



The effect of waste boron addition on material properties in gray cast iron production

Merve Koparan*^{ID}, Mehmet Süha Kaya^{ID}, Muratcan Ocaktan^{ID}

Erkunt Industry Inc., R&D Center Management, 06370, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Mechanical weakening by boron
- Comparison of B₂O₃ and B₄C
- Graphite morphology alteration

Keywords:

- Boron
- EN-GJL-300
- Gray cast iron
- Mechanical properties
- Microstructure

Article Info:

Research Article

Received: 13.10.2025

Accepted: 09.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1800738

Acknowledgement:

We would like to thank Erkunt Sanayi A.Ş. for providing the technical infrastructure, laboratory facilities, and institutional support throughout the conduct of this study. We would also like to express our gratitude to all our colleagues who contributed to the experimental studies and to the relevant personnel who provided support throughout the process

Correspondence:

Author: Merve Koparan
e-mail: merveulular@gmail.com
phone: +90 530 602 8212

Graphical/Tabular Abstract

Boron, often introduced via steel scrap, is considered an undesirable impurity in gray cast iron as it significantly affects microstructure and mechanical properties even at trace levels. This study examines the effects of B₂O₃ and B₄C additions on EN-GJL-300 grey cast iron. The reference sample (GG30) showed ~215 HB hardness, 310 N/mm² tensile, and 230 N/mm² yield strength. With 4 g B₂O₃, hardness dropped to ~200 HB and strength losses exceeded 20%. Higher B₂O₃ levels gave only partial recovery, while 40 g B₄C caused the sharpest decline, reducing hardness to ~190 HB and strength to 190–200 N/mm². Overall, boron increased graphitization, raised ferrite content, and negatively impacted mechanical performance.

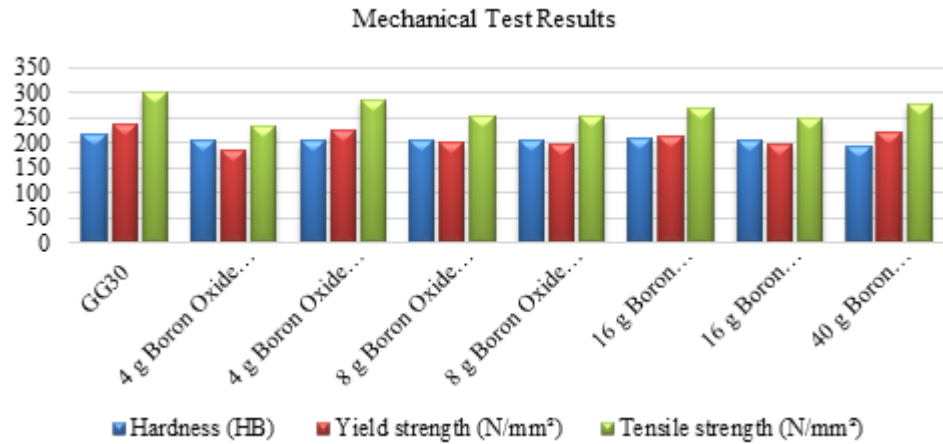


Figure A. Hardness, Tensile Strength and Yield Strength Values of Samples

Purpose:

This study aims to evaluate the effect of boron additions (B₂O₃ and B₄C) on the microstructure and mechanical properties of EN-GJL-300 gray cast iron, emphasizing its critical role in quality consistency during production.

Theory and Methods:

Based on literature reports that boron alters graphite morphology and ferrite/pearlite balance, experimental melts were prepared with different amounts and forms of B₂O₃ (0.4–16 g) and B₄C (40 g). Cast samples were subjected to thermal analysis, microstructural characterization, hardness tests (Brinell), and tensile/yield strength measurements according to BS EN 1561 standards.

Results:

Boron significantly reduced mechanical performance. Hardness dropped from ~217 HB to 192 HB with B₄C, while 4 g B₂O₃ caused over 20% losses in tensile and yield strength. Microstructural observations revealed increased graphite nucleation, leading to heterogeneity at higher additions. Thermal analysis confirmed variations in eutectic temperature and graphite precipitation factors.

Conclusion:

Even trace levels of boron severely impair EN-GJL-300 gray cast iron. B₂O₃ showed the most detrimental effect, while B₄C had milder but still negative influence. These findings highlight the necessity of strict scrap composition control and reinforce boron's role as a critical residual element in maintaining production reliability.



Gri dökme demir üretiminde atık bor ilavesinin malzeme özelliklerine etkisi

Merve Koparan*^{ID}, Mehmet Süha Kaya^{ID}, Muratcan Ocaktan^{ID}

Erkunt Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü, 06370, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bor katkılı gri dökme demirlerin karakterizasyonu
- Bor oksit ve bor karbür katkılarının karşılaştırılması
- Grafit morfolojisi ve mekanik özellik ilişkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.10.2025

Kabul: 09.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1800738

Anahtar Kelimeler:

Bor,
EN-GJL-300,
gri dökme demir,
mekanik özellikler,
mikroyapı

ÖZ

Bor, döküm sanayinde genellikle artık element olarak kabul edilmekte ve çoğunlukla çelik hurdası aracılığıyla sıvı metale geçmektedir. Eser miktarlarda bulunmasına rağmen dökme demirlerin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Literatürde, artan bor miktarının gri ve küresel grafitli dökme demirlerde mukavemet kaybına neden olduğu bildirilmektedir. Bu çalışmada, EN-GJL-300 gri dökme demir malzemesinde bor katkısının etkileri, bor oksit (B_2O_3) ve bor karbür (B_4C) ilavesiyle araştırılmıştır. Deneylerde B_2O_3 , toz ve pelet formunda 0,4 g, 1,2 g, 4 g, 8 g ve 16 g seviyelerinde, B_4C ise 40 g miktarında şarja eklenmiştir. Üretilen numunelerden standart çekme çubukları hazırlanmış, sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve çekme-akma dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca termal analiz sonuçları değerlendirilerek bor katkısının katılaşma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, bor katkısının sertlik ve dayanım değerlerinde genel olarak düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Literatürde EN-GJL-300 için yaklaşık 217 HB olarak verilen sertlik değeri, özellikle B_4C katkısı ile 192 HB seviyelerine kadar gerilemiştir. En belirgin mukavemet kaybı 4 g B_2O_3 ilavesinde görülmüş ve çekme ile akma dayanımında %20'nin üzerinde azalma tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, bor ilavesinin grafit morfolojisini ve matris yapısını değiştirdiğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, düşük seviyelerdeki bor ilavelerinin dahi EN-GJL-300 gri dökme demirin mekanik performansını olumsuz etkileyebileceğini ve hurda kompozisyonunun kontrolünün üretim kalitesi açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

The effect of waste boron addition on material properties in gray cast iron production

H I G H L I G H T S

- Characterisation of boron-alloyed grey cast iron
- Comparison of boron oxide and boron carbide additions
- The relationship between graphite morphology and mechanical properties

Article Info

Research Article

Received: 13.10.2025

Accepted: 09.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1800738

Keywords:

Boron,
EN-GJL-300,
gray cast iron,
mechanical properties,
microstructure

ABSTRACT

Boron is generally regarded as an impurity in the foundry industry and is mostly introduced into the molten metal via steel scrap. Although present in trace amounts, it can significantly affect the microstructure and mechanical properties of cast irons. The literature reports that increasing boron content leads to a loss of strength in grey and spheroidal graphite cast irons. In this study, the effects of boron addition on EN-GJL-300 grey cast iron were investigated by adding boron oxide (B_2O_3) and boron carbide (B_4C). In the experiments, B_2O_3 was added to the charge in powder and pellet form at levels of 0.4 g, 1.2 g, 4 g, 8 g and 16 g, whilst B_4C was added at a quantity of 40 g. Standard tensile bars were prepared from the produced specimens, hardness measurements were carried out, and tensile and yield strengths were determined. Furthermore, the effects of boron addition on solidification behavior were examined by evaluating the results of thermal analysis. The results showed that boron addition generally led to a decrease in hardness and strength values. The hardness value given in the literature for EN-GJL-300 as approximately 217 HB has decreased to levels as low as 192 HB, particularly with the addition of B_4C . The most pronounced loss in strength was observed with the addition of 4 g of B_2O_3 , and a reduction of over 20 per cent in tensile and yield strength was detected. Microstructural analyses revealed that the addition of boron altered the graphite morphology and matrix structure. The results obtained indicate that even low levels of boron addition in EN-GJL-300 grey cast iron.

1. Giriş (Introduction)

Gri dökme demir, sahip olduğu yüksek dökülebilirlik, işlenebilirlik, aşınma direnci ve titreşim sönümleme özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan demir esaslı alaşımlardan biridir [1]. Otomotiv, makine imalatı ve inşaat gibi birçok sektörde kullanılan gri dökme demir, ekonomik üretim avantajı nedeniyle önemli bir malzeme sınıfı olarak kabul edilmektedir. Gri dökme demirde bulunan elementler genel olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır: ana elementler, ikincil elementler ve eser elementler [2–5]. Bu malzemenin temel bileşenleri demir ve karbondur. Ancak gri dökme demirin mekanik performansı yalnızca bu iki ana elementin oranı ve dağılımıyla sınırlı değildir. Üretim sürecinde sisteme karışan ikincil elementler ve özellikle eser elementler, mikroyapı oluşumunda ve mekanik özelliklerin şekillenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu tür elementlerin varlığı, alaşımın temel performans göstergeleri olan dayanım, sertlik ve tokluk üzerinde belirgin farklılıklar oluşturabilmektedir.

Eser elementler arasında yer alan bor, döküm endüstrisinde özel bir öneme sahiptir. Bor, çelik hurdası üzerinden sıvı metale istemsiz biçimde karışarak düşük konsantrasyonlarda dahi malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini belirgin şekilde etkilemektedir [6]. Literatürde borun, grafit morfolojisini etkileyerek perlit ve ferrit fazlarının oranlarını değiştirdiği, ayrıca sertlik ve dayanım değerlerinde dalgalanmalara yol açtığı sıkça rapor edilmektedir. Dolayısıyla, gri dökme demir üretiminde borun varlığı, sadece metalurjik açıdan değil, aynı zamanda kalite kontrol ve üretim güvenilirliği açısından da göz ardı edilmemesi gereken bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde bor genellikle istenmeyen bir artık element olarak tanımlanmakta, ancak düşük konsantrasyonlarda dahi grafit morfolojisini, matris fazlarının oranını ve mekanik özellikleri değiştirdiği bildirilmektedir [7]. Özellikle EN-GJL-300 sınıfı gri dökme demirde, bor ilavesi sertlik, çekme ve akma dayanımlarında önemli düşüşlere sebep olmaktadır [8]. Şekil 1’de görüldüğü üzere, bor ilavesi grafit yapısında belirgin değişimlere yol açmakta ve bu da malzemenin mukavemetinde azalmaya neden olmaktadır.

Borun etkilerini inceleyen çalışmalar, borun farklı kimyasal formlarının farklı sonuçlar doğurduğunu ortaya koymuştur. Bor oksit

(B₂O₃) ve bor karbür (B₄C) ilavelerinin karşılaştırıldığı araştırmalarda, her iki katkının da sertlik değerini düşürdüğü, ancak özellikle bor oksit ilavesinin çekme ve akma dayanımlarında %20’nin üzerinde kayıplara yol açtığı gözlemlenmiştir [10].

Mikroyapısal açıdan değerlendirildiğinde, borun ferrit oluşumunu baskıladığı ve perlit oranını artırdığı rapor edilmiştir [11]. Bu durum, malzemenin daha gevrek bir yapıya dönüşmesine neden olmakta ve dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda performans kayıplarına yol açabilmektedir. Ayrıca, borun segregasyona uğrayarak katılaşma sırasında lokal bölgelerde yoğunlaşması, heterojen mikroyapılar oluşmasına ve aynı parça içerisinde farklı mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [12]. Bu tür düzensizlikler, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek güvenilirlik gerektiren sektörlerde ciddi riskler barındırmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bor ilavesinin sadece mekanik özellikleri değil, aynı zamanda üretim süreçlerini de etkilediğini göstermektedir. Katılaşma davranışında meydana gelen değişiklikler, mikroyapının gelişim sürecini etkilemekte ve bu da üretim sonrası elde edilen malzemenin homojenliğini azaltmaktadır. Özellikle atık bor kaynaklarının sanayide giderek artan şekilde kullanılması, borun dökme demirlerdeki etkilerini daha da önemli hale getirmiştir. Çelik çürüf, uçucu kül ve diğer endüstriyel yan ürünlerde bulunan bor, geri dönüşüm süreçleriyle üretime dolaylı olarak katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle, atık borun dökme demirlerdeki etkilerinin detaylı şekilde anlaşılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de malzeme kalitesi açısından kritik öneme sahiptir [13].

Son on yılda bor ilavesinin dökme demirler üzerindeki etkisini inceleyen çalışmaların sayısında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Özellikle gri ve küresel grafitli dökme demirler üzerinde yapılan güncel çalışmalar, borun hem katılaşma davranışı hem de grafit morfolojisi ve matris faz dengesi üzerinde çok düşük derişimlerde dahi etkili olduğunu göstermektedir. Klançnik ve ark., yüksek performanslı gri dökme demire ppm mertebesinde bor ilavesiyle, grafit morfolojisi, sertlik ve çekme dayanımı gibi özelliklerde anlamlı değişimler elde edildiğini ve küçük bor katkılarının chill davranışı ile mekanik özellikler arasında hassas bir denge kurduğunu rapor etmiştir [14]. Sféro dökme demir tarafında Ha vd., Cu alaşımlı küresel grafitli dökme demirde bor ve bakırın birlikte etkisini incelemiş; bor ilavesinin matrisin ferrit fraksiyonunu



Şekil 1. (a) Dökme Demir Mikroyapısı (b) Bor ilave edilmiş gri dökme demir mikroyapısı [9]
(a) Cast Iron Microstructure (b) Boron-added grey cast iron microstructure [9]

Tablo 1. Ana malzemenin kimyasal kompozisyonu (Table 1. Chemical composition of the main material)

Alaşım No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	Sn	Fe
1	3,52	1,70	0,260	0,045	0,065	0,150	0,025	0,001	0,409	0,002	0,019	Kalan
2	3,60	1,63	0,262	0,039	0,0575	0,106	0,030	0,002	0,491	0,008	0,014	Kalan

artırdığını, bakırın ise perlit fazını kararlı hâle getirdiğini, ayrıca borun austenit–sementit dönüşümüne ait entalpi değişimlerini farklılaştırdığını ortaya koymuştur [15]. Benzer şekilde Bugten vd, düşük bakır içerikli küresel grafitli dökme demirlerde borun en kuvvetli karbürleştirici elementlerden biri olduğunu, 20 ppm gibi çok düşük derişimlerde dahi hücreler arası karbür oluşumunu tetiklediğini, grafit şekil ve yüzey kalitesini bozabildiğini, buna karşın Cu ile birlikte ferrit oluşumunu da teşvik edebildiğini göstermiştir [16]. Kasvayee ve ark. ise bor içeriği ile kesit kalınlığının birlikte ele alındığı küresel grafitli dökme demirde, borun mikroyapısal faz oranlarını ve buna bağlı mekanik özellikleri kesit kalınlığına duyarlı bir şekilde değiştirdiğini bildirmiştir [17]. Bor katkısının yüksek alaşımlı beyaz dökme demir ve soğuk yüzeyli dökümler gibi diğer dökme demir sınıflarında da karbür oluşumu ve aşınma direnci üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Çöl ve ark., Ni-Hard 4 tipi yüksek alaşımlı beyaz dökme demirde %0,26–0,55 aralığında bor ilavesinin karbür faz miktarını artırarak sertlik ve aşınma direncini yükselttiğini, ancak darbe tokluğunu belirgin ölçüde azalttığını göstermiştir [18]. Benzer bulgular, 2015 tarihli bir başka yüksek alaşımlı beyaz dökme demir çalışmasında da rapor edilmiş; artan bor içeriği ile karbür oluşumunun, sertliğin ve aşınma direncinin arttığı, buna karşılık tokluğun düştüğü belirtilmiştir [19]. Chilled motor supabı malzemesi üzerine yapılan yeni bir çalışmada ise, bor yüzdesindeki artışın soğuk dökme demirde sertlik ve çekme dayanımını yükselttiği, aynı zamanda mottled yapı oluşumunun sınırlandırılmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir [20]. Bu güncel literatür, borun dökme demir sistemlerinde iz element düzeyinde bile katılma koşullarını, grafit–karbür dengesini ve mekanik performansı güçlü biçimde etkilediğini ortaya koyarken, özellikle EN-GJL serisi gri dökme demirlerde farklı bor kaynaklarının (örneğin B_2O_3 ve B_4C) termal analiz parametreleri, mikroyapı ve mekanik özelliklerle birlikte sistematik olarak değerlendirilmesine daha sınırlı yer verildiğini göstermektedir. Bu açıdan, söz konusu bor oksit ve bor karbür katkılarının EN-GJL-300 gri dökme demir üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma hem iz element kontrolü hem de bor içeren katkılarının mühendislik uygulamalarına uyarlanması bakımından literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Son yıllarda dökme demirlerde bor ilavesinin etkilerini inceleyen çalışmalar daha çok küresel grafitli dökme demirler, yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler veya kontrollü ferro-bor takviyeleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Ha ve ark., borun sfero dökme demirde ferrit-perlit dengesini değiştirdiğini ve grafit morfolojisi üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu bildirirken [21], Bugten vd., borun ppm düzeylerinde dahi karbür oluşumunu artırarak mekanik davranışta kayıplara yol açabildiğini göstermiştir [22]. Beyaz dökme demirlerde yapılan çalışmalar ise borun karbür faz miktarını artırarak sertlik ve aşınma direncini yükselttiğini, ancak tokluğu azalttığını ortaya koymuştur [18]. Bu çalışmaların ortak yönü, borun mikroyapısal evrimi ve faz dönüşümleri üzerindeki güçlü etkisini ortaya koymalarıdır; ancak bu çalışmaların büyük bir bölümü ya küresel grafitli dökme demirlerde ya da yüksek alaşımlı özel dökümlerde gerçekleştirilmiştir. Buna karşın EN-GJL-300 sınıfı gri dökme demirde atık/kaynak bazlı bor

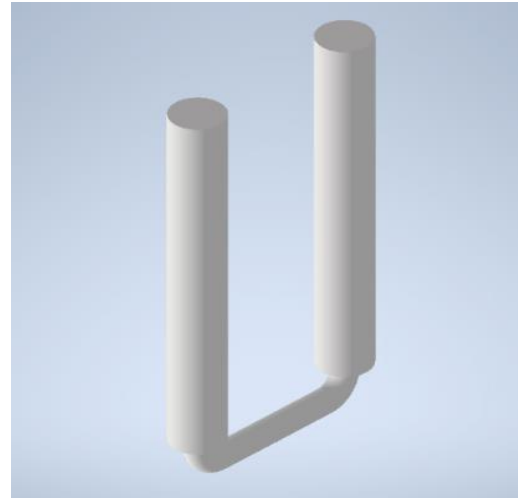
oksit (B_2O_3) ve bor karbür (B_4C) katkılarının farklı form ve miktarlarda katılarak hem termal analiz parametreleri hem mikroyapı hem de mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin sistematik olarak karşılaştırıldığı kapsamlı bir çalışma literatürde sınırlıdır. Bu açıdan mevcut çalışma, bor ilavesinin bu alaşım sınıfındaki çift yönlü etkilerini (grafitleşme davranışı, ferrit/perlit dengesi, çekme dayanımı ve sertlik değişimi) bütüncül bir yaklaşımla incelemesi ve B_2O_3 – B_4C gibi iki farklı bor kaynağının doğrudan karşılaştırılmasına olanak sağlaması bakımından güncel literatüre katkı sunmaktadır. Şekil 1’de bor ilavesinin mikroyapı üzerinde yarattığı değişim görsel olarak eklenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçların, dökme demir üretiminde kalite kontrol süreçlerine katkı sağlayacağı ve endüstriyel geri dönüşüm stratejileri için yol gösterici olacağı öngörülmektedir.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

2.1. Döküm İşlemi (Casting Process)

Numuneler orta frekanslı indüksiyon ocağında ergitilmiş, Tablo 1’de sunulan kimyasal bileşime sahip gri dökme demir esas alınarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Ergitme sonrasında şarja pelet ve toz formunda bor eklenmiş, ardından numuneler kum kalıplara dökülerek şekillendirilmiştir.

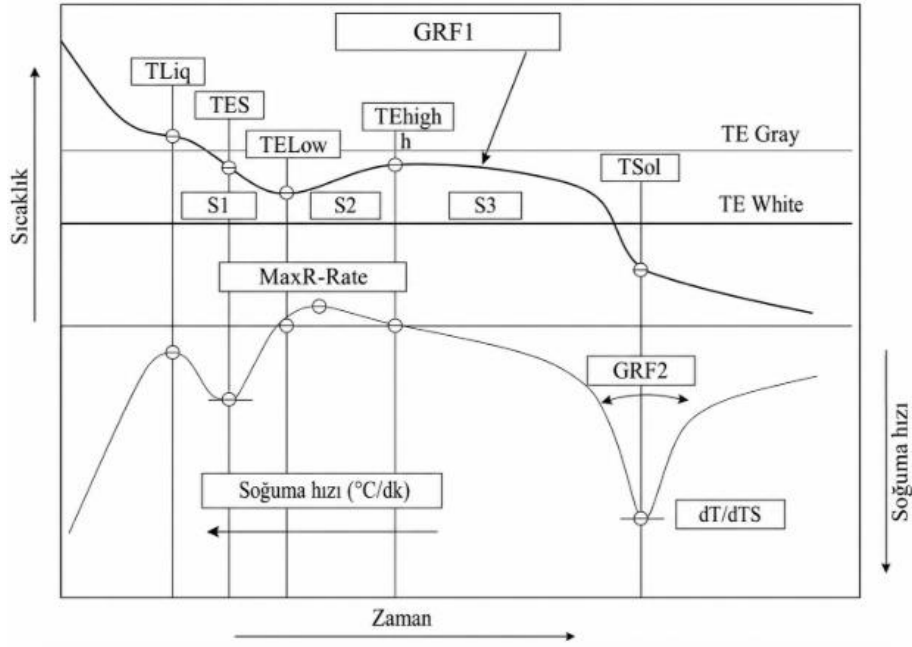
Ergitme işlemi sonucunda elde edilen 1500 °C sıcaklıktaki sıvı alaşım, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere hazırlanan kalıplara dökülmüştür. Numune tasarımı, 25 mm çapında iki çubuktan oluşan ve Şekil 2’te gösterilen U formundaki düzeneğe kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla reçine esaslı kalıplar hazırlanmış ve sıvı metal kontrollü şekilde bu kalıplara dökülmüştür.



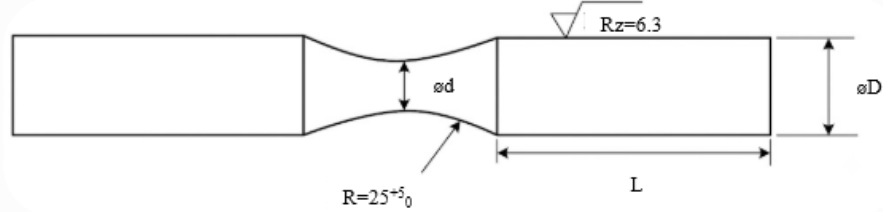
Şekil 2. U formunda tasarlanmış reçineli kalıp içerisine dökülen numunenin üç boyutlu modeli
(Three-dimensional model of the sample poured into a resin mould designed in a U-shape)

Tablo 2. Bor oksit ve bor karbür katkılarının formları, ilave miktarları (g), ağırlıkça oranları (wt. %) (Borax and boron carbide additive forms, additional quantities (g), weight percentages (wt. %))

Numune Kodu	Form	Bor Kaynağı	Miktar (g)	Wt %
1	Toz	B_2O_3	0,4	0.0008
2	Toz	B_2O_3	4	0.008
3	Toz	B_2O_3	8	0.016
4	Toz	B_2O_3	16	0.032
5	Pelet	B_2O_3	1,2	0.0024
6	Pelet	B_2O_3	4	0.008
7	Pelet	B_2O_3	8	0.016
8	Pelet	B_2O_3	16	0.032
9	Toz	B_4C	40	0.08



Şekil 3. Termal analiz sonucunda elde edilen soğuma eğrisi ile kritik sıcaklık noktalarının eğri üzerinde gösterimi [23]
The cooling curve obtained as a result of thermal analysis and the representation of critical temperature points on the curve [23]



Şekil 4. BS EN 1561 standardına uygun çekme numunesi (Tensile test specimen in accordance with BS EN 1561 standard)

Deney planında iki ayrı seri tasarlanmıştır. İlk seride sıvı metal içerisine farklı oranlarda (4, 8 ve 16 g) pelet formunda bor oksit ilavesi yapılmıştır. İkinci seride ise aynı oranlarda (0,4;1,2;4;12;16 g) bor oksitin toz formu kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca 40 g bor karbür içeren ayrı bir deneysel uygulama gerçekleştirilmiştir. Böylece, borun farklı form ve miktarlarda eklenmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bor oksit ilavesinin etkisini daha doğru değerlendirebilmek için, şarja bor oksit eklenmeden önce ve eklendikten sonra sıvı alaşımdan ayrı ayrı numuneler alınmıştır. Bu numuneler, para büyüklüğünde metal kalıplara dökülerek kimyasal bileşim analizine hazırlanmıştır. Ardından, söz konusu numuneler spektrometre cihazında test edilerek kimyasal içerikte meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

2.2. Termal Analiz (Thermal Analysis)

Malzemenin katılaşma özelliklerini incelemek amacıyla özel olarak hazırlanmış sıvı alaşım üzerinde, Termal analiz cihazı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Termal analiz, döküm öncesinde sıvı metalin kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir aşama olup, süreç parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, optimum döküm koşullarının elde edilmesi ve katılaşma davranışının öngörülmesi açısından analiz sonuçları büyük önem taşımaktadır. İnceleme sırasında özellikle MQ ile tanımlanan “metal kalitesi” parametresi esas alınmıştır. Bunun yanı sıra sıvı metal sıcaklığı (TL), ötektik katılaşma sıcaklığı (TES), geri yükselme

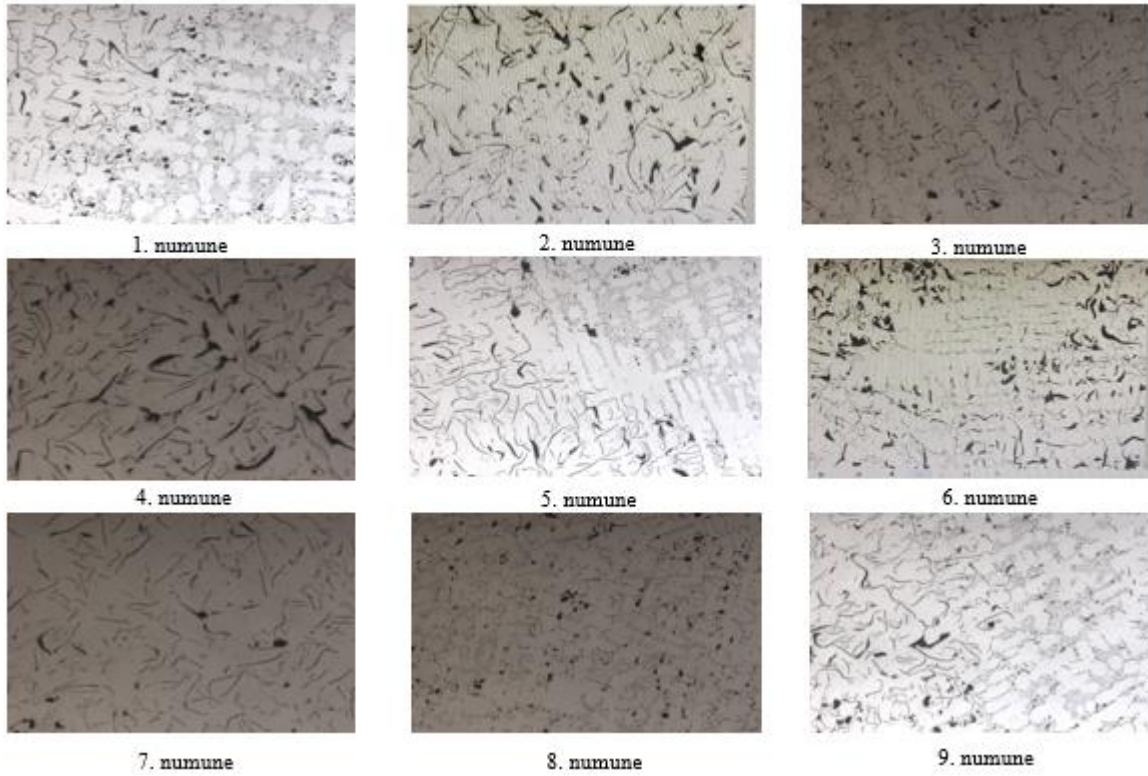
miktarı (R), grafitleşme faktörleri (GRF1 ve GRF2) ile katılaşma sıcaklığı (TS) gibi temel parametreler de değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular sayesinde, malzemenin döküm öncesinde göstereceği katılaşma karakteri ayrıntılı bir şekilde ortaya konulabilmektedir.

2.3. Mikroyapısal Analiz (Microstructural Analysis)

Döküm malzemelerinin grafit ve matris fazlarının karakterizasyonu amacıyla mikroyapı analizleri optik mikroskop altında gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlığında kesme işlemleri ve sıcak montaj işlemleri yapılmıştır. Yüzey hazırlığı yapıldıktan sonra, numuneler sırasıyla 220, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh boyutlu Al_2O_3 zımparalar ile zımparalanmış ve devamında 6 μm , 3 μm ve 1 μm elmas süspansiyonlarla polisaj edilmiştir. Mikroyapı gözlemlerinde grafit morfolojisi dağlama uygulanmadan incelenirken, matris fazının belirlenmesi için %2’lik nital çözeltisi ile dağlama yapılmıştır.

2.4. Sertlik, Akma ve Çekme Testi (Hardness, Flow and Tensile Testing)

U tipi döküm numunelerden, mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik iki farklı geometriye sahip numune hazırlanmıştır. Sertlik deneyleri için 20 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde; çekme deneyleri için ise BS EN 1561 standardı doğrultusunda 20 mm çapında ve 37 mm uzunluğunda numuneler elde edilmiştir. Sertlik testleri öncesinde yüzey hazırlığı 220, 400, 600 ve 800 mesh zımparalar ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, kalibrasyonu yapılmış olan cihazımızda 10 mm çaplı çelik bilye ucu ile 3000 kgf



Şekil 5. Farklı miktarlarda bor katkısının mikroyapıya etkisi (Effect of boron addition at different levels on microstructure)

yük altında Brinell yöntemi uygulanarak yapılmıştır. Her numunede üç farklı noktadan elde edilen ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak deneysel veriler raporlanmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

3.1. Bor Katkısının Mikroyapı Morfolojisine Etkisi (Effect of Boron Addition on Microstructure Morphology)

Bor ilavesi farklı form ve miktarlarda (pelet ve toz) uygulandığında, mikroyapı üzerinde belirgin morfolojik değişimler gözlenmiştir. Özellikle grafit oluşumu, dağılım homojenliği ve matris yapısı açısından dikkat çekici farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Pelet formu incelendiğinde:

- 4 gram pelet ilavesinde grafit parçacıklarının daha iri ve düzensiz dağılım gösterdiği, matris içerisinde heterojen bir yapı sergilediği görülmektedir.
- 8 gram pelet ile birlikte grafit morfolojisinin daha ince ve homojen dağılıma yöneldiği, ayrıca grafitlerin sayıca arttığı gözlenmiştir. Bu durum, borun grafit çekirdeklenmesini teşvik ettiğini göstermektedir.
- 16 gram pelet seviyesinde ise grafit parçacıklarının daha yoğun, fakat bir miktar kümelenme eğiliminde olduğu, bunun da aşırı bor katkısına bağlı olarak yerel segregasyon ihtimalini artırdığı değerlendirilmektedir.

Toz formu incelendiğinde:

- 0,4 gram toz eklenen numunede grafit oluşumlarının seyrek ve iri formda kaldığı, bu miktarın etkili bir çekirdeklenme için yetersiz olduğu görülmektedir.
- 1,2 gram toz seviyesinde grafitlerin belirgin şekilde incelendiği ve daha düzenli dağıldığı, optimum katkıya yaklaşan bir davranış sergilediği gözlenmektedir.

- 4 ve 8 gram toz ilavesinde grafit morfolojisinin daha da belirginleştiği, grafitlerin daha ince ve homojen dağıldığı, matris yapısında ise ferrit oranının arttığı anlaşılmaktadır.
- 16 gram toz eklenmesiyle ise grafitlerin oldukça yoğunlaştığı, fakat yer yer aşırı çekirdeklenmeye bağlı düzensizliklerin olduğu, bu nedenle fazla katkının istenmeyen yapısal farklılıklara yol açabileceği değerlendirilmektedir.

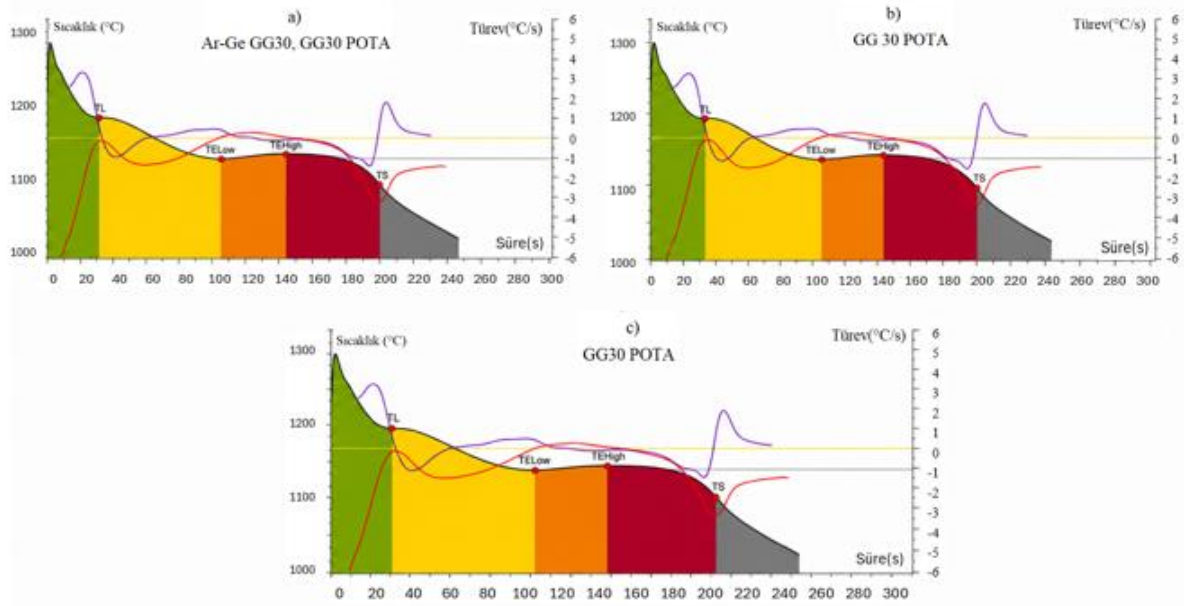
Bor oksit ilavesi hem pelet hem de toz formunda grafit çekirdeklenmesini artırarak grafit parçacıklarının sayısını yükseltmiş ve dağılımın homojenleşmesine katkı sağlamıştır. Ancak düşük katkı seviyelerinde etkinlik sınırlı kalmış, yüksek katkılarda ise aşırı çekirdeklenme ve yerel düzensizlikler ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla optimum bor miktarının seçilmesi, mikroyapının dengeli ve homojen bir şekilde gelişmesi açısından kritik öneme sahiptir.

3.2. Katılaşma Sürecinin Termal Analiz ile Karakterizasyonu (Characterisation of the Solidification Process Using Thermal Analysis)

Numunelerin döküm işlemi sırasında alınan termal analiz verileri ve aralık değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Belirlenen numunelerin metal kalitesi olarak uygun olduğu görülmüştür. Termal analiz işlemlerinde literatür çalışmalarında olduğu gibi termal analiz kabında yapılmıştır. Buna göre ACEL (Soğuma Hızı İvmesi) değeri 0,4 g Bor oksit içeren toz numune de 3,62; 1,2 g Bor oksit içeren pelet numune de 3,77 ve 40 g bor karbür içeren numune de 3,73 olduğu görülmüştür. Şekilde görüldüğü üzere, tüm numunelerin TL, S1 ve dT/dt TES parametrelerinin, minimum değer aralığının çok az altında olduğu gözlenmiştir. Tüm numunelerde R, GRF1, GRF2, TS değerlerinin öngörülen aralıklar içerisinde kaldığı, TE_{Low} değerinin ise aralık değerlerinin az miktarda altında olduğu belirlenmiştir. Tüm numunelerde TS değerinin uygun aralıkta olması karbür oluşum ihtimalini azaltmakta, yüksek GRF1 ve düşük GRF2, hem daha iyi grafitleşme hem de daha düşük çekinti riski ile ilişkilendirilmektedir. Bu şekilde katılaşmanın sonunda daha fazla grafit çekelmesinin meydana gelmesini sağlamaktadır [19]

Tablo 3. GG 30 döküm malzemed e numunelere ait temel termal analiz verileri. (1.numune; 0,4 g Bor Oksit toz, 5.numune; 1,2 g Bor Oksit pelet, 9.numune; 40 g Bor Karbür)
(Basic thermal analysis data for samples in GG 30 casting material. (Sample 1: 0.4 g boron oxide powder; Sample 5: 1.2 g boron oxide pellets; Sample 9: 40 g boron carbide))

Parametre	1. Numune	5. Numune	9. Numune
TL (°C)	1216,7	1200,2	1204,6
TES (°C)	1193,8	1182,6	1187,3
dT/dT TES	-1,37	-1,51	-1,39
S1	47,2	41,1	40,1
TELow (°C)	1143,4	1143,8	1145,8
R	8,8	6,3	6,1
GRF1	63	61	64
GRF2	32	42	31
dT/dt TS	-3,39	-3,14	-3,40
TS (°C)	1111,7	1101,4	1110,1
ACEL	3,62	3,77	3,73



Şekil 7. (a)1.Numune, (b) 5.Numune ve (c) 9.Numune denemelerine ait termal analiz
(a) Thermal analysis of Sample 1, (b) thermal analysis of Sample 5, and (c) thermal analysis of Sample 9)

3.3. Sertlik, Akma Dayanımı ve Çekme Testi Sonuçları (Hardness, Flow Resistance and Tensile Test Results)

Grafikte verilen sertlik sonuçları mikroyapısal oluşumlar ile birlikte değerlendirildiğinde, referans numune GG30'un yaklaşık 215 HB ile en yüksek sertlik değerine sahip olduğu, bor katkılı numunelerde ise bu değerin düştüğü görülmektedir. Özellikle 4 g bor oksit katkılı numunelerde sertlik değerlerinin yaklaşık 200 HB seviyelerine gerilemesi, bor oksit ilavesinin grafitleşmeyi teşvik ederek matriste daha yumuşak fazların (örneğin ferrit) oluşumuna neden olduğunu göstermektedir.

8 g ve 16 g bor oksit katkılı numunelerde sertlik değerlerinde kısmi artış gözlenmiştir. Bu durum, bor katkısının artmasıyla birlikte ötektik reaksiyonun daha kontrollü ilerlemesi ve matriste perlit miktarının kısmen yükselmesine bağlanabilir. Ancak bu artışlara rağmen sertlik değerleri referans GG30'un altında kalmıştır. Pelet ve toz formları arasında ise belirgin bir fark oluşmamış, bu da bor oksidin ilave şeklinin mikroyapı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

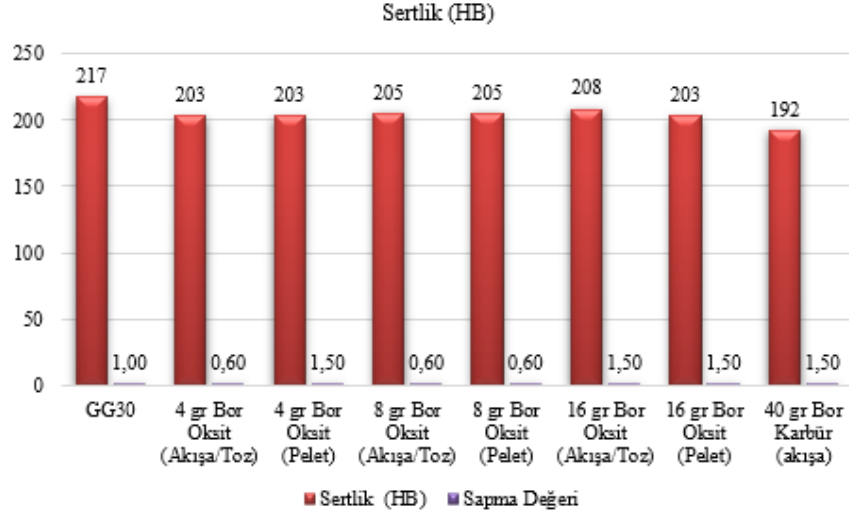
40 g bor karbür katkılı numunede ise sertlik değeri yaklaşık 190 HB seviyelerine kadar düşmüş ve bu sonuç, yüksek orandaki bor karbürün

grafit oluşumunu kuvvetlendirmesiyle açıklanabilir. Aşırı grafitleşme eğilimi, matristeki perlit oranını azaltarak ferrit miktarını artırmakta, bu da malzemenin sertliğini düşürmektedir.

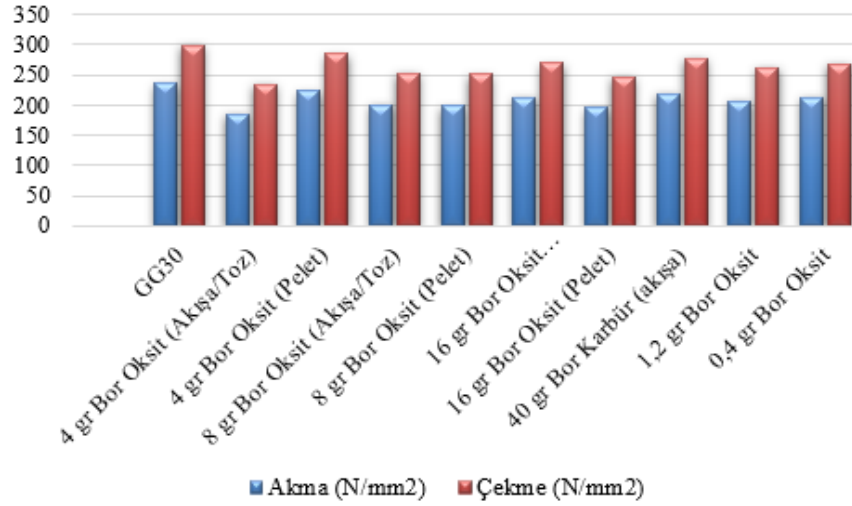
Sonuç olarak, bor oksit katkısı düşük miktarlarda sertlik üzerinde sınırlı etkiler gösterirken, yüksek miktarda bor karbür katkısı lamel grafit oluşumunu artırarak sertliği önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu bulgu, sertlik özelliklerinin doğrudan mikroyapısal denge (ferrit/perlit oranı ve grafit morfolojisi) ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Grafikte verilen çekme ve akma dayanımı değerleri incelendiğinde, referans numune GG30'un her iki mekanik özellik açısından da en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. GG30 numunesinde çekme dayanımı yaklaşık 310 N/mm², akma dayanımı ise 230 N/mm² seviyesindedir. Bor oksit ve bor karbür ilavesi yapılan numunelerde bu değerlerin genellikle düştüğü dikkat çekmektedir.

4 g ve 8 g bor oksit katkılı numunelerde hem akma hem de çekme dayanımlarında belirgin bir azalma gözlenmiş, değerler sırasıyla 200–220 N/mm² aralığına gerilemiştir. Bu durum, bor oksit ilavesiyle birlikte mikroyapıda grafitleşmenin artması ve ferrit oranının yükselmesi sonucu mekanik dayanımın zayıflamasıyla



Şekil 8. Numunelere Ait Sertlik Değerleri (Hardness Values of Samples)



Şekil 9. Numunelere ait Çekme ve Akma Dayanımı Değerleri (Tensile and Yield Strength Values of Samples)

ilişkilendirilebilir. 16 g bor oksit katkısında ise özellikle çekme dayanımı değerlerinin kısmen toparlandığı ve diğer bor oksit katkılı numunelere göre daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu bulgu, artan bor miktarının ötektik reaksiyon üzerindeki etkisiyle matriste kısmen daha fazla perlit oluşumuna işaret etmektedir.

40 g bor karbür ilavesinde çekme ve akma dayanımları daha da düşerek yaklaşık 190–200 N/mm² seviyelerine inmiştir. Bu sonuç, yüksek oranda bor karbürün grafitleşmeyi fazlaca teşvik ederek mukavemeti olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Düşük miktarda bor katkısı (0,4 g ve 1,2 g) ise mekanik özelliklerde orta seviyede değerler sağlamış, fakat referans numunenin oldukça altında kalmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bor katkısı ile hazırlanan numunelerde dayanım değerleri referans GG30'a kıyasla düşüş göstermiştir. Bu durum, borun grafitleşme eğilimini artırarak ferrit oluşumunu teşvik etmesi ve perlit oranını azaltmasıyla açıklanabilir. Ancak katkı miktarı ve formuna bağlı olarak mekanik özelliklerde kısmi değişimler olduğu da görülmektedir. Özellikle 16 g bor oksit katkılı numunelerde gözlenen belirli düzeyde iyileşme, optimum katkı miktarının belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada, bor oksit (B₂O₃) ve bor karbür (B₄C) katkılarının dökme demir numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri termal analiz, sertlik ölçümleri ile çekme ve akma dayanımı testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Termal analiz sonuçları, tüm numunelerin kabul edilebilir metal kalitesine sahip olduğunu göstermiş; ancak bor katkısının ötektik sıcaklık, grafitleşme faktörleri ve geri yükselme (recalcescence) parametrelerinde önemli değişimlere neden olduğu belirlenmiştir. Özellikle bor oksit katkılı numunelerde R ve GRF1 değerlerinin artması, buna karşılık GRF2 değerlerinin azalması, grafitleşme eğiliminin arttığını ve çekinti oluşumu riskinin azaldığını ortaya koymuştur.

Mekanik test sonuçları incelendiğinde, referans GG30 numunesinin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu, bor katkılı numunelerde ise sertlik değerlerinin genel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük ve orta seviyelerde bor oksit ilavesi sertlik üzerinde sınırlı değişimlere neden olurken, yüksek miktarda bor karbür (40 g) ilavesi belirgin bir sertlik kaybına yol açmıştır. Çekme ve akma dayanımı sonuçları da sertlik verileriyle uyumlu olup, bor katkılı numunelerde mukavemet değerlerinin referans GG30 numunesine kıyasla düştüğü tespit

edilmiştir. Bununla birlikte, 16 g bor oksit ilavesi yapılan numunede mekanik özelliklerde sınırlı bir iyileşme eğilimi gözlenmiştir. En olumsuz sonuçlar ise yüksek miktarda bor karbür katkısı uygulanan numunelerde elde edilmiş, bu numunelerde hem sertlik hem de mekanik dayanım değerleri önemli ölçüde azalmıştır.

Elde edilen bulgular, bor katkılarının mikroyapıda grafitleşmeyi teşvik ederek ferrit oranını artırdığını ve bunun sonucunda sertlik ile mekanik dayanım değerlerinde düşüş meydana geldiğini göstermektedir. Sonuç olarak, katkı miktarı ve katkı formunun dökme demirin özellikleri üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş; özellikle uygun seviyelerde yapılan bor oksit ilavesinin mekanik özelliklerde sınırlı da olsa iyileştirici etkiler sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi süresince sağladığı teknik altyapı, laboratuvar imkânları ve kurumsal desteklerinden dolayı Erkunt Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca deneysel çalışmaların yürütülmesinde katkı sağlayan tüm çalışma arkadaşlarımıza ve süreç boyunca destek veren ilgili personele teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar (References)

- Oktaviano B., et al., Castability and Damping Capacity of Gray Cast Iron: A Review, *Mater. Today Proc.*, 27, 1435-1441, 2020.
- Elliott R., *Cast Iron Technology*, Butterworth-Heinemann Ltd., London, U.K., 1996.
- ASM International, *ASM Metals Handbook: Casting*, ASM International, Materials Park, OH, U.S.A., 1998.
- ASM International, *ASM Metals Handbook: Properties and Selection of Irons, Steels and High-Performance Alloys*, Vol. 1, ASM International, Materials Park, OH, U.S.A., 1988.
- Heine R.W., Cooper C., Rosenthal P.C., *Principles of Metal Casting*, Tata McGraw-Hill Publishing Co., New Delhi, India, 1996.
- Chen C.L., et al., Influence of Trace Elements on the Microstructure and Properties of Cast Iron, *J. Mater. Sci.*, 42 (14), 5678-5685, 2007.
- Choi J., Kim Y., The Role of Boron in Foundry Practice: Effects on Microstructure and Mechanical Properties, *Metall. Mater. Trans. A*, 40 (6), 1412-1419, 2009.
- Kandula A., Effect of Boron and Lead on the Properties of Gray Iron, *Foundry J.*, 56 (3), 45-52, 1994.
- Ankamma K., Effect of Trace Elements (Boron and Lead) on the Properties of Gray Cast Iron, *Indian J. Eng.*, 95 (1), 19-26, 2014.
- Kasvayee K., Ciavatta M., Ghassemali E., Svensson I., Jarfors A., Effect of Boron and Cross-Section Thickness on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron, *Mater. Sci. Forum*, 925, 249-256, 2018.
- Ying Z., Nakae H., Influence of Boron on Ferrite Formation in Copper-Added Spheroidal Graphite Cast Iron, *Mater. Sci. Eng. A*, 667, 23-30, 2016.
- eng Y.C., Jin H.J., Liu J.H., Li G.L., Effect of Boron on the Microstructure and Mechanical Properties of Carbide Austempered Ductile Iron, *Mater. Sci. Eng. A*, 529, 321-325, 2011.
- Klančnik G., Burja J., Klančnik U., Batič B., Krajnc L., Resnik A., Microstructure and Properties Variation of High-Performance Grey Cast Iron via Small Boron Additions, *J. Alloys Compd.*, 785, 123-131, 2019.
- Klančnik G., Burja J., Klančnik U., Batič B., Krajnc L., Resnik A., Microstructure and Properties Variation of High-Performance Grey Cast Iron via Small Boron Additions, *Crystals*, 14 (1), 103, 2024.
- Ha J.S., Hong J.W., Kim J.W., Han S.B., Choi C.Y., Song H.J., Jang J.S., Kim D.Y., Ko D.C., Yi S.H., Cho Y.J., The Effect of Boron (B) and Copper (Cu) on the Microstructure and Graphite Morphology of Spheroidal Graphite Cast Iron, *Materials*, 16 (12), 4225, 2023.
- Bugten A.V., Michels L., Di Sabatino M., The Role of Boron in Low Copper Spheroidal Graphite Irons, *Metall. Mater. Trans. A*, 54 (6), 2539-2553, 2023.
- Kasvayee K.A., Ciavatta M., Ghassemali E., Svensson I.L., Jarfors A.E.W., Effect of Boron and Cross-Section Thickness on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron, *Mater. Sci. Forum*, 925, 249-256, 2018.
- Çöl M., Koç F.G., Öktem H., Kır D., The Role of Boron Content in High Alloy White Cast Iron (Ni-Hard 4) on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance, *Wear*, 348-349, 158-165, 2016.
- Khan M.A., Gupta R., Effect of Boron Addition on the Microstructure and Wear Behaviour of High Alloy White Cast Irons, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 5 (6), 45-50, 2015.
- Gobinath V., Influence of Boron on Mechanical and Microstructure Properties of Chilled Cast Iron Engine Tappet, *J. Adv. Res. Dyn. Control Syst.*, 9 (Special Issue 14), 1577-1583, 2017.
- Ha J.S., Hong J.W., Kim J.W., Han S.B., Choi C.Y., Song H.J., Jang J.S., Kim D.Y., Ko D.C., Yi S.H., Cho Y.J., The Effect of Boron (B) and Copper (Cu) on the Microstructure and Graphite Morphology of Spheroidal Graphite Cast Iron, *Materials*, 16 (12), 4225, 2023.
- Bugten A.V., Sanders P., Hartung C., Logan R., Di Sabatino M., Michels L., The Influence of Boron (B), Tin (Sn), Copper (Cu), and Manganese (Mn) on the Microstructure of Spheroidal Graphite Irons, *Int. J. Metalcast.*, 18 (2), 1258-1274, 2024.
- Persson P.E., Udriou A., Vomacka P., Wang X., Sjögren T., ATAS® as a Tool for Analyzing, Stabilizing and Optimizing the Graphite Precipitation in Grey Cast Iron, *Proceedings of the 69th World Foundry Congress*, Hangzhou, China, 1-16, 15-17 October, 2010.

