

Atıf İçin: Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., Yüksel, Ç., 2022. Alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygınca kullanılan sıvı metal temizleme yöntemlerinin incelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1): 423-434.

To Cite: Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., Yüksel, Ç., 2022. Investigation of liquid metal cleaning methods commonly used in the casting of aluminum alloys. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(1): 423-434.

Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yaygınca Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin İncelenmesi

Mehmet TOKATLI^{1*} Ferhat SAYDAM² Murat HAL² Abdulhadi KOŞATEPE³ Murat ÇOLAK¹ Çağlar YÜKSEL²

ÖZET: Alüminyum ve alaşımlarının birçok avantajlı özelliği sayesinde metal dökümü endüstrisinde demir-çelikten sonra kendisine ikinci sırada yer bulmayı başarmıştır. Alüminyum üretimi cevherden ve hurdadan geri dönüşüm şeklinde temelde iki farklı prosesle elde edilmektedir. Alüminyumun en önemli hammaddesi boksittir ve birincil alüminyum bu cevherden elde edilir. Alüminyum üretiminde boksit cevherinden üretim, hurdadan geri dönüşüme nazaran çok daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Üretici girdisinde de ciddi ekonomik değere sahip olan ikincil alüminyum sanayide oldukça fazla kullanılmaktadır. Ancak geri dönüşüm yoluyla ikincil alüminyum kullanımında karşılaşılan en önemli problemler sıvı metal kalitesinin optimizasyonu ve ilave sıvı metal işlemlerinin gereksinimidir. Yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmek için, çözülmüş hidrojenin, çift katlı oksit filmlerinin (bifilm), katışıkların (inklüzyon) ve safsızlıkların (empürite) arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla endüstride birçok sıvı metal temizleme yöntemi kullanılmakta ve her geçen gün alternatif yeni yöntemler geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu derlemede de bu perspektiften bakılarak, alüminyum ve alaşımlarının dökümünde güncel olarak yaygınca kullanılan sıvı metal temizleme yöntemlerinden; flaks kullanımı, rotary (döner tip) gaz giderme, kontrollü katılaştırma yöntemi, elektromanyetik yönlü gaz giderme, sprey gaz giderme, ultrasonik gaz giderme yöntemi, vakumlu gaz giderme yöntemleri ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum döküm, metal temizleme, bifilm, inklüzyon, temizleme yöntemleri

Investigation of Liquid Metal Cleaning Methods Commonly Used in the Casting of Aluminum Alloys

ABSTRACT: Owing to several advantageous properties of aluminium and its alloys, this engineering alloy family has succeeded in finding itself the second place after iron and steel in metal casting industry. Production of aluminum is basically obtained by two different processes: recycling and ore. Bauxite is the leading raw material of aluminum, and primary aluminum is obtained from this ore. In addition, aluminum production from bauxite ore requires much more energy than recycling from scrap. Also, secondary aluminum having a serious economic value as a raw material for the manufacturers is widely used in the industry. However, the most important problems encountered in the use of secondary aluminum through recycling are the optimization of the liquid metal quality and the requirement of additional liquid metal processes. To produce high quality aluminum castings, the liquid metal is needed some compulsory phenomena such as free of dissolved excess hydrogen, double oxide surface films (bifilms), inclusions and impurities. For this purpose, many liquid metal cleaning methods are used in the industry and alternative new methods are being developed every day. In this review, the liquid metal cleaning methods that are widely used in the casting of aluminum and its alloys, namely the flux usage, rotary degassing, controlled solidification method, electromagnetic directional degassing, spray degassing, ultrasonic degassing method, and vacuum degassing method are discussed from the contemporary perspective.

Keywords: Aluminum casting, metal cleaning, bifilm, inclusion, cleaning methods

¹Mehmet TOKATLI ([Orcid ID: 0000-0001-6001-0292](https://orcid.org/0000-0001-6001-0292)), Murat ÇOLAK ([Orcid ID: 0000-0002-8255-5987](https://orcid.org/0000-0002-8255-5987)) Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Bayburt, Türkiye

²Ferhat SAYDAM ([Orcid ID: 0000-0003-2679-7225](https://orcid.org/0000-0003-2679-7225)), Murat Hal ([Orcid ID: 0000-0001-6505-2336](https://orcid.org/0000-0001-6505-2336)), Çağlar YÜKSEL ([Orcid ID: 0000-0001-9591-6430](https://orcid.org/0000-0001-9591-6430)) Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

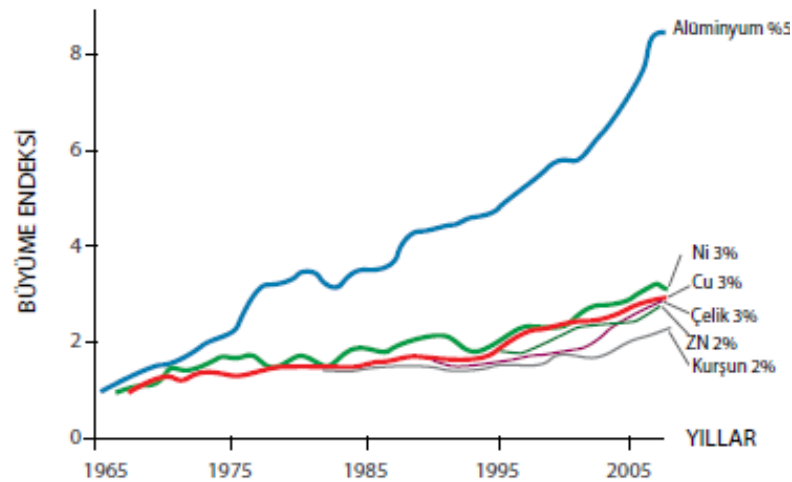
³Abdulhadi KOŞATEPE ([Orcid ID: 0000-0002-7767-4981](https://orcid.org/0000-0002-7767-4981)) Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos MYO, Ağrı, Türkiye

*Sorumlu Yazar: Mehmet TOKATLI, e-mail:meh.tokatli@hotmail.com

GİRİŞ

Ergitilmiş sıvı metalin hazırlanmış kalıp boşluğuna doldurulması olarak adlandırılan döküm yöntemi en eski imalat yöntemlerinden birisidir (Campbell, 2004). Döküm üretimi üzerine yapılan bir çalışmada Amerika'daki metal döküm üretiminin 14 milyon tonun üzerinde olduğunu belirtilmiştir. Demir dışı metal döküm alaşımları arasında ise en çok üretimi gerçekleştirilen metalin alüminyum olduğu tespit edilmiştir. Bu oran toplam demir dışı metal üretimi arasında %73,3 gibi ciddi bir orana denk gelmektedir (Gallo, 2010). Ayrıca özellikle otomotiv sektöründe alüminyum alaşımlarına her geçen gün daha fazla oranda ihtiyaç duyulduğu ve bu oranın giderek arttığı belirtilmiştir (Chen et al., 1984).

Alüminyum alaşımları denilince ilk akla gelen özelliklerin arasında hafiflik, korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması, yüksek dayanım, sünek olması gelmektedir. Bu özelliklerinden dolayı birçok endüstride farklı uygulamalarda yaygınca kullanım bulmakta ve kullanımı her geçen gün artmaya devam etmektedir (Brooks, 1984). Alüminyum alaşımlarının kullanıldığı sektörleri başta otomotiv, havacılık, savunma, uzay endüstrisi, makine imalat, gıda endüstrisi şeklinde sıralamak mümkündür. Ayrıca yayınlanan bir raporda alüminyum döküm parçalarına talebin her yıl %10'a yakın oranda artması beklenmektedir. Bu oranın ülkemizde üretilen parçaların ağırlıklı olarak otomotiv sektöründe olduğu göz önüne alındığında daha da fazla olacağı düşünülmektedir. Bu üretimin % 85 gibi çok büyük oranının ihraç edileceği hesaba katıldığında, alüminyum metalinin önemi bir kez daha göz önüne sergilenmektedir (Alan, 2008). Alüminyum kullanımının büyüme oranının diğer metaller ile karşılaştırmasının yapıldığı çalışmaya ait sonucu Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi 1965 sonrası 40 yıllık süreçte diğer metallerden yaklaşık iki kat daha fazla büyüme sergilediği anlaşılmaktadır (Yılmaz, 2013).



Şekil 1. Alüminyum alaşımının diğer metaller ile karşılaştırmalı büyüme oranları (Mayr, 2011)

Alüminyum Üretim Teknikleri

Alüminyum üretimi; cevherden birincil, hurdadan üretimi ikincil olarak ikiye ayrılmaktadır. Cevherden üretiminde, yeryüzünde çeşitli yerlerden çıkarılan çeşitli minerallerin bir kombinasyonu olarak bulunan boksit cevherinden birincil alüminyum elde edilir. Ekonomik değere sahip boksit cevheri çıkarılıp çeşitli prosesle belirli boyutlama yapıldıktan sonra uygulanabilirliği ekonomik olan Bayer Prosesi ile alümina elde edilir. Boksit cevherinden elde edilen alümina elektroliz (Hall-Herault prosesi) işlemi ile saf alüminyum elde edilir (Erman, 2019).

Ülkemizde, Dünya boksit rezervinin yaklaşık %1'i bulunmakta olup, bunun da büyük bir kısmı yaklaşık 422 milyon ton olarak Toroslar kuşağında yer aldığı rapor edilmektedir (Öztürk, 2005). Birincil alüminyum üretim prosesinde yaklaşık olarak 14500–17000 kWh arası enerji ihtiyacı söz konusudur. Ancak hurdadan geri dönüşüm ile üretim esnasında gerekli enerji miktarı neredeyse %5 kadar (750 kWh) enerji yeterli olmaktadır (Öztürk, 2005). Alüminyum geri dönüşebilirliği iyi olan bir metal olup birincil alüminyuma göre oldukça düşük enerji gereksinimi duyar. Alüminyumun geri dönüşüm ile yeniden değerlendirilmesi enerji sarfiyatı, maliyet ve çevreye olan olumlu etkilerinden dolayı yoğun ilgi görmektedir (Erman, 2019). Ayrıca kısıtlı rezerv ve her geçen gün azalan boksit kaynakları düşünüldüğünde, bu konuda ikincil üretimin önemi daha da artmaktadır. Üretici girdisinde de ciddi ekonomik değere sahip olan ikincil alüminyum sanayide oldukça fazla kullanılmaktadır. Ancak geri dönüşüm yoluyla ikincil alüminyum kullanımında karşılaşılan en önemli problem sıvı metal kalitesinin optimizasyonu ve hurdanın dökümünde ilave işlemler gereksinimidir.

Yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmek için, sıvı alüminyum içerisinde çözülmüş hidrojen gibi safsızlıklardan ve kendi yüzey oksidinin çeşitli formlara sahip çift katlı şekli olan bifilm gibi inklüzyonlardan arındırılması gerekmektedir. Alüminyum alaşımındaki çözülmüş hidrojen, metalik olmayan oksit filmler ve Cl, Fe gibi diğer bazı inklüzyon elementlerinin sıvı metal kalitesini olumsuz yönde etkileyen ve hurdadan gelme potansiyeli olan inklüzyonlar ve safsızlıklar olarak nitelenebilir. Hidrojen ve metalik olmayan oksitlerin kombinasyonu alaşımın mikro yapıları ve özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu kirlilikler ergiyiğin akışkanlığını yitirmesine ve mikro gözeneklilik oluşumuna neden olabilirler. Metalde çatlakların kaynağı ve sert noktaların oluşmasına bile yol açabilirler, böylece işlenebilirlik, yüzey düzgünlüğü ve dökümün mekanik özellikleri, özellikle tokluk ve yorulma direncini de olumsuz yönde etkileyebilir (Cheisa et al., 2001; Tiryakioğlu ve ark., 2004; Kaufmann et al., 2005; Dışpınar ve ark., 2009).

Alüminyum döküm içerisinde önlenemeyen makro ya da mikro porozite hataları, üretilen üründe birçok olumsuz etkiye sebep olur. Bu hataların üretilen parçada düşük mukavemet, süneklik azalması, basınç altında sızdırmada ortaya çıkan problemlere sebep olabileceği, nihayetinde kullanımında kısıtlamalara sebep olacağı aşikârdır (Kaufmann et al., 2005; Dışpınar ve ark., 1999; Dışpınar ve ark., 2009). Bu hataların temel sebepleri olarak termal koşullar, yetersiz sıvı metal temizliği, hidrojenin tetiklediği döküm kusurları olduğu görülmektedir. Bu nedenle, alüminyum ergiyiğinden sıvı metalin saflığını arttırmak için hidrojen ve inklüzyonların uzaklaştırılması, özellikle hidrojen içeriğini kontrol etmek, alüminyum hurda dökümlerinin ve hurda parçalarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı üzerinde büyük öneme sahiptir (Divandari et al., 1999; Lapham et al., 2002; Atwood et al., 2008; Dışpınar ve ark., 2009; Dışpınar ve ark., 2011). Öte yandan, havacılık yapılarında ve otomotiv endüstrisinde geri dönüşüm alüminyum uygulamalarını genişletmek için çok önemli olan dökümlerin performanslarını ve güvenilirliklerini büyük ölçüde artırabilir.

Sıvı Metal Temizleme Yöntemleri

Endüstride ciddi bir ekonomik değere sahip olan geri dönüşüm yoluyla kullanıma sunulan ikincil alüminyumun kaliteli ürünler üretilebilmesi için sıvı metal kalitesinin artırılması gerekmektedir. Hurda alaşımdan gelmesi muhtemel gaz, inklüzyon ve kalıntı gibi kirliliklerin ortadan kaldırılması veya asgari düzeye indirgenebilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda çalışmalar ve araştırmalar devam etmekte ve inert gaz kullanımından, tablet kullanımına birçok uygulama karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda geçmişten günümüze uzanan alüminyum alaşımlarının hurdadan geri dönüşümü esnasında kullanılan sıvı metal temizleme tekniklerini incelenmiştir.

Flakslar (Eritken)

Sıvı metal içerisindeki inklüzyonları veya gaz halindeki safsızlıkları gidermek için kullanılan inert veya reaktif gazlar da bir çeşit flaks olarak tanımlanmaktadır. Flakslama terimi, içinde kimyasal bileşiklerin kullanıldığı ergimiş metale yönelik tüm katkı maddelerini tatbik edilmesi için kullanılır. Bu bileşikler genellikle inorganiktir ve gazdan arındırma, parçalama, temizleme ve alaşımlama gibi çeşitli işlevleri yerine getirebilirler (Utigard, 1998).

Kullanım amaçlarına göre katı flaks çeşitlerini; örtü, rafinasyon, curuf çekme, temizleme, duvar temizliği, alaşımlama, gaz giderme ana başlıkları altında sıralayabiliriz. Sadece sıvı metal temizliği değil ergitme sonrası içinde sıvı alüminyumu oksitlenmesini önlemek amaçlı tedbirleri de içeren birçok flaks çeşidi mevcuttur. Uygulanabilirliği ve maliyeti açısından en çok kullanılan flakslar içerisinde bulunan klor ya da flor içeren karışımlardır (Yüksel, 2016). Bu flakslar sıvı metale doğrudan, gaz giderme cihazları ya da tabletler şeklinde dahil edilirler (Gruzleski, 1990; Meidani et al., 2004). Bu tabletler içinde heksakloreten (C_2Cl_6) en yaygın olarak kullanılan tablet türüdür. Hekzakloreten ergiyik metal içerisinde çözünerek klorür oluşturur bu da $AlCl_3$ gaz kabarcıkları halinde hidrojeni sıvı metal yüzeyine taşır. Ancak çevresel ve insan sağlığı açısından ortaya çıkan gazlar zararlı olduğu bilinmektedir (Ertan ve ark., 2003). Alüminyum sıvı temizleme işlemi için hurda azot gazı ve tablet kullanımının karşılaştırmasının yapıldığı çalışmada her iki yöntemde uygulamasına bağlı olarak etkili sonuçlar verdiği gözlenmiş ancak tablet kullanımının çevreye olumsuz etkilerinden dolayı gaz ile temizleme yönteminin avantajlı olduğu tespit edilmiştir (Tan ve ark., 2011; Çolak ve ark., 2016).

Rotary (Döner Tip) Gaz Giderme

Azot ve argon gibi inert gazların, sıvı metal içerisine daldırılan bir döner çark vasıtasıyla tatbik edilmesi ile hidrojen gazını ergimiş alüminyumdan uzaklaştırılması ile gerçekleştirilir. Hidrojen, herhangi bir kapalı alanda salınır gibi ergimiş metal boyunca dağılarak ergiyik boyunca sabit bir basınç sağlayacaktır. Alüminyumdan hidrojenin giderilmesi, ergiyikte çözülmüş halde bulunan hidrojenin yüksek basınçlı ortamdan daha düşük basınç içeren inert gazdaki ortama geçme ilkesine dayanmaktadır. Rotary gaz giderme, metale verilen inert bir gazın yüzey alanını artırma prensibine göre çalışır. İntert gaz kabarcıklarının yüzey alanı ne kadar büyükse, gaz giderme o kadar hızlı gerçekleşecektir. Belirli bir gaz hacmi için, kabarcık boyutu ne kadar küçükse, gazın toplam yüzey alanı o kadar büyük ve gazdan arındırma o kadar hızlı olacaktır (Simulator, 2021).

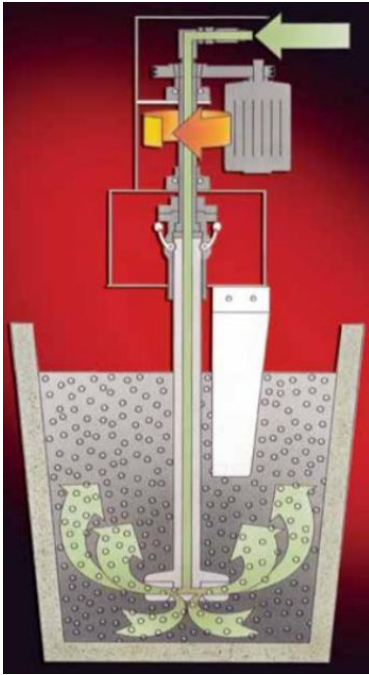
Şekil 2'de gösterilen dönen pervane tekniği yanlış kullanılırsa, ergiyikte kontrolsüz bir girdap oluşacak ve böylece atmosferdeki oksijen, ergiyikle ciddi şekilde reaksiyona girecektir. Sıvı metaldeki hidrojen içeriğinin belirli bir süre nispeten azaltılabilesine rağmen, mikro yapıda alaşımların mekanik özelliklerini azaltabilen birçok gözenek ve boşluk görünmeye devam edecektir (Ni et al., 2003).

Yeniden Ergitme Gaz Giderme (Kontrollü Katılaştırma)

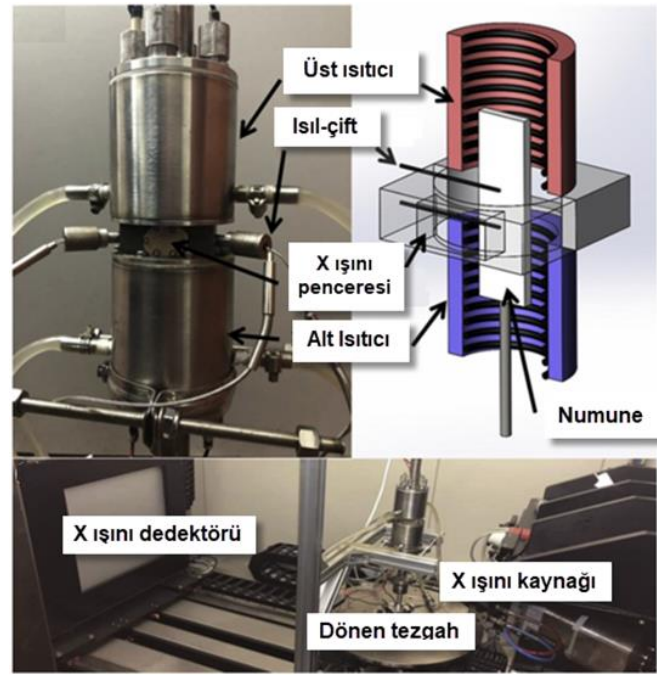
Yeniden ergitme tekniğinde sıvı metalin yeniden ergitme esnasında kontrollü yönlü katılma ile sıvı metal temizliği gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3'de belirtilen sistemde; fırının altında ve üstünde bulunan bağımsız olarak kontrol edilen iki ısıtma bölgesi, X-ışınının nüfuz etmesine izin veren bir pencere, sıcaklığı kontrol etmek ve ölçmek için ısıl-çiftler içeren üç farklı bölümden oluşur. İki ısıtıcı arasındaki sıcaklık farkı, dikey bir sıcaklık gradyanı oluşturacak şekilde ayarlanır ve alt ısıtıcı, numunenin dikey olarak yukarı doğru katılması için daha düşük bir sıcaklığa ayarlanıp malzeme sistem içerisinde belirli bir hız, süre ve sıcaklıkla hareket ettirilir. Hidrojenin, sıvı alüminyumdaki çözünürlüğünün sıcaklıkla arttığından dolayı, gözeneklilikteki hidrojen molekülleri yeniden ergitme sırasında termodinamik olarak kararsız hale gelerek, sıvı metalde ayrılmak ve çözülmek ister. Yeniden ergitme işlemi sırasında gözenekler çözünen ve yüzen olmak üzere iki olası mekanizma ile kontrol edilir.

Yeniden ergitme işleminin ayrıca ergiyik içerisindeki inklüzyonları etkili bir şekilde azaltmaktadır. Geleneksel gaz giderme işleminde, inert gazların temizlenmesi gibi yeniden ergitme işleminde de oksitler ve inklüzyonlar etkin bir şekilde uzaklaştırılır (Lee et al., 2001).

Campbell, alüminyum dökümlerdeki gözeneklerin, oksit partiküllerinden veya bifilmelerden kaynaklandığını ileri sürmektedir. Bu yöntemde, ergiyiğin yüzeyi, yeniden ergitme işlemi boyunca durgun olduğundan geleneksel gaz giderme işlemlerine kıyasla ergiyikte çok daha az yeni oksit oluşacağından etkili bir gaz giderme yöntemi olduğu düşünülmektedir (Campbell, 2004; Zhao et al., 2012).



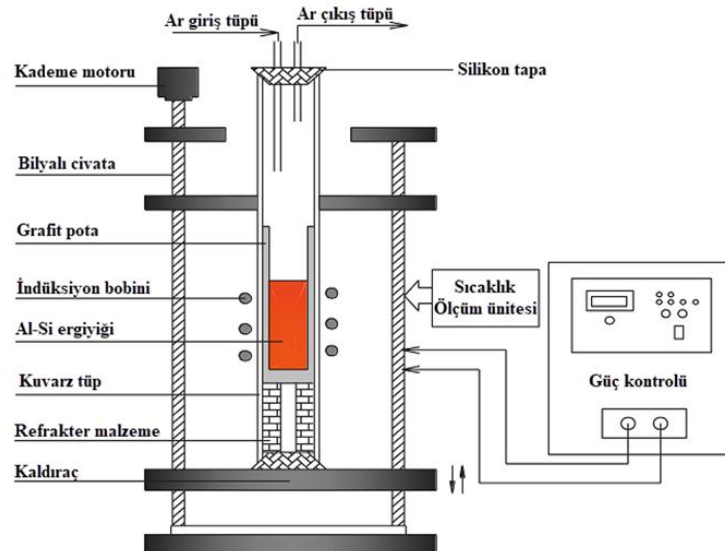
Şekil 2. Rotary gaz giderme metodu şematik gösterimi (Foseco, 2015)



Şekil 3. Yeniden Ergitme deney düzeneği şeması (Dong et al., 2020)

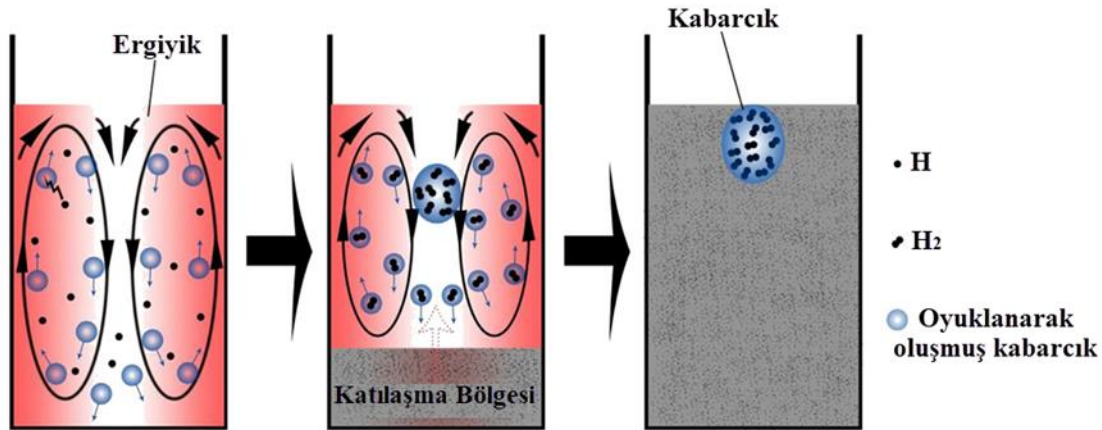
Elektromanyetik Yönlü Gaz Giderme

İndüksiyon içerisinde alüminyum alaşımın ergitilmesinden sonra sıvı metalin aşağı çekilmesi ve çekmenin eşlik ettiği doğal katılma nedeniyle aşağıdan yukarıya doğru sistemli bir katılma sağlanması yöntemidir. Bu işlemler esnasında sıvı metalin oksitlenmesini önlemek için sisteme Şekil 4'de görüldüğü gibi argon gazı tatbik edilir.

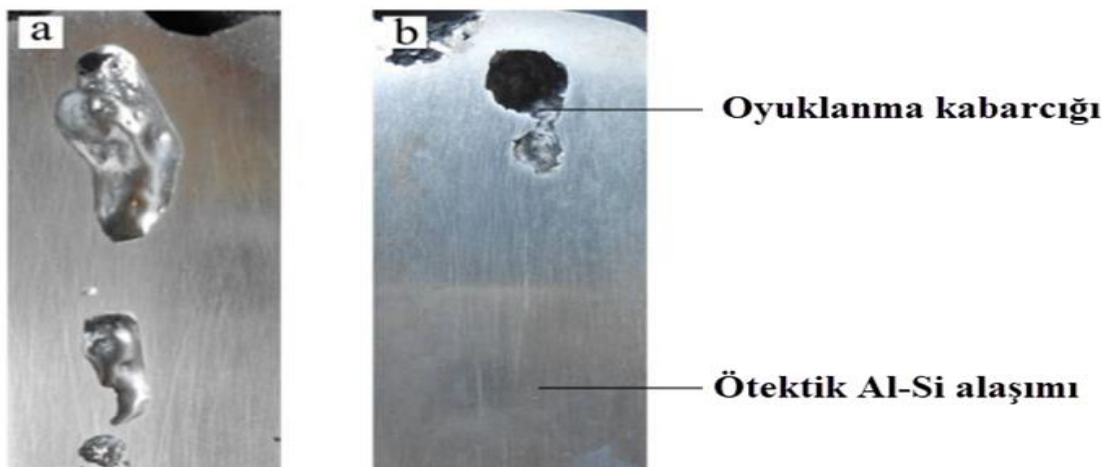


Şekil 4. Elektromanyetik yönlendirilmiş gaz giderme yönteminin şematik gösterimi (Ren et al., 2014)

Ergimiş alüminyumda çözünen hidrojen atomlarının çoğunun reaksiyona göre sıvı alüminyum yüzeyindeki su buharının ayrışmasından geldiği bilinmektedir. Başlangıçta, elektromanyetik karıştırmanın etkisi altında, hidrojen atomları tamamen ergiyik içine salınır ve daha küçük iç basınca sahip küçük kaviteasyon kabarcıkları üretilir. Dış hidrojen kısmi basıncına bağlı olarak küçük kaviteasyon kabarcıklarının oluşumu, kaviteasyon balonunun dış ara yüzünden daha büyük olduğunda, ergimiş alüminyumdaki hidrojen atomu bu kabarcıklara kolayca ve sürekli olarak yayılır ve aynı zamanda birbirleriyle etkileşime girer. Daha sonra, aşağı yönlü katılaşma sırasında, hidrojen büyüyen katı tarafından uzaklaştırılarak kalan sıvıya doğru yönlendirilir. Bu arada, ergiyik içinde oluşan sıvı akışının etkisi altında olan kabarcık bir hidrojen taşıyıcı olarak görev yapacak ve gaz giderme hızını büyük ölçüde hızlandırabilecek diğer kabarcıklarla bir araya gelme eğilimine sahip olacaktır. Sonunda, büyük miktarda küçük kaviteasyon kabarcıkları toplanır ve hacim genişler, ardından son katılaşma numunesinde nispeten daha yüksek hidrojen konsantrasyonunu içeren kabarcık boşluğu haline gelir. Ayrıca daha yavaş aşağı çekme oranıyla, zenginleştirilmiş kabarcık hacminin numunenin üst ucunda kademeli olarak arttığı gözlenmektedir (Ren et al., 2014). Şekil 5’de elektromanyetik yönlendirilmiş gaz giderme yönteminin işlem basamakları şematik olarak verilmiştir. Şekil 6’da da elektromanyetik yönlendirme olmaksızın ve elektromanyetik yönlendirmeye bağlı porozite oluşumuna dair döküm yapısı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. Elektromanyetik yönlendirilmiş katılaşma gaz giderme mekanizması (Ren et al, 2014)



Şekil 6. a) Elektromanyetik katılaşma yönlendirmesi olmaksızın, b) Elektromanyetik katılaşma yönlendirmesi ile katılaşan döküm yapıları (Ren et al., 2014)

Sprey Gaz Giderme

Sprey gaz giderme yönteminin şematik çizimi Şekil 7’de verilmiştir. Alüminyum ergiyik, bir girişten bir püskürtücüye getirilir. Püskürtücü aracılığıyla, ergiyik küçük damlacıklar halinde atomize edilir ve bir işleme tankına püskürtülür. Bir gaz besleme ünitesinden gelen temizleme gazı, bir gaz girişi vasıtasıyla işleme tankına verilir. Temizleme gaz yukarı doğru hareket eder ve ergiyik damlacıkları aşağı doğru hareket eder. Ergiyik damlacıkları temizleme gazı ile temas ettiğinde aralarındaki hidrojenin kısmi basınç farkı nedeniyle ergiyik damlacıklarındaki hidrojen temizleme gazına yayılır. Arıtma gazı, arıtma tankının tepesine yükseldikten sonra, bir gaz geri kazanım ünitesine çekilir ve geri kazanım gazındaki hidrojenin geri kazanım gazından ayrıldığı bir geri kazanım gazı ayırma ünitesine getirilir. Daha sonra geri kazanılan gaz, arındırıcı gaz girişi aracılığıyla yeniden kullanılabilir. Gazdan arındırıldıktan sonra, ergiyik damlacıkları işleme tankının dibinde toplanır ve bir çıkış yoluyla işleme tankından uzağa akar. Tüm gazdan arındırma işlemi sırasında, ergiyik damlacıklarının katılaşmasını önlemek için temizleme tankındaki gaz yüksek bir sıcaklıkta tutulur (Wu et al., 2005).

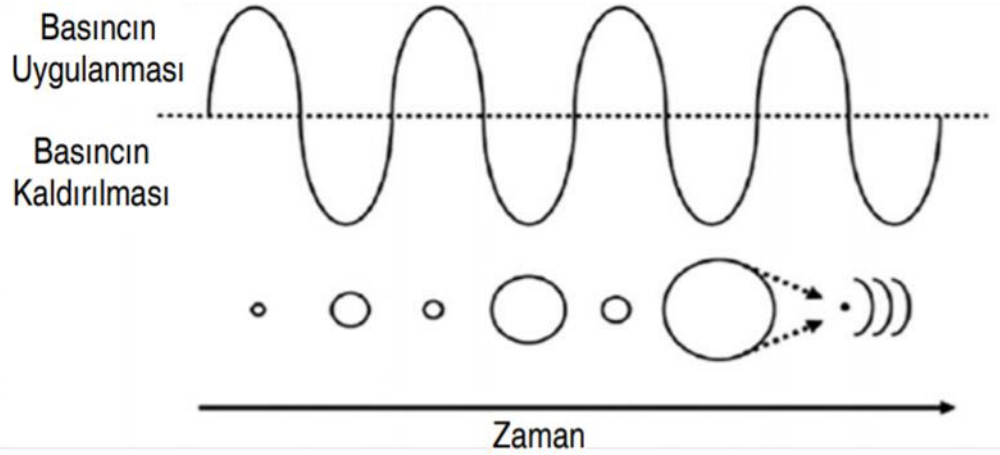


Şekil 7. Sprey gaz giderme yönteminin şematik çizimi (Wu et al., 2005)

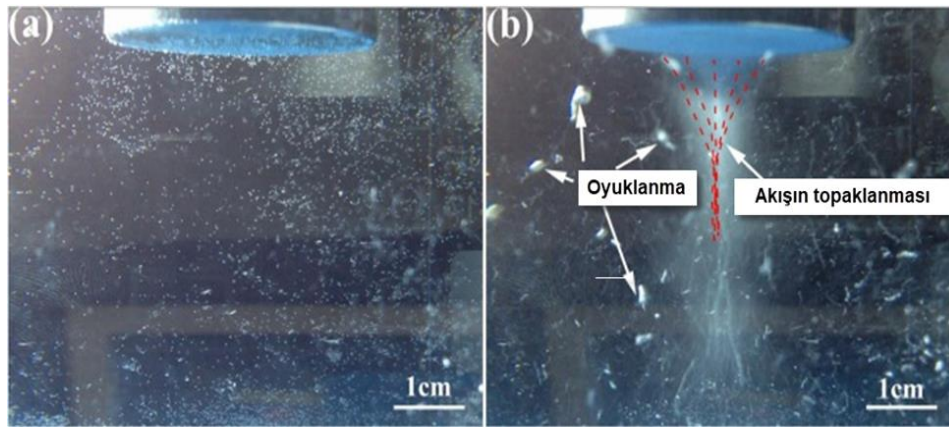
Ultrasonik Gaz Giderme

Ultrasonik gaz giderme, sıvılarda akustik kaviteasyonun ilk potansiyel uygulamaları arasındadır. 1960-1980'lerde dökümhanelerde alüminyum eriyik gazdan arındırma için endüstriyel ölçekte denenmiş ve bazı özel ekipman ve kurulum gerektirmesine rağmen, temiz ve sağlam bir teknoloji olduğu kanıtlanmıştır (Eskin., 1965, Eskin at al., 2014). Son yıllarda çevre dostu olması ve potansiyel çok yönlülüğü nedeniyle bu teknolojiye olan ilgi artmıştır. Hidrojen miktarının, çok daha az cüraf oluşumu ile Ar gaz giderme durumunda olduğundan daha düşük seviyelere düşürülebileceği gösterilmiştir (Eskin et al., 2015). Yapılan bir çalışmada, alüminyum eriyiğinde gaz kabarcığı oluşumunu başlatmak için ultrasonik kaviteasyonun gerekli olduğu bildirilmektedir (Eskin, 2002). Ergiyikte (suyun aksine) serbest gaz kabarcıkları olmamasına rağmen, absorbe edilmiş atomik hidrojen tabakasına sahip oksit partikülleri ve hatta kaviteasyon çekirdeği görevi gören moleküler hidrojen inklüzyonunun yüzey kusurları gibi çok sayıda ara yüz olduğu belirtilmektedir (Eskin at al., 2014). Dalgalı ses alanında bir kabarcık titreşirken, her genişlemede eriyikten daha fazla hidrojen çıkaran bir pompa görevi görür. Bu nedenle kabarcıklar büyür ve ardından yüzeye çıkarak hidrojeni atmosfere bırakır. Ultrason kaynağı tarafından oluşturulan ergiyik akışları, kabarcıkların dağılımını ve dolayısıyla gaz gidermeyi kolaylaştırır (Eskin at al., 2014).

Sıvı metal yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşimlere maruz kaldığında, titreşimlerin yüksek yoğunluğu, basıncın kavitasyon eşiğinin üzerinde değişmesine ve böylece çok sayıda boşluk oluşturmaya neden olur. Kavitasyon, hidrojenin ergiyikten gelişen kabarcıklara difüzyonunu hızlandıran kütle transfer süreçlerini yoğunlaştırır. Akustik kavitasyon zamanla ilerledikçe, bitişik kabarcıklara temas eder ve birleşir. Kabarcıklar yüzeye ulaşana kadar yerçekimine karşı sıvının içinden yükselmelerine izin verecek yeterli boyuta ulaşır (Xu et al., 2004). Şekil 8’de ultrason uygulamasının basınçla değişimi şematik olarak verilmiştir. Şekil 9’da ultrason uygulaması su testinde görünüşü verilmiştir.



Şekil 8. Ultrason uygulaması ile oluşan basınç değişimi (Fuchs, 2014)



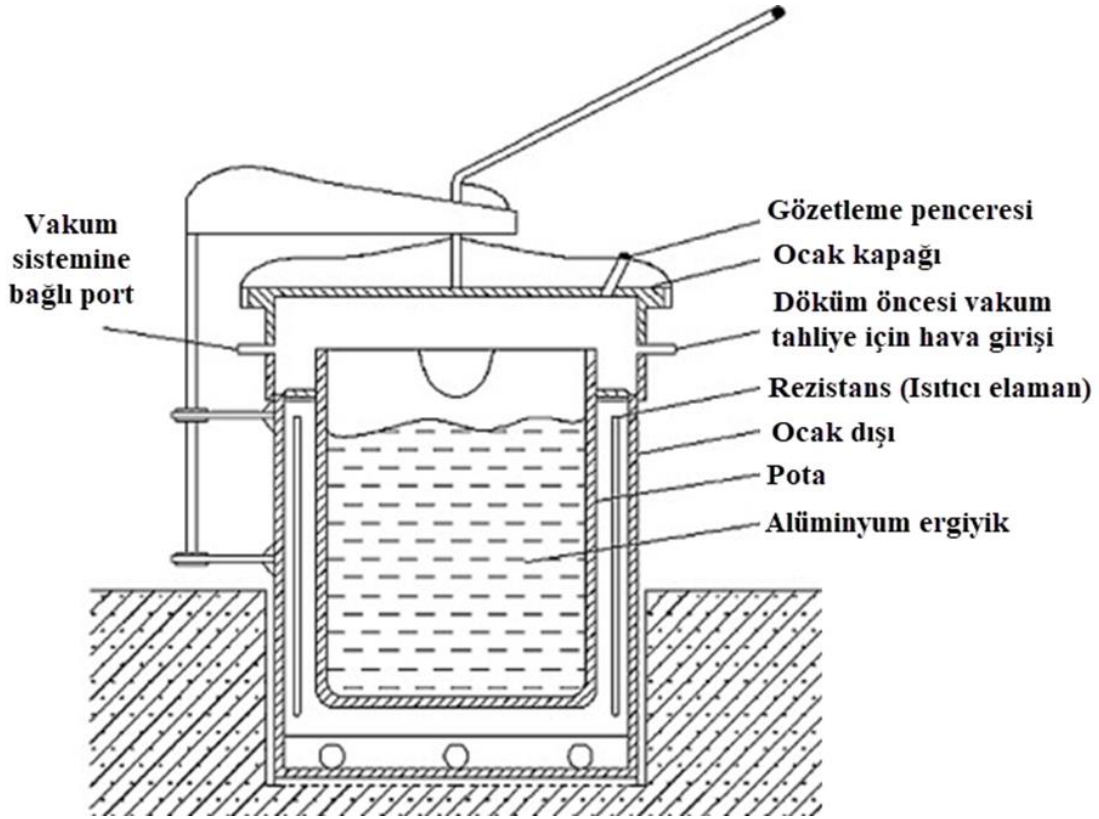
Şekil 9. Ultrasonun su simülasyonu testleri, a) Ultrason kapalı, b) Ultrason açık (Liu et al., 2017)

Ultrasonik gaz giderme işleminin, alüminyum ve magnezyum alaşımlarının gazdan arındırılması, filtrasyonu ve tane inceltmesi için etkili bir yöntem olduğu endüstriyel ölçekte kanıtlanmıştır (Eskin, 1988, Eskin et al., 2015). Ultrasonik gaz giderme sırasında sıvı metal hacmi önem arz etmekte ve boyut ve tonaj arttıkça etkinlik azalmasına yönelik problemler, son yıllarda yapılan çalışmalarla çok sayıda ultrasonik kaynak kullanılarak büyük eriyik hacimlerinin işlenmesi zorluğunu ortadan kaldırmıştır (Eskin et al., 2015, Eskin et al., 2019)

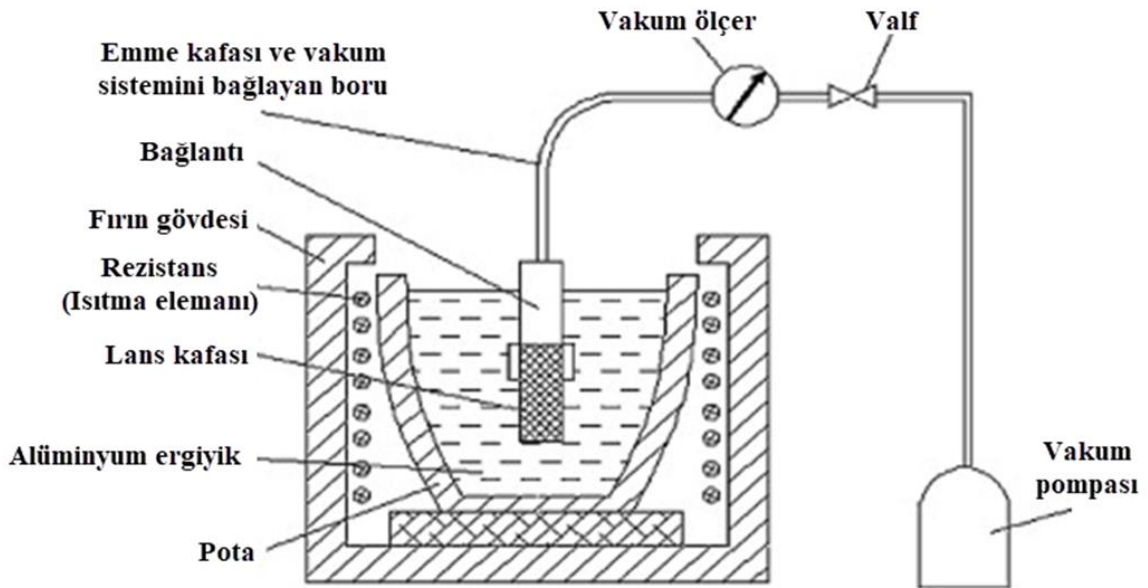
Vakum Gaz Giderme

Bu işlemde pota, ergimiş alüminyum üzerinde kapalı bir boşluk bulunan bir hazneye yerleştirilir. Boşluğu vakumlamak, hidrojenin ergiyikten uzaklaşmasını sağlar (Şekil 10). Bu işlemin verimi; hidrojenin dışarıya transferini engelleyen ergiyik yüzeyini kaplayan oksit filmi ve ergiyiğin ortasındaki ve altındaki hidrojenin yüzeye dağılması ve çıkmasının uzun sürmesinden olumsuz etkilenmektedir. Bu eksikliklerin giderilmesine yönelik iç vakum emme yöntemi geliştirilmiştir (Şekil 11). Gözenekli bir

emme kafası, ergimiş alüminyuma daldırılır. Vakum sistemine bağlanmak için valf açılır. Bu şekilde, gözenekli kafanın içinde hidrojenin kısmi basıncı her zaman sıfırda tutulur. Böylelikle, ergiyik ve gözenekli kafa arasındaki ara yüzeyde büyük bir hidrojen konsantrasyonu gradyanı oluşturulur. Difüzyonla, hidrojen, alüminyum eriyikten boru vasıtasıyla vakum sistemine bağlanan emme kafasına aktarılması sağlanır (Zeng et al., 2012).



Şekil 10. Vakum gaz gidermenin şematik görüntüsü (Zeng et al., 2012)



Şekil 11. İç vakum emme sistemi şematik görüntüsü (Zeng et al., 2012)

SONUÇ

Alüminyum ve alaşımlarının dökümünde enerji verimliliği, çevre şartları, kısıtlı boksit kaynakları ve maliyet göz önüne alındığında ikincil alüminyum (hurda) kullanımı önemli bir sanayi girdisi oluşturmaktadır. Ancak hurda alüminyum içerisindeki gaz, inklüzyon ve safsızlıkların giderilmesi yüksek kalite gereksinimi olan parça imalatında önem arz etmektedir.

Alüminyum dökümlerdeki temel gaz gözenekleri kaynağı, sıvı alüminyumda önemli çözünürlüğe sahip gaz olan hidrojen dir. Katılma noktasında, çözünürlükte büyük bir düşüş meydana gelir, bu düşüş hidrojen çökmesine ve gaz gözeneklerinin gelişmesine yol açar. Bu nedenle, ergimiş bir alaşımdaki hidrojen içeriği, özellikle yüksek mukavemetli döküm alaşımları ile uğraşırken mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Sıvı metali temizleme işlemi için çeşitli yaklaşımlar araştırılmış ve uygulanan metotlar içinde azot, argon gibi inert gaz kullanarak gaz giderme metodları, kimyasal tablet kullanımı, katılma yönlendirmesi karşımıza çıkmaktadır. Yöntemleri avantaj ve dezavantajlarını aşağıda şekilde özetleyebiliriz;

Maliyet ve uygulama pratiği açısından en kolay temizleme yöntemi çeşitli kimyasal flaksların, alüminyum eriyiğinin rafine edilmesinde etkili olduğu bilinmektedir. Flakslar içerisinde bulunan klor ya da klor içeren karışımlar arasında yer alan heksakloreten (C_2Cl_6) içeren tabletler, ergiyik metal içerisinde çözünerek klorür oluşturur, nihayetinde $AlCl_3$ gazı ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu gazlar çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olduğundan birçok ülkede tablet kullanımı yasaklanmaya başlanmıştır. Ayrıca flaksların kullanımında etkili bir gaz giderme etkisi için kullanılan tabletlerin muhafazası önemli olup, nem içermeyen kuru ortamlarda tutulması gerekmektedir.

Döner tip gaz giderme tekniği, azot ve argon gazı gibi inert gazların, sıvı metale tatbik edilmesi ile hidrojen gazını ergimiş alüminyumdan uzaklaştırılmasının sağlandığı alüminyum dökümhaneleri için düşük maliyetle verimli çalışma sağlayan bir uygulamadır. Böylelikle çevreye ve insan sağlığına tehlikeli gaz giderme tabletleri kullanma ihtiyacını ortadan kaldırır. Ancak döner pervane tekniği yanlış kullanılırsa, ergiyikte şiddetli ve kontrolsüz bir girdap oluşacak, neticesinde atmosferdeki oksijen, ergiyikle ciddi şekilde reaksiyona girecektir. Hidrojen içeriğinin azaltılmasına karşın alaşımın mekanik özelliklerini azaltan birçok gözenek ortaya çıkabilecektir. Bu sebeple bu uygulamada sistem çalışması, gaz tatbiki, rotor devri gibi parametrelerin iyi ayarlanmış olması gerekmektedir.

Yeniden ergitme tekniğinde katılma sonrası malzemenin yeniden ergitilmesi ve kontrollü yönlü katılma ile sıvı metal temizleme gerçekleştirilmektedir. Yeniden ergitme işleminde geleneksel gaz giderme işlemlerine ilaveten gazların temizlenmesinin yanı sıra oksitler ve inklüzyonlarda etkin bir şekilde temizlenebilmektedir. Ayrıca bu yöntemde, ergiyiğin yüzeyi, yeniden ergitme işlemi boyunca durgun olduğundan çok daha oksit oluşacağından etkili bir gaz giderme söz konusudur. Ancak sistem kurulum maliyeti ve uygulama ilave maliyetler ortaya çıkarmaktadır.

Havacılık sektörü gibi yüksek kaliteli alüminyum alaşımlarının imalatı için kullanım bulan gaz giderme yöntemlerinden biri de elektromanyetik yönlendirilmiş gaz giderme tekniğidir. Temiz ve çevreye duyarlı gaz giderme yöntemlerinden biri olan bu yöntemde ilave uygulama ve yüksek kurulum maliyeti gerektirmektedir.

Sprey gaz giderme yöntemi ile gaz kabarcıklarını döner tip gaz giderme yönteminde olduğu gibi toplu ergiyik haline getirmek yerine, ergiyik küçük damlacıklar halinde atomize edilmesi ile gerçekleştirilir. Sprey gaz giderme yönteminde gaz giderme tankı atmosferden izole edilmiştir ve tankın tamamı temizleme gazı ile doldurulmuştur. Bu nedenle, ergiyik atmosferden H_2O ve H_2 'yi emmez. Temizleme gazı tüketimin büyük ölçüde azaltılabilmesi için geri dönüştürülebilir.

Ultrasonik gaz giderme yönteminde, alüminyum ergiyiklerinde hidrojen içeriğini azaltmakla birlikte aynı zamanda tane inceltmede, tane boyutunu azaltma, eş eksenli tanelerin oluşumu, fazların titreşimle incelenmesinde ve dağılımın artırılmasında, malzeme homojenliğini artırma, ikincil fazların ve inklüzyonların uniform olarak dağılımını sağlamaktadır. Ancak uygulamada ultrason, bir ergiyikte salınım enerjisini ve ses yoğunluğunu kaybederse yoğunluk hızla kavitasyon eşiğine düşer ve kavitasyon durur, bu durumda gaz giderme etkisi azalır.

Vakumlu gaz giderme işleminde pota, ergimiş alüminyum üzerinde kapalı bir boşluk bulunan bir odaya yerleştirilir. Boşluğu vakumlamak, hidrojenin ergiyikten serbest kalmasını sağlar. Prosesin hidrojeni uzaklaştırmada çok etkili olduğu kanıtlanmıştır, ancak uygunsuz çalışması, düşük verimliliği ve vakumlama sırasında sıcaklık kaybı nedeniyle gerçek dökümhane üretiminde nadiren kullanılmaktadır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederlerim.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederim.

KAYNAKLAR

- Alan, S. 2008. Alüminyum Raporu, Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği, S. 30.
- Atwood, R. C., Sridhar, S., Zhang, W., Lee, P.D. 2008. Diffusion-Controlled Growth Of Hydrogen Pores İn Aluminium-Silicon Casting: In Situ Observation And Modelling, *Acta Materialia.*, 48: 405-417.
- Brooks, C.R. 1984. Heat Treatment, Structure And Properties Of Nonferrous Alloys, Asm, Ohio, Usa, 115-137.
- Campbell, J. 2004. Castings Practice The 10 Rules Of Castings, Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 9-113.
- Chen, W.F., Lui, E.M. 2005. Handbook Of Structural Engineering, Crc Press, Abd.
- Chiesa, F., Regimbal, P. 2001. Distinguishing Microporosity From Macroshrinkage When Modelling Solidification Of A356 Castings, *Afs Transactions.*, 109: 347-357.
- Çolak M, Kayıkci R, Dıspınar D. 2016. Melt Cleanliness Comparison Of Chlorine Fluxing And Ar Degassing Of Secondary Al-4Cu. *Metallurgical And Materials Transactions B*, 47: 2705-2709.
- Dıspınar, D., Campbell, J. 2009. Alüminyum Ve Alaşımlarının Döküm Kalitesinin Belirlenmesi, Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, 394-404.
- Dıspınar, D., Nordmark, A., Dı Sabatino, M., Arnberg, L. 2009. Alüminyum ve Alaşımlarının Dökümü Sırasında Gaz Giderme İşlemi Ve Döküm Kalitesi Üzerine Etkileri, Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, 405-410.
- Dıspınar, D., Campbell, J., Porosity. 2011. Hydrogen And Bifilm Content İn Al Alloy Castings, *Materials Science And Engineering A* 528, 3860-3865.
- Dıvandarı, M., Campbell, J. 1999. The Mechanism Of Bubble Damage İn Castings, 1st International Conference On Gating, Filling And Feeding Of Aluminum Castings Afs Society., 49-63.
- Dong Y, Shuai S, Zheng T, Cao J, Chen C, Wang J, Ren Z. 2020. In-Situ Observation Of Solid-Liquid Interface Transition During Directional Solidification Of Al-Zn Alloy Via X-Ray İmaging. *Journal Of Materials Science & Technology*, 39: 113-123.
- Erman C. 2019. Birincil Alüminyum Üretimine Genel Bir Bakış, *Metalurji Dergisi*, Sayı:156, Sayfa 34-48.
- Ertan S, Kavaklıoğlu B, Büyükakkaş F. 2003. Alüminyum Sıvı Metal Temizliğinde Kullanılan Flakslar, 2. Aluminium Symposium, Seydişehir, Konya.
- Eskin, D., Alba-Baena, N., Pabel, T., da Silva, M., 2015. Ultrasonic degassing of alu-minium alloys: basic studies and practical implementation. *Mater. Sci. Technol.*31, 79-84.
- Eskin, D.G., Tzanakis, I, Wang, F., Lebon, G.S.B., Subroto, T., Pericleous, K., Mi, J. 2019. Fundamentals studies of Ultrasonic melt processing. *Ultrasonics - Sonochemistry* 52, 455-467.
- Eskin, G.I., 1965. Ultrasonic Treatment of Molten Aluminum. *Metallurjiya*, Moscow. Eskin, G.I., 1995. Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing. *Ultrason. Sonochem.* 2, 137-141.
- Eskin, G.I., 2002. Device for ultrasonic treatment of light alloy melt. *Russian PatentRU2186147*, July 27, 2002.
- Eskin, G.I., Eskin, D.G., 2014. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, second ed. CRC Press, Boca Raton.

- Eskin G.I., Ultrasonic Treatment of Molten Aluminium, second ed., Metallurjiya, Moscow, 1988.
- Eskin G.I., Eskin D.G., Ultrasonic Treatment of Light Alloys Melts, second ed., CRC Press, Boca Raton, 2015.
- Fuchs, F. J. 2014. "Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application," [http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning\(1\).pdf](http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning(1).pdf), son erişim tarihi: 26.08.2014
- FOSECO, 2015. "FDU Foundry Degassing Unit - Kullanım Kılavuzu".
- Gallo, R. 2010. Circumstances Of The Automotive Industry Impact On Aluminium Foundries, American Foundry Society, Schaumburg, Il Usa, Paper 10.004, Page 1 Of 17, Afs Proceedings.
- Gruzleski Je, Closset Bm. 1990. The Treatment Of Liquid Aluminum-Silicon Alloys, American Foundrymen's Society. Inc. Des Plaines, Illinois, Usa.
- Kaufmann, J.G., Rooy, E.L. 2005. Aluminum Alloy Castings, Properties, Processes, And Applications, Asm International, American Foundry Society, Usa.
- Lapham, D.P., Schwandt, C., Hills, M.P., Kumar, R.V., Fray, D.J. 2002. The Detection Of Hydrogen In Molten Aluminium, Ionics, 391-401.
- Lee P, Hunt J.2001. Hydrogen Porosity In Directionally Solidified Aluminium Copper Alloys: A Mathematical Model. Acta Materialia, 49: 1383-1398.
- Liu X, Zhang C, Zhang Z, Xue J, Le Q. 2017. The Role Of Ultrasound In Hydrogen Removal And Microstructure Refinement By Ultrasonic Argon Degassing Process. Ultrasonics Sonochemistry, 38: 455-462.
- Nı Hj, Sun B, Jiang Hy, Ding Wj. 2003. Effects Of Rotating İmpeller Degassing On Microstructure And Mechanical Properties Of The A356 Scraps. Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing, 352: 294-299.
- Mayr, E. 2011. Global Aluminium Frp Industry, 4th Aluminium Outlook Conference, Chicago
- Meıdanı An, Hasan M.A. 2004. Study Of Hydrogen Bubble Growth During Ultrasonic Degassing Of Al-Cu Alloy Melts. Journal Of Materials Processing Technology, 147: 311-320.
- Öztürk M. 2005. Kullanılmış Alüminyum Malzemelerinin Geri Kazanılması, Çevre Ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Ren Ys, Ma Wh, Wei Kx, Yu Wz, Dai Yn, Morita K. 2014. Degassing Of Aluminum Alloys Via The Electromagnetic Directional Solidification. Vacuum, 109: 82-85.
- Simulator Bd, Holiday Eds. Portable Rotary Degasser Lowers Aluminum Refining Cost. Simulation, 2021.
- Tan E, Tarakçılar A, Dıspınar D, Colak M, Kayıkçı R. 2011. Reproducibility Of Reduced Pressure Test Results In Testing Of Liquid Aluminum Gas Levels, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18.
- Tiryakioğlu M, Staley Jt, Campbell J. 2004. Evaluating Structural İntegrity Of Cast Al-7% Si-Mg Alloys Via Work Hardening Characteristics: Ii. A New Quality İndex. Materials Science And Engineering: A, 368: 231-238.
- Utıgard T. 1988. The Properties And Uses Of Fluxes İn Molten Aluminum Processing. Jom, 50: 38-43.
- Wu R, Shu D, Sun B, Wang J, Lı F, Chen H, Lu Y. 2005. Theoretical Analysis And Experimental Study Of Spray Degassing Method. Materials Science And Engineering: A, 408: 19-25.
- Xu Hb, Jian Xg, Meek Tt, Han Qy. 2004. Degassing Of Molten Aluminum A356 Alloy Using Ultrasonic Vibration. Materials Letters, 58: 3669-3673.
- Yılmaz, M. 2013. Türkiye Alüminyum Sektörünün 2023 Projeksiyonu, Türk Döküm Dergisi, Sayı 29, Sayfa, 62-69, Ekim-Kasım-Aralık.
- Yüksel Ç. 2016. Alüminyum Alaşımlarının Sıvı Metal Kalitesinin Arttırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Zeng J, Gu P, Wang Y. 2012. Investigation Of Inner Vacuum Sucking Method For Degassing Of Molten Aluminum. Materials Science And Engineering: B, 177: 1717-1720.
- Zhao L, Pan Y, Liao H, Wang Q. 2012. Degassing Of Aluminum Alloys During Re-Melting. Materials Letters, 66: 328-331.