ve çoğu zaman mümkün olmamaktadır bu sebeple görünen şekilleri ile ilgili tanımlamalar kullanılmaktadır [1]. Parçacıkların sahip olabileceği bazı şekil özellikleri Şekil 1.5' de verilmiştir.

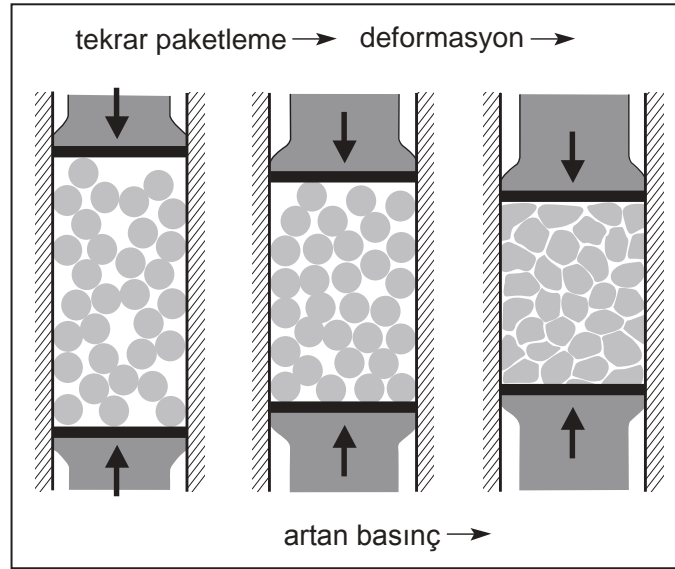


Şekil 1.5. Parçacıkların sahip olabileceği şekil özellikleri [1].

Parçacık şekillerinin sayısal özelliklerinin tespiti genellikle mikroskop görüntüleri ile elde edilmektedir. Parçacığın en uzun ölçüsüyle en kısa ölçüsünün bölüm oranı basitçe bir tanımlayıcı olarak kullanılmaktadır. Küre için 1 olan bu boyut oranı çubuk için 3 ile 5 aralığını bulabilirken pul gibi malzemeler için 200'e kadar çıkabilmektedir.

1.1.3. Tozların Sıkıştırılması

Elde edilmiş tozların kullanım alanlarına göre şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için kullanılan en yaygın metot Şekil 1.6' de gösterilen iki zımba arasında basınç vasıtasıyla şekillendirmeye yarayan kalıpta sıkıştırma işlemidir. Bu esnada meydana gelen iki tanecik davranışı vardır. Öncelikli olarak birbirlerine göre izafi konumlanma meydana gelir ve artık daha fazla parçacık hareket edemeyeceği zaman parçacıkların şekil değiştirmesi ile tozlara şekil kazandırılır ve işlem neticesinde malzemeler tozların birbirlerine bağlanmasını sağlayan ve taşınabilecek bir hale getiren ham mukavemet değerine ulaştırılır. Yoğunlaşma önce hızlı başlamasına rağmen gözenekler kapandıkça yavaşlamaktadır ve ulaşılan belirli bir yoğunluk değerinden sonra basınç artırılrsa dahi daha çok artırılamayan bir seviyeye ulaşacaktır.



Şekil 1.6. Tozların sıkıştırılması ve bu esnada meydana gelen kayma ve şekil değiştirme hareketi [1].

Partiküllerin sıkıştırılabilirlikleri ise onların

- Sertlik değerine,
- Şekil bilgisine,
- Tane boyutu ve dağılımına

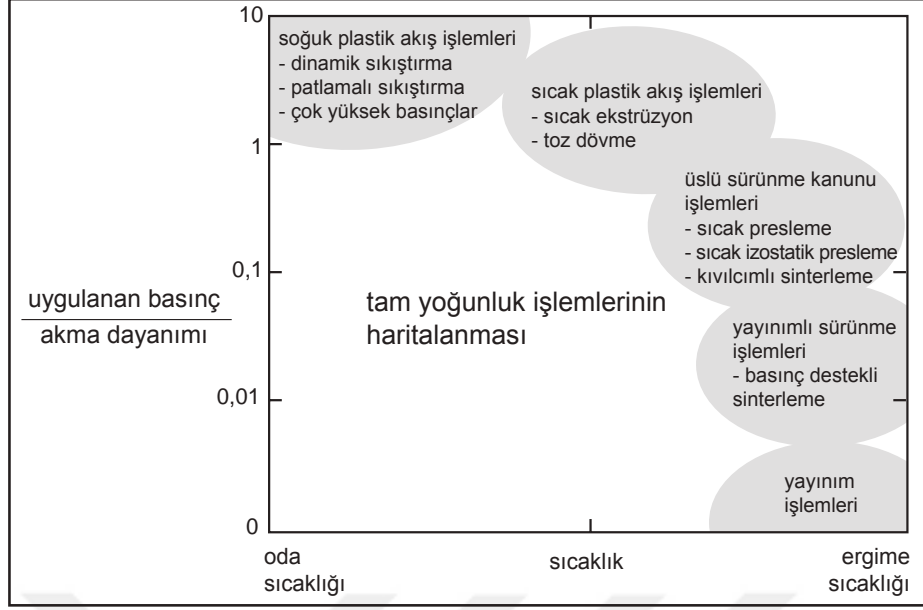
bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

1.1.3.1. Bazı Yoğunluk Terimleri

Görünür yoğunluk (ρ_g) tozun dökülmesinden sonra titreşime maruz kalmaksızın sahip olduğu yoğunluk değeridir. tozların şekil ve boyut bilgisi bu yoğunluk değeri için etkileyici bir sebeptir. Kalıpların tasarımında ve sıkıştırma esnasında uygulanması gereken yükün hesaplanmasında önemli bir etkidir [1].

Ham yoğunluk (ρ_h) sıkıştırma sonrası elde edilen numunenin sahip olduğu yoğunluk değeridir. Sıkıştırma sonrası malzemenin ham olarak adlandırılmasından dolayı bu yoğunluk değeri de ham yoğunluk denilmektedir. Sıkıştırılan malzemenin hacminin ağırlığına bölünmesi ile g/cm^3 cinsinden ifade edilen bir değer ile tanımlanır ve teorik yoğunluğa yüzde(%) mertebesinde kıyasla söylenir [1].

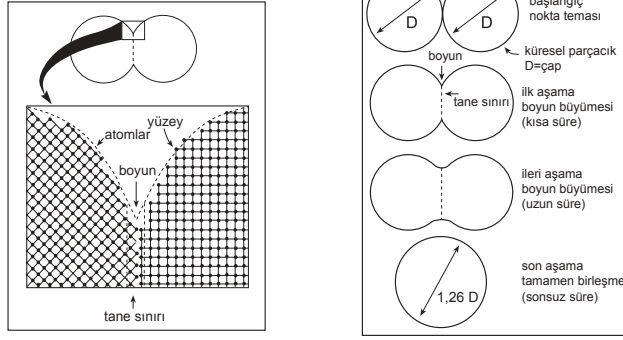
Sinterlenmiş yoğunluk (ρ_s) malzemenin sinterleme sonrası sahip olduğu yoğunluk değeridir. Teorik yoğunluğa en yakın yoğunluk değeri olarak nitelendirilebilir. *Teorik yoğunluk* (ρ_t) ise malzemenin hatasız ve tam dolu olarak kabul edildiği şartlar altında ulaşılabilecek maksimum yoğunluk değeridir [1]. Şekil 1.7' de yoğunlaştırma işlemlerini gösteren diagrama yer verilmiştir.



Şekil 1.7. Toz yoğunlaştırma basamakları [1].

1.1.4. Tozların Sinterlenmesi

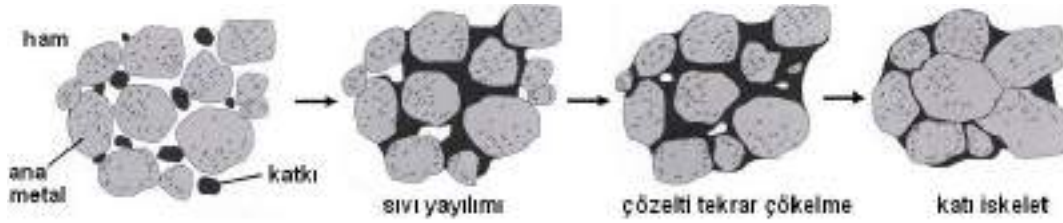
Her zaman olduğu gibi presleme sonrası elde edilen ürün, sahip olduğu düşük dayanım ve kırılganlığından dolayı, son ürün olarak kullanıma uygun değildir. Isıl işleme tâbi tutulmayan malzemenin mekanik özellikleri yeterli olmayacaktır bu mekanik özellikleri arttırmak için uygulanan ısıl işlem sinterleme olarak adlandırılmaktadır ve erime derecesinin altında atom hareketi olarak tanımlanan difüzyon mekanizmasının gerçekleşmesine izin verecek bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir [2]. Yüzey enerjisinin azalması sinterlemenin itici gücüdür. Atomların mikro yapıdaki boşluklara doğru hareket edip bu bölgeleri doldurması ile bir bağ meydana gelir. Şekil 1.8a' da parçalar arası sinter bağının şematik gösterimi ve Şekil 1.8b' de genel sinterleme mekanizması verilmiştir.



Şekil 1.8. Sinterizasyon mekanizması ve atomik düzeyde yapının gösterimi [1].

1.1.4.1. Sıvı Hal Sinterlemesi

Sıvı fazın oluşumu sinterleme hızını artırmaktadır. Sıvı faz sayesinde tanelerin birbirine bağlanması ve faz içerisinde daha hızlı yayılımı sağlamaktadır. Bu tür sinterlemenin gerçekleşmesinde temel gereksinim ıslatmadır. Islatma genellikle katının sıvı içerisinde çözüldüğü durumlarda gerçekleşir. İlâveten bu çözünebilirlik katının sıvı içinden yayınabilmesine olanak sağlar. Şekil 1.9' de sıvı hal sinterlemesine ait şematik gösterim verilmektedir.



Şekil 1.9. Sıvı hal sinterlemesi ve gerçekleşme basamakları [1].

1.1.5. Üretilen Parçaların Karakterizasyonu

Sistem tasarımı yaparken dikkate aldığımız mekanik özelliklerin tamamı temel ölçüde malzemelerin mikro yapıları ile doğrudan alakalıdır. Bu sebeple mikro yapının iyi anlaşılması malzemenin mekanik davranışı hakkında tahminde bulunmaya olanak sağlar. Mikro yapı incelemesi için zımparalama-parlatma-dağlama adımlarını içeren bir dizi işlem gerekmektedir. Bu yapıda elde edilen mikroskop görüntüsünde tane ve gözenekler görünür hale gelir. Taneler, tane sınırı ile ayrılan, farklı yönelimlere sahip kristal yapılardır.

Malzemeler de meydana gelen gözenek miktarı gözeneklilik olarak toplam hacmin boşluk olan kısmı olarak tanımlanabilir. Sinterleme yoğunluğu ile teorik yoğunluğun oranlanması ile hesap edilebilir ve birimsizdir. Bunun yanı sıra mikroskop görüntüleri de bilgisayar ortamında işlenerek gözeneklilik hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Unutulmalıdır ki gözenekler mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

Darbe ve kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikler mikro yapı değişimlerine karşı çok hassastırlar. Bu sebeple malzeme üretiminden sonra sertlik ve dayanım değerlerinin kontrolü yapıp bu yeterli görülürse o halde darbe tokluğu ve süneklik değerlerini incelemek daha uygun olacaktır [1]. Gevrek malzemelerde sertlik deneyinin sonucunda bazı çatlamlar meydana gelir ve oluşan bu çatlakların boyları bize malzemenin kırılma tokluğuna dair bir bilgi verebilir.

Bilinen benzer metotlar ile diğer mekanik özelliklerin tespiti ise standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilebilir.

1.2. Isıl İşlem

Isıl işlemler son şeklini almış malzemelerin mekanik özelliklerini düzenlemek, alaşım elementlerinin dağılımını dengelemek gibi sebeplerle sıkça kullanılan yöntemlerdir [1]. Hızlı soğuma ile birlikte karbon ve varsa diğer alaşım elementleri için difüzyon kabiliyeti azalmaktadır [4]. Bu sebeple son anda görülecek olan mikro yapılar difüzyon hızı ile yakından alakalıdır [4].

Uygulanan ısıl işlemi etkileyen başlıca parametreler ise şu şekilde sıralanabilir [1].

- Isınma hızı,

- Tutma sıcaklığı ve süresi,
- Soğutma hızı ve bekleme süreleri,
- Yeniden ısıtma süreleri,
- Son soğuma hızı ve atmosfer.

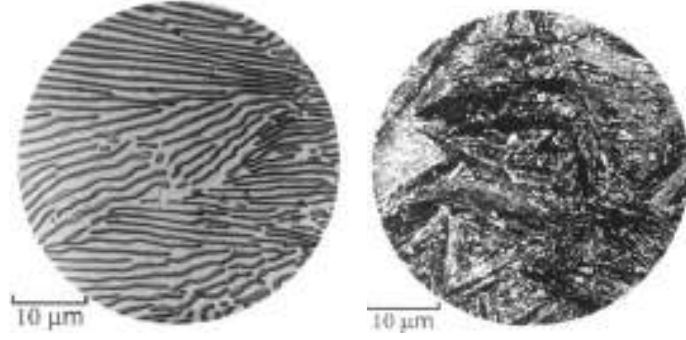
Tüm bu parametrelerin belirli bir yapı-özellik kombinasyonunu elde etmek için uygun sıra ve süre ile tatbik edilmesine ısıtma işlemi adı verilmektedir [4].

Geleneksel metotlarla üretilen metaller gibi sinterlenerek üretilmiş bir çok metal de takip eden süreçte ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerin başlıca kazanımları dayanım ve sertlik artışıdır bu ise süneklik kaybı gibi bir dezavantajı doğurmaktadır [1]. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için malzemeler tavlama ısıtma işlemlerine tabi tutulabilir fakat bu da dayanımda ciddi anlamda azalma demek olacaktır bu sebeple malzemelerin dayanımlarını süneklikten çok fazla kaybetmeksizin geliştirmek istediğimizde literatürde beynit olarak bilinen mikroyapının elde edilmesi yani östemperleme ısıtma işleminin tatbik edilmesi gerekmektedir.

Tavlama ısıtma işlemleri soğumanın yavaş ve kontrollü gerçekleştirildiği mikroyapının oluşabilecek en kararlı denge durumuna gelmesinin sağlandığı ısıtma işlemleridir bunun tersine östemperleme ısıtma işlemleri gibi sertleştirme ısıtma işlemleri ise kompozisyona bağlı olarak östenit fazındaki bir çeliğin hızlı bir şekilde soğutulmasıyla daha kararsız bir mikro yapı oluşturulması işlemidir [4].

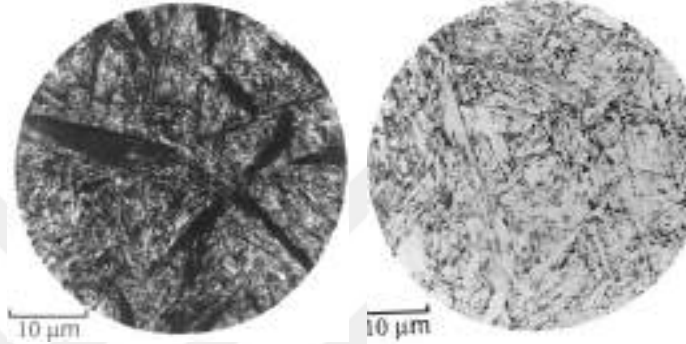
1.2.1. Beynit

Beynit mikroyapısı 1920'lerin sonlarında Davenport ve Bain tarafından keşfedilmiş ve aynı çelikte perlit ve martenzitten farklı olarak oluşan bir mikroyapı diye tanımlanmış yapıdır [5]. Beynit yapısı alışılmadık bir şekilde umut veren mekanik özellikler göstermiştir ki aynı sertlikte temperlenmiş martenzitten daha yüksek tokluk sergilemiştir [5]. Şekil 1.10' de perlit, beynit ve martenzit yapılarına ait mikroyapı resimleri görülmektedir.



(a) Perlit

(b) Üst Beynit

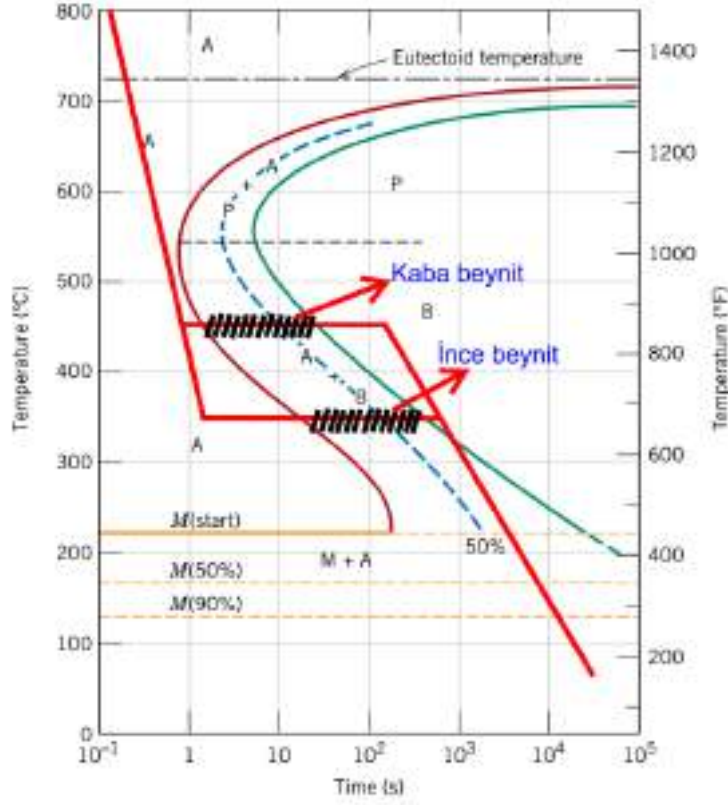


(c) Alt Beynit

(d) Martenzit

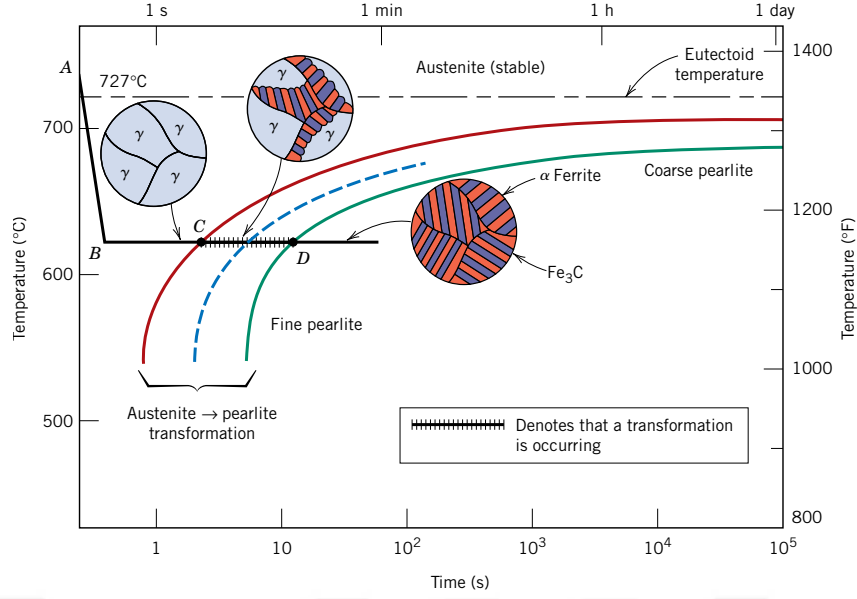
Şekil 1.10. Perlit beynit ve martenzit yapılarına ait mikroyapı görüntüleri [5].

Perlit ve martenzit dönüşüm sıcaklıkları arasında kalan alanda demir atomlarının difüzyonu gerçekleşmemektedir karbonun difüzyonu ise son derece zor olmaktadır bu engeller neticesinde oluşan perlitten daha küçük bir yapı olan beynit yapısı bu sıcaklık değerleri arasında yeterli sürenin tanınmasıyla elde edilebilmektedir [4]. Beynitik yapı sıcaklığın düşük ya da yüksek olmasına göre iki temel hale bürünmektedir: Alt beynit ve üst beynit [6]. Beynit dönüşümlerine ait teorik gösterimler Şekil 1.11' de gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Alt beynit ve üst beynit yapılarının oluşumunu gösteren izotermal dönüşüm eğrisi [7].

Bu yapılar sürekli soğuma veya sabit sıcaklıkta dönüşüm ile elde edilebilmektedir. Östenit dönüşüm sıcaklığı karbür boyutunu ve bu da beynitin türünü belirleyecektir [4]. İnce beynit martenzit başlangıç (M_s) sıcaklığının hemen üzerinde oluşmaya başlar ve 400 °C sıcaklık aralığında oluşur [4]. Daha yüksek sıcaklıklarda ise (550 °C üst limit) kolaylaşan karbon difüzyonu ayrışan karbür parçacıkları genellikle iğne doğrultusunda kesikli olarak dizilir ve kaba beynit yapısını oluştururlar [4]. 500 °C sıcaklığın üzerinde C difüzyonunun daha da artmasıyla oluşan perlit yapısını gösteren diagrama ise Şekil 1.12' de yer verilmiştir.



Şekil 1.12. Perlit dönüşüm grafiği [7].

1.2.1.1. Üst (Kaba) Beynit (400-550 °C Sıcaklık Aralığı)

Üst beynit mikroyapısı ferritin ince plakalarını içerir ve her biri yaklaşık $0.2 \mu\text{m}$ kalınlık ve $10 \mu\text{m}$ uzunluktadır [6]. Üst beynitte karbidler karbonca zengin östenitten çökürlür ve üst beynitik ferrit ise çökeltilerden aridir [6]. Östenit içerisinde çözülmüş halde bulunan karbonun sementite ilk olarak dönüşmesi ve büyümesi ile çekirdeklenme başlar bunun neticesinde yakın bölgedi karbonlarda buraya bağlanırlar ve içerisinde karbon kalmayan östenit ferrite dönüşür. Ancak ferrit çekirdeklenmesi öncelikli başladıysa karbonlar ferrit/östenit arayüzeylerinin uç kısımlarına itilir ve östenitin içerisinde sementit oluşumu gerçekleşir [8, 9]. En yaygın karbid sementit olsa dahi yüksek silikon konsantrasyonuna sahip çelikler gibi istisnalar da mevcuttur [6].

Al ve Si gibi çeliğe katıldığı zaman sementit dönüşümünü geciktirecek yeteri kadar alaşım elementi varsa sementitin hep birlikte dönüşümü baskılanabilir. Üst beynit mikroyapısında sadece ferritik beynit ve karbonca zengin kalıntı östenit bulunabilir ama ortam sıcaklığına soğuma esnasında kalıntı östenit çözünebilirse martenzitte görülebilir [6].

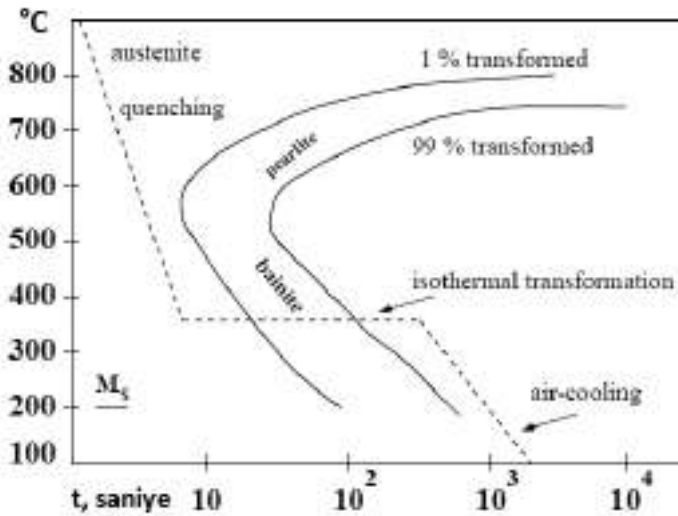
1.2.1.2. Alt (İnce) Beynit (250-400 °C Sıcaklık Aralığı)

Alt beynit, üst beynite çok benzeyen mikroyapı ve kristalografik özellikler göstermektedir. Aralarında ki temel fark sementit parçacıkları alt beynit yapısında ferrit plakaları içerisinde de çökeller. Ferrit içerisinde ki karbidler her zaman sementit olmak zorunda değildirler. Kimyasal kompozisyona ve dönüşüm sıcaklığına göre diğer karbid türleri de öncelikli çökebilirler [6]. Şekil 1.10c' de ise buna uygun olarak ince beynit yapısı görülmektedir.

Temperlenmiş martenzitin aksine alt beynit sementit parçacıkları çoğunlukla tek bir yönelim gösterirler. Temperlenmiş martenzitte karbidler widmanstatten düzlemlerinde çökmeye eğilimlidir [6].

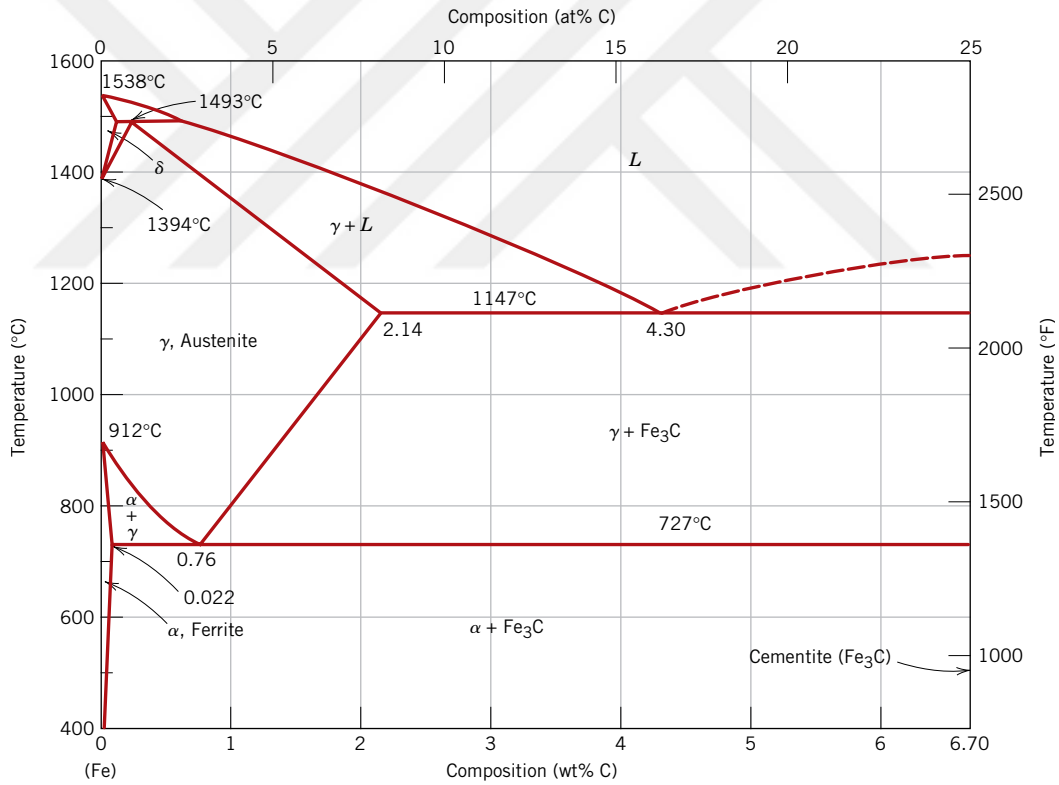
1.2.2. Östemperleme Isıl İşlemi

İzotermal bir dönüşüm olup beynit oluşturmak maksadıyla yapılmaktadır. Basit anlatımla çeliği östenitlemeyi ve takip eden süreçte izotermal dönüşüm eğrisi burnun altında kalan bir bölgeye soğutup bu sıcaklıkta tüm östenit yapıyı beynite çevirene kadar bekleme sürecini içeren ısıl işlemdir [9]. Bekleme süreci fırın içerisinde olabileceği gibi tuz banyosu gibi bir atmosferde de gerçekleştirilebilir. Şekil 1.13' de şematik olarak östemperleme ısıl işlemi görülmektedir.



Şekil 1.13. Östemperleme ısıl işlemi grafiği.

Östempirlemede çelikle öncelikle yapının tamamen östentitlenebilmesi için Fe-C denge diyagramında görülen östentileme sıcaklığı olan A_{cm} çizgisi üzerinde, çeliğin ihtiva ettiği karbon miktarını kesecek doğrultuda, uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve yapının östentit fazına dönüşebilmesi için yeterli süre beklenir. Takip eden süreçte izotermal dönüşüm için numuneler M_s sıcaklığı üzerinde bir sıcaklıkta tuz banyosu ortamında bekletilir bu bekleme süresinin çeliğin iç ve dış yapısının tamamının beynitik yapıya dönüşmesine izin verecek kadar uzun olması gerekmektedir. Dönüşüm tamamlandıktan sonra numunelerin oda sıcaklığına soğutulması uygulanır, çeliğin kimyasal kompozisyonu ve geometrik ölçüleri göz önünde bulundurularak soğutma uygun ortam ve sürede gerçekleştirilmelidir. İç gerilmelerden dolayı meydana gelebilecek olan çarpılma gibi hatalardan kaçınmak için yavaş soğutma uygulanabilir [9, 10, 8, 11]. Şekil 1.14' de Fe-C denge diyagramı ve östentileme minimum sıcaklığı olan A_{cm} çizgisi görülmektedir.



Şekil 1.14. Demir-Karbon denge diyagramı [7].

Östemperlemenin temel avantajı yakın sertlik değerlerine rağmen süneklik ve darbe tokluğu istenen yerlerde ve su verme esnasında oluşabilen çatlakların azaltılmasında geleneksel su verme ve takip eden temperleme işlemlerinin yerine tek başına geçebiliyor olmasıdır. Bu özellikleri sayesinde bilhassa kalın kesitli ve sade karbonlu çeliklerde yaklaşık 50 HRC sertlikte yüksek tokluk sağlamaktadır [8, 9]. Bunların yanı sıra mekanik özellikler açısından, tamamı beynitten oluşan bir yapı yerine %80'lik bir beynitik yapı ihtiva eden malzemelerin, daha üstün oldukları bilinmektedir[8, 11].

Şekil 1.13' de görüldüğü üzere östemperleme ısıl işlemi M_s sıcaklığının üzerinde gerçekleşmekte ve izotermal bekleme sürecinde ortam tuz banyosu olarak ayarlanmaktadır. Tuz banyosuyla östemperleme yapılması koşulunda kullanılan tuzlarla alakalı nazarı dikkate alınması gereken bazı mevzular vardır ki bunlar şöyle sıralanabilir;

- Isıyı homojen ve dengeli olarak dağıtabilmeli,
- Uygun viskozite değerine sahip olmalı,
- Isıl işlem gören numune ile tepkimeye girmemeli,
- Kullanım esnasında temizliğine dikkat edilmeli.

Bu adımlar beynitik yapının oluşum süresini ve buna bağlı olarak mikroyapıyı etkileyeceğinden yüksek derecede önem arz etmektedir [8, 11].

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Chakraborty, Bhattacharjee ve Manna (2008), yaptıkları çalışmada SAE 52100 rulman çeliğinin beynitik+martenzitik mikroyapısını geliştirecek optimum işlem parametrelerinin tespiti için bir takım östemperleme ve su verme programı tatbik etmişlerdir. İşlem sonuçlarını optik mikroskop, elektron mikroskopu, XRD analizi, sertlik, çekme ve darbe deneyleri ile kontrol edip doğrulamışlardır. Çalışmaları göstermiştir ki 270 °C ve 30 dak. ısıtma işlem parametrelerine sahip deney numuneleri suda su verme sonrasında beynit+martenzit ikili yapısını oluşturduğunu ve sertlik, darbe ve çekme dayanımı değerlerinin optimum seviyede olduğunu göstermiştir [12].

Saeidi ve Ekrami (2009), yaptıkları çalışmada ısıtma işlemlerle 4340 çeliğine ait farklı mikroyapılar elde etmişlerdir. Bunlar beynit, martenzit, ferrit-martenzit ve ferrit-beynittir. Mekanik testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar göstermektedir ki; ferrit-beynit yapısı ferrit-martenzit yapısından da beynit yapısından da daha iyi sünekliğe ve darbe tokluğuna sahiptir [13].

Putatunda ve arkadaşları (2009), yaptıkları çalışmada yüksek dayanım ve beklenenin üzerinde yüksek kırılma tokluğuna sahip yeni bir ösferritik çelik geliştirmişlerdir. Çalışmada östemperleme sıcaklığının oda sıcaklığı koşullarında mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Düşük alaşım, yüksek silikon ve orta karbon oranlarına sahip olan bu çelik 927 °C' de 2sa boyunca östenitlenmiş ve takiben 260-400 °C aralığında bir kaç farklı sıcaklıkta östemperlenmiştir. Elde edilen mikroyapılar XRD, SEM ve optik metalografi yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Çalışma için elde edilen en iyi sonuçlar 316 °C sıcaklık 2 saat östemperleme parametrelerine sahip olan deney numunelerinde gözlemlenmiştir [14].

Abbaszadeh ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada D6AC düşük alaşımlı ultra yüksek dayanımlı çeliğe beynit yapısının farklı morfolojilerinin etkilerini incelemişlerdir. Bunun için numuneleri 910 °C' de 40 dak. boyunca östenitlemişler ve 3 farklı şekilde su vermişlerdir. Numunelerin bir kısmı yağda su verilerek soğutulurken bir kısmı 330 °C tuz banyosunda ve kalan kısmı da 425 °C tuz banyosunda farklı sürelerde su verilerek soğutulmuştur. Daha sonra tüm numuneler 2sa boyunca temperlenmiştir. Mikro yapı ve kırık yüzey

görüntüleri SEM ve optik mikroskop görüntüleri ile karakterize edilmiştir [15].

Farzad ve arkadaşları (2013), çalışmalarında yüksek karbon içerikli ve mangansız bir alaşım tasarlayıp dökerek numuneler hazırlamışlardır. Hazırladıkları numuneler 200-350 °C sıcaklık aralığında östemperleme prosesine göre ısıl işleme tabi tutulmuştur. Malzemeler XRD, optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile karakterize edilmiştir. Numunelerde 697 HV sertliğe ulaşıp bir kaç on nanometre kalınlığında beynitik ferritik plakalar elde edilmiştir. Bu eşi görülmemiş sertlik değerinin olağanüstü karbon alaşımından olduğunu söylemişlerdir [16]

Mousalou ve arkadaşları (2018), yaptıkları çalışmada %0.26 ağırlık C oranına sahip çeliğe maksimum beynit hacim oranını elde etmek ve ultra ince beynitik mikroyapıya ulaşabilmek için çok kademeli östemperleme ısıl işlemi çalışmışlardır. Deney numunelerini mikroyapı, mekanik özellikler ve kristalografik karakterleri açısından analiz etmişlerdir. Sonuçlar göstermektedir ki; kısmi beynit dönüşümünün başladığı yüksek sıcaklığın hemen ardından daha düşük bir sıcaklıkta takip eden östemperleme ısıl işlemi kaba östenit/martenzit alanlarının, beynitik ferritik plakaları ve film östeniti içeren, çok daha ince beynit yapılarına dönüştüğünü gözlemlemişler ve bu durumun beynitik mikroyapının iyileştirilmesine öncülük ettiğini söylemişlerdir [17].

Gong ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmada nanobeynit dönüşüm davranışını, nötron kırınım ölçümü, SEM ve EBDS analizleri ile 523 K ve 527 K sıcaklıklarda izotermal bekleme öncesinde kısmi su vermenin olduğu ve olmadığı, iki ısıl işlem için karşılaştırmışlardır. Yapıda hali hazırda varolan martenzitin nanobeynit dönüşümünü hızlandırdığını belirtmişlerdir. Var olan martenzite komşu olarak ortaya çıkan beynitik plakaların neredeyse aynı yönelime sahip oldukları da çalışmanın sonucu olarak gözlemlenmiştir [18].

Gurumurthy ve arkadaşları (2018), yaptıkları çalışmalarında ticari olarak elde edilen AISI 4340 çeliğine ferrit/beynit çift fazlı yapısını elde etmek için kısmi östenitleme işlemi daha sonrasında ise izotermal su verme (östemperleme) ısıl işlemi alt beynit sıcaklık aralığında tatbik etmişlerdir. Orta karbon çeliği olduğundan dolayı ikili faz sürekli ferrit fazı içerisinde iyi dağılmış beynit fazı içermektedir. Bu sebeple numuneler kritik sıcaklıklarda, 750, 770 ve 790 °C 'lerde 2sa boyunca tutulmuş ve 350 °C sıcaklıkta tuz banyosuna 24 dak. ve 24sa boyunca iki farklı süre zarfında bırakılmıştır. Takip eden süreçte numuneler havada soğutulmuş ve mekanik özellikleri incelenmiştir [19].

Saeidi ve Ekrami (2010), yaptıkları çalışmada AISI 4340 çeliğinin üç mikroyapısının,

beynit, ferrit/beynit ve temperlenmiş beynit, hem dayanım hem de tokluğunun her ikisinde geliştirmek için bu çeliklere ısı işlem uygulamışlardır. Numunelere ait çekme, darbe ve sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; beynit/%34ferrit faza sahip olan çeliğin temperlenmesi ile çekme ve charpy darbe testi sonuçlarında önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir [20].

Kazemi ve arkadaşları (2014), yaptıkları çalışmalarında çelik çubuk ile takviyelendirilmiş küresel grafitli dökme demirin darbe tokluğunu araştırmışlardır. Kompozit malzemeler kum kalıba döküm metoduyla tekniğiyle üretilmişlerdir. Sonrasında iki farklı sıcaklıkta, 350 ° ve 400 °, östemperleme ısı işlemi uygulanmıştır. Numuneler SEM ve optik mikroskop görüntüleriyle incelenmiştir. Mekanik özelliklerin tespiti için sertlik ve charpy darbe deneyleri oda sıcaklığında uygulanmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki; küresel grafitli dökme demirin darbe tokluğu değeri çelik çubuk takviyesi ile artış göstermiştir. Buna ek olarak östemperleme ısı işlemi de harika bir şekilde darbe tokluğuna etki etmiştir ancak 350 ° de östemperlenen numunelerin darbe toklukları 400 ° de östemperlenen numunelerden daha iyi olduğunu gözlemlenmiştir [21].

Wang ve arkadaşları (2016), yaptıkları çalışmada 0.22C-2.0Mn-1.0Si-0.8Cr-0.8 (Mo+Ni)(%ağ.) çeliğinde beynit/martenzit multifaz mikroyapı çalışmışlardır. Söz konusu çelik, toklaştırma mekanizmasını izah edebilmek için ve farklı ısı işlem parametrelerinde martenzit/östenit bileşiminin oynadığı rolü tespit edebilmek için 325 ° - 400 ° aralığında östemperleme ısı işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak yüksek sıcaklıkta östemperlenen numunelerin geniş beynitik/ferrit kafes ve blok martenzit/östenit bileşiminden dolayı daha düşük dayanım ve zayıf tokluğa sahip olduğu görülmüştür. Martenzit başlama sıcaklığı (M_s) altında östemperlenen numuneler oda sıcaklığında harika darbe darbe tokluğu göstermişlerdir. Mikroyapılar ve mekanik özellikler arasında ki ilişki ise SEM, TEM ve kristalografik analiz ile araştırılmıştır [22].

Wang ve arkadaşları (2009), yaptıkları çalışmada düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliğe düşük sıcaklıkta östemperleme ısı işleminin mikroyapı ve darbe tokluğuna etkisini araştırmışlardır. Ultra ince karbitsiz beynitik mikroyapı gözlemlenmiştir. Bu yapı beyniti ferrit ve kalıntı östenitin kompozisyonundan oluşmaktadır. Östemperlenmiş numunelerin darbe enerjisini sönmemesi düşük sıcaklıkta temperlenmiş numunelere kıyasla çok daha iyidir. Sertlik değerlerinde ise temperlenmiş numunelerin az bir farkla daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [23].

Bakhtiari ve Ekrami (2009), yaptıkları çalışmada 4340 çelik çubuğu 850 °C' de 1 saat östenitleyip 700 °C' de 90 dak. beklettikten sonra 300 - 450 °C sıcaklık aralığında 1sa süre ile tuz banyosunda östemperlemişlerdir. SEM sonuçları göstermiştir ki; östemperleme sıcaklığının artmasıyla beynit morfolojisi de ince beynitten kaba beynite doğru yönelmiştir. Çekme, darbe ve sertlik değerleri ise sıcaklık değerlerinin artmasıyla azalma göstermişlerdir. Buna istisna olarak 450 °C' de östemperlenmiş çift fazlı olarak üretilmiş çelikte çekme dayanımı ve sertlik açısından artış görülürken toplam uzama ve darbe enerjisinde azalma görülmüştür. Çekme deney numunelerinin kırık yüzey incelemelerine göre numunelerin bu östemperleme sıcaklık aralığında gevrek davranış gösterdiğini de söylemişlerdir [24].

Avishan ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı karbid içermeyen beynitik çeliklerin kırılma tokluğunu incelemişlerdir. Sonuçlar göstermektedir ki; yüksek karbonlu kalıntı östenitin hacim oranı ve biçimi sünekliği etkileyen iki önemli faktör olduğunu ve ek olarak kafes östenit yapısının miktarının kırılma tokluğunu geliştirmeye yarayan temel olduğunu söylemişlerdir [25].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, saf demir tozları (%99,98) ve doğal grafit tozlarının ağırlıkça %1,2 oranında karıştırılması ile hazırlanan kompozisyonun oda sıcaklığında preslenmesi ve ardından sinterlenmesi ile malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonraki adımlarında %1.2 ağırlıkça karbon içeren çeliğe farklı sıcaklık ve sürelerde östemperleme ısıl işlemleri uygulanmıştır bunun neticesinde oluşan mikroyapılar incelenmiş bu mikroyapıların mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

3.1. Numunelerin Üretilmesi

Deney numuneleri, Demir(Fe) tozu içerisinde ağırlıkça %1,2 oranında grafit tozunun karıştırılıp oda sıcaklığında belirli bir basınç değeri altında preslenmesiyle prizmatik geometride üretilmiştir. Numuneler denemeler sonucunda her bir numunenin %92 doluluk değerine sahip olacağı şekilde üretilmiştir. TM yöntemleriyle üretilen deney numuneleri 1180 °C sıcaklıkta argon gazı atmosferinde 20 dak. süresince sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında numuneler fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi sonucunda numunelerin doluluk değeri %98 değerine kadar ulaşmıştır.

Numunelerin üretiminde kullanılan Fe tozu Höganäs firmasına ait ABC100.30 kodlu atomizasyon metodu ile elde edilmiş saf demir tozudur. Fe tozuna ait element dağılımı Tablo 3.1' de verilmiştir. Grafit tozu ise Alfa Aesar firmasına ait Alfa Aesar Doğal Grafit tozudur.

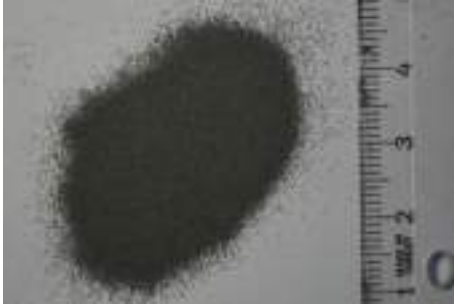
Tablo 3.1. Höganäs ABC100.30 Fe tozuna ait element dağılımı(%).

Fe	Karbon	Diğerleri
99,957	0.003	0.04

Bu tezde kullanılan saf Fe tozunun seçilmesinde, bu alanda TM metoduyla üretilen %1,2 karbon oranına ait ham çeliğin mekanik özelliklerinin tespitinin henüz tam olarak yapılmamış olmasıdır. Bu hususta mevcut olan literatür eksiğini gidermek ve daha sonra yapılacak çalışmaların temelini oluşturmak maksadı güdülmüştür.

Numunelerin üretim adımları şu şekildedir;

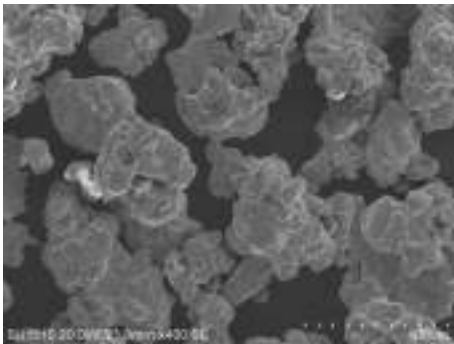
- Tozların temin edilmesi,
- Oranlama ve tartılma,
- Karıştırma,
- Sıkıştırma,
- Sinterleme,
- Isıl işlem,
- Son işlemler (boyutlandırma ve yüzey temizliği).



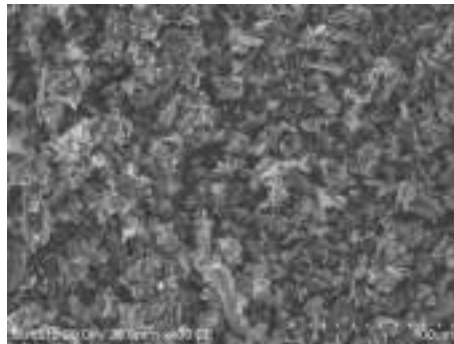
(a) Fe tozlarına ait görüntü.



(b) Grafit tozlarına ait görüntü.



(c) Fe tozu SEM görüntüsü.



(d) Grafit tozu SEM görüntüsü

Şekil 3.1. Tozlara ait SEM ve başlangıç görüntüleri.

Şekil 3.1a' da demir tozlarına ait başlangıç fotoğrafı, Şekil 3.1b' da ise grafit tozlarına ait başlangıç fotoğrafı, Şekil 3.1c' da Fe parçacıklarının süngerimsi ve nisbeten yuvarlak bir yapıda olduklarını gösteren SEM görüntüsü ve Şekil 3.1d' de ise daha keskin köşelere ve düzensiz bir şekil dağılımına sahip grafit parçacıkları görülmektedir.

3.1.1. Parçacık Boyut Analizi

1.1.2.1 başlığı altında belirtildiği gibi TM yöntemleri ile üretimde parçacık boyutları paketlenme, üretim, karakterizasyon ve malzeme özellikleri açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple parçacık boyutunun çok değişken bir skalada değil belirli bir değer aralığında olması gerekmektedir. Ticari olarak elde edilen belirli bir boyut aralığına sahip olan, tozların boyut aralıklarının doğruluğunu kontrol etmek için parçacık boyut analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu analiz Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM biriminde mevcut bulunan Cilas 1190 Particle Size Analyzer marka ve modellenli boyut analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görsel Şekil 3.2' de görülmektedir.



Şekil 3.2. Cilas 1190 Parçacık boyut analiz cihazı.

3.1.2. Karışımın Hazırlanması

Karışım hazırlama işlemi tozların tartılmasını ve müteakiben karıştırılmasını kapsayan işlemler serisidir. Tozlar Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi (BİTAM) biriminde mevcut bulunan 10^{-4} gr tartım hassasiyetine sahip RADWAG AS 60/220.R2 marka hassas terazi ile tartılmıştır. Tartımın yapıldığı terazi Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tozların tartılması için kullanılan RADWAG marka hassas terazi.

Toz karışımının, karbon bakımından %1,2 (ağ.) oranı, tozların Tablo3.2'de gösterildiği gramajlarda tartım yapılmak suretiyle sağlanmıştır. Tozların karıştırılması ise Necmettin Erbakan Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Şekil 3.4' de görülen FRITSCH Pulverisette 5/2 marka gezegen tipi karıştırıcı ile haznelerde öğütücü bilye olmaksızın 50 rpm ve 30 dak. boyunca karıştırılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2. Tozların karıştırılmasında kullanılan ağırlık değerleri.

Deney Numunesi	Fe	Karbon
Darbe Deney Numunesi	22,523 gr	0,270 gr



Şekil 3.4. Tozların karıştırılmasında kullanılan FRITSCH marka gezegen tipi karıştırıcı.

Grafit tozları kendinden yağlayıcı olması sebebiyle karışım esnasında başka yağlayıcılar kullanılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Demir tozlarının saf ve yumuşak olmasından dolayı dönme hızı hazne cidarına sıvanma olmasını engelleyecek kadar düşük fakat karışımın homojen bir surette gerçekleşmesini sağlayacak kadar hızlı seçilmiştir. Belirlenen hız ve süre değerleri yapılan bir dizi deneme sonucu optimum olarak seçilmiştir.

3.1.3. Toz Karışımının Preslenmesi

Elde edilen harmandan, istenen deney numunelerinin elde edilebilmesi için basınç altında preslemenin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. TM ile üretilen numunelerin gözenekliliği %0-35 arasında olmaktadır [1]. Üretilen deney numuneleri bu değer aralığına uygun olacak şekilde denemeler sonucu %8 gözeneklilik miktarına sahip olarak üretilmiştir. Tozların boyutları ve sahip oldukları yumuşak yapıları sebebiyle çok yüksek basınç değerlerine ve özel kalıp tasarımlarına ihtiyaç duyulmadan imkanlar dahilinde presleme işlemi gerçekleştirilebilmiştir. Bunun aksine yüksek gözenek miktarı ise mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyeceğinden istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Presleme işlemi belirlenen koşullar altında, darbe numuneleri için prizmatik olarak deney numunelerinin üretilmesiyle gerçekleşmiştir. Bu deney numunelerinin üretildiği kalıba ait görüntü Şekil 3.5' de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Numunelerin preslendiği kalıba ait görüntü.

Darbe deneyi için ASTM E23-18 standardı temel esas kabul edilmiştir. Deney için gerekli numuneler standartta belirtilen ölçülere göre üretilmiştir. Çalışmanın ekonomik ve aynı zaman da yoğunluk dağılımının homojen olabilmesi için ince parçaların üretimi uygun görülmüştür. Bu gaye doğrultusunda parçalar 5x10x55 mm boyutlarında üretilmiştir[26]. Darbe numuneleri yine Metalürji Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboraturında mevcut bulunan Şekil 3.6a' de gösterilen MSE marka pres ile gerçekleştirilmiştir. Presleme esnasında 850 Mpa değerinde basınç kullanılmıştır. Sıkıştırma esnasında plastik deformasyona izin verilmesi açısından 30 s süresince basınç altında beklenmiştir. Üretilen darbe deney numunelerine ait görüntüler Şekil 3.6b' de gösterilmektedir.

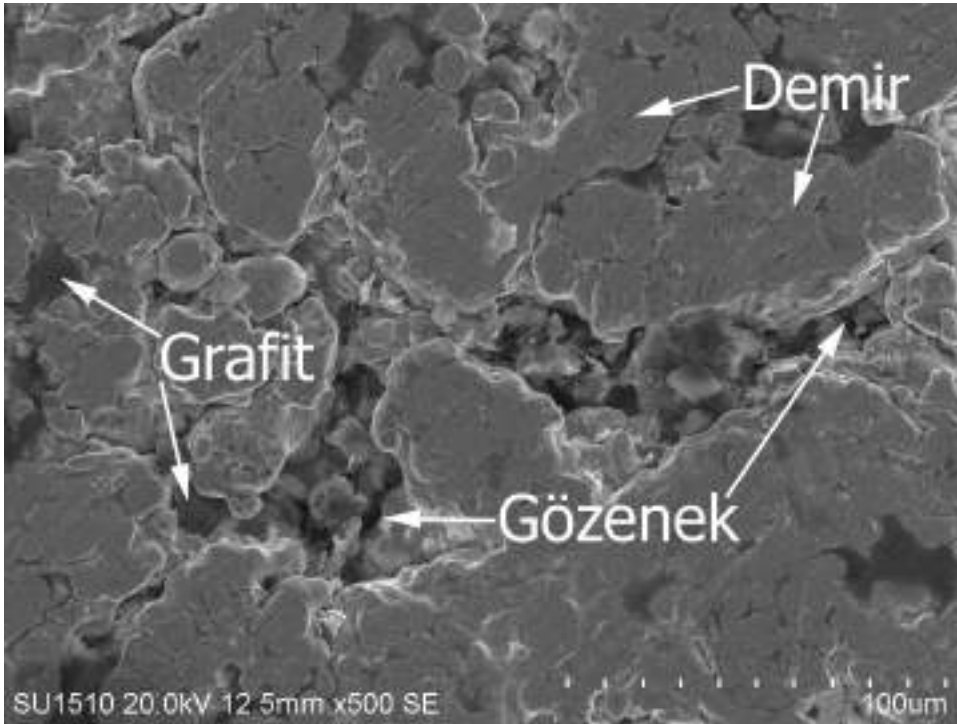


(a) Çift etkili press.

(b) Preslenmiş deney numuneleri.

Şekil 3.6. Pres ve çıkan nihai ürüne ait görseller.

Sıkıştırma esnasında, Fe tozunun grafit ile karıştırılması marifetiyle, ek yağlayıcıya ihtiyaç duyulmamıştır. Toz grafit Fe parçacıklarının şekil değişimi sırasında, birbirleri arasında ve de kalıp ile parçacıklar arasında, meydana gelen sürtünmeyi en aza indirmektedir. Bu hadise parçacıkların birbiri üzerinde kaymasını kolaylaştıracağından aynı basınç değerinde kuru olarak sıkıştırılan bir numuneden daha yüksek doluluk oranına sahip numuneler elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Şekil 3.7' de demir tozlarının üzerinden plastik deformasyon neticesinde oluşan yönelimler, gözenek yapıları ve grafit tozlarının demir tozları arasında dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.7. Preslenmiş tozlara ait SEM görüntüsü.

3.1.4. Numunelerin Sinterlenmesi ve Östemperleme Isıl İşlemi

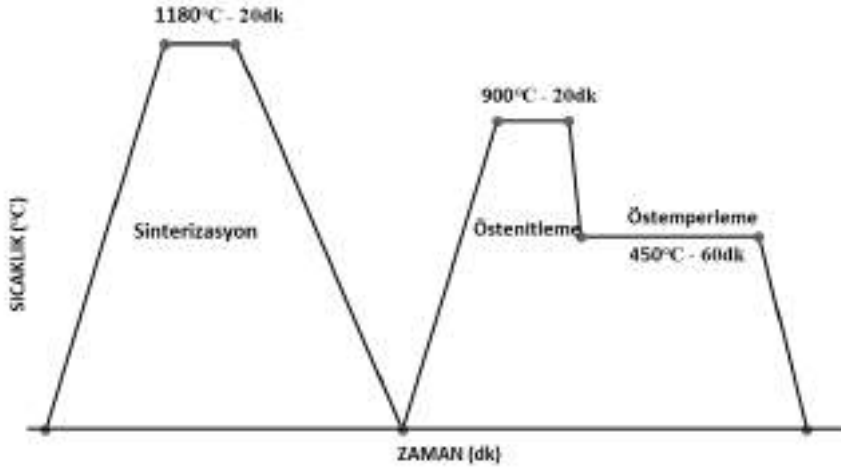
Üretimleri tamamlanan ve şekillerini ağırlıklarına rağmen koruyabilecek mukavemete sahip olan ham numunelerin artık yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmesi için difüzyon mekanizmasına izin veren bir sıcaklıkta atomların hareketine dayanan ve bağ oluşturmalarına izin veren bağlanma işlemini sağlayacak sinterleme işlemi gerçekleştirilmelidir. Sinterleme sonrasında malzeme artık dışarıdan gelen etkilere de karşı koyabilir hale gelmiş durumdadır.

Numunelerin sinterizasyon işlemi Şekil 3.8' de gösterilen Nevola marka tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Fırın ortamı oksijenden âri ve argon gazıyla sürekli beslenerek atmosfer kontrol altında tutulmuştur. Bu tasarım içeriye oksijenin girmesini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Oksijenin ortamda bulunması yüzeyde oksitlenme ve de aynı zamanda dekarbürizasyonsa sebep olarak yüzey ile merkez arasında karbon oranı bakımından dengesizliğe sebep olacağından istenmemektedir. Oksijen, yüzeyde bulunan karbon ile bağ kurarak gaz halinde tahliye olacağından karbon dağılım dengesini bozmaktadır.



Şekil 3.8. Nevola marka tüp fırına ait görüntü.

Sinterleme demirin karbonu tamamen çözebileceği östenit bölgesinde bir sıcaklık değeri seçilerek yapılmıştır. Bu değer 0,003 karbon oranına sahip bir demir için yaklaşık olarak 920 °C'dir. Bu değer Şekil 1.14' de gösterilen denge diyagramından çıkartılmaktadır. Karbon atomlarının difüzyon hızının artırılması, gözenek miktarının nisbeten azaltılması ve yayınının daha kısa sürede tamamlanabilmesi için bu değer üzerinde 1180 °C sıcaklığında 20 dak. süresince sinterleme gerçekleştirilmiştir. Bu süreyi tükendikten sonra fırının ısıtma fonksiyonu durdurularak numuneler fırın içerisinde oda sıcaklığına soğuması beklenmiştir. Soğuma esnasında argon gazı akışı devam ettirilmiştir. Sinterleme mekaniğini gösterir diagram Şekil 3.9' de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Deney numunelerinin sinterlenmesine ve ısıl işlem parametrelerine ait diagram.

Sinterleme işleminin yapılacak olduğu fırının ısınma karakterinin doğruluğu termocouple ile kontrol edilmiştir. Fırın göstergede okunan değer ile paralellik arz eden bir ısınma göstermektedir. Fırının ısınmasında bir sorun olmadığından sinterleme işlemleri bu fırın ile tamamlanmıştır. Kontrolün sağlandığını gösteren resim Şekil 3.10' de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Atmosfer kontrollü tüp fırının ısınma doğruluğunu gösteren ölçüm.

Sinterleme işleminin tamamlanmasının ardından numunelerin ısıl işlemleri tatbik edilmiştir. Numuneler 3 farklı sıcaklık değerinde ve 4 farklı süre zarfında östempereleme ısıl işlemine tâbi tutulmuştur. Sıcaklık değerleri sırasıyla 300-375-450 °C ve 30-60-90-120 dak. olarak belirlenmiştir. Numunelerin ısıl işlemleri KNO_3 ve $NaNO_3$ tuzlarının ağırlıkça %50' şer karışımlarından mamül tuz banyosu ortamında gerçekleştirilmiştir. Östempereleme

ıslı işlemleri gerçekleştirilirken östenit yapının elde edilebilmesi için 900 °C sıcaklığa 10 °C/dak. hızla çıkılmış ve burada 30 dak. boyunca östenitleme yapılmıştır. Takip eden süreçte ise belirlenen sıcaklıktaki tuz banyolarına daldırılan numuneler yine belirlenen süre değerleri sonrasında havada soğutulmak üzere tuz banyosundan çıkartılmıştır. Numuneler hali hazırda standartlarda belirtilen ölçülere göre üretildiğinden nihai işlem olarak talaşlı imalata ihtiyaç duyulmamış sadece yüzey temizlikleri yapılarak karakterizasyon işlemleri yapılmıştır.

3.2. Numunelerin Yoğunluk Ölçümleri

TM ile üretilen malzemelerde gözeneklilik ve yoğunluk önem arz etmektedir. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan çeşitli metotlar bulunmaktadır civalı porozimetre ile yahut arşimet prensibi ile çalışan yoğunluk ölçüm cihazlarıyla ölçüm yapılabileceği gibi piknometre adı verilen ve helyum gazı ile çalışan cihazlarla da yoğunluk ölçümü yapılabilir. Bu tez de Şekil 3.11’ de gösterilen micromeritics AccuPyc II 1340 marka piknometre kullanılmıştır.

Piknometreler hacmi bilinen bir kap içerisine konulan bir numunenin yoğunluğunu, kapladığı hacme ve oluşan basınç farkına dayalı olarak hesap eden cihazlardır. Cihazda her bir numune için 10’ ar defa süpürme ve 10’ ar defa yoğunluk ölçümü yapılarak her bir numune için bu değerlerin ortalaması alınıp numunelerin ayrı yoğunluk değerleri belirlenmiş ve bütün numunelerin yoğunluk değerleri baz alınarak genel bir ortalama yoğunluk değeri tayin edilmiştir.



Şekil 3.11. Yoğunluk ölçümlerinin gerçekleştirildiği micromeritics marka piknometre cihazı.

3.3. Numunelerin Sertlik Ölçümleri

Bu çalışmada üretilen numunelerin yüzey sertliklerinin ölçümü Brinell Sertlik Ölçüm Metodu(BSM) ile yapılmıştır. Üretilen numunelerin gözenekli yapılarından dolayı ve daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi için geniş bir alanı taramak adına bu yöntem seçilmiştir.

Gerçekleştirilen testler Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM biriminde mevcut bulunan EmcoTest DuraScan marke modelli otomatik sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney şartları 2,5 mm çapa sahip elmas bilye uçla 62,5 kgf kuvvet altında yeterli plastik deformasyonun gerçekleşebilmesi için 30sn boyunca gerçekleştirilmiştir. Uygulanan kuvvet d/D oranını olması gerektiği gibi 0.2 ile 0.7 arasında gerçekleştirecek şekilde seçilmiştir. Deneylein gerçekleştirildiği sertlik ölçüm cihazına ait görüntü Şekil 3.12' de verilmiştir.



Şekil 3.12. EmcoTest DuraScan otomatik sertlik ölçüm cihazı.

3.4. Numunelerin Darbe Deneyleri

Deney numunelerinin kırılma tokluğunu ve darbe emme kapasitesinin tespiti için Charpy Darbe deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney 150J enerji seviyesine sahip çekiç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin ve numunelerin hazırlığı ASTM E23-18 kodlu deney standardına göre yapılmıştır. Kullanılan darbe test cihazı Necmettin Erbakan Üniversitesi

Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında mevcut bulunan test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görüntü Şekil 3.13’ de verilmiştir.



Şekil 3.13. Darbe test cihazı görseli.

3.5. Numunelerin SEM Analizleri

Üretilen numunelerin mikroyapılarının ve kirstal yapılarının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bitam biriminde mevcut olan SU1510 Scanning Electron Microscope marka modelli cihazda incelenmiştir. SEM cihazına ait görüntü Şekil 3.14' de verilmiştir.



Şekil 3.14. SU1510 SEM cihazı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu başlık altında gerçekleştirilen ölçüm ve deneylerin sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1. Yoğunluk Ölçümleri

Aynı kimyasal bileşime sahip farklı ısı işleme koşullarına tabi tutulmuş numunelerin ham ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri analiz edilmiştir. Elde edilen bu değerlerin ortalamaları Tablo 4.1’ de ve Çizelge ??’ de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney numunelerine ait yoğunluk ve standart sapma değerlerini gösteren tablo.

Deney Numunesi	Ham Yoğunluk (gr/cm ³)	Sinterlenmiş Yoğunluk (gr/cm ³)
Darbe Numuneleri	7,226±0,021	7,747±0,029

Bütün numunlerin sinterleme sonrası sahip oldukları yoğunluk değerinde beklendiği üzere artış görülmüştür. Bu artış presleme sonrası mekanik kilitlenme ile bütünlüğü koruyan çelik tozlarının temas yüzeyleri arasında meydana gelen difüzyon bağları ve bunun neticesinde gözenekliğin azalmasına bağlanmıştır. Yoğunluk değerleri başlık 3.2 altında belirtildiği gibi her bir numune için 10 ölçümü kapsayan ve tüm bu değerlerin ortalamasını kabul eden bir hesaplamayla yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin standart sapma değerleri de hesaplanmıştır bu değerlerde ciddi bir farkın görünmeyişi sinterleme ısı işleminin güvenilirliğine ve tekrar edilebilirliğine dair kuvvetli bir delil teşkil etmektedir.

4.2. Sertlik Ölçümleri

TM yöntemiyle elde edilen numuneler sahip oldukları gözenek miktarlarından dolayı makro ve mikro sertlik ölçümlerinde çok farklı sonuçlar verebilmektedir [8]. Bu farklılığı ortadan kaldırmak için geniş bir alan taraması yapabilen Brinell Sertlik Ölçüm Metodu (BSM) kullanılmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği şartlar 3.12 başlığı altında verilmiştir. Basma deneyi ve 3 noktadan eğme deneyi genellikle sertlik değeri ile paralellik ihtiva ettiğinden bu konularla ilgili öngörüler sertlik değerleri üzerinden yürütülmüştür [27]. Deney gruplarına ait ortalama sertlik değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

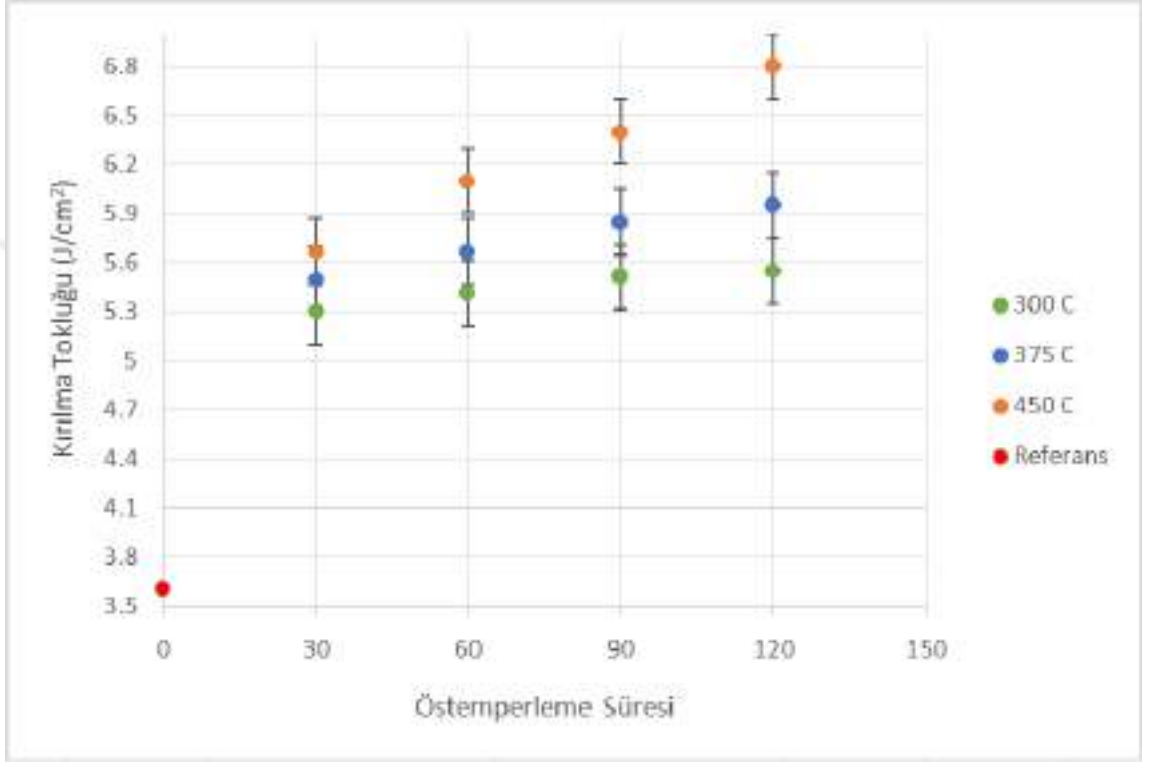
Tablo 4.2. Deney gruplarına ait ortalama sertlik değerlerini(HBW) gösterir tablo.

Deney Grubu	Ortalama Sertlik Değeri(HBW)
REFERANS	87.86
OS 30300	232.0
OS 60300	221.4
OS 90300	220.0
OS 12300	213.2
OS 30375	224.8
OS 60375	213.6
OS 90375	207.0
OS 12375	202.8
OS 30450	217.8
OS 60450	210.6
OS 90450	202.4
OS 12450	201.2

Malzemelerin sünekliği çoğunlukla sertlik değeri ile paralellik arz etmektedir. Çoğunlukla tokluk değeri de malzemenin sünekliği ve bu yolla sertliği ile ilişkilidir. Sertlik değerlerinin kırılma tokluğuyla olan ilişkisi 4.3'de incelenmiştir.

4.3. Charpy Darbe Testi

150J enerji ile yüklenmiş çekicinin belirli bir h yüksekliğinden serbest bırakılarak çenelerde bağlı bulunan deney numunesine darbe yükü uygulayarak kırması temin edilmiştir. Malzemelerin kırılma tokluğu değerleri Şekil 4.1’ de ve tablo 4.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tokluk değerlerine ait grafik.

Tablo 4.3. Deney sonucu elde edilen tokluk değerleri.

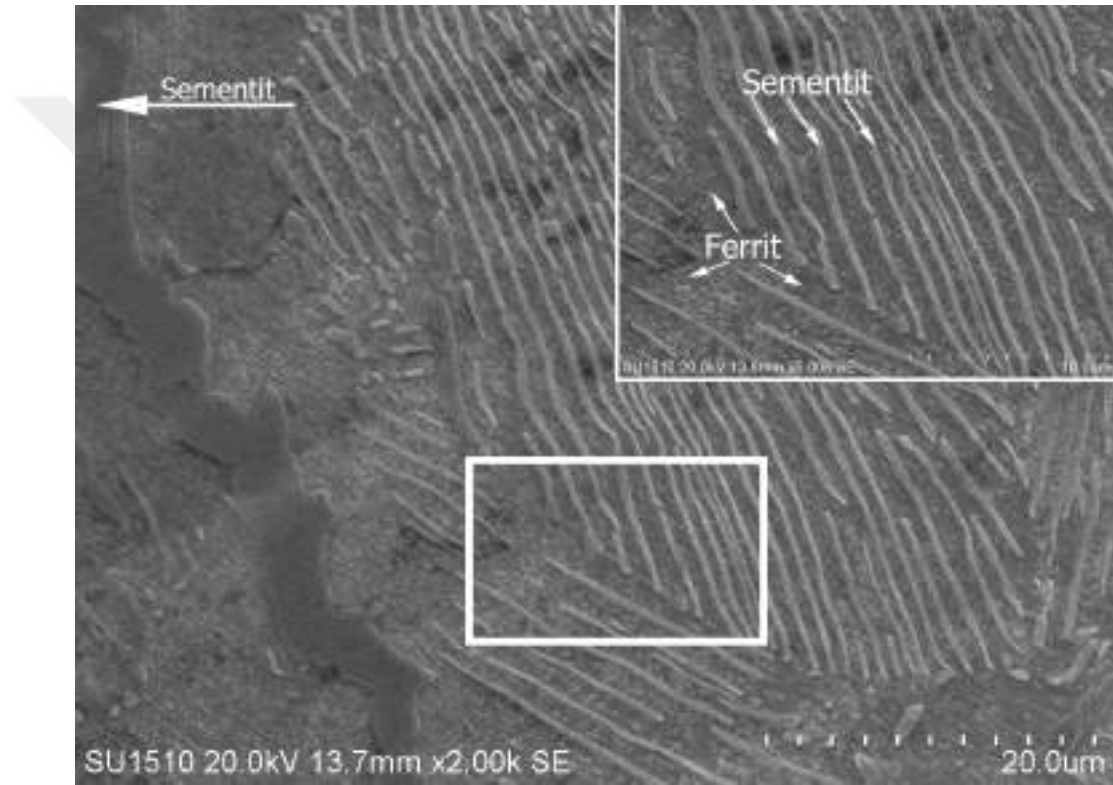
Deney Grubu	Kırılma Tokluğu (J/cm ²)
REFERANS	3,6
OS 30300	5,30
OS 60300	5,41
OS 90300	5,51
OS 12300	5,55
OS 30375	5,50
OS 60375	5,67
OS 90375	5,85
OS 12375	5,95
OS 30450	5,67
OS 60450	6,10
OS 90450	6,40
OS 12450	6,80

Genel anlamda görüldüğü üzere bütün tuz banyosu sıcaklık değerlerinde artışla birlikte kırılma tokluğu değerleri de artış göstermiştir. Bununla birlikte düşük sıcaklık olarak seçilen 300 °C sıcaklıkta östemperlenen numunelerin darbe tokluğu değerlerinde yavaş olan difüzyon hızları sebebiyle fazla artış görülmemiştir. Buna benzer olarak 450 °C sıcaklık bandında ise artan difüzyon hızı ile beynit dönüşümü artarak malzemenin darbe tokluğu değerini hızlı bir şekilde yükseltmiştir. Bunun yanı sıra her bir ısıl işlem grubuna ait en uzun süre olan 120 dakikalık östemperleme ısıl işlemine tabi tutulan deney numunelerinin ise öngörüldüğü gibi en yüksek tokluk değerine sahip oldukları görülmüştür. Bunun sebebinin ise, karbon difüzyonunun yeterli süre boyunca devam ederek sementit yapısını kalınlaştırması ve ferrit fazının daha çok alana yayılmasını sağlamasıdır. Sünek olan ferrit fazının uygulanan darbe kuvvetini sönmekteki başarısı burada görülmüştür.

4.4. Mikroyapı Görüntüleri

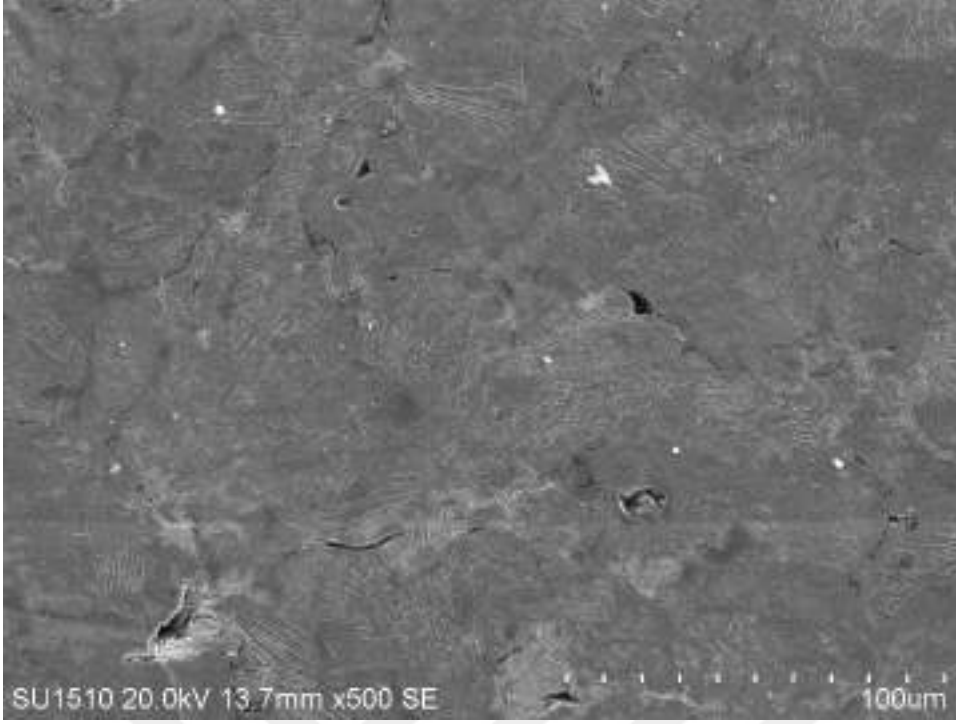
4.4.1. Sinterleme Sonrası Mikroyapı Görüntüleri

Aynı şartlar altında preslemiş deney numunelerinin Şekil 3.8’ de aynı şartlarda sinterlenmesi ve ısıl işlem sonucu fırın içerisinde yavaş soğutulmasıyla perlit ihtiva eden ilk mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Bu mikroyapı görüntüleri Şekil 4.2’ de verilmiştir.



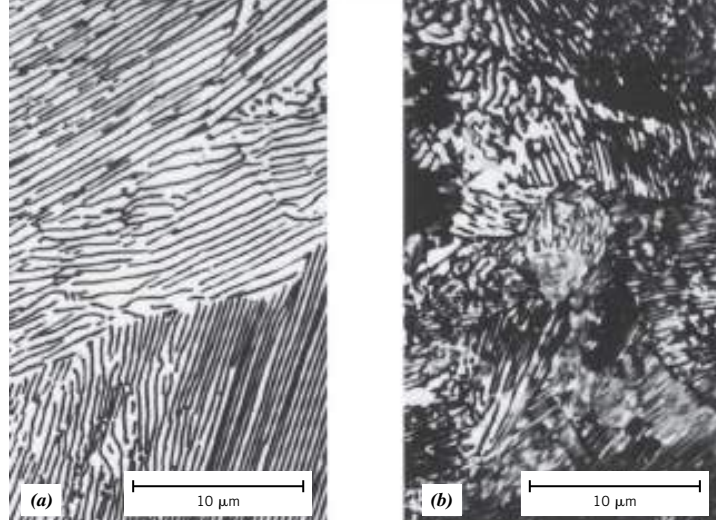
Şekil 4.2. Sinterleme sonrası elde edilen perlitik yapı.

Şekil 4.2’ da ilk olarak tane sınırında çökelmeye başlayıp giderek kalınlaşan ötektoid öncesi birincil sementit ve daha sonra tane içerisinde çökelmeye başlayan ötektoid sonrası ikincil sementit yapıları ve bu yapıların içerisinde gömülü bulunduğu ferrit matrisi görülmektedir.

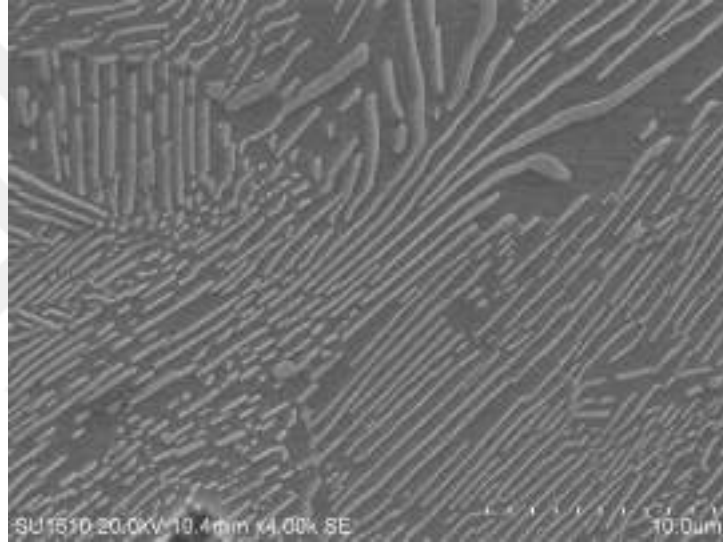


Şekil 4.3. Azalan gözenek yapısı ve sürekli sementit ağını gösteren SEM görüntüsü.

Şekil 4.3' de ise aynı zamanda presleme sonrası yapı olan Şekil 3.7' de gösterilen gözenek yapılarının büyük ölçüde sinterleme ısıl işlemi sonucu giderildiği, yapıya katılan grafit tozlarının tamamının demir ile bağ yaptıkları ve birincil sementitin sürekli olarak tane sınırında devam ettiği görülmektedir. Bunların yanı sıra gözeneklerin ise sinterleme mekaniği neticesinde tane sınırlarına itildiği görülmüştür [1].



(a) Literatürde kaba (a) ve ince (b) perlit kıyaslamasını gösteren görüntü [7].



(b) Sinterlemiş numuneye ait Perlitik yapıyı gösteren SEM görüntüsü.

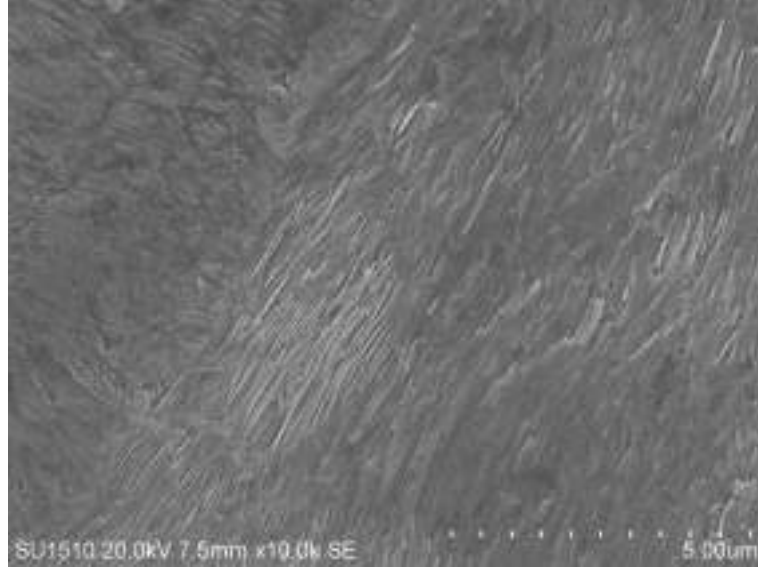
Şekil 4.4. Kaba perlit ve ince perlit kıyaslamasını gösteren mikroyapı görüntüsü.

Şekil 4.4' de ise sinterleme sonrası elde edilen perlit yapısının kaba perlit yapısı olduğu görülmektedir.

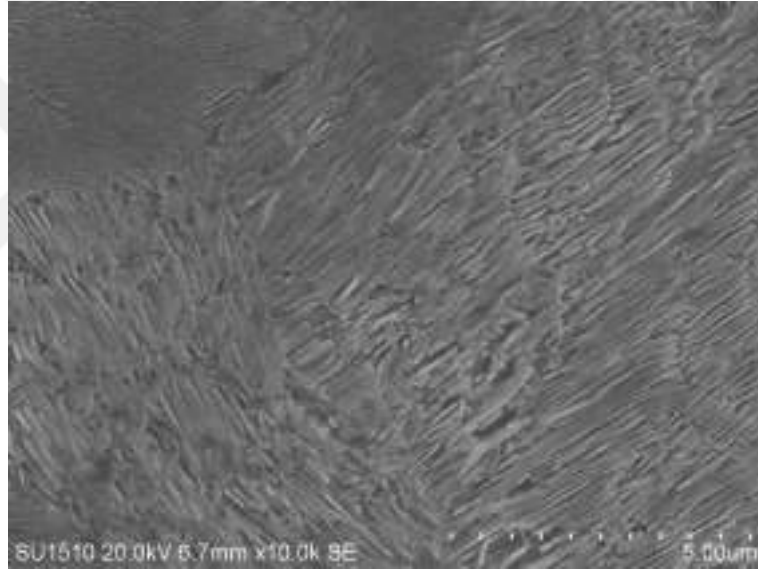
4.4.2. Östempereleme Sonrası Mikroyapı Görüntüleri

Sinterleme sonrasında elde edilen mikroyapı görüntülerinde var olan birincil sementit yapılarının tane sınırlarında var olmaları sementit ağının seramik ailesinden olması ve bütün yapı boyunca devam etmesi sebebiyle darbe kuvvetlerine karşı çok dayanıklı olmadığı bilinmektedir. Yapılan ısı işlemlerle tane sınırına çöken birincil sementit ağı ve tane içlerindeki perlitik yapı AC_3 çizgisi üzerinde, demirin östenit fazına dönüştürülerek, C atomlarını yapısında çözmesi sağlanmıştır. Takip eden süreçte soğuma hızı ve sıcaklık kontrolü ile tane sınırlarında tekrar sürekli sementit ağı oluşumu engellenmiştir. Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7' de sürekli sementit ağının oluşmadığı görülmektedir. Bu da numunelerin numunelerin kırılma tokluklarının artmasında büyük rol oynayan bir parametredir.

Şekil 4.5' de görülmektedir ki artan östempereleme süresiyle beynit iğnelerinin kalınlığı görülmektedir. Beynitik yapının kabalaşması ile sertlik değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Sertlik değeri OS 30300 grubu için 232,0 HBW olarak kaydedilirken OS 12300 grubuna ait numuneler için 213,2 HBW olarak kaydedilmiştir. Beynitik yapının avantajı olarak, perlite göre sertliğin artması ile azalan tokluk olgusunun aksine, sertlikte yaşanan artış değeri ile birlikte kırılma tokluğu değeri $6,8 \text{ J/cm}^2$ değerine kadar ulaşmıştır. Tüm değerler referans grubu numuneler ile kıyaslandığı zaman değerlerin neredeyse 2 katı yükseldiği görülmektedir. Beynitik yapının tokluk istenen alanlarda perlite üstünlüğü açıkça görülmektedir.

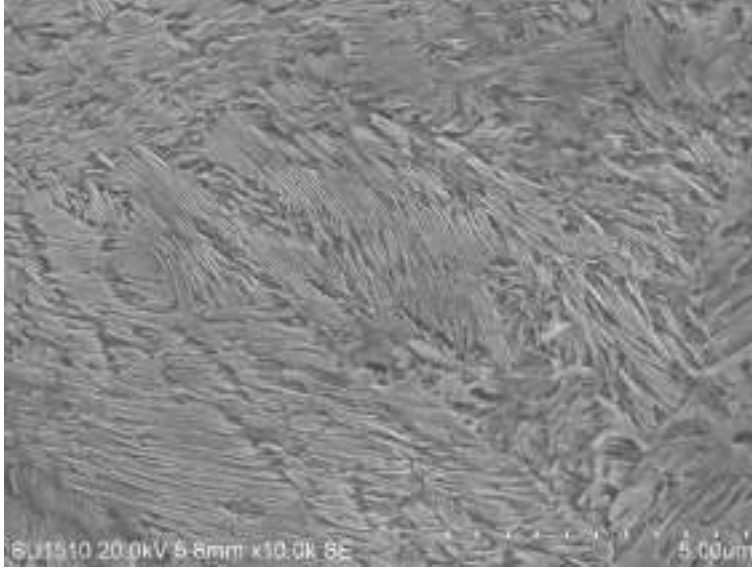


(a) Tuz banyosunda 300 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.

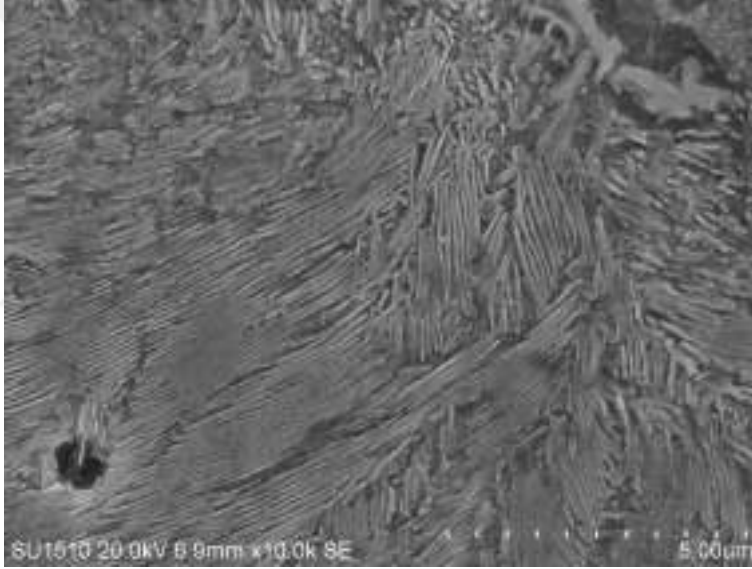


(b) Tuz banyosunda 300 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.

Şekil 4.5. Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.



(a) Tuz banyosunda 375 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.

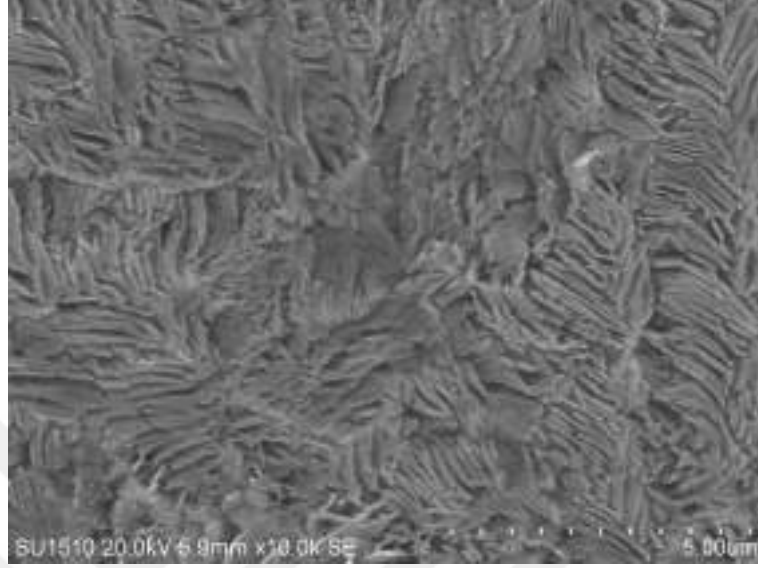


(b) Tuz banyosunda 375 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.

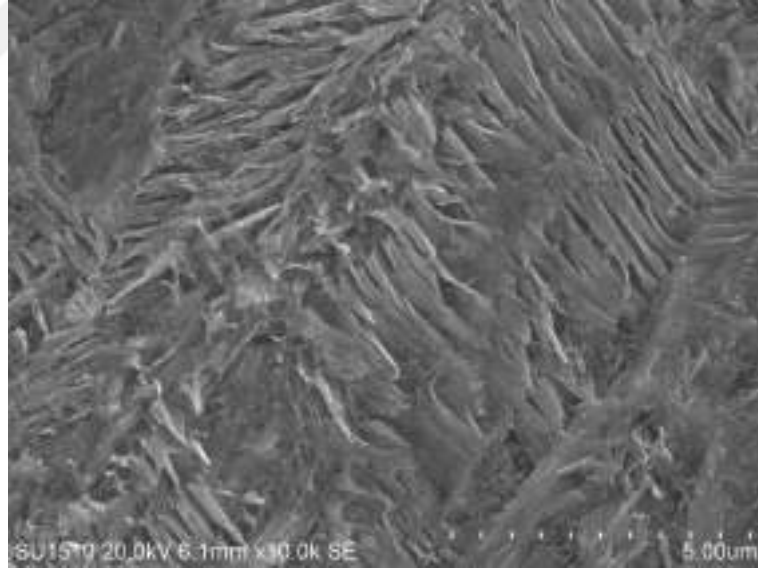
Şekil 4.6. Tuz banyosunda 375 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.

375 °C sıcaklıkta ve aynı süre de östemperlenen deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri Şekil 4.6' de verilmiştir. 300 °C' de östemperlenen numune grubuna göre beynit iğnelere kalınlaşıp uzadığı görülmektedir. Bunun artan sıcaklık ile C atomlarının difüzyonunun kolaylaşması ile alakalı olduğu düşünülmektedir. İzotermal dönüşüm grafiğine göre hala ince beynit bölgesinde gerçekleştirilen bu sıcaklık aralığında 300 °C sıcaklıkta östemperlenen numunelere göre artan sıcaklık ile beynit yapısında irileşme gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bir önceki grupta olduğu gibi bu grupta da sertlik değerinde artan süre ile artış

görülmüştür. Bunun sebebinin aynı şekilde kabalaşan beynitik yapının sertlik değerini artırıyor olmasıdır. bununla beraber kırılma tokluğu değerinde aynı şekilde azalırken artışa dönen bir eğilim sergilemiştir.



(a) Tuz banyosunda 450 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.



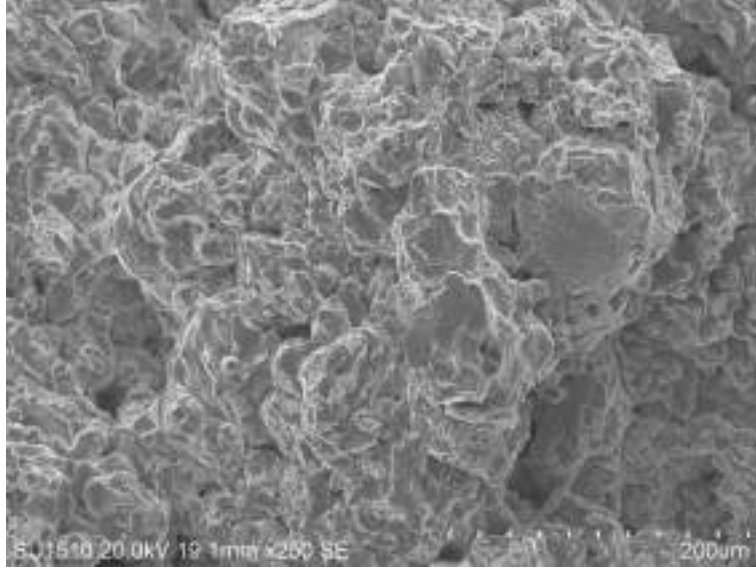
(b) Tuz banyosunda 450 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 10000X SEM görüntüsü.

Şekil 4.7. Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperlenmiş deney grubuna ait mikroyapı görüntüleri.

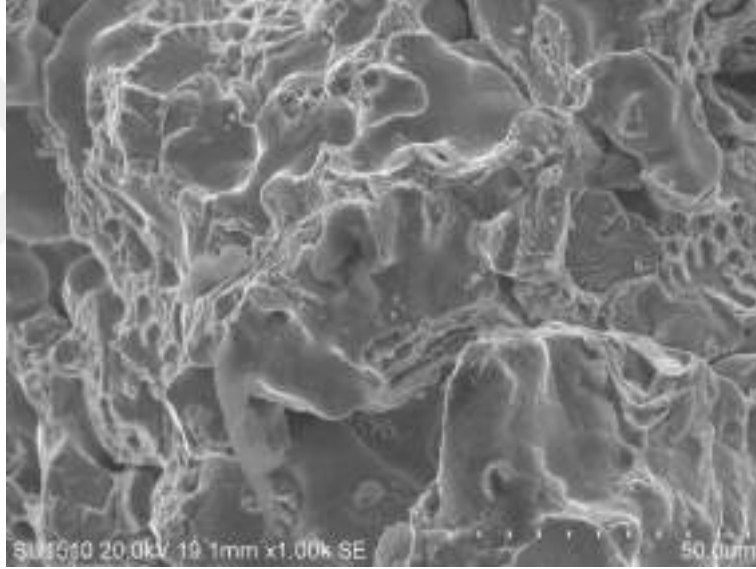
C difüzyonunu hızlandırmak ve kaba beynit yapısının oluşumunu sağlayabilmek için sıcaklık değeri bu grup için 450 °C olarak seçilmiştir. Aynı sürelerde östemperlenen deney numunelerinin sertlik değerlerinde östemperleme süresinin artmasıyla diğer gruplara göre düşüş görülmüştür. Bu düşüşün sebebi kabalaşan beynit yapısı ile beraber ferrit yapısının da daha çok yer kaplamasıdır. Ferrit fazının etkisinin artması ile en yüksek kırılma tokluğu bu grupta görülmüştür. Tüm deney gruplarında olduğu gibi bu deney numunelerinde de tokluk değeri azalırken artmaya eğilim göstermiştir.

4.5. Kırık Yüzey Görüntüleri

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13' de darbe testi sonucu elde edilen kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. TM ile üretilmiş malzemelerde uygulanan yük tüm kesit tarafından taşınmayıp bunun yerine sinterleme sonrası parçacıklar arasın-da difüzyon bağları ile oluşan boyun bölgelerinin temas alanı kadar bir yüzeyde taşınmaktadır. Verilen SEM görüntülerinden de bu açıkça anlaşılmaktadır. Numunelerin bazı bölgelerinde klivaj tipi kırılma bazı bölgelerinde ise kayma kırılması görülmüştür. Taneler arası bazı boyun bölgelerinde ise mikro-sünek tip kırılma izleri söz konusudur. Klivaj tip kırılma daha çok gevrek malzemelerde görülürken kırılma tokluğu yüksek olan deney grubunda ise kayma kırılması daha baskın görülmektedir.

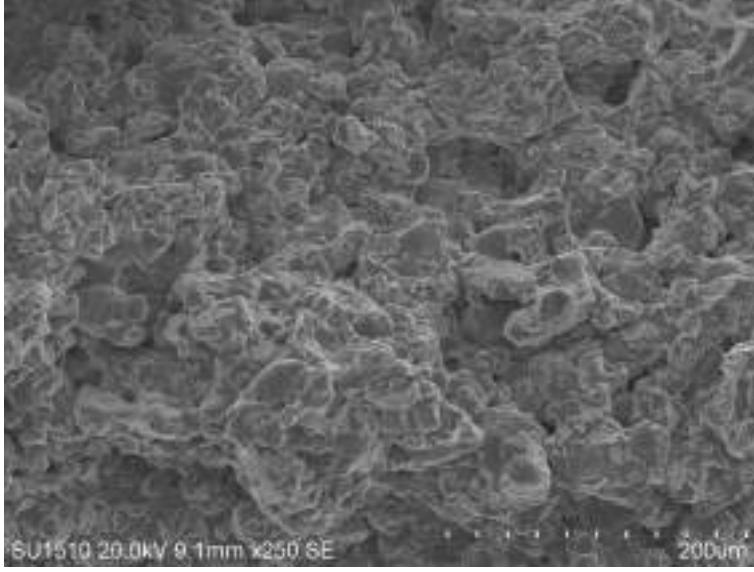


(a) Tuz banyosunda 300 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.

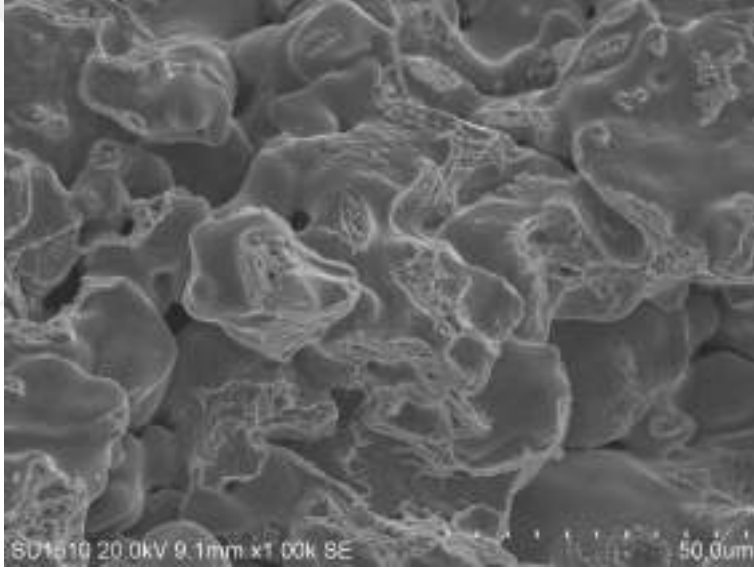


(b) Tuz banyosunda 300 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.8. Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.

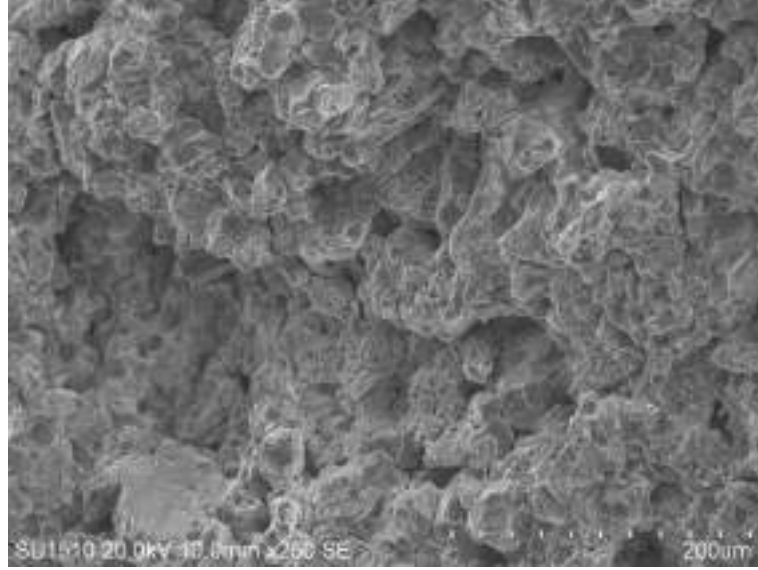


(a) Tuz banyosunda 375 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.

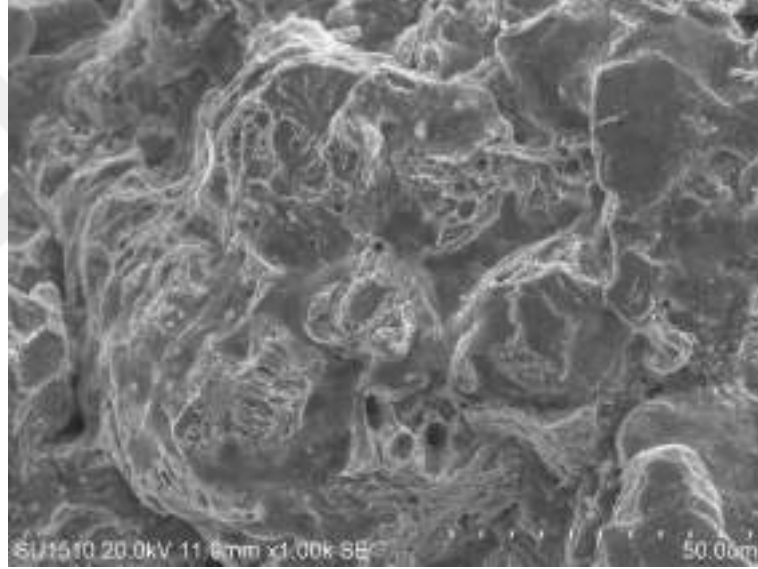


(b) Tuz banyosunda 375 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.9. Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.

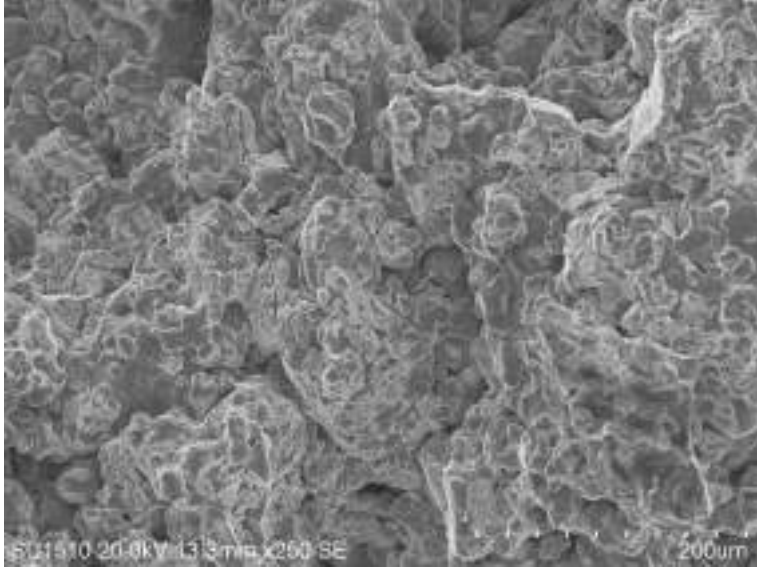


(a) Tuz banyosunda 450 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.

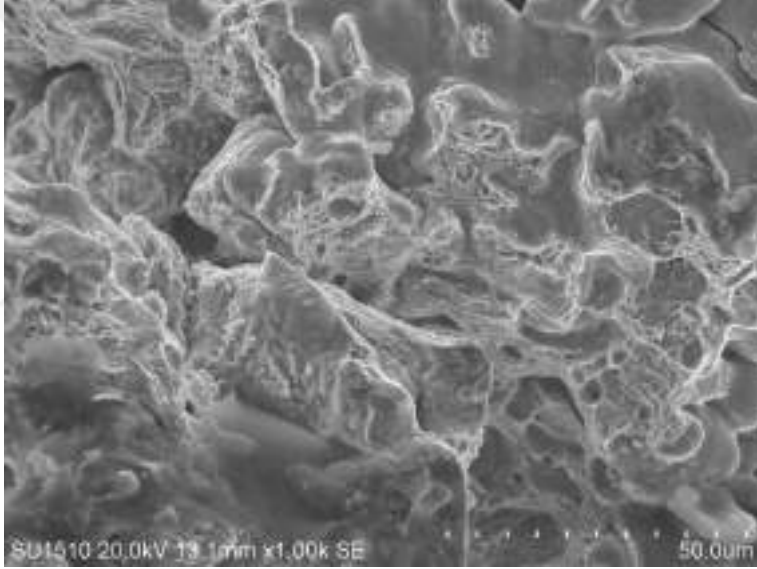


(b) Tuz banyosunda 450 °C ve 30 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.10. Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta 30 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.

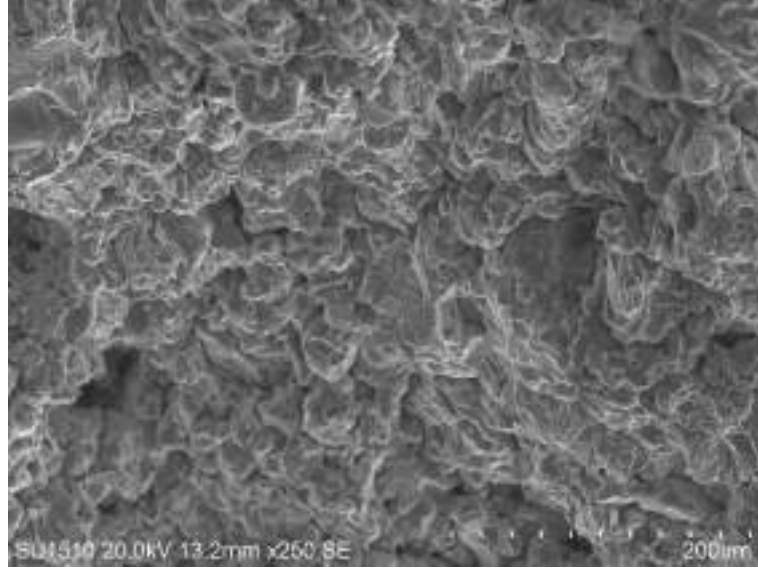


(a) Tuz banyosunda 300 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.

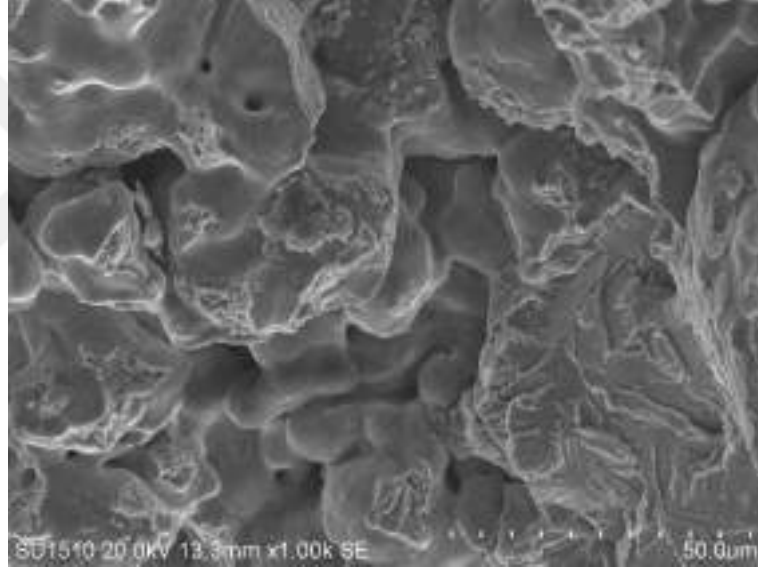


(b) Tuz banyosunda 300 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.11. Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.

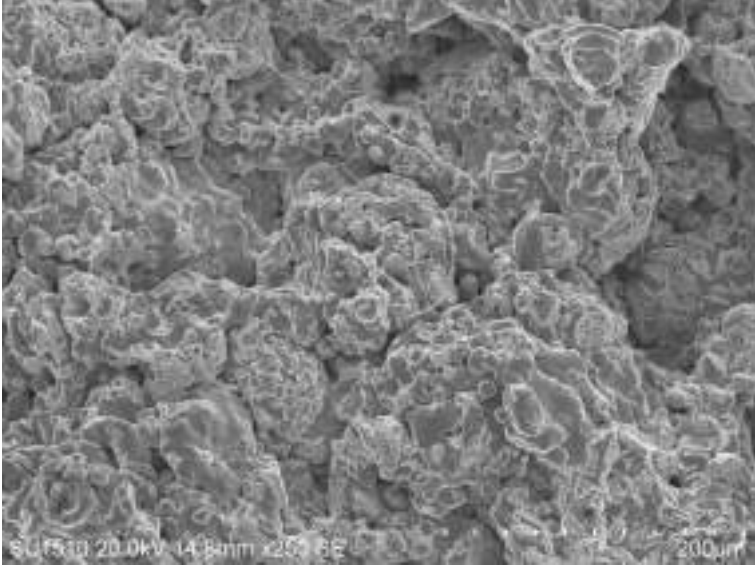


(a) Tuz banyosunda 375 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.

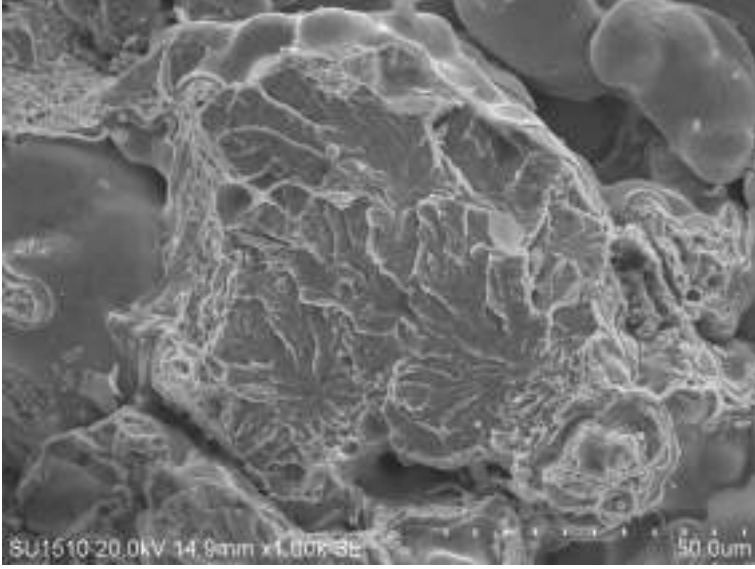


(b) Tuz banyosunda 375 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.12. Tuz banyosunda 300 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.



(a) Tuz banyosunda 450 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 250X kırık yüzey SEM görüntüsü.



(b) Tuz banyosunda 450 °C ve 120 dak. boyunca östemperlenmiş numuneye ait 1000X kırık yüzey SEM görüntüsü.

Şekil 4.13. Tuz banyosunda 450 °C sıcaklıkta 120 dak. östemperlenmiş deney grubuna ait kırık yüzey görüntüleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada saf demir tozlarına ağırlıkça %1.2 C ilavesiyle TM yöntemleriyle elde edilmiş düz karbon çeliğine uygulanan farklı sıcaklık ve süre parametrelerinde gerçekleştirilen östempereleme ısıl işleminin darbe tokluğu ve sertlik değerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları, gözlemler ve bunlara ilişkin öneriler aşağıda verilmiştir.

5.1. Sonuçlar

1. Metal tozlarının karıştırılması ve 850 MPa basınç altında preslenerek 5x10x55mm boyutlarında darbe deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin ham yoğunluk değerleri 7,226gr/cm³ olarak kaydedilmiştir. Takip eden sinterleme ısıl işlemi ile öngörüldüğü gibi yoğunluk değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Sinterleme sonrası yoğunluk değerleri ortalama 7,747gr/cm³ olarak kaydedilmiştir. Bu değer döküm ile elde edilen yoğunluk değerlerine yakındır.
2. Sinterleme ısıl işlemi neticesinde malzemenin presleme sonrası sahip olduğu gözeneklilik seviyesi de parçacıkların arasında meydana gelen difüzyon bağları ile azalmıştır. Yoğunluk değerlerinde görülen artışta da rol oynayan en temel etken de bu mekanizma olmuştur.
3. Çalışma neticesinde sinterleme ısıl işlemi sonrasında grafit tozunun tamamıyla demir içerisine difüze olarak sementit yapısını oluşturduğu mikroyapı görüntüleri ile tespit edilmiştir.
4. Sinterleme işlemini takip eden fırın içerisinde yavaş soğumanın yardımıyla tane sınırlarında sürekli sementit ağı ve tane içerisinde tam perlitik mikroyapı elde edilmiştir.
5. Sinterleme sonrasında elde edilen mikroyapıda görülen perlitik yapının literatürde kaba perlit olarak tanımlanan perlit yapısı ile benzerlik gösteren boyut ve şekil özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

6. Sinterleme işlemini takip eden östemperleme ısıl işlemleri 3 farklı sıcaklık ve 4 farklı süre zarfında tatbik edilmiştir. Tuz banyosunun sıcaklık değerleri 300-375-450 °C olarak ayarlanıp 30-60-90-120 dak. boyunca östemperleme yapılmıştır. Östemperleme sonucunda bütün malzemelerde süre ve sıcaklıkla inceden kabaya gelişim gösteren beynitik yapı elde edilmiştir.
7. Beynit yapısının en kaba hali 450 °C tuz banyosu sıcaklığı ve 120 dak. östemperleme süresine sahip olan grupta tesbit edilmiş olup en yüksek kırılma tokluğu değeri de bu grupta görülmüştür.
8. Referans numunesinin kırılma tokluğu değeri en düşük olup 3,6 J/cm² olarak kaydedilirken en yüksek kırılma tokluğu ise OS12450 grubuna ait olup 6.8 J/cm² olarak ölçülmüştür.
9. Tüm numunelerde tuz banyosu sıcaklığının artmasıyla darbe tokluğu artmaya eğilim göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda karbon difüzyonu daha hızlı olduğunda kaba beynit oluşumu kolaylaşmıştır. Beyitik yapının kaalaşması ile birlikte darbe tokluğu da artış göstermiştir.
10. Sıcaklığın artmasıyla birlikte artan bekleme süresi de beynitik yapının gelişimini olumlu etkilemiş ve bekleme süresinin artışıyla da birlikte tokluk değeri artış göstermiştir.
11. Östemperleme sonrasında yapılan sertlik ölçümlerde beynit yapısının inceliğiyle birlikte sertlikte artış görülmüştür. Ölçülen en düşük sertlik değeri referans gruba ait olup 87.86 HBW en yüksek sertlik değeri ise OS30300 grubuna ait olup 232.0 HBW olarak ölçülmüştür.

5.2. Öneriler

1. Bu tezde uygulanmamış olan çekme ve 3 noktadan eğme testi gibi deneyler malzemenin sanki statik yük altında mekanik davranışlarının ve bileşik gerilme değerlerini öğrenilmesi açısından uygulamaya tabii tutulabilir.
2. Aynı şartlarda üretilmiş deney numunelerinin farklı sıcaklık koşullarında darbe tokluğu değerleri araştırılabilir.
3. Aynı deney numunelerinin tribolojik davranışları incelenebilir.
4. İleriye dönük çalışmalar için kırılma tokluğunun artırılmasına yönelik bazı alaşım elementleri de yapıya eklenerek mekanik özelliklere alaşım elementlerinin etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Randall M. German. *Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*, volume 2. Türk Toz Metalürjisi Derneği, 2016.
- [2] TSUKERMAN S. A. *Powder Metallurgy*, volume 1. Permagon Press, 1965.
- [3] G. S. Upadhyaya. *Powder Metallurgy Technology*, volume 1. Cambridge International Science Publishing, 2002.
- [4] Hans Jurgen BARGEL and Gunter SCHULZE. *Malzeme Bilgisi*, volume 2. İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 1993.
- [5] H.K.D.H. BHADSHIA. *Bainite In Steels Transformations, Microstructure and Properties*, volume 2. IOM Communications Ltd, 2001.
- [6] H.K.D.H. BHADSHIA and R.W.K. HONEYCOMBE. *Steels Microstructure and Properties*, volume 3. Elsevier, 2006.
- [7] William D. Callister and David G. Rethwisch. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Material Science and Engineering*, volume 8. Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti, 2013.
- [8] Nurullah Sariçiçek. *ÖSTEMPERLENMİŞ TOZ METAL ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI*. Thesis, Gazi Üniversitesi, 2012.
- [9] Donald R. ASKELAND. *Steels Microstructure and Properties*, volume 1. Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti, 2998.
- [10] Volkan KILIÇLI. *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kısmi Östenitleme ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Thesis, Gazi Üniversitesi, 2004.
- [11] Q. D. Mehrkam, R. W. Foremen, D. E. Gaylord, Heyer W. E., and Lahr G. M. *Austempering of Steels, Metals Handbook*, volume 4. ASM, Ohio, USA, 2016.

- [12] J. Chakraborty, D. Bhattacharjee, and I. Manna. Austempering of bearing steel for improved mechanical properties. *Scripta Materialia*, 59(2):247 – 250, 2008.
- [13] N. Saeidi and A. Ekrami. Comparison of mechanical properties of martensite/ferrite and bainite/ferrite dual phase 4340 steels. *Materials Science and Engineering: A*, 523(1):125 – 129, 2009.
- [14] Susil K. Putatunda, Arjun V. Singar, Ronald Tackett, and Gavin Lawes. Development of a high strength high toughness ausferritic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 513-514:329 – 339, 2009.
- [15] Khodamorad Abbaszadeh, Hassan Saghaifan, and Shahram Kheirandish. Effect of bainite morphology on mechanical properties of the mixed bainite-martensite microstructure in d6ac steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(4):336 – 342, 2012.
- [16] H. Amel-Farzad, H.R. Faridi, F. Rajabpour, A. Abolhasani, Sh. Kazemi, and Y. Khaledzadeh. Developing very hard nanostructured bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 559:68 – 73, 2013.
- [17] Hamid Mousalou, Sasan Yazdani, Behzad Avishan, Naghi Parvini Ahmadi, Ali Chabok, and Yutao Pei. Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process. *Materials Science and Engineering: A*, 734:329 – 337, 2018.
- [18] W. Gong, Y. Tomota, S. Harjo, Y.H. Su, and K. Aizawa. Effect of prior martensite on bainite transformation in nanobainite steel. *Acta Materialia*, 85:243 – 249, 2015.
- [19] B.M. Gurumurthy, Sathya Shankar Sharma, and Achutha Kini. Ferrite-bainite dual phase structure and mechanical characterization of aisi 4340 steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(11, Part 3):24907 – 24914, 2018.
- [20] N. Saeidi and A. Ekrami. Impact properties of tempered bainite–ferrite dual phase steels. *Materials Science and Engineering: A*, 527(21):5575 – 5581, 2010.

- [21] M. Kazemi, A.R. Kiani-Rashid, A. Nourian, and A. Babakhani. Investigation of microstructural and mechanical properties of austempered steel bar-reinforced ductile cast iron composite. *Materials & Design*, 53:1047 – 1051, 2014.
- [22] Kaikai Wang, Zhunli Tan, Guhui Gao, Bo Gao, Xiaolu Gui, R.DK. Misra, and Bingzhe Bai. Microstructure-property relationship in bainitic steel: The effect of austempering. *Materials Science and Engineering: A*, 675:120 – 127, 2016.
- [23] T.S. Wang, J. Yang, C.J. Shang, X.Y. Li, B. Zhang, and F.C. Zhang. Microstructures and impact toughness of low-alloy high-carbon steel austempered at low temperature. *Scripta Materialia*, 61(4):434 – 437, 2009.
- [24] R. Bakhtiari and A. Ekrami. The effect of bainite morphology on the mechanical properties of a high bainite dual phase (hbdp) steel. *Materials Science and Engineering: A*, 525(1):159 – 165, 2009.
- [25] Behzad Avishan, Sasan Yazdani, and Syamak Hossein Nedjad. Toughness variations in nanostructured bainitic steels. *Materials Science and Engineering: A*, 548:106 – 111, 2012.
- [26] Astm e23 - 18 standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, 2018.
- [27] Dieter G. E. *Mechanical Metallurgy*, volume 3. McGraw-Hill Series in Materials Science and Engineering, London, UK, 1988.



EKLER





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ömer Faruk ÖZCAN
Uyruğu : Türk
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya - 03.03.1995
Telefon : 0 553 674 05 10
e-mail : info@omerfarukozcan.com.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	Adil Karaağaç Anadolu Teknik ve Meslek Lisesi	2013
Lisans	Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi	2017
Yüksek Lisans	Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD.	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	ENKA Hidrolik Pnömatik Ltd. Şti.	Stajyer Mühendis
2016	ASC Hidrolik Endüstri San. Tic. A.Ş.	Stajyer Mühendis
2017	Yıldız Pul Otomotiv Sanayi A.Ş.	Kalite Mühendisi
2019	YENMAK Piston ve Pim San. A.Ş.	Makine Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce (İyi derecede Okuma, Konuşma, Yazma)

YAYINLAR

- Karadağ, H. B., Özcan, Ö. F., edt: TEMİZER, A., 2018, Östemperleme Isıl İşleminin TM Metoduyla Üretilen Yüksek Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, V. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Sempozyumu (ISMS) Özet Kitabı, Gece Kitaplığı, (1:421)*
- Karadağ, H. B., Özcan, Ö. F., edt: KARAPINAR, R., KILIÇER, A., 2018, Östemperleme Isıl İşleminin TM Metoduyla Üretilen Yüksek Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Alanında Güncel ve Akademik Çalışmalar - 2018 Cilt 2, IVPE, (1:1289-1299)*