T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRİ DÖKME DEMİRDE KALAYIN(Sn) MİKROYAPIYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

BEKİR AKGÜL

YÜKSEK LİSANS

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Temmuz-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

GRİ DÖKME DEMİRDE KALAYIN (Sn) MİKROYAPIYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Bekir AKGÜL

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Recai KUŞ

2018, 68 Sayfa

Jüri
Prof.Dr. Mustafa BOZ
Prof.Dr. Mustafa ACARER
Doç.Dr. Recai KUŞ

Son yıllarda gri dökme demirlerin bazı dezavantajlarının önüne geçilmek ve mekanik özellikleri arttırmak için bakır, krom ve titanyum gibi alaşım elementleri kullanılmıştır. Bunlar arasında bakır elementi en yaygın kullanılanıdır. Bakırın mikroyapıda perlitik oranı arttırarak hem sertliği hem de çekme dayanımını arttırdığı bilinmektedir. Kalay elementi ise bakıra göre eser miktarda kullanıldığında dökme demirin sertlik ve çekme dayanımına etkisi birbirine yakındır. Buna göre bazı kaynaklarda 5 kat bazı kaynaklarda 10 kata daha az miktarda kullanılan kalay elementi (bakıra göre) çekme dayanımı ve sertlik üzerindeki etkisi aynı olduğunu belirtilmiştir. Bazı araştırmalara göre de ters etki yaptığı ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada gri dökme demir malzemesine 5 farklı oranlarda (0,03-0,06-0,09-0,12-0,15) kalay(Sn) ilavesi yapılarak kalayın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. İki farklı kompozisyonda referans numunesi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Referans numunelerinin birine % 0,4 oranında bakır(Cu) ilavesi yapılmıştır. Diğer referans numunesine herhangi bir alaşım elementi eklemeksizin üretilmiştir.

Çalışma kapsamında her kompozisyon için sertlik, çekme, darbe, mikroyapı ve kimyasal analiz çil numuneleri alınmıştır. Döküm prosesi gerçekleştikten sonra numuneler her deney için CNC tezgâhlarında işlenerek hazır hale getirilmiştir.

Brinell sertlik ölçüm sonuçlarına göre en yüksek sertlik değeri % 0,12 kalay(Sn) miktarında 177 HB görülmüştür. Çekme deneyi sonuçlarına göre en yüksek çekme mukavemetini %0,12 Sn içeren numunede 195 N/mm^2 olarak tespit edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti ise 157 N/mm^2 olarak alaşım elementi içermeyen numunede görülmüştür. %0,4 bakır ilaveli numunenin çekme dayanımı ise 177 N/mm^2 olarak bulunmuştur. Darbe deneyi sonuçlarına göre en yüksek darbe mukavemeti alaşım elementi içermeyen numunede 4,49 J olarak tespit edilmiştir. En düşük darbe mukavemeti ise 3,55 J olarak %0,09 Sn içeren numunede görülmüştür. %0,4 bakır ilaveli numunenin darbe dayanımı ise 4,37 J'dur.

Mikroyapı sonuçlarında en yüksek perlitik oran % 0,12 Sn içeren numunede görülmüştür. Kalayın % 0,12 oranına kadar olan numunelerde A tipi lamel grafit yapısı görülmüştür. %0,15 Sn içeren numunede lamellerin bazı bölgelerde rozetleşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Tez çalışmasının bir diğer araştırma konusu, yüksek oranda kullanılan bakırın yerine düşük oranda kalay kullanarak sanayide maliyeti düşürülebilir.

Anahtar Kelimeler: Gri Dökme Demir, Kalay(Sn), Mekanik Özellik, Mikroyapı, SEM Analizi

ABSTRACT

MASTER OF SCIENCE THESIS

AN INVESTİGATION OF EFFECT OF TIN (Sn) ON MICROSTRUCTURES AND MECHANİCAL PROPERTİES OF GRAY CAST IRON

Bekir AKGÜL

Selçuk University
The Graduate School of Natural and Applied Science,
Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Recai KUŞ

2018, 68 Pages

Jury
Prof.Dr. Mustafa BOZ
Prof.Dr. Mustafa ACARER
Assoc.Prof.Dr. Recai KUŞ

In recent years, alloying elements such as copper, chromium and titanium have been used to avoid some disadvantages of gray cast iron and to increase the mechanical properties. Among them, copper is the most common use. Copper is known to increase both hardness and tensile strength by increasing the perlitic ratio in microstructure. The effect of elemental tin to iron hardness and tensile strength when used in minor amounts compared to copper are similar. According to some sources, some sources 5 times to 10 times smaller amount of elemental tin used (based on copper) effect on tensile strength and hardness are specified the same. According to some researches it has been shown to have an adverse effect.

In this study, the effects of tin (Sn) addition on gray cast iron material were investigated at 5 different ratios (0,03-0,06-0,09-0,12-0,15 Sn) and the effect of tin microstructure and mechanical properties were investigated. Two different composites were compared with the reference sample. Copper (Cu) was added in an amount of 0.4% to one of the reference samples. It was produced without adding any alloy element to the other reference sample.

Hardness, tensile, impact, microstructure and chemical analyzes were obtained for each composition. After the casting process takes place by treatment of the samples were made ready for each test CNC machines.

According to Brinell hardness test results, the highest hardness value was 177 HB in 0.112% tin (Sn) amount. According to the tensile test results, the highest tensile strength was found to be 195 N/mm^2 in the specimen containing 0.12% Sn. The lowest tensile strength was found at 157 N/mm^2 in the sample without alloying elements. 0.4% copper addition sample tensile strength is 177 N/mm^2, respectively. According to the results of the impact test, the highest impact strength was determined as 4.49 J in the sample without alloy element. The lowest impact strength was found to be 3.55 J in the specimen containing 0.09% Sn. 0.4% copper addition the impact strength of the sample is 4.37 J.

The highest perlitic ratio in the microstructure results was found in the sample with 0.12% Sn. Specimens of type A lamellar graphite were observed in samples up to 0.12% tin. In the sample containing 0.15% Sn, the lamellae were found to tend to rosy in some regions. Another research topic of the thesis, using a high proportion of copper instead of tin used in low cost in the industry is to draw backward.

Keywords: Grey Cast Iron, Tin (Sn), Mechanical Property, Microstructure, SEM Analysis

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Recai KUŞ'a saygı ve hürmetlerimi sunarım.

Bilgi birikim ve tecrübelerini esirgemediği için Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi değerli Prof. Dr. Mustafa ACARER hocama saygılarımı sunarım.

Malzeme üretiminde yardımlarını esirgemeyen Tümosan Döküm A.Ş. yetkililerine ve kıymetli personellerine, numunelerin hazırlanmasında Baykar Fren A.Ş. firması sahibi Yusuf Bayraktar'a ve değerli personellerine, darbe testi cihazından faydalanma imkânı sağlayan Genmot Crankshaft A.Ş. Kalite Kontrol ve Güvence Sorumlusu Sibel Eser'e, çekme dayanımı testi cihazından faydalanma imkanı sunan Konya KOSGEB kuruluşuna, tecrübe ve yardımlarından dolayı Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Araştırma Görevlisi Cihat Nazik'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan eşime teşekkür ederim.

Bekir AKGÜL
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

2.1. Dökme Demirler 3
2.2. Dökme Demir Çeşitleri 4
2.2.1. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler 4
2.2.2. Beyaz Dökme Demir 5
2.2.3. Kompakt Grafitli Dökme Demirler 5
2.2.4. Temper Dökme Demirler 5
2.2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler 6
2.3. Dökme Demirlerin Yapı Bileşenleri 6
2.3.1. Grafit 6
2.3.2. Sementit 7
2.3.3. Ferrit 8
2.3.4. Perlit 8
2.4. Alaşım Elementlerinin Gri Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi 8
2.4.1. Karbon (C) 8
2.4.2. Silisyum (Si) 9
2.4.3. Kükürt (S) ve Mangan (Mn) 9
2.4.4. Fosfor (P) 9
2.4.5. Bakır (Cu) 10
2.4.6. Kalay (Sn) 10
2.5. Bileşimin Etkisi 13
2.6. Gri Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 13
2.6.1. Çekme Deneyi 13
2.6.2. Sertlik Deneyi 15
2.6.3. Darbe Deneyi 16

3. MATERYAL VE YÖNTEM **17**

3.1. Gri Dökme Demir Üretiminde Ocak Şarjının Hesaplanması 18
3.2. Alaşımlandırma ve Aşılama Prosesi 20
3.3. Numune Kalıplarının Hazırlanması ve Döküm İşlemi 20
3.3.1. Kalıp Bozma ve Temizleme 22
3.4. Kır Dökme Demirlerin Mekanik Muayenesi 23
3.4.1. Çekme Deneyi 23
3.4.2. Brinell Sertlik Deneyi 24

3.4.3. Darbe Deneyi 25
3.5. Metalografik İnceleme 26
3.5.1. SEM İncelemesi 27
3.6. Kalıp Kumunun İncelenmesi 27

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 29

4.1. Kimyasal Analiz İncelemesi 29
4.2. Mikroyapı İncelemesi 29
4.3. Sertlik Deneyi Sonuçları 35
4.4. Çekme Deneyi Sonuçları 37
4.5. Darbe Deneyi Sonuçları 40
4.6. SEM Analiz Sonuçları 41

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49

A. 5.1 Sonuçlar 49
B. 5.2 Öneriler 51

EKLER 52

II. ÖZGEÇMİŞ 56

KAYNAKLAR 57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ : Gerilme
E : Elastisite Modülü
V : Hacimsel Oran
ε : Şekil Değiştirme
A : Kesit Alanı
L : Boy
α : Ferrit
γ : Östenit
P_{max} : Maksimum Yük
U : Rezilyans
J : Joule

Kısaltmalar

TSE : Türk Standartları Enstitüsü
ASTM: American Society for Testing and Materials
EN : European Norm
ISO : International Organization for Standardization
SEM : Scanning Electron Microscope
Sn : Kalay
Cu : Bakır
Si : Silisyum
C : Karbon
CM : Sementit
Mn : Mangan
Cr : Krom
Ni : Nikel
P : Fosfat
S : Kükürt
Ce : Seryum
D.D. : Dökme Demir
ASF : Auto Sprüh Folie
Ti : Titanyum
Mo : Molibden
CE : Karbon Eşdeğeri
M-SiC: Metalürjik Silisyum Karbür
HNO_3 : Nitrik Asit
CH_3OH: Metanol

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze gri dökme demirler üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Gri dökme demirin mekanik özelliklerinin ve morfolojisinin iyileştirilmesi için çeşitli alaşım elementleri ilave edilmiştir. Yapılan literatür taramasında bakır, krom ve nikel gibi alaşım elementleri gri dökme demirin mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği ortaya konulmuştur. Bu alaşım elementlerinden bakır en yaygın kullanılanıdır.

Bakır elementi gri dökme demirin çekme mukavemetini olumlu yönde arttırdığı tespit edilmiştir. Gri dökme demir morfolojisinde de matris yapının perlitik olarak çökelmesini sağlamaktadır. Bakır elementinin bir diğer özelliği ise kalınlık-mukavemet değişimini en aza indirmesidir (Tan, Temmuz 2005). Öte yandan Demirci, A.H. (2004) geliştirilen dökme demirin, bakır ilavesindeki ağırlıkça % oranı arttıkça sertlik değerlerinin azaldığı ortaya koymuştur. Bakır katkısının ağırlıkça %'si arttıkça daha ince ledeburit oluşumuna bağlanabilir. Bakır ilavesinin ağırlıkça %'si arttıkça darbe enerjisinin arttığını gözlemlemiştir (Demirci, 2004).

Gri dökme demirin sertliğini ve çekme mukavemetini arttıran bir başka element olan kalay literatür bilgilerinde yer almaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında her ne kadar farklı sonuçlar bulunsa da çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği ve morfolojideki matris yapısını perlitik olarak çökelttiği bilgisi daha ağır basmaktadır.

Shaban ve arkadaşları kalayın(Sn) kompakt grafit ve grafit en-boy oranını artırdığını gösterdiler (M. Shaban, 2013). Vermiküler dökme demirlerde aşırı miktarda kalay(Sn) eklenmesi süper soğuma eğilimini genişletmiştir ve eriyen sistemdeki bazıları metastabilitiye dayanarak katılaşmıştır, bazıları ise serbest sementit olarak katılaşmıştır (Y. C. Peng, 2012). Kalay(Sn) içeriğinin arttırılması eritme sisteminin ötektik noktasını sağa doğru iter, bu nedenle katılaşma sıcaklığını düşürerek birincil östenit üretimini teşvik eder (Lyu Y., July 2015).

Kalay(Sn) içeriği ağırlıkça % 0,003 ila 0,057 arttığında, grafit boyutu açıkça küçülmüş ve bu nedenle gerilme mukavemetinde ve darbe tokluğunda bir artış elde edilmiştir (Lyu Y., July 2015). Ayrıca, perlit miktarındaki artış ve perlit tabakaları aralığının azalması da vermiküler dökme demirin güçlenmesine katkıda bulunmuştur (Lyu Y., July 2015). Bunun yanında Sn ilavesi vermiküler grafiti küçültür ve matriste homojen olarak çözünür (Lyu Y., July 2015).

Sn, perliti stabilize ve rafine eder yani perlit içeriğini arttırır ve perlitin ortalama tabakalı boşluklarını azaltır. Ağırlıkça% 0,057 eklenmesiyle vermiküler dökme demirdeki perlit miktarı % 95'in üzerinde ve tabakalı alan aralığı <83 nm'ye kadar ulaşır (Lyu Y., July 2015). Ağırlıkça % 0,121'den fazla Sn, istenmeyen serbest sementitin oluşmasına neden olur ve bu da mekanik özelliklere zarar verir (Lyu Y., July 2015).

Bu çalışmanın amacı gri dökme demirlerin morfolojisinde perlitik oranı arttırılmasını ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmaktır. Bilindiği üzere gri dökme demirlerde perlit oranı arttıkça sertlik ve çekme dayanımını artmaktadır. Dökümhanelerde bu yüksek mekanik değerleri yakalayabilmek için yaygın olarak %0,40-0,80 oranında bakır elementi kullanılmaktadır. Bu çalışmanın bir diğer amacı ise, düşük oranda kullanılan kalay elementi ile aynı mekanik değerleri elde edebilmektir.

Bu çalışmada gri dökme demire belirli oranlarda kalay ilavesi yapılarak mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. İki adet referans numunesi ile karşılaştırılması da yapılmıştır. Kalay ilaveleri ağırlıkça %0,03-0,06-0,09-0,12-0,15 olarak belirlenmiştir. Referans numunelerinden biri alaşım elementi içermemektedir. Diğeri ise sadece %0,40 oranında bakır elementi içermektedir.

Çalışma kapsamında her parametre için çekme, darbe, mikroyapı ve sertlik numuneleri dökümü yapılmıştır. Dökümler geleneksel kum kalıplara yapılmıştır. Çıkan sonuçlar incelenerek gerekli yorumlar yapılmıştır.

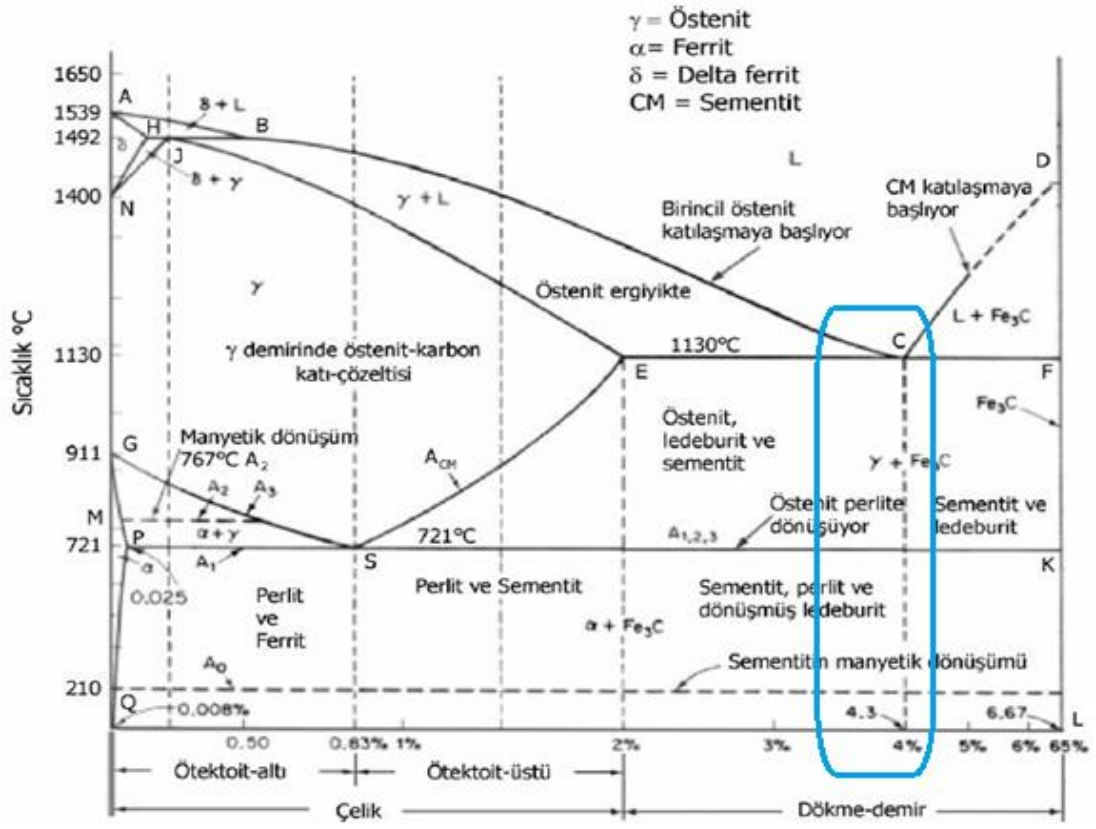
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Dökme Demirler

Demir madeninin ergitme yüksek fırınlarında ergitilmesi ve metalürjik işlemlerle değişiklik yapılması sonucu bir kalıp içine dökülmesine ve kalıp boşluğu şeklini alarak katılaşması ile meydana gelen malzemeye dökme demir denir (Yılmaz, 2003). Dökme demirler, çeliklere benzer demir-karbon alaşımı sınıfına girerler. Demir içinde %2,00'ye kadar C oranı var ise çelik olarak; % 2,00'den % 6,67'ye C içerdiğinde ise malzeme dökme demir olarak isimlendirilir. Ancak yüksek C oranı malzemeyi aşırı kırılgan yaptığı için dökme demirler % 4,00'e kadar C, % 3,50'e kadar Si içerirler.

Dökme demir; soğuma hızına ve bileşimine bağlı olarak geniş aralıkta değişen özelliklere sahiptir. Bunlar; mukavemet, sertlik, süneklik, ısıl iletkenlik, sönüm kapasitesi gibi özelliklerdir (Akman, 2006).

Sekil 7'de dökme demirin demir karbon denge diyagramındaki yeri görülmektedir. Diyagram incelendiğinde; dökme demirlerin karbon oranının karbon çeliklerinden yüksek olduğu görülebilmektedir (Akman, 2006).



Şekil 1. Demir-Karbon denge diyagramı

Dökme demirler, sünek olmadıkları için soğuk ve sıcak işlemler uygulanmak suretiyle şekillendirilemezler. Ama döküm kolaylığı, düşük ergime sıcaklığı (1150-1300 C^0), ergitme işlemlerinin kolaylığı ve ucuzluğu, talaşlı imalat kolaylığı, aşınma dayanımı, titreşim sönümleme ve mamul parça özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Yılmaz, 2003).

Dökme demirler günümüzde endüstride en çok ve yaygın kullanım alanına göre; gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir ve temper dökme demir olmak üzere dört ana grup şeklinde sınıflandırılır (Tablo 1).

Tablo 1. Dökme demir çeşitleri ve bulunan elementler (Erdoğan, 2000)

Element	Küresel Grafitli Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir
Karbon	3,00- 4,00	2,50-4,00	1,30-3,60	2,00-2,60
Silisyum	1,80-2,80	1,00-3,00	0,50-1,90	1,10-1,60
Mangan	0,10-1,00	0,25-1,00	0,25-0,80	0,20-1,00
Kükürt	0,03 maksimum	0,02-0,25	0,06-0,20	0,04-0,18
Fosfor	0,10 maksimum	0,05-1,00	0,06-0,18	0,18 max

2.2. Dökme Demir Çeşitleri

2.2.1. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler

Gri dökme demir kararlı katılaşma ve (düşük soğuma hızlarında) dönüşümler sonucu karbon atomlarının esas itibariyle grafit kristalleri halinde yapı içerisinde yer aldığı ve bu yüzden de kırılma yüzeylerinin koyu (gri) göründüğü için gri dökme demir olarak adlandırılmaktadır. Geniş kullanım alanı bulan dökme demir grubudur.

Gri dökme demirler iyi döküm kabiliyeti, kabul edilir mukavemet, iyi işlenebilme kabiliyeti gösterip kritik olmayan parçaların yapımında sıkça kullanılmaktadır. Gri dökme demirlerin üretim maliyeti düşüktür. Gri dökme demire % 3,25 C, % 1,90 Si, % 0,70 Mn, % 0,09 S ve % 0,04 P bileşimi örnek verilebilir. Bu bileşim fazla kritik olmadığından metalografik veya mekanik özellik adlandırmada ölçü olarak alınabilir (Yılmaz, 2003).

Gri dökme demirin kimyasal bileşimi yapı, mekanik özellikleri ve morfolojisi geniş aralıklar içinde değişebilmektedir. Gri dökme demirler esas olarak demir - karbon

- silisyum alaşımı olup ötektik sıcaklığında östenit'in katı eriyik olarak içerebileceğinden fazla karbona sahip alaşımlardır. Bileşimdeki bu fazla karbon grafit lamelleri halinde çökelir. Gri dökme demirler genellikle % 2,10 ile 4,00 karbon ve % 1,00 ile 3,00 silisyum içerirler (Çavuşoğlu, 1981).

2.2.2. Beyaz Dökme Demir

Yüksek soğuma hızlarında gerçekleşen katılaşma ve dönüşümlerle karbonun sementit (Fe3C) halinde oluştuğu ve kırılma yüzeyi beyaz görünen dökme demir çeşididir. Kırılma yüzeyine göre beyaz dökme demir denilirken, kararsız katılaşma ve dönüşümlerin verdiği baskın özelliklerden dolayı da sert dökme demir de denir (Demirci, 2004). Genel olarak; Si ve Ni dökme demirlere gri dökme demir yapısı oluşturma eğilimi kazandırırken, Mn ve Cr ise beyaz dökme demir oluşturma eğilimi kazandırmaktadır (George, May 1996).

2.2.3. Kompakt Grafitli Dökme Demirler

Bu dökme demire bazen vermiküler grafitli dökme demir de denilmektedir. Sıvı Fe-C-Si alaşımına az miktarda Mg ilave edilerek fleyk-kompakt-küresel grafit geçişi sağlanır. Tümüyle kompakt grafitli yapı elde etmek çok zordur. Mg, Ce, Ti alaşım elementleri sayesinde oldukça geniş bileşim aralığında kompakt yapı elde edilebilir. Sadece Mg ilavesiyle tam kompakt yapı elde etmek zordur. Fleyk veya küresel grafit yapmaya elverişli dökme demirlere Mg-Ce-Ti alaşımı kalıp veya potada ilave edilerek uygulanabilmektedir. Magnezyum ve seryum, kükürtle kolayca reaksiyona girebilmektedir. Düşük cüruf oluşumu ve ekonomik olması açısından sıvı alaşımdaki kükürt yüzdesi 0,035'ten az olmalıdır (Yılmaz, 2003).

2.2.4. Temper Dökme Demirler

Temper dökme demir; grafitsiz, sert ve kırılgan olan beyaz dökme demirin temperlenmesi olarak adlandırılmaktadır. Isıl işlem ile karbürlerin parçalanması sonucu oluşan, yüksek mukavemetli, sünek ve iyi işlenebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca mikro yapısı ferrit ve temper karbonundan meydana gelen rozet şekilli grafitlerden oluşur (Erdoğan, 2000; Velde, 2004).

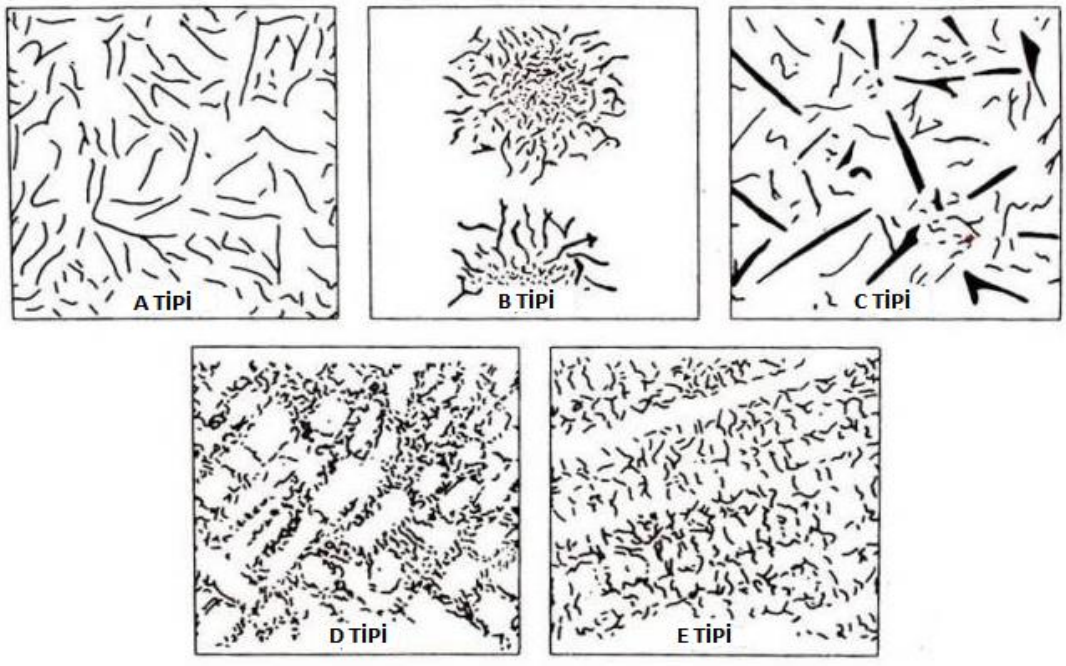
2.2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Küresel grafitli dökme demirin (KGDD) serbest karbonu, lamel yerine küre şeklindedir. Bu nedenle ABD'de nodüler dökme demir, İngiltere'de ise Küresel Grafitli Dökme Demir(KGDD) olarak adlandırılır. Karbonun lamel yerine küre şeklinde olması için aşılama işlemi (magnezyum aşılama) yapılır. Küresel yapının oluşması için dökümden önce eriyik demire çok küçük miktarda magnezyum ilave edilmektedir. Ayrıca bileşime bazı elementler ilave edilerek değişik yapılar elde edilmektedir (M. Kemal Bilici 2007).

2.3. Dökme Demirlerin Yapı Bileşenleri

2.3.1. Grafit

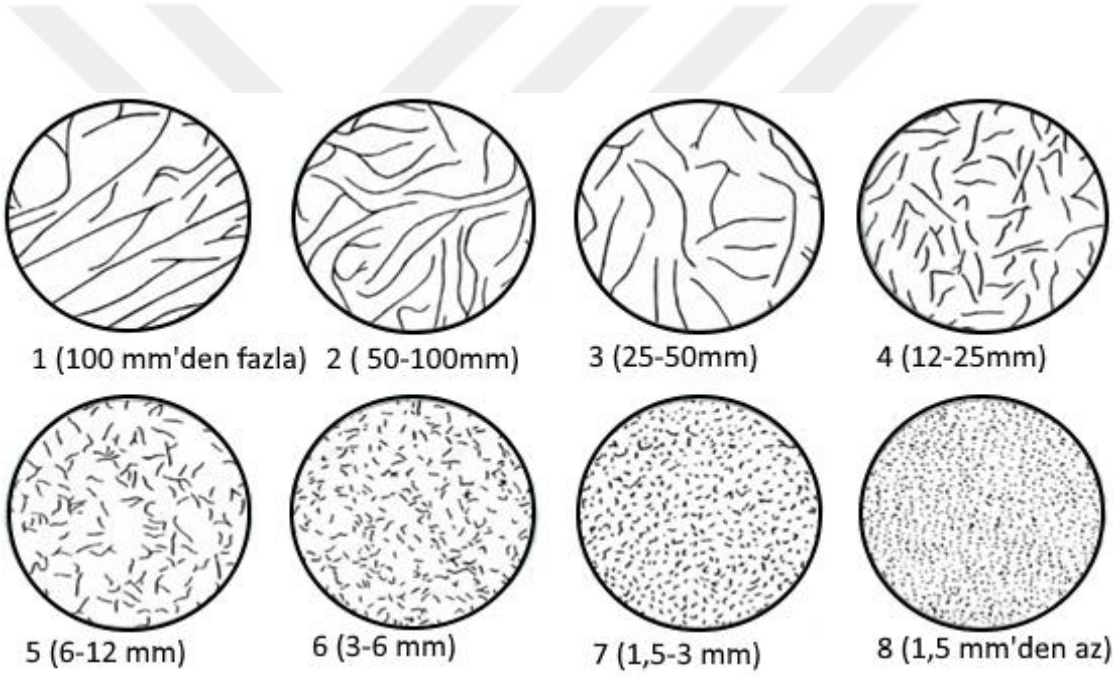
Karbon, demire bağlı olarak sementit (beyaz dökme demir) veya serbest olarak grafit halinde (gri d.d., temper d.d., küresel grafitli d.d.) bulunur. Gri dökme demirde süneklik özelliğinin olmayışı yapı içerindeki lamel grafitler nedeniyledir. Lameller yapıda çentik etkisi yarattığı için dayanımı düşüktür. Şekil 2'de görüleceği üzere lamel grafitli dökme demirler lamel tiplerine göre ASTM A 247 standartlarında 5 gruba ayrılır.



Şekil 2. ASTM A 247 standartlarına göre gri dökme demirlerde lamel grafit çeşitleri (Handbook, 2008)

Gri dökme demir yapısında genellikle gelişi güzel yönlenip üniform dağılmış A tip lameller tercih edilmektedir. B tip lameller yüksek mukavemet için yetersiz olup ferrit matrisi içerisinde çiçeksi kümelenmeler halinde gelişi güzel yönelmiştir. C tip grafitler termal şoka dayanımlıdır ve hiperötektik bileşimde meydana gelmektedirler. D tipi grafitler düşük aşınma direnci ve düşük mukavemet özelliği gösterip yüksek silisyum içerir ve hızlı soğuma şartlarında oluşmaktadır. D tipi grafitler katılaşma sırasında aşırı soğuma sebebiyle oluşmaktadır. E tipi grafitler ise C %'si düşük hipoötektik bileşimlerde bulunmaktadır (Handbook, 2008).

A tipi lameller boyutlarına göre de değişim göstermektedir. ASTM standartlarınca belirlenmiş 8 çeşit A tipi lamel grafitli dökme demir bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. ASTM A 247.1 standartlarına göre gri dökme demirlerde lamel boyutları (Handbook, 2008)

2.3.2. Sementit

Bir demir - karbür (Fe3-C) metaller arası bileşiği olduğu için çok sert ve gevrektir (Yıldız, 2014). Dökme demirlerde karbon tamamen veya kısmen sementit halinde kimyasal olarak birleşmiş durumda bulunabilir, serbest veya kitle şeklinde olan sementit, çil uygulanmış dökme demirlerin katılaşması esnasında oluşur (Akman, 2006).

2.3.3. Ferrit

Oda sıcaklığında, kübik hacim merkezli yapıda, demir ile az miktarda karbonun oluşturduğu, nispeten yumuşak, sünek ve orta derece mukavemetli, bir katı eriyik olarak tanımlanabilir. Dökme demirlerde ferrit, silisyumu içeren fazdır. Silisyum, ferriti sertleştirir ve mukavemetini arttırır. Yapısal açıdan, dökme demirlerde ferrit ya serbest halde veya perlit içinde oluşur. Dökme demirin karbonu serbest olarak oluşabiliyorsa, bilesimde grafitleştiriciler varsa ve soğuma yavaş ise serbest ferritin oluşma şansı yüksektir (Akman, 2006).

2.3.4. Perlit

Bir ötektoid bileşimidir. Ferrit tabakalarının sementit tabakaları üzerine alternatif olarak girmesiyle meydana gelir. Sertliği ve mukavemeti ferritten fazladır (Yıldız, 2014). Diğer bir deyişle, yan yana sıralanmış ferrit ve sementit tabakalarından oluşmuş iki faz karışımıdır. Dökme demirlerde perlit mukavemetli, orta sertlikte ve bir dereceye kadar sünektir. Oluşan perlit miktarı, grafitleşme mertebesine bağlıdır (Akman, 2006).

2.4. Alaşım Elementlerinin Gri Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi

2.4.1. Karbon (C)

Gri dökme demirlerde karbon miktarı ağırlıkça %2,50-4,50 arasındadır. Karbon içyapıda bileşik ve serbest olarak iki farklı faz oluşturur. Kimyasal analizlerde dökme demirdeki toplam karbon yüzdesi verilmektedir. Karbonun her iki bulunuş şekli ayrı ayrı tayin edilebildiğinden grafitleşme derecesi aşağıda verilen bağlantı ile tespit edilebilir (Aslani, 1989).

% Toplam karbon = % grafit halindeki karbon + % bileşik halindeki karbon

Gri dökme demirde %0,05-0,80 bileşik karbon varsa mikroyapı büyük ölçüde perlitik olacaktır. Çünkü %2,00 civarında Si içeren gri dökme demirde, perlit %0,60 bileşik karbon içeren ötektoid östenitten oluşmaktadır. Dolayısıyla yukarıda verilen bağıntı gri dökme demirde grafitleşme derecesi için kimyasal bir kriter olmaktadır. Gri dökme demirin katılaşmasında yeterli grafitleşmenin olabilmesi için belli bir minimum toplam karbon yüzdesi gereklidir. Bu değer, alaşımdaki silisyum yüzdesine bağlı olarak

en az % 2,20 karbon civarındadır (Aslani, 1989). Dökme demir morfolojisinde %2,20 C değerine kadar karbon elementi bileşik halinde bulunabilirken bu değerden sonra doygunluğa eriştiği için grafit olarak çökeldiği düşünülmektedir.

2.4.2. Silisyum (Si)

Gri dökme demirde silisyum oranı % 1,00-3,50 arasındadır ve silisyumun en büyük etkisi grafitleşme üzerinedir. Silisyum dökme demir morfolojisinde grafitleşmeyi teşvik eder. Düşük oranlarda seyreden silisyum katılaşma esnasında grafitleşmeyi sağlamak için yetersiz kalır, ancak yüksek sıcaklıkta ısıl işlem (temperleme gibi) katı halde çekirdek oluşumu ve grafitleşmeyi sağlar. Mikroyapı açısından silisyum ferritin içinde erimiş durumdadır ve ferrite dayanım kazandırır. % 2,00 Si içeren ferritik bir gri dökme demirin sertliği 120-130 Brinell civarındadır (Aslani, 1989).

2.4.3. Kükürt (S) ve Mangan (Mn)

Lamel grafitli dökme demir yapısında % 0,25 oranına kadar bulunabilen kükürt, daha çok grafitleşmeyi sınırlayan (karbürü stabilize eden) bir elementtir. % 0,25'in üzerindeki kükürt dökme demire istenmeyen sertlik kazandırır ve işlenebilme kabiliyetini azaltır. Kükürdün etkisi bileşim içerinde bulunan mangan elementi göz önünde tutularak incelenmelidir. Yalnız başına kükürt, FeS oluşumuna neden olur. Yapıda mangan mevcut olduğunda, manganın yüzde miktarına bağlı olarak MnS veya kompleks demir-mangan-sülfürleri oluşur. Tek başına mangan grafitleşmeye dirençli bir elementtir. Dolayısı ile kükürt ile reaksiyon için yetecek miktardan fazla mangan perlitik mikroyapının devamlılığını sağlar (Aslani, 1989). Bu nedenle sıvı metaldeki mangan kükürt oranının şu şekilde olması tavsiye edilir; %Mn = (1,70 x %S) + 0,30.

2.4.4. Fosfor (P)

Fosfor ergimiş metalin akışkanlığını arttıran ve soğumuş parçanın aşınma direncini yükselten bir elementtir. Katılaşma sırasında fosforun ergiyiğe doğrudan atılmasından dolayı katılaşma sıcaklığı düşmektedir. Fosfit ötektiği beyaz ve dağlama özelliği olmayan bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı karbürlerle kolayca karışır (Aslani, 1989).

2.4.5. Bakır (Cu)

Bakır alaşım elementi lamel grafitli dökme demirin çekme mukavemetini ve sertliğini olumlu yöne arttıran elementlerden biridir ve grafitleştirici etkisi de bulunmaktadır. Bakır elementi esas olarak dökme demir morfolojisindeki yapının perlitik olarak katılaşmasını sağlamaktadır. Bakırın perlit yapıcı bir element olarak kullanılmasının önemli bir nedeni de, normal ilave miktarı olan % 0,50-1,20 seviyelerinden yapıda sementit tehlikesinin olmamasıdır (Tan, Temmuz 2005).

Bakırın faydalı bir diğer özelliği, belirli oranlarda kullanılması halinde, dökme demirin kalınlığına göre sertlik ve çekme mukavemetinin değişmesini asgariye indirgemesidir. Bakır ilavesinin yapıdaki mekanik etkisi, dökme demirdeki Si, C ve Mn miktarına bağlıdır. Bakır elementinin dökme demire en yararlı katkısı işlenebilme özelliğini arttırmasıdır. Bu özelliği, perlitik homojen bir yapı oluşturması ve sementit, karbür gibi işleme kalemini köreltici fazların oluşmasını engellemesi ile sağlar (Tan, Temmuz 2005).

Bakır ilavesinde % 3,00 Cu üzerine çıkıldığında mekanik özelliklerde azalma görülmektedir. Bunun sebebi, bu miktarların üzerinde bakır fazlası ince kürecikler şeklinde ergiyik dışında kalır (Tan, Temmuz 2005). Bakır ilavesinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise, kullanılan bakırın saf elektrolitik bakır olması ve içinde dökme demir için zararlı antimon ve kurşunun bulunmamasıdır ((TÜDOKSAD), 1997).

2.4.6. Kalay (Sn)

Dökme demirdeki kalayın, uzun yıllardır gri dökme demirlerde kırılganlığa neden olabilecek ve sfero dökme demirlerde grafit yapısını olumsuz yönde etkileyebilecek yıkıcı bir unsur olduğu düşünülmekteydi (Walding, 1932; Rehder, 1948; K. D. Millis, 1949; Anon, 1961; Robbins, 1963).

Fakat son zamanlarda yapılan araştırmalar dökme demire katılan kalayın mekanik ve fiziksel özelliklere zararlı olmadığını göstermiştir.

1948'de dökme demirdeki kalayın mikroyapıda önemli değişiklikler meydana getirebileceğine dair ilk gösterge, Ottowa'daki Kanada Maden Ofisi tarafından bulunmuştur (Rehder, 1948). Rehder yaptığı çalışmasında kalayın (%0,025-0,09 Sn arasında) gri dökme demir morfolojisindeki matrsi perlite dönüştürdüğünü ortaya koymuştur. (K. D. Millis) sfero dökme demirde yaptıkları çalışmada kalay oranının

%0,05'ten sonra zararlı olduğunu tespit etmişlerdir (K. D. Millis, 1949). Öte yandan daha sonra yapılan araştırmalarda (Morrogh), kalayın dökme demir içerisinde alaşım elementi olarak %0,13 oranına kadar katılabileceğini ortaya koymuştur (Morrogh, 1952). Morrogh bu kanıyı, eser miktar alaşım elementlerinden (Cu, Ti, Mo, Al. vs.) tamamen kurtarılmış bir dökme demir içesine kademe kademe kalay ilavesi yaparak elde etmiştir.

Kalayın demir içesindeki sıvı katı çözünürlüğü yüksektir. Erimiş demir sıcaklıklarında bile kalayın buhar basıncı düşüktür (1300 C^0) (Thwaites, 1969a). Bu, kalayın neredeyse tamamı buharlaşma ile kaybolduğu anlamına gelmez (Macintosh, 1961; Thwaites, 1969a).

2.4.6.1. Kalay(Sn)'ın Çekme Mukavemetine Etkisi

Lamel grafitli dökme demir içerisindeki kalayın çekme mukavemetine etkisi ile alakalı çeşitli literatür bilgileri bulunmaktadır. Her ne kadar iki farklı görüş olsa da kalayın gri dökme demir çekme dayanımını olumlu yönde etki ettiği görülmektedir.

Lamel grafitli dökme demirin çekme mukavemeti %0,20 ila 0,30 kalay(Sn) oranına kadar artmaktadır. Bu oranlardan sonraki kalay miktarları çekme mukavemetinin azalmasına neden olur (Gilbert, 1965; Prytherch, 1969).

Gri dökme demirin gerilme mukavemeti, kalay içeriği arttıkça sürekli olarak azalır (Veresh, 1967).

Gri dökme demirin gerilme mukavemeti mikroyapı içerisindeki perlitik matris yapısı arttıkça sürekli artar (Cage, 1965; Thwaites, 1965; Davis J., 1967; Thwaites, 1969a).

2.4.6.2. Kalay(Sn)'ın Sertliğe Etkisi

Dökme demire yapılan kalay ilavesi Brinell sertlik değerini arttırır (White, 1963; Long, 1964; Thwaites, 1965; Veresh, 1967). Dökme demirin sertliği mikroyapı içerisindeki matrisin perlit oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Morfoloji içesindeki perlit miktarı da artan kalay miktarı ile artmaktadır (Macintosh, 1961; Gilbert, 1965; Davis J., 1967).

Kalay ilavesi ile daha yüksek ve daha düzgün sertlik değerleri olan gri dökme demir üretilebilmektedir (Ellwood, 1959; Long, 1964; Cage, 1965). Dökme demirin

sertlik değeri, yapı perlit haline gelinceye kadar kalay içeriği ile hızla artar ve sonra perlitik oran doygunluğa eriştiğinde yaklaşık olarak sabit kalır.

2.4.6.3. Kalay(Sn)'ın Darbe Mukavemetine Etkisi

Gri dökme demirlere yapılan kalay ilavesi darbe dayanımını düşürür (Thwaites, 1965; Prytherch, 1969). %0,05 Sn ilavesine kadar dökme demirlerde darbe dayanımı artar. Fakat özellikle kalın çaplı çubuklarda(25,4-38,1 mm arası) bu değerden sonraki kalay miktarları darbe dayanımına zarar vermektedir (Hoare, 1959; Davis J., 1967; Thwaites, 1969a). Küçük çaplı çubuklarda (25,4 mm'den az), kalaydaki katkılar %0,50'e kadar çıkarken darbe mukavemetinde herhangi bir değişiklik olmaz (Hoare, 1959; Davis J., 1967).

Kalay ilavesi mikroyapıyı kontrol etmek için gerekli miktarın üzerinde kullanıldığı zaman kırılganlığa neden olmaktadır (Davis J., 1967).

2.4.6.4. Kalay(Sn)'ın Mikroyapıya Etkisi

Eser miktarda (%0,10) ilave edilen kalay, gri dökme demirde ferriti bastırır ve masif sementit oluşumuna neden olmaksızın perliti teşvik eder (Anon, 1961; Robbins, 1963; White, 1963; Gilbert, 1964; 1965; Thwaites, 1965; Davis J., 1967; Thwaites, 1968; Barry, 1969). Demire ilave edilen kalay içyapıdaki ferritik dokuyu ortadan kaldırır (Long, 1964; Thwaites, 1968; 1969b).

Kalay, yüksek sıcaklıklarda bir perlit stabilizatörüdür. Yüksek sıcaklıklarda dökme demir morfolojisinde yapısal bozulma için gereken zaman kalay sayesinde artmaktadır (Robbins, 1963; Cage, 1965; Thwaites, 1965; Prytherch, 1969). Tam inceltilmiş bir perlitik matris üretmek için gereken kalay miktarı, başlangıçta demir içinde bulunan ferrit miktarına bağlıdır (Davis J., 1967).

2.5. Bileşimin Etkisi

Bilesimin etkisi, karbon eşdeğeri ile açıklanmaktadır. Demir ile ötektik oluşturmak için gerekli karbon miktarı, fosfor ve silisyum tarafından önemli oranda azaltılır. Ötektik bilesime yaklaştıkça ergime derecesi azalır, akışkanlık artar, katılaşmış dökme demirin çekme mukavemeti azalır. Karbon eşdeğeri bu etkinin ölçüsüdür ve CE= C+ [(Si+P)/3] bağıntısı ile hesaplanır (Akman, 2006).

Karbon eşdeğeri %4,3'ten büyük (ötektik üstü) olduğunda, karbüre veya grafitin ilk önce katılaşmasıyla gri dökme demir oluşumuna yol açar. Karbon eşdeğeri %4,3'ten küçük (ötektik altı) olduğunda, östenitin ilk önce katılaşmasıyla, beyaz dökme demir oluşumunu tetikler (Akman, 2006).

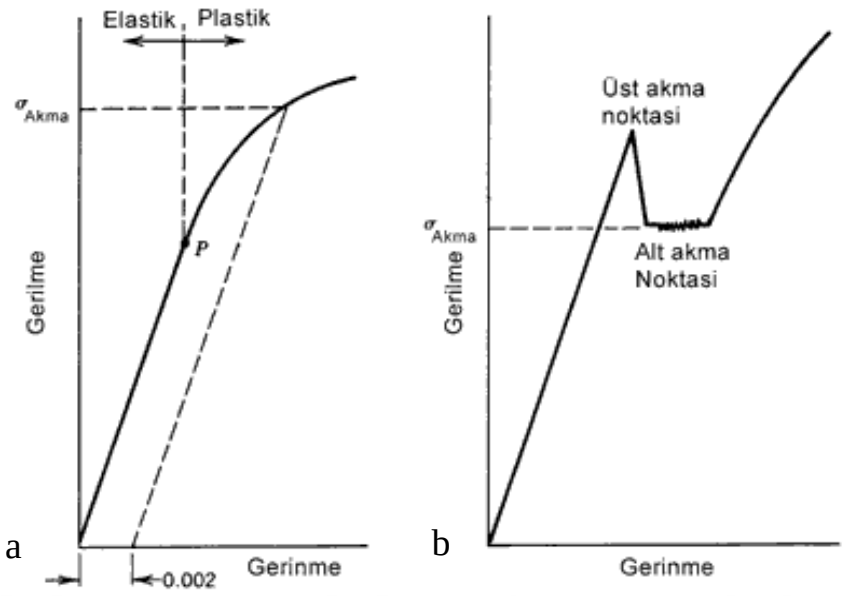
2.6. Gri Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

2.6.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek eksende, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir.

Çekme numuneleri: Çekme deneyine tabi tutulan numunenin, sonuçları sıhhatli bir şekilde ortaya çıkarılabilmesi için, alındığı malzemeyi tam olarak temsil edebilmesi şarttır. Numunenin malzeme durumu belirlendikten sonra, numunenin alındığı bölge, numunenin alınış şekli ve hazırlanış şekli de deney sonuçlarının irdelenmesini etkilemektedir (Kayalı, 1990).

Akma dayanımı: Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit olmasına karşılık, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünsüzlük gösterdiği bölgeye karşı gelen gerilme değeridir. Akmanın başladığı gerilme değerine üst akma sınırı, akmanın devam ettiği ortalama gerilmeye de alt akma sınırı adı verilir(Şekil 4 (b)).



Şekil 4. Çekme Eğrileri (a) Akma noktası belli olmayan malzemenin (b) Akması noktası belli olan malzemenin üst ve alt akma noktaları Gerilme-Gerinim grafiği (Dieter, 2001)

Fakat akma dayanımı bütün malzemelerde bariz değildir. Mühendislik olarak kullanılabilir elastik sınır ise akma sınırı olarak bilinir. Bundan dolayı Şekil 4(a)'da görüldüğü gibi belirgin bir şekilde akma göstermeyen malzemelerde de akma sınırının bilinmesi gerekir. Böyle akma göstermeyen malzemelerin (gri dökme demir gibi) çekme diyagramında belirli bir kalıcı uzama (örneğin; e= % 0,2) oranında elastik doğruya bir paralel çizildiğinde, eğriyi kestiği noktaya karşıt olan gerilme akma gerilmesi olarak alınır.

Elastisite modülü: Çekme diyagramındaki ilk doğrusal kısmın eğimine Elastisite Modülü veya Young Modülü (E) denir. Elastisite Modülü malzemelerin rijitlik ölçüsüdür. Elastisite Modülü ne kadar büyük olursa elastik uzama oranı o kadar küçüktür.

Çekme diyagramından malzemenin Elastisite Modülü, elastik sınır içindeki herhangi bir noktadaki gerilmenin, bu gerilmeye karşılık gelen uzama oranına (e) bölünmesiyle hesaplanır (Kayalı, 1990).

Çekme dayanımı: Bir malzemenin çekme dayanımı veya çekme mukavemeti, maksimum yükün (P_{max}) numunenin orijinal kesit alanına (A_0) oranıdır.

$$\sigma_{ç} = \frac{Pmax}{A0}$$

Uygulanan kuvvet kg ve numunenin kesit alanı mm^2 cinsinden ise, çekme mukavemeti birimi kg/mm^2 olarak ifade edilir (Kayalı, 1990).

2.6.2. Sertlik Deneyi

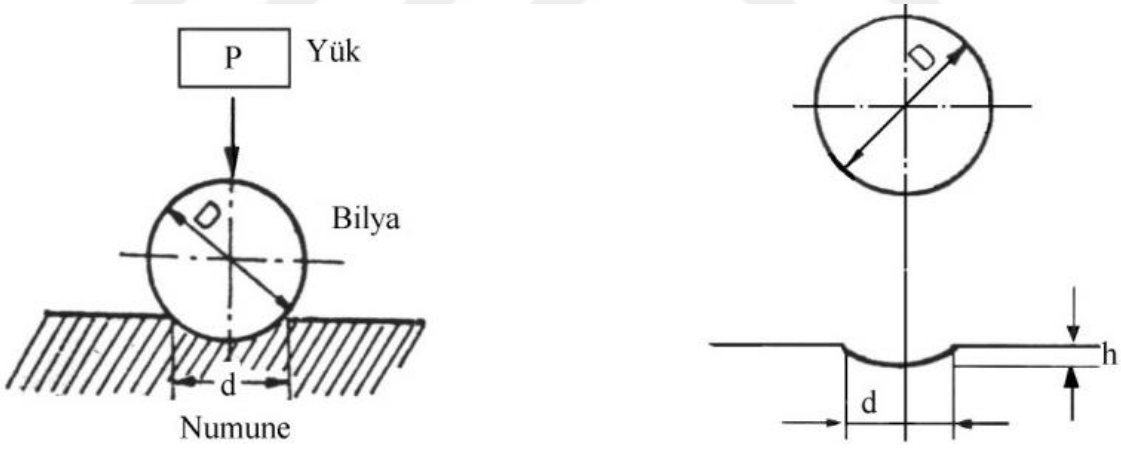
Sertlik ölçme genellikle, konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Uygun olarak seçilen uç uygun yük altında malzemeye batırıldığında malzeme üzerinde bir iz bırakır. Genel olarak malzemenin sertliği, bu izin büyüklüğü ile ters orantılıdır.

Malzemelere uygulanan sertlik ölçme yöntemleri şunlardır:

i. Brinell sertlik ölçme yöntemi
ii. Rockwell sertlik ölçme yöntemi
iii. Vickers sertlik ölçme yöntemi
iv. Mikro-sertlik deneyi

2.6.2.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntem numuneye sert malzemeden yapılmış bir bilyenin, belirli bir yük altında, belirli süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin çapının ölçülmesinden ibarettir (Şekil 5).



Şekil 5. Brinell sertlik deneyinin prensip şeması

$$BSD = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

P : Kg cinsinden uygulanan yük
D : mm cinsinden bilye çapı
d : mm cinsinden izin çapı

Brinell sertlik değeri yukardaki formülle bulunur. Brinell sertlik deneylerinde standart olarak 10 mm bilye çapı olduğunda 3000 kg yük 10-15 sn. tatbik edilir. 5 mm bilye çapında ise 500 kg'lık yük 30 sn. tatbik edilir (Kayalı, 1990).

2.6.3. Darbe Deneyi

Darbe deneyi, metallerin özellikle gevrek kırılma özellikleri hakkında sağlıklı bir fikir elde etmek amacıyla kullanılır. Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir.

Darbe deneyleri genellikle çentikli numunelerde yapılmaktadır. Fakat gri dökme demir numunelerinde malzemenin içyapısında bulunan lamel tipi grafitler çentik etkisi gösterdiği için ayrıca bir çentik açmak gerekmez.

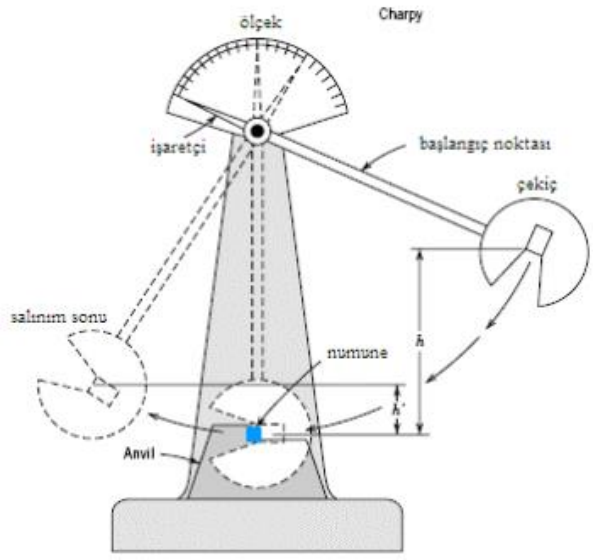
Darbe deneylerinde, Şekil (6)'de şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanır. Sarkacın, numuneye temas ettiği andaki potansiyel enerjisi ile numune kırıldıktan sonraki potansiyel enerjisi arasındaki fark, darbe direncini verir. Aşağıdaki formülle de bulunur (Kayalı, 1990).

Kırılma Enerjisi = $Gx(h - h_1)$

G : Sarkacın ağırlığı

h : Sarkacın ağırlık merkezine düşme yüksekliği (m)

h_1 : Sarkacın ağırlık merkezinden çıkış yüksekliği (m)



Şekil 6. Darbe deney cihazının çalışma prensibi

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma için seçilen yöntem kum kalıba dökülmüş çekme, sertlik, mikro yapı ve darbe numunelerinin farklı oranlarda kalay(Sn) ve bakır(Cu) uygulanarak dökümhane şartlarında üretilmesidir. Çalışma için iki farklı kompozisyonda referans numunesi ve kalay(Sn) ihtiva eden beş farklı kimyasal kompozisyonda araştırma numunesi bulunmaktadır. İlk referans numunesi bakır ve kalay takviyesi içermemektedir. İkinci referans numunesi bakır ilavelidir ve kalay içermemektedir. Diğer beş araştırma numuneleri ise farklı oranlarda sadece kalay alaşım elementi ihtiva etmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen çekme, darbe, sertlik ve mikro yapı test numunelerinin ilk ocak üstü kimyasal kompozisyonları Tablo 2'de olduğu gibi belirlenmiştir. Numuneler geleneksel kum kalıplara TSE standartlarına uygun olarak ve uygun döküm sıcaklıklarında dökülmüştür. Uygun döküm sıcaklığı esas çalışma öncesi 1200-1420 C^o sıcaklıklarında yapılan denemeler ile tespit edilmiştir.

Yapılan bu denemeler sonrası uygun döküm sıcaklığı (+/-10) 1320 C^o olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (1380-1420 C^o) hızlı soğuma etkisi ile termal çarpılmalara, döküm yüzeyinde pullanmalara ve kum sinteri hatalarına rastlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda ise (1200-1250 C^o) sıvı metal birleşmemesi (katmer) ve yolluktan sıvı metalin yürümemesi hatalarına rastlanmıştır.

3 tonluk ergitme ocağı için **hedef analiz;** **C: % 3,40** **Si: %1.70**

Tablo 2. Ocak şarjında kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri ve ocak üzerinde ilk analiz sonucu

Malzeme	C	Si	Mn	S	P	Cu
Ç1	4,06	0,6	0,26	0,02	0,05	0,01
St 37	0,18	-	0,20	0,02	0,02	-
Hurda	3,35	1,75	0,40	0,06	0,04	0,15
Ocak(Q. Lab.)	3,40	1,70	0,46	0,075	0,04	0,03

3.1. Gri Dökme Demir Üretiminde Ocak Şarjının Hesaplanması

Dökümhanelerde ocaklar bütün prosesin en başıdır. Ocaklarda sıvı metalin kimyasal kompozisyonunun sağlıklı hazırlanabilmesi için eritilen malzemelerin analizi daha önceden bilinmek zorundadır.

Tüm bunlar göz önünde bulundurularak ocaklara istenen analiz doğrultusunda aşağıdaki şarj hesapları yapılarak yükleme yapılmıştır. Ocakların yükleme prensibi Şekil 7'da şematik olarak anlatılmaya çalışılmıştır. Gri dökme demir sıvı metalinde düşük sıcaklılarda çalışıldığı için ocaklara eklenen karbon çoğu zaman erime problemi yapmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için ocaklarda sıvı metal 1500 C^0'ye kadar çıkartılarak kaynatılmıştır ve döküm sıcaklığına gelene kadar dinlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 7. İndüksiyon ocağına sarsak ile metal (Ç1 piki ve çelik gibi) şarjının şematik görünümü

Hesaplamalarda pikin analizi, sertifikalı ürünler kullanılarak ve ayrıca ergitme ocaklarında yalın pik eritme ile teyit edilmiştir. Tablo 2'de kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve ocak üzerinde Quick Lab analiz cihazında alınan ilk ocak analizinin kimyasal analizi verilmiştir.

Çelik hurda olarak St 37 saç paket malzemeler kullanılmıştır. İndüksiyon ocağında ergime hızı daha iyi ve maliyeti daha ucuz olduğu için St 37 saç paketler

tercih edilir. Çelik hurdadan yok denecek kadar az miktarda Si geldiği için % değeri ‘0’ olarak kabul edilmiştir.

Geri döngü olarak döküm parçalarının üzerinde bulunan ve kimyasal analizleri Tablo 2’de görülen; yolluk, besleyici veya hurdaya ayırılan parçalar kullanılmıştır.

Bu çalışmada %3,40 karbon ve %1,70 silisyum ile çalışılmıştır. Demir-Karbon denge diyagramındaki çalışma aralığı Şekil 1’de işaretli bölgede verilmiştir. Karbon eşdeğeri (CE) ise yaklaşık %4,00 civarındadır. Yani ötektik altında çalışılmıştır.

% Si oranının hesaplanması;

$\frac{(1300x0,6)+(500x1,75)}{3100}$ = 0,53 (Ergitme sonrası)

Ergitme ocaklarında silisyum kompozisyonunu ayarlamak için M-SiC (metalürjik silisyum karbür) kullanılmıştır.

NOT: Metalürjik SiC % 90’lik saflıktadır. Saf SiC içerisinde %70,50 Si ve %29,50 C bulunmaktadır.

Buna göre M-SiC içerisindeki kullanılabilen;

Si miktarı; 90*0,705 = % 63,5 Si

C miktarı; 90*0,2950 = % 26,5 C

Ocağa ilave edilen M-SiC Miktarı;

$\frac{(1,75-0,53)x\ 3100}{63,5}$ = **60 kg M-SiC** ilavesi yapılmıştır.

60 kg M-SiC ilavesi ocakta yapılarak silisyum için kimyasal kompozisyon ayarlanmıştır. Karbon için de %26,50 oranında etki edecektir.

% C oranının hesaplanması;

$\frac{(1300x4,06)+(500x3,35)}{3100}$ = 2,24 (Ergitme sonrası)

$\frac{(3,40-2,24)x\ 3100}{90}$ = 40 Kg karbon gereklidir.

NOT: kullanılan karbonlar %90 saflıktadır.

M-SiC ’den 60*0,26 = 15,6 kg C gelmektedir.
40 – 15,6 = **24,40 kg C** ilavesi yapılacaktır.

M-SiC ve karbon ilaveleri ocak şarj edilirken prosesin orta kısımlarında bir zamanda yapılır. Karbon veya M-SiC ilavesinin gecikmesi yukarıdaki bu hesapların yanılmasına neden olabilir; kimyasal kompozisyona nüfuziyetleri zaman aldığı için.

3.2. Alaşımlandırma ve Aşılama Prosesi

Alaşımlandırma ve aşılama işlemleri sıvı metal potaya alınırken yapılmıştır. Ocakta C ve Si değerleri ayarlanan sıvı metal uygun ocak sıcaklığında potalara alınmadan önce 30 kg’lık potalar için hassas terazilerde tartılarak hazırlanmış aşı ve %99 saflıkta alaşım elementleri (Cu ve Sn) potaya yerleştirilmiştir. 1350-1360 C^{o}‘de sıvı metal potalara alınmıştır. Homojen bir alaşımlandırma ve aşılama için sıvı metal 30 saniye potada bekletilmiştir. Bu zaman zarfında pota içerisindeki sıvı metalde istenen döküm sıcaklığına (+-10 1320 C^{o}) gelmiştir.

3.3. Numune Kalıplarının Hazırlanması ve Döküm İşlemi

Kum kalıplarda hazırlanan çekme, darbe, sertlik ve mikroyapı döküm numunelerine sıvı metal döküm işlemi yapılmıştır. Mikroyapı ve sertlik numuneleri için 30x70 mm boyutlarında yine silindirik bir maça kalıbı oluşturulmuştur (Şekil 8 b). Çekme numunesi için 30x300 mm boyutlarında silindirik bir kalıp oluşturulmuştur (Şekil 8 a). Darbe numunesi için 30x70 mm boyutlarında silindirik bir maça kalıbı oluşturulmuştur (Şekil 8 b).



(a)



(b)

Şekil 8. Numunelerin kalıplanması (a. Geleneksel kum kalıp, b. Maça kalıp)

Kalıplar hazırlanırken kalıp kumunun mekanik özellikleri mikser analizleri ile tayin edilmiştir. Kalıp kumu hazırlamak için uygulanan reçete ve kumun mekanik özelliklerini belirten analizler Tablo 3'te verilmiştir.

Kalıplaması yapılan numunelerin döküm işlemine pota içerisindeki sıvı metal istenen döküm sıcaklığına (+/-10 1320 C^o) geldiği zaman başlanmıştır. Numuneler 3 kg/sn döküm hızı ile dökülmüştür. Numunelerin döküm öncesi, döküm anı ve döküm sonrasına ait görüntüler Şekil 9'da görüldüğü gibidir. Döküm öncesinde ve sonrasında poşemen pota sıvı metal ile yıkanmıştır. Bu işlem potanın kendi sıcaklığını kaybetmemesi için ve önceki alaşımlandırmadan kalıntılar kalmaması için yapılmıştır. Döküm işleminden sonra kalıplar normal soğutmaya bırakılarak kalıp içerisinde bir gün bekletilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. Numunelerin döküm anı ve döküm sonrası görüntüleri (a) Poşemen ile döküm anı, (b,c) Döküm sonrası

3.3.1. Kalıp Bozma ve Temizleme

Kalıp içerisinde bir gün normal soğumaya bırakılan numuneler sarsak yardımı ile bozularak alınır. Numuneler yüzeyindeki kum vs. kalıntılarından arındırılmak için Şekil 10(a ve c)'de görüldüğü gibi kumlama makinesinde temizlenmiştir. Çapak ve yollukları flex ile kesilmiştir. Döküm yoluyla üretilen malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek amacıyla; ilk olarak numunelerin yüzeyi torna tezgâhında 2 mm işlenmiştir (Şekil 10 b ve d). Numuneler ASTM standartlarına uygun olacak şekilde CNC tezgâhlarında işlenerek testler için hazırlanmıştır.



a. b.

c. d.

Şekil 10. Numunelerin temizlenme aşaması çekme (a,c), darbe, sertlik ve mikroyapı numuneleri (b,d)

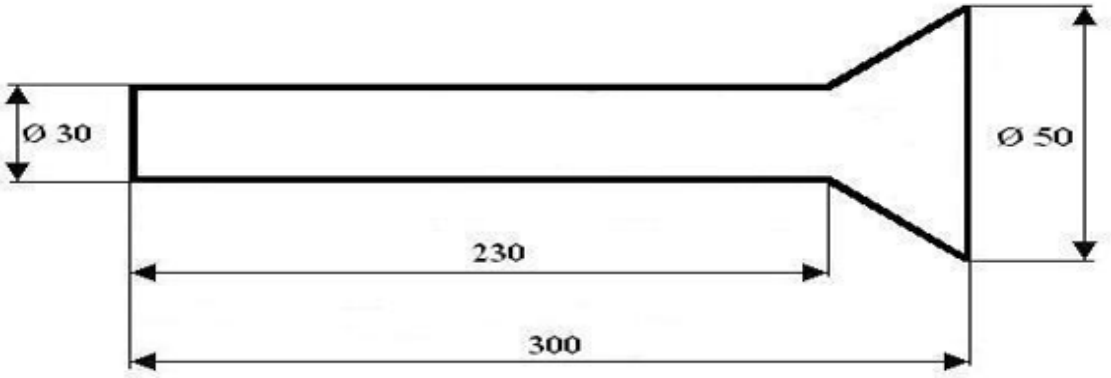
3.4. Kır Dökme Demirlerin Mekanik Muayenesi

3.4.1. Çekme Deneyi

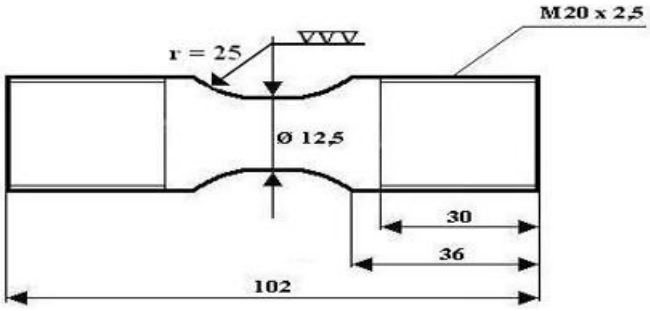
Çekme deneyi için TSE EN ISO 6892-1: 2016 standartlara uygun numune alınabilecek döküm kalıbı yaş kum ile hazırlanmıştır. Hazırlanma aşaması Şekil 8'da görülmektedir. Kumun mekanik özellikleri 'kalıp kumunun incelenmesi' bölümünde verilmiştir. Yaş kum içerisindeki nem döküm yüzeyine kum sinteri yapmaması için döküm prosesi öncesi şaloma ile kuru kum mukavemetini kaybetmeyecek şekilde bir

miktar kurutulmuştur. Döküme hazır kalıpların karışmaması için numaralandırılmıştır. Ocaklardan 1 tonluk potalara alınan sıvı metal 30 kg'lık poşemen adı verilen potalara alınarak numunelerin döküm işlemi yapılmıştır. Aşılama ve alaşımlandırma işlemleri poşemen potalarda yapılmıştır. Numunelerin döküm aşaması ve kalıptan çıkmış haldeki görüntüleri Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

TSE EN ISO 6892-1: 2016 standardına uygun lamel grafitli gri dökme demir için çekme numunesi hazırlayabilmek için döküm kalıp ölçüleri Şekil 11'de ve çekme numunesi standart ölçüleri Şekil 12'de verilmiştir. Çekme deneyi Konya KOSGEB Hizmet Müdürlüğü Laboratuvarında Dartec marka 40 ton kapasiteli çekme cihazında yapılmıştır. Numunelerin testleri TSE ISO 6892/1: 2016 test standartlarına uygun yapılmıştır. Deneyler 1 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 11. TSE EN ISO 6892-1: 2016 standardına göre çekme deneyi numunesi için pik döküm numunesi



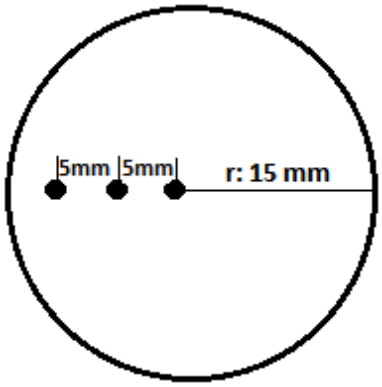
Şekil 12. TSE EN ISO 6892-1: 2016 standardına uygun çekme numunesi

3.4.2. Brinell Sertlik Deneyi

Sertlik deneyi için 30 mm çapında 70 mm yüksekliğinde maça kalıbına döküm işlemi yapılmıştır (Şekil 8 b). Dökümü yapılan parçalar normal soğumaya bırakıldıktan sonra döküm kalıbından çıkarılarak kumlama makinesinde temizlenmiştir. Kumlama makinesinde temizlenen numunelerin hava ile temas halinde olan baş kısmından 10 mm, şerit testerede kesilerek atılmıştır ve geriye kalan 60 mm'lik bölümü üç eşit

parçaya bölünerek sertlik için zımpara ile yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır (Şekil 10 b ve d). 80 mesh ’den 300 mesh’e kadar kademeli olarak zımparalama işlemi yapılmıştır.

Bu çalışmada Şekil 13’de görüldüğü gibi 30 mm çapındaki tüm sertlik numunelerinin merkezinden kenarına kadar üç farklı (nokta arası 5 mm) sertlik değeri alınmıştır.



Şekil 13. Brinell sertlik ölçüm bölgeleri

Sertlik testi Tümosan Motor ve Traktör AŞ’de Wolpert-Werke Marka Brinell Sertlik cihazında TS EN ISO 6506-4 2014 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. Sertlik testleri her parametre için üçer kez tekrarlanmıştır.

3.4.3. Darbe Deneyi

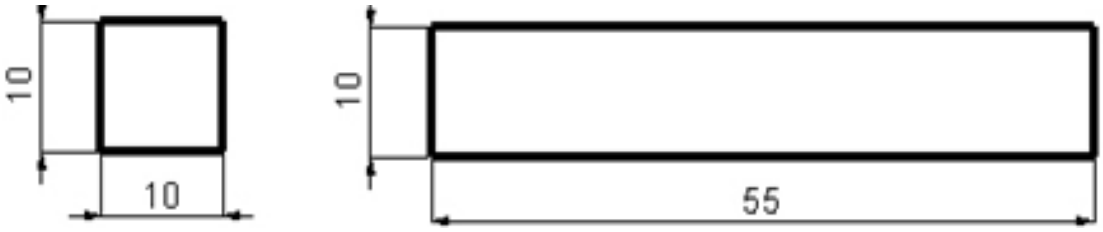
Darbe deneyi için 30 mm çapında 70 mm uzunluğunda maça kalıbı hazırlanmıştır. Ocaklardan uygun sıcaklıkta(1350-1360 C^0) 1 tonluk potalara alınan sıvı metal 30 kg’lık poşemenler ile numune kalıplarına dökümü yapılmıştır. Gerekli alaşımlandırma ve aşılama (%0,04) prosesi poşemenlerde yapılmıştır.

Darbe numuneleri döküm yapıldıktan sonra normal soğumaya bırakılarak kalıbından çıkarılmıştır. Darbe numunelerinin soğuma hızına özellikle dikkat edilmiştir. Hızlı soğumadan kaynaklı sertleşmelerin önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında dökümü yapılan numunelerden ASTM E-23 standartlarının ebatlarına uygun 10x10x55 mm boyutlarında darbe numuneleri CNC ve freze tezgâhlarında hassas bir şekilde işlenerek üretilmiştir (Şekil 14). Gri dökme demir içerisindeki lamel grafitler zaten çentik etkisi yaptığı için ayrıca çentik açılmamıştır.

Numuneler Genmot Crankshaft Industry Laboratuvarlarında Alşa Marka Izod-Charpy darbe deneyi yapabilen cihaz ile Charpy testine tabi tutulmuştur. 300 Joule

tipinde, çekiç boyu 770 mm, çekiç ağırlığı 20,5 kg ve çekiç düşme açısı 160^0'dır. Numunelerin darbe testi 20 C^0'de yapılmıştır.



Şekil 14. ASTM E-23 standardı ebatlarına göre(10x10x55mm) darbe numunesi

3.5. Metalografik İnceleme

Metalografik incelemeler çekme deneyi yapıldıktan sonra kırılan parçalardan hassas kesme ile alınan numunelerde yapılmıştır. 20 mm çapında olan çekme numunelerinden 15 mm uzunluğunda parçalar kesilmiştir. Metalografik çalışma bu parçalar üzerinden yürütülmüştür. Deney numunesinin metalografik incelemesi Tümosan Motor ve Traktör A.Ş. Dökümhane Laboratuvarında Metkon marka hassas kesme ve döner diskli zımpara / parlatma cihazında ve Leica marka metal mikroskop kullanılarak yapılmıştır (Şekil 15).



a. b.

c. d.

Şekil 15. Metalografik inceleme için kullanılan cihazlar; (a) hassas kesme tezgâhı, (b) spektrometre için yüzey taşlama tezgâhı, (c) zımparalama ve parlatma cihazı, (d) metal mikroskop

Metalografik inceleme numuneleri sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile zımparalandıktan sonra, ilk olarak 6 μm'lik ve daha sonra 3 μm'lik elmas pasta süspansiyonu ile çuhalarda parlatılmıştır. Parlatılan numuneler %2'lik Nital (2 ml HNO_3 + 98 ml CH_3OH) ile dağlanarak metalografik incelemeye uygun hale getirilmiştir. Dağlama işlemi 8-10 saniye dağlama solüsyonunda bekletilerek yapılmıştır. 10 saniye üstündeki bekletmelerde ferrit yapısının yandığı ve mikroskopta perlit görüntüsü vererek perlitik oranı yanılttığı tespit edilmiştir. Son olarak Tümosan Motor ve Traktör A.Ş. Dökümhane Laboratuvarındaki Leica Marka Metal Mikroskopta çeşitli büyütmelerde (10x-20x-50x) mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

Numunelerin 10X büyütmede perlitik oranına bakılmıştır. Numunelerin perlitik oranı 'ImageJ' adı verilen bir program ile ölçülmüştür. Mikro yapı fotoğrafları programa yüklenip önce 'Binary' yapılarak siyah beyaz forma getirilir ardından lameller işaretlenip faz farkı önlenir. Son olarak siyah ve beyaz bölgelerin analizi yapılarak perlit ve ferrit oranı belirlenmiş olur.

3.5.1. SEM İncelemesi

Bu çalışmada Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Fakültesinin ZEİSS EVO-LS10 Marka SEM cihazı kullanılmıştır. Çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin incelenmesi ve perlit kalınlığının belirlenmesi için farklı büyütmelerde SEM görüntüleri alınmıştır. Çekme testinden sonra numuneler hassas kesme tezgâhında kesilerek, SEM makinesine sığabilecek 3 mm kalınlığında uygun boyutlara getirilmiştir. Ayrıca numunelerin SEM incelemesini daha sağlıklı yapabilmek için fırında 120 C^0'de 2 saat bekletilerek neminden arındırılmıştır.

3.6. Kalıp Kumunun İncelenmesi

Döküm numunelerinin kalıplandığı yaş kum 2250 kg kapasiteli EİRİCH marka mikserde hazırlanmıştır. Kalıp kumu için gerekli şarjlar ve bu şarj sonrası kalıp kumunun mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 3'de verilmiştir. Kalıp kumların testleri her mikser için ayrı ayrı alınmıştır. Kum testleri Tümosan Motor ve Traktör A.Ş. Dökümhane Laboratuvarındaki kum test cihazlarında bakılmıştır (Şekil 16).

Tablo 3. Kalıp kumu şarj tablosu ve kumun mekanik değerleri

Mikser Şarj Değerleri			
Eski Kum (**kg**)	**1750**		
Yeni Kum (**kg**)	**50**		
Kömür Tozu (**kg**)	**20**		
Bentonit (**kg**)	**26**		
Alınan Su Miktarı (**kg**)	**30,10**		
Eski Kum Sıcaklığı (**C^0**)	**11,2**		
Analiz Sonuçları			
Test Numunesi (**gr**)	**142,50 (50x50 mm)**	Yaş-Basma Mukavemeti (**N/cm^2**)	**16,7**
Sıkıştırılabilme **(%)**	**45,3**	Ezme Mukavemeti (**N/cm^2**)	**3,5**
Gaz Geçirgenliği **($gr/sn.cm^3$)**	**111**	Kesme Mukavemeti (**N/cm^2**)	**5,2**
Nihai Nem (**%**)	**3,95**	Islak-Çekme Mukavemeti (**N/cm^2**)	**0,302**



a.



b.



c.



d.

Şekil 16. Kum test cihazları; (a) sıkıştırma test cihazı, (b) gaz geçirgenlik testi cihazı, (c) yaş çekme ve koparma testi cihazı, (d) nem ölçme cihazı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Kimyasal Analiz İncelemesi

Gri dökme demir üretimi için Kardemir Ç1 piki, St 37 çelik hurda paket malzemesi, %90 saflıkta Metalurjik Silisyum-Karbür (M-SiC), %72 tenöre sahip mangan, %99 saflıkta bakır, kalay ve kükürt malzemeleri kullanılmıştır. Ç1 pikinin, St 37 çeliğinin ve ocak kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Cu, Sn ve Aşı (%0,04) ilaveleri poşemen pota içerisinde yapılmıştır.

Nihai kimyasal analiz potalara yapılan takviye malzemelerden sonra çekme, darbe, sertlik ve mikroyapı döküm numuneleri ile beraber şahit analiz numunesi prensibi ile dökülmüştür. Dökümü yapılan analiz numunelerinin 80 mesh'lik kaba zımparalama sonrası kimyasal analizine bakılmıştır (Tablo 4). Numunelerin kimyasal analizine Tümosan Motor ve Traktör AŞ'de Bruker Q8 Magellan Marka (son kalibrasyon tarihi: 12.05.2017) spektrometre cihazında bakılmıştır.

Tablo 4. Nihai kimyasal analiz sonuçları

Numune no	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Fe
1	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	<0,001	0,012	94,00
2	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	**0,435**	<0,001	0,012	93,66
3	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	**0,030**	0,012	94,00
4	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	**0,060**	0,012	94,03
5	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	**0,090**	0,012	94,07
6	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	**0,120**	0,012	94,15
7	3,40	1,80	0,42	0,041	0,075	0,067	**0,150**	0,012	94,32

4.2. Mikroyapı İncelemesi

Numunelerin grafit morfolojisini ve perlitik yapısını belirlemek için metal mikroskobunda 10X ve 50X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve ayrıca perlit kalınlığını belirlemek için SEM mikroskobunda 100X büyütmede görüntüleri alınarak sonuçların daha sağlıklı değerlendirilmesini sağlamıştır.

Numunelerin metal mikroskobunda alınan 10X büyütmedeki görüntüleri, lamel tipini belirleme ve perlitik dokuyu ortaya koymak için önemli bir veridir. Şekil 17(a ve

b)'de görüleceği gibi referans numunelerinde A tipi grafit yapısı görülmektedir. %0,15 oranında kalay içeren numunede grafit morfolojisi daha dağınık ve belli başlı yerlerde rozetlenmeye yönelmiştir. Bu sonuç (Lyu Y.) sonuçları ile örtüşmektedir.

Şekil 17(a)'da görülen alaşımsız dökme demirde grafitin lamel yapısı genel olarak kalın ve uzundur. ASTM Lamel Boyutları Standartlarına göre A2 tipine uymaktadır. %0,4 bakır ilaveli referans numunesinde lamellerin boyu biraz daha kısa fakat lamel kalınlığı çok fazla değişmemiştir (Şekil 17 b).

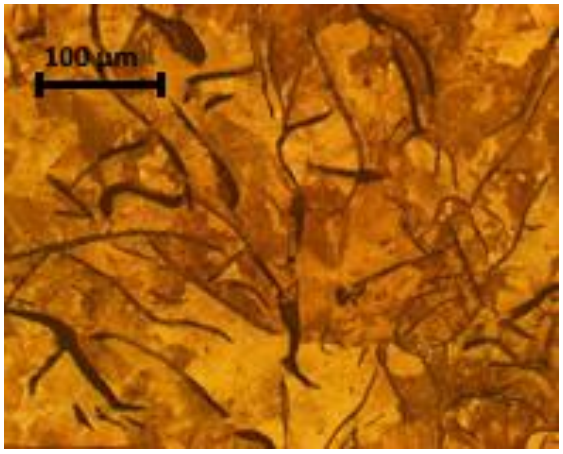
Şekil 17(c)'de %0,03 oranında kalay içeren numunede; kalay gri dökme demir mikroyapısında etkili olmamıştır ve lamel boyunda ve kalınlığında bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 17(d)'de %0,06 oranında kalay içeren numunede kalayın etkisini gösterdiği gözlenmiştir. Buna göre lamel boyu kısalmış ve A3 tipi lamel boyutuna dönüşmüştür. Bunun yanında bazı bölgelerde grafitin küreselleştiği gözlenmiştir (Şekil 17 d'de belirtilmiştir). %0,06 kalay(Sn) oranının dökme demir mikroyapısında lamel tipleri ve boyutları hakkında geçiş oranı olduğu düşünülmektedir (A2 lamel tipinden A3 lamel tipine dönüşüm olmuştur). Bu orandan sonra lameller daha düzgün, kısa ve ince seyretmiştir. Şekil 17(e)'de görülen mikroyapıda grafit yapısının A3-A4 tipi arasında seyrettiği belirlenmiştir. %0,09 Sn oranı ise kalayın kendi içinde bir diğer geçiş oranı olarak tespit edilmiştir. Lamel boyları çoğu bölgede kısa ve kalınlıkları daha incedir. Lamel dağılımları daha düzenlidir. Bu yüzden A3 ve A4 tipi lamellerin her ikisini de bulundurmaktadır. %0,12 oranında kalay içeren Şekil17(f)'de görülen mikro yapıda lamel tipi A4 olarak tespit edilmiştir. Lamellerin boyu daha kısa fakat bazı bölgelerde lamel kalınlıkları artmaktadır. Lamellerin %0,12 Sn oranında ve bu orandan sonra kıvrımlaştığı hatta %0,15 oranında kalay içeren Şekil 17(g)'de görüldüğü gibi rozetleşmelerin başladığı söylenebilir. Tam olarak rozetleşme diyemesek de belli noktalarda yığılmalar görülmüştür.

Öte yandan bir diğer konu numunelerin perlitik oranını belirlenmiştir. Şekil 17'deki görüntülere genel olarak bakıldığı zaman, artan kalay miktarı ile paralel perlitik dokunun da arttığı gözlenmiştir. Anon ve arkadaşları 1965 yılında, eser miktarda (%0,10) ilave edilen kalayın, gri dökme demirde ferriti bastırıp ve masif(serbest) sementit oluşumuna neden olmaksızın perliti teşvik ettiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada çıkan sonuçlara göre kalay elementi ağırlıkça %0,12'ye kadar gri dökme demir morfolojisi içindeki karbonun grafit olarak değil de bir bileşik olan sementit olarak çökelme eğilimi kazandırdığı görülmüştür.

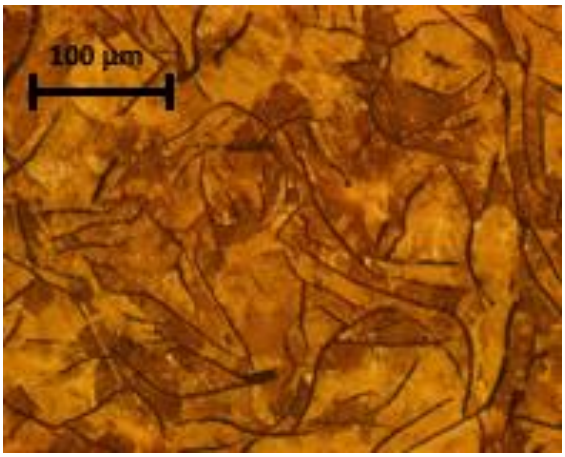
Alaşım elementi içermeyen referans numunesinde perlitik dokunun yaklaşık %40 oranında olduğu görülmüştür (Şekil 17 a). %0,4 Cu ihtiva eden diğer referans numunesinde ise bu oran %70'lere kadar çıkmıştır.

Kalay elementi gri dökme demir morfolojisinde matris yapısını ferritten perlite dönüştürdüğü gözlemlenmiştir. Bu dönüşüm Şekil 17(f)'de görüleceği gibi %0,12 kalay miktarına kadar sürekli artmıştır. %0,03 Sn içeren numunenin perlit oranı (Şekil 17 c) alaşım elementi içermeyen referans numunesi ile neredeyse aynı orandadır (Şekil 17 a). Çünkü kalay elementinin mikroyapıda sementiti bileşik olarak bağlama eğilimi kazandırması için yeterli olmadığı görülmüştür. Perlit oranındaki artış Şekil 17 (d)'de görüldüğü gibi %0,06 Sn oranında başlamaktadır. %0,06 Sn içeren numunede yaklaşık %60 oranında perlitik doku gözlenmiştir (Şekil 17 d). Bu sonuç Lyu ve arkadaşlarının 2015 yılında buldukları sonuçlar ile de örtüşmektedir. Fakat onlarda perlitik oran biraz daha fazla seyretmiştir aynı miktarda kalay ilavesinde. Bunu da Lyu ve arkadaşlarının çalıştıkları karbon aralıklarına bağlanabilir. Daha düşük karbon değerlerinde çalışmışlardır.

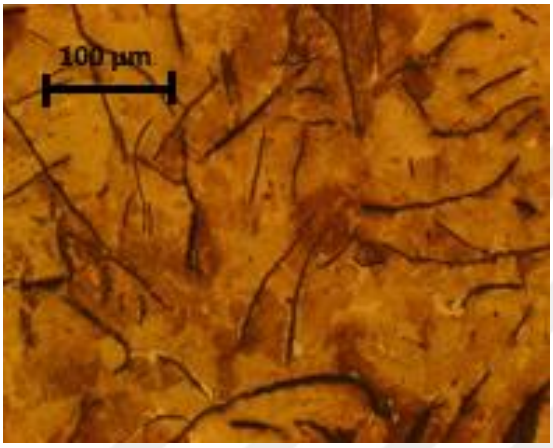
%0,09 kalay(Sn) içeren numunede perlitik oran bir miktar daha artarak yaklaşık %75 oranında seyretmiştir. Şekil 17 (f ve g)'de görülen %0,12 ve %0,15 kalay ihtiva eden numunelerde perlitik oran yaklaşık %90'a ulaşmıştır. %0,12 kalay içeren numune ile %0,15 kalay içeren numunelerin perlitik oranında çok fazla bir değişim görülmemiştir. Buda gösteriyor ki kalay elementi gri dökme demir içerisindeki matris yapısının ferritten perlite dönüşümünü %0,12 oranına kadar etki edebiliyor. Bu sonuçtan, kalay elementinin mikroyapıda %0,12 oranından sonra sementititin bileşik olarak bağlanma eğilimindeki doygunluk noktasına ulaştığı anlaşılıyor. Lyu ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışmada ise kalayın %0,057 oranına kadar perlitik oranı artırabileceğini bulmuşlardı. Öte yandan (Tan, Temmuz 2005) yılında yaptığı çalışmada bakır elementinin gri dökme demir morfolojisinin matris yapısını perlit olarak çökelttiğini savunmuştur. Bu çalışmada da bakır elementi için bulunan sonuçlar benzer çıkmıştır.



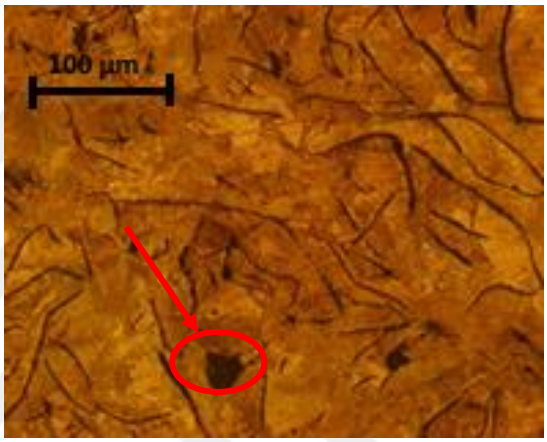
a. Alaşımsız



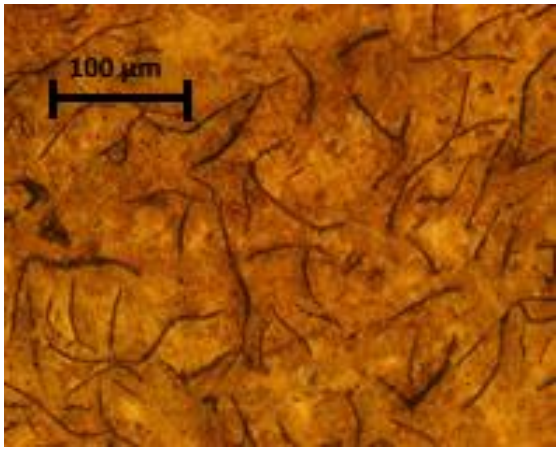
b. %0,4 Cu



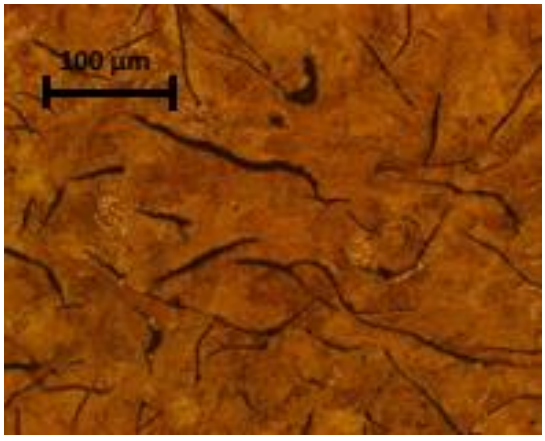
c. %0,03 Sn



d. %0,06 Sn



e. %0,09 Sn



f. %0,12 Sn



g. %0,15 Sn

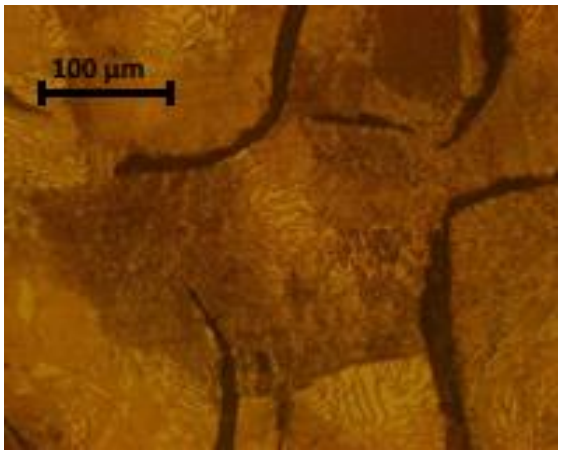
Şekil 17. 10X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

Numunelerin 50x büyütmedeki görüntüleri perlit dokusunun inceliği ve kalınlığı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 18 (a)'da görülen alaşım elementsiz numunenin perlit dokusunun kalın olduğu görülmektedir. Bu dokuya yakın değerler %0,03Sn içeren (Şekil 18 c) numunede ve %0,4 Cu içeren (Şekil 18 b) numunede görülmektedir. Bakır elementinin gri dökme demir morfolojisinde perlit miktarını arttırdığı görüldü fakat perlit dokusunda herhangi bir değişim görülmemiştir.

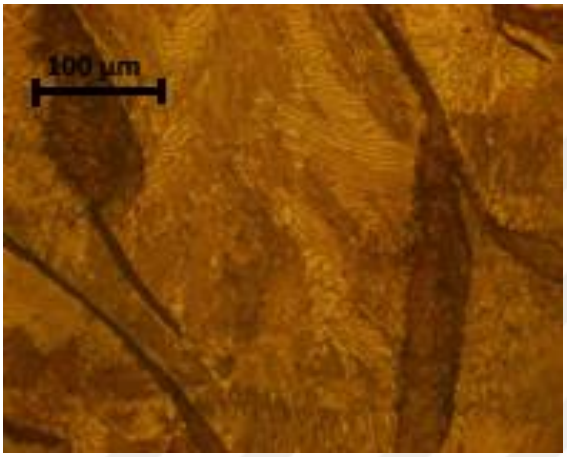
Kalay elementi ihtiva eden diğer numunelerde perlitik doku, kalay miktarındaki artış ile incelmektedir. En ince perlit dokusu Şekil 18 (f)'de görüleceği gibi %0,12 Sn içeren numunededir. %0,12 Sn içeren numunenin morfolojisindeki perlitik dokunun görüntüsü adeta 'insanların parmak izine' benzemektedir. Kalay gri dökme demir mikroyapısında bulunan perlitin sementit dokusunu daha sık ve daha ince bir şekilde çökelmesini sağlamıştır. %0,15 Sn içeren numunenin perlit dokusunun bazı bölgelerde bozulduğu hatta kalınlaştığı söylenebilir (Şekil 18 g). Sertlik ve çekme dayanımında görülen düşüşü perlit dokusundaki bozulmaya (kalınlaşma) ve lamellerinde ki düzensizlik, topaklanma ve bazı bölgelerde oluşan rozetlenmelere bağlanabilir. Davis J'nin 1967 yılında yaptığı çalışmada daha ince perlitik doku için kalay oranının %0,1 oranına kadar çıkılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada da en ince ve düzgün perlitik dokuyu %0,12 Sn içeren numunede elde edilmiştir.



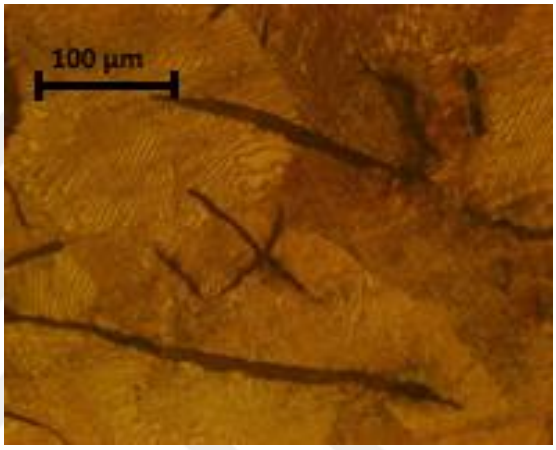
a. Alaşımsız



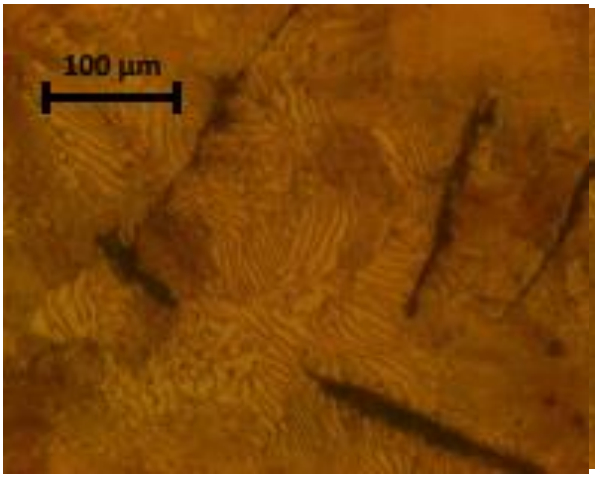
b. %0,4 Cu



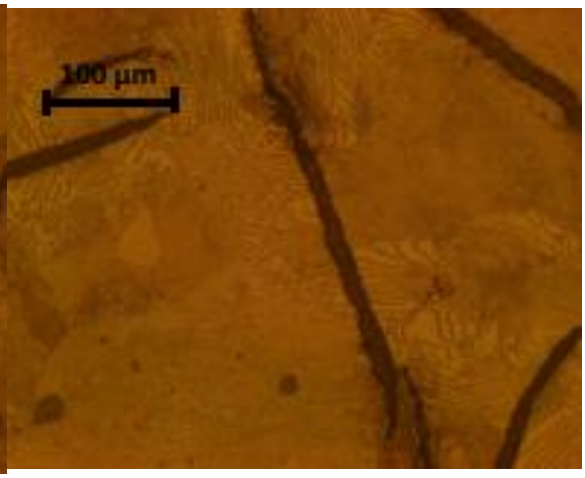
c. %0,03 Sn



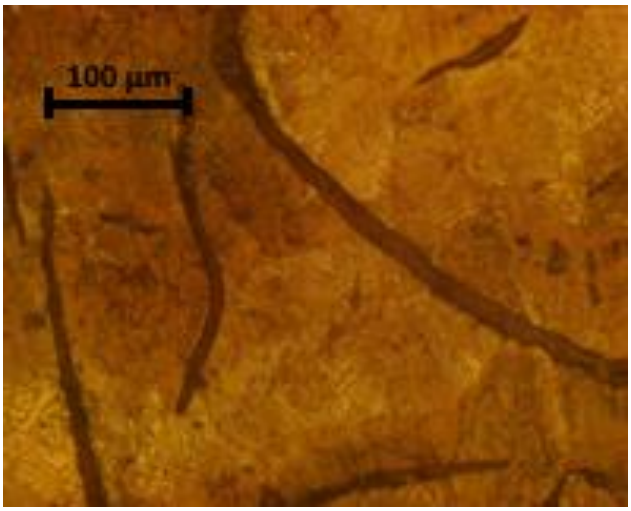
d. %0,06 Sn



e. %0,09 Sn



f. %0,12 Sn



g. %0,15 Sn

Şekil 18. 50 X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

4.3. Sertlik Deneyi Sonuçları

Numunelerin sertlik değeri Brinell Sertlik metodu ile yapılmıştı. Bilye çapı 5 mm ve yük olarak 250 kg seçilmiştir. 2 nolu kenar sertliğinin bilye çapı 2,5 mm ve yük 187,5 kg'dır. 2 nolu kenar sertliğinde daha küçük bilye ve buna bağlı olarak daha az yük seçmemizin sebebi, kenara yaklaştıkça numunelerin kırıldığı gözlemlenmiştir.

Bilindiği gibi, dökme demirin mekanik özellikleri, grafit morfolojisine, (şekil, dağılım, miktar ve boyuta) ve matris yapılarına (ferrit, perlit) bağlıdır. Literatür araştırmaları matris yapısındaki perlit oranının artışı ve grafit morfolojisindeki düzenli dağılımın sertlik değerini arttırdığını göstermektedir.

Araştırma numuneleri üzerinden üç farklı noktada Brinell sertlik deneyi yapılmıştır. Sertlik değerlerinden bir tanesi orta noktada diğer ikisi ise kenara doğru 5'er mm aralılarla alınmıştır. Sertlik deneylerinden çıkan sonuçlar Şekil 19'de görüldüğü gibi ortalamaları ile beraber verilmiştir.

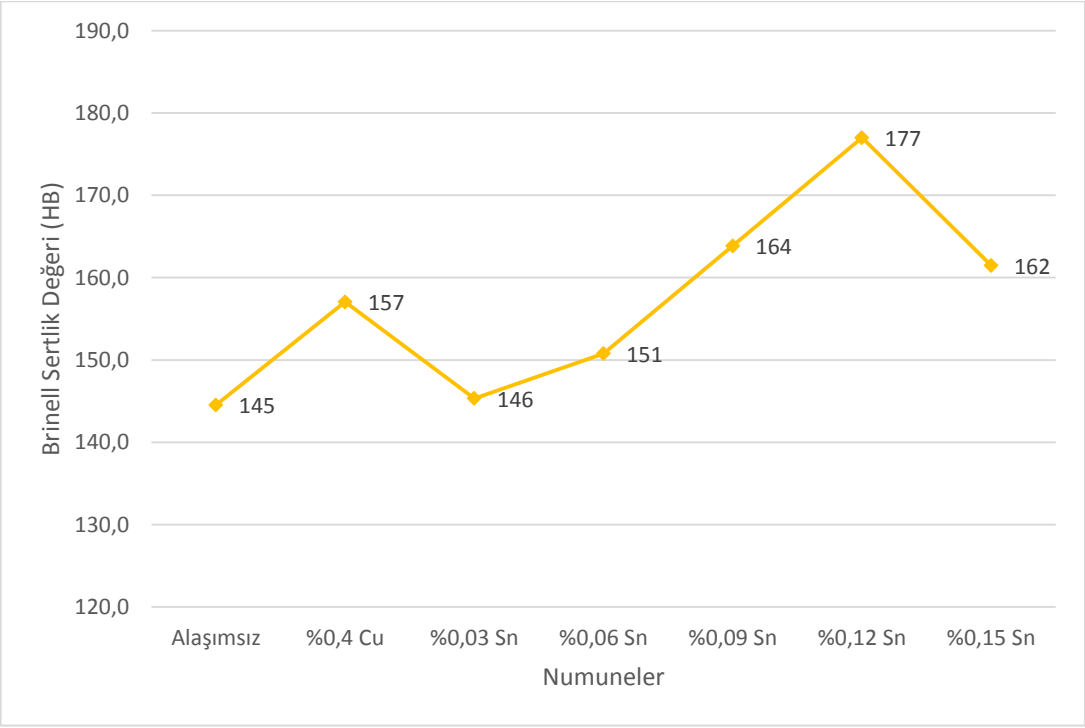
En düşük sertlik değeri, alaşım elementi ilavesi yapılmayan 1 nolu referans numunesinden alınmıştır. Bu değere en yakın değer %0,03 miktarında kalay(Sn) ihtiva eden 3 nolu numunede görülmektedir. Bu iki numunenin mikroyapısnıdaki matris yapısı yaklaşık %60 ferritik olduğu için sertlikleri düşük çıkmıştır.

2 numaralı referans numunesinde sadece bakır (%0,4 Cu) ilavesi yapılmıştır. Şekil 21'de görülen sertlik sonuçları bakırın gri dökme demir sertliğine olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Miktoyapıda perlitik oranın artması ile sertlikte artmıştır.

%0,03-0,06-0,09-0,12-0,15 oranlarda farklı kalay(Sn) içerikli numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında, %0,12 oranında kalay içeren numunede en yüksek sertlik değeri görülmüştür. Çünkü %0,12 kalaylı numunenin perlit dokusu çok ince ve sık olduğu için maksimum sertlik elde edilmiştir. %0,40 oranında bakır(Cu) içeren gri dökme demirin sertlik değeri, %0,06-0,09 oranında kalay(Sn) içeren numunelerin sertlik değerlerinin arasında bir sertlik değerine tekabül ettiği tespit edilmiştir.

Macintosh, Gilbert ve Davis J.'nin 1967 yılında yaptıkları çalışmalarda gri dökme demir içerisinde artan kalay miktarının perlit miktarını arttırdığını ve bununla bağlantılı olarak da Brinell sertlik değerlerinin arttığını vurgulamışlardır.

Öte yandan Ellwood ve arkadaşları 1959 yılında yaptığı çalışmalarda perlit miktarı matris içinde tam doygunluğa ulaşıncaya kadar Brinell sertlik değerinin arttığını belirtmişlerdir. Doygunluk miktarından sonraki kalay ilavesinde (%0,1 Sn'den sonra) sertlik değerleri bir miktar sabit kaldığını ve aşırı yüklemede düşüşler de gözlendiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma da Elwood ve Macintosh'un çalışmalarına yakın ve destekleyen sonuçlar çıkmıştır. Fakat %0,15 kalay içeren numunede sertlik değerinde bir düşüş görülmektedir. Perlit oranı %0,12 Sn içeren numune ile aynı olsa da sertlik düşmüştür. Bu düşüşü mikroyapı içerisinde artan ve bazı bölgelerde topaklaşan ve ayrıca gri dökme demir morfolojisinde perlite göre daha yumuşak olan grafite bağlayabiliriz.



Şekil 19. Brinell sertlik değeri sonuçları

4.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneylerine ait gerilme-%uzama eğrileri EK 1-4'de verilmiştir. Grafik eğrilerinde de görüldüğü gibi numuneler belirgin bir akma göstermemişlerdir. Akma mukavemetini bulabilmek için %0,2 uzama değerinden eğriye paralel çizilen doğrunun eğride kestiği nokta ile belirlenmiştir. Bu noktanın %uzama ekseninde denk gelen değer de %akma uzaması olarak tespit edilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi en yüksek akma mukavemeti %0,12 Sn içeren numunede görülmüştür. En düşük akma değeri ise alaşım elementi içermeyen 1 nolu numune belirlenmiştir. Ayrıca Tablo 6'da da tüm numunelerin çekme deneyine ilişkin sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5. Çekme deneyi sonuçları

Malzeme ve Özellikler	**Çekme Mukavemeti (N/mm^2)**	**Akma Mukavemeti (N/mm^2)**	**% Kopma Uzama**	**% Akma Uzama**
1 [Alaşımsız]	157	150	2,3	2,1
2 [%0,4 Cu]	177	173	2,7	2,65
3 [%0,03Sn]	166	162	2,53	2,35
4 [%0,06Sn]	176	167	2,6	2,22
5 [%0,09Sn]	185	180	2,8	2,61
6 [%0,12Sn]	195	190	2,8	2,7
7 [%0,15Sn]	175	168	2,55	2,2

Numunelerin tamamı gevrek bir kopma karakteri sergilemişlerdir. Çekme mukavemeti sonuçları Şekil 20'de verilmiştir. Alaşım elementi içermeyen 1 nolu referans numunesi %2,3'lük uzama ve 157 N/mm^2 çekme dayanımı göstermiştir. Mikroyapı ferritik ve grafit lamelleri kalın ve düzensiz olduğu için en düşük çekme dayanımı gözlenmiştir. %0,4 Cu içeren numune %2,7 uzama ve 177 N/mm^2 çekme dayanımı göstermiştir. Bakır elementi içeren numunenin çekme dayanımı alaşım elementi içermeyen numunenin çekme dayanımından %12,5 daha yüksek çıkmıştır. %0,4 Cu içeren numunenin perlit oranı daha yüksek olduğundan çekme dayanımı 1 nolu referans numunesinden daha yüksek çıkmıştır. Kopma uzaması da % 17 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Kalay elementi gri dökme demirin çekme dayanımını %0,15Sn değerine kadar her artışında (%0,03, %0,06, %0,09, %0,12) yükseltmiştir. %0,12sn değeri dökme demir için en yüksek çekme dayanımı sonucunu vermiştir. Bu değerden sonra %0,15Sn'de bir düşüş gözlenmektedir.

%0,03Sn içeren numune %2,53 kopma uzaması ve 166 N/mm^2 çekme dayanımı göstermiştir. Alaşım elementi içermeyen numuneye göre %5,5 çekme mukavemeti artışı ve kopma uzamasında da %10'luk bir artış elde edilmiştir. %0,40 Cu elementi içeren numunenin ise %7 oranında gerisinde kalmıştır. Kopma uzaması da aynı şekilde değişmiştir.

%0,06 kalay elementi ihtiva eden numunede 176 N/mm^2 çekme mukavemeti ve %2,6 kopma uzaması gözlenmiştir. %0,06 kalay ilaveli numune ile 1 nolu referans numunesi kıyaslandığında; çekme mukavemetinde %12 artış, kopma uzamasında ise %13 bir artış olmuştur. Bakır elementi içeren numuneye göre çekme dayanımı yaklaşık aynı kalmıştır. Kopma uzaması %4 düşük seviyede seyretmiştir.

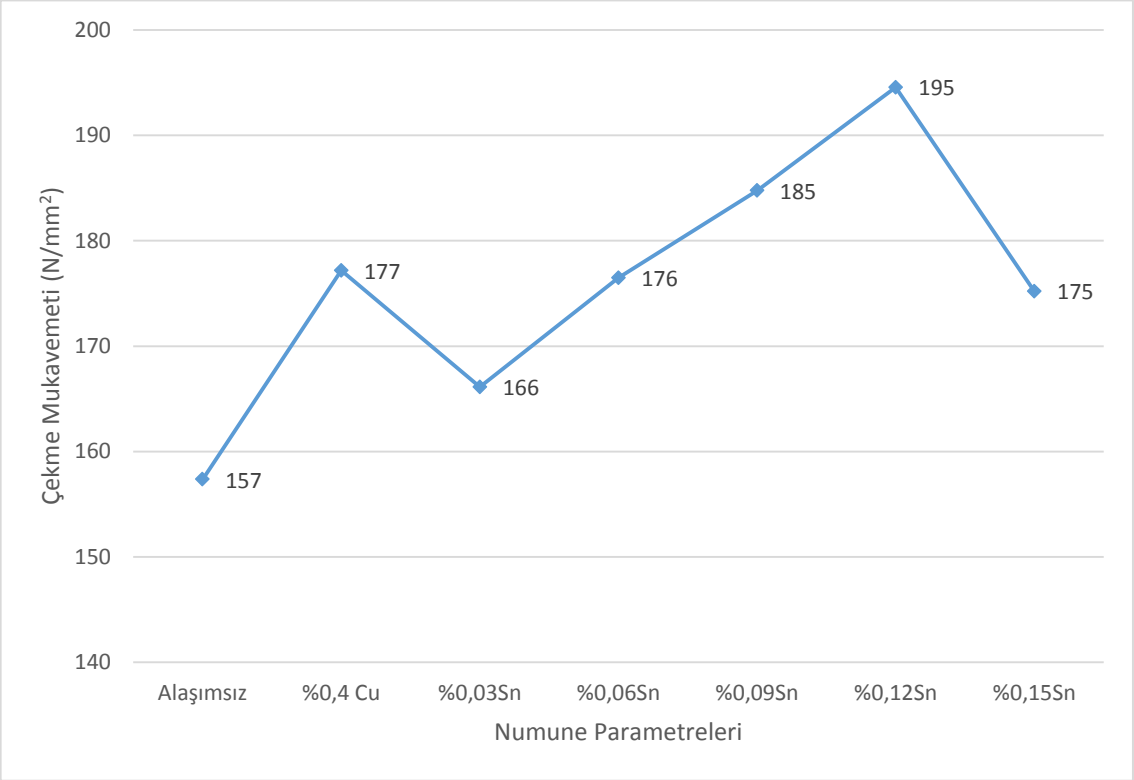
%0,09 Sn içeren numunenin çekme mukavemeti 185 N/mm^2 ve kopma uzaması %2,8 olarak ölçülmüştür. Bu numunenin çekme mukavemeti alaşım elementi içeremeyen numuneye göre %17,5 artış göstermiştir. %0,40 Cu içeren numuneye göre %4 artış göstermiştir. Kopma uzamasında, alaşım elementine göre %21,5 ve bakır elementi içeren numuneye göre ise %3,5 artış gözlenmiştir.

En iyi ve en verimli sonuçlar %0,12 Sn içeren numunede elde edilmiştir. Çekme dayanımı 195 N/mm^2 ve kopma uzaması %2,8 olarak tespit edilmiştir. Numuneler arasında en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Alaşım elementi içermeyen numune ile kıyaslandığında; çekme dayanımı % 23,5 ve kopma uzaması %21,5 artış göstermiştir. %0,4 oranında bakır elementi içeren numuneye göre çekme dayanımı %10 ve kopma uzaması %3,5 artış göstermiştir. %0,12 Sn içeren numunenin çekme mukavemetinin en yüksek olmasını; perlit dokusundaki artış, sıklık ve inceliğe bağlayabiliriz. %0,12 Sn içeren numunenin perlit oranı yaklaşık %90 çıkmıştı ve perlit dokusu da diğer numunelere göre gayet ince bir formda gözlenmiştir. Bu da çekme dayanımı arttıran bir faktör olmuştur. Ayrıca lamel yapısının kısa ve düzgün olması da çekme dayanımındaki artışa etki etmiştir.

Kalay oranı en fazla olan numunede çekme dayanımında ve kopma uzamasında düşüş görülmektedir. %0,15 Sn içeren numunenin çekme gerilmesi 175 N/mm^2 ve kopma uzaması %2,55 gelmiştir. Bakır elementi ihtiva eden numuneye göre; çekme dayanımı %2 ve kopma uzaması %6 düşük olarak tespit edilmiştir. Alaşım elementi

içermeyen numune ile kıyaslandığında; çekme dayanımında %11, kopma uzamasında ise %10 artış görülmüştür. %0,15 Sn içeren bu numunenin çekme dayanımındaki düşüş; grafit lamellerindeki bölgesel düzensizlikler ve perlit dokusundaki kalınlaşma ile açıklanabilir. Yapı içerisindeki lamellerin düzensiz olması çekme dayanımında düşüşe sebep olmuştur.

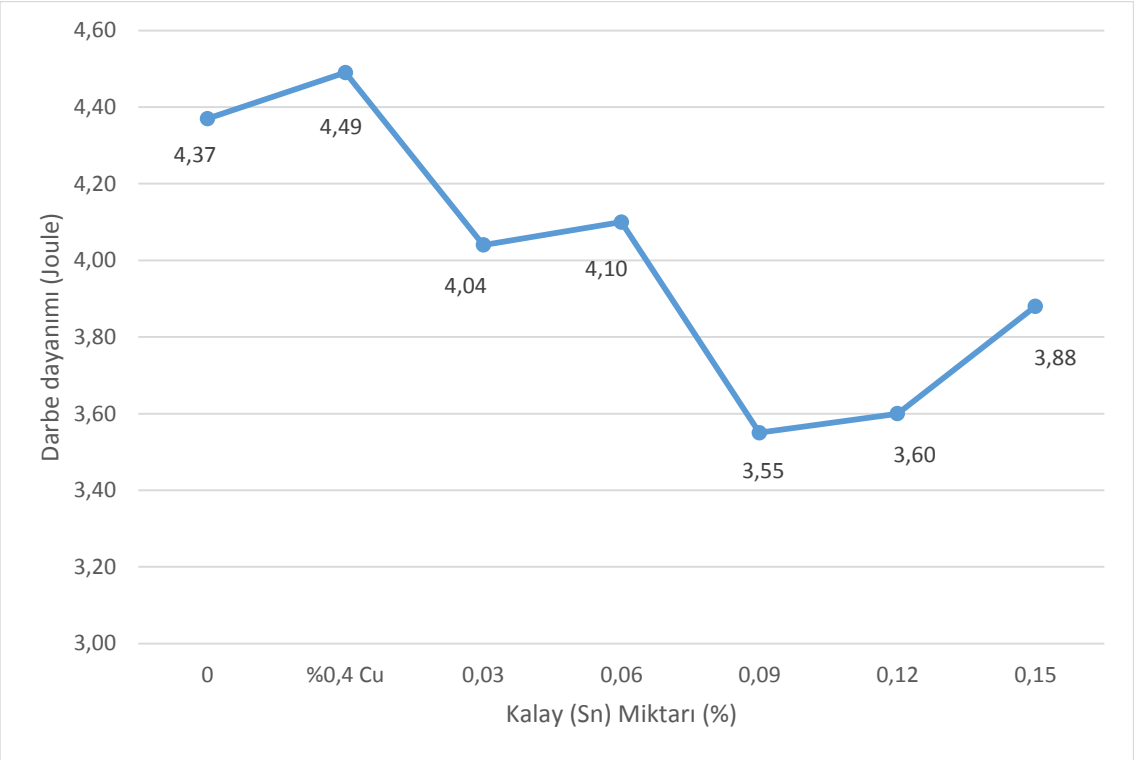
Veresh'nin 1965 yılında yaptığı çalışma da kalay elementinin çekme dayanımı düşürdüğünü belirtmiştir. Bu çalışmada bulunan sonuçlar 1965 yılında yapılan Veresh'nin çalışması ile örtüşmemektedir. Öte yandan 1969 yılında Prytherch'ın yaptığı çalışma da ise kalay %0,2-0,3 oranları arasında gri dökme demirin çekme mukavemetini arttırdığını vurgulamıştır. Bu çalışmada bulunan sonuçlar ile Prytherch'in sonuçları da uyuşmasa da kalayın gri dökme demirin çekme mukavemetini arttırabildiğini belirtmiştir. 1969 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise Thwaites mikro yapı içerisindeki perlit miktarındaki artışa paralel olarak çekme dayanımının arttığını vurgulamıştır ve gri dökme demirde perlit oranındaki artışın kalay elementi ilavesi ile olabileceğini belirtmiştir. Thawaites'in sonuçları bu çalışma ile örtüşmekte ve Thawaites'i destekler nitelikte olmuştur.



Şekil 20. Çekme mukavemeti sonuçları

4.5. Darbe Deneyi Sonuçları

Numuneler lamel grafitli dökme demir olduğu için ayrıca çentik açılmamıştır. Her parametre için 3 ayrı deney yapılarak bunların ortalaması alınmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. Darbe deneyi sonuçları(kırılma enerjisi ve kırılma açısı)

Şekil 21'de görülen darbe deneyi sonuçlarına genel olarak bakıldığında, en düşük darbe dayanımının %0,09 Sn içeren numunede 3,55 J olarak görülmüştür. Alaşım elementi içermeyen numune ile kıyaslandığında %26 düşüktür. En yüksek darbe dayanımı ise alaşım elementi içermeyen 1 numaralı numunede 4,49 J olarak görülmektedir. Darbe deneyinde numunelerin hepsi gevrek bir kırılma sergilemiştir. %0,15 Sn içeren numunenin darbe dayanımı 3,38 J olarak belirlenmiş. Bu numunedeki artış sertlikteki düşüş ile açıklanabilir. %0,15 Sn içeren numunede perlit oranı yüksek olsa da grafit lamelleri düzensiz ve kimi yerde küreselleştiği için sertlik düşmüş ve haliyle darbe dayanımı artmıştır.

Thawaites 1965 yılında yaptığı çalışmada gri dökme demire ilave edilen kalay elementinin darbe dayanımını düşürdüğünü ifade etmiştir. Bu çalışmada çıkan sonuçlar da bu kanıyı destekler niteliktedir.

Bir diğer araştırma da Hoare 1959 yılında %0,05 Sn oranına kadar kalayın gri dökme demir darbe dayanımını arttırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada alaşım elementi içermeyen numunenin darbe dayanımı en yüksek çıkmıştır. Fakat %0,03 Sn içeren numunede kırılma enerjisi 4,04 J iken %0,06 Sn içeren numune de 4,10 J olarak belirlenmiştir ve bu kalay değerinden sonra da kalay miktarı arttıkça darbe dayanımında düşüş gözlenmiştir. Darbe dayanımı sertlik ile ters orantılı olduğu için ve ayrıca gri dökme demir içerisinde bulunan perlit dokusu ferrit dokusunu aksine malzemeye süneklilik değil de sertlik verdiği için darbe dayanımları artan sertlik değeri ile azalmıştır.

4.6. SEM Analiz Sonuçları

Çekme numunelerinin kırılma yüzeyleri SEM analizi ile tespit edilmiştir. SEM görüntülerine genel olarak bakıldığı zaman; numunelerin genel olarak gevrek bir kopma davranışı sergilediği görülmektedir. Kalay ilavesi ve bakır ilavesi yapılan numunelerin bazılarında bölgesel sünek kopmaya rastlanmıştır.

7 farklı numunenin SEM'de 100X büyütmedeki görüntülerine bakıldığında genel kopma tavrı gevrektir.

Alaşım elementi içermeyen numunede genel kopma ve bölgesel kopma tavrının tamamen gevrek olduğu tespit edilmiştir. Kopma yüzeyindeki lamellerin düzlemleri ve numunenin lamel düzlemlerinden kırıldığı Şekil 24 a'da görülmektedir. Bu da lamellerin malzemede çentik etkisi yaptığını ortaya koymaktadır. Grafit lamellerin yoğun çentik etkisi nedeni ile çekme dayanımı da en düşük gözlenmiştir.

Bakır (%0,4) elementi ilavesi yapılan numunenin kopma yüzeyinde alaşımsız numuneye göre lamel düzlemlerine daha az rastlanılmıştır. Genel kopma tavrı gevrektir fakat bazı bölgelerde alaşımsız numuneye göre sünek kopma tavrı sergilemiştir. Lamellerin çentik etkisini burada da görmek mümkündür (Şekil 22 b). Kırılma yüzeyinde görünen sünek bölgeler yapı içindeki perlit veya ferrit bölgeyi gösterir ki bakır elementi içeren numunede perlit oranı daha yüksekti ve bu yüzden çekme dayanımı yüksek çıkmıştır.

%0,03 oranında kalay elementi içeren numunenin SEM görüntüsünde alaşım elementi içermeyen numuneye benzer bir görüntü elde edilmiştir. Şekil 22 c'de

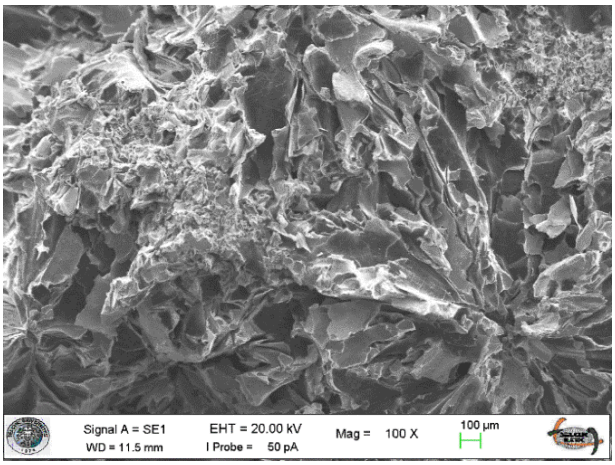
görüldüğü gibi genel kopma gevrektir. Nadir bölgelerde az da olsa sünek kırılmanın izleri görülmektedir. Lamel düzlemleri ve lamellerin çentik etkisi burada da görülmektedir. Bu sonuç çekme dayanımı sonucu ile örtüşmektedir. Çekme dayanımı sonucu 1 nolu alaşım elementi içermeyen referans numune ile yakındır.

Şekil 22 d'de görülen %0,06 Sn içeren numunenin kopma görüntüsü genel olarak gevrek kopmadır. Alaşım elementi içermeyen referans numunesi ile kıyaslandığında daha fazla bölgede sünek kopma düzlemleri görülmektedir. Şekil 22 d'de görüleceği gibi lamel düzlemleri ve lamellerin yapı içerisindeki çentik etkisi gözlemlenmiştir.

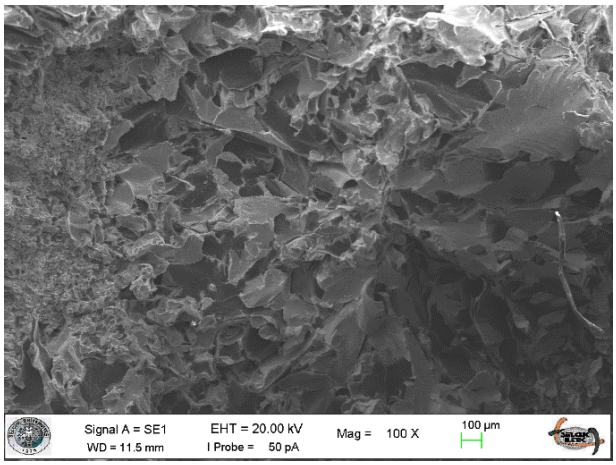
%0,09 Sn içeren numunenin kopma yüzeyi genel olarak gevrek olmakla beraber bölgesel sünek kopmalarda %0,06 Sn ve %0,4 Cu içeren numunelere kıyasla daha fazladır. Çekme dayanımı değeri de bu görüntüyü desteklemektedir. Şekil 22 e'deki görüntüde kopma yüzeyinde görülen lamel düzlemleri lamellerin çentik etkisini ortaya koymaktadır.

En yüksek çekme dayanımı sonucu alınan; %0,12 Sn içeren numunenin Şekil 22 f'de görülen kopma yüzeyinin genel kopma tavrı gevrektir. Buna rağmen bu numunede diğer tüm numunelerden daha fazla sünek kopma tavrı gösteren bölgeler saptanmıştır. Lamel düzlemleri ve lamellerin çentik etkisi burada da görülmektedir. Fakat diğer numunelerde olduğu gibi bariz olmadığı görülmüştür. Çekme dayanımı soucuna bakıldığında da en yüksek çekme dayanımı %0,12 Sn içeren numunede görülmüştür. Yapı içindeki perlit dokusu kırılma yüzeyinde sünek bölge olarak görülmektedir. Bu perlit dokusu da malzemeye çekme dayanımı kazandırmıştır.

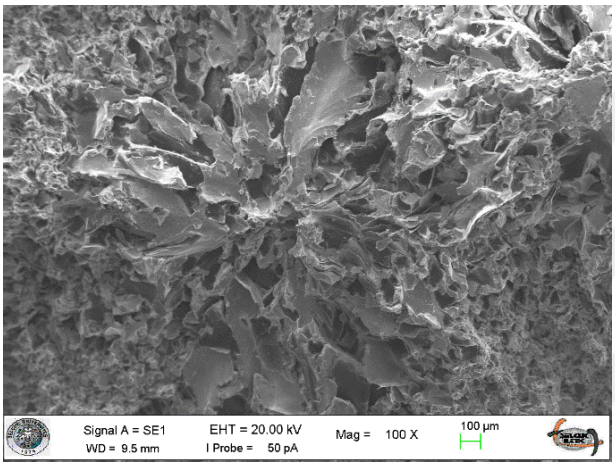
%0,15 kalay elementi içeren numunenin Şekil 22 g'de kopma yüzey görüntüsü görülmektedir. Kopma yüzeyinde genel kopma ve bölgesel kopma tavrı gevrek olarak belirlenmiştir. Bölgesel sünek kopma alaşım elementi içermeyen numune ile kıyaslandığında benzer bir kopma şekli görülmektedir. Lamellerin kopma düzlemi ve yapı içerisindeki çentik etkisi bu numunede açıkça görülmektedir. %0,15 Sn içeren numunenin kopma yüzeyinde görülen grafit lamelleri; mikroyapıda perlit oranının fazla olmasına rağmen çekme dayanımını düşürmüştür.



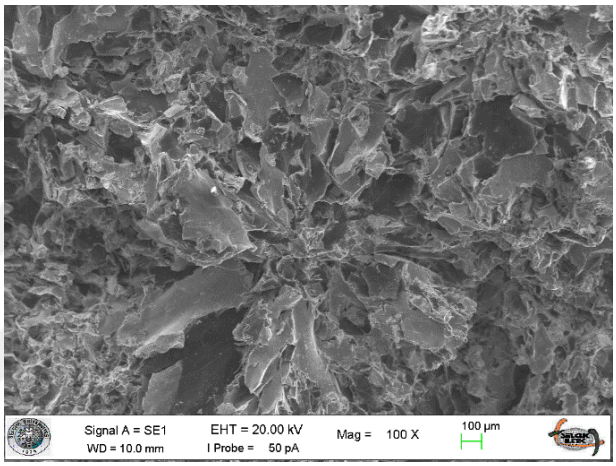
a. Alaşımsız



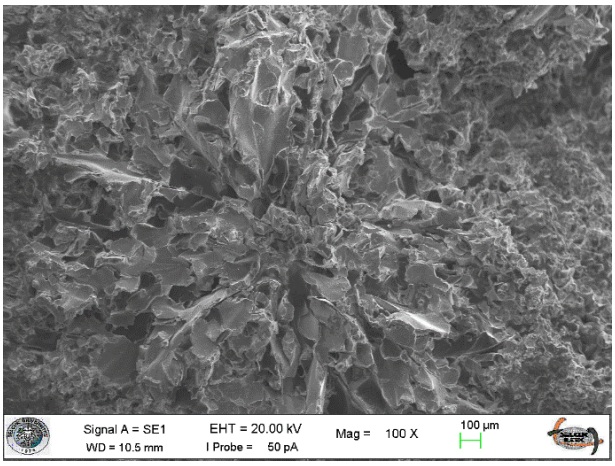
b. %0,4 Cu



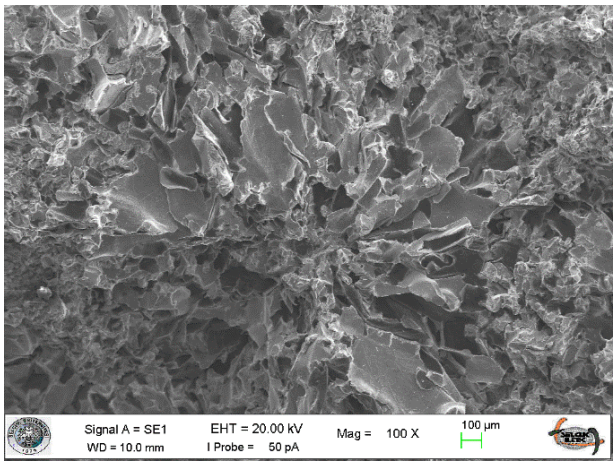
c. %0,03 Sn



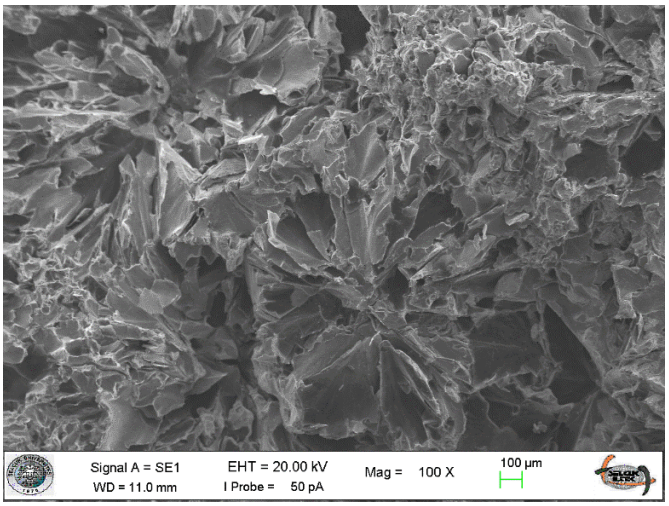
d. %0,06 Sn



e. %0,09 Sn



f. %0,12 Sn



g. %0,15 Sn

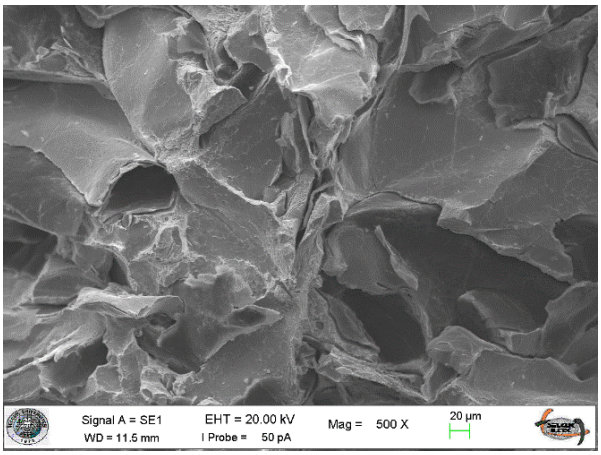
Şekil 22. 100X büyütmedeki SEM görüntüleri

Numunelerin Şekil 23'de 500X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler lamellerin kayma düzlemini ve çentik etkisini en iyi şekilde ortaya koymaktadır.

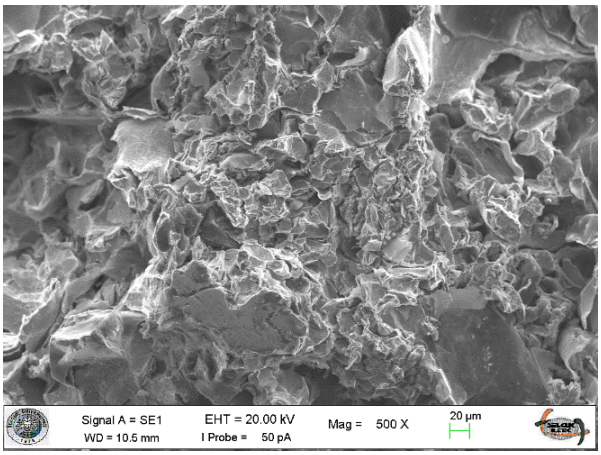
Alaşım elementi içermeyen numunede lamellerin kayma düzlemi ve çentik etkisi Şekil 23 a'da görülmektedir. Lamellerin yapı içindeki mukavemeti azaltıcı çentik etkisi, en fazla alaşım elementi içermeyen numunede tespit edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti sergileyen bu numunede, lamellerin çentik etkisi SEM görüntüleriyle de desteklenmektedir.

%0,4 oranında bakır elementi içeren referans numunesinde de lamellerin çentik etkisi görülmektedir (Şekil 23 b). Fakat alaşım elementi içermeyen numuneye göre daha az bölgelerde görülmektedir.

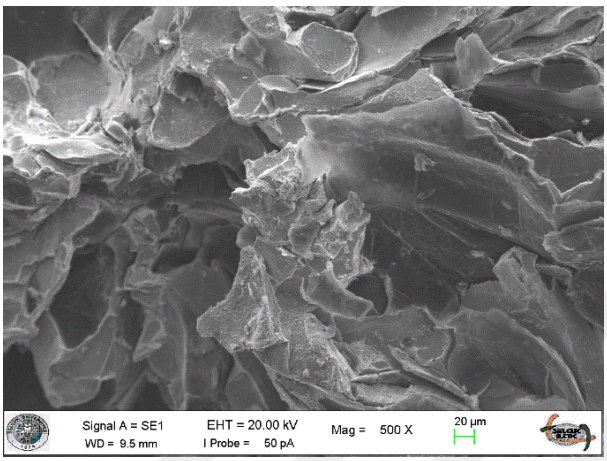
Kalay elementi içeren numunelerin (%0,03-0,06-0,09-0,12-0,15 Sn) SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 23 (c-d-e-f-g)'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kalay miktarı arttıkça (%0,12 Sn oranına kadar) lamellerin kayma düzlemi azalmaktadır. Bölgesel sünek kopma tavırlarında bir artış gözlenmiştir. %0,15 Sn içeren numune de ise karakter bir anda değişerek bölgesel kopma tavrındaki süneklilik azalmıştır. Lamellerin kayma düzlemi ve çentik etkisi Şekil 23(g)'de de görüleceği gibi belirgindir.



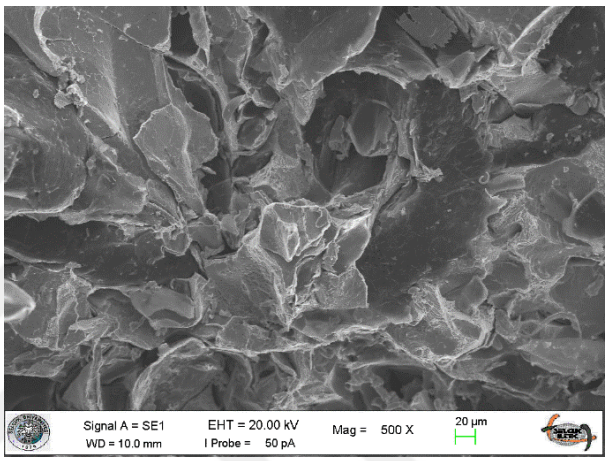
a. Alaşımsız



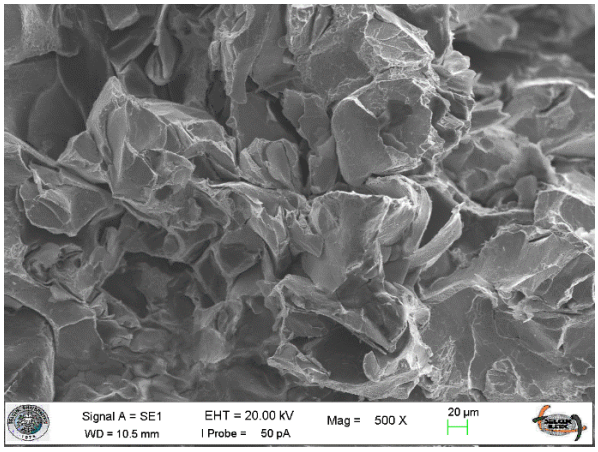
b. %0,4 Cu



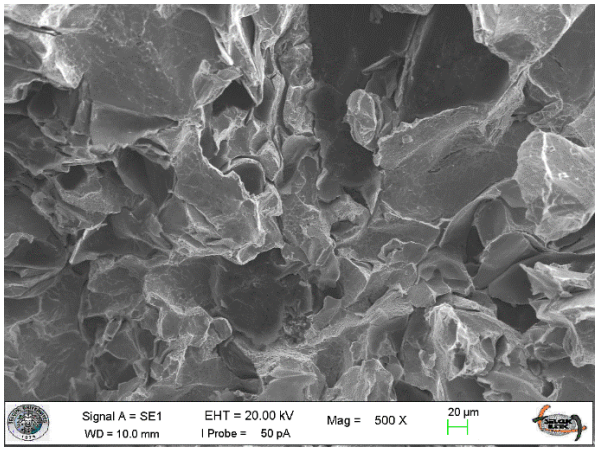
c. %0,03 Sn



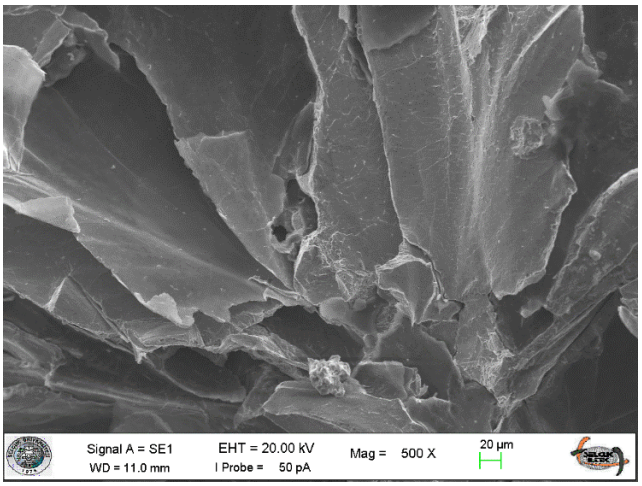
d. %0,06 Sn



e. %0,09 Sn



f. %0,12 Sn



g. %0,15 Sn

Şekil 23. 500X büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 24'de numunelerin 5000X büyütmedeki %2 Nital ile dağlanmış yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı matrisinde bulunan perlitik yapısının inceliği-kalınlığı, uzunluğu-kısalığı ve perlit dokuları arasındaki sıklık hakkında bilgi vermektedir.

Alaşım elementi içermeyen numunede kısa ve aralıkları diğerlerine göre daha geniş perlit yapısı görülmektedir (Şekil 24a). Perlit dokusunun kalın ve dağınık olduğu tespit edilmiştir. Ferritik bölgede işaretli olan alanda görülmektedir.

Şekil 24 b'de görülen %0,4 Cu elementi içeren numunenin perlit dokusu daha ince daha sık ve doku bileşenleri daha uzun olduğu görülmüştür. %0,4 Cu içeren numunenin alaşım elementi içermeyen numuneye göre çekme dayanımı ve sertliğinin yüksek olması bu sonuç ile açıklanabilir. Sertlik ve çekme değerindeki artış esasen perlit oranının artması ile ilgili iken perlit dokusunun sıklığı ve düzgün bir formda olması ile de alakalıdır. %0,4 Cu içeren numunenin hem perlit oranı fazla hem de perlit dokusu düzgün ve nispeten ince ve uzun olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 24 c'de %0,03 Sn içeren numunenin mikroyapı içindeki perlit görüntüsü verilmiştir. Bu numunenin perlit dokusu kimi yerde ince kimi yerde kalın seyretmiştir. Perlitlerin matris içindeki yerleşme düzeni karışık olduğu görülmektedir. Perlit yapısının aralıkları nispeten dardır. %0,03 Sn içeren numunenin tane yapısı küçük olduğu için tane sınırları görülmektedir.

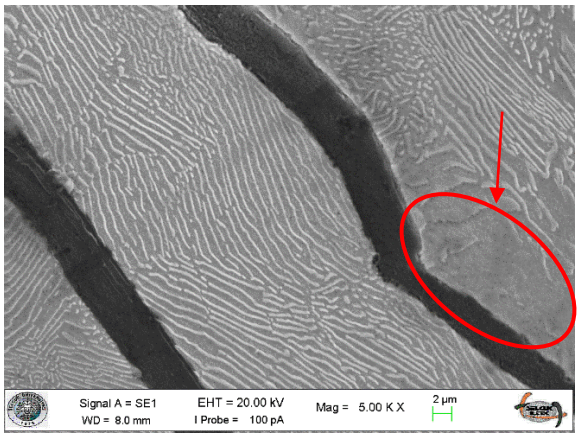
Şekil 24 d'de %0,06 Sn içeren numunede perlit yapısı kalın ve aralıklar arası mesafesi perlit kalınlığından dolayı dardır. Neredeyse ferritik bölge görülmeyecek kadar sıkı bir düzen içindedir. Fakat perlit boyları kısadır. Çekme dayanımı ve sertlik

sonuçlarına bakıldığı zaman alaşım elementi içermeyen numuneye göre yüksek ve %0,4 Cu içeren numune ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç Lyu ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışma ile örtüşmektedir. Lyu ve arkadaşları %0,057 oranında kalayın perlit tabakaları arası genişliği azalttığını ve dokunun sıklaştığını belirtmişlerdir ve buradaki sonuçları destekler niteliktedir.

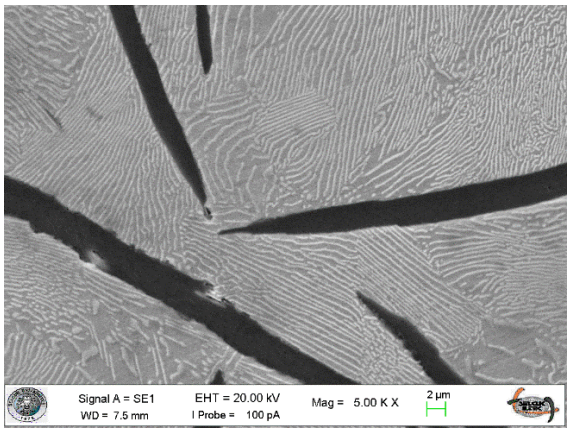
Şekil 24 e'de %0,09 Sn içeren numunenin mikroyapı içindeki perlitik matrisinin görüntüsü verilmiştir. Perlit dokusundaki özellikler %0,06 Sn içeren numune ile benzer sonuçlar çıkmıştır. Fakat %0,09 Sn içeren numunenin tane sınırları daha belirgin olduğu görülmüştür. Tane sınırı tane yapısı diğer numunelere göre daha küçük olduğu görülmektedir. %0,03 Sn içeren numunenin tane sınırları da belirgin olarak görülmüştü.

%0,12 Sn içeren numunenin mikroyapı matrisi içindeki perlit dokusu Şekil 24 f'de görülmektedir. Perlit dokusu hayli ince ve muntazam bir şekilde düzgündür. Tane sınırları burada da belirgin olarak görülmektedir. Perlit dokusunun aralıkları kısadır ve perlit boyları diğerlerine göre uzundur. %0,12 Sn içeren numunenin darbe dayanımı sonuçlarında görülen bir miktar artışı perlit dokusu ile alakalı olduğu görülmüştür. Perlit dokusunda görülen ince ve uzun perlit yapısı darbe dayanımının artmasına etki etmiştir. Bu sonuç 1967 yılında Davis J.'nin yapmış olduğu çalışma sonuçları ile örtüşmektedir ve destekler niteliktedir.

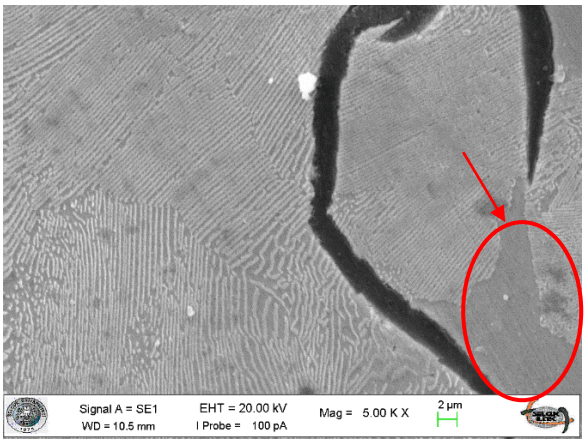
%0,15 Sn içeren numunenin mikroyapı matrisi içindeki perlit dokusu Şekil 24 g'de verilmiştir. Perlit dokusu %0,12 Sn içeren numune ile benzerdir. Fakat tane sınırları burada daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca perlit dokusu kimi bölgelerde bozularak; kalınlığının arttığı ve boyunun kısaldığı tespit edilmiştir. Darbe dayanımı sonuçlarındaki artışı perlit dokusundaki düzgün ve kararlı dizilim ile ilgilendirilebilir.



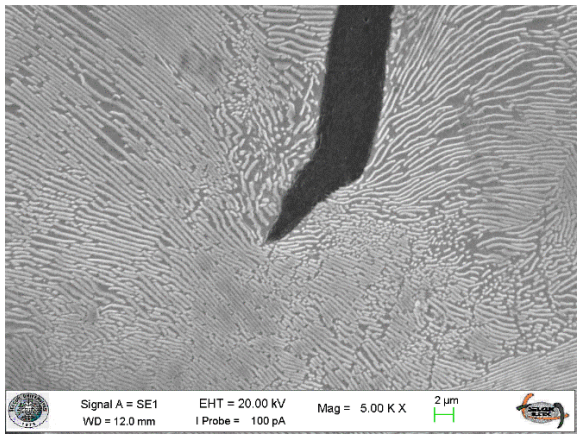
a. Alaşımsız



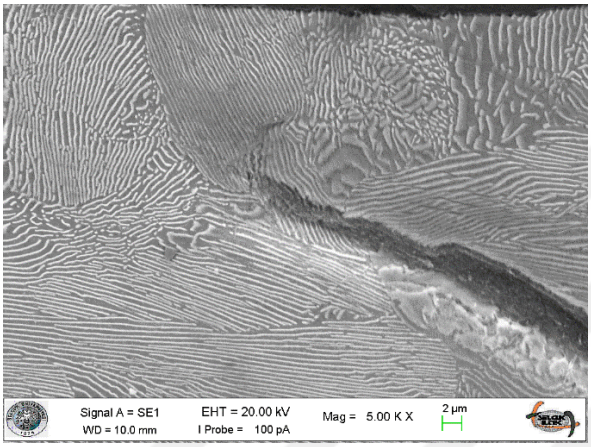
b. %0,4 Cu



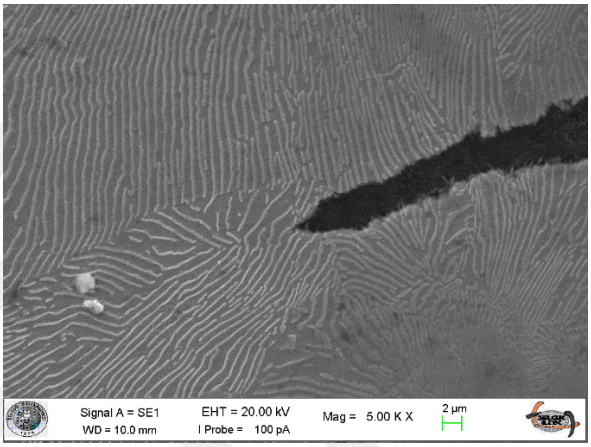
c. %0,03 Sn



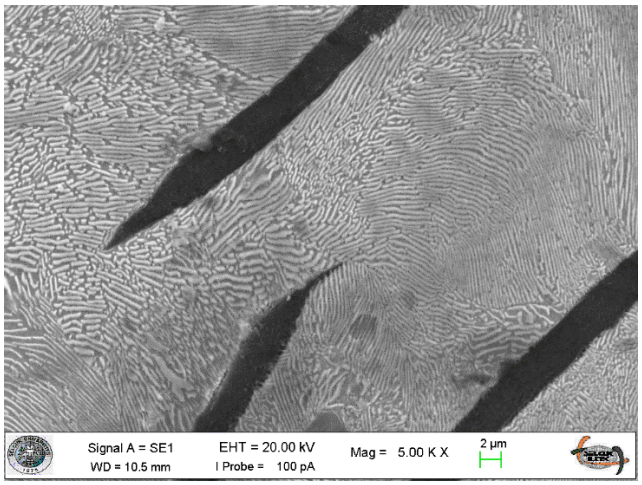
d. %0,06 Sn



e. %0,09 Sn



f. %0,12 Sn



g. %0,15 Sn

Şekil 24. 5000X büyütmedeki dağlanmış yüzeyin mikroyapı SEM görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

A. 5.1 Sonuçlar

Gri dökme demirin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirebilmek ve ayrıca sanayide kullanımındaki maliyetini düşürebilmek için bu çalışmada, kalay elementi alaşım elementi olarak kullanılmıştır. Sanayide gri dökme demir morfolojisindeki matris yapısını perlite dönüştürebilmek için bakır elementi (%0,3-0,5) kullanılmaktadır. Bu çalışmada %0,03-0,06-0,09-0,12-0,15 oranlarında kalay elementi ilave edilerek gri dökme demir üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar da hem üretim kolaylığı hem maliyet hem de mekanik ve morfolojik olarak, alaşım elementi içermeyen numune ve sadece bakır elementi içeren numune ile karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

a) Mikroyapı açısından incelendiğinde, kalay elementinin lamel kalınlığı %0,12 oranına kadar incelttiği söylenebilir. %0,09 oranında kalay içeren numunenin lamel boyutları ASTM standartlarına göre A3-A4 olarak tespit edilmiştir. Lameller daha ince ve boyları diğerlerine göre daha kısadır. Matris yapısındaki perlitik oran karşılaştırması yapılan %0,4 Cu (%70 perlit) içeren numuneye en yakın değer %0,09 Sn (%75 perlit) içeren numune ile elde edilmiştir. %0,12 ve %0,15 Sn içeren numunelerin perlitik oranı %90 civarında çıkmıştır. Buda gösteriyor ki eser miktarda kalay elementi gri dökme demir morfolojisinde matris yapısını ferritten perlite çevirebilmektedir.

b) Numunelerin Brinell sertlik sonuçları incelendiğinde, en yüksek sertlik değeri 177 HB ile %0,12 Sn içeren numunede tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri alaşım elementi içermeyen referans numunesinde 144,5 HB olduğu görülmüştür. Bakır içeren(%0,4 Cu) numunenin Brinell sertlik değeri 157,1 HB olarak bulunmuştur. Bu değer; %0,06 ile %0,09 oranında kalay(Sn) içeren numunelerin sertlik değerleri (150,8-163,9 HB) arasında bir değer olarak tespit edilmiştir. Sertlik sonuçları karşılaştırılırsa; %0,4 bakır elementi içeren numunenin sertlik sonucu (157,1 HB) %0,09 Sn içeren numunenin sertlik sonucu (163,9 HB) ile uyuşmaktadır.

c) Numunelerin darbe deneyi sonuçlarına bakıldığı zaman; en yüksek darbe dayanımı 4,49 J ile alaşım elementi içermeyen referans numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunenin kırılma açısı ise $155,60^0$ olarak kaydedilmiştir. %0,04 Cu içeren referans numunesinin darbe dayanımı 4,37 J, kırılma açısı ise $155,70^0$ olduğu görülmüştür. En düşük kırılma enerjisi 3,55 J olarak %0,09 Sn içeren numunede görülmüştür. Kalay

elementi ilavesi %0,09Sn miktarına kadar darbe dayanımını düşürmüştür. %0,12 ve %0,15 Sn içeren numunelerde darbe dayanımı artsa da alaşım elementi içermeyen numunenin darbe dayanımının altında seyretmiştir. Darbe dayanımının sertlik ve çekme dayanımı ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Nitekim yapmış olduğumuz çalışmalarda bu kanıyı destekler bir sonuç çıkmıştır. Numunelerin sertliği arttıkça darbe dayanımı düşmüştür.

d) Çekme mukavemeti deneyi dökme demirlerin mekanik özelliklerini tayin etmede kullanılan yaygın bir yöntem olduğu bilinmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmada ortaya konulan çekme deney sonuçları incelendiğinde, en düşük çekme mukavemeti alaşım elementi içermeyen referans numunesinde 157,36 N/mm^2 olarak tespit edilmiştir. %0,4 Cu elementi içeren diğer referans numunesinde ise 177,17 N/mm^2 olduğu görülmüştür. Bakır elementi içeren bu numuneye en yakın çekme dayanımını %0,06 Sn içeren numunede 176,48 N/mm^2 olarak bulunmuştur. Çekme dayanımı değerleri %0,09 ve %0,12 oranlarında kalay(Sn) elementi içeren numunelerde artış göstermiştir. %0,09 Sn içeren numunenin çekme dayanımı 184,75 N/mm^2 ve en yüksek çekme dayanımı %0,12 Sn içeren numunede 194,55 N/mm^2 olduğu tespit edilmiştir. %0,15 Sn içeren numune de çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Bunun da %0,15 Sn içeren numunede yapı morfolojisinin perlit miktarında doygunluğa ulaştığını ve grafit olarak daha fazla çökelebileceği düşünülerek çekme dayanımının azaldığı düşünülmektedir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, kalay(Sn) elementi gri dökme demirin çekme dayanımını arttırarak olumlu yönde etki ettiği söylenebilir.

e) Numunelerin çekme deneyi kopma yüzeylerinin SEM analizleri lamellerin yapı içerisindeki çentik etkisini ortaya koymaktadır. SEM analizi ile lamel düzlemleri de görülmektedir. Lamel düzlemi fazla olan numunelerde çekme dayanımı da düşük çıkmıştır. Kalay elementi içeren numunelerin bazı bölgelerde bölgesel sünek kopma tavrı gözlemlenmiştir. Kalay elementinin gri dökme demirin kopma dayanımına olumlu yönde etki ettiği söylenebilir.

f) Yapılan çalışmada belirtilen sonuçlar maliyet açısından incelendiğinde; ilk olarak %99 saflıktaki hurda kalay ve bakırın fiyatları Metal Market Ltd. Şirketinden öğrenilmiştir ve www.hurdafiyatlari.org sitesinden de güncel olarak teyit edilmiştir.

Hurda kalay fiyatı = 35 TL

Hurda bakır fiyatı = 23 TL

Çekme deneyi sonuçlarına göre fiyat kıyaslaması yaparsak; %0,4 Cu (177,17 N/mm^2) kullanarak hazırlanan numunenin çekme dayanımı %0,06 Sn (176,48 N/mm^2)

içeren numune ile birbirine yakın çıkmıştır. Buda demek oluyor ki bakırın kullanım miktarı kalaydan (0,4/0,06) 6,6 kat fazladır.

6,6x23 = 151,8 TL tutarında bakır,

1x35 = 35 TL tutarında kalay.

Sonuç olarak kalay elementi kullanımı bakır elementi kullanımından (151,8/35) 4 kat daha hesaplı olmaktadır.

1000 kg'lık sıvı metal için hesaplandığında, %0,4 Cu oranını yakalamak için 4 kg bakır kullanılması gerekmektedir. Fiyat olarak 92 TL tutarında bakır kullanımı olmaktadır. %0,06 Sn oranını yakalayabilmek için 0,6 kg kalay kullanılması gerekmektedir. Fiyat olarak 21 TL tutarında kalay kullanımı olmaktadır. Fiyat farkı olarak bakırdan 4 kat daha ucuz bir değerde kalay kullanımı ile yaklaşık aynı çekme dayanımı elde edildiği gözlenmiştir.

B. 5.2 Öneriler

1) Gri dökme demirlerde kalay ilavesinin potada yapılması alaşımlandırma verimi için daha uygun olabilir. Ocaklarda yapıldığı takdirde bir miktar kayıp gözlenmektedir.

2) Üretilen numunelere normalizasyon veya temperleme gibi ısıl işlem yapılırsa daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir.

3) Mikroyapı numuneleri hazırlanırken dağlama prosesinde ferritik bölgenin aşırı dağlamadan yanmaması için daha az bekletilebilir. Bu çalışmada dağlama süresi 8-10 saniye olarak tespit edilmiştir.

4) Sertlik numune boyutları daha büyük yapılabilir. Böylelikle merkez ve kenar sertlikleri arasındaki fark daha belirgin ortaya çıkabilir.

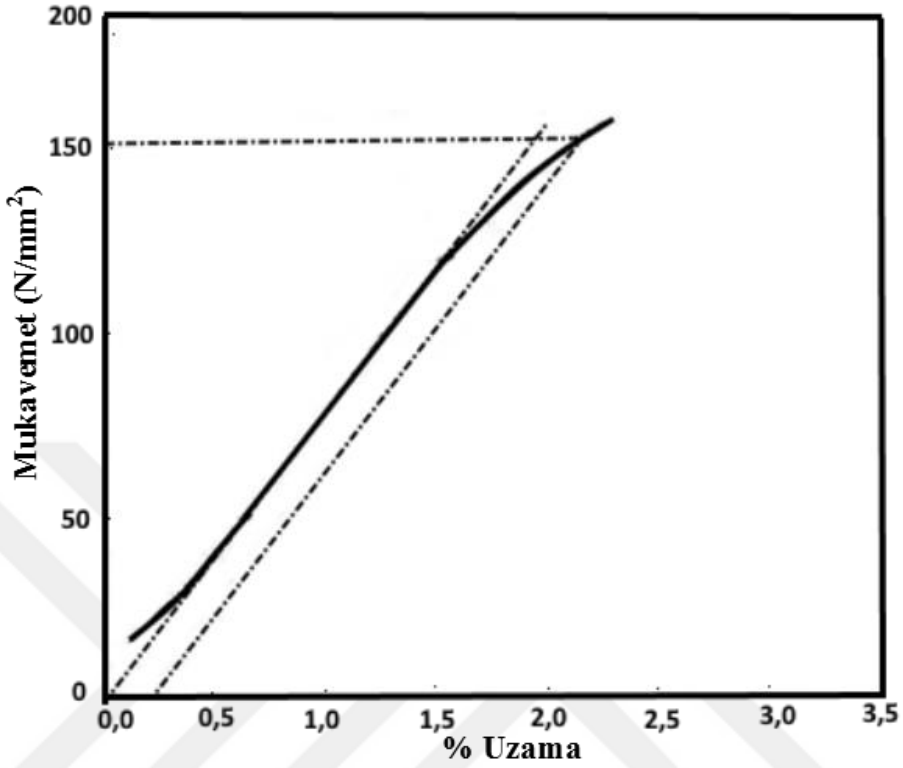
5) Çekme numunelerinin dökümü seramik kabuk döküm yöntemi ile dökülebilir. Böylece ısıtılmış seramik kalıp içerisine döküm yapılarak oksit oluşumu önlenebilir.

6) Çalışma kapsamında darbe dayanımlarında sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları da hesaplanabilirdi. Fakat kısıtlı imkânlar nedeni ile hesaplanamamıştır.

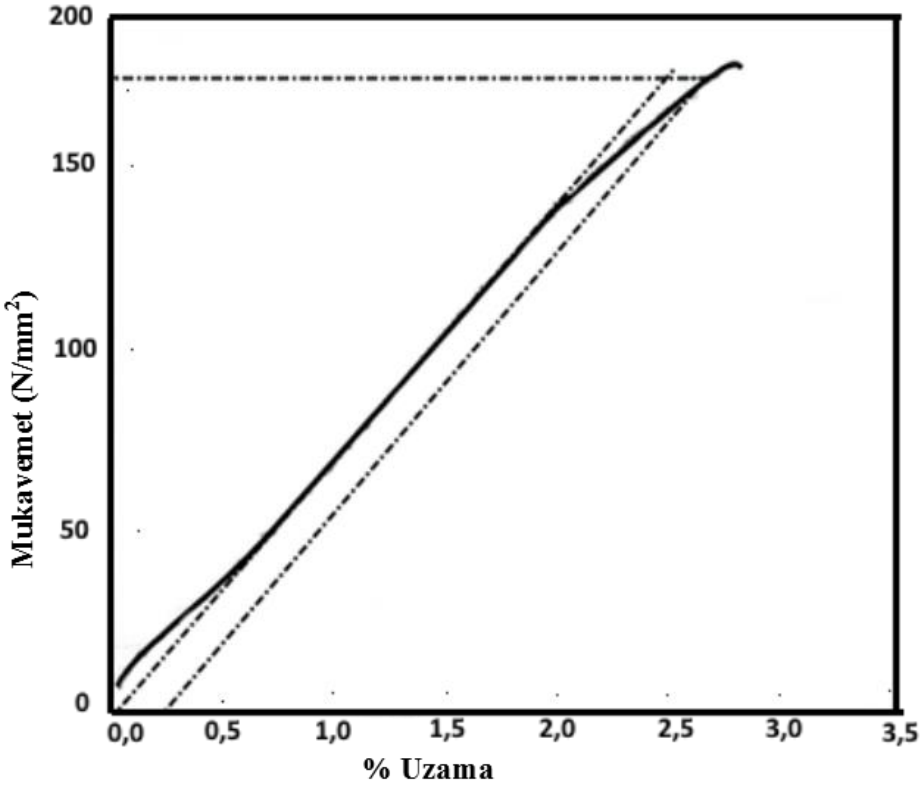
7) Dökümhanelerde perlitik oranı arttırmak ve bu sayede sertliği arttırmak için bakır elementi yerine daha düşük miktarlarda aynı etkiyi sağlayan kalay elementi kullanılabilir. Böylelikle maliyet daha aşağılara çekilebilir.

EKLER

EK-1 Çekme deneyinin akma mukavemeti ve kopma uzaması grafikleri.

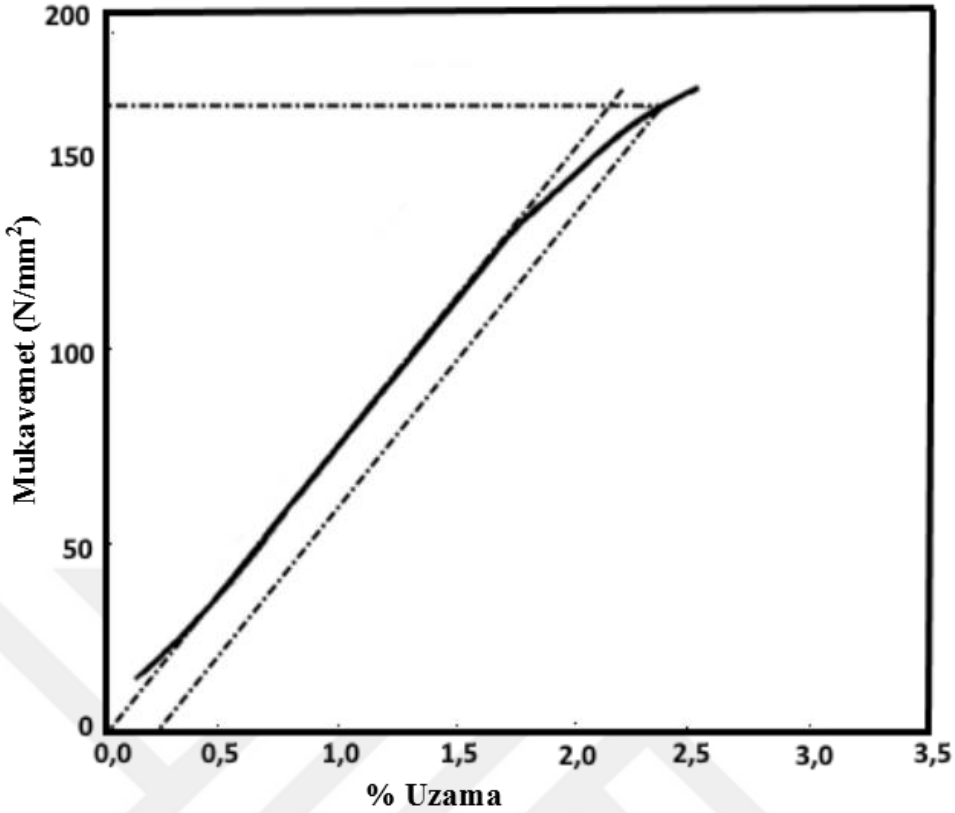


Şekil 25: Alaşım elementsiz

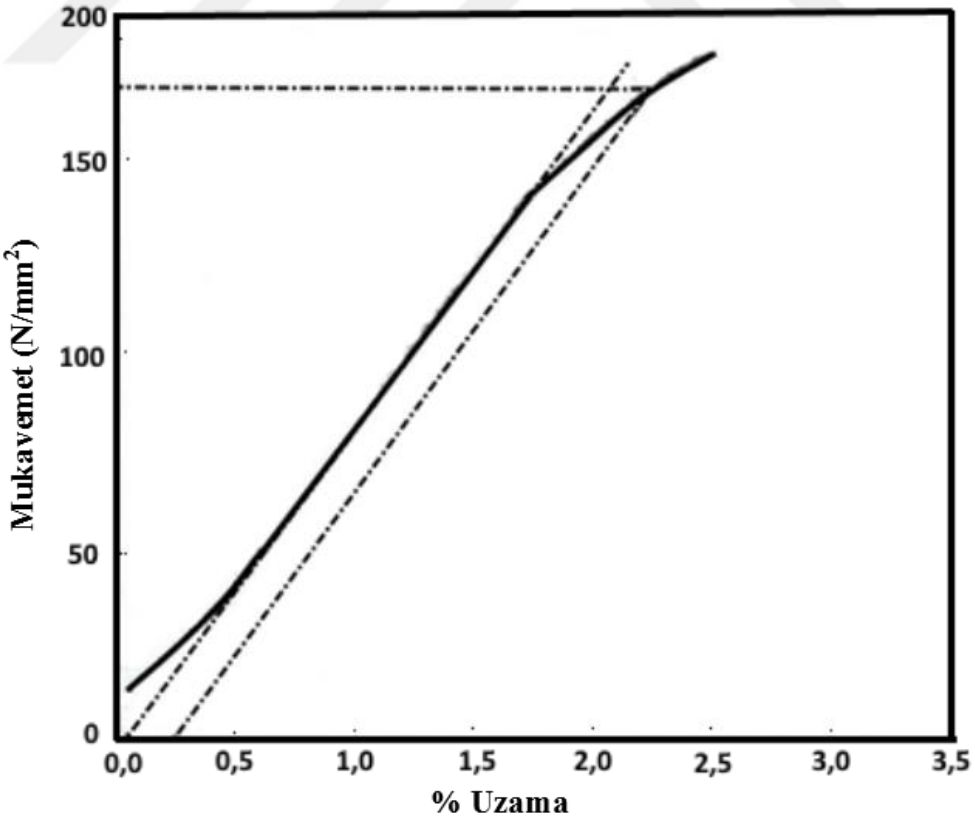


Şekil 26: %0,4 Cu

EK-2 Çekme deneyinin akma mukavemeti ve kopma uzaması grafikleri.

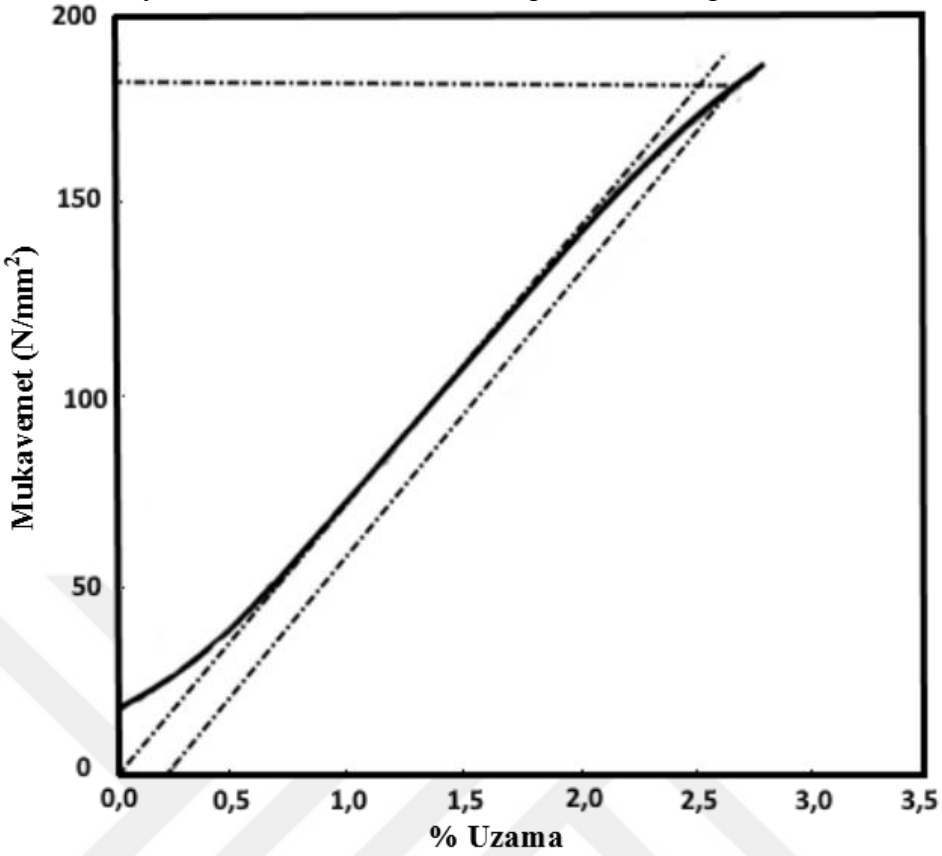


Şekil 27: %0,03 Sn

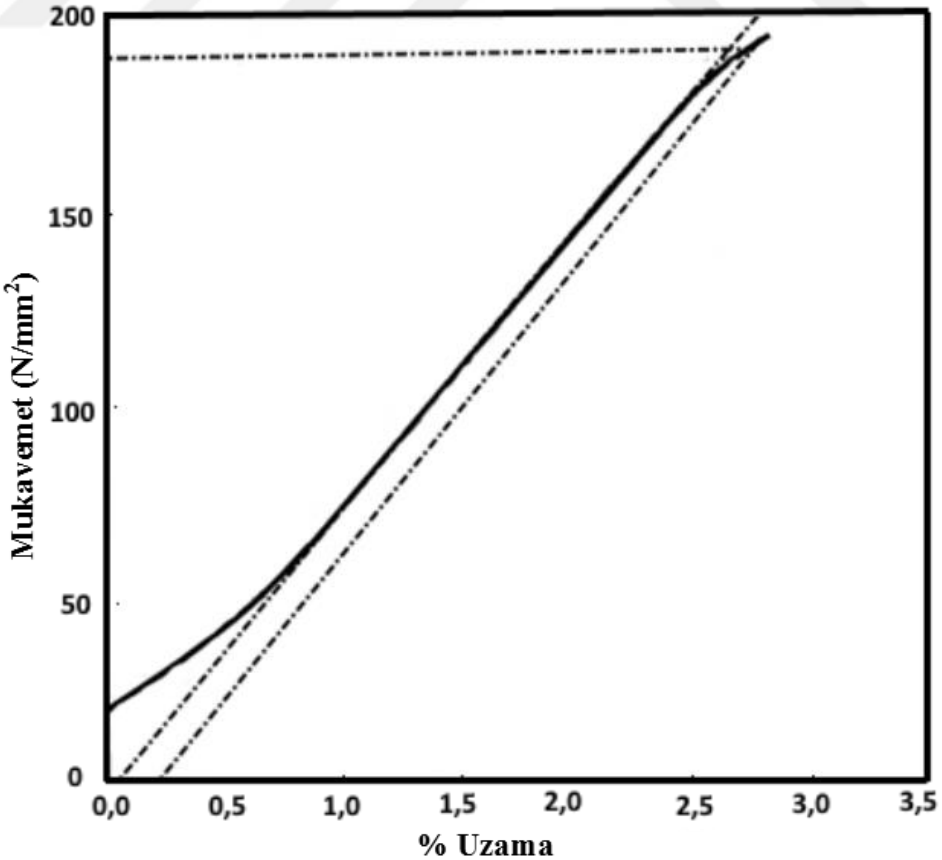


Şekil 28: %0,06 Sn

EK-3 Çekme deneyinin akma mukavemeti ve kopma uzaması grafikleri.

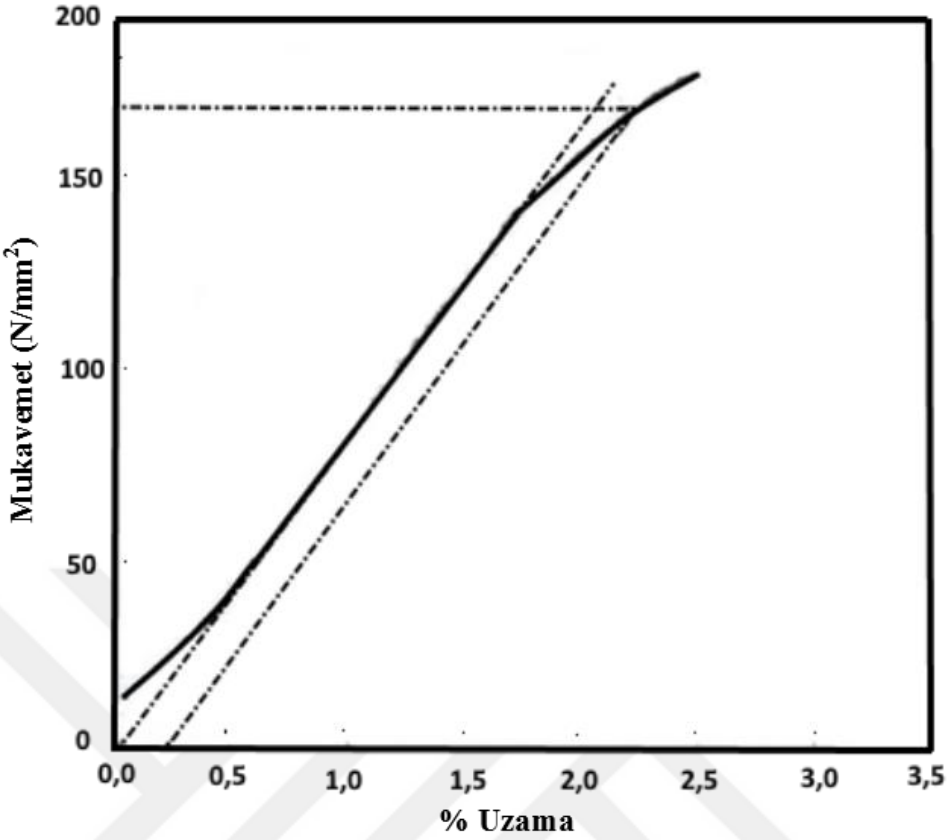


Şekil 29: %0,09 Sn



Şekil 30: %0,12 Sn

EK-4 Çekme deneyinin akma mukavemeti ve kopma uzaması grafikleri.



Şekil 31: %0,15 Sn

II. ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bekir AKGÜL
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya / 01.04.1991
Telefon : 05415134913
Faks : -
e-mail : bekir.akgul.13@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Karatay Anadolu Lisesi Konya**	**2008**
Üniversite	:	**Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon**	**2012**
Yüksek Lisans	:	-	
Doktora	:	-	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2012-2013	**Soylu Döküm**	**Metalürji ve Malzeme Mühendisi**
2013-2014	**Hacıbalı Rulman Yatakları**	**Metalürji ve Malzeme Mühendisi**
2015-2016	**Mepsan A.Ş.**	**Kalite Kontrol Müh.**
2016-Aktif	**Tümosan Motor Traktör**	**Ergitme Mühendisi**

UZMANLIK ALANI
Döküm
YABANCI DİLLER
İngilizce (Orta)
BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

- **Investigation of the Effect of Tin (Sn) on Microstructure and Hardness Properties of Gray Cast Iron (Icente'17, 07-09 December 2017, Konya/TURKEY, International Conference on Engineering Technologies)**

KAYNAKLAR

(TÜDOKSAD), T. D. S. D., 1997, Döküm Bilgileri, p. 3-6.

Akman, C., 2006, GG22 lamel grafitli dökme demirden üretilen motor silindir gömleklerinin CNC torna tezgahında işlenebilirliğinin incelenmesi, *Balıkesir Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Anon, 1961, Cast Iron Improved by Addition or Coating of Tin, *Australian Mechanical Engineering*, 49, 45.

Aslani, H., 1989, Alaşım elementlerinin gri dökme demir mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi, *Gazi Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, 4-21.

Barry, T. C. J. a. B. T. K., 1969, Tin-Alloyed Cast Iron Today, *Tin and Its Uses*, 82, 3-7.

Cage, T. A. J. a. R. M., 1965, Tin-Alloying Speeds Production of Gray-iron Cylinder Blocks, *S.A.E. Journal*, 73, 66-69.

Çavuşoğlu, N., 1981, Döküm Teknolojisi 1, *Gümüşsuyu*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, p.

Davis J., A., Krause D. E., and H. W. Lownie, Jr., 1967, Tin is not a Subversive Element in Gray Iron, *Modern Castings*, 31, 96-98.

Demirci, A. H., 2004, Mühendislik Malzemeleri, *İstanbul*, p.

Dieter, G. E., 2001, Mechanical Metallurgy, *London*, p.

Ellwood, E. C., 1959, Tin Effect on Structure and Properties of Flake and Nodular Cast Irons, *Modern Castings*, 36, 73-80.

Erdoğan, M., 2000, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özelliği, *Ankara*, p.

George, L. S. D., May 1996, Microstructures of Cast Irons High Alloy Steels Superalloys, *Massachusetts Institute of Technology*.

Gilbert, G. N. J., 1964, Effects of Tin and Chromium Added Separately and in Combination on the Chilling Properties of Grey Cast Irons, *B.C.I.R.A. Journal*, 12, 774-786.

Gilbert, G. N. J., 1965, Effect of Tin on the Structure and Properties of Grey Cast-Irons Containing Up to 0.6 Per Cent Phosphorus, *Foundry Trade Journal*, 118, 129-134.

Handbook, A., 2008, Casting Formerly Tenth Edition, *Ohio, USA*, p.

Hoare, W. E., 1959, Modifying the Structure of Cast-iron by Additions of Tin, *Tin and Its Uses*, 47, 4-8.

K. D. Millis, A. P. G., N. B. Pilling, 1949, U. S. Patent No. 2, *U.S.*, 485,760.

Kayalı, E. S., 1990, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, *İstanbul*, Ofset Atölyesi, p. 4-45, 46-63, 132-193.

Long, J. B., 1964, From Research to Production, *Metal Castings*, 46, 34-35.

Lyu Y., Y. S., S. Liu and J. Zhao, July 2015, Effect of tin on microstructure and mechanical properties of compacted graphite iron, *Article in International Journal of Cast Metals Research*, 0 (0).

M. Kemal Bilici , H. Ö. G., Yahya Bozkurt , Serdar Selman, 2007, Enhancing the wear properties os iron based powder metallurgy alloys by boron additions, *Materials & Desing*, 28 (7), 2255-2259.

M. Shaban, A. M., A. Halvaee and J. Rassizadehghani, 2013, Effect of Si content and Sn addition on solidification behavior and graphite morphology of compacted graphite iron, *Academic Research Online Publisher Sdn. Bhd.*, 1 (2), 87-100.

Macintosh, R. M., 1961, Tin as a Ladle Addition in the Casting of Iron, *Tin and Its Uses*, 51.

Morrogh, H., 1952, The Harmful Influence of Some Residual Elements in Magnesium - Treated Nodular Cast Irons and Their Neutralization by Cerium, *B.C.I.R.A. Journal*, 4, 292-314.

Prytherch, C. J. T. a. J. C., 1969, 'Structural Stability of Flake-graphite Iron Alloyed with Tin and Chromium, *Foundry Trade Journal*, 126, 115-121.

Rehder, J. E., 1948, A Cause of Poor Annealability of a Commercial Malleable Iron, *Canadian Metals and Metallurgical Industries*, 11, 20-21.

Robbins, J. B. L. a. D. A., 1963, Control of Structure and Properties of Cast Iron by the Addition of Tin, *Modern Castings*, 43, 275-284.

Tan, E. v. D. İ., Temmuz 2005, Hadde Merdanesi metalurjisi ve Hadde Merdanesi Malzemesi Seçim Kriterleri, *Metal Dünyası*, 146, 129-135.

Thwaites, C. J., 1965, How Tin Effects Cast Iron, *Metal Progress*, 88, 100-103.

Thwaites, C. J., 1968, The Suppression of Ferrite in Undercooled Flake Iron by Additions of Tin, *The British Foundry*, 61, 378-384.

Thwaites, C. J., 1969a, The Development of the Use of Tin to Improve the Quality of Iron Castings, *Iron and Steel*, 42, 201-208.

Thwaites, C. J., 1969b, Improving the Quality of Iron Castings, *Foundry Trade Journal*, 126, 447-454-457.

Velde, C. v. d., 2004, Proposal of a new Iron Carbon Diagram, http://www.ceesvandevelde.eu/newfecdiagram.htm:

Veresh, L. I. L. a. A., 1967, Influence of Tin on the Structure and Properties of Gray Iron, *Russian Castings Production*, 7, 338-340.

Walding, W. H. S. a. M. M., 1932, Effects of Eleven Metals or Alloys on the Physical Properties of Gray Cast Iron, *Transactions of the American Foundrymen's Association*, 40, 491-509.

White, G. N. J. G. a. D. G., 1963, Growth and Scaling Characteristics of Flake Graphite and Nodular Graphite Cast Irons Containing Tin, *B.C.I.R.A. Journal*, 11, 295-318.

Y. C. Peng, H. J. J., J. H. Liu and G. L. Li, 2012, Mater. Charact, 72, 53-58.

Yıldız, M., 2014, Dökme demirlerde nicel faz analiz tekniklerinin incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, F., 2003, İçme-Atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, *Iski Yayını*.