AŞILAMA TÜRÜ, MİKTARI VE KESİT KALINLIĞININ EN–GJS–600-3 (GGG60) KALİTE KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Şeyma AYHAN[1], Mehmet YILDIRIM[2], Hüseyin GÜMÜŞ[1], Murat DİLMEÇ[3]

[1]Mesa Makina Döküm Gıda Sanayi ve Ticaret A.Ş., Konya, Turkey

[2]Konya Teknik Üniversitesi, Müh.ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, Turkey

[3]Necmettin Erbakan Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Turkey

[1]seyma@mesamakina.com.tr, myildirim@ktun.edu.tr, huseyin.gumus@mesamakina.com.tr, muratdilmec@erbakan.edu.tr,

ÖZET

Bu çalışmada EN-GJS-600-3 (GGG60) kalite küresel grafitli (sfero) dökme demirlerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerine aşılayıcı türü ve miktarının etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında Ba-esaslı ve Ca-Si esaslı olmak üzere iki farklı aşılayıcı kullanılmıştır. Ca-Si esaslı aşı iki farklı oranda ilave edilmiştir: (i) %0,2 Ba-esaslı, (ii) %0,2 Ca-Si esaslı ve (iii) %0,1 Ca-Si esaslı aşılayıcı. 5, 15, 25, 35 ve 50 mm kalınlığa sahip basamak kalıp şeklindeki parçalar geleneksel kum kalıba döküm tekniği ile üretilmiştir. Üç farklı durum için parçaların mikroyapıları optik mikroskop ve görüntü yazılımı kullanılarak, mekanik özellikleri ise Brinell sertlik ve çekme testleri kullanılarak belirlenmiştir. Her üç durum için de EN-1563 standardında belirtilen değerlerden daha yüksek dayanım ve uzama değerleri elde edilmiştir. Parçaların mikroyapıları kıyaslandığında benzer mikroyapısal özellikler gösterdiği belirlenmiş olup %0,1 Ca-Si aşılama yapılmış parçanın nispeten daha fazla perlit fazı (% 10-15 arası, diğer parçalarda % 5 civarı) içerdiği görülmüştür. Perlit fazındaki artış % 0,1 Ca-Si aşılanmış parçalara kıyasla biraz daha yüksek Brinell sertlik değerlerine sahip olmasını sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Küresel grafitli dökme demir, aşılama, mikroyapı, mekanik özellik

EFFECT OF INOCULANT TYPE, AMOUNT AND SECTION THICKNESS ON MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EN–GJS–600-3 (GGG60) DUCTILE CAST IRON

ABSTRACT

In this study, the effect of inoculant type and amount on the microstructural and mechanical properties of EN-GJS-600-3 (GGG60) grade ductile cast irons was investigated. Two different inoculants were used: Ba-based and Ca-Si-based. The Ca-Si-based inoculant was added in two different amounts: (i) 0.2% Ba-based, (ii) 0.2% Ca-Si-based, and (iii) 0.1% Ca-Si-based. Step-shaped parts with thicknesses of 5, 15, 25, 35, and 50 mm were produced using the conventional sand mold casting technique. The microstructures of the parts were examined using an optical microscope and image analysis software, while their mechanical properties were determined by Brinell hardness and tensile tests. For all three conditions, higher strength and elongation values than those specified in the EN-1563 standard were obtained. When comparing the microstructures of the parts, it was determined that they exhibited similar microstructural characteristics; however, the part inoculated with 0.1% Ca-Si contained relatively more pearlite phase (around 10–15%, compared to around 5% in the other parts). The increase in pearlite phase resulted in slightly higher Brinell hardness values for the part inoculated with 0.1% Ca-Si compared to the others.

Keywords: Ductile cast iron, inoculation, microstructure, mechanical properties

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demir (KGDD), ergimiş demire döküm öncesinde çok az miktarda magnezyum, seryum gibi küreleştirici elementlerin eklenmesiyle elde edilir. Bu işlem, karbonun yapı içerisinde grafit küreleri şeklinde çökelmesini sağlayarak malzemenin mikro yapısını belirler. KGDD'ler, gri dökme demirlerin düşük ergime sıcaklığı, iyi akışkanlık ve yüksek işlenebilirlik gibi temel avantajlarını korurken, aynı zamanda çeliğe özgü yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri de sunar. Bu özellikler sayesinde, dökme demirler arasında en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir [1,2]. Dökümle şekillendirilen malzemelerde ürünün iç yapısı ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri üzerinde katılaşma süreci büyük bir etkiye sahiptir. İnce taneli ve homojen grafit yapılar, üstün mekanik performansları nedeniyle tercih edilen bir iç yapı türüdür. Küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemelerde katılaşma sırasında uygulanan küreleştirme ve aşılama işlemleri, istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesinde kritik rol oynar.

Küreleştirme işlemi, dökme demir içerisinde küresel grafit yapılarının oluşmasını sağlamak amacıyla en yaygın olarak magnezyum (Mg) ile gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra kalsiyum (Ca), seryum (Ce) gibi bazı diğer toprak metalleri de bu amaçla sıvı metale eklenebilir. Küreleştirme işleminde ilave edilmesi gereken alaşım elementlerinin miktarı, esas olarak dökme demirin bileşimindeki kükürt ve oksijen oranlarına bağlıdır. Sıvı metale eklenen elementlerin reaksiyon şiddetini azaltmak ve en uygun metalurjik koşulları sağlamak amacıyla bu elementler, buharlaşmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmış özel potalarda, diğer elementlerle alaşımlandırılarak işleme alınır. Nihai alaşımda kalıcı magnezyum miktarı % 0,04 ile % 0,05 aralığında olmalıdır [3, 4, 5]. Küresel grafitli dökme demir (KGDD) üretiminde magnezyumla yapılan küreleştirme işleminin etkinliği, başta oksidasyon sonucu magnezyumun yanması olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak zamanla azalabilir. Bu etkinin kaybı, dökümde oluşan hücre sayısının azalmasına ve grafit şeklinin bozulmasına yol açar [6].

Döküm prosesinde aşılama işlemi, özellikle gri dökme demir ve sfero dökme demir üretiminde kullanılan kritik bir işlemdir ve bu işlem, ergimiş metale küçük miktarlarda özel alaşım elementlerinin veya bileşiklerin ilave edilmesiyle gerçekleştirilir. Aşılamanın ana amacı, katılaşma sırasında metalin mikro yapısını kontrol altına alarak daha iyi mekanik ve fiziksel özellikler elde edilmesini sağlamaktır. Aşılayıcı türü ve yöntemi, dökümün mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve nihai ürün kalitesine doğrudan eder. Döküm prosesinde aşılayıcı miktarı, özellikle grafit oluşumu, mekanik özellikler ve mikroyapı üzerinde oldukça öneme sahiptir. Aşılayıcı miktarının az veya çok olması da döküm hatası veya istenmeyen özellikte malzemeye sebebiyet verir. Aşılayıcının tane boyutu, uygulama sırasında eklenecek sıvı metalin miktarı, sıcaklığı ve üretilecek parçanın geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Aşılayıcı malzeme, sıvı metal içinde hızla çözünmeli ancak aynı zamanda çabuk okside olmamalıdır. Tane boyutu seçilirken bu kriterler mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [7-9]. Temel olarak, aşılayıcı malzeme sıvı metale mümkün olduğunca geç bir aşamada eklenmelidir. Aşılama işleminden hemen sonra döküm yapılmalı; ısı ve zaman kaybı yaşanmamalıdır. Aksi takdirde, aşılayıcının etkisi azalır, bu da küresel grafit yapılarında bozulmalara ve küre sayısında azalmaya yol açar [10].

Aşılama uygulamasının kontrolü çok önemlidir ve tatmin edici ve tutarlı sonuçlar elde etmek için doğru teknik kullanılmalıdır. Aşılayıcılar, düzgün ve tam bir çözelti elde etmek için erimiş demirle iyi karıştırılmalıdır. İyi bir karışım, kepçeden kepçeye aktarılarak elde edilebilir. Doldurmaya başlamadan önce aşılayıcıyı kepçenin dibine yerleştirme uygulaması önerilmez [11]. Aşılama yönteminin seçimini etkileyen faktörler şunlardır [12]:

- 1. Kepçenin doldurulmasından son dökümün dökülmesine kadar geçen süre.
- 2. Metal sıcaklığı.
- 3. Aşılayıcıyı işlemin belirli bir noktasında eklenebilmesi.
- 4. Döküm sisteminin geç akış aşılamasına uygunluğu.

Aşılayıcılar genellikle döküm prosedürü sırasında dört aşamadan birinde veya daha fazlasında dökme demirlere eklenir. Farklı boyut ve bileşimdeki tabletler mevcuttur ve özellikle solma süresi uzun olduğunda, yalnızca geç metal akışı işlemi mümkün olmadığında ikincil aşılama görevi görerek değerli olduklarını kanıtlarlar. Tableti bir kalıba eklemede insan hatası olasılığı, genellikle tabletlerin tek aşı maddesi olarak kullanıldığı birkaç durumda, yüksek derecede döküm sonrası inceleme gerektirir [12].

Aşılamadan sonra uzun tutma süreleri kaçınılmazsa, aşılama ek, küçük bir ilaveyle tamamlanabilir. Alternatif olarak, bir tür geç aşılama düşünülebilir. Geç metal akışı aşılaması solmayı neredeyse ortadan kaldırır. Metal kepçeden çıktıktan ve kalıba veya kalıbın içine girdikten sonra uygulanan bir aşılama yöntemine geç aşılama denir. Doğru şekilde uygulanan geç aşılamalar, bir aşılama ilavesinden elde edilebilecek maksimum etkiyi verir, böylece

çok daha yüksek aşılama seviyeleri ve dolayısıyla tek başına kepçe aşılamasından çok daha düşük soğuma eğilimleri üretir. Geç aşılama, kepçede yeterli aşılamanın elde edilmesi ve sürdürülmesinin imkansız olduğu durumlarda kullanılmalıdır. Geç aşılama, her döküm için uygun bir işlem oluşturmak için ayrı, kapsamlı denemeler gerektirir ve oluşturulduğunda, zorluklardan kaçınmak için işlem kesinlikle takip edilmelidir. Geç aşılama, ek bir etki elde etmek için kepçe aşılamasına ek olarak kullanılabilir, ancak başarılı olacağından emin olmak için önce ön denemeler yapılmalıdır [12].

Bahubali ve ark. [13], değişen miktarlarda aşı maddesiyle (ağırlıkça %2-4) sünek demir üzerindeki çalışmalarında, nodül sayısını iyileştiren aşılama uygulamasının genellikle nodülariteyi artırdığı ve böylece toklukta artış sağladığı sonucuna vardı. Borsato ve ark. [14], kalıp içi aşılama için kullanılan aşılayıcıların kimyasal bileşiminin nodül sayısını, büzülme gözenekliliğini ve dolayısıyla ağır kesitli sünek demirin yorulma davranışını güçlü bir şekilde etkilediğini gözlemledi. Aşılama işleminin grafit çökeltilerinin sayısı, boyutu ve kısmen biçimi üzerindeki yukarıda belirtilen etkilerine ve bu parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki karşılık gelen etkisine dayanarak, aşılama işlemi hala araştırılmaya değerdir [15]. Bu nedenle bu çalışmada, aşılayıcı türü ve miktarı (%0,2 Ba-esaslı, %0,2 Ca-Si esaslı ve %0,1 Ca-Si esaslı) ile kesit kalınlığının (5, 15, 25, 35 ve 50 mm) EN-GJS-600-3 (GGG60) kalite küresel grafitli (sfero) dökme demirlerin mikroyapısal (küresellik, küre sayısı, ferrit/perlit oranı vb.) ve mekanik özelliklerine (sertlik, uzama akma ve çekme dayanımı) etkisi araştırılmıştır.

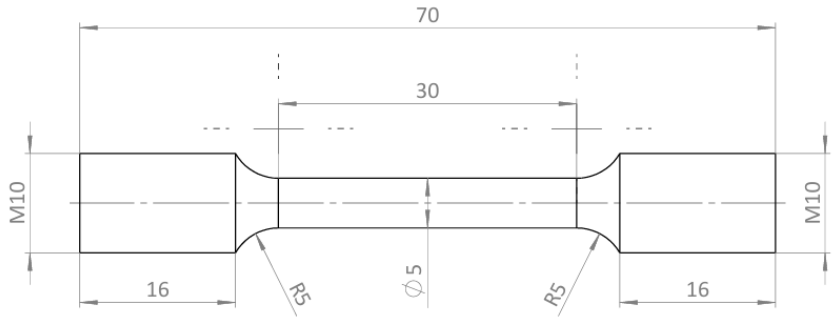
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. EN-GJS-600-3 (GGG-60) kalite küresel grafitli dökme demir üretimi

GGG-60 (EN-GJS-600-3) küresel grafitli dökme demir, Mesa Makine bünyesinde 1500 kg kapasiteli orta frekanslı indüksiyon fırını kullanılarak üretilmiştir. Çelik hurdaları, pik demir, ferro-karbon, silisyum-karbür, dökümhane hurdaları (besleyici ve yolluk) ve kalay (perlit oluşturucu olarak) hammadde olarak kullanılmıştır. Küreselleştirme işlemi için yaklaşık %1,3 FeSiMg kullanılmıştır. Aşılama işlemi iki farklı aşılayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (i) %0,2 Ba-esaslı, (ii) %0,2 Ca-Si esaslı ve (iii) %0,1 Ca-Si esaslı aşılayıcı. Aşılayıcıların parçacık boyutu 2–10 mm arasındadır. Daha sonra sıvı metal, basamak kalıp şeklinde (Şekil 1) kum kalıplara dökülmüştür. Basamak kalıpların kesit kalınlıkları sırasıyla 5, 15, 25, 35 ve 50 mm'dir. Son olarak, parçalara besleyicilerin ve yollukların çıkarılması ve temiz bir yüzey elde etmek için kumlama ve taşlama uygulanmıştır.

2.2 Karakterizasyon

Numunelerin kimyasal bileşimleri Oxford Foundry Master model optik emisyon spektrometresi (OES) kullanılarak analiz edilmiştir. Numunelerin mikro yapısal incelemesi Nikon Eclipse MA 100 model invertör tipi optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro yapısal incelemeden önce numuneler standart metalografik numune hazırlama teknikleri kullanılarak hazırlanmıştır. İlk olarak, disk şeklindeki numuneler (40 mm çap ve 10 mm yükseklik) aşındırıcı bir kesici kullanılarak kesilmiş, daha sonra numuneler SiC zımpara kağıtları (180 ila 1200 grit arasında) kullanılarak mekanik olarak zımparalanmış, 1 µm alümina süspansiyonu ile parlatılmıştır. Son olarak %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Ayrıca, küresellik, küre sayısı, küre boyutu, küre dağılımı, grafit miktarı ve ferrit/perlit oranı gibi dökme demirlerin temel mikro yapısal parametreleri görüntü analiz yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Çekme testi numunesi geometri ve boyutları

Brinell sertlik ölçümleri, 3 ton yük altında parlatılmış yüzeylerde Bulut Makina BMS 3000-OB model Brinell sertlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin çekme testleri, 8 mm/dakika deformasyon oranına

sahip ALSA KTM 600 Model (60 ton/600 kN) hidrolik üniversal çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ile akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri belirlenmiştir. Çekme numuneleri Şekil .1'de verilen geometri ve boyutlarda Mesa Makina talaşlı imalat bölümü tarafından hazırlanmıştır. Çekme numunesi boyutundan dolayı 5 mm kalınlığa sahip kesitlerde çekme testi uygulanmamış, diğer 15, 25, 35 ve 50 mm kalınlığa sahip kesitlerde uygulanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Mikroyapısal özellikler

EN-GJS-600-3 kalite sfero dökme demirin optik emisyon spektroskopisi (OES) kullanılarak ölçülen kimyasal bileşimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Perlit yapıcı olarak Sn kullanılmıştır. Cr, Mo, V, W ve benzeri kuvvetli karbür yapıcı elementler eser miktarda ilave edilmiştir.

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
1	93,1	3,61	2,76	0,210	0,0202	0,0136	0,0480	0,0067	< 0,0010	0,0152
2	93,0	3,61	2,76	0,227	0,0206	0,0167	0,0552	0,0117	0,0072	0,0206
Ort	93,1	3,61	2,76	0,219	0,0204	0,0152	0,0516	0,0092	0,0041	0,0179

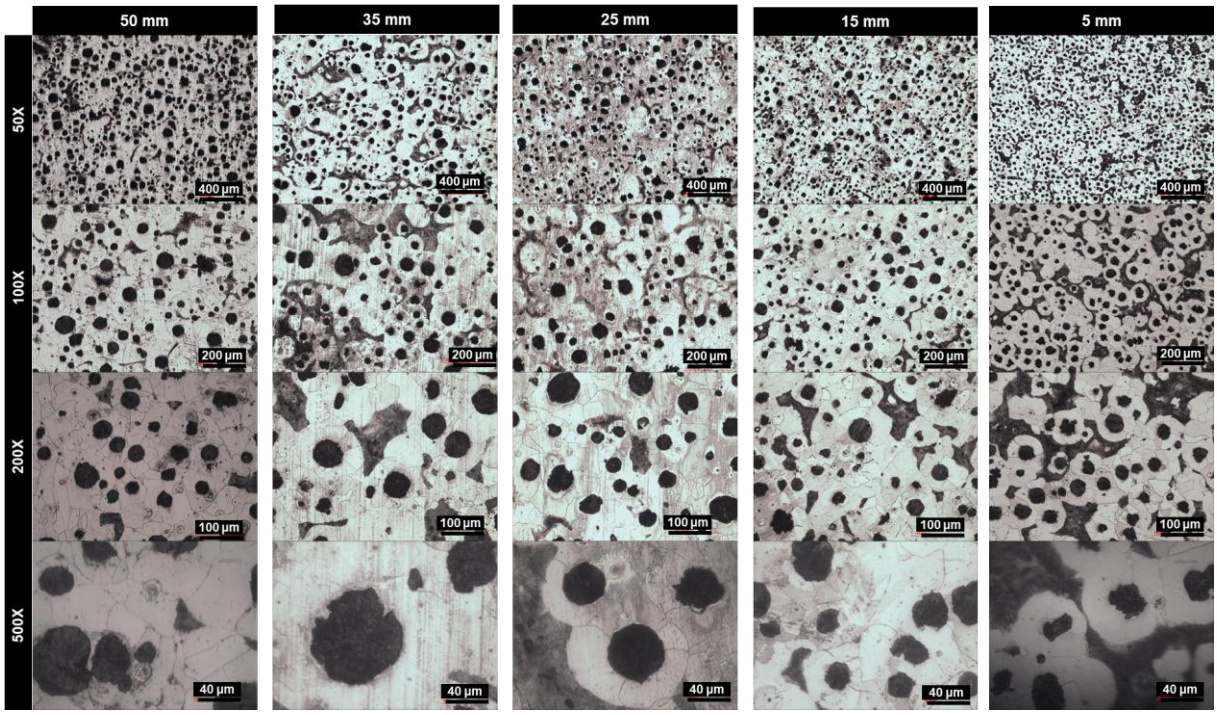
	Co	Cu	Mg	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B
1	0,0064	0,0913	0,0590	0,0027	0,0079	0,0065	< 0,0040	< 0,0010	0,0144	0,0026
2	0,0059	0,0961	0,0692	0,0050	0,0095	0,0081	< 0,0040	< 0,0010	0,0147	0,0025
Ort	0,0061	0,0937	0,0641	0,0038	0,0087	0,0073	0,0040	0,0010	0,0145	0,0026

	Ca	Ce	Zr	Zn	Bi	As	Se	Te	Sb	La
1	0,0037	0,0080	0,0054	0,0061	< 0,0010	0,0018	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	0,0037
2	0,0047	0,0056	0,0090	0,0065	< 0,0010	0,0015	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	0,0050
Ort	0,0042	0,0068	0,0072	0,0063	0,0010	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010	0,0043

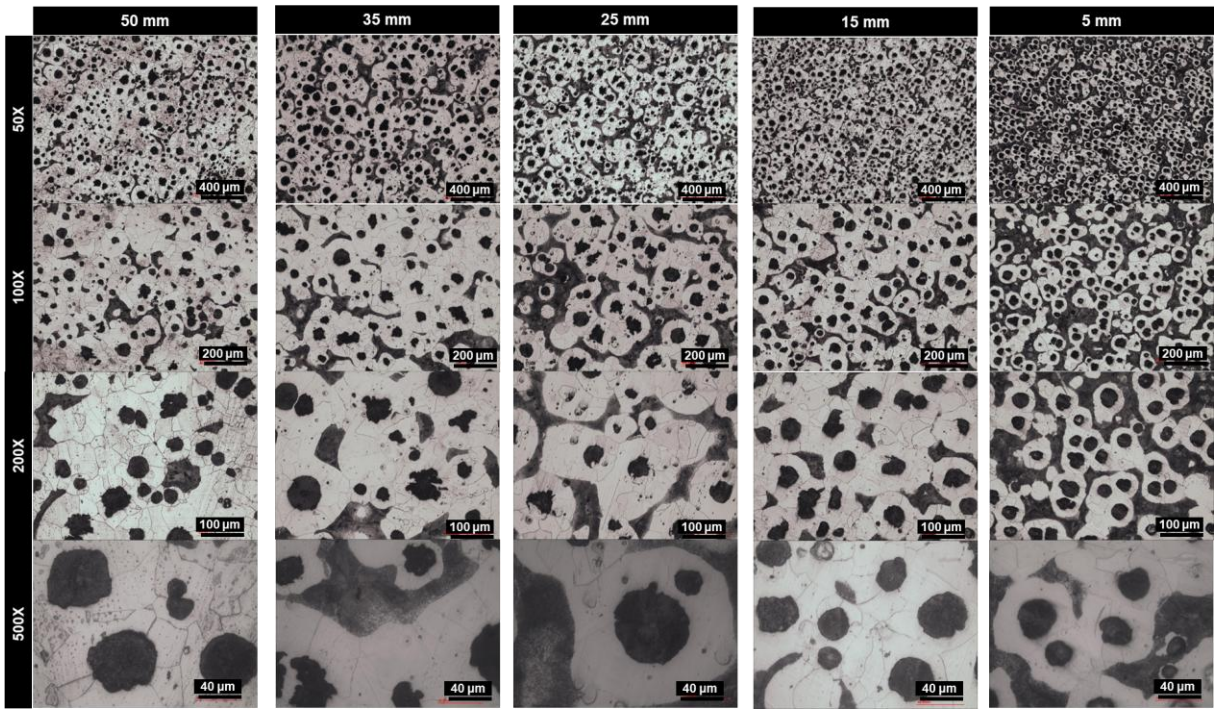
Şekil .1 Çalışma kapsamında incelenen numunelerin kimyasal bileşimi

Çalışma kapsamında incelenen numunelere ait optik mikroyapı fotoğrafları Şekiller 3-5'te gösterilmiştir. İncelenen tüm numuneleri mikro yapıları 3 fazdan meydana gelmektedir: Ferrit (açık renkli), perlit (koyu renkli) ve küresel grafitler. İncelenen tüm numunelerin iç yapılarında dökümden, küreselleştirme işleminden veya katılaşmadan kaynaklı çekinti, gaz boşluğu, patlak grafit, bodur grafit, dross, karbon yüzmesi ve lamelleşme gibi hatalar bulunmamaktadır. Kullanılan aşı türüne ve miktarına bağlı mikroyapısal özellikler incelendiğinde her üç durumda da küre sayısı, küresellik, küre boyut dağılımı gibi özelliklerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları detaylı incelendiğinde %0,1 CaSi aşılama yapılan numunelerde perlit fazı miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

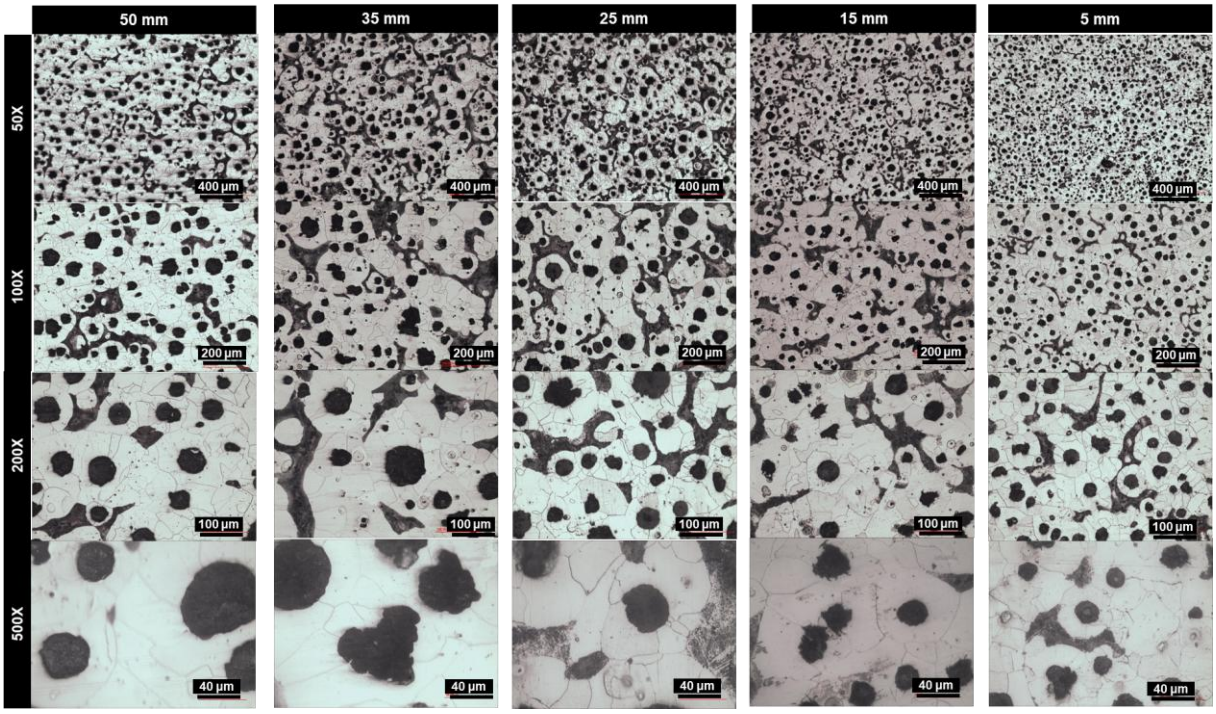
Numunelerin kesit kalınlığına bağlı mikroyapı değişimleri incelendiğinde kesit inceldikçe perlit faz miktarının arttığı ve ferrit faz miktarının arttığı gözlemlenmiştir. En ince kesit kalınlığına (5 mm) sahip numuneler diğer kesit kalınlığına sahip numunelere kıyasla daha fazla miktarda perlit fazı içermektedir. dökümcülükte iyi bilindiği üzere dökme demirlerin mikroyapısında bulunan sert perlit fazı miktarı 2 önemli faktöre bağlıdır: (i) kimyasal bileşimde bulunan Cu ve Sn gibi perlit yapıcıların varlığı ve (ii) perlitin soğuma morfolojisi olması. Perlit fazı soğuma hızına bağlı olduğu için soğuma hızının yüksek olduğu ince kesitlerde daha fazla miktarda ve daha ince yapıda bulunmaktadır. 5 ve 15 mm kalınlığa sahip en ince kesitler haricindeki kesitlerde (25, 35 ve 50 mm) mikroyapının neredeyse homojen olduğu yeni nesil sünek dökme demirler gibi kesitten bağımsız olduğu görülmektedir. %0,2 Ba ve % 0,2 CaSi aşılanmış numunelerin 25, 35 ve 50 mm kalınlığa sahip kesitlerinde perlit oranı % 5 civarı iken, % 0,1 CaSi aşılanmış numunelerde perlit oranı % 10-15 arasındadır.



Şekil 3. %0,2 Ba-esaslı aşılama yapılmış EN-GJS-600-3 kalite sfero dökme demirin 50X, 100X, 200X ve 500X büyütme optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 4. %0,1 Ca-Si esaslı aşılama yapılmış EN-GJS-600-3 kalite sfero dökme demirin 50X, 100X, 200X ve 500X büyütme optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 5. %0,2 Ca-Si esaslı aşılama yapılmış EN-GJS-600-3 kalite sfero dökme demirin 50X, 100X, 200X ve 500X büyütme optik mikroyapı fotoğrafları.

Çalışma kapsamında numunelerin mekanik özellikleri Brinell sertlik testleri ve oda sıcaklığında çekme deneyleri ile belirlenmiş olup elde edilen sonuçlar Çizelgeler 1-4'te listelenmiştir. Öncelikli olarak tüm incelenen numunelerin mekanik özellikleri EN 1563 dökme demirler standardında EN-GJS-600-3 (GGG60) kalite sfero dökme demir için verilen mekanik özelliklerden daha üstündür. EN 1563 standardında EN–GJS–600-3 kalite sfero dökme demir için minimum % uzama, akma ve çekme dayanım değerleri sırasıyla % 3, 370 MPa ve 600 MPa'dır. Standarttaki veriler ile kıyaslandığında yapılan çalışmada elde edilen akma dayanımı %10-15, çekme dayanımı % 10-15 ve % uzama değerleri de en az 2,5 kat artış göstermiştir. Her üç aşılama yöntemi için de numuneler genelde benzer sertlik değerleri sergilemiştir. %0,1 Ca-Si aşılama yapılmış numunenin sertlik değerleri (Çizelge 1) diğer iki aşılama yapılmış numunelerin sertlik değerlerine göre bir miktar fazladır. Benzer eğilim çekme dayanımları (Çizelge 2) için de geçerlidir. %0,1 Ca-Si ile aşılama yapılmış numunelerin daha üstün mekanik özellik göstermesinin sebebi diğer numunelere göre mikroyapılarında daha fazla oranda perlit fazı içermesidir. Sert ve kırılgan faz olarak bilinen perlit fazı çelik ve dökme demirlerde mekanik özellikleri kontrol eden önemli bir fazdır. Öte yandan incelenen numunelerin akma dayanımları neredeyse aşı türü ve miktarına bağlı değildir.
Çalışma kapsamında incelenen diğer bir önemli parametre kesit kalınlığına bağlı değişen mekanik özelliklerdir. normalde beklenen parça inceldikçe sertlik ve dayanım değerlerinin azalması, % uzama değerlerinin artmasıdır. incelenen numunelerin özellikle sertlik, akma ve çekme dayanımları kesit kalınlığından bağımsız değerler sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar aslında SSF olarak adlandırılan katı çözelti sertleşmesi ile güçlendirilmiş ferritik matrise sahip yeni nesil sünek dökme demirlerin verilerine çok benzemektedir. Bilindiği üzere SSF'lerde perlit miktarı %5'in altında ve mikroyapı ile mekanik özellikler neredeyse kesit kalınlığından bağımsızdır. Elde edilen veriler bu sonucu çoğunlukla desteklemektedir. Sadece 15 mm kalınlığa sahip numunelerde perlit oranı nispeten fazla olduğu için uzama değerleri diğer kesit kalınlıklarına kıyasla oldukça düşüktür.

Çizelge 1. Farklı aşılama uygulanmış EN-GJS–600-3 numunelerinin kesit kalınlığına bağlı sertlik değerleri

Aşı tipi	**50 mm**	**35 mm**	**25 mm**	**15 mm**
%0,2 Ba	149,7	152,3	156,8	147,2
%0,1 Ca-Si	154,6	154,3	157,9	153,7
%0,2 Ca-Si	157,9	149,1	152,8	150,3

Çizelge 2. Farklı aşılama uygulanmış EN-GJS–600-3 numunelerinin kesit kalınlığına bağlı çekme dayanımı değerleri

Aşı tipi	Çekme dayanımı (MPa)			
	50 mm	**35 mm**	**25 mm**	**15 mm**
%0,2 Ba	650,6	678,8	651,8	711,6
%0,1 Ca-Si	709,1	681,1	681,2	684,4
%0,2 Ca-Si	658,7	655,5	716,2	673,3

Çizelge 3. Farklı aşılama uygulanmış EN-GJS–600-3 numunelerinin kesit kalınlığına bağlı akma dayanımı değerleri

Aşı tipi	Akma dayanımı (MPa)			
	50 mm	**35 mm**	**25 mm**	**15 mm**
%0,2 Ba	414,2	406,3	407,4	393,3
%0,1 Ca-Si	403	417,5	397,2	400,6
%0,2 Ca-Si	400,1	399,3	401,6	401,8

Çizelge 4. Farklı aşılama uygulanmış EN-GJS–600-3 numunelerinin kesit kalınlığına bağlı % uzama değerleri

Aşı tipi	% Uzama			
	50 mm	**35 mm**	**25 mm**	**15 mm**
%0,2 Ba	12,7	13,6	11	6
%0,1 Ca-Si	13,6	15,3	12,6	12,6
%0,2 Ca-Si	17,6	15,2	16,4	11,2

4. SONUÇ

- Her üç aşılama ile de benzer mikroyapılara sahip döküm hatası içermeyen parçalar başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Her üç aşılama yöntemi ile dökülen parçaların EN 1563 standardında belirtilen mekanik değerlerden oldukça üstündür.
- Her üç aşılama yöntemi için benzer mekanik özelliklere sahip parçalar üretilse de %0,1 Ca-Si ile aşılanmış parçaların mekanik özellikleri diğer iki aşılama yöntemi ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinden daha üstündür.
- Kesit kalınlığına göre sertlik ile akma ve çekme dayanımlarında artış veya azalma eğilimi gözlemlenmese de ince kesitlerin uzama değerleri her üç koşul için de en az olandır.

Kaynaklar

[1] STEFANESCU, D.M., "ASM Handbook Metals Handbook, Vol.15, Casting", ASM International, Metals Park, pp. 296-307, Ohio, 1988.

[2] FREDRIKSSON H., STJERNDAHL A., TINOCO J., "On the Solidification of Nodular Cast Iron and its Relation to the Expansion and Contraction", Materials Science and Engineering, A 413–414, 363-372, 2005.

[3] OLSEN, S.O., HARTUNG, C., "Recovery of Mg in a Ductile Iron Process", Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway, 2003.

[4] ECOB, C.M., HARTUNG, C., "An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons", ASA, Eklem , Norway, 2004.

[5] Erdal KARADENİZ, Murat ÇOLAK, Fadıl BARUTÇU, "GGG-60 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Aşılayıcı Türü ve Miktarının İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 6, Sayı 1, 2017, 275-282.

[6] METALS HANDBOOK, "Nondestructive Evaluation and QUALİTY CONTROL", Sintercast Yayını, 231-236, 2006.

[7] DAWSON, S., HOLLINGER, I., ROBBINS, M., DAETH, J., REUTER, U., SCHULTZ, H., "The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron", Society of Automotive Engineers, Inc., 2001.

[8] Abdullah AYDOĞUŞ, Mustafa ACARER, Memduh KARA, "Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılayıcıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi", Selçuk-Teknik Dergisi, Cilt 18, Sayı: 3 - 2019.

[9] WEBSTER, P.D., "Fundamentals of Foundry Technology", First Published, Portcullis Press Ltd., s:246 - 252, 1980.

[10] SKALAND, T., "Nucleation Mechanisms in Ductile Iron", Elkem foundry products, Kristiansand, Norway, 2005.

[11] T. Skaland, "A New Approach to Ductile Iron Inoculation", AFS Transactions, 2001.

[12] Iulian Riposan et.al, "Role of Al, Ti, and Zr in Gray Iron Preconditioning/Inoculation", Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 18(1) February 2009 - 83.

[13] Sangame B B, and Shinde V D, IOSR-JMCE 5 (2013)17. 10. Tartaglia J M, and Gundlach R B, Int J Metalcast 8 (2014) 7.

[14] Borsato T, Berto F, Ferro P, and Carollo C, Proc Struct Integ 2 (2016) 3150.

[15] Çekici M, Yıldırım M, "Combined Effect of Inoculant Type and Section Thickness on the Microstructural and Mechanical Properties of EN-GJS-600-3 Grade Ductile Cast Iron", Konya Journal of Engineering Sciences, Vol.3(3), 2025.