

Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi

Zehra ÇINARCIK^{1*}  Bora GÜNTAY¹ 

¹Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş. 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/07/2024
Düzeltilme: 03/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araçlarda Fren
Diski
Mikroyapı Kusurları
Azot Boşluğu
Yorulma Testi
Lamel Garflı Dökme
Demir
Gri Dökme Demir

Article Info

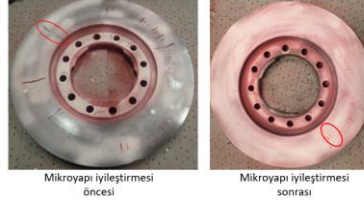
Research article
Received: 08/07/2024
Revision: 03/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

Heavy-Duty Vehicle Brake
Disc
Microstructural Defects
Nitrogen Porosity
Fatigue Test
Lamellar Graphite Cast
Iron
Gray Cast Iron

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının iyileştirilmesi yoluyla çatlak dayanımının artırılabilirliğini ve bu süreçte malzeme homojenliği ile üretim süreci optimizasyonlarının kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. / This study demonstrates that improving the microstructure of brake discs used in heavy-duty vehicles can enhance crack resistance, highlighting the critical role of material homogeneity and production process optimization in achieving this outcome.



Şekil A: Fren diski numuneleri çatlak boyları / Figure A: The crack lengths of the brake disc samples

Önemli noktalar (Highlights)

- Mikroyapı analizi ile malzeme içindeki hatalı modların tespit edilmesi. / Identification of defect modes within the material through microstructural analysis.
- Döküm işlemi sırasında besleyici giriş sayısının artırılması, yolluk tasarımının iyileştirilmesi ve zirkonlu aşılama gibi önlemler alınması. / Implementation of corrective measures such as increasing the number of feeder inputs during the casting process, improving the gating system design, and applying zircon inoculation.
- Atalet dinamometresi testlerinde, iyileştirici önlemler uygulanan fren diskinin daha yüksek çatlak dayanımı göstermesi. / Inertia dynamometer tests showing higher crack resistance in the brake disc with applied corrective measures.

Amaç (Aim): Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisini atalet dinamometresi kullanarak doğrulamayı ve mikroyapısal iyileştirmelerin bu etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. / This study aims to verify the effect of the microstructure and mechanical properties of brake discs used in heavy-duty vehicles on crack resistance using an inertia dynamometer and to investigate how microstructural improvements influence these effects.

Özgünlük (Originality): Makalenin özgün yönü, ağır hizmet araçlarına yönelik fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisinin literatürde yeterince incelenmemiş olması ve atalet dinamometresi ile yapılan deneysel doğrulamalarla bu ilişkinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamasıdır. / The originality of the paper lies in the fact that the effect of the microstructural properties of brake discs for heavy-duty vehicles on crack resistance has not been sufficiently studied in the literature, and this research contributes to a more comprehensive understanding of this relationship through experimental validations using an inertia dynamometer.

Bulgular (Results): Fren diskinin, çatlak dayanımını iyileştirmek ve mikroyapı kusurlarını önlemek amacıyla, besleyici giriş sayısı artırılması, yolluk tasarımı iyileştirmesi ve zirkonlu (Zr) aşılama uygulaması süreç geliştirmeleri yapılmış bu iyileştirmelerin sonucunda, mikroyapısının iyileştiği ve çatlak dayanımının arttığı görülmüştür. / To improve crack resistance and prevent microstructural defects in the brake disc, process improvements were made by increasing the number of feeder inputs, optimizing the runner design, and applying zircon (Zr) inoculation. As a result of these enhancements, the microstructure was improved, and crack resistance increased.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışma, ağır ticari araçlar için fren disklerinin malzeme özelliklerinin ve üretim süreci iyileştirmelerinin mikroyapının homojenliğini artırarak çatlak dayanımını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir. / This study demonstrates that the material properties and production process improvements of brake discs for heavy commercial vehicles significantly enhance crack resistance by increasing the homogeneity of the microstructure.



Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi

Zehra ÇINARCIK^{1*} Bora GÜNTAY¹ ¹Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş. 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/07/2024
Düzeltilme: 03/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araçlarda
Fren Diski
Mikroyapı Kusurları
Azot Boşluğu
Yorulma Testi
Lamel Garfıtlı Dökme
Demir
Gri Dökme Demir

Öz

Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının, çatlak dayanımına olan etkisini detaylı bir şekilde incelemeyi ve bu dayanımı iyileştirmeyi hedeflemektedir. İlk aşamada, atalet dinamometresi testinde beklenenden daha erken çatlak oluşumu gösteren bir fren diski numunesi incelenmiştir. Mikroyapısal analiz sonucunda, malzeme içindeki homojen olmayan yapı ve azot boşlukları gibi çeşitli hata modları tespit edilmiştir. Bu hata modlarının fren diskinin çatlak dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Hata modlarını gidermek ve malzemenin mikroyapısal bütünlüğünü artırmak amacıyla bir dizi iyileştirici önlem uygulanmıştır. Bunlar arasında, döküm işlemi sırasında besleyici giriş sayısının artırılması, yolluk tasarımının iyileştirilmesi ve zirkonlu aşılama uygulamaları bulunmaktadır. Besleyici girişlerinin artırılması ve yolluk tasarımının iyileştirilmesi, malzeme akışını iyileştirerek daha homojen bir yapının elde edilmesini sağlamış, zirkonlu aşılama uygulaması ise mikroyapısal kusurların azaltılmasına yardımcı olmuştur. Bu iyileştirici aksiyonlar sonrasında ikinci bir fren diski numunesi üretilmiştir. Yeni numunenin, atalet dinamometresi testlerinde, çatlak dayanımının belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan mikroyapısal analizler, uygulanan önlemlerin malzeme içerisindeki homojenliği artırdığını ve azot boşluklarını büyük ölçüde giderdiğini göstermiştir. Sonuç olarak, ikinci numunenin mikroyapısının iyileştiği ve çatlak dayanımının arttığı doğrulanmıştır. Bu çalışma, fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin mekanik performans üzerindeki kritik etkisini vurgulamakta ve mikroyapısal iyileştirmelerin çatlak dayanımını nasıl artırabileceğini göstermektedir. Çalışmada, fren disklerinin güvenilirliğini artırmak için mikroyapısal kontrollerin ve üretim süreci iyileştirmelerinin önemi ortaya koyulmuştur.

Microstructural Impact on Crack Resistance in Heavy-Duty Vehicle Brake Discs

Article Info

Research article
Received: 08/07/2024
Revision: 03/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

Heavy-Duty Vehicle Brake
Disc
Microstructural Defects
Nitrogen Porosity
Fatigue Test
Lamellar Graphite Cast
Iron
Gray Cast Iron

Abstract

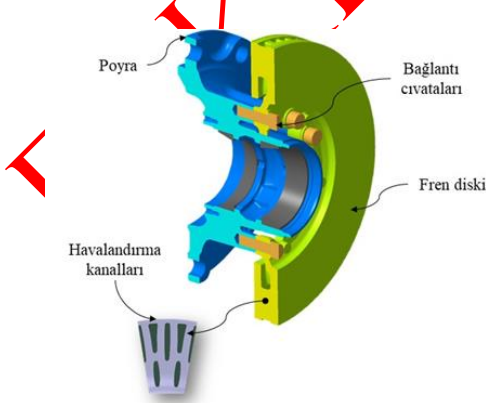
This study aims to comprehensively examine the microstructure of brake discs used in heavy-duty vehicles and its impact on crack resistance, with the goal of enhancing this resistance. In the initial phase, a brake disc sample exhibiting premature crack formation during inertia dynamometer testing was analyzed. Microstructural analysis revealed various defect modes such as non-homogeneous structure and nitrogen porosity within the material. These defect modes were found to adversely affect the crack resistance of the brake disc. To address these issues and improve the microstructural integrity of the material, a series of corrective measures were implemented. These included increasing the feeder inlet numbers during the casting process, optimizing the gating system design, and applying zirconium inoculation. Increasing feeder inlets and improving gating system design improved material flow, resulting in a more homogeneous structure, while zirconium inoculation helped reduce microstructural defects. Following these corrective actions, a second brake disc sample was produced. Observations during inertia dynamometer tests indicated a significant improvement in crack resistance for the new sample. Microstructural analyses confirmed that the implemented measures enhanced material homogeneity and largely eliminated nitrogen porosities. Consequently, the improved microstructure and increased crack resistance of the second sample were verified. This study highlights the critical impact of microstructural characteristics of brake discs on mechanical performance and demonstrates how microstructural improvements can enhance crack resistance. It underscores the importance of microstructural controls and process enhancements in increasing the reliability of brake discs.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her aracın, değişen yol ve trafik koşullarına göre durması veya hızını ayarlaması için bir fren sistemine ihtiyacı vardır. Fren sistemlerinde kullanılan temel prensip, bir aracın kinetik enerjisini başka bir enerji formu olan ısıya dönüştürmektir. Yaygın olarak kullanılan disk fren ve kampanalı fren olmak üzere iki tür fren sistemi bulunmaktadır [1]. Disk frenler, kampanalı frenlere göre daha geniş bir yüzey alanına sahiptirler ve daha fazla hava akışına maruz kalırlar bu nedenle daha hızlı bir şekilde soğumaktadırlar [1].

Disk frenler, 1890'larda İngiltere'de geliştirilmiştir. Karayolu araçları için ilk fren diski patenti, Frederick William Lanchester tarafından 1902'de sunulmuş ve bu frenler 1950'lerde popüler hale gelmiştir. Günümüz fren diskleri ile 1980'lerdeki fren disklerinin temel çalışma prensipleri ve ana bileşenleri aynıdır. Diskler, iyi termal iletkenlik, düşük gürültü seviyeleri ve uzun ömür gibi birçok avantajı nedeniyle gri dökme demirden (GDD, lamel grafitli dökme demir) üretilmektedir [2-4].

Fren diskleri (Şekil 1), aksa bir poyra yardımı ile sabitlenir, böylece tekerlek ile aynı hızda dönmektedir. Bir disk freninin frenleme gücü, balata ile disk arasındaki sürtünme kuvvetleri nedeniyle kinetik enerjinin ısıya dönüştürme hızına bağlıdır. Verimli bir fren tasarımı için, ısı mümkün olduğunca hızlı bir şekilde dağıtılmalıdır; aksi takdirde disk sıcaklığı artabilir ve disk freninin performansı negatif etkilenebilir. Bu nedenle, uygulamalarda daha yüksek performans elde etmek için fren disklerine havalandırma kanatçıkları eklenir ve bu da diskin soğuma hızını artırmaktadır [4-6].

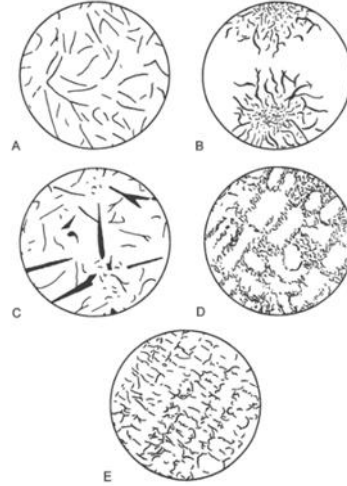


Şekil 1. Bütünleşik fren diski ve poyra çifti [5]
(Integrated brake disc and hub pair)

Gri dökme demir, %2,11 ile %6,67 arası karbon içeren demir-karbon alaşımlarına verilen genel bir isimdir [7]. GDD, yüksek titreşim sönümleme

kapasitesi, ergime noktası, termal iletkenlik ve ısı depolama kapasitesi gibi termofiziksel özellikleri nedeniyle, aşırı ısınmayı ve fren gürültüsünü önlemektedir [1, 8]. Bunların yanı sıra, GDD, düşük maliyeti ve kolay döküm işlemi nedeniyle tercih edilmektedir [9].

Gri dökme demirin mekanik özelliklerini, grafitin miktarı, şekli, uzunluğu ve dağılımı önemli ölçüde belirlemektedir. Grafit formları, ISO 945-1:2008 standardına göre, A, B, C, D ve E olmak üzere Şekil 2'de gösterildiği gibi beş sınıfa ayrılmaktadır [10, 11]. A tipi grafit içeren dökme demirler, genellikle yüksek perlit içeriğine sahiptir. Bu durum, malzemenin dayanıklılığını ve aşınma direncini artırmaktadır [10, 12]. B tipi grafit, hızlı soğutulmuş hiperötektik gri dökme demirlerde ortaya çıkmaktadır [10, 12]. C tipi grafit, küçük grafit olarak da adlandırılır, sadece karbon eşdeğerinin çok yüksek olduğu, ötektik üstü (hiperötektik) dökme demirlerde ortaya çıkmaktadır. Grafitin yüksek miktarda bulunması, dökme demirin ısı iletkenliğini önemli ölçüde artırmaktadır. C tipi grafit, yüksek ısı iletimi gerektiren uygulamalarda bu özelliği nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak büyük ve kalın tabaka yapısı nedeniyle dökme demirin mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir. D ve E tipi grafitler, hızlı soğumanın olduğu durumlarda, 1500°C derecenin üzeri sıcaklıktaki dökümlerde özellikle ince kesitlerinde ortaya çıkmaktadır. D ve E tipi mikroyapısı genellikle ferritiktir [12, 13].



Şekil 2. ISO 945-1:2019 standardına göre dökme demirlerde grafit formlarının gösterimi [14]
(Graphite forms in cast irons according to ISO 945-1:2019)

Gri dökme demirin mekanik özellikleri, mikroyapısındaki grafit miktarı, boyutu, morfolojisi ve lamellerin dağılımına; mikroyapısı ise kimyasal bileşimine ve özellikle soğuma koşullarına bağlıdır [15]. Dökülen parçanın çeşitli bölgelerinde farklı

soğuma hızları olması homojen olmayan mikroyapı oluşmasına sebep olabilmektedir [15].

Dökme demirler genellikle çeşitli yapısal kusurlar içermektedir. Bunlar arasında, en yaygın olanları gaz kusurları, gözenekler, azot çatlakları ve boşlukları, metal penetrasyon kusuru ve büzülme gözeneği kusurlarıdır [16-21]. Bu kusurların giderilmesi ve malzemeye etkileri literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Örneğin, Kambayashi ve arkadaşları (2007), gözenek kusurunun oluşum faktörlerini ve önlemlerini belirlemişlerdir [22]. Patil ve arkadaşları (2015), metal döküm sürecinde gaz boşluklarının oluşumunu önlemek amacıyla kalıbın sıcaklığının düşük tutulması, kalıp ve maçalarının yeterli havalandırılması, besleyici ve giriş sisteminin iyileştirilmesi ve döküm tasarımının değiştirilmesi gibi uygulamalar önermiştir [23]. Javahery ve arkadaşları çalışmalarında (2019), kalıpta katılma sırasında oluşabilecek büzülme gözeneği kusurlarını önlemek amacıyla besleme ve yolluk tasarımlarının sıvı akışı, ısı transferi ve katılma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [24]. Ray Elliot (1988), maçanın yetersiz kurutulması, ıslak maça gazı veya döküm sırasında yüksek azot içeriği sağlayan bir bağlayıcının gözenek kusuruna neden olduğunu gözlemlemiştir. Bu kusuru engellemek için, maçaların iyi kurutulması ve yeterli havalandırılması gerekliliğini vurgulamıştır [25].

Lin ve arkadaşları (2022), azotun gri dökme demirin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve azot içeriği arttıkça grafit yapısında belirgin değişiklikler olduğunu bulmuşlardır [26]. J. Linde ve arkadaşları (2006) ise gözeneklilik miktarının yorulma mukavemetini %25'e kadar azalttığını göstermiştir [27]. Soiński ve arkadaşları (2011), gri dökme demirlerde zirkonlu aşılamanın, malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, zirkonlu aşılama öncesinde mikroyapıda D ve E tipi grafitlerin yoğun olduğunu, ancak aşılama işlemi sonrasında grafit lamellerinin, daha homojen ve ince bir yapıya sahip olan A tipi olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Her diskte bir miktar bulunan bu malzeme hataları ve diskin geometrik tasarımı, araç üzerindeki kullanım ömrünü etkilemektedir. Diskler zaman içerisinde ısınma ve soğuma kaynaklı iç gerilmelerin etkisiyle yorulmakta ve yüzeylerinde çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların büyüklüğü ve oluşma süresi aracın kullanım şartlarına bağlı olup daha sıcak koşullarda kullanılan disklerin daha erken çatladığı gözlenmektedir [29]. Disklerin, sahadaki ömürlerini ön görebilmek için laboratuvar

ortamında, atalet dinamometresi test üniteleri ile çatlak dayanım testleri yapılmaktadır.

Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisini atalet dinamometresi kullanarak doğrulamayı ve mikroyapısal iyileştirmelerin bu etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Mevcut literatürde, ağır hizmet araçlarına yönelik fren disklerinin mikroyapısının çatlak dayanımına olan etkisi yeterince incelenmemiştir. Özellikle, atalet dinamometresi ile yapılan doğrulamalar literatürde sınırlı yer bulmaktadır. Bu araştırma, bu önemli boşluğu doldurarak, fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin, çatlak dayanım performansı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamayı sağlamaktadır.

Çalışmanın materyal ve yöntem bölümünde, test edilen numune diskler tanımlanmış, üretim metodunda yapılan iyileştirici önlemler açıklanmış, numunelerin geometrik yapısı ve malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Ayrıca saha kullanımını temsil eden atalet dinamometresi test ünitesinin yapısı ve koşulan testin sınır şartları tanımlanmış ve inceleme yöntemi açıklanmıştır. Bulgular bölümünde ise, numunelerin detaylı incelemesi ve karşılaştırılması yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmanın devamında, mevcut imalat yöntemi ile üretilen fren diski Numune 1 ve süreçte iyileştirme yapılarak üretilen fren diski Numune 2 olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde, disklerin geometrik ve malzeme özellikleri tanımlanmış, Numune 2 üretilirken yapılan süreç iyileştirmeleri açıklanmış ve iki diskin farkları vurgulanmıştır. Ayrıca test düzeneği, test koşulları, inceleme metotları ve parametreleri hakkında detaylı bilgiler paylaşılmıştır.

2.1. Numune Tanıtımı (Sample Introduction)

Fren diskleri, 22,5" jant ölçüsüne uygun, Ø430 mm dış çap ve 45 mm kalınlık ölçüsüne sahip havalandırılmalı disklerdir. Diskler EN-GJL-150 eşdeğeri GDD malzemedan üretilmiştir. Lamel grafitli dökme demirlerde mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörler grafit miktarı ve şeklidir. Dökme demirin kimyasal bileşiminde bulunan ve mekanik özellikleri etkileyen ana elementler; C (Karbon), Si (Silisyum), P (Fosfor), S (Kükürt), Mn (Mangan)'dır [30]. Kükürt (S) ve fosfor (P) elementlerinin oranları sırasıyla maksimum %0,11 ve %0,10 ile sınırlandırılmıştır.

Kükürt ve fosfor genellikle metalürjik işlemlerde safsızlık olarak kabul edilmektedir, çünkü bu elementler alaşımın kırılgenliğini artırabilmekte ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [31-34].

Tablo 1’de, DIN EN 1561 standartlarına göre EN-GJL-150 gri dökme demir malzemenin, çekme dayanımı ve sertliği verilmiştir [35]

Tablo 1. Diskin mekanik özellikleri (The mechanical properties of the disc)

	Çekme (Mpa)	Sertlik (HB)
Minimum değer	130	160
Maksimum değer	-	200

2.2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

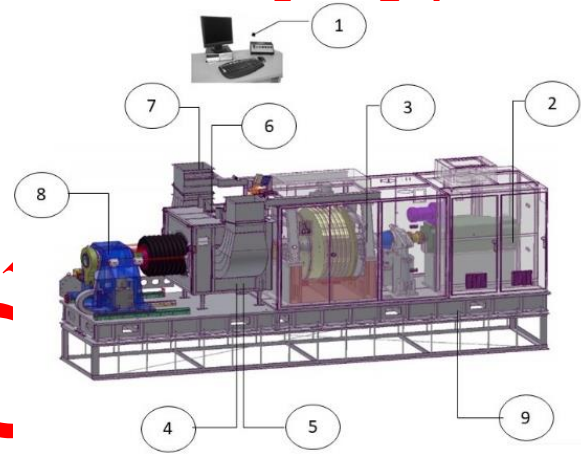
Günümüzde araç üzerinde yapılan birçok performans ve dayanım testi, laboratuvar ortamında, daha güvenli, kontrollü ve düşük maliyet ile dinamometre test ünitelerinde yapılabilmektedir. Laboratuvar ortamında sınır koşulları daha kolay ayarlanabildiği için frenler üzerindeki balata ve disklerin performans, aşınma, yorulma, çatlama vb. parametreleri atalet dinamometresi ile test edilebilmektedir. Dinametreler, fren sistemi üzerindeki yükü ve stresi simüle ederek, farklı hız, sıcaklık ve yükler altında nasıl davrandığını inceleyebilmektedir [36]. Şekil 3’de, Link firmasına ait bir ticari araç dinamometresi örneği gösterilmektedir.



Şekil 3. Ağır ticari araç dinamometresi (Model 6900) [37] (Heavy commercial vehicle dynamometer)

Atalet dinamometresi Şekil 4’de görüldüğü gibi dokuz bölümden oluşmaktadır. Motor (2) tarafından

döndürülen atalet volanları (3), aracın yüklü ağırlığını temsil etmektedir. Fren, reaksiyon aparatlandırmasına (8) yataklanmış dingil ucu parçalarına bağlıdır ve kapalı bir kabinin (6) içerisinde çalışmaktadır. Frenin üzerinden tork, hava basıncı, sıcaklık, devir hızı bilgilerini kayıt eden bir veri toplama ünitesi (5) bulunmaktadır. Basıncılı hava sistemi ve valf (4) aracılığı ile belirlenen sınır şartlarına uygun olarak frenleme yapılabilmektedir. Frenin bulunduğu kabinin sıcaklığı, ortam şartını temsil etmekte olup, bir havalandırma sistemi (7) yardımı ile şartlandırılmaktadır. Tüm sistem yerden, sönümleyici bir şasi (9) yardımı ile yalıtılmış durumdadır. Bir kontrol bilgisayarı (1) yardımı ile veriler canlı olarak izlenebilmektedir.



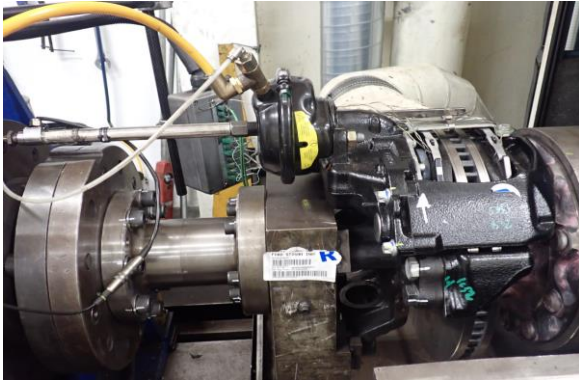
Şekil 4. Link (Model 6900) Atalet dinamometresi test düzeneği; (1) Kontrol bilgisayarı, (2) Motor, (3) Atalet volanları, (4) Basıncılı hava sistemi ve valf, (5) Veri toplama ünitesi, (6) Kabin, (7) Havalandırma sistemi, (8) Reaksiyon aparatı, (9) Şasi [37] (Link (Model 6900) Inertia dynamometer test setup; (1) Control computer, (2) Engine, (3) Inertia flywheels, (4) Pressurized air system and valve, (5) Data acquisition unit, (6) Cabin, (7) Ventilation system, (8) Reaction device, (9) Chassis)

Test sırasında fren sıcaklıkları Şekil 8’de görüldüğü gibi iç ve dış balata baskı yüzeylerinden ve ayrıca iç ve dış balatalar üzerinden ölçülmüştür. Tüm ölçüm noktalarında 0-900 °C aralığına kalibre edilmiş K tipi termokupullar kullanılmıştır. Disk yüzeylerinden ölçüm alan termokupulların uçlarının sürtünme ile bozulmaması için Şekil 5’de görüldüğü gibi kızak parçaları kullanılmıştır.



Şekil 5. K tipi termokupulların ölçüm sistemi üzerindeki yerleşimi (Placement of type K thermocouples on the measurement system)

Frenleme basıncı, bir oransal valf ile kontrol edilmekte olup, ayrıca bir basınç sensörü ile geri besleme yapılmakta ve sınır şartları geri besleme sensörüne göre kontrol edilmektedir. Sensör, frenin körüğüne yakın konumlandırıldığı için fren hortumlarında ve borularında kaybedilen basınç hatasının elenmesini sağlamaktadır. Frenleme torku, Şekil 6'da görüldüğü gibi, şasiye bağlı sabit yataklama aparatı ile fren arasında seri bağlı şekilde duran bir tork sensörü ile ölçülmektedir.



Şekil 6. Test düzeni (Test setup)

Araç hızı, diskin dönüş hızı ile temsil edilmektedir ve disk deviri ile tekerlek çevresi çarpılarak hesaplanmaktadır. Araç hızı, diskin dönüş hızı ile temsil edilmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V = \theta \cdot C \quad (1)$$

V : diskin dönüş hızını (m/s)

θ : disk deviri (rad/s)

C : tekerlek çevresi (m)

Test sınır şartları diskin kullanıldığı ağır ticari aracın kütlesine göre seçilmiştir. Kullanılacak atalet değeri, Formül 2'ye $1389 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

$$I = \frac{G \cdot r^2}{2} \quad (2)$$

I : atalet değerini ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

G : aks ağırlığını (kg)

r : tekerlek yarıçapı (m)

Frenler öncelikle disk ve balatanın birbirine alışması için 100°C frenleme başlangıcı sıcaklığında ve 3 Bar basınç ile 100 defa tahrik edilmiştir.

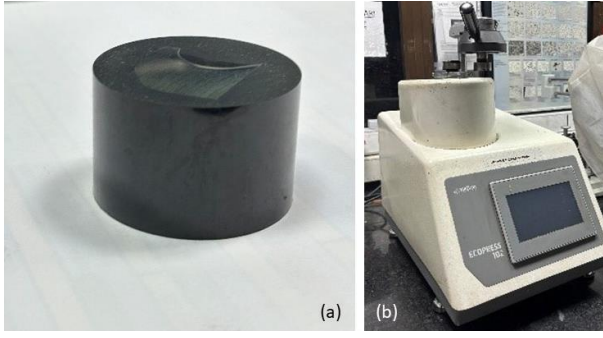
Daha sonra, test boyunca ilk altısı 100, sonuncusu 50 frenleme olacak şekilde, 7 blok şeklinde, toplam 750 frenleme yapılmıştır. Bu frenlemelerde hava basıncı, frenleme torkunun 2800 Nm olmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. 2800 Nm, aracın $1,1 \text{ m/s}^2$ yavaşlama ivmesine ulaşacağı frenleme değeridir. Frenleme başlangıcı için teker hızı 85 km/saat seçilmiş olup, frenleme boyunca hızın sabit kalması için disk, motor ile sürekli olarak tahrik edilmiştir. Bu durum bir aracın yokuş aşağı inerken hızını sabit tutması için kısmi olarak fren yapmasını temsil etmektedir.

Frenlemelerin hepsinde başlangıç sıcaklığı 50°C olarak seçilmiştir. Frenleme esnasında erişilen sıcaklık tepe noktaları veri olarak kaydedilmiştir.

2.3. Numuneleri İncelemek İçin Kullanılan

Metot (Method Used For Examining The Samples)

Testten çıkan numuneler, farklı boyutlarda parçalara bölünerek testere ile kesilmiş ve mikroyapı, çekme deneyi ve sertlik testi numuneleri hazırlanmıştır. Kesilen numunelere ilk önce bakalit ile sıcak kalıplama yapılmıştır. İncelenecek numunelerin boyutlarının küçük olması veya düz bir zeminde duramayacak kadar karmaşık bir şekle sahip olması gibi durumlarda bakalitleme yöntemi kullanılmaktadır [38].



Şekil 7. (a) Bakalitlenmiş numune (b) Numune kalıplama cihazı ((a) Embedded sample (b) Sample molding device)

Numuneler, mikroskopta daha iyi incelenebilmesi amacıyla yüzeyleri 2000 kum zımpara ile parlatılarak düzgün hale getirilmiştir. Metalin tane sınırlarını mikroskopta görünür hale getirebilmek için %2 nital karışımı ile dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri, Nikon MA100 marka optik mikroskop kullanılarak x100 büyütme ile incelenmiştir.

Çekme deneyi için her iki disk parçasından dörder adet numune TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak imal edilmiştir [39]. Çekme testleri için 100 kN kapasiteli hidrolik çekme deney cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümleri BMS 3000-OB Brinell Sertlik Cihazında (Şekil 8) 3000 kg yükte yapılmıştır. Sertlik testi her iki disk numunesinin, farklı bölgeleri temsil edecek şekilde dörder adet numuneye uygulanmıştır.



Şekil 8. BMS 3000-OB Brinell sertlik cihazı (BMS 3000-OB Brinell hardness tester)

2.4. Numune 1'in İncelenmesi Ve Bulgular

(Examination And Results Of Sample 1)

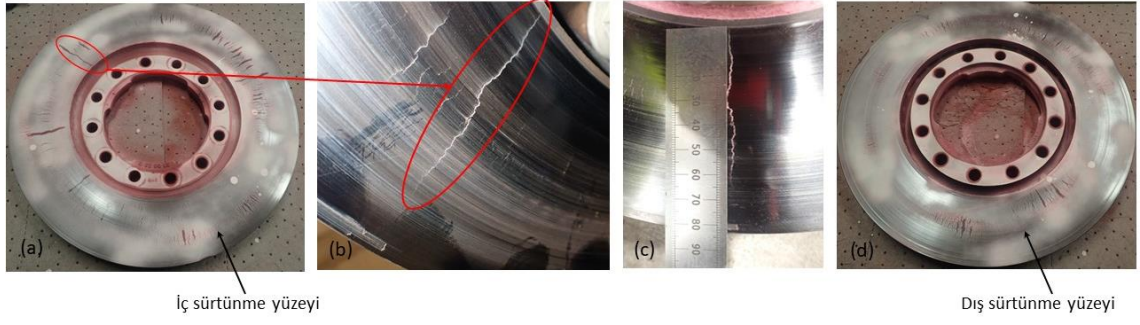
Numune 1'de, atalet dinamometresi testlerinde beklenenden daha erken çatlak oluşumu görülmüş ve çatlakların disk üzerinde hızla ilerlediği gözlemlenmiştir. Şekil 9'da dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi yapılan Numune 1 gösterilmiştir. Disk üzerindeki çatlak oluşumunu tespit edebilmek amacıyla numune, tahribatsız muayene tekniklerinden biri olan penetrant sıvısı testine tabi tutularak incelenmiştir. Yapılan görsel incelemede iki balata sürtünme yüzeyinde de çatlaklar tespit edilmiş olup, iç balata sürtünme yüzeyinde, dış balata sürtünme yüzeyine göre daha yoğun ve uzun çatlaklar görülmüştür. Test sonunda fren diski sürtünme yüzeyi genişliğinin, %75'inden daha kısa çatlak boyları beklenmektedir. Diskin sürtünme yüzeyi genişliği 83 mm'dir. İç balata sürtünme yüzeyinde gözlenen maksimum çatlak uzunluğu yaklaşık 65 mm olarak ölçülmüştür, bu da sürtünme yüzeyinin %78'ine denk gelmektedir. Bu durum, çatlak uzunluğunun kabul edilebilir sınırların üzerinde olduğunu göstermektedir.

Numune 1'den kesilen dörder adet numuneye çekme dayanımı testi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçların, DIN EN 1561 standardında belirtilen değer aralığında olduğu görülmüştür. Aşağıda Tablo 2'de Numune 1'e ait çekme dayanım ve sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

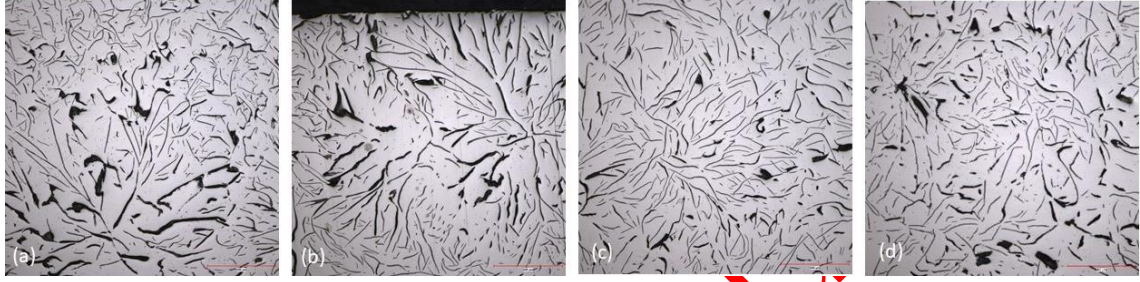
Tablo 2. Numune 1 – Çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları (Sample 1 – Tensile strength and hardness measurement results)

Numune 1	Çekme (MPa)	Sertlik (HB)
1	171,83	204,51
2	169,42	202,94
3	172,25	227,87
4	172,10	229,90

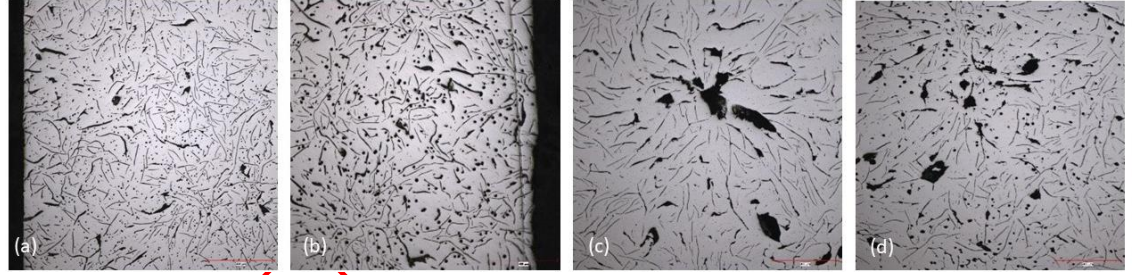
Optik mikroskop ile Numune 1'in mikroyapısı incelenmiştir. Şekil 9'da (a, b), diskin iç ve dış balata sürtünme yüzeylerinden alınan mikroyapı örnekleri gösterilmiştir. Şekil 9 (a) incelendiğinde, numunede ISO 945-1 standardına göre A, C ve D tipi grafit formları görülmüş ve homojen olmayan bir mikroyapı tespit edilmiştir. C ve D tipi grafit formları mikroyapıda istenmeyen özelliklerdir [11,12].



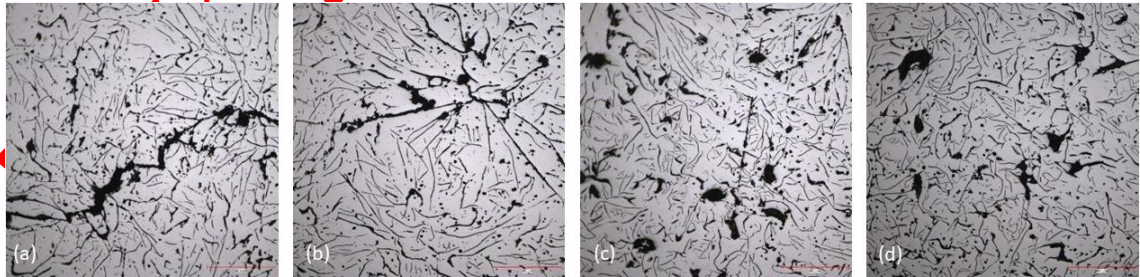
Şekil 9. Numune 1 - Dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi; (a) İç sürtünme yüzeyi, (b) İç sürtünme yüzeyi en büyük çatlak, (c) İç sürtünme yüzeyi çatlak ölçümü, (d) Dış sürtünme yüzeyi (Sample 2 – Crack inspection after dynamometer test; (a) Inner friction surface, (b) Largest crack on inner friction surface, (c) Crack measurement on inner friction surface, (d) Outer friction surface)



Şekil 10. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) İç balata sürtünme yüzeyi, (c, d) Dış balata sürtünme yüzeyi (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Inner pad friction surface, (c, d) Outer pad friction surface)



Şekil 11. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a,b) Gözenekli mikroyapı, (c,d) Gaz boşlukları (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Microstructure porosity, (c, d) Gas porosity)



Şekil 12. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) Azot çatlakları, (c, d) Azot boşlukları (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Nitrogen fissure, (c, d) Nitrogen porosity)

Ayrıca aynı numunenin, Şekil 10 (a) iç balata sürtünme yüzeyinden, Şekil 10 (b) dış balata sürtünme yüzeyine doğru bakıldığında, mikroyapıda belirgin değişiklikler görülmektedir. İç balata sürtünme yüzeyinde, daha kalın ve uzun C tipi grafit lamelleri bulunurken, dış balata sürtünme

yüzeyinde daha ince grafit lamelleri ve daha homojen bir mikroyapı görülmektedir. Bu farklılık, malzemenin homojen olmamasından kaynaklanmaktadır ve numunenin farklı bölgelerindeki farklı mekanik özelliklerin oluşabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, homojen olmayan mikroyapıya ek olarak, numunelerde gözlemlenen gözenekler, gaz boşlukları ve azot boşlukları gibi diğer kusurlar da dikkat çekmektedir.

Şekil 11'de, gaz boşlukları ve gözenekli mikroyapı örnekleri bulunmaktadır. Numune 1'de yoğun miktarda gözenek ve gaz boşluklarının bulunmasının, test sırasında daha fazla çatlak oluşumuna neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bu durum, Linder ve arkadaşlarının çalışmasında (2006), elde ettiği verileri ile benzerlik göstermektedir. Çalışmalarında, porozite miktarı arttıkça yorulma mukavemetinin azaldığını vurgulamışlardır [27].

Şekil 12'de (a, b) mikroyapıda dar, uzun ve rastgele yönlere dağılmış boşluklar, elektron mikroskobu EDS yöntemi ile incelendiğinde, element analizinde %90 azot tespit edilmiş ve bu kusurların azot boşluğu olduğu yorumu yapılmıştır. Azot kusurlarının, genellikle numunenin yüzeyine yakın yerlerde oluştuğu ve işlemeden sonra gözle görülür boyutlarda olduğu bilinmektedir. Azot boşlukları ve çatlakları genellikle yüksek azot içeriğine sahip alaşımlar veya kalıp malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Sertucha ve arkadaşları çalışmasında (2022), azot seviyeleri %0,008'den (80 ppm) yüksek olduğunda bu tür kusurların oluşma riskinin arttığını belirtmektedir [18]. Bu durum, azot içeriğinin çatlak oluşumunda kritik bir faktör olduğunu ve yüksek azot içeriğine sahip numunelerin çatlak oluşumuna daha yatkın olduğunu ortaya koymaktadır.

Numune 1'de görülen mikroyapı kusurları, fren diskinin dinamometre testinde erken çatlak oluşumunun kök nedeni olarak tespit edilmiştir. Bu kusurları önlemek amacıyla, süreç iyileştirmeleri yapılarak Numune 2 imal edilmiştir.

2.5. Süreç İyileştirmeleri Ve Numune 2 Üretimi (Process Improvements And Production Of Sample 2)

Fren diskinin çatlak dayanımını iyileştirmek ve Numune 1'de görülen mikroyapı kusurlarını önlemek amacıyla, besleyici giriş sayısı artırılması, yolluk tasarımı iyileştirmesi ve zirkonlu (Zr) aşılama uygulaması süreç geliştirmeleri yapılmıştır.

Zirkonlu (Zr) aşılama, dökme demirlerde fazla azotu bağlayarak, yapı içerisindeki azot nedenli porozite ve gaz boşluklarını azaltmaktadır. Katılaşma sürecinde grafit lamellerinin büyümesini

kontrol ederek mikroyapıyı iyileştirmekte ve sonuç olarak kırılma tokluğunu ve çatlak dayanımını arttırmaktadır [28, 40].

Besleyici giriş sayısının artırılması ve yolluklarının buna göre tekrar tasarlanması, döküm esnasında metalin kalıp içinde daha dengeli ve homojen bir şekilde dolmasını sağlamakta ve katılaşma sürecinde homojen olmayan mikroyapının oluşumunu önlemektedir. Ayrıca yolluk tasarımı, gözenekliliği ve gaz hapsini azaltmaktadır. Bu sayede, disk yüzeylerinde ısıl iletkenliğin ve mukavemetin eşit olması sağlanarak daha iyi çatlak dayanımı elde edilmektedir [41].

Süreç iyileştirmeleri sonrasında Numune 2 üretilmiş ve Numune 1 ile aynı dinamometre test prosedürlerine tabi tutulmuştur. Dinamometre testinin ardından, Numune 2'den mikroyapı, sertlik ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması için örnek numuneler çıkartılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

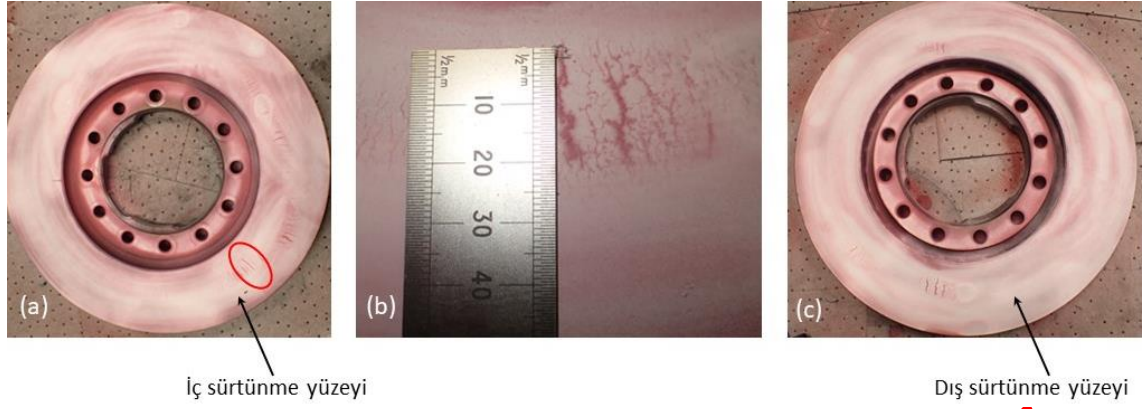
Bu bölümde, ilk aşamada test edilen Numune 1 ve daha sonra iyileştirilmiş süreç ile üretilip test edilen Numune 2'nin, testler sonrası yapılan inceleme bulguları açıklanmıştır.

Süreç iyileştirmesi yapılarak üretilen Numune 2, dinamometre testini tamamladıktan sonra penetrant sıvısı testine tabi tutularak çatlak oluşumları incelenmiştir. Yapılan görsel incelemelerde, Numune 2'nin (Şekil 13) balata sürtünme yüzeylerinde oluşan en büyük çatlak 20 mm, beklenen kesit uzunluğunun %75'inden kısa olarak ölçülmüştür. Çatlakların, iç ve dış balata sürtünme yüzeylerinde dengeli bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Aşağıda Tablo 3'de, Numune 2'ye ait çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 4'te Numune 1 ve 2'ye ait kimyasal analizleri verilmiştir. Numune 1 ve 2 arasında bir fark planlanmamış olup normal döküm prosesi değişkenliğinden kaynaklı farklar olduğu yorumu yapılmıştır.

Şekil 14'de (a, b), Numune 2'nin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Numune 2'de mikroyapı iç balata sürtünme yüzeyinden, dış balata sürtünme yüzeyine doğru incelendiğinde, grafit dağılımının daha homojen olduğu görülmüştür.



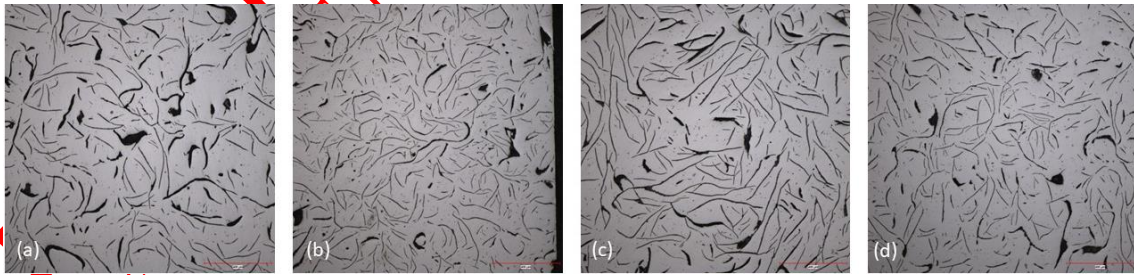
Şekil 13. Numune 2 – Dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi; (a) İç sürtünme yüzeyi, (b) İç sürtünme yüzeyi çatlak ölçümü, (c) Dış sürtünme yüzeyi (Sample 2 – Crack inspection after dynamometer test; (a) Inner friction surface, (b) Crack measurement on inner friction surface, (c) Outer friction surface)

Tablo 3. Numune 2 – Çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları (Sample 2 – Tensile strength and hardness measurement results)

Numune 1	Çekme (MPa)	Sertlik (HB)
1	172,82	209,43
2	169,47	219,78
3	170,81	216,37
4	176,31	233,29

Tablo 4. Numune 1 ve 2 – Kimyasal analiz sonuçları (Sample 2 – Chemical analyses results)

	% C	% S	% Si	% P	% Mn	% Cr	% Cu	% Mn
EN-GJL-150	3,20-3,50	Max 0,11	1,80-2,40	Max 0,20	0,40-0,80	0,15-0,50	0,50-1,00	Max 0,10
Numune 1	3,39	0,06	1,83	0,03	0,53	0,18	0,71	0,001
Numune 2	3,20	0,09	1,80	0,01	0,50	0,18	0,60	0,001



Şekil 14. Numune 2 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) Gözenekli mikroyapı, (c, d) Gaz boşlukları (Sample 2 - Microstructure images; (a, b) Microstructure porosity, (c, d) Gas porosity)

Numunelere ait çekme dayanımları ve sertlik değerleri karşılaştırıldığında, Numune 1 ve Numune 2 arasında kayda değer bir fark görülmemiştir.

Numune 1 ve Numune 2'nin balata sürtünme yüzeylerinden ölçülen çatlak boyutları karşılaştırıldığında, Numune 2'nin yaklaşık %70 daha iyi bir çatlak dayanımı sergilediği tespit edilmiştir. Bu bulgu, süreç iyileştirmelerinin çatlak

oluşumu üzerindeki etkinliğini ve önemini göstermektedir. Öte yandan, Numune 1'de gözlemlenen istenmeyen C ve D tipi grafit formları, malzemenin homojenliğini olumsuz etkileyerek çatlak dayanımını azalttığı görülmüştür. Bu durum, Numune 2'de kullanılan zirkonlu aşının etkisiyle düzeltilmiş, daha homojen bir mikroyapı sağlanarak çatlak oluşumunun önlenmesine katkıda bulunduğu görülmüştür.

Her iki numunede de gözlenen mikro gözenekli yapılar, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Numune 1'de daha fazla ve büyük boyutta görülen gözeneklerin, çatlak oluşumunu teşvik ettiği ve mekanik dayanıklılığı olumsuz etkilediği yorumu yapılmıştır. Numune 2'de gözlenen daha az miktardaki ve küçük boyuttaki gözenekler olmasına karşın süreç iyileştirmeleri sonucunda elde edilen homojen mikroyapı sayesinde çatlak dayanımının arttığı görülmüştür. Bu bulgular, gözenek yoğunluğunun ve boyutunun, malzemenin çatlak dayanımı üzerinde kritik bir faktör olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, gözeneklerin katılaşma sürecinin sonunda oluştuğunu, boyutlarının artmasıyla malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmektedir [16].

Mikroskop ile görsel olarak incelendiğinde, Numune 2'de, Numune 1'e göre daha az azot boşluğu tespit edilmiştir. Bu durum, döküm sürecinde uygulanan zirkonlu aşılamanın, literatürde vurgulanmış azot nedenli boşlukları önleyici etkilerini doğrulamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, zirkonlu aşılamanın döküm sırasında metal içinde azotun gaz halinde kalmasını önleyerek veya azaltarak bu tür boşlukların oluşumunu minimize ettiğini göstermektedir. Zirkon, döküm sırasında metal içinde çözünerek azot ile reaksiyona girmekte ve bu sayede azotun döküm sonrası boşluklar olarak ortaya çıkmasını engellemektedir [28,40]. Literatürde yapılan çalışmalar, zirkon içeren aşılama kullanarak azotu stabilize etmenin, döküm işlemi sırasında oluşabilecek azot boşluklarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için etkin bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır [40].

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular, süreç iyileştirmelerinin Numune 2'nin mikroyapısını iyileştirildiğini ve bu iyileştirmenin çatlak dayanımını belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinde malzeme özelliklerinin fren diski dayanım performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve üretim sürecindeki besleyici ve yolluk tasarımı, aşılama gibi parametrelerin malzeme özelliklerine etkisi vurgulanmıştır.

İlk testte, mevcut süreçlerle elde edilen Numune 1'in beklenenden erken çatladığı gözlemlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri, malzemenin homojen olmadığını ve yoğun miktarda gaz hatası içerdiğini doğrulamıştır. Bu hataların önlenmesi amacıyla aşağıdaki süreç iyileştirmeleri yapılmıştır:

- Besleyici giriş sayısının artırılması
- Yolluk tasarımının iyileştirilmesi
- Zirkonlu aşının kullanılması

Numune 2'de uygulanan süreç iyileştirmeleri sonucunda mikroyapıda;

- C ve D tipi grafitlerde azalma,
- Azot ve diğer gaz boşluklarında azalma,
- Disk üzerinde radyal yönde ve iç-dış balata sürtünme yüzeyleri arasında malzeme homojenliği sağlanmış ve en büyük çatlak uzunluğu 65 mm'den 20mm'ye indirilmiştir.

Bu bulgular, mikroyapının homojenliğinin ve döküm hatalarının fren disklerinin çatlak dayanımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen süreç parametreleri, ağır ticari araçların fren disklerinin üretiminde kullanılacaktır. Böylece, fren disklerinin dayanım performansı artırılarak güvenilirlik sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar sağlanan test imkânlarından dolayı Ege Fren San. Ve Tic. AŞ'ye, numunelerin hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı İstikamet Döküm AŞ'ye teşekkürlerini sunar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zehra ÇINARCIK: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Bora GÜNTAY: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Rashid, Overview of Disc Brakes and Related Phenomena-A Review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10:4 (2014) 257-301.
- [2] G. P. Voller, Analysis of Heat Dissipation from Railway and Automotive Friction Brakes. Doctoral Dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, 2003.
- [3] O. Maluf, M. Angeloni, M. T. Milan, D. Spinelli, W. W. Bose Filho, Development of Materials for Automotive Disc Brakes. *Minerva*, 4:2 (2007) 149-158.
- [4] M. H. Dakhil, A. K. Rai, R. Reedy, A. A. Jabbar, Structural Design and Analysis of Disc Brake in Automobiles. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 4:1 (2014) 95-112.
- [5] İ. C. Güteryüz, Ö. C. Yılmaz, Ağır Hizmet Aracı Bütünleşik Fren Diski ve Poyra Çiftinin Soğuma Süresinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 27:2 (2023) 469-477.
- [6] İ. C. Güteryüz, B. Yılmaz, Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8:4 (2020) 936-947.
- [7] M. C. Pekşen, Gri Dökme Demir Üretiminde Metalürjik Silisyum Karbür Ve Ferro Silis Katkılarının Malzeme Üzerindeki Etkileri.
- [8] M. H. Cho, S. J. Kim, R. H. Basch, J. W. Fash, H. Jang, Tribological Study of Gray Cast Iron with Automotive Brake Linings: The Effect of Rotor Microstructure. *Tribology International*, 36:7 (2003) 537-545.
- [9] G. Le Gigan, M. Ekh, T. Vernersson, R. Lunden, Modelling of Grey Cast Iron for Application to Brake Discs for Heavy Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231:1 (2017) 35-49.
- [10] W. Li, X. Yang, S. Wang, J. Xiao, Q. Hou, Comprehensive Analysis on the Performance and Material of Automobile Brake Discs. *Metals*, 10:3 (2020) 377.
- [11] S. Fidaner, S. Çelik, H. Doğmuş, C. Süzen, A. D. Duran, Genel Dökümcülük Bilgisi. Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, (1979).
- [12] H. Lu, M. Liu, D. Yu, T. Zhou, H. Zhou, P. Zhang, H. Bao, Effects of Different Graphite Types on The Thermal Fatigue Behavior of Bionic Laser-Processed Gray Cast Iron. *Metallurgical and Materials Transactions, A*:49 (2018) 5848-5857.
- [13] J. R. Davis, Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons. ASM Specialty Handbook Cast Irons, (1996) 3-12.
- [14] Microstructure of Cast Irons – Graphite Classification by Visual Analysis. International Organization for Standardization, (2019).
- [15] L. Collini, G. Nicoletto, R. J. M. S. Konečná, Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron. *Materials Science and Engineering: A*, 488:1-2 (2008) 529-539.
- [16] S. Vazehrad, Shrinkage Porosity Characterization in Compacted Cast Iron Components. 2012.
- [17] P. Idodo, S. F. M. Rayan, Reducing Casting Defects in Pure Copper Casting: A Look at the Gating Design of High-Performance Blast Furnace Tuyeres. Jönköping University, (2022).
- [18] J. Sertucha, J. Lacaze, Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons—An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. *Metals*, 12:3 (2022) 504.
- [19] E. F. Ryntz Jr, R. E. Schroeder, W. W. Chaput, W. O. Rassenfoss, The Formation of Blowholes in Nodular Iron Castings (Retroactive Coverage). *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 91 (1983) 161-164.
- [20] S. D. Sun, S. J. He, M. Q. Zhang, X. Ma, Study of Blowholes Formation and Its Prevention in Nodular Iron Castings. *Key Engineering Materials*, 584 (2014): 67-72.
- [21] George M. Goodrich, Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes. *AFS Trans*, 105 (1997) 669-683.
- [22] H. Kambayashi, Y. Kurokawa, H. Ota, Y. Hoshiyama, H. Miyake, Evaluation with Surface Analysis Equipment, Of Casting Defects in Cast Iron Articles. In *Materials Science Forum*, (2007) p. 1110-1115.
- [23] R. T. Patil, V. S. Metri, S. S. Tambore, Causes of Casting Defects with Remedies. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4:11 (2015) 639-644.

- [24] M. Javahery, M. Abbasi, Simulation of Casting Process: Case Study on the Gating and Feeding Design for Outlet Diaphragms of Iron Ore Ball Mill. *Heat and Mass Transfer*, 55 (2019) 1959-1967.
- [25] R. Elliott, *Cast Iron Technology*. Butterworths, 1988.
- [26] Y. Lin, Y. Zhang, N. Zhu, D. Lai, J. Huang, K. Wang, Effect of Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron. *Jom*, 74:3 (2022) 954-962.
- [27] J. Linder, A. Arvidsson, J. Kron, The Influence of Porosity on the Fatigue Strength of High-Pressure Die Cast Aluminium. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29:5 (2006) 357-363.
- [28] M. S. Soiński, P. Jędrecki, K. Grzesiak, Inoculation of Grey Cast Iron with Master Alloys Containing Strontium and Zirconium. *Archives of Foundry Engineering*, 11:3 spec (2011) 195-198.
- [29] J. Yamabe, M. Takagi, T. Matsui, T. Kimura, M. Sasaki, Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength. *JSAE review*, 23:1(2002) 105-112.
- [30] L. C. Kumruoğlu, Lamel Grafitli ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerinin Mekanik Özellikler ve Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi. Master's Thesis, Sakarya Üniversitesi, 2003.
- [31] H. R. Abbasi, M. Bazdar, A. Halvae. Effect of Phosphorus as an Alloying Element on Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron. *Materials Science and Engineering: A*, 444:1-2 (2007) 314-317.
- [32] C. Khuntrakoon, S. Janudom, P. Muangjunburee, N. Mahathaninwong, T. Chuchee, T. Chotikarn, A. Yodjan, Effects of Chemical Composition on Microstructure and Properties of High Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoe. *International Journal of Metalcasting*, 16:3 (2022) 1221-1234.
- [33] Y. S. Chung, I. B. Kim, I. M. Park, Influence of Sulfur on the Inoculation Effect of Gray Cast Iron. *Journal of Korea Foundry Society*, 9:3 (1989) 221-227
- [34] R. Gundlach, M. Meyer, L. Winardi, Influence of Mn and S on the Properties of Cast Iron Part III—Testing and Analysis. *International Journal of Metalcasting*, 9 (2015) 69–82.
- [35] Grey cast irons (DIN EN 1561:1997-08). Standards Germany, (1997).
- [36] G. P. Voller, Analysis of Heat Dissipation from Railway and Automotive Friction Brakes. Doctoral Dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, (2003).
- [37] Link, Model 6900 Ticari Araç Fren Dinamometresi, <https://www.linkeng.com/>
- [38] A. Saydan, H. Gürün, A. Gültaş, O. Çavuşoğlu, Kalıplama Parametrelerinin Bakalit Malzemenin Darbe Dayanımına Etkisinin İncelenmesi. 1. Uluslararası Plastik ve Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, (2013).
- [39] Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009).
- [40] R. L. Naro, Porosity Defects in Iron Castings from Mold-Metal Interface Reactions. *AFS Transactions*, 107 (1999) 839-851.
- [41] S. L. Nimbalkar, R. S. Dalu, Design Optimization of Gating and Feeding System through Simulation Technique for Sand Casting of Wear Plate. *Perspectives in Science*, 8 (2016) 39-42.