



## Dökme Demirlerin Aşılması

W. MASCHKE, M. JONULEIT

Dökme Demirlere aşılama ilavesi tavsiye edilen, hatta istenilen kalitede döküm parça üretimi için gerekli bir uygulamadır. Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri mikro yapıları ile direkt olarak ilişkilidir. Hem mekanik özellikler hemde mikro yapı önemli ölçüde aşılama mekanizmasından etkilenir. Bu nedenle, dökme demirlerin katılaşma süresince aşılama mekanizması ve grafit oluşumu bu makalede detaylı olarak incelenecektir.

### Dökme demirin aşılması ne anlama gelmektedir?

“Dökme demirlerin aşılması” sıvı metale çekirdek ilave edilerek, katılaşma mekanizmasını ve mikroyapısını istenilen özellikleri elde edebilmek için etkilemek anlamına gelmektedir. Çekirdekler  $\leq 4 \mu\text{m}$  boyutunda, grafit presipitasyonu için kristalleşme merkezleri işlevini gören ince parçacıklardır.

Literatürde aşılama teorisi hakkında bir çok makale mevcuttur. Bu makalede yayınlanmış teorilere tek tek yer verilmeyecektir. Ancak, mevcut teoriler arasında en yaygın kabul görmüş olan oksit çekirdeklenme teorisidir [1, 2]. Bu teoriye göre, aşılama sırasında  $\text{SiO}_2$  çekirdekleri çöker ve daha sonra bu çekirdekler üzerinde grafit oluşumu ve büyümesi gerçekleşir. Ancak,  $\text{SiO}_2$  çekirdeklerinin oluşabilmesi için sıvı metal içerisinde bu çekirdeklerin oluşmasına yardımcı olacak diğer yabancı çekirdeklerinde bulunması gereklidir. Bu yabancı çekirdekler, genellikle oksijenle bağ kurma (birleşme) eğilimi yüksek olan elementler tarafından oluşturulur (ayrıca Aşılama başlıklı bölüme bkz).

Aşılama, hem grafit çökmesini (sayı, boyut, şekil açısından) hem de katılaşmayı (gri katılaşmayı teşvik etmek, ledebürite soğumayı engelleme) etkilemek için tasarlanmalıdır.

Etkin bir aşılama, hem parça genelinde homojen mekanik özellikler hemde değişik et kalınlıklarında bile homojen bir sertlik dağılımı sağlar. Aşılama ayrıca, Östenit- grafit ötektik reaksiyonu üzerindeki etkili olduğu için parça sızdırmazlığı ve besleme özelliklerine de etki eder.

Aşılamanın etkinliği, aşılama öncesi sıvı metalin ergitme sırasındaki metalurjik özellikleri, kimyasal kompozisyonu, ergitme ve aşılama sıcaklıkları, sıvı metalin aşılama öncesi ve sonrası bekleme süresi gibi değişkenliklere bağlıdır.

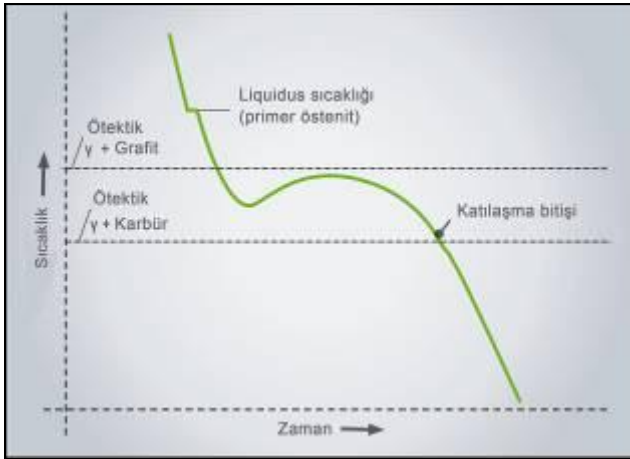
Aşılama birçok farklı aşamada uygulanabilir ancak en etkili uygulama dökümden hemen önce veya döküm sırasında yapılan aşılama. Çekirdeklerin etkinliğine ve soğuma koşullarına bağlı olarak aşılama, ergitme ocağında veya bekletme ocaklarında yapılabilir ancak bu çok nadiren görülen ve önerilmeyen bir uygulamadır. En yaygın uygulamalar ergitme ocağından metal potaya aktarılırken, kalıp içerisine akan metale ve kalıp içinde uygulanan aşılama yöntemleridir.

Alaşımız veya düşük alaşımlı dökme demirlerde, %1,5 ila % 3 silis ve % 2 ila % 4 karbon bulunur. Yavaş ve dengeli bir soğuma şartlarında, sıvı, belli bir süre sonra ötektik kompozisyonuna erişir (% 4,3 karbon eşdeğeri) ve böylece ötektik katılaşma başlamış olur. Ötektik katılaşma sırasında ortaya çıkan karbon tamamen grafit dönüşür. Ancak



dökümhane şartlarında yavaş ve dengeli soğuma şartları gerçekleşmez. Bunun sebepleri, kimyasal kompozisyondaki farklılıklar, et kalınlığı veya soğuma hızı ve döküm sıcaklıklarıdır. Laboratuvar şartları ve gerçek uygulama arasındaki bu farklılıklar sonucu, sıvı metal, ötektik reaksiyon başlamadan önce Östenit-Grafit denge sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğur.

Aşılamanın amacı, ötektik katılaşmanın başlangıcında grafit kristalleşmesi için yeterli miktarda çekirdeğin mevcut olduğunu garanti altına almak ve bu şekilde demir karbür (sementit,  $Fe_3C$ ) oluşumunu engellemektir. Dolayısıyla aşılı ilavesi, grafit kristalleşmesinin Östenit-Grafit denge sıcaklığında veya çok az altında bir sıcaklıkta (alt soğuma) gerçekleşmesini sağlayacak oranda yapılmalıdır. Bunun sağlanabilmesi durumunda; lamel grafitli dökme demirlerde eşit büyüklüklerde ve homojen dağılmış A tipi grafit, küresel grafitli dökme demirlerde ise çok sayıda, küçük ve tam yuvarlak görünümlü nodüller içeren mikro yapılar elde edilir.



Şekil 1: Hipoötektik gri dökme demirin tipik soğuma eğrisi



Şekil 2: A - tipi grafit ve gri katılaşmış lamel grafitli dökme demirin mikroyapısı

## Aşılایıcılar

Genellikle, Ferro-silis alaşımları dökümhanelerde aşılایıcı olarak kullanılmaktadır. Ferro-silislere, aşılama etkinliğini arttırmak için, oksijen'e karşı afinitesi yüksek Kalsiyum, Alüminyum, Baryum, Zirkon, Stronsiyum ve Nadir Toprak Metalleri gibi elementler ilave edilir. Bunun sebebi, başarılı bir aşılama için, sıvı metal içinde çözülen oksijenin bağlanması gerekliliğidir. Bunun yanısıra, bazı aşılایıcılar, grafit çekirdeklenmesi üzerinde olumlu etkiye sahip Bizmut, Titanyum, Mangan, Kükürt ve Oksijen gibi elementler de içerir. ASK Chemicals Metallurgy'nin (eski adı SKW) üretmekte olduğu geniş aşılایıcı ürün yelpazesinin bir kısmı Tablo 1'de gösterilmektedir. Bunların yanısıra, grafit ilave edilmiş FeSi aşılama malzemeleri de vardır. Bu tür aşılایıcılar, oksit oluşturmanın yanısıra, metale grafit çekirdekleri ilave edilmesini sağlar. Grafit, aşılایıcı olarak kullanılacaksa, bunun yüksek ısılarda ( $2500^{\circ}C$ ) üretilen kristalleşmiş grafit olduğundan emin olmak gerekir. Kalsiyum ve Alüminyum gibi aşılama etkinliğini arttıran bazı elementler FeSi içinde doğal



olarak bulunur. Bu nedenle, alaşımsız olarak FeSi'lerde aşılایıcı olarak kullanılabilir ancak bu tür aşılama malzemelerinin etkinlikleri azdır. Aşılama etkinlikleri yüksek olan kompleks aşılایıcılarda hem Kalsiyum ve Alüminyum konsantrasyonu daha fazladır hemde bu tür aşılama malzemelerinin içinde aşının sıvı metal içinde kolay çözünebilirliğini sağlamak için özel katkı malzemeleri bulunmaktadır.

Aşılایıcı olarak saf ferro-silis kullanımının etkisiz olduğu kanıtlanmıştır.

Tablo 1: ASK Kimyasal Metalürji Aşılایıcıları

Tablo 1: ASKCM aşılایıcılar - etkin elementler ve kullanımı uygun dökme demir türleri

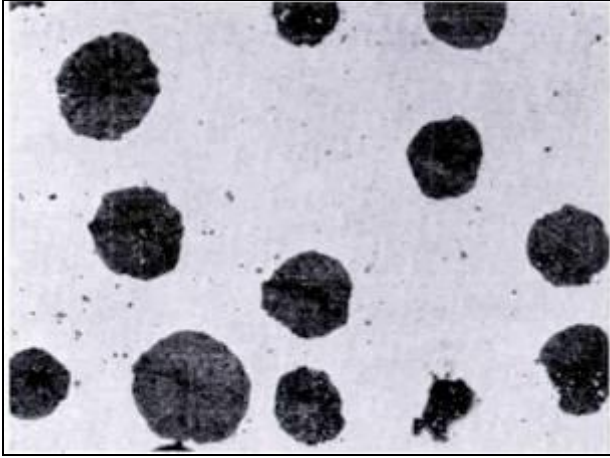
Etkin elementler	Gri ve Sfero		Sfero	Gri	Vermiküler
Al	Inogen		VP 216/ 116/Germalloy		
Ca					
Ba	SB 5	Inoculo 63			
Mn	ZM 6			VP 316/ Optigran	
Zr		Optinoc Z			
Ca			SMW 605		
Bi					
CerMM		CSF 10			
Sr	SRF 75				SRF 75
Ti				LC Graphidox	LC Graphidox

### Etki süresi

Aşılama işleminin etkisi sıcaklığa fakat en önemlisi zamana bağlıdır. Aşılایıcıların zamana olan bağımlılığı, aşının sönümlenme (etkisini kaybetme) süresi olarak adlandırılır. Sönümlenme zamanı, aşının ilave edilmesiyle başlar ve ötektik katılşma sıcaklığına ulaşıldığında sona erer. Bu süreçte, aşılama etkisi gösterecek inklüzyonların sayısı azalır, tekrar oksitlenmeye bağlı olarak çekirdek oluşturacak inklüzyonlar irileşir ve çözünür. Bu da aşılama etkinliğinin katılşma süresine bağlı oluşunun bir göstergesidir. Seri üretim şartlarında 5 mm ile 50 mm et kalınlığındaki parçaların katılşması birkaç saniye ile birkaç dakika arasında gerçekleşirken, el kalıplama ile üretilen, ağır ve 60 mm'nin üzerinde et kalınlıkları olan parçalarda katılşma süresi, döküm sıcaklığına bağlı olarak, saatler sürebilir. Katılşma süreleri arasındaki bu farklar, kesitleri kalın ağır parça dökümünde aşılama malzemelerinin etkinliğinin kaybolmasına neden olur, oluşan çekirdek sayısı azalır



ve oluşan kristallerin büyüme süreleri uzar. Bu nedenle kalın kesitli parçalarda ötektik hücreler ve oluşan grafitlerin sayısı az ve boyutları büyük olur (Şekil 3).



Şekil 3: Kalın kesitli Küresel grafitli dökme demirde çok büyük boyutlu küre oluşumu (20 nodül/mm<sup>2</sup>, 100 µm'ye kadar nodül çapı)

Kalın kesitli parçalarda aşılmanın etkilerini kaybetmesinin önüne geçmek için düşük döküm sıcaklıklarında döküm ve geç aşılama yapılması gerekir. Bu sayede, aşılama miktarını arttırmadan, aşılama etkinliği artar. Kalın kesitlerde geç aşılama ile elde edilen aşılama etkinliği, pota aşılama elde edilemez.

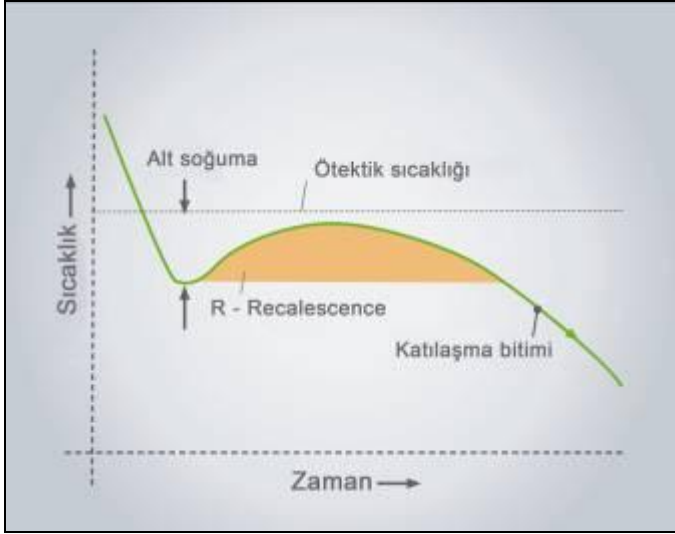
Uygulamada kullanılan en etkili geç aşılama metotları, akan metal üzerine ve kalıp içinde yapılan aşılama. Bu uygulamalarda, ya hassas olarak tartılmış aşı akan metalin içine doğru ilave edilir yada aşı kalıp içine konularak tüm döküm süresince sıvı metalin içinde çözülmesi sağlanır.

Çökelti veya aşılmanın sönümlenme süreleri aşılamanın kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği için aşılama malzemelerinin kimyasal kompozisyonları çok önemlidir ve dikkatlice seçilmesi gerekir. Örneğin, en güçlü aşılama ajanları en hızlı şekilde etkinliklerini yitirirler. Diğer taraftan, baryum ve seryum içeren aşılama ajanlarının etkileri çok uzun sürer. İki kademeli aşılama yapılacağı durumlarda bu durum dikkate alınmalıdır.

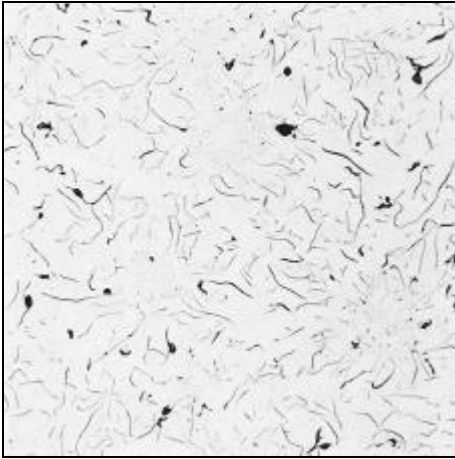
### Grafit oluşumu üzerindeki etkisi

Sıvı dökme demirde çekirdeklenmeyi etkilediği için aşılamanın, grafit sayıları, boyutları, miktarı ve kısmen şekli üzerinde etkisi vardır.

Yetersiz aşılama sonucu alt soğumanın (under cooling) artması öncelikle B- tipi grafit (çiçeksi grafit) veya aynı zamanda D- ve E- tipi grafit oluşumuna (undercooled grafit) sebep olur, bkz. Şekil 5 ve Şekil 6. Ortaya çıkan sonuç ise, mikro yapı içinde düşük mukavemet ve işlenebilirlik azalmasına neden olan ferrit adacıklarının oluşmasıdır.



Şekil 4: Yetersiz çekirdek ihtiva eden dökme demirin soğuma eğrisi – stabil ötektik sıcaklığının altında gözle görülür aşırı alt soğuma (undercooling)



Şekil 5: B-tipi grafit



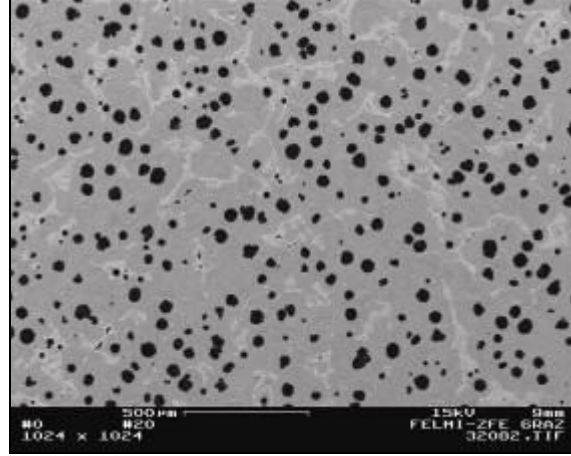
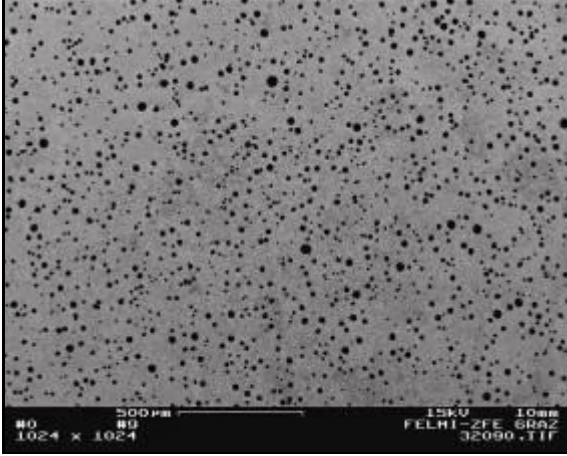
Şekil 6: D-tipi grafit

Soğuma hızındaki artış veya yetersiz çekirdeklenmeye bağlı olarak alt soğuma devam ederse, kır (mottled), hatta grafitin tamamen veya kısmen demir karbür ( $Fe_3C$ ) 'e dönüştüğü beyaz yapı oluşur.

Küresel grafitli dökme demirlerde, yetersiz çekirdeklenme, düşük nodül (küre) sayıları, bozuk grafit oluşumu ve aynı zamanda daha yüksek perlit oluşumuna neden olur. Çekirdek sayısı eğer çok az ise, tercih edilmeyen karbür oluşumu meydana gelir.

Aynı soğuma şartlarında (duvar kalınlığı), bizmut içeren SMW 605 ile aşılana küresel grafitli dökme demirde, baryum içeren aşılama ile aşılana dökme demire göre, şekil 7'de gösterildiği gibi çok daha fazla nodül sayısı elde edilir.

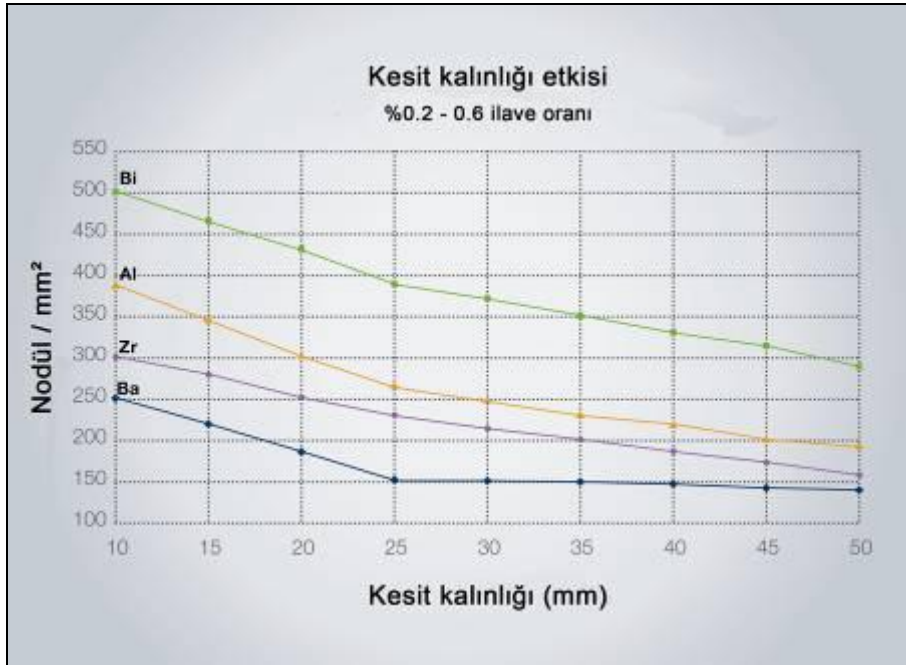




Şekil 7a: %0,15 SMW 605'de geç aşılama

Şekil 7b: Baryum içeren aşılama ile geç aşılama

Bunun yanında, aynı duvar kalınlığı ve aynı miktarda aşılama ile, elde edilecek nodül sayısı kullanılan aşılama tipine (aşılama etkili elementlere) bağlı olarak farklılık gösterir.

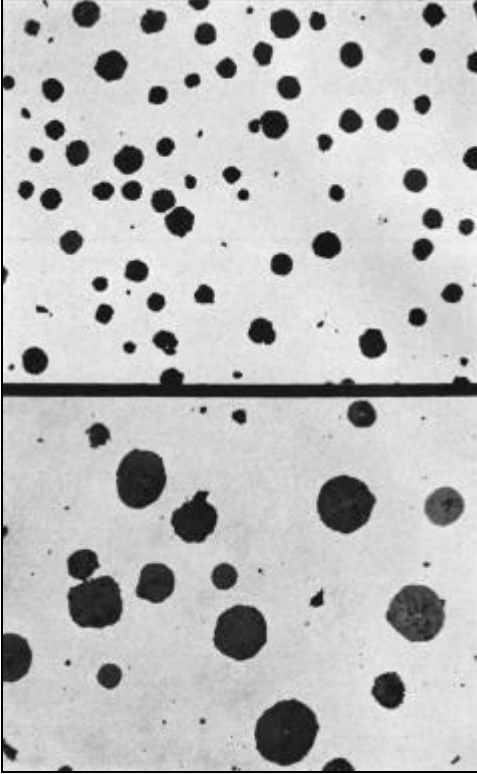


Şekil 8: Nodül sayısı üzerinde et kalınlığı ve aşılama tiplerinin etkileri

Şekil 8'de et kalınlığı veya soğutma hızının, çeşitli aşılama tipleri ile ilişkili olarak nodül sayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Katılaşmanın çok hızlı olduğu ince cidarlı parçalarda, bütün aşılama tiplerinin etkin olduğu görülmektedir. Et kalınlığı arttıkça, katılaşma süresinin uzamasına bağlı olarak aşılama tiplerinin etkinliklerinin azaldığı, nodül sayısındaki azalmadan, görülmektedir. Başka bir ifade ile, kalın kesitlerde, optimum aşılama ile bile, ince kesitli parçalarda elde edilen nodül sayısına ulaşmak mümkün değildir. Çok kalın



kesitlerde, mm<sup>2</sup> başına bazen sadece 40 ila 60 nodül sayısı elde edildiği görülürken, çok ince kesitli parçalarda nodül sayısının > 500/mm<sup>2</sup> olması oldukça normaldir. Kesit artışına (soğuma hızına) bağlı olarak nodül sayısında görülen azalma paralelinde oluşan grafitlerin irileşmesine neden olur bkz. Şekil 3 ve Şekil 9.



Şekil 9: Farklı et kalınlıklarında [4]nodül sayılarının ve nodül büyüklüklerinin karşılaştırılması

Burada küresel grafitli dökme demirler için bahsedilen özellikler, doğal olarak diğer dökme demirler içinde geçerlidir.

### **Matriks üzerindeki etkisi**

#### **Lamel grafitli dökme demir**

Lamel grafitli dökme demirlerde, genel olarak karbürsüz, ince taneli hücreleri olan, perlitik matrikse sahip, düzgün dağılımlı ve ince A tipi grafit içeren mikro yapı hedeflenir. Etkili aşılama veya iyi çekirdek dağılımı, hedeflenen mikro yapıya ulaşılmasını olumlu yönde etkiler. Kimyasal kompozisyon ve soğuma şartları hedeflenen mikro yapıyı etkileyen diğer parametrelerdir. Etkili aşılama ile farklı kesit farklılıklarında bile aynı mekanik özelliklere sahip ve işlenebilirliği iyi döküm parçalar elde edilebilir.

#### **Küresel grafitli dökme demir**

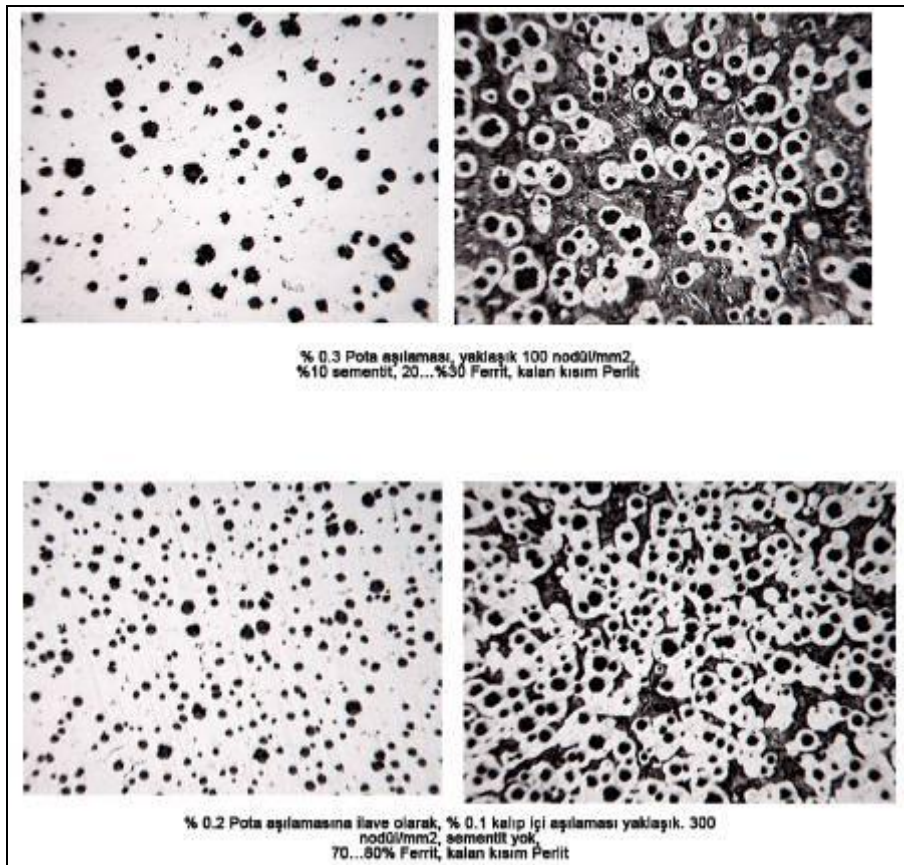
Küresel grafitli dökme demirler, magnezyum tretmanının bir sonucu olarak, alt soğuma eğiliminin yüksek olması nedeniyle, aşılamadıkları takdirde, beyaz veya kır demir olarak



katılaşırlar. Gri katılaşma ancak aşılama ile elde edilebilir. Aşılama ile, küre sayısı artar, küreleşme iyileşir, ferrit oluşumu artar ve hepsinden önemlisi çil veya karbür oluşumu eğilimi azalır.

Şekil 10, Magnezyum tretmanından sonra % 0,3 pota aşılması ve % 0,2 pota aşılmasına ilave olarak % 0,1 kalıp içi aşılama yapılmış metallerin mikro yapılarını göstermektedir. Mukayese edildiğinde, % 0,1 kalıp içi aşılama yapılmış metalin mikro yapısındaki nodül sayısı, nodüllerin küreselliği ve ferrit miktarı fazladır.

Orta ve kalın kesitli parçalarda, geç aşılama ile mikro yapı önemli ölçüde iyileştirilebilir. Küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş kalın kesitli parçalarda ise, geç aşılama (Ingot kalıplarının dökümü hariç), nodül sayısını arttırmak, segregasyonu önlemek, grafit bozulmalarının önüne geçmek ve ters çil oluşumuna mani olabilmek için tek seçenektir.



Şekil 10: GJS-500-7; Pota aşılması (yukarıda), % 0,2 Pota ve ilaveten % 0,1 kalıp içi aşılama (aşağıda) 10 mm et kalınlığı, 100:1 oranında büyütme

## Aşılama metotları

### Ön aşılama / Ön şartlandırma

Bu terimler, sıvı metalin içine, daha ergitme ocağında veya metal ocaktan potaya alınırken çekirdeklenme etkisi yaratacak malzemelerin ilavesi için kullanılmaktadır. Bu uygulama,





metalurjik yapının ilk başladığı safhadan itibaren, sıvı metalde optimum yapı ve grafit oluşumunu sağlamak için yapılmaktadır.

Ce-Zr-Mn ihtiva eden VL(Ce)<sub>2</sub>, ön şartlandırıcı olarak kullanılır ve sıvı metalin içindeki çözünmüş oksijen seviyesinin, oksit bileşikleri oluşturarak, azalmasına ve sıvı metal içinde çekirdeklenmenin ve çekirdek dağılımının iyileştirilmesine katkıda bulunur. Baryum veya Alüminyum ihtiva eden diğer önşartlandırıcılar da vardır.

Ayrıca, silisyum karbür ilavesi de, sıvı metal içindeki çekirdek sayısını arttırdığı için, ön şartlandırıcı olarak tanımlanabilir.

### **Pota aşılması**

Bu klasik aşılama yöntemidir. Aşılama, sıvı metal ocaktan potaya alınırken veya Magnezyum tretman potasından döküm potasına aktarılırken eklenir. Bu uygulamada, sıvı metal miktarına bağlı olarak, 0,6 mm ve 6 mm arasındaki tane iriliklerinde aşılama kullanılır. Aşılama potanın dibine konulmaması ve mümkün olduğunca homojen bir şekilde akan metalin üzerine ilave edilmesine dikkat edilmelidir.

### **Tel aşılama**

Tel aşılama yönteminde aşılama, yuvarlak kesitli bir telin içine konmuş şekilde sıvı metale ilave edilir. Tel, sıvı metalin içine kontrollü bir şekilde tel besleme makinası ile verilir. Bu şekilde hem tel boyu, hemde tel besleme hızı kontrol edilerek hassas bir şekilde aşılama sıvı metale verilmiş olur. Tel aşılama hem pota içinde hemde döküm ocaklarının döküm ağzında ilave edilebilir.

### **Akan metal'e (stream) aşılama**

Bu yöntemde aşılama direk olarak kalıba akan metalin içine verilir. Uygulamada, döküm süresince sıvı metalin içine homojen bir şekilde aşılama ilavesini sağlamak için, genellikle, otomatik aşılama makinası adı verilen cihazlar kullanılır. Bu uygulama için en uygun aşılama tane iriliği genellikle 0,2 mm ve 0,7 mm arasındadır ve aşılamanın çok kısa süre içinde tamamen çözünmesi gerektiğinden eklenen miktar % 0,15'den fazla olmamalıdır. Pota aşılama göre avantajı, geç aşılama yapıldığından aşılamanın etkinliğini yitirmemesidir (sönümlenme). Bu uygulama otomatik kalıplama makinalarına entegre döküm ocaklarında yaygın olarak kullanılır.

### **Kalıp içi aşılama**

Kalıp içi aşılama, aşılama sıvı metalin içine mümkün olan en geç süreçte ilave edildiği için aşılamanın etkinliğini kaybetme riski en aza indirgenmiş olur. Kalıp içi aşılama, aşılama, sıvı metale, döküm havşasında veya doğrudan yolluk sistemi içinde verilir. Dolayısıyla, aşılamanın çözünmesi, dolmuş süresince havasız bir ortamda ve direk olarak sıvı metalin içinde gerçekleşir. Kalıp içi aşılama için blok şeklinde aşılamanın kullanılması önerilir. İnce taneli aşılamanın kullanılmalısı durumunda çözünmemiş aşılama malzemesinin kalıp içine girmesi ve döküm parça üzerinde olumsuz etkileri olma riski bulunmaktadır.

### **Aşılama ve aşılama sonuçlarının kontrol edilmesi ve takibi**



Aşılama sırasında ortaya çıkabilecek hataların önüne geçmek için için dökümden sonra parça üzerinde veya ayrı dökülmüş numune üzerinde yapılacak kontroller yeterli değildir. Bu tür hatalara mani olmak için aşılama, üretimin her safhasında ve üretim şartlarına uygun olacak şekilde, kalite emniyet sisteminin bir parçası olarak planlamak gerekir. Aşılama ile ilgili verilerin kayıt altına alınması ve istatistik proses kontrol yöntemleri ile kontrol edilmesi gerekir. Aşılama ile ilgili verilerin, aşı seçimi, gelen aşılama ön kontrolü, stoklama şartları, döküm sıcaklıkları, aşı ilave oranlarının tartılarak doğrulanması, otomatik aşılama makinalarının rutin bakımı ve kalibrasyonu, aşılama ile döküm bitimi arasında geçen süre, titreşimli aşı dozlama ünitelerinde frekans ölçümü ve kontrolü, tel besleme makinalarında besleme hızı ve telin doğru bir şekilde sıvı metal içine verilip verilmediği gibi bir çok parametrenin dikkate alınması gerekir.[5]

Aşılama sonuçlarının takibi için uygulamacıların kullanabileceği değişik yöntemler vardır. Bunlardan geleneksel olanı, kama testi (çil derinliğinin ölçülmesi) ve mikroskop altında mikroyapı incelemesidir (grafit şekli, tipi, matriks yapısı, ötektik hücre sayısı, nodül sayısı). Diğer bir uygulama ise günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlayan termal analiz sistemleridir. Metalin soğuma eğrisi incelenerek, aşılamanın etkinliğinin yanı sıra ölçülen metalin metalurjik özellikleri ile ilgili bir çok faydalı bilgiler elde edilebilmekte ve döküm öncesi sıvı metalin katılaşma eğilimi, çekinti eğilimi, oluşacak grafitin şekli ve miktarı gibi bir çok konuda ön bilgi elde edilebilmektedir.

#### Literatür:

- [1] F. Neumann: Giesserei 83 (1996) No. 14, pp. 11-15
- [2] J. Müller, W. Siefer: Giessereiforschung 45 (1993) No. 3, pp. 92-98
- [3] J.F. Janovak, R.B. Gundlach: Gießereipraxis (1983) No. 15/16, pp. 223-242
- [4] K. Reifferscheid: Gießerei Praxis (1973) Issue 22/November, pp. 393-398
- [5] VDG Information Sheet p. 210 "Impfen von Gusseisenschmelzen"

#### Yazarlar:

Dipl.-Ing. W. Maschke, Application Technology ve  
Dr. M. Jonuleit, Head of Application Technology - ASK Chemicals Metallurgy GmbH,  
Unterneukirchen, Almanya