DÖKÜMCÜNÜN EL KİTABI, DÖKÜMHANE AKADEMİ PROJESİ KAPSAMINDA HAZIRLANMIŞTIR.

El Kitabı

Dökümhane Eğitim Projesi Özel Sayı Serisi

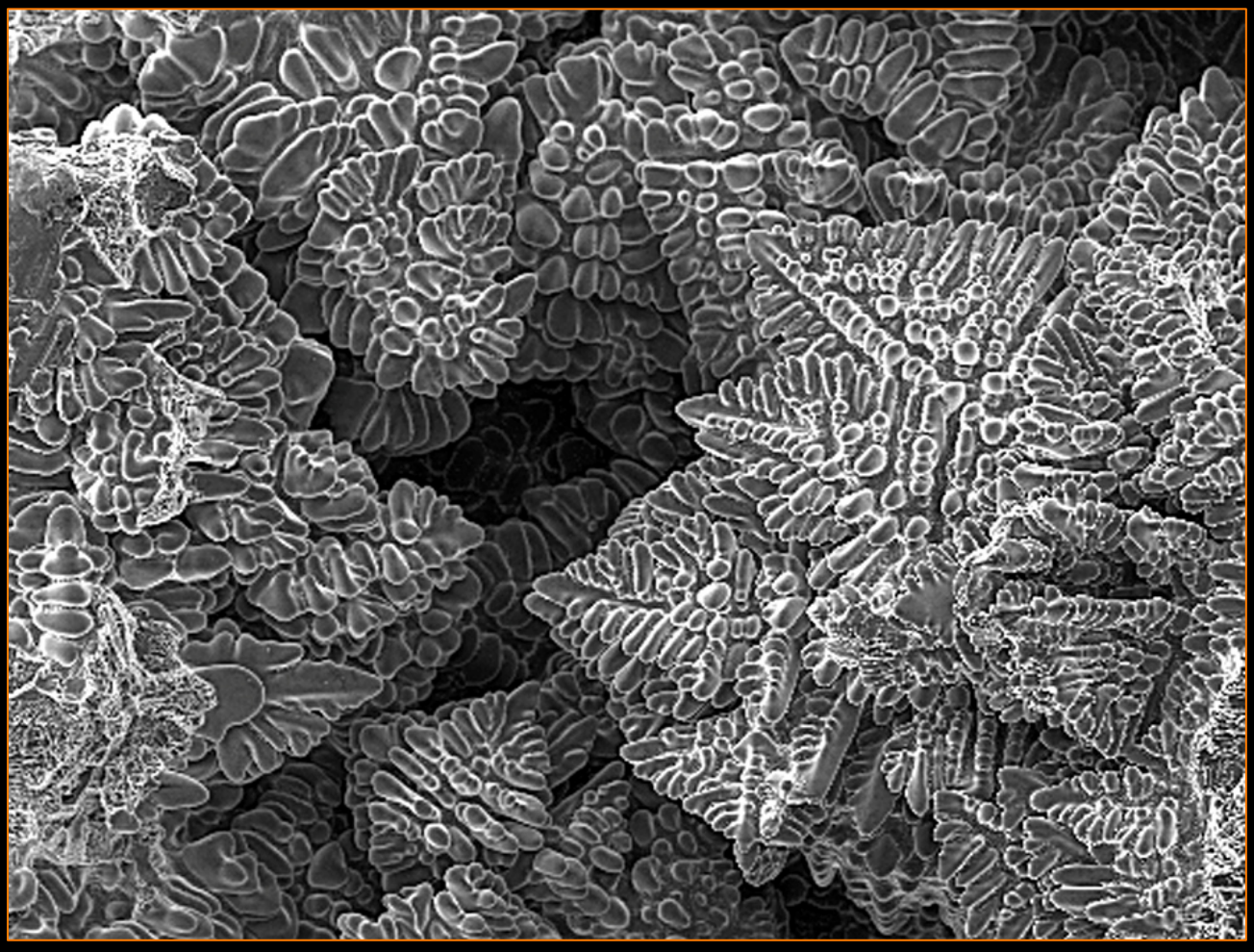
7000

Yıllık Tarihin
Gelecekle Buluşma Noktası

Dokumhane.net

04 Alüminyum Döküm Alaşımları

- Tarihçesi
- Alaşımlanması
- Sıvı temizliği
- Mikroyapısı
- Özellikleri



ARDA ÇETİN © 2017

El Kitabı Sayı: 4
Alüminyum Döküm Alaşımları
Yazan ve yayına hazırlayan: Dr. Arda Çetin
Eylül 2017

Kapak resmi: A356 alaşımındaki bir çekinti boşluğunda görülen α-Al dendritleri.
© A. Khosravani

Dökümhane'den Merhaba

Dökme demirler üzerine odaklanan üç sayının ardından, El Kitabı'nın bu 4. sayısında Türk döküm sanayisinde her sene kapasite artışına tanık olduğumuz alüminyum döküm alaşımları üzerine odaklanıyoruz.

Hafif ve güçlü olması yanında magnezyum gibi rakiplerine kıyasla daha kolay proses edilebilen bir metal de olması nedeniyle, alüminyumun sanayideki kullanımı gittikçe yaygınlaşıyor. Özellikle otomotiv sektöründeki eğilimlere ve elektrikli araç teknolojisindeki gelişmelere baktığımız zaman, alüminyum alaşımlarının önümüzdeki yıllarda daha da yaygın bir şekilde kullanılacaklarını tahmin etmek, çok da zor bir iş değil.

O nedenle bu sayı, özellikle mesleğe yeni başlayan genç mühendislere ışık tutmak ve genç mühendislerin kullanımı gittikçe artan bu önemli metalin döküm süreçlerine hızlı bir başlangıç yapmalarını sağlamak amacıyla hazırlandı.

Alüminyum teknolojisinde ne kadar büyük bir yol aldığımızın anlaşılabilmesi için, bu sayıya öncelikle alüminyumun tarihçesi ve bir zamanlar değerli metal olarak tanınan bu metalin nasıl ucuzlayıp yaygınlaştığıyla başlıyoruz. Bu sayıda alüminyumun tarihçesine ek olarak döküm sektöründe kullanılan alaşımların sınıfları, mikroyapıları ve özellikleri üzerine de kapsamlı bilgiler bulacaksınız.

Türk döküm sektörü için faydalı olması dileğiyle.

Saygılarımla,

Dr. Arda Çetin

Foseco'dan sıvı alüminyum'unuz için en yeni gelişme

Sadece Foseco Yeter

SMARTT – Aluminyum alaşımlarının döner gaz gidermesi için yenilikçi süreç kontrolü

SMARTT, yakın zamanda geliştirilmiş Foseco Degassing Modelini temel alan, döner gaz giderme işlemini simüle eden bir yazılımdır.
Operatör sadece metal ergitme kalitesini SMARTT'a tanımlıyacak ve SMARTT en iyi gaz giderme uygulamasını kendisi ayarlayacaktır.
SMARTT dökümhane ortamına (ortam sıcaklığı (°C) ve ortam nem oranı (%)) en uygun gaz giderme prosesini simüle ederek hesaplar ve en iyi gaz giderme parametrelerini FDU MTS ünitesine aktarır. Foseco SMARTT'ı yeni nesil Foseco rotor ve shaftlarla kullanarak
sabit bir kalite seviyesi ve güvenilir sonuçlar garanti eder.

Foseco ile gerçek potansiyelinizi serbest bırakın

FOSECO

- Tüm FDU ve MTS prosesleri için uygunluk
- Tutarlı gaz giderme sonuçları
- Gaz giderme ve gaz ilavesi için uygunluk
- Operatörden bağımsız parametre seçimi
- Geliştirilmiş gaz giderme veri kayıdı

www.foseco.com.tr

İletişim
Foseco Dökümhane Bölümü
Vesuvius İstanbul Refrakter San. ve Tic. A.Ş.
Gebze Organize Sanayi Bölgesi
1000. Cad. No:1022
41420 Çayırova - Kocaeli / TURKIYE
Tel: +90 262 677 10 50 Fax: +90 262 677 10 60

İçindekiler

07 Alüminyumun kısa tarihçesi
09 Alüminyumun ucuzlaması ve yaygınlaşması: Hall-Héroult işlemi
11 Alüminyum ürünlerinin üretim sırası
13 Alüminyum döküm alaşımları
14 Alüminyum alaşımlarının sergiledikleri özelliklerin kısa bir özeti
15 Alüminyumun popülerleşmesi
16 Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimleri
21 Temel alaşım grupları
24 Alaşımların uygulama bazında değerlendirilmesi
27 Alüminyum alaşımlarının döküm süreçleri
28 Döküm yönteminin seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler
28 Kum kalıba döküm
29 Hassas döküm
30 Kokil döküm
31 Basınçlı döküm
33 Alçak basınçlı döküm
34 Sıkıştırma döküm
34 Yarı-katı döküm
37 Alüminyum dökümünde sıvı temizliği
38 Gaz giderme
39 Hidrojeni sıvıdan nasıl uzak tutabiliriz?
39 Gaz giderme yöntemleri
39 Asal (inert) gaz uygulaması

40 Vakum yöntemi
40 Ultrasonik yöntem
41 Hidrojenin diğer olumsuz etkileri
41 İnklüzyonlar
42 Sıvı temizliği için alınabilecek önlemler
44 Alüminyum dökümünde mikroyapı kontrolü
44 Alüminyum-silisyum alaşımlarına genel bir bakış
46 Alüminyum-silisyum alaşımlarının ötektik modifikasyonu
47 Ötektik üstü alaşımlarda modifikasyon
49 Alüminyum alaşımlarında tane inceltme
52 İntermetalikler
55 Soğuma hızının intermetaliklerin yapısına etkisi
56 Alüminyum alaşımlarında soğuma hızının etkisi
57 Dendrit kol aralığı ve soğuma hızı ilişkisi
58 Dayanımdaki artışı sadece dendritlere mâl etmek doğru mu?
59 Ötektik silisyum yapısının dayanıma etkisi
59 Diğer fazlar nasıl etkileniyor?
60 Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında mikroyapı kontrolü
62 Ötektik silisyumun yapısını etkileyen faktörler
62 Nadir toprak elementlerinin ötektik silisyum üzerindeki etkisi
64 Isıl işlemin ötektik silisyum üzerindeki etkisi
66 Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklık performansı
67 Yüksek sıcaklık ifadesi neyi temsil ediyor?

67 Yüksek sıcaklık dayanımı nasıl arttırılır?
69 Yüksek basınçlı dökümde mikroyapı kontrolü
71 Yüksek basınçlı dökümde fosfor gerekli mi?
72 Döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri
81 Sonuç
83 Kaynaklar ve okuma listesi

Alüminyumun Kısa Tarihçesi

Washington Anıtının tepesindeki alüminyum piramit 1934 senesinde yıldırım düşmesi nedeniyle yenilenmişti. Fotoğraf: Theodor Horydczak (1934).

Amerika Birleşik Devletleri'nin ilk Milli Meclisi, 1783 senesinde George Washington'un anısına bir anıt yapılmasına karar verdi. 1840'lı yıllarda Robert Millis adında bir mimar tarafından tasarlanan ve açılışı 1885 yılına kadar sarkan bu mermer anıt, o güne kadar benzeri yapılmamış büyüklükte, devasa bir uzunluğa sahipti: Washington anıtı 169,35 metrelik yüksekliğiyle, dünyanın en yüksek dikilitaşı sıfatını günümüzde de korumaya devam ediyor. Bu anıt ilk inşa edildiği tarihte, sadece dünyanın en yüksek dikilitaşı değil, aynı zamanda gezegende bulunan en yüksek yapı sıfatına da sahip olmuştu. Fakat 1889 senesinde Paris'te Eyfel Kulesi inşa edilince, Washington Anıtı en yüksek dikilitaş olarak varlığını sürdürmeye devam etse de, dünyanın en yüksek yapısı ünvanını kaybetmiş oldu (Binczewski, 1995).

Dökümhane Akademi projesi kapsamında yayımlanan El Kitabı'na mermer bir dikilitaşın hikayesiyle giriş yapıyor olmamız sizi şaşırtmış olabilir. Fakat bu hikayeyi vardırmak istediğimiz nokta aslında bu mermer taş değil: Bu anıtın en tepesine konumlandırılmış olan metal piramit. Bu koca dikilitaşın tasarımına göre, taşın en tepesine metalden bir piramit yerleştirilmesi

gerekiyordu. Bu piramit için seçilen malzeme, El Kitabı'nın bu sayısında ele alacağımız malzeme: Yani, alüminyum.

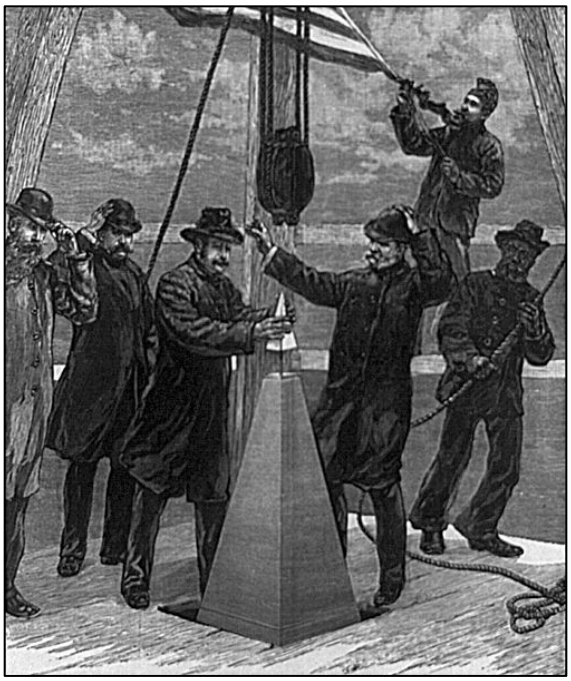
Bu neden enteresan bir bilgi? Çünkü böylesine anlam yüklü bir anıtın zirvesi için alüminyumun tercih edilmiş olması, sadece hafif bir metal olmasından kaynaklanmıyordu. Alüminyum o dönemde aynı zamanda değerli de bir metaldi. İlerleyen yıllarda alüminyum üretimini kolaylaştıran ve bu metalin ucuzlamasına yol açacak olan Hall-Héroult prosesi ortaya çıkana kadar, yüksek hacimde üretilmesi pek kolay olmadığı için, alüminyum fiyatları oldukça yüksek bir seviyedeydi.

Bir fikir vermesi açısından basit bir hesap yapalım: Bu piramitin üretildiği 1884 senesinde, bu projede çalışan bir işçinin günlük ücreti 1 dolardı. Bu rakam aynı zamanda, o dönemde 30 gr alüminyum için ödenen ücreti temsil ediyor. Bugün benzer bir projede çalışan bir işçinin Amerika'daki günlük ücreti 300 dolar seviyesinde. Yani bugünün fiyatları üzerinden düşünecek olursak, o dönemde 1 kg alüminyumun bugünün parasıyla 10.000 dolar gibi bir fiyata sahip olduğunu anlayabiliyoruz. Benzer rakamlarla yapılan bir değerlendirmeyi Binczewski'nin (1995) çalışmasında siz de görebilirsiniz.

Bu piramitin üretimi o dönemde pahalıya patlamış olmasına rağmen, 1934 senesinde yıldırım düşmesi sonucunda gördüğü zarar nedeniyle anıtın renovasyonu sırasında değiştirilmesi gerekmiş. Alüminyumun günümüzdeki fiyatlarını göz önüne aldığımız zaman, anıt üzerine konulan yeni piramitin üretim maliyetinin, ilk piramite kıyasla komik kalacak kadar düşük bir seviyede olduğunu tahmin edebiliriz. İyi ama, fiyatlar arasında neden böyle büyük bir fark var? Bir dönem oldukça değerli olan bir metal, nasıl oluyor da bugün bu kadar ucuzlamış olabilir?

Alüminyum piramitin yerleştirilme anını gösteren bir resim

Kaynak: Harper's Weekly (1884)
(*Kamu malına aktarılmış resim*)



Bu sorunun cevabı, metalik alüminyumun üretim sürecinde saklı. Şimdi gelin, alüminyumu değerli metal konumundan indirip, ucuz bir metal seviyesine çeken tarihi keşfe yakından bakalım.

Alüminyumun ucuzlaması ve yaygınlaşması: Hall-Héroult İşlemi

1886 senesi öncesine alüminyum, gümüşe benzer seviyede fiyatı olan değerli bir metal olarak değerlendiriliyordu. Bunun nedeni az bulunuyor olması değildi: Dünya yüzeyinde en yaygın şekilde bulunan üçüncü element olmasına rağmen, doğal bileşik formundan elde edilmesi oldukça zor ve pahalı bir işlemle mümkün olabiliyordu. Alüminyum içeren bu bileşik ilk olarak 1821 senesinde Fransa'da Les Baux'da keşfediliyor. Zaten Türkçe boksit adı verilen bu cevher (İngilizce: *bauxite*) adını Fransa'daki Les Baux'tan alıyor.

Arkeolojik bulgulara ve çeşitli tarihsel kaynaklara baktığımız zaman, bu keşiften çok daha önceki yıllarda alüminyumun bileşik halinde kullanıldığını gösteren çeşitli örneklere rastlıyoruz: Örneğin yaklaşık 7000 yıl önce Pers İmparatorluğunda (bugünkü İran) alüminyum oksit içeren oldukça dayanıklı çanak ve çömleklerin yapıldığını biliyoruz. Ya da 4000 yıl önce Antik Mısır'da alüminyumlu farklı bileşiklerin kullanılarak boya ve kozmetik ürünlerinin üretildiğini de biliyoruz (Kaynak: ACS, *bilgi için kaynakça kısmına bakınız*). Fakat alüminyumun element formunda, bir metal olarak kullanılabilmesi için 19. Yüzyılın beklenilmesi gerekiyor.

Fransa'da Les Baux-de-Provence'den çıkarılan boksit cevheri

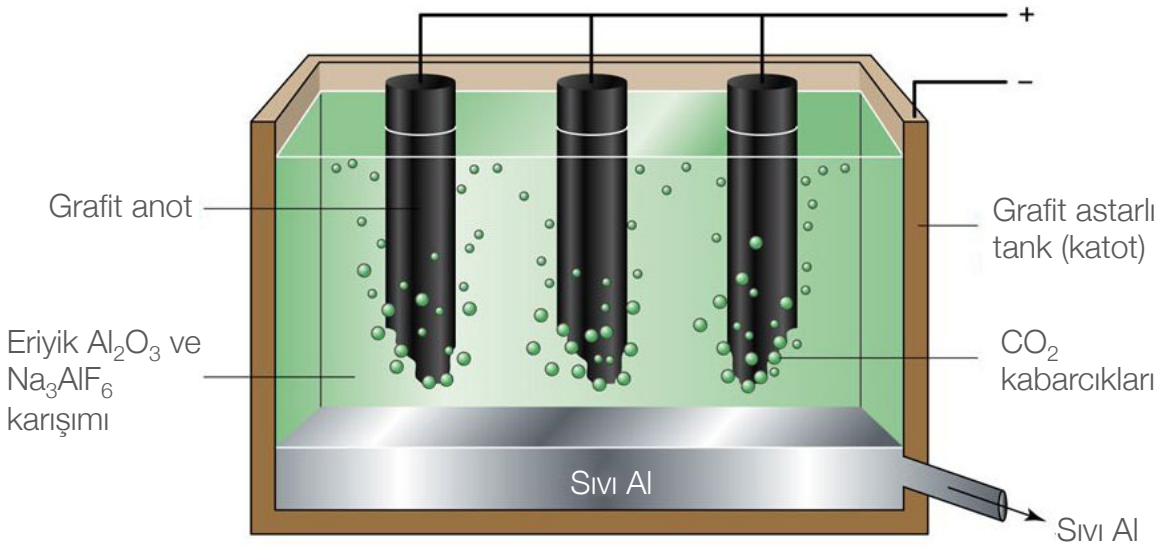
Kaynak: Wikimedia Commons (CC BY-SA 3.0)

Metalik alüminyumun elde edilebilmesi için 19. Yüzyıl civarında çeşitli araştırmalar yürütülmüş olsa da, burada ele alacağımız Hall-Héroult prosesi ortaya çıkana kadar, alüminyumun yüksek miktarda ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesine olanak sağlayabilen bir süreç geliştirilememiş. Bu proses öncesinde alüminyum, metalik sodyumun, alüminyum klorür ile tepkimesi sonucunda elde edilmesini sağlayan bir işlemle üretilebiliyormuş. Bu işlem alüminyumun yüksek miktarlarda üretilmesi için pek uygun olmadığı için, sınırlı miktarlarda üretilebilen bu metalin neden pahalı olduğunu anlayabiliyoruz.

Hall-Héroult prosesinin adından da tahmin edilebileceği üzere, bu proses Hall ve Héroult adında iki farklı araştırmacı tarafından geliştiriliyor. İşin ilginç tarafı ise şu: Bu iki araştırmacı, bu prosesi ortak bir çalışma sonucunda geliştirmiyorlar. Aksine biri ABD'de, diğeriyse Fransa'da birbirlerinden bağımsız yaptıkları çalışmalar sonucunda, yaklaşık aynı zamanda bu prosesi geliştirdiklerini açıklıyorlar: Paris'te Paul Héroult 23 Nisan 1886'da Fransa'dan patent alıyor. Charles Hall ise ABD'de patent başvurusunu 9 Temmuz 1886 tarihinde yapıyor. Bu önemli keşfe imzasını yaklaşık aynı zamanda atan bu iki araştırmacının anısına, bugün bu işlem Hall-Héroult prosesi olarak isimlendiriliyor.

Bu iki araştırmacının birbirlerinden bağımsız olarak iki farklı kıtada geliştirdikleri bu işlem, alümina olarak da bilinen alüminyum oksitin elektroliz işlemiyle indirgenerek, metalik alüminyumun elde edilmesi prensibine dayanıyor. Bu işlemde elektrolit olarak, alüminayı çözebilen kriyolit (Na_3AlF_6) adında eriyik halde bir tuz kullanılıyor. Bu elektrolit içine daldırılan karbon elektrotlardan gelen akım, çözünmüş alümina içeren kriyolit çözeltisine ilerliyor ve alüminanın indirgenmesi sonucunda alüminyum elde ediliyor: Alüminyum erimiş halde hücrenin dibinde birikirken, açığa çıkan oksijen karbon elektrotlarla tepkimeye girip, karbon dioksit gaz kabarcıkları oluşturuyor. Bu işlem sayesinde bir zamanlar sadece düşük miktarlarda elde edilebilen metalik alüminyumun yüksek tonajlarda üretilmesi ve dolayısıyla ucuzlaması sağlanabiliyor.

Hall-Héroult İşleminin Şematik Gösterimi



Alüminyum ürünlerinin üretim sırası

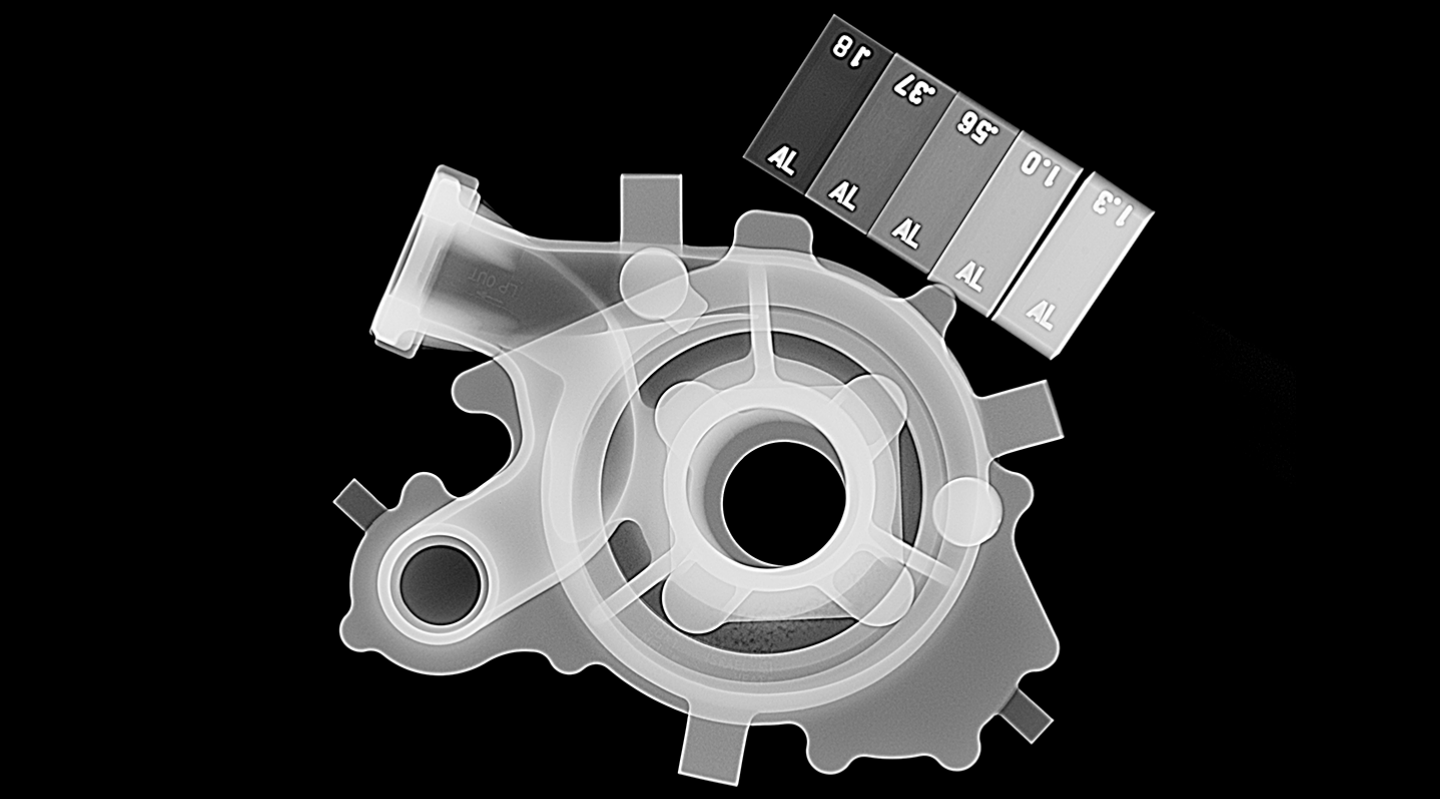
Önceki sayfalarda tarif edilen Hall-Héroult prosesi, alüminyum üretiminde hikayenin tamamını temsil etmiyor. Çünkü bu proseste kullanılan alüminanın da öncelikle boksit madeninden elde edilmiş olması gerekiyor.

Tüm sürece en başından itibaren bakacak olursak, doğal olarak ilk adımda boksit cevherinin madenlerden çıkarılması gerekiyor. Ardından bu boksit cevherinden Bayer prosesi adı verilen bir işlemle alümina elde ediliyor.

Ardından gelen adımda, ayrıntıları daha önce verilen Hall-Héroult prosesiyle alümina indirgenerek metalik alüminyum elde ediliyor. Son olarak elde edilen alüminyumun dökümhanelerde eritilip alaşımlandığını ve El Kitabı'nın bu sayısında ele alacağımız alüminyum döküm alaşımlarının üretim aşamasına nihayet geldiğimizi görüyoruz.

İsterseniz artık işin tarihsel boyutunu bir kenara bırakalım ve bu genç metali baz alarak sanayide ürettiğimiz farklı alaşımların türlerine ve özelliklerine bakmaya başlayalım.

Global
PARTNERİNİZ.
Uluslararası geniş ağımız,
Stok gücümüz ve
Kaliteli ürünlerimiz ile ...
SEKTÖRDE
20. YIL
AVEKS
www.aveks.com
BUREAU
VERITAS
İmes Sanayi Sitesi C Blok 306 Sk. No. 4
Y. Dudullu, Ümraniye, İstanbul, 34775 TURKEY
T. +90 (216) 540 00 60 F. +90 (216) 540 00 61
Eski Yapanlar Plaza No. 1/1 K.6
S.M. Fatih Öngül Sk. Kozyatağı, İstanbul, 34742 TURKEY
T. +90 (216) 410 00 60 F. +90 (216) 410 00 90
E-5 Karayolu Üzeri Tavşanlı Mevkii
Yolbulan Antrepo Yanı Gebze, Kocaeli TURKEY
T. +90 (262) 724 99 14-15 F. +90 (262) 724 99 12



Alüminyum Döküm Alaşımları

Havacılık uygulamaları için alüminyumdan üretilen döküm bir parçanın X-ray görüntüsü (© Vidisco).

Önceki sayfalarda bahsettiğimiz Hall-Héroult prosesinin ticarileşmesi ve alüminyumun yüksek tonajlarda ve ekonomik bir şekilde elde edilebilmesi sonucunda, doğal olarak dökümhaneler bu genç metalle ilk ilgilenmeye başlayan işletmeler arasına giriyor. Her ne kadar mekanik özelliklerin açısından yüksek potansiyele sahip bir metal olsa da, dökümhanelerin alüminyumla ilk münasebeti daha ziyade günlük eşyaların üretimi çerçevesinde gerçekleşiyor: Örneğin kapı numaraları, el aynaları ya da dekoratif lamba parçaları gibi. Alüminyum fiyatlarının düşmeye devam etmesi ve bu hafif metalin aslında mühendislik uygulamaları için de uygun bir aday olabileceğinin fark edilmesi sonucunda, 19. Yüzyıl sonlarına doğru alüminyumun yavaş yavaş mühendislik uygulamalarında da kullanılmaya başladığını görüyoruz.

Alüminyum saf haldeyken oldukça yumuşak olduğu için, mühendislik uygulamalarında ciddiye alınabilmesi için alaşımlanması ve elde edilen alaşımların farklı özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiş olması gerekiyor. Bu çerçevede yapılan çalışmalar sayesinde, alüminyumda kullanıan alaşım elementlerine bağlı olarak ne tür özellikler elde edilebileceği konusunda oldukça zengin verilere artık ulaşabiliyoruz.

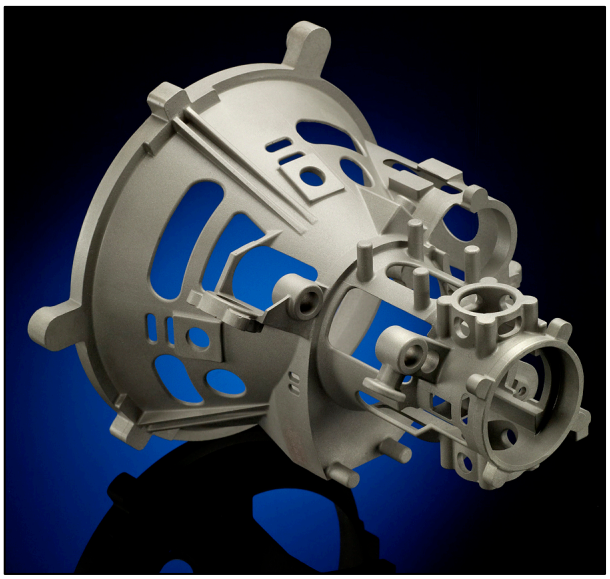
Alüminyum döküm parçalarla ilgili olarak elde edilen ilerlemeler sadece alaşımlama üzerine değil elbette: Kokil ve basınçlı döküm gibi farklı üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, ayrıca ısıl işlemle özellikleri optimize edilebilen alaşımların tespit edilip, bu süreçlerin de geliştirilmesi, bu metalin çok daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlayan etkenler arasında sayılabilir.

Alüminyum alaşımlarının sergiledikleri özelliklerin kısa bir özeti

İlerleyen sayfalarda alüminyum alaşımlarının sergiledikleri özellikler hakkında kapsamlı bilgiler vereceğiz. Fakat ayrıntılara girmeden önce büyük resmi anlamak adına, isterseniz bu alaşımların sergiledikleri özelliklerin genel çerçevesini bir inceleyelim.

İlk olarak çekme dayanımıyla başlayalım. Bu alaşımların sergilediği çekme dayanımı değerleri, yaklaşık olarak 70 – 500 MPa aralığında değişim gösteriyor. Her ne kadar çelik kadar kuvvetli bir malzeme olmasa da, bu değerler alüminyum alaşımlarının gri dökme demirin sergilediği değerlerin üzerine çıkabildiğini, küresel grafitli (sfero) dökme demirlerle boy ölçüştüğünde ise perlitik alaşımlar kadar olmasa da, ferritik bir sfero dökme demirin üzerine çıkabilecek dayanım değerleri sergileyebildiğini gösteriyor. Tabii sfero dökme demirlerin en az bir 400 MPa civarında çekme dayanımına sahip olduklarını, yani en zayıf sfero dökme demirin bile, alüminyum alaşımlarının sergilediği çekme dayanımı aralığının üst sınırına yakın değerlerde olduğunu vurgulamamızda fayda var.

Hassas döküm ile üretilmiş bir alüminyum parça
Kaynak: O'Fallon Casting (ABD)



Akma dayanımı değerlerine baktığımızda ise, alüminyum alaşımlarının yaklaşık 20 – 450 MPa aralığında değerler sergileyebildiğini görüyoruz. Uzama değerleri ise, alaşımın kompozisyonuna, uygulanan döküm yöntemi ve ısıl işleme bağlı olarak %1'in altındaki değerlerden başlayıp, %30 gibi yüksek değerlere kadar çıkabiliyor. Bu değerler de bize bu alaşımların dökme demirlerle kıyaslanabilir seviyede özellikler sergileyebildiğini gösteriyor. Alüminyum alaşımlarının sergilediği sertlik değerleri ise, dökme demir ve çelik alaşımlarına kıyasla oldukça düşük kalıyor: Sertlik değerlerinin genellikle 30 – 150 HB aralığında değiştiğini görüyoruz.

Bu noktada dikkat edilmesi gereken bir konu var: Alüminyum alaşımlarını dökme demir ve çelik alaşımları karşısında üstün kılan en önemli özelliklerinin düşük yoğunlukları olduğunu vurgulamamız lazım. Alüminyum alaşımlarının yoğunluk değerleri yaklaşık 2,60 – 2,95 g/cm^3 arasında değişiyor. Bu değerler, alüminyum alaşımlarının bazı dökme demir ve çelik alaşımlarına kıyasla yaklaşık üç kat daha hafif olduklarını gösteriyor. Diğer bir deyişle yukarıda verdiğimiz dayanım değerlerini eğer yoğunluk değerlerine oranlayarak dikkate alırsak, alüminyum alaşımlarının demir bazlı alaşımlara kıyasla ne kadar üstün olduklarını görebiliyoruz.

Alüminyum alaşımlarının avantajları bununla sınırlı değil: Döküm süreçlerinin demir bazlı alaşımlara kıyasla çok daha kolay olması, daha düşük sıcaklık ve enerji gereksinimine sahip olmaları, döküm parçaların sergiledikleri yüksek yüzey kalitesi, boyutsal kararlılık ve bu özelliklerin getirdiği düşük temizleme ve işleme ihtiyacı, bu alaşımların sahip olduğu diğer iyi özellikler arasında gösterilebilir.

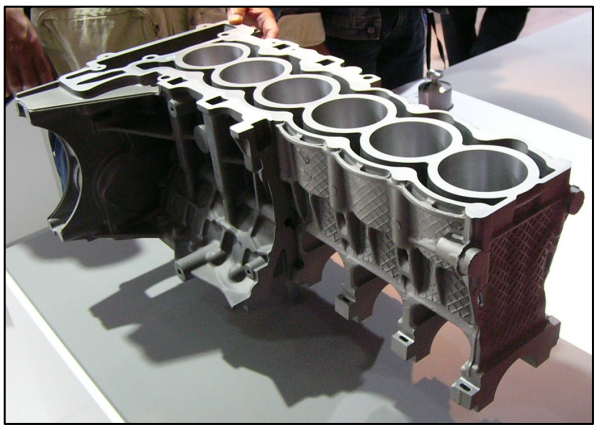
Tabii sadece avantajlar üzerinde durursak, diğer alaşımlara haksızlık etmiş oluruz. Alüminyum alaşımlarının bazı zayıf yönleri de var. Döküm yöntemi tercihine bağlı olarak dökülebilen kesit kalınlıklarında bazı sınırlamalar olduğunu görebiliyoruz. Dökülen parçanın geometrisi çok karmaşık olduğu durumlarda, katılaşma sürecinin işleyişine bağlı olarak hem parça yüzeyinde göze çarpan, hem de mikroyapıda kendini gösteren bazı problemlerle karşılaşabiliyoruz.

Alüminyumun popülerleşmesi

Alüminyumu demir bazlı alaşımlar karşısında öne çıkaran en önemli özelliğin düşük yoğunluğu olduğunu biraz önce belirtmiştik. Gerçekten de alüminyum alaşımlarının sergiledikleri akma ve çekme dayanımı değerlerini parçaların ağırlıklarıyla birlikte değerlerlendirdiğimiz zaman, özgül dayanımlarının (İngilizce: *specific strength*) demir bazlı alaşımların oldukça üstünde olabileceğini görebiliyoruz. Alüminyum alaşımları, parça ağırlıklarının azaltılması konusunda böyle bir avantaj sundukları için, doğal olarak enerji verimliliğinin önemli olduğu otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkıyorlar. Bu eğilimin önümüzdeki senelerde de devam edeceğini tahmin etmek, pek de zor bir iş olmasa gerek.

Dış kısmı Mg, iç kısmı Al-Si alaşımından basınçlı dökümle üretilmiş motor bloğu

BMW N52. Kaynak: Wikimedia Commons



Malzeme tercihleriyle ilgili olarak son yıllarda gittikçe daha çok önem kazandığını gördüğümüz bir diğer konu da, malzemenin geri dönüşüme uygunluğu: Bu konu hem enerji verimliliği açısından, hem de çevre açısından önem taşıyor. Birincil alüminyum üretiminin oldukça yoğun bir enerji gereksinimi olmasına rağmen, indirgenme işleminin sahip olduğu enerji ihtiyacının yaklaşık %5 gibi bir kısmını kullanarak alüminyum parçaların geri dönüşümü sağlanabiliyor. Hem enerji verimliliği açısından sunduğu bu avantaj, hem de her tür alüminyum bazlı ürünün %90 gibi yüksek verim değerleriyle geri dönüştürülebiliyor olması, bu malzemenin popülerleşmesine katkı sağlayan diğer etkenler arasında gösterilebilir.

Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimleri

Alüminyum döküm alaşımları birkaç farklı standart kapsamında tanımlanıyor olmalarına rağmen, genellikle Aluminum Association (AA) tarafından tanımlanan gösterimlerin kabul gördüğünü görüyoruz. Bu gösterimlerde alüminyum döküm alaşımları, alaşımın içerdiği elementler dikkate alınarak sınıflandırılıyor.

Bu sınıflara geçmeden önce ufak bir parantez açıp, alaşım elementleri hakkında birkaç noktayı aydınlatmamız faydalı olabilir. Alaşım elementleri, özellikler üzerindeki etkileri dikkate alınarak üç farklı grup altında ele alınıyor.

Majör (ana) alaşım elementleri: Parçanın özelliklerini ve dökülebilirliğini etkileyen temel alaşım elementleri.

Minör alaşım elementleri: Katılaşma sürecini etkileyen, ötektik yapıda modifikasyon etkisi yaratan, birincil dendrit yapısını incelten ya da bazı fazların oluşumun teşvik eden veya engelleyen elementler.

Empürite (istenmeyen) elementler: Dökülebilirlik üzerindeki etkileri yanında, malzeme özelliklerini de olumsuz yönde etkileyen parçacıkların oluşumuna neden olabilen elementler.

Birazdan üzerinde duracağımız alaşım grupları tanımlanırken, alaşımın içerdiği majör (ana) alaşım elementlerini dikkate alıyoruz. Alaşımın türüne bağlı olarak, alaşım içinde bulunması gereken minör ve empürite elementler hakkında bazı kısıtlamaların ya da tercihlerin belirtildiğini de görebiliyoruz.

AA alaşım gösterimleri dört basamaktan meydana geliyor. Üçüncü ve dördüncü basamaklar, bir noktayla ayrılıyor: 356.0 gibi. Tahmin edebileceğiniz üzere bu basamaklarda yer alan rakamların her biri, bir anlam ifade ediyor:

Birinci basamak: Majör (ana) alaşım elementleri.

İkinci ve üçüncü basamak: Alaşımın ayrıntılarını tanımlayan rakamlar.

Dördüncü basamak: Döküm (0), standart ingot (1) ya da standart ingottan daha dar kompozisyon aralığına sahip ingot (2).

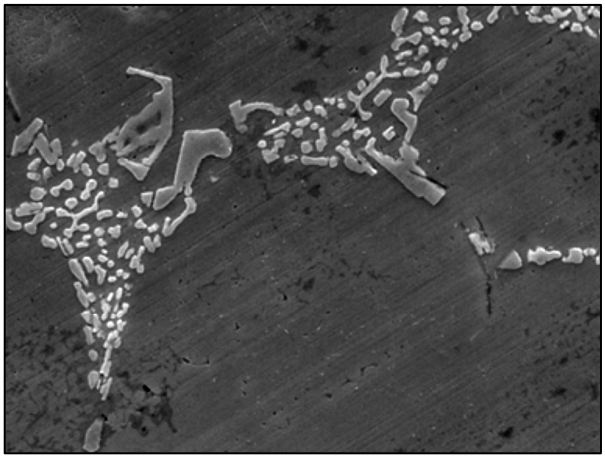
Eğer alaşımın kompozisyonunda sayısal olarak ifade edilemeyecek kadar küçük bir farklılık gösterilmek isteniyorsa, bu basamakların önüne bir de harf geldiğini görebiliyoruz. Örneğin A356.0 ya da B356.0 gibi.

Şimdi, ilk basamakta yer alan sayılar hangi majör (ana) alaşım elementlerini temsil ediyor, ona bakalım.

1xx.x: Saf alüminyum (en az %99,00 saflıkta)
2xx.x: Alüminyum – bakır alaşımları
3xx.x: Alüminyum – silisyum ve bakır ve/veya magnezyum alaşımları
4xx.x: Alüminyum – silisyum alaşımları
5xx.x: Alüminyum – magnezyum alaşımları
6xx.x: *Kullanılmıyor*
7xx.x: Alüminyum – çinko alaşımları
8xx.x: Alüminyum – kalay alaşımları
9xx.x: Alüminyum – diğer elementlerin alaşımları

1xx.x ile gösterilen saf alüminyum üzerinde biraz durmamızda fayda var. Bu noktada birçok okuyucunun aklında, saf alüminyum neden alaşım olarak ele alınıyor sorusu olabilir. Bu gösterimde ikinci ve üçüncü basamaklarda yer alan rakamlar, izin verilen en düşük alüminyum miktarını temsil ediyor. Bu malzemede minimum %99,00 oranında alüminyum olması gerektiğini yukarıda belirtmiştik. Dolayısıyla bu basamaklardaki rakamlar, 99'dan sonra, yani virgülden sonra gelen değerleri belirtiyorlar. Örneğin en az %99,70 oranına alüminyum olması gerekiyorsa, alaşım 170.0 şeklinde gösteriliyor.

A356 alaşımında ötektik silisyum parçacıkları
Kaynak: Jiang et al. (2012)



2xx.x ve 8xx.x arasında yer alan diğer alaşımlarda ise, ikinci ve üçüncü basamaklarda yer alan rakamlar için benzer bir şeyi söyleyemeyiz. Bu rakamlar, bazı özel alaşımları temsil edecek şekilde belirleniyorlar. Dolayısıyla eğer bu sayıların neyi temsil ettiğini bilmiyor ya da bir kaynaktan bulamıyorsanız, akıl yürütme ile ne anlama geldiklerini anlama şansınız bulunmuyor.

Alaşım gösteriminin başında yer alan harf ise, belli bir kompozisyonun minör element varyasyonlarını temsil ediyor. Örneğin 356.0 alaşımının varyasyonları olan A356.0, B356.0 ya da C356.0 gibi alaşımlarda aynı majör (ana) alaşım elementlerinin bulunduğunu, fakat harf alfabede A, B, C şeklinde ileri doğru gittikçe, alaşımın azalan derecede empürite limitlerine sahip olduğunu anlayabiliyoruz.

Son olarak bir de en sonda yer alan rakam üzerinde duralım. Bu değerin 0 olmasının, döküm parça olarak üretilen bir alaşımdan bahsettiğimiz anlamına geldiğini daha önce belirtmiştik: 356.0 gibi. Bu nedenle döküm alaşımlardan bahsedilirken çoğu zaman sondaki bu "0" rakamının göz ardı edildiğini ve alaşımın sadece ilk üç basamakla gösterildiğini görebiliyoruz: 356 gibi. Her ne kadar doğru gösterimin 356.0 ya da 240.0 şeklinde olması gerekiyor olsa da, sanayide yerleşmiş bu alışkanlığın farklında olmamızda fayda var. Eğer sonda yer alan bu rakam 1 ya da 2 değerini almışsa, son döküm parçanın kompozisyonunun değil, dökümde kullanılacak ingotun kompozisyonunun belirtildiğini anlayabiliyoruz. Ergitme sırasında alaşımın kompozisyonunda olabilecek değişimleri de dikkate almak amacıyla, son döküm parça ve dökümde kullanılacak ingot arasında böyle bir ayrım yapıldığını görebiliyoruz.

Tablo: Alüminyum döküm alaşımlarının nominal kompozisyonları.

Alaşım	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	Notlar
201.0	-	4,60	0,35	0,35	-	-	-	0,25	1
204.0	-	4,60	-	0,25	-	-	-	-	
A206.0	-	4,60	0,35	0,25	-	-	-	0,22	
208.0	3,00	4,00	-	-	-	-	-	-	
213.0	2,00	7,00	-	-	-	-	2,5	-	2
222.0	-	10,00	-	0,25	-	-	-	-	
224.0	-	5,00	0,35	-	-	-	-	-	3
240.0	-	8,00	0,50	6,00	-	0,50	-	-	
242.0	-	4,00	-	1,50	-	2,00	-	-	
A242.0	-	4,10	-	1,40	0,20	2,00	-	0,14	
295.0	1,10	4,50	-	-	-	-	-	-	

Tablo (devam): Alüminyum döküm alaşımlarının nominal kompozisyonları.

Alaşım	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	Notlar
308.0	5,50	4,50	-	-	-	-	-	-	
319.0	6,00	3,50	-	-	-	-	-	-	
328.0	8,00	1,50	0,40	0,40	-	-	-	-	
332.0	9,50	3,00	-	1,00	-	-	-	-	
333.0	9,00	3,50	-	0,28	-	-	-	-	
336.0	12,00	1,00	-	1,00	-	2,50	-	-	
354.0	9,00	1,80	-	0,50	-	-	-	-	
355.0	5,00	1,25	-	0,50	-	-	-	-	
C355.0	5,00	1,25	-	0,50	-	-	-	-	4
356.0	7,00	-	-	0,32	-	-	-	-	
A356.0	7,00	-	-	0,35	-	-	-	-	4
357.0	7,00	-	-	0,52	-	-	-	-	
A357.0	7,00	-	-	0,55	-	-	-	0,12	4, 5
359.0	9,00	-	-	0,60	-	-	-	-	
360.0	9,50	-	-	0,50	-	-	-	-	
A360.0	9,50	-	-	0,50	-	-	-	-	4
380.0	8,50	3,50	-	-	-	-	-	-	
A380.0	8,50	3,50	-	-	-	-	-	-	4

Tablo (devam): Alüminyum döküm alaşımlarının nominal kompozisyonları.

Alaşım	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	Notlar
383.0	10,50	2,50	-	-	-	-	-	-	
384.0	11,20	3,80	-	-	-	-	-	-	
B390.0	17,00	4,50	-	0,55	-	-	-	-	
413.0	12,00	-	-	-	-	-	-	-	
A413.0	12,00	-	-	-	-	-	-	-	4
443.0	5,20	-	-	-	-	-	-	-	
B443.0	5,20	-	-	-	-	-	-	-	4
C443.0	5,20	-	-	-	-	-	-	-	6
A444.0	7,00	-	-	-	-	-	-	-	
512.0	1,80	-	-	4,00	-	-	-	-	
513.0	-	-	-	4,00	-	-	1,80	-	
514.0	-	-	-	4,00	-	-	-	-	
518.0	-	-	-	8,00	-	-	-	-	
520.0	-	-	-	10,00	-	-	-	-	
535.0	-	-	0,18	6,80	-	-	-	0,18	7
705.0	-	-	0,50	1,60	0,30	-	3,00	-	
707.0	-	-	0,50	2,10	0,30	-	4,20	-	
710.0	-	0,50	-	0,70	-	-	6,50	-	

Tablo (devam): Alüminyum döküm alaşımlarının nominal kompozisyonları.

Alaşım	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	Notlar
711.0	-	0,50	-	0,35	-	-	6,5	-	8
712.0	-	-	-	0,58	0,50	-	6,0	0,20	
713.0	-	0,70	-	0,35	-	-	7,5	-	
771.0	-	-	-	0,90	0,40	-	7,0	0,15	
850.0	-	1,0	-	-	-	1,0	-	-	9
851.0	2,5	1,0	-	-	-	0,50	-	-	9
852.0	-	2,0	-	0,75	-	1,2	-	-	9

Notlar:
1. Aynı zamanda %0,70 oranında gümüş (Ag) içerir.
2. Aynı zamanda %1,20 oranında demir (Fe) içerir.
3. Aynı zamanda %0,10 oranında vanadyum (V) ve %0,18 zirkonyum (Zr) içerir.
4. Üstünde yer alan alaşıma kıyasla çok daha düşük oranda empürite element içermesi istenir.
5. Aynı zamanda %0,055 oranında berilyum (Be) içerir.
6. Aynı zamanda %2,00'a kadar demir (Fe) içerir.
7. Aynı zamanda %0,005 berilyum (Be) ve %0,005 boron (B) içerir.
8. Aynı zamanda %1,00 demir (Fe) içerir.
9. Aynı zamanda %6,20 kalay (Sn) içerir.

Temel alaşım grupları

Önceki sayfalarda verilen tabloda her ne kadar birçok alüminyum alaşımı tanımanmış olsa da, aslında bütün bu alaşımları aşağıda verilen yedi ana grup içinde ele alabiliyoruz:

- Alüminyum-bakır (2xx)
- Alüminyum-silisyum-bakır (3xx)
- Alüminyum-silisyum-magnezyum (3xx)
- Alüminyum-silisyum (4xx)
- Alüminyum-magnezyum (5xx)
- Alüminyum-çinko-magnezyum (7xx)
- Alüminyum-kalay (8xx)

Şimdi teker teker bu temel alaşım gruplarına ve bu alaşımlardan beklenen özelliklere göz atalım.

Alüminyum-bakır alaşımları (2xx):

Bakır ile alaşımlanan alüminyum alaşımları, genellikle yüksek sıcaklıkta dayanım ve tokluk istenen uygulamalarda tercih ediliyorlar. Bu amaçla yaygın kullanılan alaşımlar arasında 242.0 ve A242.0 gibi alaşımları gösterebiliriz. Zaman zaman bakırın etkisini desteklemek amacıyla bu alaşımlarda nikel kullanıldığını da görebiliyoruz.

İyi bir akışkanlığa ve dökülebilirliğe sahip bu alaşımların zayıf yönleri arasında katılaşma sırasında çatlama ve dendritler arasında çekinti oluşturma eğilimlerini gösterebiliriz. İstenmeyen elementlerin miktarları kontrol altında olduğu zaman oldukça yüksek süneklik sergileyebilen bu alaşımlar, yüksek çekme dayanımları ve sünekliklerinin bir sonucu olarak oldukça iyi düzeyde tokluk değerlerine sahip oluyorlar.

Alüminyum-silisyum-bakır alaşımları (3xx):

Sanayide oldukça yaygın bir şekilde döküldüğünü gördüğümüz bu alaşımlar bakır yüksek tutulacak şekilde üretilebildiği gibi, silisyumu yüksek olacak şekilde de üretilebiliyorlar. Örnek olarak ötektik-üstü kompozisyona sahip, %12-%30 arası silisyum içeren silisyum alaşımlarına da zaman zaman bakır eklenildiğini görebiliyoruz. Bu alaşımlarda bulunan yüksek silisyumun ortaya çıkardığı birincil silisyum parçacıkları alaşıma aşınma direnci sağlarken, bakır kullanılması matrisin sertleşmesine ve yüksek sıcaklık dayanımı kazanmasını sağlıyor. 3xx serisi alaşımlarda %5,6'nın altında bakır içeren alaşımların ısıl işleme uygun olduklarını da son bir not olarak belirtelim.

Alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımları (3xx):

Bu da sanayi de oldukça yaygın bir şekilde döküldüğünü gördüğümüz alaşım gruplarından bir tanesi. Örneğin 356 ve A356 gibi döküm alaşımlarını, yaygın olarak dökülen 3xx alaşımlarına örnek olarak gösterebiliriz. Silisyumun sağladığı özelliklere ek olarak (ayrıntılar için 4xx alaşımlara bakınız) alaşımda bir miktar magnezyum da bulunması, ısıl işlem sonrasında oldukça iyi mekanik özelliklerin elde edilebilmesini sağlıyor. Bu özelliklerin ötektik modifikasyon ile daha da ileri taşınabildiğini de belirtelim.

Bu alaşımlar her ne kadar oldukça iyi mekanik özelliklere sahip desek de, elde edilen dayanım değerlerinin bakır kullanıldığı zaman elde edilen değerlere kıyasla düşük kaldığını da belirtmemiz gerekir.

Alüminyum-silisyum alaşımları (4xx):

Alüminyum-silisyum alaşımları, döküm sektöründe üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek oranı teşkil ediyor (özellikle 3xx serisi alaşımlar da göz önüne alındığında). Nispeten düşük dayanım sergileyen bu alaşımlar, istenmeyen elementlerin miktarları düşük tutulduğunda çok yüksek sünekliğe sahip olabiliyorlar. Bu alaşımların mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki yaratan faktörlerden bir tanesi, ötektik katılaşma sırasında oluşan silisyum parçacıklarının

biçimsel özellikleri: Sivri köşelere sahip, iğnemsi bir yapıda katılaşan bu parçacıklar, ötektik modifikasyon adı verilen bir işlem sayesinde sivri köşelerden arınmış, yuvarlanmış kenarlara sahip olacak şekilde katılaştırılabiliyor. Alüminyum-silisyum alaşımlarının dayanım ve sünekliği üzerinde olumlu etki yaratan bu işlemin etkileri, özellikle kum kalıplara dökülen alaşımlarda öne çıkıyor. Bu işlemin ayrıntılarını ilerleyen sayfalarda kapsamlı bir şekilde ele alacağız. Genellikle stronsiyum (Sr) ile yapılan ötektik modifikasyon işleminin, ötektik üstü kompozisyona sahip alaşımlarda bulunan büyük birincil silisyum paracıklarını etkilemediğini ve bu parçacıkları inceltmek için fosfor (P) kullanılabileceğini son bir not olarak ekleyelim.

Alüminyum-magnezyum alaşımları (5xx):

Özellikle korozyona karşı gösterdikleri yüksek dayanımla tanınan bu alaşımlar, mekanik özellikler açısından genellikle orta seviye diyebileceğimiz bir düzeyde değerler sergiliyorlar. Korozyon yaratan ortamlarda iyi bir dayanım sergiliyor olmaları nedeniyle, bu alaşımların özellikler gıda sektöründe, içecek kutularında kullanıldığını görebiliyoruz. 535 gibi alaşımlar yüksek boyutsal kararlılık da sergileyebildiği için, elektronik cihazlarda da tercih edilebiliyorlar.

Sanayide en yaygın şekilde üretildiğini gördüğümüz alüminyum-silisyum alaşımlarıyla kıyaslandığında, bu alaşımların üretim süreçlerinin biraz daha hassasiyet gerektirdiğini görüyoruz: Hatasız döküm için özellikle yolluk ve besleyici sistemlerinin daha dikkatli bir şekilde tasarlanması ve silisyumlu alaşımlara kıyasla daha büyük besleyicilerin kullanılması gerekiyor. Sıvı alaşım içinde magnezyum bulunması oksitlenme hızını arttıracağı için, önlem alınmadığı takdirde magnezyum kayıplarının yüksek olabildiğini, aynı zamanda sıvı içinde çeşitli oksit inklüzyonlarının oluşabildiğini görebiliyoruz.

Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları (7xx):

Çinko içeren alüminyum-magnezyum alaşımlarının akla gelen ilk özelliği, oda sıcaklığında doğal yaşlanma becerisine sahip olmaları: Bu becerileri sayesinde bu alaşımlar optimum mekanik özelliklerine üretimleri üzerinden yaklaşık 1 ay geçtikten sonra ulaşıyorlar. Bu özelliklerinin sağladığı bir diğer dikkat çeken fayda da, ısıl işlem ve su verme süreçlerinin getirdiği tüm olumsuz etkilerden muaf olmaları: Maliyet avantajı bir yana, bu işlemleri gören parçalarda karşımıza çıkabilen çarpılma ve kalıntı gerilme gibi problemleri, bu alaşımlarda görmüyoruz.

Genellikle iyi çekme özellikleri sergileyen bu alaşımların dökülebilirlikleri pek iyi olmadığı için, iyi bir döküm pratiği ve cömert bir besleyici kullanımı gerektirebiliyorlar. Bu alaşımların hızlı katılaşmaya yol açan döküm süreçleri için pek uygun olmadıklarını da son bir not olarak ekleyelim: Hızlı katılaşma sonucunda çinko ve magnezyum segregasyonu (birikmesi) gerçekleşebildiği için, doğal yaşlanma etkisinin sadece birikme olan kısımlarda gerçekleşmesi ve

parçanın tüm hacmine yayılmaması gibi problemler yaşanabiliyor.

Alüminyum-kalay alaşımları (8xx):

Alüminyum-kalay alaşımlarını, yukarıda saydığımız diğer alaşımlardan ayıran bir özellik var: Bu iki metal sıvı fazdayken birbirleriyle karışmıyorlar. Tıpkı su ve zeytinyağı gibi. İki metal arasındaki yoğunluk farkı da dikkate alındığında, sıvı fazda bu iki metalin katmanlı bir şekilde birbirlerinden ayrılabileceklerini gözümüzde canlandırabiliriz. Bu etkinin karşısında durmak için sıvı fazdayken bu karışımın etkili bir şekilde karıştırılması ve dağılan kalay damlacıklarının tekrar topaklanmasına fırsat vermeden alaşımın hızlıca katılaştırılması gerekiyor.

Özellikle rulmanlarda kullanıldığını gördüğümüz bu alaşıma bakır da eklenmesi, alaşımın ısıl işlem görebilir ve çökelmeyle sertleşebilir hale gelmesini sağlıyor. Aynı zamanda alaşıma düşük miktarlarda bizmut, kurşun ya da kadmiyum eklenmesi, malzemenin kolay işlenebilir bir hale gelmesine de yardımcı oluyor.

Alaşımların uygulama bazında değerlendirilmesi

Alüminyum alaşımlarını her ne kadar esas olarak içerdikleri alaşım elementlerini baz alarak sınıflandırıyor olsak da, bu sınıflandırma hangi alaşımların hangi uygulama için tercih edilmesi gerektiği konusunda bize pek bir şey söylemiyor. Bu nedenle bu başlık altında yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarına bir de uygulama perspektifinden bakmaya çalışacağız.

Alüminyum alaşımları jantlarda yaygın olarak kullanılıyor

(Kamu malına aktarılmış resim, CC0)

Alüminyum alaşımlarını uygulamalar etrafında değerlendirirken, yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için geliştirilen alaşımlar, yüksek sıcaklığa uygun alaşımlar, aşınma dayanımı gerektiren uygulamalar için geliştirilen alaşımlar ve genel kullanıma yönelik alaşımlar gibi bir çerçeve oluşturmamız mümkün olabilir. İlk olarak yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için geliştirilen alaşımlarla başlayalım. Alüminyum alaşımları her ne kadar belli bir dayanım sergileyebiliyor olsalar da, yüksek dayanımlı çelikler ya da östemperlenmiş sfero dökme demirler (ADI) gibi malzemelerle kıyaslandıkları zaman zayıf kaldıklarını biliyoruz. Fakat yine de kendi potansiyelleri içinde değerlendirdiğimiz zaman, bazı alaşımların oldukça iyi dayanım değerleri sergileyebilecek şekilde tasarlanabildiklerini görebiliyoruz.

Özellikle havacılık sektöründe yapısal malzeme olarak tercih edilen, ya da füze gövdesi gibi uygulamalarda savunma sanayiinde kullanılan bu alaşımlar, hidrolik pompalar gibi uygulamalarda da tercih edilebiliyorlar. Yüksek dayanıma sahip bu alaşımlar arasında 350 ila 480 MPa aralığında çekme dayanımı sergileyebilen A201.0, A206.0 ve 224.0 gibi alüminyum-bakır alaşımları yanında 180 ila 350 MPa arasında çekme dayanımı sergilemesi beklenen A, B, C ve D356.0 alaşımlarını, A, B, C ve D357 alaşımlarını, 358.0 ve 359.0 alaşımlarını gösterebiliriz. Tabii bu noktada bu alaşımların kendilerinden beklenen özellikleri sergileyebilmeleri için döküm hatalarından yoksun bir şekilde üretilmeleri gerektiğini ve bu alaşımları mutlaka mikroyapısal özellikler açısından da değerlendirmek gerektiğini belirtelim (örneğin 3xx.x alaşımlara ötektik modifikasyon uygulanması gibi).

Yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlara geçmeden önce, yüksek sıcaklık kavramı üzerinde biraz durmamızda fayda olabilir. Saf alüminyum 660°C sıcaklıkta eriyen bir metal. Bu metal farklı elementlerle alaşımlandığında, sıvılaşma sıcaklığının daha da düşük değerlere indiğini biliyoruz. Dolayısıyla çelik ya da dökme demir gibi malzemelerle kıyaslandığımız zaman, alüminyum alaşımlarının çok daha düşük sıcaklıklar için uygun bir malzeme olduğunu baştan belirtmemiz gerekir. Burada bizim yüksek sıcaklık ifadesiyle kastettiğimiz, dislokasyonların hareketlenmesi, tane büyümesi ve hatta tanelerin yeniden kristallenmesi gibi işleyişlerin ortaya çıkmaya başladığı sıcaklık değeri. O nedenle yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen alaşımları ele alırken, bahsettiğimiz sıcaklık değerlerinin alaşım türüne göre 150°C – 300°C arasında değişen değerler olduğunu hatırlamamızda fayda var. Bu amaçla geliştirilen alaşımlar ne tür uygulamalarda kullanılıyor olabilir? Muhtemelen birçok kişinin aklına ilk olarak çeşitli otomotiv uygulamaları geliyor olabilir: Silindir başlığı ya da motosiklet motorlarının çeşitli parçaları gibi belli bir sıcaklığa maruz kalan parçaların, yüksek sıcaklıkta hem mikroyapısal, hem de boyutsal kararlılığını koruyabilen alaşımlardan üretilmeleri önem taşıyor. Bu amaçla geliştirilen alaşımlar arasında 242.0, 243.0, 332.0-T5 ve A242.0-T571 gibi alaşımları gösterebiliriz.

Aşınma dayanımı gerektiren uygulamalar için geliştirilen alaşımlara esas olarak pistonlar, silindir blok ve gömlekleri ve fren parçalarında ihtiyaç duyuyoruz. Bu amaçla en çok kullanılan alaşımlar arasında, ötektik üstü kompozisyona sahip alüminyum-silisyum alaşımlarını gösterebiliriz. Ötektik üstü kompozisyonlarda oluşan büyük ve sert birincil silisyum parçacıkları, malzemeye önemli bir aşınma direnci kazandırıyor. Bu amaçla geliştirilen alaşımlar arasında 390.0, 392.0 ve 393.0 alaşımlarını gösterebiliriz.

Son olarak bir de genel kullanıma yönelik alaşımlar üzerinde duralım. Kolay dökülebilir olmaları nedeniyle genel kullanıma yönelik alaşımlar arasında özellikle alüminyum-silisyum alaşımlarının öne çıktığını görüyoruz: Örneğin 413.0 ve 443.0 gibi. Eğer uygulama belli bir darbe dayanımı da gerektiriyorsa, 444.0 alaşımının tercih edildiğini de görebi-

liyoruz. Eğer uygulama, parçanın biraz daha yüksek dayanıma sahip olmasını gerektiriyorsa, o zaman 3xx.x serisi alaşımların tercih edildiğini de görebiliyoruz: Örneğin 308.0, 360.0, 380.0 ve 384.0 alaşımları gibi. Bu tür genel uygulamalar arasında mimari panel uygulamalarını, çeşitli ızgara yapıları, mutfak gereçlerini, asansör parçalarını gösterebiliriz. Daha yüksek dayanım ve korozyon direnci istenen ve 3xx.x serisi alaşımların kullanıldığı uygulamalara baktığımız zaman ise motor blokları, gaz regülatörleri ve yakıt pompaları gibi uygulamaları görebiliyoruz.

Alüminyum Alaşımlarının Döküm Süreçleri

Kamu malına aktarılmış resim (CC0).

Sanayide kullanılan diğer mühendislik alaşımlarına kıyasla, alüminyum alaşımlarının biraz daha kolay dökülebilir olduklarını söyleyebiliriz: Çünkü alüminyum nispeten düşük bir erime noktasına sahip olması yanında, birçok alaşım elementiyle kolay alaşımlanabiliyor ve sıvı fazda oksitlenmesinin önüne geçmek için kapsamlı koruyucu önlemler alınmasını gerektirmiyor. Bu nedenle gerek dökme demir ya da çelik gibi yüksek sıcaklık gerektiren alaşımlarla kıyaslandığında, gerekse sıvı fazda çeşitli koruyucu önlemler altında eritilmesi gereken magnezyum gibi hafif metallerle kıyaslandığında, dökümcüye çok sorun yaratmayan, dökümü kolay bir metal olarak öne çıkıyor.

Alüminyum alaşımlarının sahip olduğu bir diğer önemli avantaj daha var: Bu alaşımlar döküm sanayisinde aşina olduğumuz birçok kalıplama yöntemiyle üretilen kalıplara dökülebiliyorlar. Yani bu alaşımları yaş kum ya da furan bağlayıcılı kum kalıplar yanında, hassas döküm, kabuklu döküm, savurma döküm, sıkıştırma döküm ya da basınçlı döküm gibi yöntemlerle dökebiliyor, yarı-katı fazda çeşitli işlemler uyguladığımız, bazı yenilikçi yöntemlerin uygulamalarını da alüminyum alaşımlarında görebiliyoruz.

Bu kısa girişten anlıyoruz ki, alüminyum alaşımlarını sadece sergiledikleri özellikler açısından değil, aynı zamanda döküm süreçleri açısından da oldukça geniş bir

yelpazede ele almak gerekiyor. Şimdi isterseniz yavaş yavaş bu süreçlere göz atmaya başlayalım ve hangi üretim süreçlerinin hangi durumlarda tercih edildiklerini anlamaya çalışalım.

Döküm yönteminin seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler

Alüminyum alaşımları birçok farklı döküm yöntemine uygun diyoruz ama bu ifadenin herhangi bir yanlış anlaşılmaya olanak vermemesi için biraz açmaya çalışalım: Alüminyum alaşımlarının kum kalıp ya da basınçlı döküm gibi farklı yöntemlerle dökülebiliyor olması, tüm bu yöntemlerin benzer özelliklere sahip parçaların üretimini mümkün kılacağı anlamına gelmiyor. Tahmin edebileceğiniz gibi, farklı yöntemlerle üretilen parçaların sergiledikleri özellikler arasında önemli farklar olduğunu görebiliyoruz. Dolayısıyla elde etmeyi beklediğimiz mekanik özelliklere bağlı olarak, farklı döküm yöntemlerine yönelmemiz gerekebiliyor. Çok basit bir örnek verelim: Basınçlı döküm ile üretilen bir parça, furan bağlayıcılı kum kalıba dökülen bir parçaya kıyasla çok daha hızlı katılaşacağı için, parçalar benzer geometrik özelliklere sahip olsalar bile basınçlı döküm ile üretilen parçanın daha yüksek bir dayanıma sahip olduğunu görüyoruz.

Mekanik özellikler, döküm yöntemine karar verirken dikkate almamız gereken tek parametre değil elbette. Örneğin üretilecek parçanın geometrik özellikleri, et kalınlıkları ve kalıptan çıkarma açıları da tercih edilen yönteme göre değişiklik gösteriyor. Yani tasarımsal faktörlerin de mutlaka döküm yöntemine karar verirken dikkate alınmaları gerekiyor. Bu çerçevede parçanın sergilemesi gereken boyutsal kararlılık gibi özelliklerin de döküm yöntemiyle ilişkili olabileceğini belirtelim.

Kum kalıba döküm

Dökümcülerin gayet iyi bildiği üzere, kum kalıplar birçok farklı kum (silis kumu, zirkon ya da olivin gibi) ve bağlayıcı (bentonit, furan ya da alfaset gibi) ile üretilebiliyorlar. Burada kum kalıp üretimi için kullanılabilen yöntemlerin bir değerlendirmesini sunmak yerine, kum kalıp içine dökülen alüminyum alaşımlarının sergiledikleri özellikler üzerinde duracağız.

Kum kalıplar ister kürleşmeyen bentonit/su gibi bağlayıcılarla üretilmiş olsun, ister havada sertleşen furan bağlayıcılı sistemlerle, bu yöntemle üretilen parçalarda ilk akla gelen kısıtlamanın kesit kalınlığıyla ilgili olduğunu söyleyebiliriz. Kum kalıba döküm yapıldığında sıvı üzerine basınç etki etmemesi, bir de kum kalıpların yüzey pürüzlülüğünün yüksek olmasıyla birleştiği zaman, çok ince kesitlere sahip parçaların üretimini zorlaştırıyor. Minimum kesit kalınlığı konusunda net rakamlar vermek zor: Çünkü sıvının içine sızabildiği kesitin kalınlığı, aynı zamanda kesitin yüzey alanıyla da ilgili bir durum. Bir kesitin toplam yüzey alanı ne kadar küçükse, sorunsuz dökülebileceği kalınlık değeri de o ölçüde azalıyor. Bunun neden olduğunu kolaylıkla gözümüzde can-

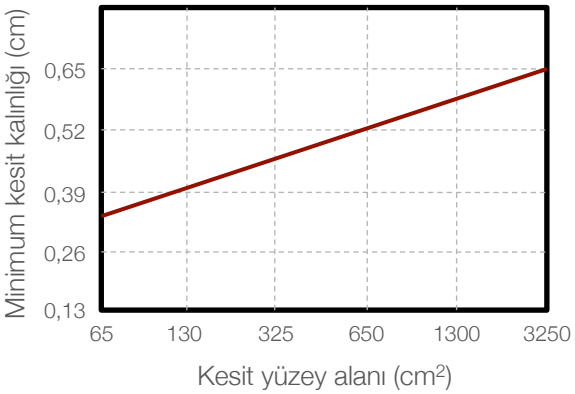
landırabiliriz: Kesitin yüzey alanı geniş olduğunda, sıvının dar kesit içinde yol alması gereken mesafe arttığı için, ister istemez hatasız dökülmesi zorlaşıyor. Fakat eğer kesitin toplam yüzey alanı darsa, sıvının pürüzlü kum içinde kat ettiği mesafe kısaldığı için, daha dar kesitlerin hatasız dökülmesi mümkün olabiliyor. Her ne kadar net değerler vermek bu nedenle zor olsa da, kum kalıba dökülen alüminyum alaşımlarında 4 mm'den ince kesitlerin dökülmesinin problemli olacağını genel bir kural olarak söyleyebiliriz (yandaki resim). Kum kalıba dökümün getirdiği diğer kısıtlamalar ve dezavantajlar arasında boyutsal kararlılığın düşük olmasını, nispeten kötü yüzey kalitesini ve dökülen parçaların yavaş soğuma nedeniyle düşük dayanıma sahip olmalarını sayabiliriz.

Hassas döküm

Hassas döküm süreciyle aşina olmayan okuyucularımız için kısa bir bilgilendirme yaparak başlayalım: Hassas döküm sürecinde ilk olarak dökülmesi istenen parçanın mumdan bir modelinin yapılması gerekiyor. Daha sonra bu mum modeli seramik bir çamur ile kaplıyoruz. Seramik kabuğu sertleşmesi için pişirirken, mum modelin de erimesini sağlayarak bu kabuğun içinden çıkartıyoruz. Son olarak sertleşen seramik kabuk (yani kalıp) içine istediğimiz metal ya da alaşımı döküyoruz. Katılaşma tamamlandıktan sonra kabuğu kırarak, döküm parçayı elde etmiş oluyoruz.

Kum kalıba dökülen alümiyum alaşımları için minimum kesit kalınlıkları

Kesit yüzey alanı genişledikçe, minimum kalınlığın artması gerekiyor (Kaynak: MRT Castings)



Hassas dökümde üretilen seramik kabuk oldukça iyi bir yüzey kalitesine sahip olduğu için, kum kalıplarda elde edilmesi mümkün olmayan incelikte kesitlerin hassas döküm ile dökülebildiğini görüyoruz. Kalıplar çoğu zaman önden ısıtıldığı ve döküm kısmi vakum altında yapıldığı için, kesit kalınlıklarının daha da ince tutulması mümkün olabiliyor. Bu yöntemle dökülen alüminyum alaşımlarının kum kalıplara kıyasla yaklaşık 10 kat daha ince olduğunu (~0,40 – 0,70 mm) ve kesitlerin çok daha iyi bir yüzey kalitesine sahip olduğunu görebiliyoruz.

Hassas dökümle üretilen parçalarda her ne kadar kum kalıplara kıyasla daha ince kesitler görebiliyor olsak da, dökülen parçaların yine nispeten yavaş soğuyor olması (örneğin basınçlı döküme kıyasla), elde edilen mekanik özelliklerin göreceli olarak zayıf kalmasına yol açabiliyor. Fakat

bu yöntemle dökülen parçaların yüksek bir boyutsal kararlılık sergiliyor olması, bu yöntemin popülaritesini korumaya devam etmesini sağlıyor.

Kokil döküm

Kokil dökümün önceki sayfalarda bahsettiğimiz yöntemlerden temel farkı, kalıpların tek kullanımlık değil, kalıcı olması. Bu cümleden de tahmin edebileceğiniz üzere, alüminyum dökümünde kullanılan kokil kalıpları çelik ya da dökme demir gibi, alüminyumun döküm sıcaklığında yapısını koruyabilen alaşımlardan üretiyoruz. Eğer boş çıkması istenen kısımları üretmek için maça kullanılması gerekiyorsa, kalıp tasarımına ve döküm sonrasında parçanın kalıptan çıkma kolaylığına bağlı olarak yine çelik ya da kum maçaların kullanıldığını görebiliyoruz. Kum maçaların kullanılması durumunda bu döküm yönteminden bazı kaynaklarda yarı-kokil döküm (*semi-permanent mold casting*) adıyla bahsedildiğini de belirtelim.

Kum ve kokil (yani metal) kalıba döküm arasında aslında tasarım açısından çok büyük farklar yok. Dökülen parçalar arasında göze çarpan en büyük fark, kokil dökümde yüksek katılaşma hızı elde ediliyor olması nedeniyle mikroyapının genel olarak incelmesi ve mekanik açıdan malzemenin güçleniyor olması. Soğuma hızının alüminyum alaşımlarında görülen çeşitli fazları ve intermetalik parçaları nasıl incelttiğini ilerleyen sayfalarda ele alacağız.

Alüminyum alaşımının hassas döküm yönteminde kullanılan seramik kalıba dökümü

Resim: © Milwaukee Precision Casting

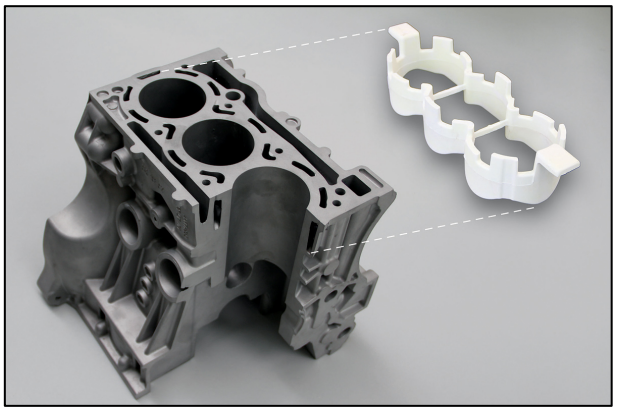
Mekanik özelliklere olumlu etkisi yanında, yüksek hacimde üretim durumda avantaj sağlıyor olmasını da bu yöntemin artıları arasında sayabiliriz. Eğer üretim hacmi düşükse, yani az sayıda parça üretilmesi planlanıyorsa, bu yöntemin avantajı yüksek kalıp maliyeti nedeniyle kayboluyor. O nedenle kokil dökümü özellikle çok sayıda üretilecek parçalar için bir yöntem olarak dikkate almak doğru olur. Üretim hacminin çok yüksek olması durumunda döküm sürecinin otomatikleştirilmesi, sürecin maliyet açısından daha da avantajlı hale gelmesini sağlayabilir.

Her ne kadar kum kalıba göre daha üstün bir yöntem gibi görünüyor olsa da, kokil döküme dair sayabileceğimiz birçok problemli konu da bulunuyor. İlk olarak dökülebilen alaşım sınırı ile başlayalım. Kum

kalıplardan farklı olarak, kokil döküme uygun alaşımlarının sınırlı sayıda olduğunu görüyoruz. Bunun temel nedeni, hızlı soğuma nedeniyle sıvının yüksek bir akışkanlığa sahip olmasının gerekmesi: Yani sıvının donmadan bütün kalıbı doldurabiliyor olması. Bu açıdan baktığımız zaman, özellikle silisyum içeren 3xx.0 ve 4xx.0 alaşımlarının kokil döküm için uygun olduklarını görüyoruz. Bir diğer problem ise, alüminyumun demirle (yani kalıp malzemesiyle) tepkimeye girip, kırılgan intermetalikler oluşturuyor olması. Fakat bu riski gidermek için kalıp yüzeyini çeşitli malzemelerle kaplayarak iki metalin bir araya gelmelerini engelleyebiliyoruz. Bu amaçla kullanılan kaplama malzemeleri arasında zirkonyum dioksit ya da demir oksit gibi çeşitli metal oksitlerin süspansiyonlarını ve su içinde kolloidal grafit ya da kalsiyum karbonat gibi süspansiyonları sayabiliriz.

Basınçı dökümde kullanılan tuz maçalar

Kaynak: Global Casting Magazine



Bir de metal kalıp kullanmanın getirdiği avantaj ve dezavantajlar üzerinde duralım. Tahmin edebileceğiniz üzere, alüminyumun döküldüğü çelik ya da dökme demir gibi malzemeler katılaşma sırasında yüksek bir boyutsal kararlılık sergiledikleri için, bu yöntemle üretilen parçaların da yüksek bir boyutsal kararlılığa sahip olduklarını görüyoruz. Fakat katılaşma sırasında ve sonrasında çatlamaya eğilim gösteren alaşımlar için bu yöntemin problemli olduğunu da söylememiz lazım: Çelik ve dökme demir kalıpların esneme payları çok düşük olduğu için, bu eğilimi gösteren alaşımların bu yöntemle dökülmemesi gerekiyor. Kokil kalıplara dökülen parçaların kesit kalınlıklarının ise yaklaşık 2,5 mm sınırının üzerinde olması gerekiyor.

Basınçlı döküm

Basınçlı döküm, ya da bazı kaynaklarda geçen adıyla yüksek basınçlı döküm, sunduğu avantajlar sayesinde alüminyum döküm süreçleri içinde en yüksek oranda parçanın üretildiği yöntem olarak karşımıza çıkıyor. Yüksek hacimde üretim yapılmasına olanak veriyor olmasını ve üretilen parçaların yüksek boyutsal kararlılık yanında oldukça iyi bir yüzey kalitesi de sergiliyor olmasını, bu yöntemin yaygın bir şekilde tercih edilmesini sağlayan başlıca etkenler arasında gösterebiliriz.

Basınçlı döküm yönteminin adından da anlaşılabileceği üzere, bu yöntemde sıvı me-

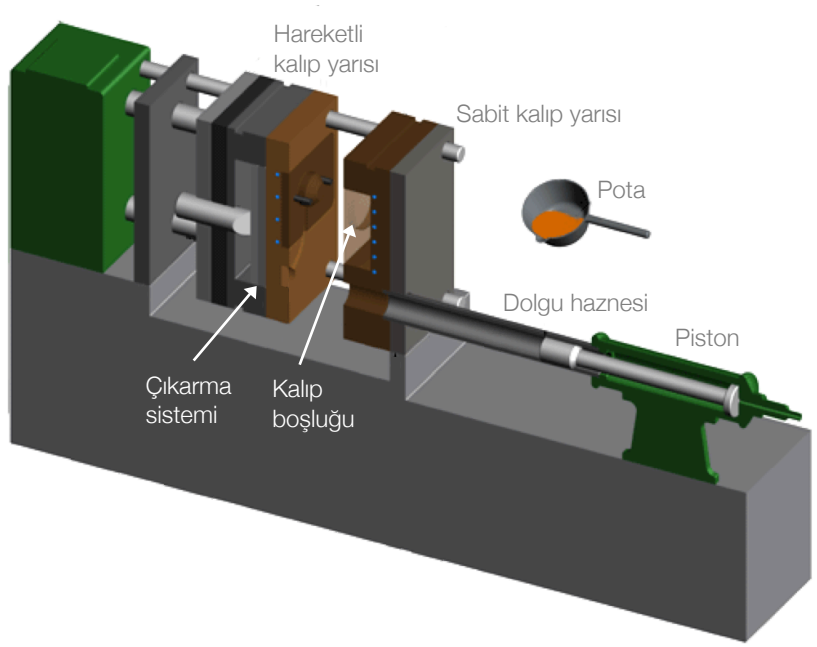
tal, soğutulan metal kalıplar içine basınçla gönderiliyor ve katılaşma tamamlanana kadar basınç uygulanmaya devam ediyor. Genellikle takım çeliklerinden üretildiğini gördüğümüz kalıpların içine hidrolik bir piston yardımıyla itilen metal, basıncın da etkisiyle hızlı bir şekilde katılaştığı için, yukarıda bahsettiğimiz yöntemlere kıyasla daha ince bir mikroyapı oluştuğunu ve üretilen parçanın yüksek bir dayanıma sahip olduğunu görüyoruz. Karmaşık biçimli ve ince cidarlı parçaların dökümü için uygunluğu yanında ince kesitlerin de tam olarak dolmasını sağlayan bir yöntem olmasını, bu yöntemin diğer üstün yönleri arasında sayabiliriz.

Bu yönteme dair bazı kısıtlamalar da bulunuyor elbette: Örneğin takım çeliğinden üretilen kalıpların hem üretim hem de tasarım açısından maliyetli olduklarını biliyoruz. O nedenle basınçlı döküm yönteminin yüksek hacimde parça üretilmesi gereken durumlarda tercih edilmesi tavsiye ediliyor. Çok büyük parçaların üretimi açısından elverişli olmaması yanında döküm makinesinin belli bir yatırım maliyetinin olmasını, bu yönteme dair dezavantaj yaratan parametreler arasında gösterebiliriz.

Basınçlı döküm makineleri, alaşımın nasıl eritildiğine bağlı olarak *sıcak* ve *soğuk hazneli* basınçlı döküm makineleri şeklinde sınıflandırılabiliyorlar. Sıcak hazneli döküm

Soğuk hazneli basınçlı döküm makinası

Kaynak: J. Orkas, Aalto Üniversitesi Ders Notları



makinalarında hazne ve piston sıvı metalin içine dalmış şekilde bulunuyor. Bu yöntem erime noktası düşük olan kalay, kurşun ve çinko alaşımlarında başarıyla kullanılabiliyor olsa da, nispeten daha yüksek bir sıcaklıkta eriyen alüminyum demir bazlı yapısal bileşenlerle tepkimeye girme eğilimi taşıdığı için, alüminyum dökümde bu yöntemin tercih edildiğini görmüyoruz. Bu nedenle alüminyum dökümde soğuk kamaralı olarak da adlandırılan soğuk hazneli döküm makinaları tercih ediliyor. Bu makinalarda ergitme ocağı ayrı bir yerde bulunuyor ve sıvı metal hazneye bir pota yardımıyla ya da otomatik olarak dökülüyor. Ardından piston sıvı metali kalıp içine itiyor. Soğuk hazneli döküm makinalarında sıvı metal üzerine piston tarafından uygulanan basınç 2000 ila 2250 kg/cm^3 değerlerini bulabiliyor.

Her ne kadar genel olarak olumlu yönleri üzerinde duruyor olsak da, basınçlı dökümün burada ele almamız gereken önemli bir dezavantajı da bulunuyor: Bu yöntemle dökülebilen alaşımların kısıtlı sayıda olduklarını görüyoruz. Hem kalıba dolumun, hem de katılaşmanın çok hızlı bir şekilde ve çok sert kalıplar içinde gerçekleşiyor olması nedeniyle, çok iyi dökülebilirliğe sahip ve katılaşma sırasında ve sonrasında çatlama eğilimi göstermeyen alaşımların tercih edilmesi gerekiyor. Bu nedenle Amerikan Dökümcüler Birliğinin (AFS) sunduğu verilere göre, basınçlı dökümle üretilen parçaların yaklaşık %85 gibi bir oranı, 380.0 ve türevi alaşımlar dökülerek üretiliyor. Çatlama direnci yanında iyi bir akışkanlığa da sahip olan düşük bakırlı alüminyum silisyum alaşımları da (360.0 ve 413.0 gibi) basınçlı dökümle üretilen alaşımlar arasında sayabiliriz. Oksit inklüzyonlarının oluşumunu azaltmak için genellikle magnezyumun düşük seviyelerde tutulması gereken bu alaşımlarda, parçanın kalıptan kolay ayrılmasını sağlamak amacıyla düşük bir miktarda demir bulunması da istenebiliyor.

Basınç nedeniyle oluşan hızlı katılaşmanın mikroyapıyı inceltici etkisi yanında, aynı zamanda gözeneksiz parçaların üretimini de mümkün kılan bir süreç olması nedeniyle, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçaların oldukça iyi çekme ve yorulma dayanımına sahip olduklarını görüyoruz. Sıvıya uygulanan basınç metalin ince kesitlere girmesine yardımcı olsa da, parçanın çok hızlı katılaşması kesit kalınlığı konusunda bazı kısıtlamalar olmasına yol açıyor. Bu yöntemle dökülebilen en ince kesitlerin 1 mm civarında olduğunu da son bir not olarak belirtelim.

Alçak basınçlı döküm

Basınçlı döküm yönteminden farklı olarak, bir de alçak basınçlı döküm olarak bilinen bir üretim yöntemi daha bulunuyor. Her ne kadar isimleri benzer olsa da, bu iki yöntem arasında oldukça ciddi farklar bulunuyor.

Basınçlı dökümde olduğu gibi bu yöntemde de kalıcı kalıplar kullanılıyor. Fakat basınçlı dökümden farklı olarak bu yöntemde sıvı metal bir potanın içinde duruyor. Potadaki sıvı metalin yüzeyine basınç uygulanarak, sıvı içine daldırılan dikey bir yolluk yardımıyla sıvı metal yolluk boyunca yukarı tırmanıyor ve

ocağın üzerinde duran kalıbı dolduruyor (yandaki resim). Kalıbın tamamen dolması sağlandıktan sonra sıvı metal yüzeyine etki eden basınç kaldırılıyor ve böylece dikey yollukta kalan sıvının tekrar potaya dönmesi sağlanıyor. Sıvı metal kalıp içinde katılaştıktan sonra parça kalıptan alınıyor ve döküm süreci tamamlanıyor.

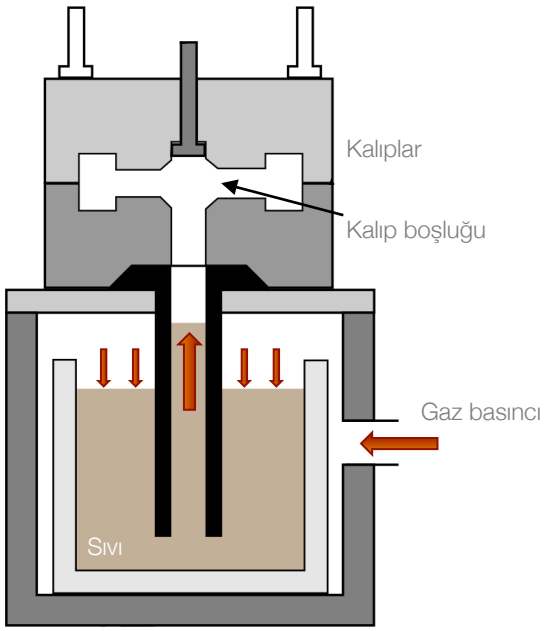
Bu yöntemde sıvı metal pota içinden dikey yolluk yardımıyla yukarı doğru hareket ettiği için, sıvı yüzeyinde bulunan çeşitli oksit inklüzyonlarının kalıp içine girmesi engellenmiş oluyor. Fakat bu durum yine de oksit inklüzyonlarına karşı kesin bir çözüm sağlamıyor: Kalıp dolduktan sonra dikey yolluktan boşalan sıvı metalde düşük miktarda da olsa oksitlenme olması, sonraki dökümlerde kalıp içine bir miktar inklüzyon girmesine yol açabiliyor.

Genellikle radyal doğrultuda simetrik tasarımların dökümünde kullanılan bu yöntemin özellike jant dökümünde tercih edildiğini görüyoruz. Fakat radyal eksende simetrik olmayan parçaların da bu yöntemle üretilebildiklerini son bir not olarak belirtelim.

Sıkıştırma döküm

Sıkıştırma döküm özünde basınçlı döküm yöntemini andıran bir proses. Aradaki farkı yaratan etken, sıkıştırmayı yapan bileşenin farklı olması: Basınçlı dökümde sıvı metal kalıp içine bir piston ile itiliyor ve sıkıştırma görevini esas olarak piston gerçekleştiriyor. Sıkıştırma dökümde ise sıvı metal hareket eden kalıp parçaları arasında sıkıştırılıyor ve

Alçak basınçlı döküm şematik gösterimi
Kaynak: Wikimedia Commons (CC BY-SA 3.0)



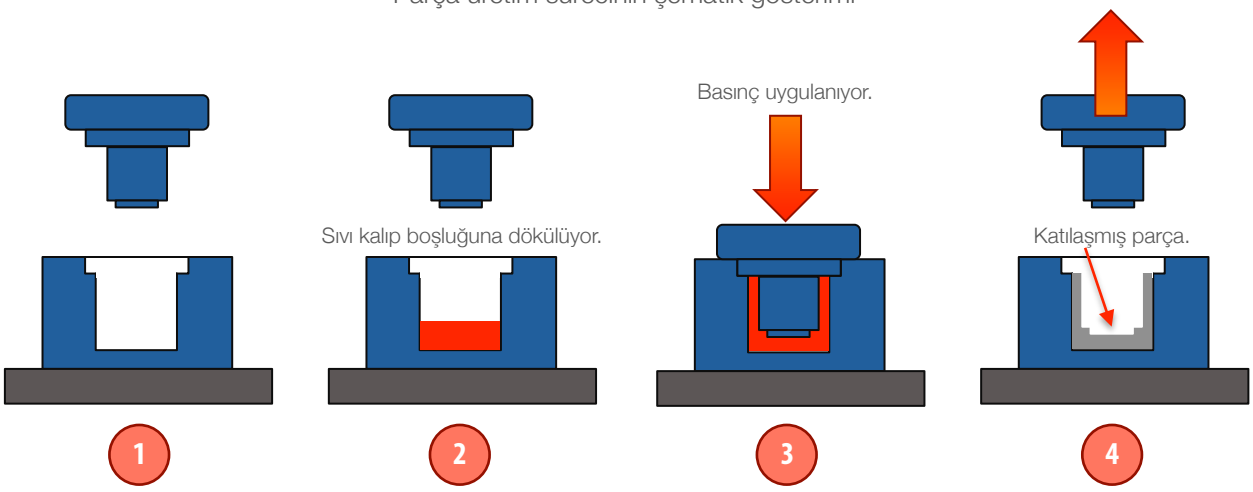
sıkıştırma görevini kalıp görüyor. Yani basınçlı dökümde sıvı kalıp içine bir piston yardımıyla itilirken, sıkıştırma dökümde sıvı metal direkt olarak alt kalıp boşluğuna dökülüyor ve üst kalıp kapanıp basınç uygulayarak sıkışmayı yaratıyor. Tıpkı basınçlı dökümde olduğu gibi sıkıştırma dökümde de hızlı katılaşma neticesinde incelmiş bir mikroyapı ve bunun sonucu olarak yüksek dayanıma sahip parçalar elde edildiğini görüyoruz.

Yarı-katı döküm

Yarı-katı döküm sürecinin adından da tahmin edebileceğiniz üzere, malzeme döküm öncesinde tam olarak sıvı fazda değil, yarı-katı halde bulunuyor. Saf metallerden farklı

Sıkıştırma döküm yöntemi

Parça üretim sürecinin şematik gösterimi



olarak alaşımlanmış malzemeler tek bir sıcaklıkta değil, bir sıcaklık aralığında katılaştıkları için, katılaşmanın başladığı ve tamamlandığı sıcaklık değerleri arasında yarı-katı adı verilen, çamurumsu bir halde bulunuyorlar. Çamurumsu haldeki bu yarı-katı alaşımın akışkanlığı çok düşük olduğu için, kalıp içine döküldüğünde kalıbı kendiliğinden doldurmasını beklemiyoruz. O nedenle bu yöntemde de basınçlı dökümde olduğu gibi basınç uygulanması ve çamur halindeki alaşımın kalıbı tam olarak doldurması sağlanıyor. Bu sebeple yarı-katı dökümü aslında sadece bir döküm yöntemi olarak değil, döküm, dövme ve ekstrüzyon işlemlerinin birleşimi gibi değerlendirmek daha doğru olur diyebiliriz.

Yarı-katı halde bulunan malzemeyle çalıştığımız zaman, hem döküm işlemine hem de dövme işlemine kıyasla bazı avantajlar elde edebiliyoruz. İlk olarak sıvı fazda çalıştığımız döküm süreçlerine kıyasla avantajlara bakalım: Öncelikle kalıp içine döktüğümüz malzeme yarı-katı haldeyken çamur kıvamında olduğu için, kalıba döküldüğünde türbülans oluşma gibi bir durumla karşılaşmıyoruz. O nedenle sıvının türbülansından kaynaklanan hava girişi ve bunun neticesinde oluşan gözenekler gibi problemler bu yöntemde karşımıza çıkmıyor. Ayrıca alaşım kalıba döküldüğünde zaten kısmen katılaşmış olduğu için, katılaşma çekintisi nedeniyle oluşan hacim daralmasının miktarı da doğal olarak azalıyor. Bu nedenle çekinti kaynaklı oluşabilecek çeşitli hataları bu yöntemde görme ihtimalimiz önemli ölçüde azalıyor.

Bu yöntemin bir diğer avantajı da yarı-katı haldeki malzemenin çözebildiği gaz miktarının azalıyor olması. Bildiğiniz gibi gaz gözeneklerinin oluşması ardındaki neden, alaşımın sıvı ve katı halde gaz çözebilme kapasitesinin farklı olması: Alaşım sıvı fazdayken katı faza kıyasla daha çok gaz

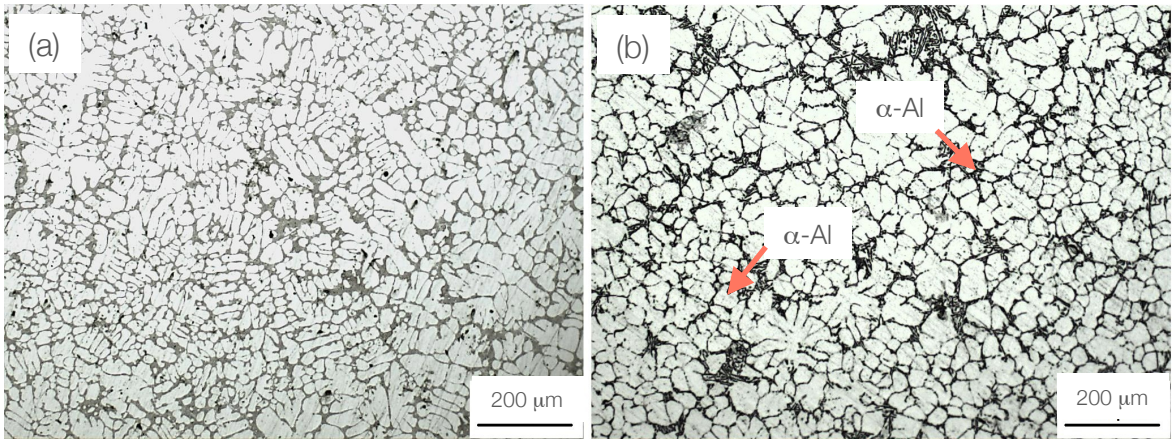
çözebildiği için, katılaşma sırasında fazla gazın atılması gerekiyor. Katılaşma sırasında atılan gaz parçanın içinde sıkışıp kaldığı zaman, minik gaz gözeneklerinin oluştuğunu görüyoruz. Yarı-katı dökümde kalıp içine dökülen alaşım zaten kısmen katılaşmış olduğu için, içinde çözünen gazın bir kısmını döküm öncesinde dışarı atmış oluyor. O nedenle gaz gözeneği oluşma eğiliminin de bu yöntemde azaldığını görüyoruz. Son olarak kısmen katılaşmış alaşım sıvı fazdaki alaşımla kıyasla daha düşük bir sıcaklığa sahip olduğu için, prosesin sıcaklık gereksinimi de düşüyor.

Eğer yarı-katı dökümü dövme ile kıyaslayacak olursak, ilk akla gelen avantajın malzemeyi şekillendirmek için uygulanan yükün ciddi bir şekilde düşmesi olduğunu söyleyebiliriz. Dövme işlemi katı malzemelere uygulandığında, doğal olarak uygulanması gereken yük miktarı yüksek oluyor. Yarı-katı haldeki malzemeler ise çamurumsu doğaları gereği çok daha düşük yükler altında, daha kolay şekillendirilebiliyorlar. Fakat bu noktada şunu belirtmemiz gerekir: Dövme ile şekillendirilen alüminyum alaşımları katılaşma sırasında ve sonrasında çatlak oluşumuna meyilli olabildikleri için, dövmeyle üretilen alaşımların yarı-katı döküme her zaman uygun olmadıklarını görüyoruz. O nedenle dövme sonucunda elde edilen üstün mekanik özellikleri, yarı-katı dökümle elde edemeyebiliyoruz. Ayrıca yarı-katı dökümde parçanın soğuması için belli bir süre gerektiği için, dövme kadar yüksek sirkülasyonla parça üretme konusunda da bu yöntem biraz geride kalabiliyor. Sonuç olarak yarı-katı döküm eğer dövmeye bir alternatif olarak değerlendiriliyorsa, özellikle dövmeyle üretilmesi zor olan karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde avantaj sunacağını bilmemizde fayda var.

Yarı-katı dökümde görülen küreselleşmiş dendritik mikroyapı

(a) Geleneksel ve (b) yarı-katı döküm ile üretilen alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapılarının kıyaslaması.

Kaynak: Cheng et al. (2016)



Alüminyum Dökümünde Sıvı Temizliği

Resim: © Mensell and Associates, USA.

Alüminyum alaşımlarında kullanılan elementler, sadece dökülen parçanın mekanik özelliklerini etkilemiyorlar. Bu elementler aynı zamanda döküm öncesinde ocakta duran sıvı alaşımın da birçok özelliği üzerinde de önemli etkiler yaratıyorlar. Örnek vermek gerekirse sıvının yüzey gerilimini, sıvının ağdalığını (viskozitesini) ve alaşımın katılaşma aralığını, alaşımdaki elementlere bağlı olarak değişim gösteren parametreler arasında sayabiliriz.

Tabii burada sadece alaşımda bulunmasını istediğimiz elementleri dikkate alırsak, eksik bir değerlendirme yapmış oluruz: Alaşımda bulunmasını istemediğimiz, zararlı etkileriyle öne çıkan empürite elementler üzerinde de durmamız gerekir. Çünkü alaşım elementlerinin tümü istenen aralıklarda olsa bile, istenmeyen bir ya da birkaç elementin varlığı, döküm parça kalitesinin beklentimizden çok daha kötü olmasına yol açabilir. Üretilen alaşıma bağlı olarak farklı etkileriyle çeşitli problemlere yol açabilen bu elementler arasında kurşun (Pb), nikel (Ni), bizmut (Bi), fosfor (P), kadmiyum (Cd), kalay (Sn) ve çinko (Zn) gibi bazı elementleri sayabiliriz.

Alüminyum içinde miktarı kontrol edilmesi gereken elementlerden bahsederken, alkali metaller olarak da bilinen sodyum (Na),

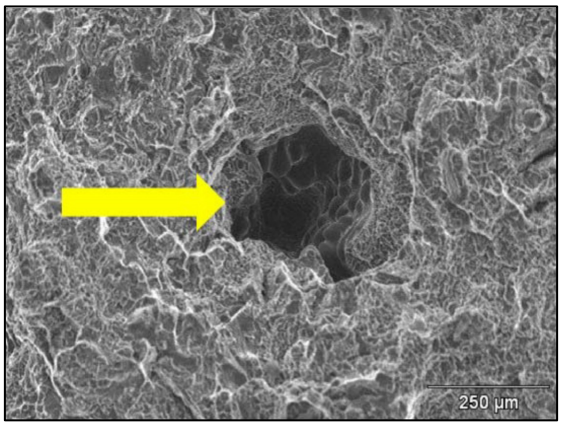
potasyum (K) ve lityum (Li) gibi elementleri de dikkate almamız gerekir. Bu elementler alüminyum içine iki farklı kaynaktan gelmiş olabilirler: Birincil alüminyum üretiminde (Hall-Héroult prosesi sırasında) ve alüminyumun geri dönüşümü sırasında. Birincil alüminyum üretimi sırasında gelebilen empürite miktarları 30-50 ppm Na ve 0-20 ppm Li aralığında olurken, geri dönüştürülen alüminyumda bu değerlerin Na ≤ 10 ppm ve Li ≤ 1 ppm seviyelerine gerilediklerini görebiliyoruz.

Gaz giderme

Yukarıda sıraladığımız elementler çeşitli nedenlerle zararlı etkiler ortaya çıkarabiliyor olsalar da, söz konusu alüminyum alaşımları olduğu zaman, farklı bir element üzerinde özellikle durmamız gerekiyor: Hidrojen. Çünkü sıvı alüminyum içinde çözünen hidrojen atomları, diğer elementlerden farklı olarak katılaşma sırasında gaz formunda çökeliyorlar. Bu problemin arkasında anlaması oldukça basit bir mekanizma yatıyor. Sıvı alüminyumun hidrojen çözebilme kapasitesi, katı alüminyuma göre oldukça düşük. Teknik literatürde sunulan bilgilere göre, katılaşma sıcaklığının biraz üzerinde 100 gramlık sıvı alüminyum 0,65 cm^3 gibi oldukça yüksek bir değerde gaz çözebilirken, katılaşma sıcaklığının hemen altında bu değer 0,034 cm^3'e düşüyor: Burada verdiğimiz 0,65 cm^3 değeri üst sınır bir değer olsa da, bu tür sınır durumlarda %95'e varan oranlarda bir çözünürlük kaybı olabildiğini görebiliyoruz.

Döküm ile üretilmiş AlSiMg0.6 alaşımında gaz gözeneği

Kaynak: Uehara et al. (2010)



Dolayısıyla, yüksek döküm sıcaklığında sıvı alüminyum içinde çözünmüş olarak bulunan hidrojen gazının büyük bir kısmı, katılaşma sırasında dışarı atılıyor. Bu da, tıpkı bir bardak kola içinde oluşan kabarcıklar gibi, sıvı içinde hidrojen kabarcıklarının oluşmasına neden oluyor. Sonuç olarak bu kabarcıkların, dökülen parça içinde gaz gözenekleri yapısında kaldıklarını görüyoruz. Tahmin edebileceğiniz gibi, parça içinde kalan bu boşluklar mekanik özellikleri olumsuz bir şekilde etkiliyor.

Gaz gözeneklerini döküm parçalardan uzak tutmak için yapabileceğimiz iki şey var: Ya hidrojenin sıvı içine girmesini engelleyeceğiz, ya da girmiş olan hidrojeni dökümden önce almanın bir yolunu bulacağız. Gelin, bu iki senaryoya biraz daha yakından bakalım.

Hidrojeni sıvıdan nasıl uzak tutabiliriz?

Hidrojenin sıvı içine girmesini engellemek için sanayide kullanılan bazı koruyucu örtü tozları olduğunu biliyoruz. Bu örtü tozları, ocaktaki sıvının hidrojen kapmasını engellemek için eriyiğin üzerinde sıvı bir tabaka oluşturuyorlar.

Fakat bu örtü tozlarının fayda sağlayamadığı durumlar da var: Hidrojen, sıvı içine esas olarak nem ile temas sonucunda giriyor. Dökümde kullanılan potalar, astarlar ve çeşitli alyajlar beklerken mutlaka yüzeylerinde bir miktar nem biriktiriyorlar. Ön ısıtma her ne kadar bu nemin giderilmesi için bir çözüm sunsa da, maliyet ve zaman kaybı gibi nedenlerle bu işlemler zaman zaman ihmal ediliyor. O nedenle bu örtü tozlarının sadece sıvı fazda yüzeyden kapılan hidrojeni durdurabileceğini ve hidrojenin bu saydığımız farklı kaynaklardan da gelebileceğini aklımızda tutalım.

Eğer alüminyum içine hidrojen bir kere girmişse, bu sefer bu gazı dökümden önce almak için bazı özel geliştirilmiş yöntemlere başvurmamız gerekiyor. Şimdi teker teker kısaca bu yöntemlere bakalım.

Gaz giderme yöntemleri

Asal (inert) gaz uygulaması

Herhalde akla gelen ilk ve en basit yöntem, sıvı alüminyum içinden argon ya da azot gibi bir gaz geçirmek: Sıvıyla reaksiyona girmeyen ve sıvı içinde çözünmeyen bu gazları sıvı içine verdiğimiz zaman, yüzeye doğru giden ufak kabarcıklar oluşturuyorlar: Bir pipetle su dolu bir bardağın içine üfleyerek kabarcık oluşturduğunuzu düşünün. Olan, bunun aynısı. Bu işlemin etkinliğini arttırmak için gazı sadece yüzeye değil, en dipten gelecek şekilde vermeniz gerekiyor. Yüzeye giden bu kabarcıklar, sıvı içindeki hidrojen gazını toplayarak sıvıyı temizleyebiliyorlar. Gaz kullanılmayan durumlarda, bu kabarcıkları oluşturmak için hegzakloretan (C_2Cl_6) tabletlerinden de faydalanabileceğimizi belirtelim.

Bu yöntemin etkinliği arttırmak için yapabileceğimiz birkaç işlem daha var: Örneğin sıvı içine eklenen çok az miktarda Mg, alaşımın yüzey gerilimini düşürdüğü için, gaz giderme sırasında oluşan kabarcıkların çok daha büyük, dolayısıyla da geniş yüzey alanına sahip olmasını sağlıyor. Azot ya da argon kabarcıkları bu şekilde büyüdükleri zaman, işlem sonrasında yapıda kalan hidrojen miktarı daha da azaltılabiliyor. O nedenle, örneğin bir Al-7Si alaşımı yerine, az miktarda Mg de içeren A356 alaşımının dökülmesi, parçanın daha iyi mekanik özellikler sergilemesini sağlayabiliyor.

Vakum yöntemi

Asal gaz yönteminden farklı olarak, vakum yöntemiyle de sıvı alüminyum alaşımları içindeki gaz seviyesinin düşürülmesini sağlayabiliyoruz. Adından da anlaşılabileceği gibi, bu yöntemde sıvı alaşım vakum altına alınarak, sıvı yüzeyinin üzerindeki basınç düşürülüyor. Gaz çözünürlüğü sadece sıcaklığa değil, aynı zamanda ortam basıncına da bağlı olarak azaldığı için, eriyik, bu düşük basınç altında içindeki hidrojeni yüzeyinden kusmaya başlıyor. Bu yöntemde dökümhane içine bir vakum sistemi kurulması gerekeceği için, vakum yönteminin maliyetinin göreceli olarak yüksek olacağını anlayabiliyoruz.

Ultrasonik yöntem

Son olarak bir de ultrasonik yöntemlerle gaz gidermeden bahsedelim. Yine yöntemin adından anlaşılabileceği üzere, sıvı içinde basınç dalgaları yaratarak, çok sayıda küçük oyuklar oluşmasını sağlıyoruz: Yani aslında gaz kabarcığı oluşturmak yerine, aynı mekanizmayı ses dalgaları yardımıyla devreye sokmaya çalışıyoruz. Bu şekilde oluşan minik oyukçuklar, basınç dalgalarının etkisiyle birbirleriyle çarpışarak daha büyük oyukların oluşmasına yol açıyorlar. Bu şekilde sıvı içinde oluşan gözenekler, tıpkı diğer yöntemlerde olduğu gibi sıvı içindeki hidrojeni temizleyerek yüzeye gidiyorlar.

Bu yöntemin bahsetmemiz gereken birkaç güzel yönü var: Her şeyden önce çevreye verdiği zararın oldukça düşük olması açısından oldukça güzel bir proses olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca gaz giderme sırasında karıştırıcı kullanılmıyor olması nedeniyle, sıvı yüzeyinde oluşan oksit tabakasının sıvı içine karışması gibi yan etkilerle karşılaşmıyoruz. Teknik literatürde sunulan bilgilere bakılırsa, bu yöntem aynı zamanda sıvı içinde bulunan inklüzyonların temizlenmesine de yardımcı olabiliyor. Sıvıda oluşan bu inklüzyonlara ilerleyen sayfalarda ayrıntılı bir şekilde yer vereceğiz.

Literatüre baktığımız zaman, alüminyum alaşımlarında gaz giderme için kullanabileceğimiz çeşitli yöntemler üzerine sayısız araştırma yapıldığını görüyoruz. Bu araştırmalar, sıvı içindeki gazın nasıl giderilmesi gerektiği konusunda yeterli düzeyde bilgi sunmalarına rağmen, gaz giderme sonrasında sıvının tekrar gaz kapma eğilimi konusuna pek dikkat etmiyorlar. Fakat literatürde sunulan bilgilere bakılırsa, böyle bir durum gerçekten de gözlenebiliyor.

Burada anlamamız gereken önemli nokta şu: Sıvı içinde hidrojenin bulunması gereken bir yakın-denge (*quasi-equilibrium*) konsantrasyonu var. Bu değer, sıvının kompozisyonu, sıcaklığı ve ortam basıncı gibi değerlere bağlı olarak değişiklik gösterebiliyor. Örneğin Baena'nın (2013) çalışmasına baktığımız zaman 20°C ortam sıcaklığında eritilen A356 alaşımı için bu yakın-denge konsantrasyonunun 0,17 cm^3/100 g olduğunu görüyoruz. 16°C ortam sıcaklığında dökülen A380 alaşımı içinse bu değer 0,11 cm^3/100 g olarak verilmiş.

Yapılan çalışmada, hidrojen konsantrasyonu bu değerlerin altına çekilecek şekilde gaz giderme yapıldığında, sıvı alaşımın yaklaşık 40 dakikalık bir süre zarfında bu yakın-denge konsantrasyonuna ulaşacak şekilde tekrar gaz kapabildiği gösteriliyor. (Çalışmada 4 kilogramlık eriyikler kullanılmış.) Fakat eğer gaz giderme sonrasında sıvıdaki gaz konsantrasyonu bu yakın-denge değerinin üzerinde kalırsa, sıvı alaşım tekrar gaz kapmadan bekletilebiliyor.

O nedenle gaz giderme sırasında bu bekleme süresinin de dikkate alınması ve bu tür durumlarda iki aşamalı bir gaz giderme işleminin kullanılması tavsiye edilebilir. Bu konuda daha fazla bilgi isteyen okurlarımız, kaynakça sayfasında ayrıntıları bulunan Baena'nın (2013) çalışmasına göz atabilirler.

Hidrojenin diğer olumsuz etkileri

Sıvı alüminyum nem ile bir araya geldiğinde, su buharı ve alüminyum arasındaki aşağıdaki tepkimenin gerçekleştiğini ve hidrojenin sıvı içine bu şekilde girdiğini biliyoruz:

$2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 6H$

Dikkat ederseniz bu tepkime sonrasında ortaya çıkan tek atomlu (*monoatomik*) hidrojene ek olarak, aynı zamanda alüminyum oksit de (Al_2O_3) oluşuyor. Sıvı içinde oluşan bu oksit parçacıkları amorf yapıda ve oldukça ince filmler halinde ortaya çıkıyorlar. Sıvıya kıyasla daha hafif olmaları nedeniyle yüzeyde biriken bu amorf oksit filmleri, erime sırasında yeterince uzun bir süre beklenirse sırasıyla γ-Al_2O_3'e, ardından da α-Al_2O_3'e dönüşüyorlar. Bu dönüşüm sonunda oluşan α-Al_2O_3 oksit filmleri, sıvı metalin yüzeyde daha hızlı oksitlenmesine yol açıyor. O nedenle hidrojen gazının giderilmesi sadece döküm parçada gözeneklerin engellenmesi açısından değil, sıvıdaki oksitlenme kaybının önüne geçilmesi açısından da önem taşıyor.

İnklüzyonlar

Sıvı alüminyum içinde sadece istenmeyen elementler değil, farklı elementlerin oluşturduğu bazı bileşikler de karşımıza çıkabiliyor. Farklı birçok nedene bağlı olarak ortaya çıkabilen bu bileşikleri intermetalik ve metalik olmayan olmak üzere, iki başlık altında ele alabiliyoruz. Bu parçacıkların her zaman zararlı etkiler ortaya çıkardıklarını söylersek, haksızlık etmiş oluruz. İlerleyen sayfalarda ayrıntılı olarak görebileceğiniz gibi, bazı parçacıklar mekanik özellikleri destekleyen etkilerin ortaya çıkmasını sağlarken, özellikle demir içeren bazı bileşiklerin mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yarattığını görüyoruz. Bu parçacıklar hakkında daha fazla bilgi isteyen okurlarımız, ilerleyen sayfalarda intermetalikler üzerinde ayrıntılı bilgi bulabilirler.

Tablo: Sıvı alümiyum içinde ortaya çıkabilen inklüzyon türleri.

Tür	Faz	Biçim
Oksit	γ-Al_2O_3 α-Al_2O_3 Al_2O_3 MgO Al_2MgO_4 (spinel) $AlMgO_4$ SiO_2 CaO CaSiO Fe_3O_4	Film Parçacık, film Parçacık, yüzey filmi Parçacık, yüzey filmi Parçacık, film ve topak Parçacık, film ve topak Parçacık Parçacık Topak, parçacık Topak, film
Borür	TiB_2 AlB_2	Parçacık, topak Parçacık
Karbür	Al_4C_3 SiC	Parçacık, topak Parçacık
Nitrür	AlN	Parçacık, film
Tuz	NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$ Na_2SiF_6	Sıvı damlacık Küresel
Sludge	(Cr-Fe-Mn)Si	Parçacık
İntermetalik	TiAl, $TiAl_3$, NiAl	Parçacık, topak

Sıvı temizliği için alınabilecek önlemler

Dökümcüler, yukarıda saydığımız bu zararlı element ve inklüzyonlara karşı çaresiz değiller elbette. Üretim sırasında alınabilecek çeşitli önlemlerle, sıvının temiz tutulmasını sağlamak mümkün olabiliyor.

İlk olarak zararlı elementlerle başlayalım: Dökümhanelerde yaygın bir şekilde kullanıldığını bildiğimiz optik emisyon spektrometreleri sayesinde, alaşımda bulunan elementlerin ppm seviyelerinde takip edilmesi ve zararlı elementlerin kritik seviyelerin üzerine çıkmaları durumunda çeşitli önlemlerin alınması mümkün olabiliyor. Önceki sayfalarda bahsettiğimiz gibi zararlı etkileriyle bilinen hidrojenin sıvıdan uzak tutulması için çeşitli gaz giderme yöntemleri de uygulanabiliyor.

Parça içinde oluşan inklüzyonların takibi için de kritik elementlerin miktarlarının süreç sırasında izleniyor olması önem taşıyor. Fakat konu inklüzyonlar olduğu zaman, sadece elementlere bakmak yeterli olmuyor: Aynı zamanda hangi elementlerin hangi inklüzyonları teşvik ettiğinden haberdar olmak ve bu elementlerin sıvıya girmesine yol açan kök nedenleri de anlayıp, ortadan kaldırabilmek gerekiyor. Örneğin önceki sayfalarda hidrojen gazı oluşumuna yol açan tepkimenin, aynı zamanda sıvının oksitlenmesine ve oksit filmlerinin de oluşmasına yol açabildiğinden bahsetmiştik. Bu tepkimenin önüne geçebilmek için uygun flaksların kullanılması, sıvı yüzeyinde bir battaniye oluşturarak sıvıyı korumak için etkili olabilir. Eğer inklüzyonların oluşumunu teşvik eden elementler belli şarj malzemelerinden geliyorsa, bu şarj malzemelerinin değiştirilmesi ve daha temiz malzemelerle çalışılması da, alınabilecek diğer önlemler arasında gösterilebilir.

Tabii kök nedenleri tespit edebilmenin her zaman bu kadar kolay olmadığını belirmekte de fayda var. Çünkü sıvı içinde görmek istemediğimiz inklüzyonlar her zaman sadece tek bir nedene bağlı olarak ortaya çıkmıyor: Zaman zaman tek başlarına ele alındıklarında masum gibi görünen farklı etkilerin, sinerjik bir etkileşim sonucu bazı problemlerin oluşumunu tetiklediklerini de görebiliyoruz. O nedenle Dökümhane Akademi projesi kapsamında yayımladığımız diğer El Kitabı sayılarında ve çeşitli yazılarda da vurguladığımız gibi, problemlere doğru çözümleri getirebilmemiz için, öncelikle karşımızdaki problemi doğru bir şekilde teşhis ettiğimizden emin olmamız gerekiyor.

Alüminyum Dökümünde Mikroyapı Kontrolü

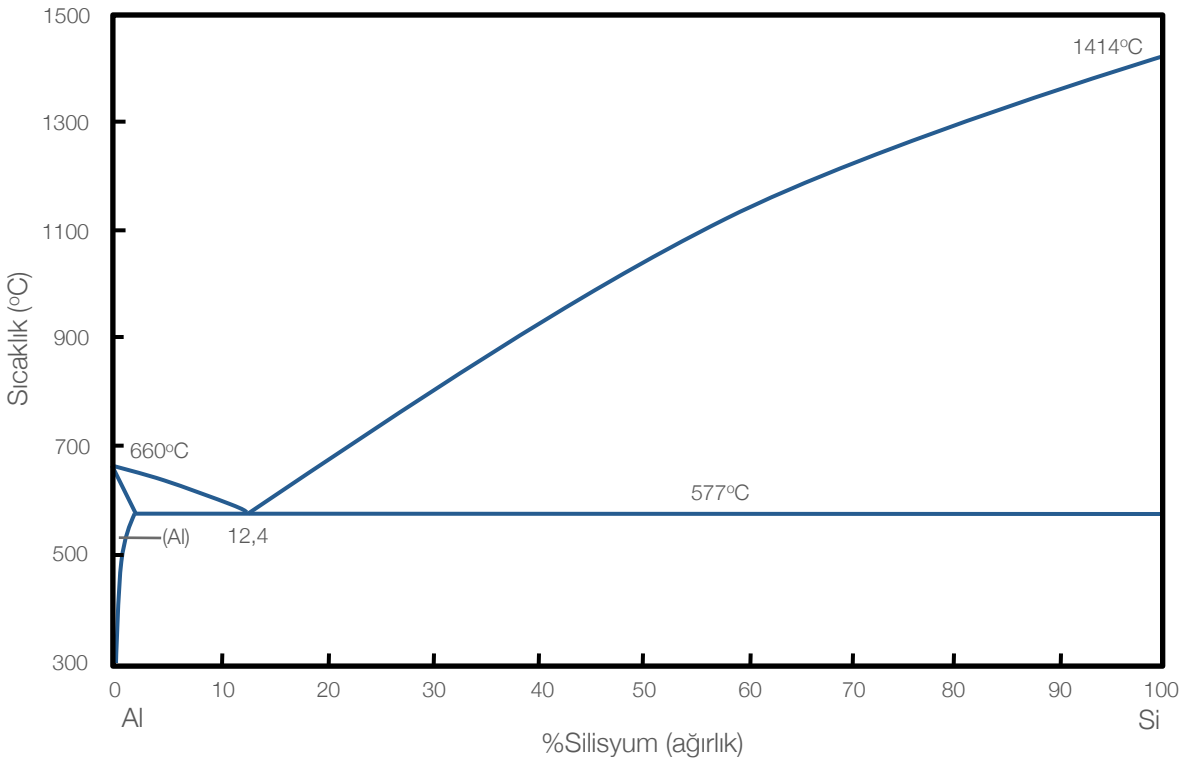
Buz dendritleri. Birçok alüminyum alaşımında görülen dendritik katılaşma yapısı, doğada birçok yerde karşımıza çıkabiliyor. (Resim © storyofsnow.com)

Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarına genel bir bakış

Alüminyum döküm alaşımlarından bahsederken, silisyum kullanılarak üretilen alaşımların ayrı bir yeri olduğunu kabul etmemiz gerekiyor. Çünkü döküm alaşımları sınıflandırılmasında 4xx.x koduyla, ya da içinde magnezyum veya bakır da varsa 3xx.x sayı koduyla (A356.0 gibi) belirtilen bu alaşımlar, döküm yoluyla üretilen tüm alüminyum alaşımları içinde %90'a varan bir oranı teşkil ediyorlar. Silisyumun sağladığı yüksek akışkanlık sayesinde karmaşık ve ince kesitlere sahip parçaların döküm yoluyla üretimini mümkün kılabilen bu alaşımlar ötektik modifikasyon gibi işlemlere de uygun oldukları için, mekanik özelliklerin geniş bir yelpazede değiştirilip ayarlanabilmesine olanak tanıyorlar.

Mukavemetin çok yüksek olmasına gerek olmayan ama iyi bir korozyon direnci istenen durumlarda bakır içermeyen alaşımlar tercih edilirken, yüksek mukavemet değerlerinin gerektiği ama korozyon direncinin çok önemli olmadığı durumlarda ise %5'e kadar bakır içeren alaşımlar kullanılabiliyor. Silisyum sıvı metale bir yandan akışkanlık sağlarken, diğer yandan dökülen parçada çekinti oluşma eğilimini de azaltıyor.

Alüminyum-silisyum denge faz diyagramı



Alüminyum-silisyum faz diyagramında ötektik nokta %12,6 Si'ye denk geldiği için, alüminyum dendritlerinin yapıda bulunduğu ve yüksek çekme dayanımına sahip alaşımlar üretebilmek için silisyum miktarını bu ötektik değerin altında tutmak gerekiyor. A356 gibi yaygın kullanılan alüminyum döküm alaşımlarına baktığımızda, silisyum miktarının %7 civarında olduğunu görüyoruz. Silisyum parçacıklarının verdiği yüksek aşınma direncinin istendiği durumlarda ise, silisyum miktarının ötektik nokta (%12,6 Si) üzerine çıkartılması gerekiyor. Döküm yöntemiyle üretilen parçalarda görülen en yüksek silisyum değerleri %24 civarında olurken, toz metalurjisi yönteminde bu oran %50 değerine kadar çıkartılabiliyor.

Al-Si alaşımlarında bulunması istenmeyen elementlerin başında demir geliyor. Alüminyum ile oldukça kararlı yapıda, fakat kırılgan doğaya sahip intermetalik bileşikler oluşturan demir, parçanın sünekliğini olumsuz etkilediği gibi, aynı zamanda korozyon dayancını da düşürüyor. Kum ve kokil kalıba dökümlerde maksimum %0,6

civarına kadar tolere edilen demir, basınçlı dökümde zaman zaman %3'e kadar tolere edilebiliyor. Demirin yarattığı bu zararlı etkilerden kurtulmak için alaşım içine bir miktar mangan ya da kobalt eklendiğini görebiliyoruz.

Al-Si alaşımlarında en önemli mikroyapısal değişimi yaratan element ise stronsiyum (Sr): Ötektik reaksiyon ile oluşan silisyum parçacıklarını incelten ve küreselleştiren stronsiyum, bu etki sayesinde parçanın mukavemetinde ve özellikle sünekliğinde önemli bir iyileşme sağlıyor. Stronsiyuma benzer şekilde sodyum da (Na) silisyum parçacıkları üzerinde aynı etkiyi ortaya çıkartıyor. Tabii bu etkinin özellikle kum dökümde daha belirgin şekilde gözlendiğini belirtmemizde fayda var. Basınçlı dökümdeki yüksek soğuma hızı silisyum parçacıklarının hâlihazırda incelmesini sağladığı için, Sr'nin sağladığı iyileşmenin etkisi ister istemez daha az belirgin bir hale geliyor.

Şimdi ilk olarak ötektik modifikasyon adı verilen bu işlemin alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısında yarattığı değişimlere biraz daha yakından bakalım. Ardından, tane inceltme gibi mikroyapı ve mekanik özellikleri etkileyen diğer işlemlerle devam edelim.

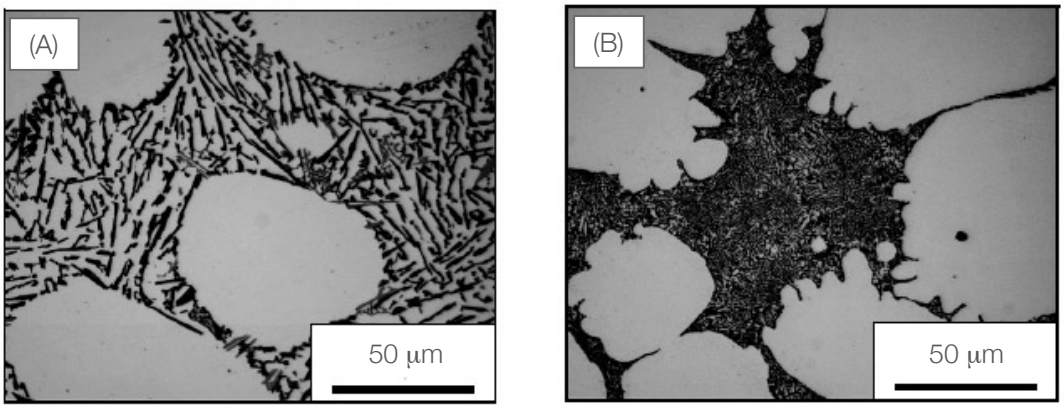
Alüminyum-silisyum alaşımlarının ötektik modifikasyonu

Ötektik modifikasyon adı verilen işlemin temel amacı, iğnemsi bir yapı sergileyen ötektik silisyum parçacıklarının sivri köşelerinin yuvarlanmasını sağlamak. Malzemelerin mekanik özellikleri, mikroyapıda bulunan köşeli ve sivri kenarlara sahip iğnemsi fazların varlığından olumsuz şekilde etkilendiği için, bu özelliklere sahip silisyum parçacıkları yuvarlanmış hatlara sahip olarak katılaştığı zaman, döküm parçanın mekanik özelliklerinin bu değişimden olumlu yönde etkilendiğini görüyoruz. Şimdi bu değişim nasıl gerçekleşiyor, ona bakalım.

Bir sonraki sayfada (A) ile gösterilen soldaki resimde ötektik altı bir Al-Si alaşımının mikroyapısı gösteriliyor. Açık renkli ve birbirine bağlı görünen yapılar, α-Al olarak tanımladığımız alüminyum dendritlerinin iki boyutlu kesitleri. Bu dendritler arasında kalan ve iğnemsi olarak görünen koyu renkli yapı ise, ötektik reaksiyon sonucunda ortaya çıkan silisyum tabakaları. Tabaka yapısındaki bu silisyum parçaları, kesilip parlatılmış bir yüzey üzerinde mikroyapı resminde olduğu gibi iğnemsi bir yapıda görünüyorlar. Bir sonraki sayfada (B) ile gösterilen sağdaki resimde ise, Sr takviyesinin aynı alaşımda yarattığı değişim gösteriliyor. Dikkat ederseniz α-Al dendritleri üzerinde önemli bir etki göze çarpmamasına rağmen, ötektik silisyum tabakaları çok daha incelmiş ve tabakadan ziyade elyafımsı bir yapıda ortaya çıkmış durumdalar.

Ötektik modifikasyonun silisyum parçacıklarına etkisi

Kaynak: Reddy et al. (2013)



Al-Si alaşımlarında Sr'nin etkisini bu fotoğraflar üzerinde tekrar bir özetleyelim: Döküm öncesinde sıvı alaşıma eklenen eser miktarda Sr, ötektik silisyum tabakalarının ince elyaf yapısına kavuşmalarına yol açıyor. Hem malzemenin dayanımını, hem de sünekliğini olumsuz şekilde etkileyen bu sert Si tabakaları Sr sayesinde ince fiber yapısında ortaya çıkınca, ister istemez malzemenin hem dayanımında, hem de sünekliğinde önemli bir artış elde ediyoruz.

Bu tür bir etki sadece Sr ile değil, sodyum (Na) ya da antimon (Sb) gibi elementlerle, ya da soğuma hızını arttırarak da elde edilebiliyor. Fakat kokil ve basınçlı dökümde soğuma hızı üzerinde önemli bir kontrol şansı olmaması ve eser miktarda Sr'nin bu etkiyi ortaya çıkartabilmesi nedeniyle, sanayide bu amaçla yaygın şekilde Sr'nin tercih edildiğini görüyoruz. Aynı zamanda Sr'nin modifiye edici etkisinin sodyuma göre daha uzun sürmesi de, bu elementin tercih edilme nedenlerinden bir diğeri. Sr her ne kadar ötektik modifikason sayesinde mekanik özellikleri olumlu yönde etkiliyor olsa da, olumsuz bir yan etkisi de bulunuyor: Teknik literatürde sunulan bilgilere göre Sr ilavesi yapılan eriyiklerde, katılaşma sırasında hidrojen gözeneklerinin oluşma eğilimi artıyor.

Stronsyum ilavesi genellikle %10 civarı Sr içeren master alaşımlar kullanılarak gerçekleştiriliyor. Stronsyumun etkisi özellikle ötektik-altı silisyum parçacıkları üzerinde görüldüğü için, optimum etkilerin %5 ila %12 arasında silisyum içeren alaşımlarda ortaya çıktığını görüyoruz. Ötektik-üstü kompozisyona sahip alaşımlarda ortaya çıkan büyük birincil parçacıklar üzerinde stronsiyumun pek bir etkisini görmüyoruz.

Ötektik üstü alaşımlarda modifikasyon

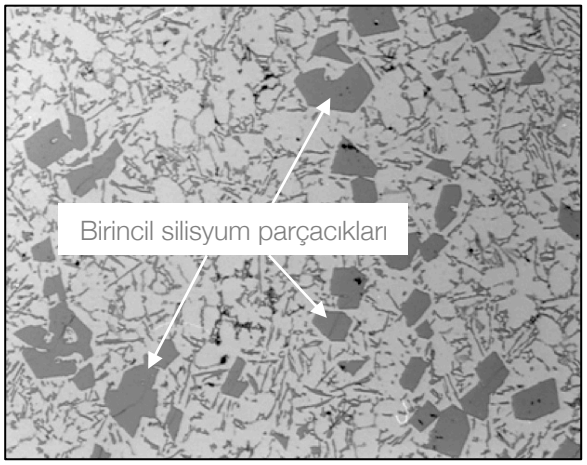
Yukarıdaki mikroyapı fotoğrafları, katılaşmanın α-Al dendritleriyle başladığı ötektik altı alaşımların genel durumunu tem-

sil ediyor. Tabii bu noktada, bu alaşımlara aşinalığı olan birçok kişinin aklına, ötektik üstü alaşımlarda ortaya çıkan birincil silisyum parçacıklarının bu modifikasyondan nasıl etkileneceği sorusu geliyor olabilir. Stronsiyum, bu birincil silisyum parçacıklarının boyutları üzerinde de bir incelme etkisi yaratıyor. Fakat bu parçacıkların özellikle inceltilmek istenildiği durumlarda, stronsiyuma ek olarak, alaşım içine bir miktar fosfor da ekleniyor. Teknik literatürde sunulan çeşitli çalışmalarda, birincil silisyum parçacıklarının AlP üzerinde çekirdeklendiğine dair bulgular görebiliyoruz. Bu nedenle stronsiyuma ek olarak az miktarda fosfor da kullanılması, bu büyük silisyum parçacıklarının hem incelmelerini, hem de yapıda daha homojen bir şekilde dağılmalarını sağlayabiliyor.

Önemli bir bilgi: Teknik literatürdeki bilgilere göre, fosfor ve stronsiyumu aynı anda ekleyerek hem birincil, hem de ötektik silisyum parçacıkları modifiye edemiyoruz. Bu zorluğun üstesinden gelmek amacıyla, fosfor eklenmiş ötektik üstü alaşımlarla, stronsiyum eklenmiş ötektik kompozisyona sahip alaşımları karıştırarak, iki aşamalı bir döküm yaklaşımının geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapıldığını görüyoruz. Teknik literatürde sunulan verilere göre modifikasyon bu tür ötektik üstü bir alaşımın çekme dayanımında %15 oranında bir artış sağlarken, sünekliğin iki katına çıkmasına yol açabiliyor. Tabii bu tür çalışmaların, laboratuvar ölçeğinde başarıyla gerçekleştirilebiliyor olsalar da, sanayi ölçeğinde seri üretimde uygulanmasının maliyet açısından problemli olacağını belirtmekte fayda var.

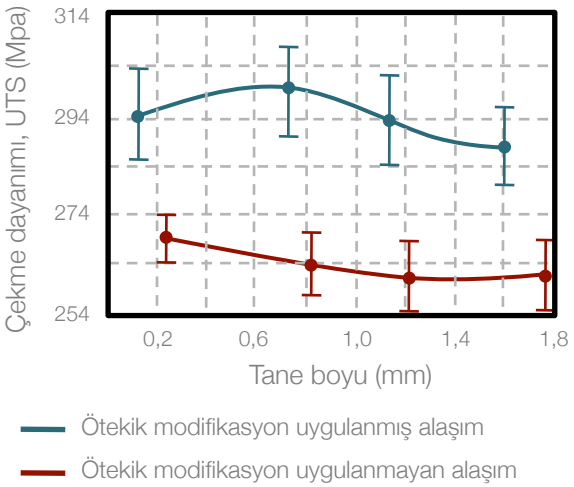
Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında birincil silisyum parçacıklarının yapısı

Kaynak: Warmuzek (2004)



Ötektik modifikasyonun A356 alaşımının çekme dayanımına etkisi

Kaynak: Davis (2001)



Tablo: Ötektik modifikasyonun mekanik özelliklere etkilerinden örnekler. (Kaynak: Zalenas, 1993).

Alaşım	Üretim Yöntemi	Modifikasyon	AkmaDayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
13% Si	Kum kalıp	Yok	-	124	2,0
		Na	-	193	13,0
	Kokil kalıp	Yok	-	193	3,6
		Na	-	221	8,0
356.0-T6	Kum kalıp	Yok	208	289	2,0
		%0,07 Sr	238	293	3,0
	Soğutuculu kum kalıp	Yok	213	284	4,4
		%0,07 Sr	218	291	7,2
A356.0-T6	Kum kalıp	Yok	179	226	4,8
		%0,01 Sr	207	297	8,0
A444.0-T4	Kokil kalıp	Yok	-	151	24,0
		%0,07 Sr	-	149	30,0

Alüminyum alaşımlarında tane inceltme

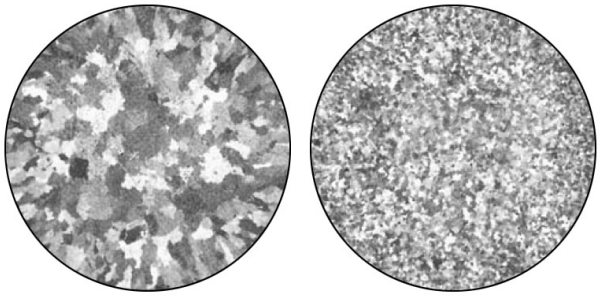
Tane inceltmenin artı yönlerini biliyoruz: İnce taneli yapıya sahip bir parça, daha iri taneli bir parçaya göre daha yüksek bir dayanım sergiliyor. Tane boyunu değiştirmenin en bilindik yolu ise soğuma hızı ile oynamak: Dökülen parçanın hızlı soğuyan kısımlarında ince taneler ortaya çıkarken, göreceli olarak daha yavaş soğuyan kısımlarında daha iri taneler ortaya çıkıyor. Eğer birçok farklı kesit kalınlığı sergileyen bir parçayı hiçbir müdahalede bulunmadan dökerseniz, ince kesitler daha ince taneli ve dolayısıyla daha iyi mekanik özelliklere sahip olarak, kalın kesitler ise daha kalın taneli ve dolayısıyla daha zayıf mekanik özellikler sergileyerek katılaşabiliyor. Hem mekanik özellikler ara-

sındaki bu değişimleri ortadan kaldırmak, hem parçada ortaya çıkan ikincil fazların dağılımını kontrol altına alabilmek, hem de parçanın yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla, tane boyu dağılımını sadece soğuma hızının inisiyatifine bırakmadan, eklediğimiz bir takım katkı maddeleriyle bizim kontrol altına almamız gerekebiliyor.

1930'lu yılların başında uygulanan pratiklere baktığımızda, alüminyum alaşımlarında tane inceltmek için sıvı içinde titanyum eklendiğini görüyoruz. Günümüzde ise genellikle çok daha etkili bir tane inceltici etkisine sahip olan Al-Ti-B alaşımları kullanılıyor. Mikroskobik ölçekte TiB_2 ve $TiAl_3$ parçacıkları içeren bu alaşımlar sıvıya eklendiğinde, sıvıya geçen bu ufak parçacıklar alüminyum kristallerinin çekirdeklenebilecekleri birer yüzey görevi görüyorlar. Bunun doğal sonucu olarak katılaşma birçok farklı noktadan başladığı için, katılaşma sonunda birim hacim içinde düşen tane sayısının arttığını görüyoruz. Diğer bir deyişle tane boyunun küçüldüğünü, yani tanelerin inceldiğini gözlemliyoruz. Aynı zamanda kalıp yüzeyinden içeri doğru büyüyen sütunsu (İngilizce: *columnar*) taneler yerine, ince ve eşeksenli (İngilizce: *equiaxed*) tanelerden oluşan bir yapı elde ediyoruz. İlgili okurlarımız için parantez içinde şunu da belirtelim: Her ne kadar alaşımların içindeki TiB_2 ve $TiAl_3$ parçacıkları tane incelmesini sağlıyor desek de, sadece TiB_2 ya da sadece $TiAl_3$ içeren alaşımlarda bu etkinin daha zayıf bir şekilde ortaya çıktığını görüyoruz. Yani bu iki bileşiği de içeren alaşımlar çok daha kuvvetli bir inceltici etki ortaya çıkartabiliyorlar. Bu alaşımların dışında, tane inceltme amacıyla zaman zaman TiC içeren alaşımların kullanıldığını da görebiliyoruz.

Al - %7 Si alaşımında tane incelticinin etkisi

Kaynak: Kaufman, Rooy (2004)



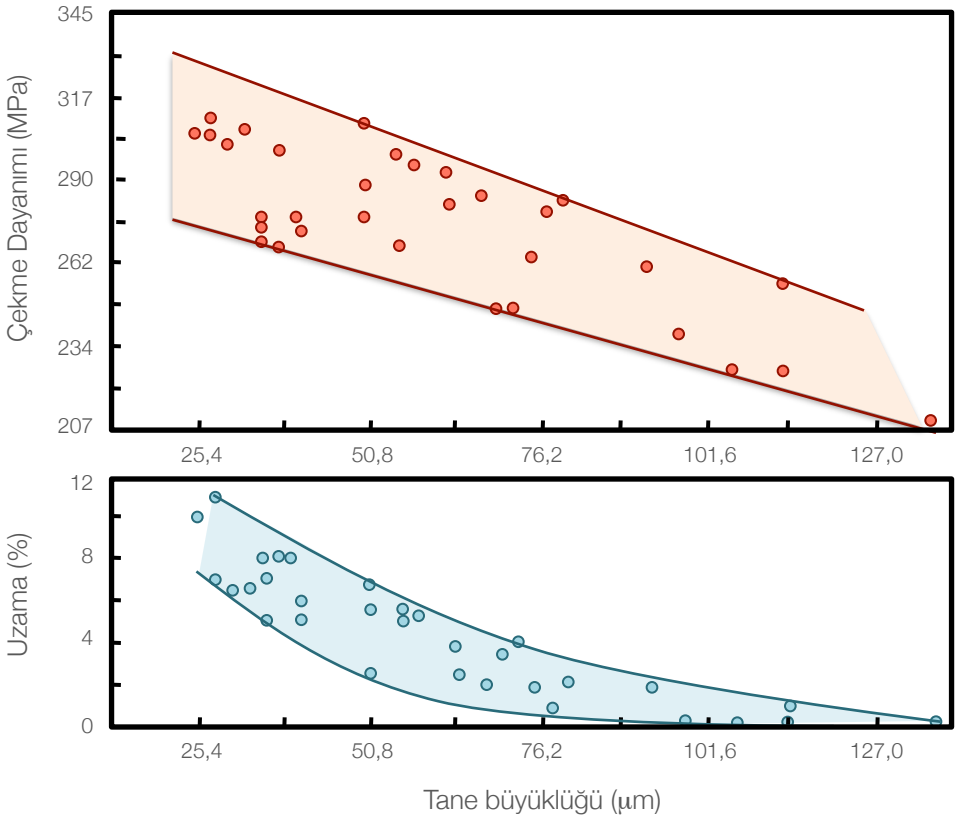
Tane inceltme öncesi

Tane inceltme sonrası

Ötektik modifikasyon her ne kadar silisyum içeren ötektik altı alaşımlarda görülebilen bir işleyiş olsa da, bütün alüminyum döküm alaşımlarına tane inceltme işlemi uygulanabiliyor. Bu amaçla kullanılan tane inceltici alaşımlar arasında alüminyum-titanyum bazlı olanlar genellikle %3 ila %10 arasında titanyum içeriyorlar. Al-Ti-B alaşımlarının ise %0,2 ila %1 arasında bor içerdiklerini ve Ti/B oranı 5 ila 50 aralığında olacak şekilde titanyum miktarının değişebildiğini görüyoruz. Taneler inceldiği zaman mekanik özelliklerde meydana gelen değişimlerin kısa bir özeti bir sonraki sayfada yer alan grafik üzerinde incelenebilir.

Al - %7 Si alaşımında tane incelticinin etkisi

Kaynak: Kaufman, Rooy (2004)



Tane incelticileri kullanırken dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar bulunuyor. Örneğin süre konusu, dikkat etmemiz gereken konulardan bir tanesi. Çünkü tane incelticilerin etkisi zamanla geçebiliyor. Diğer bir deyişle, tane inceltici malzemeyi sıvı içine ekledikten sonra dilediğimiz kadar bekleme özgürlüğüne sahip değiliz. Mutlaka fazla süre geçirmeden döküme gitmemiz gerekiyor. Bunun nedeni sıvı içine eklenen TiB_2 ya da TiC parçacıklarının çözünmesi değil: Bu parçacıklar çözünmeden nispeten uzun bir süre sıvıda kalabiliyorlar. Fakat özellikle TiB_2 kullanıldığında, parçacıklar bir süre sonra topaklanma ve dibe çökme eğilimi göstermeye başlıyorlar. TiC kullanıldığında bu eğilim nispeten daha düşük olsa da, yine de topaklanma ve dibe çökmenin bir süre sonra gerçekleştiğini görüyoruz.

Al-Ti-B alaşımları kullanıldığında ortaya çıkan bir diğer sorun ise, alüminyum içinde zirkonyum bulunduğunda ortaya çıkıyor.

Zirkonyum bir tür "zehirleme" etkisi yaratarak, tane incelticinin etki göstermesini engelliyor. Teknik literatürde yayımlanan araştırmalara göz attığımızda, bu "zehirlenme" etkisinin ardında zirkonyumun titanyum ile yer değiştirerek, tane inceltici etki ortaya çıkarması beklenen parçacıkların yapısında bir modifikasyona yol açması yattığını görüyoruz.

Bu geleneksel yöntemlerden farklı olarak, ses dalgalarıyla (ultrason) ve elektromanyetik dalgalarla da tane inceltici etki elde edilebildiğini gösteren bazı araştırmalar teknik literatürde bulunuyor.

İntermetalikler

Alüminyum döküm alaşımlarının sergilediği mekanik özellikler her ne kadar otomotiv uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde olsa da, yapıda bulunan çeşitli intermetalik parçacıklar, döküm parçaların hem mekanik, hem tribolojik özelliklerini, hem de korozyon dayanımlarını olumsuz yönde etkileyebiliyor. Tabii her intermetalik parçacık için aynı şeyi söyleyemeyiz: Parçacıkların sahip olduğu sertliğe, biçimsel ve kimyasal özelliklere, ve parçacıkların dağılımlarına göre ortaya çıkarttıkları etkilerin değiştiğini biliyoruz. Bu nedenle hangi parçacıkların, ne oranda yapıda bulunmalarına izin vermemiz gerektiğini iyi bilmemiz, dökülen parçaların özellikleri üzerinde kontrol sağlayabilmemiz açısından büyük önem taşıyor. Örneğin küresel biçime sahip ve homojen dağılıma sahip küçük parçacıklar mekanik özellikler açısından olumlu etkiler yaratabilirken, sivri kenarlara sahip nispeten büyük parçacıklar, özellikle belli konumlarda topaklanarak ortaya çıkmışlarsa, mekanik özellikleri ciddi şekilde olumsuz etkiliyorlar.

İntermetalik parçacıklar farklı boyutlarda ve biçimsel özelliklere sahip olacak şekilde karşımıza çıkabiliyorlar. Örnek olarak bir sonraki sayfada yer alan tabloda 2xx.x ve 3xx.x alaşımlarında görülen başlıca intermetalik fazların boyutları ve biçimsel özellikleri gösteriliyor.

Hangi intermetalik yapıların ne tür biçimsel özellikler sergilediğini bilmek, mekanik özellikleri optimize edebilmemiz açısından büyük önem taşıyor. Örneğin ötektik Si parçacıkları büyük ve iğnemsi bir biçime sahip olmalarına rağmen, alaşımda bakır bulunması bu parçacıkların ince, fiber yapısına sahip olmalarını sağlayarak tribolojik özellikleri olumlu yönde etkiliyor. Alaşımda bir miktar magnezyum da varsa, Al_2Cu parçacıklarını incelterek Al_2CuMg yapısının ortaya çıkmasını sağlayabiliyor. Resmi anladınız: Eğer bu intermetaliklerin biçimsel özellikleri ve kompozisyonu hakkında bilgi sahibi değilsek, mekanik özellikleri istediğimiz düzeye taşımak için ne tür müdahalelerde bulunmamız gerektiğini anlamamız pek kolay olmuyor.

Genel bir kural olarak, intermetalliklerin boyutları inceldikçe mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattıklarını söyleyebiliriz. Büyük parçacıklar, sergiledikleri biçimsel özellikler nedeniyle malzemenin sadece mekanik özelliklerini değil, tribolojik özelliklerini ve korozyon

Tablo: 2xx.x ve 3xx.x alüminyum alaşımlarında görülen çeşitli fazların biçimsel özellikleri.

Alaşım	Yapı	Gösterim	Boyut	Biçim
2xx.x	Si		5 – 12	İğnemsi
	Al_2Cu	θ	< 50	Köşeli yumru
	Al_2CuMg	S	0,5 – 10	Düzensiz yuvarlak
	Al_7Cu_2Fe	ω	0,7 – 2,7	İnce iğnemsi
	$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$	Q	< 20	Bal peteği
	$Al_{12}(FeMn)_3Si$	α	< 0,5	Çok yüzlü
	$Al_{20}Cu_2Mn_3$	T	< 0,1	Dağıntı
3xx.x	Si		5 – 12	İğnemsi
	Al_2Cu	θ	< 50	Köşeli yumru
	Al_2CuMg	S	0,5 – 10	Düzensiz yuvarlak
	Al_7Cu_2Fe	ω	0,7 – 2,7	İnce iğnemsi
	$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$	Q	< 20	Bal peteği
	$Al_{12}(FeMn)_3Si$	α	< 0,5	Çok yüzlü
	$Al_{20}Cu_2Mn_3$	T	< 0,1	Dağıntı
	Mg_2Si	β	~10	Katmanlı, çubuk
	$Al_8Mg_3FeSi_2$	π	< 0,5	Çin harfi

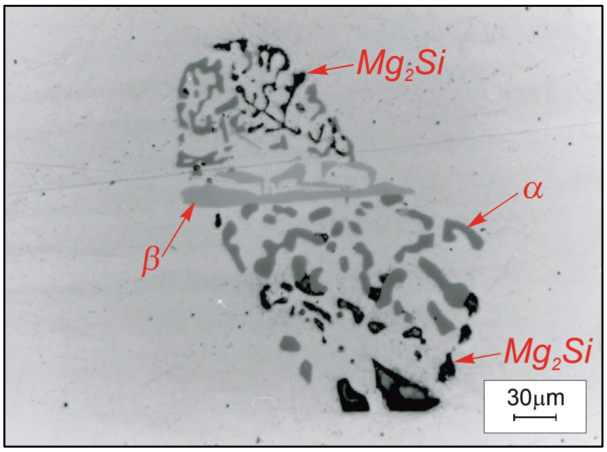
dirençlerini de olumsuz yönde etkileyebiliyorlar. Bu parçacıkları inceltmenin en bilinen yolu ise soğuma hızını arttırmak: Soğuma hızı arttığı zaman bu parçacıkların hem inceldiklerini, hem de belli konumlarda topaklanma eğilimlerinin azaldığını ve buna bağlı olarak malzemenin güçlendiğini teknik literatürdeki birçok araştırmada görebiliyoruz. Bu parçacıkların belli konumlarda topaklanmak yerine homojen bir dağılım eğilimi göstermeleri sadece mekanik özellikleri değil, korozyon dayanımını da arttıran bir etki ortaya çıkarıyor.

İsterseniz bir örnek vermek adına Al-Si-Mg-Mn alaşımlarında karşımıza çıkan iki parçacığın yapısına biraz yakından bakalım: Mg_2Si ve Al_6Mn. İlk olarak Mg_2Si ile başlayalım: Bu faz, Mg içeren Al-Si alaşımlarında iskeleti andıran bir yapı halinde katılaşıyor. Mikroskop altında baktığımız zaman, sanki Çin alfabesinden alınmış bir harfi de andırdığı için, bazı kaynaklarda bu fazdan *Chinese script* adıyla bahsedildiğini de görebilirsiniz. Oldukça kırılgan bir yapı sergileyen bu fazın yapıda bulunması en yüksek çekme dayanımını 150 MPa mertebesine, uzama değerlerini ise %1 civarına kadar düşürebiliyor. Yanda gösterilen ve Mrowka-Nowotnik'in (2007) çalışmasından alınan mikroyapı resminde, 6082 alaşımında bu fazın nasıl bir yapı sergilediğini görebilirsiniz. Yapıda β olarak gösterilen diğer bileşik ise, demir de içeren β-Al_5FeSi intermetalik parçacığı.

Mg_2Si fazı böyle bir mikroyapı resmi üzerinde her ne kadar Çin alfabesinden alınmış bir harfi andırsa da, ölçeği biraz arttırıp daha yakından baktığımız zaman, bu fazın aslında yan yana dizilmiş plakalar halinde bir yapı sergilediğini görüyoruz. Metalurji ile aşina olan okuyucularımız kolaylıkla anlamışlardır: Yan yana dizilmiş bu plakalar, aslında aşina olduğumuz ötektik yapının oluştuğunu gösteriyor. Yani katmanlar halinde sıralanmış bir Al-Mg_2Si ötektiğinin oluşmuş olduğunu görüyoruz. Fakat şunu da özellikle vurgulamamız lazım: Bu faz her zaman plaka yapısında katılaşmıyor. Alaşımı yüksek bir soğuma hızı altında katılaştırdığımız zaman, küreselleşme eğilimi de gösterebiliyor.

AlSi1MgMn alaşımında β-Al_5FeSi ve Mg_2Si parçacıkları

Kaynak: Mrowka-Nowotnik et al. (2007)



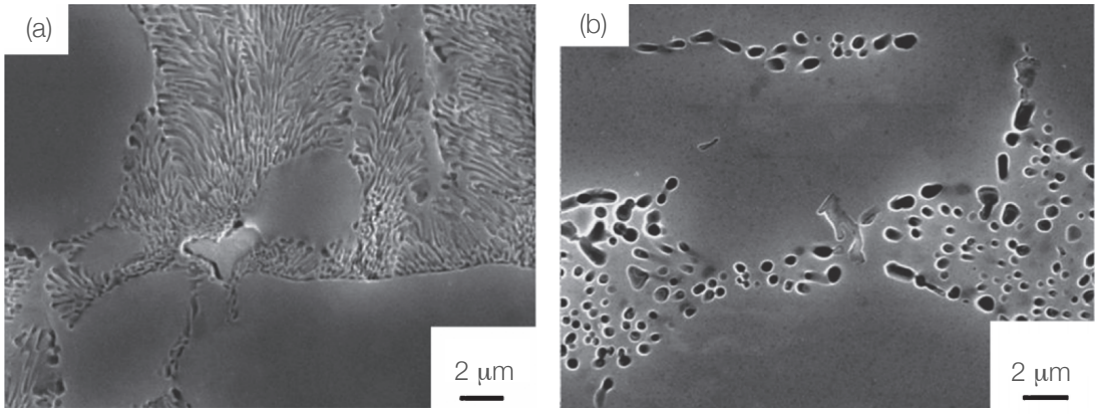
Soğuma hızının intermetaliklerin yapısına etkisi

Bir önceki kısımdaki son cümle üzerinde biraz daha durmamız faydalı olabilir: Eğer hızlı katılaşma koşullarını elde edebilirsek, herhangi bir kimyasal takviye kullanmaya gerek kalmadan bu parçacıkları küreselleştirme fırsatı bulabildiğimizi söylüyoruz. Bu, mekanik özellikler açısından iyi bir haber. Fakat burada bahsettiğimiz yüksek soğuma hızlarının gerçekten de yüksek değerlere tekabül ettiğini belirtmemiz lazım. Örnek olarak kokil döküm ile bu etkiyi elde etmemiz oldukça zor. Ancak saniyede 1000°C'ye varan soğuma hızlarının elde edilebildiği ikiz merdane döküm yönteminde Mg_2Si parçacıklarının gerçekten de küresel bir yapı sergilemeye başladıklarını görebiliyoruz.

Soğuma hızının yapısında önemli bir değişiklik yaratmadığı bazı parçacıklarda var. Bunu özellikle vurgulamakta fayda olabilir, çünkü soğuma hızının artması mutlaka bütün parçacıkların yapısını inceltecek diye bir kural yok. Örnek olarak aşağıda gösterilen mikroyapı resimlerinde (a) kokil döküm, ve (b) ikiz merdane döküm yöntemleriyle üretilen alaşımlarda Al_6Mn parçacıklarının yapısı gösteriliyor. Resimde de görülebileceği üzere soğuma hızının nispeten yavaş olduğu kokil dökümde çubuğumsu yapısı sergileyen bu faz (solda, a), soğuma hızının çok daha yüksek olduğu ikiz merdane döküm parçalarda biraz küreselleşiyor (sağda, b). Fakat bu değişime rağmen ölçek bazında baktığımızda, bu parçacıkların soğuma hızından önemli bir şekilde etkilenmiş olduklarını söyleyemeyiz.

Soğuma hızının Al_6Mn parçacıklarının yapısına etkisi

Kaynak: Shimosaka et al. (2011)



Kokil döküm yapısı

İkiz merdane döküm yapısı

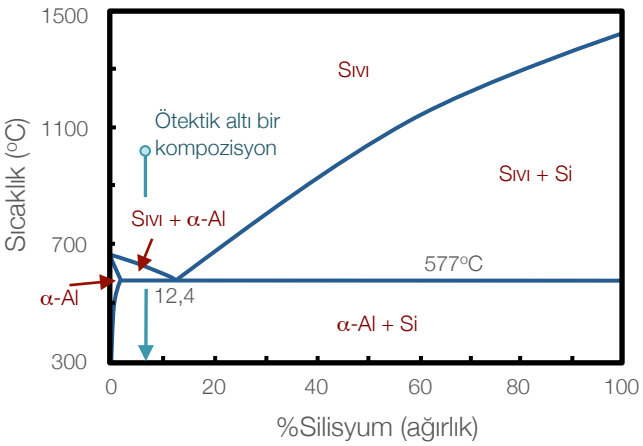
Soğuma hızı konusunu sadece intermetalik parçacıklar çerçevesinde ele almamız doğru olmaz. Çünkü soğuma hızı sadece bu parçacıklar üzerinde değil, alaşımın tüm yapısı üzerinde önemli etkiler yaratabiliyor. O yüzden isterseniz bir de büyük resmi görmek adına soğuma hızı malzemenin yapısını nasıl etkiliyor, bir de ona bakalım.

Alüminyum alaşımlarında soğuma hızının etkisi

Alüminyum alaşımlarının mikroyapısal ve doğal olarak mekank özelliklerini etkileyen birçok etken sayabiliriz: Örneğin alaşımın kompozsiyonu, uygulanan döküm yöntemi ve ısıl işlem gibi. Fakat bu değişkenlerin hepsini sabitlesek ve aynı kompozisyona sahip iki alaşımı, aynı döküm yöntemiyle üretip ardından aynı ısıl işlemi uygulasak bile, elde ettiğimiz özellikler birbirinden farklı olabiliyor. Tahmin edebileceğiniz gibi, bu tür bir örnekte bu farkı yaratan temel etken soğuma hızı oluyor. Aynı döküm yöntemiyle üretilen ve yavaş katılaşan bir parçanın (ya da kesitin) mekanik ve mikroyapısal özellikleri, hızlı soğuyan bir parçaya (ya da kesite) kıyasla farklılık gösteriyor.

Soğuma hızının nasıl böyle bir fark ortaya çıkardığını anlamak için, öncelikle alüminyum alaşımlarının katılaşma sırasını tekrar bir hatırlamamız gerekiyor. Konunun kapsamını fazla dağıtmamak adına, isterseniz tipik bir 3xx serisi (Al-Si-Mg/Cu) alaşım üzerinden bu sırayı bir hatırlayalım. Alaşımda her ne kadar farklı elementler bulunsa da, daha kolay anlaşılmasını sağlamak için bu sırayı ana

Ötektik altı bir Al-Si alaşımının katılaşma sırası



alaşım elementlerini gösteren, yukarıdaki Al-Si denge faz diyagramı üzerinde takip edelim:

I. Ötektik altı kompozisyona sahip bir alaşımda katılaşma ilk olarak alüminyum dendritleriyle başlıyor. Alaşımın içerdiği silisyum miktarına bağlı olarak, bu dendritlerin ilk ortaya çıktığı sıcaklık 580-620°C arasında değişebiliyor. Dendritik katılaşma sırasında diğer alaşım elementleri dendritlerden dışarı kusulduğu için, bu süreçte sıvının bu elementler açısından zenginleştiğini görüyoruz.

II. Bir 3xx alaşımında dışarı kusulan bu elementlerden en önemlisi, temel alaşım elemeni olan silisyum. Silisyum, dendritik katılaşma süresince kusularak sıvıda biriktiği için, yaklaşık 555-570°C aralığında, bu elementin sıvıdaki miktarı ötektik kompozisyona geliyor ve ötektik katılaşma başlıyor.

III. Demir (Fe) içeren bazı intermetalik fazlar da, ötektik tepkimenin gerçekleştiği bu sıcaklık aralığında katılaşıyorlar.
IV. Sıcaklık biraz daha düşüp 540°C değerine geldiğinde, Mg_2Si ve $Al_8Mg_3FeSi_6$ fazlarının çökelmeye başladıklarını görüyoruz.
V. Sıcaklık biraz daha azalıp 470-500°C aralığına geldiğinde ise, bu sefer sıra bakır içeren fazlara geliyor ve Al_2Cu ve $Al_{15}Mg_8Cu_2Si_6$ intermetalikleri çökeliyor.

Soğuma hızı bu fazların katılaşma sırasını değiştirmiyor elbette, fakat fazların boyutlarını ve dağılımını etkiliyor. Tane incelticilerin etkisini biliyoruz: İnce taneler malzemenin dayanımının artmasına yol açıyor. Benzer şekilde, yüksek soğuma hızı da yapıları incelterek malzemenin dayanımının artmasına yol açıyor.

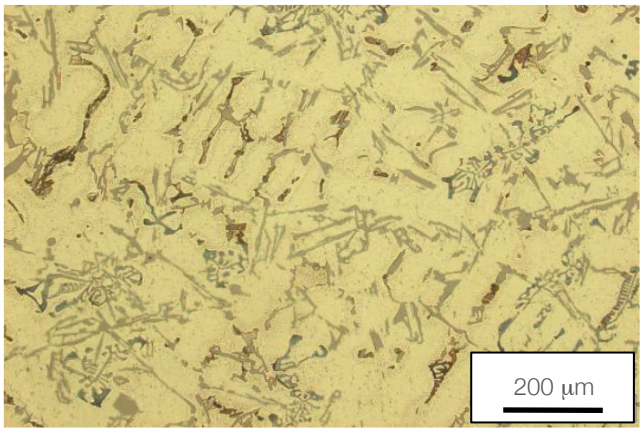
Dendrit kol aralığı ve soğuma hızı ilişkisi

Bu katılaşma sırası içinde, soğuma hızına bağlı olarak incelen ilk faz alüminyum dendritleri. Ağacı andıran bu dendritlerin kolları arasındaki mesafe, soğuma hızı arttığı zaman azalıyor. Yani malzemenin yapısı, dendrit kolları arasındaki mesafe açısından incelmiş oluyor. Bu dendrit ağı birbirine ne kadar kenetlenmiş bir şekilde oluşursa, malzemenin dayanımı o oranda arttığı için, sonuç olarak malzemenin güçlendiğini görüyoruz.

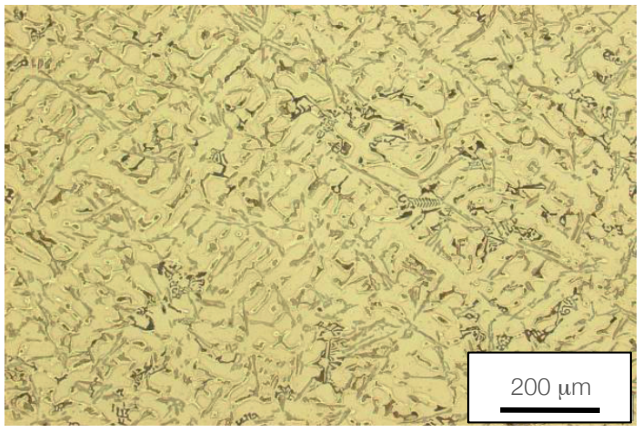
Soğuma hızının dendrit kol aralığına etkisi

Kaynak: Dobrzanski et al. (2007)

(A) Soğuma hızı = 0,16°C/s

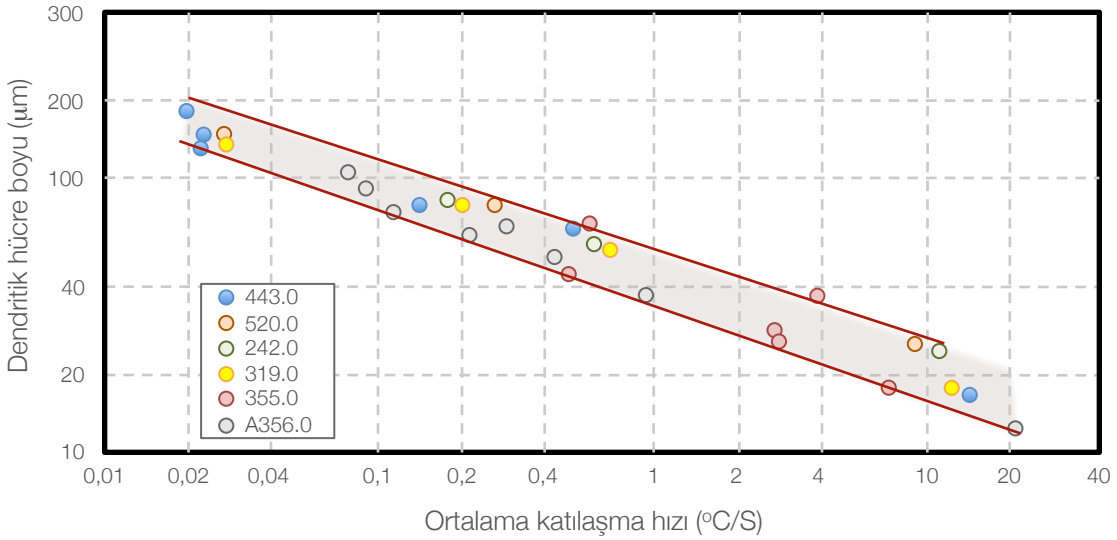


(B) Soğuma hızı = 1,04°C/s



Katılaşma hızı ve dendritik hücre boyu ilişkisi

Kaynak: Kaufman, Rooy (2004)



Dendrit kol aralığı mesafesi gerçekten de soğuma hızıyla oldukça tutarlı bir şekilde değişen bir parametre. Farklı döküm alaşımları dikkate alındığında bile, soğuma hızına bağlı olarak dendritik hücre boyunun ve dendrit kol aralığı değerlerinin hep benzer şekilde değiştiğini görüyoruz. Örnek olarak yukarıdaki grafik üzerinde farklı alüminyum alaşımlarında soğuma hızına bağlı olarak dendritik hücre boyunun nasıl değiştiğini inceleyebilirsiniz.

Dayanımdaki artışı sadece dendritlere mâl etmek doğru mu?

Çeşitli makale ve kitaplarda, dendritlerin kol aralığı ve çekme dayanımı arasında bir ilişki kurulduğunu ve bazı matematiksel eşitliklerin verildiğini görebilirsiniz. Aslında bu eşitliklere ve genel olarak bu yaklaşıma biraz kuşkuyla bakmamız lazım. Çünkü soğuma hızından sadece alüminyum dendritleri değil, önceki sayfalarda da bahsettiğimiz gibi birçok faz etkileniyor. Dolayısıyla farklı soğuma hızında katılaşmış alaşımların dendrit boylarına bakıp, bunu direkt çekme dayanımıyla ilişkilendirecek şekilde denklemler kurmak, bu sebeple pek doğru değil. O yüzden biz burada bu tür bir denklem vermekten kaçınacağız. Çünkü bu açıdan baktığımız zaman, teknik literatürde sunulan bu verilerin, aslında çok da sağlıklı bir çerçevede değerlendirilmediklerini anlaya-biliyoruz. Bir örnek vermek adına ötektik silisyum soğuma hızından nasıl etkileniyor, birlikte bakalım.

Ötektik silisyum yapısının dayanıma etkisi

Alüminyum alaşımlarında gördüğümüz ötektik silisyum, köşeli yapısı ve sivri kenarları nedeniyle mekanik özellikler açısından olumsuz bir etki yaratıyor. Zaten bu etki nedeniyle Sr ile ötektik modifikasyon yaparak, bu silisyum parçacıklarını sivri köşelerinden arındırıyor ve elyafımsı bir yapıya dönüştürüyoruz.

Bu silisyum paracıkları da, tıpkı alüminyum dendritleri gibi, soğuma hızı arttığı zaman incelmeye başlıyorlar. Bu inceleme etkisinin de alaşımın dayanımını arttıracağı açık. Diğer bir deyişle, soğuma hızının artması dendritleri hiç etkilememiş olsa bile, ötektik silisyumun incelmesi nedeniyle malzemenin güçlendiğini zaten göreceğiz. Dolayısıyla soğuma hızının dayanım üzerindeki etkisini sadece dendritlere mal ederek açıklamak, gerçekten de pek doğru bir yaklaşım gibi görünmüyor.

Diğer fazlar nasıl etkileniyor?

Önceki sayfalarda soğuma hızına bağlı olarak bazı intermetaliklerin biçimsel özelliklerinde bir incelme gerçekleştiğini, fakat bazı intermetaliklerin soğuma hızındaki değişimlerden fazla etkilenmediklerini göstermiştik. Soğuma hızı arttığı zaman, normalde keskin köşelere sahip bir intermetalik fazın küreselleşme eğilimi göstermesi, malzemenin dayanımında yine bir artış gerçekleşmesi gerektiğini gösteriyor. Yani hızlı soğuma durumunda meydana gelen dayanım artışı genellikle sadece dendrit kol aralığıyla ilişkilendirilse de, silisyuma ek olarak, bu tür intermetalliklerin biçimsel özelliklerindeki değişim de aslında bu artışta rol oynuyor.

Üstelik dayanım artışına intermetaliklerin yaptığı katkı sadece biçimsel özelliklerle sınırlı da değil: Bu ufak parçacıkların genellikle dendritler arası bölgelerde kümelendiklerini biliyoruz. Yüksek soğuma hızı altında katılaşan bir parçada dendrit kol aralığının inceliyor olması, bu intermetaliklerin toplu şekilde kümelenebilecekleri alanların da daraldığı anlamına geliyor. Bunun doğal sonucu olarak, bu ikincil fazların yüksek soğuma hızı altında kümelenmek yerine, toplam hacim içinde daha düzenli bir dağılım gösterdiklerini gözlemliyoruz. Bu parçacıkların yüksek oranda kümelenmesi, gerinimin bu kümeler civarında yoğunlaşmasına ve çatlak oluşumuna yol açacağı için, yüksek soğuma hızı sayesinde bu kümelerin oluşmasını engelleyerek de malzemenin dayanımını arttırmış oluyoruz.

Sonuç olarak yüksek soğuma hızına bağlı olarak dayanımda meydana gelen artış her ne kadar çoğu zaman sadece dendritik yapının incelmesine mâl edilse de, büyük resme baktığımız zaman aslında bu artışa katkıda bulunan birçok farklı değişken olduğunu görüyoruz. Bu değişkenlerin teker teker etkilerini tanımlayabilen bir eşitliği burada verebilmemiz oldukça zor. Zaten literatürde de henüz böyle bir eşitliğin verildiğini göremiyoruz. Fakat bu tür konularda bu büyük resme bakma alışkanlığımızı geliştirebilirsek, hem döküm hatalarının giderilmesi için, hem de ürettiğimiz malzemelerin özelliklerini daha da

geliştirebilmemiz için doğru bakış açılarını bulma fırsatını da yakalayabiliriz.

Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında mikroyapı kontrolü

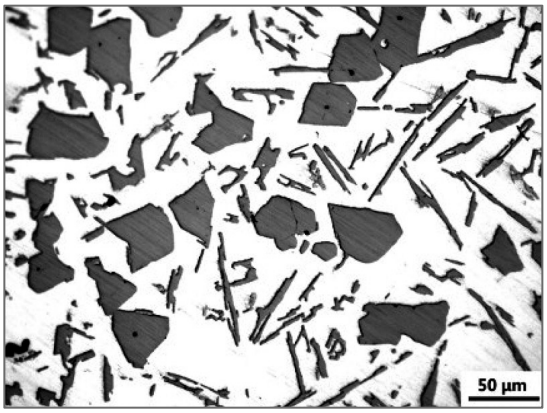
Ötektik üstü kompozisyona sahip alüminyum-silisyum alaşımlarında katılaşma süreci birincil alüminyum dendritleri ile değil, birincil silisyum kristalleri ile başlıyor. Bu temel fark nedeniyle ötektik üstü alaşımların mikroyapılarına baktığımız zaman ötektik altı alaşımlardan farklı olarak dendritler yerine büyük silisyum parçacıklarını görüyoruz. Her iki alaşım türü de ötektik reaksiyona girdiği için, doğal olarak her iki durumda da yapıda mutlaka ince fiber yapısındaki ötektik silisyum ortaya çıkıyor. Fakat aradaki temel fark, dediğimiz gibi, malzemenin çekme mukavemetini arttıran birincil dendritler yerine, yapıda büyük birincil silisyum parçacıklarının ortaya çıkıyor olması. Bu temel fark nedeniyle, ötektik üstü alaşımların çekme dayançlarının ötektik altı alaşımlara kıyasla daha düşük olduğunu görüyoruz.

Birincil silisyum parçacıklarının en belirgin özelliği, oldukça sert ve kırılgan bir yapıya sahip olmaları. Bu nedenle bu parçacıkların varlığı, ötektik üstü alüminyum alaşımlarının yüksek aşınma ve korozyon direnci sergilemelerini sağlaması yanında, aynı zamanda yüksek sıcaklıktaki dayanımlarının da artmasını ve nispeten daha düşük bir ısıl genleşme katsayısına sahip olmalarını sağlıyor.

Ötektik üstü alaşımların çekme dayanımları-

Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında görülen birincil silisyum parçacıkları

Kaynak: Zhang et al. (2015)



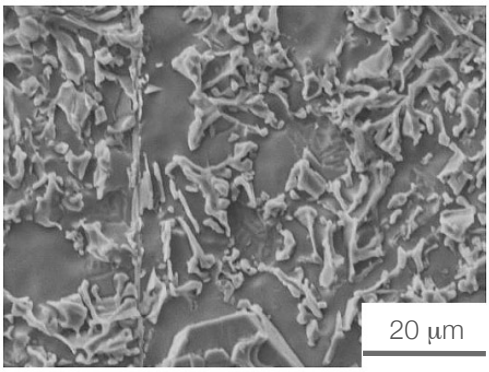
nın birincil dendritlerin yokluğu nedeniyle daha düşük olduğunu yukarıda söylemiştik. Ötektik üstü alaşımların tokluğunun da ötektik alaşımlara kıyasla daha düşük olduğunu görüyoruz. Bu alaşımlarının mekanik özelliklerinin daha zayıf olmasının tek nedeni, yapıda birincil dendritlerin olmaması değil: Sert ve kırılgan silisyum parçacıklarının varlığı bir yandan aşınma ve korozyon direncini arttırırken, diğer taraftan malzemenin çekme dayanımı ve tokluğunun düşmesine yol açıyor. Özellikle büyük, sert ve sivri köşelere sahip silisyum parçacıkları gerilimin yoğunlaşmasına yol açtığı için, çekme dayanımı ve tokluk gibi değerler düşük seviyelere geriliyor.

O zaman aslında oldukça aşikar görünen bir noktaya geliyoruz: Eğer bu büyük silisyum parçacıklarını bir şekilde küçültmeyi becerebilirsek, bir yandan malzemenin aşınma ve korozyon direncini korurken, diğer yandan mekanik özelliklerini biraz daha

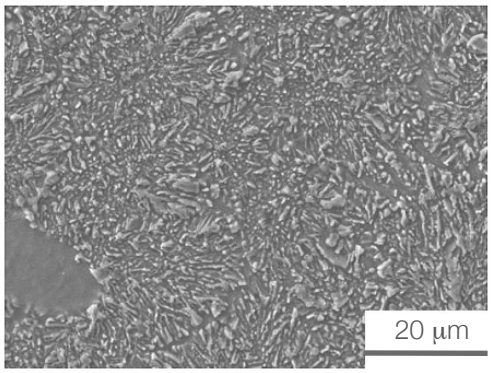
Ötektik üstü alaşımda ötektik Si kristallerinin yapısı

Kaynak: Ding et al. (2004)

(a) Modifikasyon öncesi



(b) %0.6 Al-5Ti-C eklendikten sonra



arttırmanın yolunu bulabiliriz.

Açıkçası teknik literatüre baktığımız zaman, bu amaçla yapılan birçok işlem olduğunu görüyoruz. Birkaç örnek vermek gerekirse, alaşımı yüksek basınçlı döküm yöntemiyle dökmek ya da hızlı katılaştırma uygulamak, bu büyük silisyum parçacıklarını küçültebilmenin yollarından bazıları. Fakat bu yöntemleri doğal olarak her prosese uygulayabilmemiz mümkün değil. Ayrıca bu süreçler malzemenin bütün yapısını etkilediği için, ister istemez malzemenin başka özelliklerini istemediğimiz farklı şekillerde etkilemeleri de mümkün olabiliyor.

Alaşıma az miktarda fosfor ekleyerek de bu büyük silisyum parçacıklarını inceltmemiz mümkün olabiliyor. Hem kolay uygulanabilir, hem de etkin sonuçlar veren bu yöntem, silisyum parçacıklarının boyutlarını 20 – 30 μm mertebesine kadar düşürebiliyor. Fakat fosforun ötektik modifiye edici bir etkisi olmadığı için, ötektik silisyum fosforun varlığından etkilenmiyor. Eğer ötektik silisyum parçacıklarının etkilenmesini istemiyorsanız, buna bir avantaj olarak bakabilirsiniz. Fakat büyük silisyum parçacıklarını inceltirken bir yandan da ötektiği modifiye etme düşünceniz varsa, o zaman aradığınız şeyin fosfor olmadığını söyleyebiliriz.

Bu amaçla, yani bir yandan birincil silisyum parçacıklarını inceltirken, bir yandan da ötektiği modifiye etmek için deneyebileceğiniz bazı alaşımlar mevcut. Örnek vermek gerekirse teknik literatürde hem tane inceltici hem de modifiye edici etki yaratması için geliştirilen Al-Ti-B-Sr alaşımlarından bahsedildiğini görebiliyoruz (ilgili kaynakları kaynakça sayfasında bulabilirsiniz). Fakat bu çalışmalarda sunulan sonuçlara bakılırsa, alaşımda hem bor hem de stronsiyumun bulunması sonucunda SrB_6 bileşiği oluşuyor ve bunun sonucu olarak hem tane incelticinin, hem de modifiye edicinin perfor-

mansı bir miktar düşüyor. Fakat Al-Ti-C-Sr alaşımlarıyla yapılan denemelerde, çok daha olumlu sonuçlar elde edilebildiğini görüyoruz.

Ötektik silisyumun yapısı etkileyen diğer faktörler

Nadir toprak elementlerinin ötektik silisyum üzerindeki etkisi

Önceki sayfalarda birçok yerde gördük: Ötektik silisyumun iğnemsi yapısı mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği için, soğuma hızını arttırarak ya da stronsiyum ya da sodyum gibi elementler kullanarak bu iğnemsi yapıyı ince bir elyaf yapısına dönüştürmek istiyoruz. Şimdi bu başlık altında, dikkatimizi nadir toprak elementlerine verip, nadir toprak elementlerini kullanarak, stronsiyum ya da sodyumun ortaya çıkardığı etkinin bir benzeri elde edilebilir mi sorusuna cevap arayacağız. Metalurji tarihiyle aşina olan okuyucularımız biliyordur: Bu modifikasyon konusunun hikayesi, 1921 senesinde Macar asıllı Aladar Pacz adındaki bir metalurjistin yaptığı bir patent başvurusuna dayanıyor. Pacz'ın yaptığı patent başvurusunda, %5 ila %15 arasında silisyum içeren alüminyum alaşımlarına alkali florür bazlı flakslar (sodyum florür gibi) eklendiğinde, dökülen parçaların uzama değerlerinde bir artış olduğu ve işlenebilirliklerinin arttığı belirtiliyor. Pacz'ın elde ettiği bu iyileştirmenin kökeninde, yukarıda bahsettiğimiz ötektik silisyum parçacıklarının biçimsel bir modifikasyona girmiş olmaları yatıyor.

Bu keşfin ardından, bu etkiyi yaratabilecek, kullanımı daha güvenli ve kolay olan farklı elementlere yönelik bir arayış başlıyor. Bugün geldiğimiz noktada, alüminyum dökümhanelerinde bu iş için az miktarda (100 – 250 ppm) stronsiyum (Sr) kullanıldığını biliyoruz.

Peki, metalurjinin pek çok farklı alanında kendine kullanım alanı bulan nadir toprak elementleri? Bu elementler de acaba ötektik modifikasyon amacıyla kullanılabilir ve bir avantaj sağlayabilir mi?

Bu iş için hâlihazırda kullanılan ve oldukça iyi sonuçlar verebilen stronsiyum gibi bir element varken, durduk yerde icat çıkartıp başka elementler aramak neden? Çünkü Sr'nin de kendine özgü bazı problemli yönleri var: Örneğin dozunu biraz fazla kaçırdığımız zaman, alüminyum ve silisyum ile birleşip istenmeyen intermetalik fazların (Al_2SrSi_2 ve Al_4SrSi_2 gibi) oluşmasını sağlayabiliyor. Ayrıca ötektik üstü alaşımlarda görülen birincil silisyum parçacıklarını inceltmek için eklenen fosfor ile birlikte kullanılmasında da sıkıntılar olduğunu önceki sayfalardan biliyoruz.

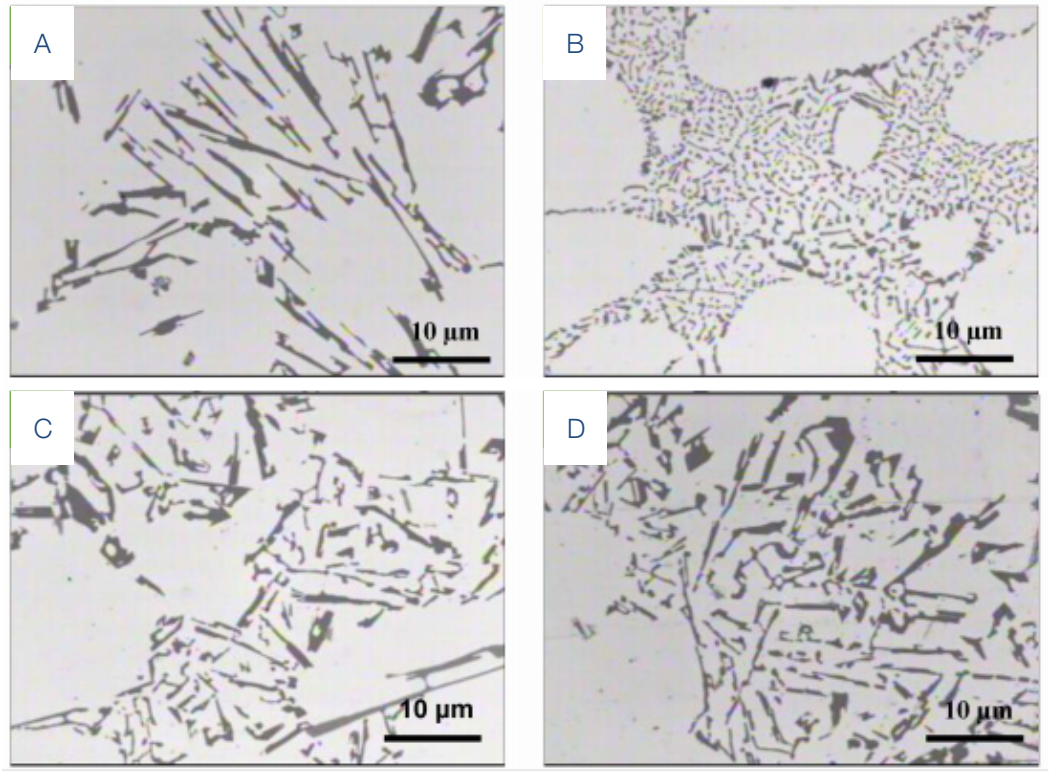
Şimdi kısaca literatürde sunulan bilgilere dayanarak nadir toprak elementlerinin etkilerini bir derlemeye çalışalım. İlk olarak şunu söylememiz lazım ki, stronsiyum kadar düşük seviyede eklenip de benzer bir etki ortaya çıkartabilen bir nadir toprak elementi yok. Ayrıca teknik literatüre göre, birçok nadir toprak elementi ötektik silisyumu bir şekilde etkiliyor olsa da, stronsiyumun ortaya çıkardığı kadar temiz bir modifikasyon

etkisini tek başına ortaya çıkarabilen element sayısı da çok sınırlı. Örneğin Nogita (2004), Ce, La, Eu, Gd, Dy, Tb, Er, Pr, Sm, Nd, Ho, Ym ve Tm gibi birçok nadir toprak elementini teker teker ekleyerek etkilerini inceleme yoluna gitmiş. Ortaya koyduğu sonuç ise oldukça enteresan: Tüm bu elementler arasında, sadece 600 ppm seviyesindeki europiumun (Eu) tek başına eklendiği zaman tam anlamıyla bir modifikasyon etkisi yaratabildiği görülüyor. Diğer elementler de bir şekilde ötektik silisyum ile etkileşiyorlar, fakat tam anlamıyla bir modifikasyon etkisi yaratamıyorlar.

Ötektik altı ve üstü alaşımlarda yapılan çalışmalarda ise varılan genel sonuç, %1 oranında eklenen La'nın, 100 ppm Sr eklenmesine denk bir etki yarattığı yönünde. Fakat bu çalışmalarda da silisyum parçacıklarının inceldiğini, ama yine tam anlamıyla bir modifikasyon etkisinin elde edilemediğini görüyoruz. Örneğin Li'nin (1989) çalışmasında da %1 oranında eklenen La ve Ce'nin silisyum parçacıklarını incelttiği ama modifiye edemediği göze çarpıyor. Burada bahsi geçen bazı elementlerin ötektik Si üzerindeki etkilerini aşağıdaki mikroyapı fotoğrafları üzerinde görebilirsiniz.

Farklı elementlerin ötektik Si yapısı üzerindeki etkisi

(A) Modifikasyon yok, (B) 100 ppm Sr, (C) %1 La, (D) %1 Ce
Kaynak: Alkahtani et al. (2016)



Bu noktada kısa bir özet yapmak istersek, bu araştırmaların aslında stronsyumun yerini alabilecek bir alternatif üretemediklerini söyleyebiliriz. Fakat bu araştırmaların sonuçlarına göre, birkaç elementi karıştırarak kullandığımız zaman enteresan sonuçlar elde edebiliyoruz. Örneğin Mousavi'nin (2012) çalışmasında, La, Ce, Pr ve Nd'nin karışımından oluşan bir mischmetal kullanılarak modifikasyon etkisi elde edilebildiği görülüyor. Üstelik bu karışımın ince kesitler için %0,1, kalın kesitler ise %0,3 oranında kullanılmasının yeterli geldiği belirtiliyor. Farklı bir çalışmada ise ötektik üstü alaşımlara La eklendiğinde, fosforun birincil silisyum parçacıkları üzerindeki inceltici etkisinin daha da kuvvetlendiğini görüyoruz (Ouyang et al. 2007).

Son olarak Alkahtani'nin (2016) çalışmasına baktığımız zaman, Ce ve La gibi elementlerin ancak %1,5'in üzerinde eklendikleri zaman modifikasyona yakın bir etki yaratabildiklerini gözlemliyoruz. Fakat bu iki element de Sr ile reaksiyona girme eğiliminde olduğu için, Sr ile birlikte kullanılmaları durumunda modifikasyon etkisinin zayıfladığını, yine bu çalışmada sunulan sonuçlar arasında görebiliyoruz.

Isıl işlemin ötektik silisyum üzerindeki etkisi

Silisyum aslında alüminyum alaşımlarının ısıl işlemden etkilenmelerini sağlayabilen bir element değil. Bu amaçla alüminyum-silisyum alaşımları içine genellikle bakır ve magnezyum gibi elementler ekliyoruz. Burada bir noktayı açıklığa kavuşturmak gerekiyor: Alaşım ısıl işlem görebilir hale geliyor derken, alaşımı çözeltiye alıp su vererek ve ardından yaşlandırarak, malzemenin dayancını arttırmaktan bahsediyoruz. Yani yüksek sıcaklıkta elde ettiğimiz katı çözeltiyi ilk olarak hızlıca soğutuyoruz. Ardından, düşük sıcaklıkta aşırı doymuş hale gelen bu katı çözeltiyi yaşlandırma (İngilizce: *ageing* ya da *aging*) işlemine tabi tutarak, çok ufak yapıda çökeltilerin oluşmasını ve bu şekilde malzemenin dayancını arttırmayı hedefliyoruz.

Isıl işlem sürecinde esas amaç yaşlandırma olduğu için, ötektik silisyum parçacıklarının bu süreçten nasıl etkilendiği zaman zaman göz ardı edilebiliyor. Oysa bu süreç sırasında silisyum parçacıklarında da bazı biçimsel değişimlerin meydana geldiğini görebiliyoruz.

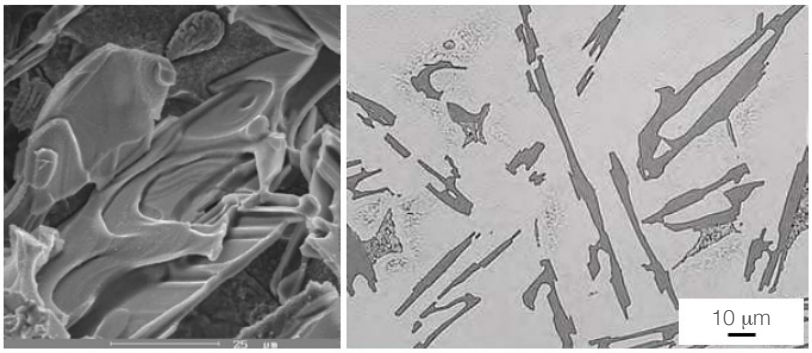
Önceki sayfalarda bahsettik: Al-Si alaşımlarındaki temel alaşım elementi olan silisyumun biçimsel özellikleri, alaşımın mekanik özelliklerini önemli bir şekilde etkiliyor. Herhangi bir tane inceltici ya da modifiye edici kullanılmadan döküldüğünde plaka yapısı sergileyen ötektik silisyum parçacıklarını, çeşitli işlemlerle küçültüp küreselleştirebiliyoruz. Fakat eğer bu tür bir işlem yapmadan alaşımı direkt olarak kalıba dökersek, o zaman silisyumun büyük plakalar halinde ortaya çıktığını gözlemliyoruz. Örnek olarak bir sonraki sayfada en üstte, direkt kum kalıba dökülmüş ve tane inceltici ya da modifiye edici kullanılmamış bir Al-Si-Cu alaşımındaki silisyum parçacıklarının yapısını görebilirsiniz. Tahmin edebileceğiniz üzere, silisyumun bu şekilde büyük plakalar halinde yapıda yer

Çözeltiye alma sıcaklığının ötektik Si yapısına etkisi

Kaynak: Tillova et al. (2012)

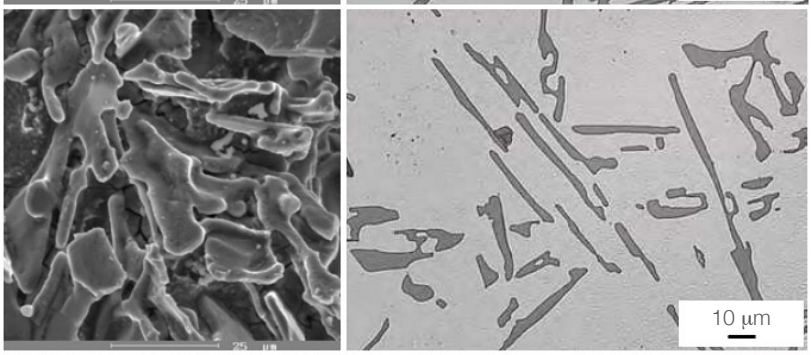
A

Kum kalıba dökülmüş Al-Si-Cu alaşımında ötektik Si plakaları.



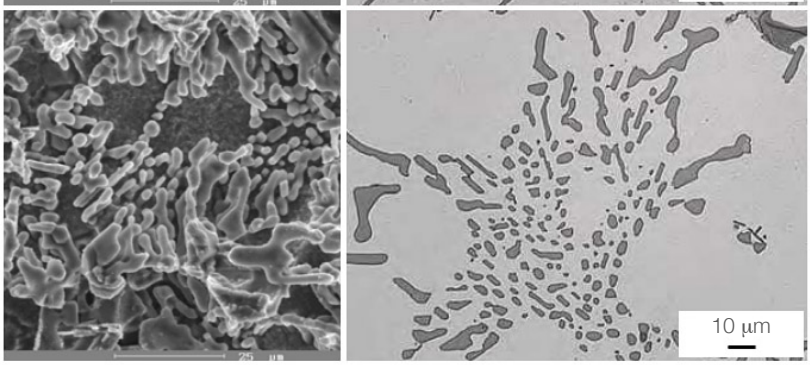
B

505°C'de 4 saat çözeltiye alma sonucunda ötektik Si'nin yapısı.



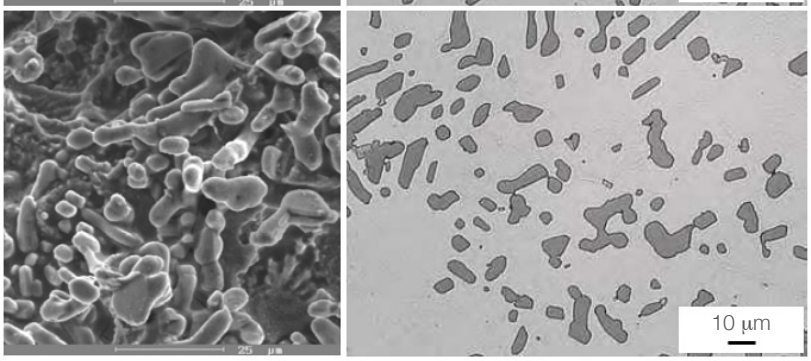
C

515°C'de 4 saat çözeltiye alma sonucunda küreselleşen ötektik Si parçacıkları.



D

525°C'de 4 saat çözeltiye alma sonucunda küreselleşen ve büyüyen ötektik Si parçacıkları.



alması, mekanik özellikler açısından olumsuz bir etki ortaya çıkarıyor.

Herhangi bir tane inceltici ya da modifiye edici kullanılmadığında plaka yapısı sergileyen silisyum parçacıkları, doğal olarak, ısıl işlem sırasında biçimsel olarak değişebiliyor. Fakat bu parçacıkların şeklini ne oranda değiştireceği, çözeltiye alma işleminde uygulanan sıcaklığa ve işlemin süresine ciddi şekilde bağlılık gösteriyor. Bu biçimsel değişim sırasında silisyum plakalarının ilk olarak ufak parçalara ayrıldığını, ardından gelen ikinci adımda ise, bu ufak parçaların küreselleşmeye başladıklarını görüyoruz. Bu iki adımın da peş peşe gerçekleşebilmesi için, çözeltiye alma sıcaklığının yeterince yüksek ve ısıl işlem süresinin de yeterince uzun olması gerekiyor. Örneğin önceki sayfada bahsettiğimiz Al-Si-Cu alaşımı 505°C'de 4 saatlik bir işlemle çözeltiye alındığında, silisyum plakalarında bir miktar ayrışma olduğunu, fakat küreselleşmenin henüz başlamadığını görüyoruz (Resimde: B).

Aynı malzemeyi, sıcaklığı sadece 10°C arttırarak 515°C'de 4 saatlik bir işlemle çözeltiye aldığımızda, bu sefer silisyum parçacıklarının hem ayrıştıklarını, hem de ciddi bir şekilde küreselleştiklerini görüyoruz (Resimde: C). Sadece 10°C'lik bir fark bile mikroyapı ve dolayısıyla mekanik özellikler açısından ciddi bir fark ortaya çıkartabiliyor.

Son olarak, aynı işlem 525°C'de 4 saat boyunca yapıldığında nasıl bir durumla karşılaşıyoruz, ona bakalım. Sıcaklık daha da arttığı için, doğal olarak küreselleşme açısından bir problem görmüyoruz. Fakat bu yüksek sıcaklık, küreselleşen silisyum parçacıklarının aynı zamanda bir miktar büyümelerine de neden oluyor. Yani ısıl işlem sıcaklığındaki bu kadar ufak bir fark bile, bu parçacıkların boyutlarını ve dolayısıyla da elde edilecek mekanik özellikleri etkileyebiliyor (Resimde: D).

Sonuç olarak silisyum içeren alüminyum alaşımlarına eğer ısıl işlem de uygulanması gerekiyorsa, ötektik modifikasyon için ayrı bir işlem yapmaya gerek olmadan, ısıl işlemle de bu parçacıkların iğnemsi yapılarının yuvarlatılabileceğini görüyoruz. Bunun elde edilebilmesi için çözeltiye alma sıcaklığına dikkat etmemiz gerektiğini yukarıda anlatılanlardan anlayabiliyoruz. O nedenle bu etkinin farkında olmamızda ve ısıl işlemle zaten elde edebileceğimiz bir yapısal değişim için boş yere modifikasyon yapmamıza her zaman gerek olmadığını akılda tutmamızda fayda var.

Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklık performansı

Her ne kadar metalurji ve malzeme biliminin sağladığı bilgiler neticesinde alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmenin yolları keşfedilmiş olsa da, dökme demir ya da çelik gibi rakipleri karşısında alüminyum alaşımlarının hala yumuşak bir karnı bulunuyor: Yüksek sıcaklık. Alüminyum alaşımlarının sıvılaşma sıcaklıkları demir bazlı alaşımlara kıyasla çok daha düşük seviyelerde kaldığı için, çalışma sıcaklığı yaklaşık 200 - 230°C'nin üzerinde

olan uygulamalar için standart alüminyum alaşımları istenen performansı sergilemekte zorluk çekiyor. Çünkü bu sıcaklık değerinin üzerinde hem çekme, hem de yorulma dayanımı açısından alüminyum alaşımlarının performansını düşürecek etkenler su yüzeyine çıkmaya başlıyor: Hem taneler, hem de düşük sıcaklıkta kararlı olan ve sertleşme etkisi yaratan fazlar büyümeye başlayarak, alaşımının mikroyapısal özelliklerinin dejenere olmasına yol açıyor.

Yüksek sıcaklık ifadesi neyi temsil ediyor?

Yüksek sıcaklık, aslında neyi temsil ettiği net bir şekilde belli olmayan bir ifade. Örneğin 250°C gibi bir sıcaklık, çelikler göz önüne alındığında düşük bir sıcaklık olmasına rağmen, bir alüminyum alaşımı için yüksek bir sıcaklık olarak değerlendirilebilir. Çünkü "yüksek sıcaklık" ifadesi, aslında malzemeden malzemeye değişiklik gösteren bir değeri temsil ediyor. Eğer konuya malzemelerin mekanik davranışı perspektifinden bakacak olursak, yüksek sıcaklık dediğimiz zaman, düşük sıcaklıkta aktif olmayan deformasyon mekanizmalarının aktifleşmeye başladığı bir sıcaklık değerinden bahsediyoruz demektir.

Merak eden okuyucularımız için bir adım daha ileri gidip, konuya biraz daha açıklık getirelim: Metalik malzemelerin düşük sıcaklıktaki şekil değiştirme (*deformasyon*) becerisini, dislokasyon hareketi adı verilen bir işleyiş belirliyor. Eğer dislokasyonlar rahatça hareket edebiliyorlarsa malzeme sünek bir davranış sergiliyor. Fakat eğer dislokayonların hareketi kısıtlanmışsa, o zaman malzemenin güçlendiğini ve sertleştiğini söylüyoruz. Sertleştirme mekanizmalarının temelinde yatan düşünce de zaten bundan ibaret: Dislokasyonların hareketini zorlaştırmak. Fakat biz dislokasyonları her ne kadar kontrol altına alıp durdursak da, "yüksek sıcaklık" değerlerinde, dislokasyonlar bu engellerden kurtulup tekrar hareket etmeye başlayabiliyorlar. Bunun sonucu olarak sertleştirme mekanizması etkisini kaybediyor ve malzeme yumuşamaya ve süneklik kazanmaya başlıyor.

Yukarıda da belirttiğimiz gibi, bu geçiş sıcaklığı malzemeden malzemeye değişiklik gösteriyor. Saf metallerde mutlak sıcaklık değeri erime sıcaklığının yaklaşık üçte biri gibi bir değere ulaştığı zaman atıl duran dislokasyonların tekrar hareket kazandığını ve malzemenin yumuşadığını görüyoruz. O nedenle bu geçişin yaşandığı sıcaklığı malzemenin bir özelliği olarak değerlendirmekte ve müdahale etmemizin zor olduğu gerçeğini baştan kabul etmemizde fayda var.

Yüksek sıcaklık dayanımı nasıl arttırılır?

Bu demek değil ki yüksek sıcaklık karşısında çaresiziz: İşin mekanizmasını doğru kavradıktan sonra, yapılabilecek müdahaleler de aslında kendiliğinden ortaya çıkmaya başlıyor: Örneğin dislokasyonlar yüksek sıcaklıkta engellerin üzerinden geçip tekrar hareket kazanabiliyorsa, malzeme içine dislokasyonların aşamayacağı kadar büyük ve kararlı parçacıklar (yani engeller) koyarsak, o zaman yüksek sıcaklıkta

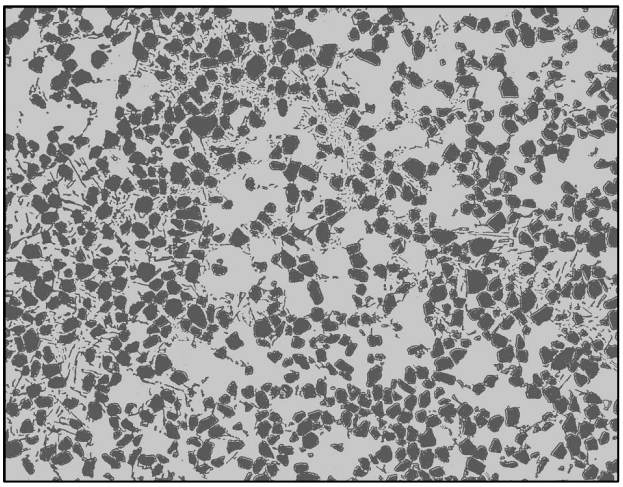
aktifleşen bu durumun gerçekleşmesini engelleyebilir ya da erteleyebiliriz.

Bunu yapmanın en kolay yollarından bir tanesi, kompozit malzemelere yönelmek. Alüminyum içine sert ve sıvı alaşımla tepkimeye girmeyen ufak partikül ya da fiber takviyeler ekleyerek, alüminyum alaşımlarının hafifliklerini kaybetmeden daha yüksek dayanım ve sertlik kazanmalarını sağlayabiliyoruz. Yukarıda anlatılanlardan anlaşılabileceği üzere, bu takviye sayesinde alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta dayanımlarını korumalarını da sağlayabiliyoruz.

Alüminyum alaşımları özelinde bunu sağlamanın bir diğer yolu da, ötektik üstü kompozisyona sahip alaşımlar üretmek olabilir (Si > %12). Ötektik üstü kompozisyona sahip alaşımlarda katılaşma ilk olarak birincil silisyum kristalleriyle başladığı için, bu büyük kristaller de kompozit malzemelerdeki takviye parçacıklara benzer bir etkiyle dislokasyonların hareketini engelleyerek, yüksek sıcaklıkta dayanımın korunmasını sağlayabiliyorlar. Bu parçacıkların varlığı aynı zamanda sertliği ve aşınma direncini arttırırken, dökülen parçaların boyutsal kararlılığının da yüksek olmasını sağlıyor.

Literatürde sunulan çeşitli sonuçları değerlendirdiğimizde, alaşım elementlerini kullanarak yapıda oluşturulan sert intermetalik parçacıkların yüksek sıcaklık performansı açısından istenen etkiyi yaratmakta zorlandıklarını görüyoruz. Tabii bu noktada yüksek sıcaklık performansı

SiC parçacıklarıyla desteklenmiş bir alüminyum kompozitin mikroyapısı



açısından sadece sertlik ve çekme dayanımının değil, elastik modül, yorulma (*fatigue*) ve sürünme (*creep*) dayanımlarının da önemli olduğunu bilmemizde fayda var. Buna ek olarak boyutsal kararlılık açısından düşük bir ısıl genleşme katsayısının da tercih edildiğini belirtmemiz lazım. Bu açıdan baktığımızda alüminyum alaşımlarında Cu ve Ni gibi elementlerin kullanılması sonucunda yapıda oluşan intermetallik parçacıkların, yorulma ve sürünme dayanımlarını olumlu yönde etkileyebildiklerini görüyoruz. Bu konuda ayrıntılı bilgi isteyen okurlarımız Jeong'un (2012) çalışmasından bilgi alabilirler.

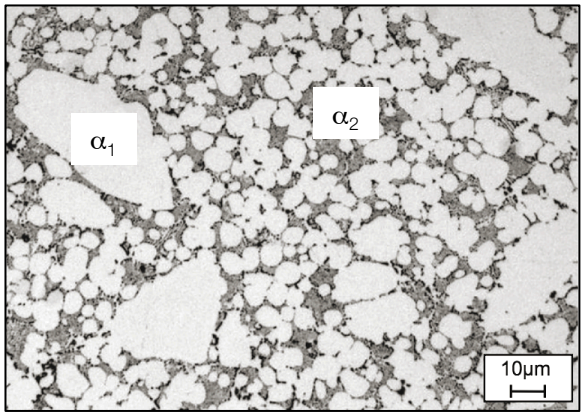
Yüksek basınçlı dökümde mikroyapı kontrolü

Türkiye'de hızla büyüyen bir sektör olması nedeniyle, yüksek basınçlı dökümü ayrı bir başlık altında ele almak ve bu döküm yöntemiyle üretilen parçalarda gördüğümüz katılaşma sürecine biraz daha yakından bakmak faydalı olabilir. O yüzden isterseniz sıvı kalıp içine döküldükten sonra ne olup bittiğine, bir Al-Si-Mg alaşımı üzerinden birlikte bakalım.

Aslında her ne kadar kalıp içinde olup bitenlere bakacağız desek de, ilk olarak şunu anlamamız önemli: Basınçlı dökümde katılaşma kalıp içinde başlamayabiliyor. Daha öncesinde, nispeten düşük bir sıcaklıkta bulunan dolgu haznesinin içinde de başlayabiliyor. Bunun kanıtlarını, teknik literatürde sunulan çeşitli çalışmalarda görebiliyoruz. Örneğin Ji'nin (2013) çalışmasında sunulan verilere baktığımız zaman, katılaşması tamamlanan döküm parçaların mikroyapılarında, iki farklı boyuta sahip dendritler olduğunu fark ediyoruz. Yukarıdaki mikroyapı fotoğrafı üzerinde birincil büyük dendritler α_1 ile, ikincil küçük dendritler ise α_2 ile gösteriliyor. Bu büyük birincil dendritler kalıp içerisinde değil, dolum haznesi içinde, bu haznenin nispeten soğuk olması nedeniyle katılaşmaya başlayan denditler. Ardından gelen adımda metal kalıba basıldığı zaman, bu denditler maruz kaldıkları basınç ve konveksiyon nedeniyle kırılıyor ve mikroyapı resimlerinde bilindik dendrit morfolojisinden oldukça uzak bir şekilde kendilerini gösteriyorlar.

Basınçlı dökümde oluşan birincil ve ikincil dendritler

Kaynak: Ji et al. (2013)



Siz de eğer ürettiğiniz malzemelerin yapısında böyle büyük α-Al dendritleri görüyorsanız, bu yapının kalıp içerisinde değil, sıvı metalin ilk konulduğu ve 2-3 saniye içinde beklediği dolum haznesinde oluşmaya başladığını aklınızın bir köşesinde tutabilirsiniz. İkincil denditlere biraz daha yakından baktığımız zaman ise, bildiğimiz ve görmeye alıştığımız dendrit kolu yapısını sergilediklerini görüyoruz. Bu gözlem, bu ikincil dendritlerin gerçekten de kalıp içinde oluştuklarını ve diğer birincil dendritler gibi bir deformasyona uğramadıklarını gösteriyor.

Yüksek basınçlı dökümde fosforun etkisi

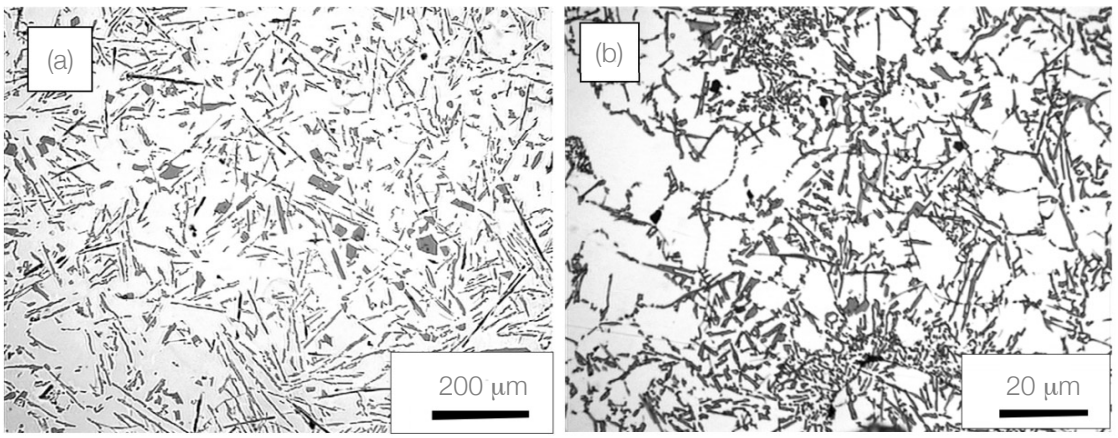
Önceki sayfalarda ötektik modifikasyon sonucunda iğnemsi silisyum parçacıklarının nasıl inceltilebildiğini, fakat ötektik-üstü alaşımlarda görülen birincil silisyum parçacıklarının bu işlemden etkilenmediklerini görmüştük. Hatırlarsanız, bu büyük silisyum parçacıklarını inceltmek için

fosfordan faydalandığımızı da açıklamıştık. Fosfora ek olarak, bu büyük birincil silisyum parçacıklarını inceltmenin bir diğer yolu da, alaşımın hızlı soğumasını sağlamak. Bunu sağlamanın yolarından bir tanesinin, alaşımı yüksek basınç altında soğutmak olduğunu biliyoruz. Zaten bu nedenle yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçalarda, bu birincil silisyum parçacıklarının incelmiş durumda olduklarını gözlemliyoruz. Teknik literatürde sunulan verilere baktığımızda, bazı kaynaklar yüksek basınçlı döküm yönteminde fosfor kullanılmasına gerek olmadığını belirtiyorlar (Gruzsleski et al. 1990). Fakat bazı kaynaklar, yüksek basınçlı dökümde fosforun birincil silisyum parçacıklarını ekstradan %50'ye varan bir oranda inceltebildiğine işaret ediyor (Suarez-Pena et al. 2007). Bu veriler arasında bir çelişki olup olmadığını anlamak için, biraz konunun derinine inelim.

Aşağıdaki resimde (a) fosfor eklenmeden kokil dökümle üretilmiş bir ötektik alaşımın mikroyapısı ve, (b) aynı alaşımın 30 ppm fosfor ilavesi ve basınçlı döküm sonrasındaki mikroyapısı gösteriliyor (Suarez-Pena et al. 2007). Her iki resimde de birincil silisyum parçacıkları, gri, köşeli parçacıklar halinde görünüyor. (İki resim arasındaki ölçek farkına da dikkat ediniz.) Bu çalışmada sunulan verilere göre, çubuk formunda eklenen kırmızı fosfor takviyesi fosforsuz dökülen alaşıma kıyasla bir fark ortaya çıkarmamasına rağmen, Al-15Fe-P formun-da eklenen fosfor, yüksek basınçlı dökümde silisyum parçacıklarının boyutlarını ortalama %45 oranında inceltiyor (fosforsuz ortalama boyut = 3,8 µm, 30 ppm fosfor takviyesi sonrasında ortalama boyut = 2,1 µm).

Fosfor ve soğuma hızının birincil silisyum parçacıkları üzerindeki etkisi

(a) Fosforsuz kokil döküm yapısı, (b) 30 ppm P eklenmiş basınçlı döküm yapısı.
(Ölçek farkına dikkat ediniz.)
Kaynak: Suarez-Pena et al. (2007)



Her ne kadar teknik literatürde yayımlanmış bir çalışma da olsa, biz yine de kuşkuculuğumuzu elden bırakmadan şu noktayı bir açıklığa kavuşturalım: Bu çalışmada, fosfor takviyesi sonrasında döküme gitmeden sıvının ne kadar bir süre bekletildiğine dair bir bilgi bulunmuyor. Fosfor takviyesi sonrasında esas inceltici etkiyi ortaya çıkaran AlP parçacıklarının zaman geçtikçe topaklanarak, inceltici etkilerini yitirdiklerini biliyoruz. O nedenle kırmızı fosfor eklendiğinde ekstra bir incelmenin ortaya çıkmamış olmasını, spekülatif bir yorum olsa da, daha uzun süre beklenmiş olmasıyla açıklamamız mümkün olabilir. Daha doğrusu, bu konuda net bir bilgi sahibi olmadan, bu iki yöntemin kıyaslamasını sadece eklenen yüzdelere bakarak kıyaslamamız doğru olmaz dememiz lazım. Böyle bir kıyaslama yapılabilmesi için, mutlaka bekleme süresinin de dikkate alınması gerekir. O nedenle bu araştırmada sunulan bu bilgiyi bir soru işaretiyle birlikte aklımızda tutmamızda fayda var.

Yüksek basınçlı dökümde fosfor gerekli mi?

Burada sorulması gereken bir diğer soru da, fosfor takviyesi olmadan 3,8 µm ortalama boyuta sahip olan silisyum parçacıklarını, fosfor takviyesiyle 2,1 µm ortalama boya indirmemizin mekanik özellikleri ne şekilde etkileyeceği. Tamamen kırılgan yapı sergileyen bir malzemeyi ele alıyor olsak, bu kadar ufak bir farkın kırılma tokluğunu arttırmasını bekleyebiliriz. Fakat alüminyum alaşımları gibi plastik deformasyon kapasitesine sahip alaşımlarda, bu ufak farkın kırılma tokluğu ve aşınma direnci üzerindeki etkilerinin çok yüksek olmasını bekleyemeyiz. O nedenle zaten yüksek soğuma hızı altında 3 – 4 µm mertebesine inmiş parçacık boyu üzerinde 1 µm daha inceltme elde etmek için ekstra fosfor takviyesi yapmanın pek gerekli görünmediğini söyleyebiliriz.

Döküm Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Cummins dizel motor piston kafası (Resim: Wikimedia Commons, CC BY 2.0)

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini değerlendirirken, genellikle dökülen parçayı değil, parçanın döküldüğü potadaki alaşımdan ayrı test çubukları döküp, bu numunelerin sergiledikleri özellikleri dikkate alıyoruz. Elbette müşteri ve tedarikçi arasında bazı özel anlaşmaların olması ve müşterinin özellikle parçadaki değerleri dikkate almak istediğini görebiliriz. Fakat birazdan ayrıntılarını vereceğimiz genel mekanik özellikleri dikkate alacaksak, parçadaki sonuçları değil, ayrı dökülmüş test numunelerindeki değerleri dikkate almamız gerekiyor. Bunun oldukça anlaşılabilir bir nedeni var: Önceki sayfalarda gördüğümüz farklı üretim yöntemlerinde katılaşma hızının çok geniş aralıklarda değişebildiğini biliyoruz. Katılaşma hızı mikroyapı üzerinde önemli bir etki yaratacağı için, parçadan alınan numunelerin mekanik özellikleri üretim yöntemi ya da parçanın geometrik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebiliyor. O nedenle hangi alaşımdan ne civarda bir dayanım ya da uzama bekleyebileceğimizi anlamak için kıyaslanabilir bir yöntem kullanmamız, yani ayrı dökülmüş standart test numunelerine başvurmamız gerekiyor. Bu sebeple birazdan ayrıntılarını sunacağımız mekanik özelliklerin ayrı dökülmüş numunelere ait olduğunu akılda tutmamızda fayda var. Ayrı dökülen test numunelerinin gerçek döküm

parçayı ne oranda temsil etmesini beklediğimizi soracak olursanız, genel bir kural olarak parçadan alınan numunelerin ayrı dökülen test numunelerinin minimum %75'i oranında bir dayanım sergilemesi gerektiğini söyleyebiliriz.

Bu noktada şunu anlamamız da önemli: Önceki sayfalarda her ne kadar basınçlı dökümün hem Türk hem de Dünya döküm sanayisinde önemli bir yeri olduğunu söylemiş olsak da, bu yönteme dair yayımlanmış güvenilir değerlerle ulaşmak gerçekten zor. O nedenle bu yöntemle üretim yapan işletmelerin kendi test numunelerini parça içinden alıp, istatistiksel çalışmalarla bir veri tabanı oluşturmaları tavsiye edilebilir.

Tablo: Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kum kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
201.0	T6	450	380	8
	T7	470	415	6
	T43	415	255	17
204.0	T4	310	195	6
A206.0	T4	350	250	7
213.0	F	165	105	2
222.0	O	185	140	1
242.0	F	145	140	1
	O	185	125	1
	T571	220	205	1
	T77	205	160	2

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kum kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
A242.0	F	145	140	1
319.0	F	185	125	2
	T5	205	180	2
	T6	250	165	2
354.0	T62	380	310	3
355.0	F	160	85	3
	T51	195	160	2
	T6	240	170	3
	T7	260	180	1
	T71	240	200	2
C355.0	T6	270	200	5
356.0	F	165	125	6
	T51	170	140	2
	T6	230	165	4
	T7	235	205	2
	T71	195	145	4

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kum kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
A356.0	F	160	185	6
	T51	180	125	3
	T6	275	205	6
	T71	205	140	3
307.0	F	170	90	5
	T51	180	115	3
	T6	345	295	2
	T7	275	235	3
A357.0	T6	315	250	3
359.0	T62	345	290	5
A390.0	F	180	180	< 1
	T5	180	180	< 1
	T6	275	275	< 1
	T7	250	250	< 1
443.0	F	130	55	8
B443.0	F	115	40	3

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kum kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
A444.0	F	145	60	9
511.0	F	145	85	3
512.0	F	140	90	2
520.0	T4	330	180	16
A535.0	F	250	125	9
707.0	T5	230	150	2
	T7	255	205	1
710.0	F	220	140	2
	T5	220	140	2
712.0	F	235	170	4
771.0	T5	220	185	3
	T52	250	205	2
	T53	250	185	2
	T6	290	240	5
850.0	T5	140	75	8
852.0	T5	185	150	2

Tablo: Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kokil kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
201.0	T6	450	380	8
	T7	470	415	6
	T43	415	255	17
204.0	T4	330	200	8
A206.0	T4	430	260	17
	T7	435	345	12
208.0	T6	240	150	2
	T7	230	110	3
213.0	F	205	165	2
222.0	T551	255	240	< 0,5
	T52	240	215	1
238.0	F	205	165	2
242.0	T571	275	235	1
	T61	325	290	1
A249.0	T63	475	415	6
296.0	T7	270	140	5

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kokil kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
308.0	F	195	110	2
319.0	F	235	130	3
	T6	275	185	3
324.0	F	205	110	4
	T5	250	180	3
	T62	310	270	3
332.0	T5	250	195	1
333.0	F	235	130	2
	T5	235	170	1
	T6	290	205	2
	T7	255	195	2
355.0	F	185	105	4
	T51	205	165	2
	T6	290	185	4
	T61	310	275	2
	T7	275	205	2

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kokil kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
C355.0	T6	330	195	8
	T61	315	235	6
	T62	330	255	5
356.0	F	180	125	5
	T51	185	140	2
	T6	260	185	5
	T7	220	165	6
A356.0	F	185	90	8
	T51	200	140	5
	T6	285	205	12
357.0	F	195	105	6
	T51	200	145	4
	T6	360	295	5
	T7	260	205	5
A357.0	T6	360	290	5
359.0	T61	330	255	6

Tablo (devam): Seçilmiş bazı alüminyum döküm alaşımlarından oda sıcaklığında beklenen tipik mekanik özellik değerleri (Kaynak: Kaufman, Rooy, 2004). Sonuçlar, kokil kalıba ayrı dökülmüş test numunelerini temsil etmektedir.

Alaşım	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
A390.0	F	200	200	< 1
	T5	200	200	< 1
	T6	310	310	< 1
	T7	260	260	< 1
443.0	F	160	60	10
A444.0	F	165	75	13
	T4	160	70	21
513.0	F	185	110	7
535.0	F	240	125	8
705.0	T5	255	115	10
707.0	T7	310	240	3
711.0	T1	195	125	7
713.0	T5	220	150	4
850.0	T5	160	75	12
851.0	T5	140	75	5
852.0	T5	220	160	5

Sonuç

Günümüzde ağırlıklı olarak basınçlı döküm yöntemiyle üretildiklerini gördüğümüz döküm alüminyum alaşımları, aslında bu sayıda ele aldığımız birçok farklı döküm yöntemiyle üretilebiliyorlar. Üstelik kum kalıp gibi basit yöntemlerle üretildiklerinde bile, bu alaşımların gri (pik) dökme demire yakın mekanik özellikler sergileyebildiklerini görüyoruz. Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri dendrit yapısının boyutlarına bağlı olarak değiştiği için, bu yapıyı incelterek dayanımın armasını sağlayan kokil ve basınçlı döküm yöntemleri, daha güçlü alaşımların üretilmesini mümkün kılabiliyor.

Alüminyum alaşımlarının bir diğer önemli özelliği de ısıl işleme yatkın olmaları. Isıl işlem konusu başlı başına ele alınması gereken, oldukça kapsamlı bir konu olduğu için, bu sayıda ısıl işlem süreçleri kapsam dışında bırakılarak, sadece döküm süreçleri üzerine odaklanılması tercih edildi.

Bu sayıda alüminum döküm alaşımlarının birçok avantajını gördük: Oldukça kolay bir şekilde dökülebiliyor olmaları yanında, çok karmaşık döküm hataları ortaya çıkarma eğilimi taşımıyorlar. Hafiflikleri ve değişken mekanik özellikler sergileme kapasiteleri de dikkat alındığı zaman, bu alaşımları ilerleyen yıllarda daha sık göreceğimizi tahmin etmek zor bir iş değil.

Bu özel sayının, alüminyum dökümüne başlayan genç mühendislere ışık tutması dileğiyle.

Okumak için vaktiniz yok.
Döküm konularını basitçe anlatan biri olsa,
güzel olmaz mı?

DÖKÜMHANE AKADEMİ

Uzaktan Eğitim Platformu

Dokumhane.net

Kaynaklar ve Okuma Listesi

ACS (American Chemical Society) National Historic Chemical Landmarks. Hall Process: Production and Commercialization of Aluminum. http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/aluminumprocess.html.

Alçak basınç döküm prosesinde kullanılan kalıp kaplama malzemelerinin metal akışkanlığına etkisi. Ö.Y. Topçuoğlu, Ö.B. Çe, U. Aybarç, M. Keskiç. 7. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi, İstanbul (2014).

Aluminum alloy castings: Properties, processes and applications. J.G. Kaufman, E.L. Rooy. ASM International (2004).

Aluminum and aluminum alloys. J.R. Davis. ASM International (2001).

Aluminium cast alloys: Enabling tools for improved performance.D. Apelian. North American Die Casting Association, Wheeling, IL (2009) 1–68.

Aluminum casting technology. D. Zalenas (Ed.) American Foundrymen Society (1993).

Aluminum-silicon casting alloys: An atlas of micrographs. M. Warmuzek. ASM International, Materials Park, OH (2004).

A new method for the refinement of the primary Si of hypereutectic casting alloys in direct chill and ingot casting. Light Metals (1993) 815.

A scientific basis for degassing of aluminium. G. K. Sigworth. AFS Transactions, Vol. 95 (1987) 73.

Cast aluminum alloy for high temperature applications. J.A. Lee. Automotive Alloys, TMS (2003).

Casting aluminum alloys.V.S. Zolotorevsky, N.A. Belov, M.V. Glazoff. Elsevier (2007).

Development of a super ductile diecast Al–Mg–Si alloy. S. Ji, D. Watson, Z. Fan, M. White: Mater. Sci. Eng. A. Vol. 556 (2012) 824.

Effect of a degassing treatment on the quality of Al-7Si and and A356 melts – Degassing diffusers. T.S. Shih, K.Y. Weng. Materials Transactions, Vol. 45 (2004) 1852.

Effect of Al-5Ti-C master alloy on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20%Si alloy. W. Ding, T. Xia, W. Zhao, Y. Xu. Materials, 7 (2004) 1188.

Effect of alloying elements on high temperature mechanical properties for piston alloy. C.Y. Jeong. Materials Transactions. Vol. 53 (2012) 234.

Effect of the casting process variables on microporosity and mechanical properties in an investment cast aluminium alloy. Y.M. Li, R.D. Li. Science and Technology of Advanced Materials. 2:1 (2001) 277.

Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe alloy. R. Chen, Y.F. Shi, Q.Y.Xu, B.C. Liu. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 24 (2014) 1645.

Effect of cooling rates during solidification of Al-5.5%Mg-2.3%Si-0.6%Mn and Al-13%Mg2Si pseudo-binary alloys on their secondary-particle morphology and tear toughness. D. Shimosaka, S. Kumai, F. Casarotto, S. Watanabe. Materials Transactions. Vol. 52 (2011) 920.

Effects of degassing and fluxing on the quality of Al-7%Si and A356.2 alloys. T.S. Shih, K.Y Wen. Material Transactions, Vol. 46 (2005) 263.

Effect of process parameters on the microstructure of semi-solid ZL101 aluminum alloy. S. Cheng, H. Hou, Y. Zhao, Y. Jin. Materials Research 19 (2016).

Effect of rare earth metals on the microstructure of Al-Si based alloys. S.A. Alkahtani, E.M. Elgallad, M.M. Tash, A.M. Samuel, F.H. Samuel. Materials 9, 45 (2016) 1.

Eutectic modification of Al-Si alloys with rare-earth metals. K. Nogita, S.D. McDonald, A.K. Dahle. Materials Transactions Vol. 45, No. 2 (2004) 323.

Evolution of phases in a recycled Al-Si cast alloy during solution treatment. E. Tillova, M. Chalupova, L. Hurtalova. Scanning Electron Microscopy, Dr. Viacheslav Kazmiruk (Ed.), ISBN: 978-953-51-0092-8, InTech (2012).

Fatigue properties and micromechanism of fracture of an AlSiMg0.6 cast alloy used in diesel engine cylinder head. A. Uehara, M. Sato, I. Ferreira. Procedia Engineering 2 (2010) 759.

Grain refinement of aluminum alloys. M. Easton, D. John. Metallurgical and Materials Transactions A 30 (1999) 1613.

Impact of intermetallic precipitates on the tribological and/or corrosion performance of cast aluminium alloys: a short review. D. Culliton, T. Betts, D. Kennedy. International Journal of Cast Metals Research. Vol. 6 (2013) 65.

Influence of modification on the solution heat treatment response of cast Al-Si-Mg alloys. H.J. Li, S. Shivkumar, X.J. Luos, D. Apelian. Cast Metals 1 (1989) 227.

Intermetallic phase particles in 6082 aluminium alloy. G. Mrowka-Nowotnik, J. Sieniawski, M. Wierzbinska. Archieves of Materials Science and Engineering. Vol. 28 (2007) 69.

Kinetics of ultrasonic degassing of aluminium alloys. N.A. Baena, D. Eskin. Light Metals (2013) 957.

Master alloy for modification and grain refining of hypoeutectic and eutectic Al-Si foundry alloys. T. Sagstad, E. Bhondus. US6531092 B2 (2001).

Mechanical and microstructural characterisation of A356 castings realised with full and empty cores. M. Merlin, G.L. Garagnani. Metallurgical Science and Technology. Vol. 27-1 (2009) 21.

Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications. Part I: Al-Si-Cu alloys. R. Molina, P. Amalberto, M.Rosso. Metallurgical Science and Technology. Vol. 29-1 (2011) 5.

Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications. Part II: Al-Cu, Al-Mg alloys. R. Molina, P. Amalberto, M.Rosso. Metallurgical Science and Technology. Vol. 29-2 (2011) 5.

Metalürji Teknolojisi: Basınçlı Döküm (521MMI288). T.C. Milli Eğitim Bakanlığı (2011).

Microstructure and mechanical properties of AC AlSi9CuX alloys. L.A. Dobrzanski, R. Maniara, M. Krupinski, J.H. Sokolowski. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 24 (2007) 51.

Microstructural effects of phosphorus on presure die cast Al-12Si components. B. Suarez-Pena, J. Asensio-Lozano, J.I. Verdeja-Gonzalez, J.A. Pero-Sans Elorz. Revista de Metalurgia 43 (2007) 352.

Microstructural evolution and solidification behavior of Al-Mg-Si alloy in high-pressure die casting.S. Ji, Y. Wang, D. Watson, Z. Fan. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 44A (2013) 3185.

Microstructure, tensile properties, and fractography of A356 alloy under as-cast and T6 obtained with expandable pattern shell casting process. W.M. Jiang, Z.T. Fan, D.J. Liu. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 22 (2012) 7.

Multiplex modification with rare earth elements and P for hypereutectic Al-Si alloys. Z.Y. Ouyang, X.M. Mao, M. Hong. Journal of Shangai University (English Edition) Vol. 11 (2007) 400.

New trends in aluminium degassing – A comparative study. H. Puga, J. Barbosa, E. Seabra, S. Ribeiro, M. Prokic. 4th International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials. AES – ATEMA (2009) Hamburg.

Preparation of Al-Ti-C-Sr master alloys and their refining efficiency on A356 alloy. H.L. Zhao, H.L. Bai, J. Wang, S.K. Guan. Materials Characterization 60 (2009) 377.

Semi-solid forming of aluminum and steel – Introduction and overview. G. Hirt, L. Khizhnyakova, R. Baadjou, F. Knauf, R. Kopp. In: Thixoforming: Semi-solid Metal Processing. Edited by G. Hirt and R. Kopp. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2009).

Studies on tool wear, cutting forces and chip morphology during high-speed milling of Al-Si-Mg-Fe alloys. S.M. Reddy, A.C. Reddy. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2 (2013) 1987.

Study on dual modification of Al – 17% Si alloys by structural heredity. J. Zhang, H. Chen, H. Yu, Y. Jin. Metals 5 (2015) 1112.

The effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AC AlSi9Cu alloy. L.A. Dobrzanski, R. Maniara, J.H. Sokolowski. Archieves of Materials Science and Engineering. Vol. 28 (2007) 105.

The effect of mischmetal and heat treatment on the tensile properties of A357 Al-Si casting alloy. G.S. Mousavi, M. Emamyn, J. Rassizadehghani. Materials Science and Engineering A 556 (2012) 573.

The global aluminum industry: review and forecast. *Yazar belirtilmemiş*. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. Vol. 58 (2006) 10.

The point of a monument: A history of the aluminum cap of the Washington Monument. G.J. Binczewski. JOM, 47 (1995) 20.

The treatment of liquid Al -Si alloys. J.E. Gruzsleski, B.M. Closset. American Foundrymen's Society (1990) 107.
US Patent No: 1,387,900. A. Pacz (1921).

Dökümcünün

El Kitabı

Serisi – 04
Alüminyum Döküm Alaşımları

Dökümcünün El Kitabı Serisi
"Dökümhane Akademi"
Projesi Kapsamında Hazırlanmıştır.

Dokumhane.net

Eylül 2017