

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖKÜMDE AKICILIK VE AKICILIĞI ETKİLEYEN
FAKTÖRLERİN ARAŞTIRILMASI**

Endüstri Mühendisi Rasül ASLANDOĞAN

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. DÖKÜM ALAŞIMLARI	3
2.1 Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması	3
2.1.1 Tek Fazlı Alaşımlar	4
2.1.2 Çift Fazlı Alaşımlar	4
2.1.3 Katı Eriyikler	6
2.1.4 Ötektoitler	7
2.2 Başlıca Döküm Alaşımları	8
2.2.1 Alüminyum Alaşımları	9
2.2.1.1 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Kompozisyonları	11
2.2.1.2 Başlıca Alüminyum Döküm Alaşımları	11
2.2.1.3 Alüminyum Alaşımlarının Döküm Özellikleri	25
2.2.2 Bakır Alaşımları	26
2.2.2.1 Bakır-Çinko Alaşımları (Pirinçler)	27
2.2.2.2 Bakır-Kalay Alaşımları (Bronzlar)	28
2.2.2.3 Bakır-Nikel Alaşımları	34
2.2.2.4 Bakır-Nikel-Çinko Alaşımları (Nikel Gümüşü)	35
2.2.3 Magnezyum Döküm Alaşımları	35
2.2.3.1 Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri	38
2.2.4 Dökme Demirler	41
2.2.4.1 Demir Döküm Usulleri	45
3. DÖKÜMDE KATILAŞMA	47
3.1 Çekirdeklenme	48
3.1.1 Homojen Çekirdeklenme	48
3.1.2 Heterojen Çekirdeklenme	49
3.2 Sıvı Metalde Kristalin Büyümesi ve Tane Yapısının Oluşumu	49
3.2.1 Düzlemsel Cephede Büyüme	51
3.2.2 Dendritik Büyüme	51
3.3 Katılaşma Zamanı	52
3.4 Saf Metallerde ve Alaşımlarda Katılaşma	52
3.4.1 Saf Metallerde Katılaşma	53
3.4.1.1 Çekirdeklenme	53

3.4.1.2	Kristal Büyümesi	56
3.4.2	Alaşımelerde Katılaşma	57
3.4.2.1	Mikrosegregasyon	60
3.4.3	Katılaşma Sırasında Oluşan Hacim Azalmaları	61
3.4.4	Kalıp İçinde Katılaşmanın Yönlendirilmesi	64
3.4.4.1	Çıkıcı ve Besleyiciler	66
3.4.4.2	Soğutucular	68
4.	AKICILIK	70
4.1	Cürufun Akıcılığı	71
4.2	Metallerin Akıcılığı ve Akıcılığı Etkileyen Faktörler	72
4.2.1	Viskozite	78
4.2.1.1	Belli Metallerin Viskoziteleri	79
4.2.2	Yüzey Gerilimi	79
4.2.3	Yüzey Oksit Filmleri	80
4.2.4	Oksitlenme	81
4.2.5	Yoğunluk	81
4.2.6	Gaz Miktarı	82
4.2.7	Döküm Süresi	83
4.2.8	Asılı İnküzyonlar	85
4.2.9	Kristalleşmenin Şekli ve Katılaşma	85
4.2.10	Yolluk Sistemi	86
4.2.11	Üst Isı	87
4.2.12	Bileşim	88
4.2.13	Gaz Problemi	90
4.2.14	Kalıbın Özellikleri	90
4.2.15	Kalıp Yüzeyi Etkisi	91
4.2.16	Boşalma Hızı	91
4.2.17	Döküm Başı	92
5.	METALLERİN AKICILIĞI	93
5.1	Ergime Sıcaklığı Düşük Olan Metallerin Akışkanlığı	93
5.2	Pirinç ve Bronzun Akıcılığı	95
5.3	Çeliğin Akıcılığı	96
5.4	Dökme Demirin Akıcılığı	102
5.5	Alüminyum Alaşımalarının Akıcılığı	109
5.6	Alüminyum-Bakır Alaşımalarının Akıcılığı	110
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	112
7.	SONUÇLAR	129
	KAYNAKLAR	131
	ÖZGEÇMİŞ	133

SİMGE LİSTESİ

A	Katılaşılan parçanın yüzey alanı
AGv	Hacim serbest enerjisi
c _o	Eriyiğin ilk derişikliği
c _k	Kalıp katsayısı
C.E	Bileşim katsayısı
d	Çap
D	Oksit tabakasının yoğunluğu
h	Yükseklik
K	Birim zamanda oluşan çekirdek sayısı
k	Akıcılık faktörü
L	Ortalama döküm kalınlığı
l	Uzunluk
M	Katılama modülü
m	Metalin atom ağırlığı
n	Bir oksit molekülündeki atom sayısı
r _o	Kritik çekirdek yarıçapı
Re	Reynold sayısı
Rm	Kopma dayanımı
Rp0,2	Akma dayanımı (%0,2 gerinme)
t	Oksit tabakasının kalınlığının teşekkülü için geçen zaman
T	Sıcaklık
T _o	Döküm sıcaklığı
T _d	Döküm sıcaklığı
T _{ger}	Alaşımın gerçek sıcaklığı
T _{Li}	Katılamanın başlayacağı likidüs sıcaklığı
T _m	Ergime sıcaklığı
V	Katılaşılan parçanın hacmi
v	Döküm hızı
W	Kristallerin büyüme hızı
w	Ağırlık
y	Oksit tabakasının kalınlığı
Δt	Aşırı soğuma miktarı
Δx	Aşırı soğuma bölgesi
v	Kinematik viskozite

μ	Dinamik vizkozite
ρ	Yoğunluk
φ	Metalin yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

ASM	American Society of Metals
ASTM	American Society of Testing and Materials
BHN	Brinell Hardness Number
EA	Elektrik Ark Fırını Çeliği
EF	Endüksiyon Fırını Çeliği
HB	Hardness Brinell
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HRC	Hardness Rockwell C
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
KS	Katılma Süresi
MÖ	Milattan Önce
NADCA	North American Die Casting Association
RE	Rare Earths
RMS	Root Mean Square
SDH	Sıkı Düzenli Hegzagonal
SM	Siemens-Martin Çeliği
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 İki farklı metalin ısı eğrileri.....	5
Şekil 2.2 İki farklı metalin ötekiğinin ısı eğrileri	5
Şekil 2.3 Denge diyagramı	6
Şekil 2.4 Bakır-nikel alaşımasının denge diyagramı ve kafes sisteminin sembolik görüntüsü	6
Şekil 2.5 Al-Cu denge diyagramı	15
Şekil 2.6 Al-Si denge diyagramı.....	16
Şekil 2.7 Al-Mg denge diyagramı	18
Şekil 2.8 Al-Si alaışımına Mg ilavesinin mekanik özelliklerine etkisi	19
Şekil 2.9 Al-Si-Mg faz diyagramı	20
Şekil 2.10 Al-Si-Mg faz diyagramının alüminyumca zengin köşesi.....	21
Şekil 2.11 Al-Fe-Si denge diyagramının alüminyum tarafındaki solvüsü	22
Şekil 2.12 Pirinç döküm yapısı	27
Şekil 2.13 Cu-Zn denge diyagramı	28
Şekil 2.14 Kalay bronz döküm yapısı.....	29
Şekil 2.15 Yüksek kurşunlu kalay bronz sürekli döküm yapısı	30
Şekil 2.16 Alüminyum bronz	31
Şekil 2.17 Alüminyum bronz	31
Şekil 2.18 Nikelli alüminyum bronz.....	32
Şekil 2.19 Bakır-nikel alaşımlarının mikro yapıları	33
Şekil 2.20 Bakır-nikel alaşımlarının mikro yapıları	33
Şekil 2.21 Cu-Sn denge diyagramı	34
Şekil 2.22 Cu-Ni denge diyagramı	35
Şekil 2.23 2001 yılında Avrupa’da magnezyum kullanım alanları	36
Şekil 2.24 Ferritik küresel grafitli dökme demir yapısı.....	44
Şekil 2.25 Perlitik küresel grafitli dökme demir yapısı	44
Şekil 2.26 Östenitik küresel grafitli dökme demir yapısı	45
Şekil 3.1 Saf bir metalin soğuma eğrisi	53
Şekil 3.2 Katılma sırasında oluşan taneler ve tane sınırları	54
Şekil 3.3 Aşırı soğumanın birim zamanda oluşan çekirdek sayısı ve büyüme hızına etkisi	55
Şekil 3.4 Soğuma sırasında sıcaklık gradyeninin tane oluşumuna etkisi	57
Şekil 3.5 Kalıp içinde katılma farklı bölgelerin tane biçimleri	57
Şekil 3.6 Cu-Ni sisteminin faz diyagramı ve %50’lik alaışımın soğuma eğrisi.....	58
Şekil 3.7 Metal eriyiklerinde yapısal aşırı soğuma.....	59
Şekil 3.8 Katılma cephesi ve içyapının yapısal aşırı soğumayla olarak değişimi.....	60
Şekil 3.9 İki bileşenli alaışımarda mikrosegregasyon oluşumu	61
Şekil 3.10 Katılma sırasında hacim değişimleri.....	62
Şekil 3.11 Katılma sırasında çekme boşluğu oluşumu.....	64
Şekil 3.12 Alaışımarda katılma cephesi	64
Şekil 3.13 Yönlenmiş katılma	65
Şekil 3.14 Köşelerde katılma	65
Şekil 3.15 Çıkıcı ve besleyiciler	66
Şekil 3.16 Çıkıcılarda yalıtkan ve ekzotermik örtülerin kullanılması	68
Şekil 3.17 Besleyicilerde kalem maçaların kullanılması.....	68
Şekil 3.18 Çekme boşluklarının soğutma plakaları yardımıyla önlenmesi	69
Şekil 3.19 Çekme boşluklarının önlenmesi için soğutucu ve yalıtkanlardan yararlanılması ..	69
Şekil 4.1 Spiral ve vakum deneyi	71
Şekil 4.2 İkili diyagramlar üzerine işlenmiş bulunan akıcılık eğrileri	73
Şekil 4.3 Kır ve yumuşak dökme demirlerde döküm sıcaklığı ve bileşimin akıcılığa etkisi	74
Şekil 4.4 Aşırı ısıyla dökülmüş hemen hemen saf bir alüminyumda makro yapı.....	75
Şekil 4.5 Aşırı ısısız saf bir metalin bir akıcılık kanalında katılaştırılması.....	76
Şekil 4.6 Seyreltik bir alaışımın akıcılık kanalında akışı ve katılaştırılması.....	77

Şekil 4.7 Kurşun-kalay alaşımında bileşim ve akışkanlık bağıntısı.....	89
Şekil 5.1 Ergime sıcaklığı düşük olan metallerin akışkanlığı.....	93
Şekil 5.2 Sabit kalıpta dökülmüş alüminyum ve çinkonun akışkanlığı.....	94
Şekil 5.3 Klasik alüminyumun spiral kesitte kum kalıptaki akışkanlığı	94
Şekil 5.4 Alaşım elementlerinin alüminyum dökümün akışkanlığı üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 5.5 Bronzun akıcılığı.....	96
Şekil 5.6 Yaş kum kalıptaki bronzun akıcılığı.....	96
Şekil 5.7 Karbonun çeliğin akıcılığı üzerindeki etkisi.....	97
Şekil 5.8 Silisyumun çeliğin akıcılığı üzerindeki etkisi	98
Şekil 5.9 U şekilli akıcılık test parçası	99
Şekil 5.10 Cury spiral akışkanlık testi	100
Şekil 5.11 Sıcaklığın ve kimyasal bileşimin çeliğin akıcılığı üzerindeki etkileri	101
Şekil 5.12 Çeşitli çelik üretim yöntemlerinin akıcılık üzerindeki etkileri.....	102
Şekil 5.13 Sıcaklık, karbon miktarı ve akışkanlığın dökme demirdeki ilişkisi	103
Şekil 5.14 Dökme demirin akıcılığı	103
Şekil 5.15 Farklı sıcaklık ve karbon değerlerinin akıcılığa etkisi	104
Şekil 5.16 Akıcılığı tespit için sıcaklık-spiral uzunluğu eğrileri.....	106
Şekil 5.17 Sıcaklığın ve kimyasal bileşimin beyaz dökme demirin akıcılığına etkisi	107
Şekil 5.18 Akıcılık deneyi için kalıp	110
Şekil 5.19 Alüminyum-bakır alaşımlarında bakır yüzdesine göre akıcılığın değişimi	111
Şekil 6.1 Alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali.....	113
Şekil 6.2 %2 Cr, %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali .	115
Şekil 6.3 %5 Cr, %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali .	116
Şekil 6.4 %9 Cr, %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali .	118
Şekil 6.5 %2 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	119
Şekil 6.6 %5 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	121
Şekil 6.7 %9 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	123
Şekil 6.8 %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	124
Şekil 6.9 %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	126
Şekil 6.10 %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali	127

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Bazı alaşımların fiziksel özellikleri.....	9
Çizelge 2.2 Türk standartlarında alüminyum alaşımları	12
Çizelge 2.3 Al-Fe-Si alaşımının üç fazı ve bileşimleri.....	23
Çizelge 2.4 Çeşitli Al alaşımları, mekanik özellikleri ve kullanım yeri örnekleri	24
Çizelge 2.5 Birincil döküm alaşımları	25
Çizelge 2.6 %10'dan fazla nikel içeren bronzlar.....	32
Çizelge 2.7 Bazı mühendislik metallerinin fiziksel özellikleri ve maliyetleri	37
Çizelge 2.8 Magnezyum alaşımlarının dökümü	38
Çizelge 2.9 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi	40
Çizelge 2.10 Magnezyum alaşımları standartları ve bileşimleri	40
Çizelge 2.11 Dökme demirlerin kimyasal bileşimleri	42
Çizelge 3.1 Bazı malzemeler için katılma sırasında oluşan hacim azalmaları.....	62
Çizelge 3.2 Değişik geometrilere sahip parçaların katılma modülleri	67
Çizelge 4.1 Bazı sıvıların viskozitesi	78
Çizelge 4.2 Bilinen bazı metallerin yüzey gerilimleri	79
Çizelge 4.3 Bazı alüminyum alaşımlarının akıcılığı	89
Çizelge 5.1 Akıcılığı tespit için f faktörleri	107

ÖNSÖZ

Döküm tekniğinde ergimiş metalin kalıp içerisinde katılaşmadan önce aldığı toplam yol olarak tanımlanan akıcılık kavramı, kaliteli döküm ürünlerin eldesinde katılaşma kadar önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar. Ergimiş metalin akıcılığı, malzemenin ve kalıbın özellikleri ve sıcaklık başta olmak üzere birçok faktörden etkilenir. Bu çalışmada teorik ve deneysel çalışmalar vasıtasıyla akıcılığı etkileyen faktörler araştırılmıştır. Bu amaçla tezin ilk bölümünde uygulamada en çok kullanılan döküm alaşımlarından ve özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde döküm içyapısının oluşumunda doğrudan etkili olan katılaşma üzerinde durulmuştur. Sonraki bölümde döküm tekniğinde sıvı metalin akışı ve akıcılık konusundaki temel prensipler, problemler, çözüm yöntemleri ve akıcılığı etkileyen faktörler anlatılmıştır. Son bölümde ise yapılan deneysel çalışmalar anlatılarak sonuçları yorumlanmıştır.

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında desteklerini yanımda hissettiğim aileme, arkadaşlarıma ve öğretmenlerime teşekkürü borç bilirim.

Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a, Standart Conta'ya, Koray Makine'ye, Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Eskişehir Döküm Fabrikası'na, Cevdet Tanguroğlu'na ve Metalürji Mühendisi Necmi Tuncel'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Döküm tekniğinde parça yapısını ve kalitesini etkileyen etkenlerden en önemlileri katılaşma ve akıcılıktır. Ergimiş metalin kalıp içerisinde belirli koşullardaki karmaşık davranışı, sıcaklık ve malzeme bileşimi gibi çeşitli faktörlerin etkisi altındadır.

Bu çalışmada döküm tekniğinde akıcılık kavramı ve akıcılığı etkileyen faktörler geniş bir literatür taraması ile araştırılmış ve malzeme bileşiminin akıcılığa etkisi deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Yapılan deneysel uygulamalarda öncelikle AISI 1040 alaşımsız çeliği belirli döküm şartlarında spiral kalıpta dökülerek akıcılığı ölçülmüştür. Daha sonra alaşımsız çeliğe çeşitli oranlarda Cr ve Ni ilavesi ile aynı döküm şartlarında dokuz adet daha döküm yapılarak akıcılıklar ölçülmüş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Döküm tekniğinde akıcılığı artırıcı en önemli etken sıcaklıktır. Çelik dökümlerde alaşımsız çeliğe Cr ve Ni ilavesi çeliğin akıcılığını artırarak spiral kalıpta katılaşmadan daha fazla yol almasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Döküm, akıcılık, katılaşma.

ABSTRACT

The most important factors affecting material structure and quality in casting are solidification and fluidity. Complex behavior of melted metal in mold in specific conditions is affected by several factors such as temperature and material composition.

In this study, casting fluidity and factors affecting fluidity was researched in literature and affect of material composition to fluidity has been tested via experimental studies. In experimental studies, firstly, AISI 1040 carbon steel poured into a spiral mold in specific conditions and its fluidity was measured. Then, Cr and Ni were added to carbon steel at various rates and nine more castings poured under the same conditions, fluidities measured and results commented. The most important factor increasing casting fluidity is temperature. Adding Cr and Ni to carbon steel increased the fluidity of cast steels and helped melted metal fill the spiral mold more before it solidified.

Keywords: Casting, fluidity, solidification.

1. GİRİŞ

Günümüz insanının yaşam standardında son elli yılda sağlanan olağanüstü iyileşme, büyük ölçüde mühendislik tasarımlarının seri ve ucuz olarak imalatını sağlayan yöntemlerin geliştirilmesi sayesinde. İmal usullerini tanımak bütün mühendislik disiplinleri için kaçınılmaz bir zorunluluktur. Mühendisler her bir imal usulünün imkânlarını, üstünlüklerini ve sınırlarını tanıyarak amaçladıkları tasarıma en ucuz ve doğru olarak ulaşmak için gerekli bilgileri edinmek zorundadırlar.

Üretim, doğada bulunan maddeleri istenilen özellik ve biçimdeki ürünlere dönüştürmek olarak tanımlanabilir. Bu amaçla geliştirilen çeşitli yöntemler mevcuttur ve bu yöntemler için genellikle “imal usulleri” adı kullanılmaktadır. İmal usulleri çok sayıda değişik yöntemi içerir. Bunlar arasında en eskisi olmasına rağmen halen en önemlisi ve yaygın olanı döküm tekniğidir.

Metal dökümü özetle, “istenilen bir şekli elde etmek için, seçilen metal veya alaşımın ergitilmesi ve söz konusu şeklin negatifi olan kalıp boşluğuna dökülmesi işlemi” olarak tanımlanabilir. İstenilen özelliklere sahip, sağlam ve hatasız bir döküm yapısının eldesi için; uygun yöntemin seçilmesi, seçilen yöntemeye uygun kalıp ve maçaların tasarlanması, parametrelerin belirlenmesi ve kontrolü, uygun alaşımın hazırlanması, uygun ergitme ünitesinin seçimi, ergitme esnasında gerekli müdahalelerin yapılması, uygun yolluk ve çıkıcı sistemlerinin tasarımları, ergimiş metalin kalıba uygun şekilde ve akışkanlıkta girişinin sağlanması, katılaşmanın ve döküm yapısının sürekli kontrolü ve dökümden sonraki gerekli müdahalelerin yapılması gerekir.

Hemen hemen bütün mamullerin imalatının bir safhasında dökümden geçmiş olmaları dökümün önemini gösterir. Başarılı bir dökümün ise, katılaştırma yönteminin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle gerçekleştirilebileceği bugün açıkça anlaşılmış durumdadır. Katılaştırmanın kontrol altında tutulmasıyla döküm yapısı içindeki heterojenlikler kontrol altına alınabilmekte ve optimum özelliklere sahip malzemelerin dökümü mümkün olmaktadır. Bu bakımdan döküm ve katılaştırma terimleri günümüz teknolojisinde artık bir arada düşünülmektedir.

Kaliteli dökümlerin üretimi, birçok metalürjik etkenin yerine getirilmesi ile mümkündür. Hatasız bir döküm elde edilebilmesi için sıvı metalin, kalıbın en uç ve en uzak köşelerine

kadar katılaşmadan ilerleyebilmesi gerekir. Sıvı metalin kalıbı tam doldurmadan katılaşmaya başlaması halinde, hatalı parçalar meydana gelir. Bu nedenle, döküm tesislerinde dökümden önce, pratik olarak uygulanabilen akışkanlık testleri ile döküm şartları ve parametreleri belirlenmektedir. Bu sayede hatalı parça oranı minimuma indirilebilmekte, daha kaliteli ve verimli dökümler yapılabilmektedir.

Döküm tekniğinde kaliteyi belirleyen etkenlerden en önemlisi katılaşma ve ergimiş metalin akıcılığıdır. Metal ve alaşımların yolluk sisteminden akarak, kalıbı kusursuz olarak doldurma özelliği “akıcılık” olarak adlandırılır. Kalıp içine doldurulan sıvı metalin akıcılığı; malzeme, parça, kalıp ve döküm şartları ile ilgili birçok parametreden etkilenir. Bunlardan başlıcaları; malzeme bileşimi, sıcaklık, katılaşma şekli ve yolluk sistemidir.

Yukarıdaki temel dört faktörden başka akıcılığı ve döküm kabiliyetini, dolayısıyla dökümün kalitesini ve verimliliğini etkileyen pek çok faktör bulunmasına rağmen, yalnızca bu temel faktörlerin incelenmesi dahi döküm tekniğinde akıcılık kavramının öneminin araştırılması ve anlaşılması için gerekli ve yeterli olacaktır. Akıcılık dökümde en temel sorunlardan birisidir ve uygun şartların sağlanması ile dökümde sebep olabileceği olumsuz etkileri minimuma indirmek mümkündür. Burada önemli olan, akıcılığın dökümde kaliteyi etkileme yönlerinin doğru teşhisinin yapılmasıdır.

2. DÖKÜM ALAŞIMLARI

Endüstride saf metaller yerine alaşımları kullanılır. Bir metalin yapısına (bileşimine) başka maddeler katılarak özellikleri, amaçlara uygun bir şekilde değiştirilebilir. Bu nedenle malzeme bilgisi içerisinde alaşımların önemli bir yeri vardır.

Gelişen ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla insanoğlu değişik özellikleri bir arada bulunduracak yeni metaller araştırma yolunu öğrenmiştir. İnsanoğlunun değişik metallere yeni özellikler kazandırarak yaptığı ilk alaşım olarak bronz örnek verilebilir. Bakır ile kalayı alaşım yaparak kullanmış ve bu çağı bronz çağı (M.Ö. yaklaşık 2500) olarak adlandırmıştır. Daha sonraki bin yıllarda daha değişik ihtiyaçlarını karşılayacak alaşımlar konusunda gelişmeler kaydetmiş olan insanoğlu, günümüzde neredeyse hiçbir metali saf olarak kullanmayacak hale gelmiştir.

Her metalin kendine has özellikleri olduğu bir gerçektir. Ancak ihtiyaçlar, farklı özelliklere sahip metallerin birleşmesiyle yeni özellikler veren yeni metallerin bulunması için yeterli zemini oluşturmakta olup, her geçen zaman sayıları artan alaşımları karşımıza çıkarmaktadır. Görünen odur ki insanoğlunun yaradılışından kaynaklanan araştırmacı ruhu, ileriki yıllarda değişik yapılara sahip alaşımların ortaya çıkmasına olanak sağlayacaktır.

Genelde aşağıda sıralanan ihtiyaçlara cevap vermesi amacıyla alaşımlandırma yapılır:

- Malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini değiştirmek suretiyle daha elverişli malzemeler üretmek.
- Çok sayıda ve değişik özelliklerde metaller geliştirerek ihtiyaçlara cevap vermek.
- Isıl işlemlere uygun metaller üretmek.
- Malzeme maliyetlerini mümkün olduğunca düşürmek.
- Malzemeyi aşınma ve dış şartların yıpratıcı etkilerinden korumak.

Döküm tekniğinde alaşımlandırmanın amacı, malzeme özelliklerini döküme en uygun hale getirerek istenen hatasız dökümleri elde edebilmektir. Bu amaçla alüminyum başta olmak üzere bakır ve magnezyum alaşımları günümüzde oldukça kullanım alanı bulmuş döküm alaşımlarıdır.

2.1 Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alaşımlar tek ve çift fazlı olmak üzere iki tiptedirler. Tek fazlı alaşımlara katı eriyik, çift fazlı alaşımlara ise ötektik adı verilir. Çift fazlı alaşımlarda alaşımı oluşturan elemanların kafes sistemi değişmez, dolayısıyla özellik değişimi meydana gelmez. Tek fazlı alaşımlarda ise daha kolay özellik değişimi meydana geldiğinden tek fazlı alaşımlar daha çok tercih edilirler.

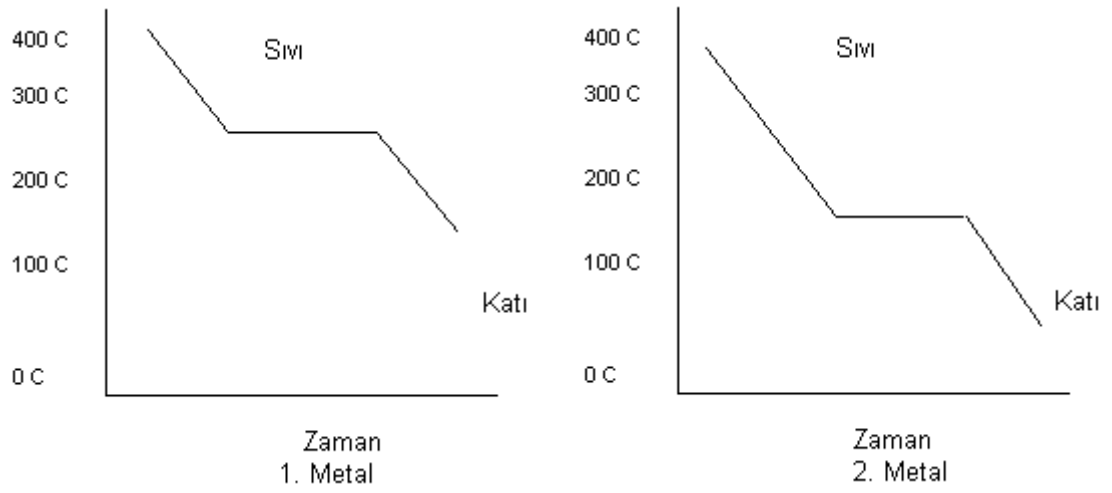
2.1.1 Tek Fazlı Alaşımlar

Genel olarak alaşımlar, bileşenlerin bir arada eritilmesiyle üretilir. Alaşımı oluşturan metaller bu sırada birbirlerinden farklı davranış gösterirler. Bu farklılıklar içinde en çok rastlanılan durum eriyiklerin birbirleri içinde çözünmesidir. Tıpkı su ve alkolde olduğu gibi eriyikler birbiri içinde çözünerek tek yapıda bir sıvı meydana getirirler. Su ve alkol arasında hiçbir ayırım yüzeyi bulunmadığından, bu tür eriyikler tek fazlı olarak adlandırılır.

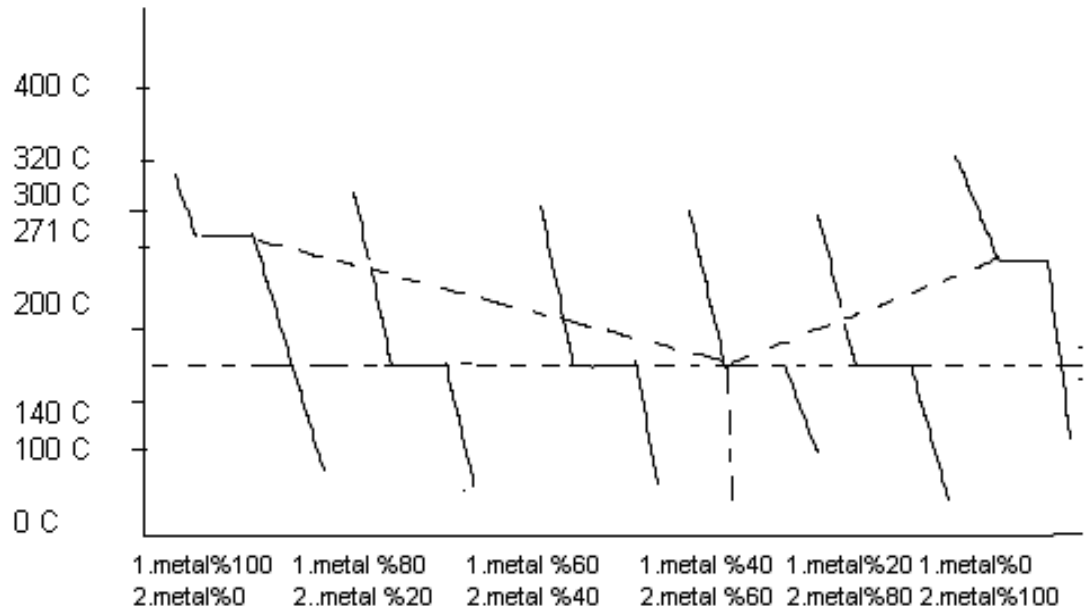
Makine üretiminde kullanılan alaşım eriyiklerinin hemen hemen hepsi, üretimleri esnasında birbirlerinin içerisinde çözünürler. Bunlara örnek olarak bakır-kalay, bakır-çinko, bakır-nikel, demir-nikel ve kurşun-kalay alaşımları verilebilir.

2.1.2 Çift Fazlı Alaşımlar

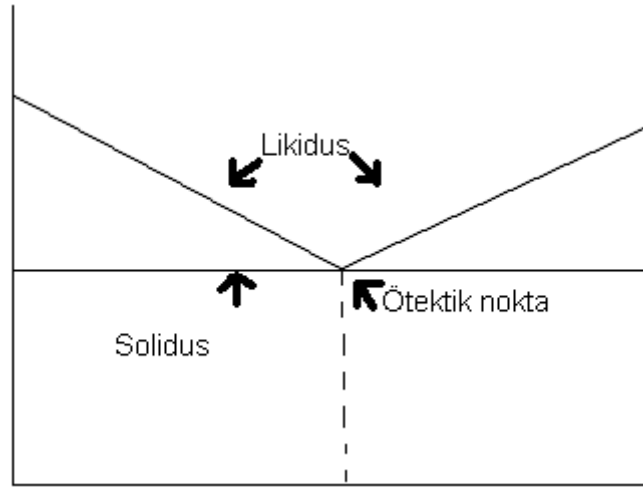
Ötektik olarak adlandırılan çift fazlı alaşımlarda alaşım elemanları ayrı ayrı kendi yapılarını değiştirmeden ergir ve katılaşır. İlk etapta alaşımı oluşturan elemanların her birinin farklı ısılarda ergimesi mümkündür. Ancak alaşımı oluşturan metallerin miktarı bir noktada aynı ısıda ergiyip, aynı ısıda katılaşmalarına olanak verecek konumda olur. Farklı ısıda ergiyen iki metalin alaşım oluşturma sonucunda oranları öyle bir noktada birleşir ki, bu nokta farklı ergime ısısına sahip iki metalin aynı ısıda ergimesine veya katılaşmasına olanak sağlar. İşte bu oran ötektik orandır. Söz konusu oranda, daha önce farklı ısılarda ergiyen veya katılaşan metallerin alaşım yapmaları sebebiyle kazandıkları yeni ısı değerleri ise ötektik sıcaklığı verir. Kısacası alaşım miktarlarında yapacağımız değişiklikler ile farklı ergime derecesine sahip iki metali, aynı ısıda ergir duruma getirebiliriz. Bu bize homojen yapıya sahip yeni alaşımlar sağlar. Sonuçta saf bir metalin özelliklerine sahip alaşım elementleri ortaya çıkmış olur. İki farklı ısı eğrisi olan metalin katılaşma eğrileri ve iki farklı metalin alaşım yapmaları sonucunda oluşturdıkları ötektiğin ısı eğrileri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.1 İki farklı metalin ısı eğrileri



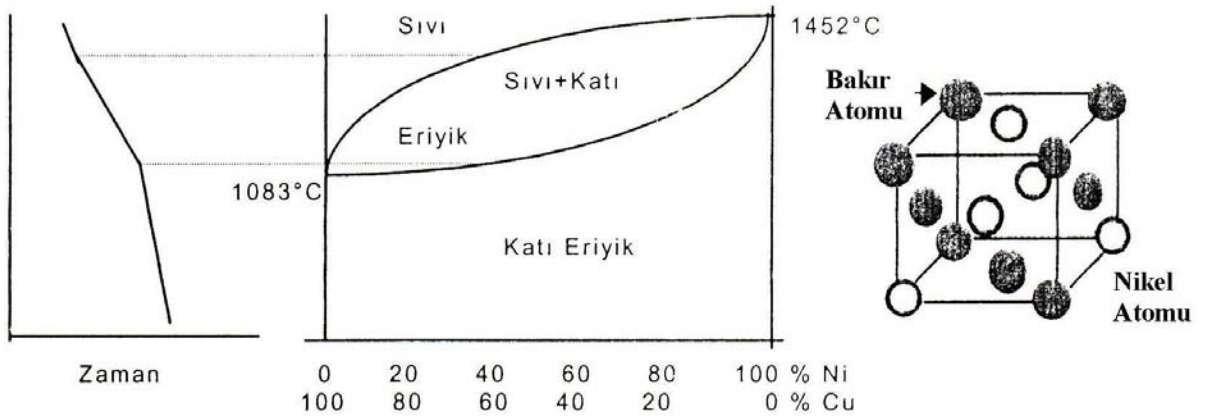
Şekil 2.2 İki farklı metalin ötekiğinin ısı eğrileri



Şekil 2.3 Denge diyagramı

2.1.3 Katı Eriyikler

Katı eriyikler tek fazlı alaşım olarak da adlandırılır. Alaşımı oluşturan elementlerin atomları tek bir kafes içerisinde birleşmiş durumdadır. Bunu yaparken eriyik değil katı haldedirler. Bir bakıma iki bileşen katı halde birbirinin içerisinde tamamen çözünebilir yani iki bileşen ortak bir kristal kafes meydana getirebilir. Bileşenler, kristal kafesleri iki ayrı atom çeşidinden oluşmuş karışım kristalleri meydana getirirler. Bu tip sistemlerin bir temsilcisi bakır-nikel sistemidir. İki metal de kübik yüzey merkezli kafes sisteminde kristalleşir. Böylece bir kafes içinde hem bakır, hem de nikel atomu bulunur ve hemen hemen aynı kafes değerlerine sahiptirler. Bakır ve nikelin aynı kafes değerlerine sahip olabilmeleri, her oranda karışım kristalleri oluşturmalarına olanak tanır.



Şekil 2.4 Bakır-nikel alaşımının denge diyagramı ve kafes sisteminin sembolik görüntüsü

Katı eriyiklerin soğuma eğrilerinde iki büklüm noktası meydana gelir (Şekil 2.4). Bu soğuma eğrileri yardımıyla katılaşma bölgesi mercimek şeklinde olan bir denge diyagramı çizilir. Bütün alaşımlar soğuma sırasında karışım kristalleri meydana getirirler. Sıcaklığın düşmesiyle bu tür kristallerin miktarı artar, sıvı miktarı düşer.

Bu tarzda meydana gelen karışım kristallerine katı eriyik denmesinin nedeni bileşenlerin birbirleri içinde bir eriyikte olduğu gibi çok iyi karışmış ve erimiş olmasıdır. Katı eriyiklerin bu homojen yapısı, onların tek fazlı bir alaşımın özelliklerini göstermesine neden olur. Bu yüzden katı eriyikler tek fazlı alaşım olarak da adlandırılır.

2.1.4 Ötektoitler

Ötektoit, katı eriyiklerin yapmış olduğu bir ötektittir. Ötektoitlere örnek olarak çelikler verilebilir.

Çelik, demir ile karbonun yapmış olduğu bir alaşımdır. Karbon, demirin en önemli alaşım elemanıdır. Karbon ucuz bir elementtir ve düşük miktarlarda bile demirin özelliklerini yüksek oranda etkiler. Yüksek fırınlarda ham demir üretimi sırasında, karbon demirin içerisine girer ve yaklaşık %4 karbonlu ham demiri meydana getirir. Ham demirin bileşiminde ayrıca diğer refakat elementleri de yer alır.

Demirin sıcaklıkla birlikte değişen karbon çözündürme yeteneği vardır. Bu özellik kristal kafes sisteminde meydana gelen değişim nedeniyledir. Bu durumu yalın olarak açıklamak istersek; yüksek sıcaklıklarda demir kristalleri yüzey merkezli kübik bir yapı gösterirken, düşük sıcaklıklarda hacim merkezli kübik kristaller meydana gelir. Bundan ötürü sıvı demir ancak belirli bir miktar karbonu çözündürebilir.

Yapılan araştırmalar 1147°C’de yüzey merkezli kübik demir kristallerinin içyapılarında bulundurabilecekleri karbon miktarının, kendi ağırlıklarının %1,7’si kadar olabileceğini göstermiştir.

Bu durumu, şekerin su içinde çözünmesine benzetmek mümkündür. Sıcak su belirli bir miktar şekeri çözündürebilir. Daha fazla şeker ise çözünmeden tabana çöker. Aynı zamanda soğuk

suyun da daha az şeker çözüdürebildiği bilinmektedir. Benzer nedenlerden dolayı demir de düşük sıcaklıklarda daha az karbonu içerisine alabilir.

Bu sebeplerden, katılaşmış demir daha düşük miktarlarda karbon çözüdürür. Bu düşük miktar, demirin katı eriyik halindeki sıcaklığı olan 723°C 'de %0,85'dir.

Yüksek sıcaklıklarda demirin karbon çözüdürmesi ötektik bir yapının oluşması anlamına gelmektedir. Oysa katı halde (723°C) %0,85 oranında karbon çözüdürmesi farklı bir yapının oluşmasına neden olur. Yapı, sıvı haldeki demirin karbon çözünlüğüne benzer özellik gösterir.

Sıcaklığın 723°C 'nin altına indirilmesi esnasında oluşacak dönüşüm, ötektik dönüşüme benzer, ancak bütün olaylar katı halde meydana geldiğinden, ötektoit dönüşüm adını alır. Ötektoitin oluşması için yavaş soğuma gereklidir. Çünkü ancak yavaş soğuma sırasında atomik difüzyon için yeterli süre oluşabilir ve karbon atomları demir atomlarıyla ayrı kristal kafes içinde yerlerini alır.

Ötektoit oluşumu sırasında meydana gelen kristal kafesler, karışım kristalleri şeklindedir. Karbon atomlarının, katı eriyik içinde yer almalarının önemli nedenlerinden biri, demir atomlarına göre küçük olmalarıdır.

Çelik bu özelliğine göre sınıflandırılır. İçyapısında %0,85'ten az karbon bulunan çelikler ötektoit altı çelikler, içyapısında %0,85'ten fazla karbon bulunan çelikler ötektoit üstü çelikler olarak adlandırılır. Ötektoit grubu çeliklerin tümüne sade karbonlu çelikler adı verilir.

2.2 Başlıca Döküm Alaşımları

En çok kullanılan döküm malzemesi dökme demirler olmasının yanı sıra döküm özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanarak hazırlanan çeşitli döküm alaşımları da bulunmaktadır. Bunların başlıcaları şunlardır.

- Alüminyum Alaşımları
- Magnezyum Alaşımları
- Bakır alaşımları
- Çinko alaşımları

Çizelge 2.1 Bazı alaşımların fiziksel özellikleri

Alaşım	Yoğunluk (gr / cm³)	Ergime Noktası (°C)	Çekme Mukavemeti (N/mm²)
Çelik	7,70 – 7,85	1450 – 1520	340 – 1800
Gri dökme demir	7,10 – 7,30	1150 – 1250	150 – 400
Östenitik paslanmaz çelik	7,80 – 7,90	1440 – 1460	600 – 800
Mg- alaşımları	1,80 – 1,83	590 – 650	180 – 300
Al- alaşımları	2,60 – 2,85	570 – 655	100 – 400
Zn- alaşımları	5,70 – 7,20	380 – 420	140 – 300
Pirinç	8,25	900 – 950	250 – 600
Bronz	8,56 – 8,90	880 – 1040	200 – 300

2.2.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları, alüminyuma bakır, çinko, silisyum, magnezyum, mangan, demir, nikel, titan vb. elementler katılarak oluşturulur. Bunların bazen biri, bazen daha çoğu alüminyuma katılarak alaşımlandırma yapılabilir. Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri, malzemenin özelliklerini daha da iyileştirerek diğer metallere göre üstün olmasını sağlar. Alüminyum ve alüminyum alaşımları dünyada demir esaslı malzemelerden sonra en önemli metal grubunu oluşturur. Ayrıca hafif metaller arasında da gerek saf halde gerekse alaşım olarak en çok kullanılanıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, günümüzde artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri, özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı çok iyi bir şekilde iletmesi ve kolay biçimlendirilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı günümüz endüstrisinde son yıllarda artan bir kullanım alanına sahip metalsel malzemeler konumuna gelmişlerdir. Her geçen gün yeni kullanım alanları açılmaktadır. Bu tür malzemelerin kullanım alanları ev eşyalarından uzay teknolojisine kadar geniş bir alana yayılmıştır.

Alüminyum alaşımlarının işlenmesi kolaydır. Metal kalıplara çok kolay dökülebilirler. Basınçlı dökümde iyi sonuç verirler.

Korozyona dayanıklı oldukları ve zehirlenme tehlikesi yaratmadıkları için ilaç sanayisinde ve gıda maddelerinde koruma maddesi olarak kullanılırlar. Mutfak eşyalarının yapımına da elverişlidirler.

Alüminyum alaşımları, özellikle hafiflikleri sayesinde uçak, gemi, tren, otomobil vb. taşıma araçlarında ve konutlarda geniş ölçüde kullanılırken iletkenlikleri nedeniyle de elektrik endüstrisinde kullanım alanı bulmuşlardır. Alaşımların iletkenlikleri alüminyuma göre daha azdır.

Hafif olmaları, işlenme ve kullanılmalarındaki taşıma giderlerini azaltır. Sertliklerinin ve dayanımlarının yeteri kadar yüksek olmayışı, kolay aşınmaları, önemli korozyonlara dayanıklı olmayışları ve fiyatlarının yüksekliği, sakıncaları olarak gösterilmektedir.

Ergime dereceleri düşük olduğu için dökümleri kolaydır. Her çeşit döküm ocağında ergitilebilir ve kolaylıkla dökülebilirler.

Çelikten sonra günümüz endüstrisinde en fazla kullanılan metelsel malzeme olan ve yer kabuğunda en çok bulunan ikinci element olmakla birlikte mühendislik uygulamalarında ekonomikliğiyle ön plana çıkan bir metal olan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılmış mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen malzemeler konumuna gelmişlerdir. Alüminyum, endüstriyel malzemeler içinde son keşfedilen metallere biridir ve bu alaşımların kullanım alanının yaygınlaşmasında savunma, otomotiv ve havacılık endüstrisinin büyük bir katkısı olmuştur (Avner, 1974; Tülbentçi, 1987; Welding Handbook, 1996; Anderson, 2000; Mathers, 2002).

Alüminyumun en önemli özellikleri olarak; özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı çok iyi bir şekilde iletmesi, çok yumuşak ve sünek olması ile bazı alaşımlarının çökelme yolu ile sertleştirilebilmesi sayılabilir.

Alüminyumun ergime sıcaklığı düşük, buna karşın kendini çekmesi çok fazladır, bu bakımdan döküm yolu ile şekillendirme için saf alüminyum yerine, alüminyum alaşımları tercih edilir (Anık ve Dorn, 1995; Tülbentçi, 1987).

Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri, içeriğindeki Si, Fe, Ti, Cu ve Zn gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere karşı olan direnci azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak da büyük ölçüde değişir (Tülbentçi, 1987; Anık ve diğ., 1993).

Bu tür alaşımların büyük çoğunluğu silisyum içerir. %11,7 Si içeren alaşım ötektik bileşimde olduğundan çok üstün döküm özelliklerine sahiptir. Bu alaşımın korozyona direnci ve kaynak kabiliyeti de oldukça iyidir. Döküm alüminyum alaşımlarına bir miktar bakır katılması, talaş kaldırma özelliklerini geliştirir, buna karşın, korozyon direncinde azalmaya neden olur (Tülbentçi ve Kaluç, 1985).

Döküm alüminyum alaşımlarına silisyumdan başka magnezyum katılarak çökelme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun koroziv etkilerine dirençli alaşımlar elde edilir.

2.2.1.1 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Kompozisyonları

Döküm alüminyum alaşımları, akıcılık ve besleyicilik gibi dökülebilirlik özellikleri ile dayanım, süneklik ve korozyon dirençleri geliştirilmiş alaşımlardır.

Döküm alüminyum alaşımlarından pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan düşük ergime noktaları, iyi akıcılık ve dökülebilirlik sağlayan yeterince silisyum içerir (%5-12 Si). Akışkanlık, sıvı metalin bir kalıba doğru, erken katılaşma olmadan akma yeteneğidir. Dökülebilirlik ise alaşımdan iyi bir dökümün yapılabilmesine işaret eder. Silisyum, %12 oranında alüminyumla ötektik bileşim yapar.

Kokil veya pres dökümdeki hızlı soğuma, tane boyutunu ve ötektik mikro oluşumu inceltmek genellikle dayanımı yükseltir. Belirli alaşımlarda mikro yapıyı ve bu nedenle de dağılım mukavemetlenmesi düzeyini iyileştirmek amacıyla bor ve titanyum ilaveleri ile tane inceltme, ötektik yapıyı değiştirmek için sodyum veya stronsiyum kullanarak modifikasyon veya birincil silisyumu inceltmek mukavemetlenme sağlamak için fosfor ilavesi yapılır.

2.2.1.2 Başlıca Alüminyum Döküm Alaşımları

Başlıca alüminyum alaşımları bileşime bakır, silisyum, çinko ve magnezyum katılarak oluşturulur.

Çizelge 2.2 Türk standartlarında alüminyum alaşımları

1. İçinde Başlıca Bakır Bulunan Alüminyum Alaşımları														
Alaşım		Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr	Be	Al
Al-Cu ₄ Ni ₂ Mg ₂	Min.	3,5	1,2	-	-	-	1,7	-	-	-	-	-	-	Geri Kalan
	Max.	4,5	1,8	0,7	0,7	0,6	2,3	0,1	0,05	0,05	0,2	0,2		
Al-Cu ₄ Mg Ti	Min.	4,0	0,15	-	-	-	-	-	-	-	0,05			
	Max.	5,0	0,35	0,35	0,40	0,10	0,05	0,20	0,05	0,05	0,35			
Al-Cu ₄ Ti	Min.	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05			
	Max.	5,0	0,05	0,35	0,40	0,10	0,10	0,2	0,05	0,05	0,35			
Al-Cu ₄ Si	Min.	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	Max.	5,0	0,03	1,2	1,0	0,3	0,05	0,3	0,05	0,05	0,2			
2. İçinde Başlıca Silisyum Bulunan Alüminyum Alaşımları														
Alaşım		Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr	Be	Al
Al-Si ₅	Min.	-	-	4,0	-	-	-	-	-	-				Geri Kalan
	Max.	0,10	0,1	6,0	0,8	0,5	0,1	0,1	0,1	0,20				
Al-Si ₅ Fe ¹⁾	Min.	-	-	6,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,10	0,1	6,0	1,3	0,5	0,1	0,1	0,1	0,20				
Al-Si ₅ Mg	Min.	-	0,4	3,5	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,1	0,9	6,0	0,6	0,6	0,1	0,1	0,05	0,2				
Al-Si ₅ Mg Fe ¹⁾	Min.	-	0,4	3,5	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,1	0,9	6,0	1,3	0,6	0,1	0,1	0,05	0,2				
Al-Si ₅ Cu ₁	Min.	1,0	0,3	4,5	-	-	-	-	-	-				
	Max.	1,5	0,6	6,0	0,8	0,5	0,3	0,5	0,1	0,2				
Al-Si ₅ Cu ₃	Min.	2,0	-	4,0	-	0,2	-	-	-	-				
	Max.	4,5	0,15	6,5	1,0	0,7	0,3	0,5	0,05	0,2				
Al-Si ₅ Cu ₃ Fe ¹⁾	Min.	2,0	-	4,0	-	0,2	-	-	-	-				
	Max.	4,5	0,15	6,5	1,3	0,7	0,3	0,5	0,2	0,2				
Al-Si ₆ Cu ₄	Min.	3,0	-	5,0	-	0,2	-	-	-	-				
	Max.	5,0	0,3	7,0	1,3	0,6	0,3	2,0	0,1	0,2				
Al-Si ₇ Mg	Min.	-	0,2	6,5	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,20	0,4	7,5	0,5	0,6	0,05	0,3	0,05	0,2				
Al-Si ₈ Cu ₃ Fe ¹⁾	Min.	2,5	-	7,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	4,5	0,15	9,5	1,3	0,6	0,3	1,2	0,2	0,2				
Al-Si ₁₀ Mg	Min.	-	0,15	9,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,10	0,40	11,0	0,70	0,6	0,1	0,1	0,05	0,15				
Al-Si ₁₂	Min.	-	-	11,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,10	0,10	13,5	0,70	0,6	0,1	0,1	0,05	0,15				

Al-Si ₁₂ Fe ¹⁾	Min.	-	-	11,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	0,10	0,10	13,5	1,3	0,5	0,1	0,1	0,05	0,15				
Al-Si ₁₂ Cu	Min.	-	-	11,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	1,2	0,3	13,5	0,8	0,5	0,2	0,5	0,1	0,2				
Al-Si ₁₂ Cu Fe ¹⁾	Min.	-	-	11,0	-	-	-	-	-	-				
	Max.	1,2	0,3	13,5	1,3	0,5	0,2	0,5	0,1	0,2				

¹⁾ Basınçlı dökümün bileşimi

3. İçinde Başlıca Magnezyum Bulunan Alüminyum Alaşımları

Alaşım		Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr	Be	Al
Al-Mg ₃	Min.	-	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Geri Kalan
	Max.	0,10	4,5	0,5	0,5	0,6	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	0,1	-	
Al-Mg ₃ Si	Min.	-	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,10	4,5	1,3	0,5	0,6	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	0,4	-	
Al-Mg ₅ Si ₁	Min.	-	4,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,10	6,0	1,5	0,5	0,5	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	-	-	
Al-Mg ₆	Min.	-	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,10	7,0	0,50	0,5	0,6	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	0,5	-	
Al-Mg ₆ Fe ²⁾	Min.	-	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,10	4	0,50	1,3	0,8	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	0,5	-	
Al-Mg ₉ Si	Min.	-	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,1	10,0	1,0	1,0	0,5	0,1	0,1	0,05	0,05	0,2	-	0,3	
Al-Mg ₁₀	Min.	-	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Max.	0,10	11,0	0,30	0,3	0,3	0,10	0,10	0,05	0,05	0,15	-	0,05	

²⁾ Basınçlı dökümün bileşimi

4. İçinde Başlıca Çinko Bulunan Alüminyum Alaşımları

Alaşım		Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr	Be	Al
Al-Zn ₅ Mg	Min.	-	0,20	-	-	-	-	4,5	-	-	0,10	0,15	-	Geri Kalan
	Max.	0,35	0,70	0,30	1,0	0,4	0,05	6,0	0,05	0,05	0,30	0,60	-	

- Alüminyum-Çinko alaşımları

Döküme elverişli ve hazırlanması kolay olan bu alaşımlar, günümüzde çok az kullanılır. Dökümde küçük çatlaklar meydana getirme tehlikesi vardır. En büyük avantajı ucuz olmasıdır. Bu alaşımlara bazen bir miktar bakır da karıştırılır. %10-13 Zn, %2-3 Cu, kalanı Al olan bir alaşım oluşturulabilir. Bu alaşımlar eskiden karter yapımında kullanılmışlardır. Korozyon dayanımları iyi değildir.

- Alüminyum-Bakır alaşımları

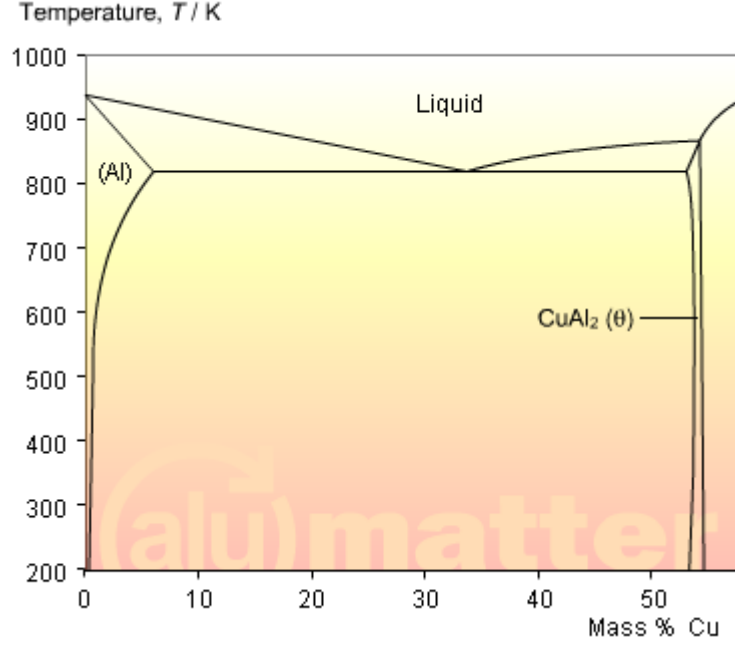
%92 Al ve %8 Cu ihtiva eder. Isıya dayanıklı olup karter imalatında kullanılır fakat oldukça kırılgandır. Parçalanma mukavemeti $12-13 \text{ kg/mm}^2$ olup, bakır oranı %6'dan aşağı düşürüldüğünde bu da çabuk azalır. Demir kokile püskürtme dökümü bu mukavemet 22 kg/mm^2 'ye çıkarılabilir. %14'e kadar bakır ilavesi dökümü ve bilhassa sertliği iyileştirir. Hafif metal pistonlar için %12-14 bakır kullanılır. Fazla bakır yüzdesi Al_2Cu 'nun büyük yapraklı kristallerini oluşturur, kırılgandır. Alüminyum-bakır alaşımlarının özgül ağırlığı $2,85 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Bakır, alüminyumla 548°C 'de %33 bakır içeren bir ötektiğin bulunduğu bir denge diyagramı yapar.

Ötektik sıcaklığında bakırın α -fazında çözünürlüğü %5,65'dir. α -fazının çözünürlük sınırı 250°C 'ye kadar bilinmektedir. Daha aşağı sıcaklıklarda çözünürlük sınırı tam olarak bilinmemektedir. Yüksek sıcaklıklarda bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü artmaktadır. Bu durum aşağıda gösterilmiştir.

Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	548	500	450	400	350	300	250
Bakır (%)	5,65	4,05	2,50	1,40	0,85	0,45	0,1-0,2

Hızlı su vermekle yarı dengeli bir α -fazı oluşur. Bu faz içerisinde CuAl_2 çökeler. Bakır alüminat çok sert bir maddedir ve zamanla oda sıcaklığında katı eriyikten ayrılır. Bu olay yaşlanma sertleşmesinin esasını oluşturarak sertlik ve mukavemeti artırır. Çökelenin tamamlanmış durumunda alüminyum-bakır alaşımlarının korozyon direnci azalır.

Alüminyum bakır alaşımlarını %1-7 ve %8,8-12 bakırlı alaşımlar olarak ikiye ayırmak da mümkündür. Bakır miktarı arttıkça gözenek teşekkülü azalır. %4,5 bakırlı alüminyum alaşımında küçük gözenek ve sıcak çatlakların oluşumu maksimum bir hal alır. Bu orandan sonra da azalmaya başlar. Si ilavesiyle sıcak çatlak ve küçük gözeneklerin önüne geçmek mümkün olur. Bu alaşımın %5 Cu miktarına kadar mukavemetinde yükselme görülür. %0,3 Mg ilavesiyle de Al-Cu alaşımının mukavemetini daha da yükseltmek mümkündür. Şekil 2.5'de Al-Cu denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.5 Al-Cu denge diyagramı

Bu alaşımların dökümleri kolaydır. Birinci alaşım daha çok kuma, ikinci alaşım ise hem kuma hem kokile dökülmektedir. Bu alaşımlar, piston ve motor kulakları yapımında kullanılır. Hazırlanmaları ve dökümleri kolaydır. Yeterli bir ısı iletkenliği ile iyi bir şok ve ısı dayanımları vardır. Gerekli zaman bunlara ısı işlemleri de uygulanabilir.

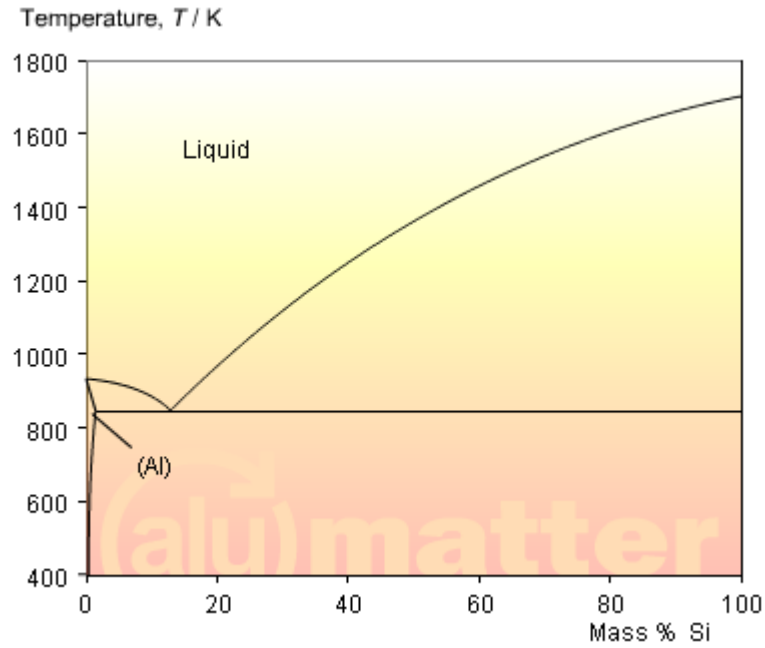
- **Alüminyum-Silisyum alaşımları**

Bakırdan sonra alüminyum alaşımlarında kullanılan en önemli alaşım elementi silisyumdur. Silisyumun alüminyuma alaşım elementi olarak en büyük etkisi, döküm karakteristiklerini geliştirmesidir. Al-Si alaşımları döküm alaşımlarıdır. Silisyum dökümün mukavemetli olmasını sağlar. Al-Si sistemi, basit bir ötektik içeren alüminyum ve silisyum fazlarına sahip bir denge diyagramı verir. Denge diyagramına bakıldığında alüminyum-silisyum ötektiklerinin yaklaşık %12 Si oranında olduğu görülmektedir. Ötektik bileşimde olduğu için döküm özelliği oldukça iyidir. Kaynak kabiliyeti ve korozyon direnci oldukça iyidir. 1xxx serisi döküm alaşımının talaş kaldırma kabiliyeti iyidir. 5xxx serisi döküm alaşımının çökelme sertleşmesi ile sertleşme kabiliyeti ve deniz suyunda korozyon direncini iyidir. 2xxx, 3xxx, 4xxx ve 7xxx serisi döküm alaşımları ise ısı işleme tabi tutulabilir alaşımlardır. Alüminyum döküm alaşımları genellikle şekil değiştirme ile sertleştirilmezler.

Silisyum, alüminyumla 578°C 'de %11,6 Si içeren bir ötektik gösteren denge diyagramı oluşturur (Şekil 2.6). Bu sıcaklıkta silisyumun alüminyum içindeki çözünürlüğü %1,65'dir. %5,25 Si içeren Al-Si alaşımı dekoratif ve mimari dizaynda üstünlük getirir. Bu alaşımların çekme mukavemeti ve emniyet gerilmesi Al-Cu alaşımlarından düşük olduğu halde, süneklik ve darbeye mukavemetleri yüksektir. Silisyumun alüminyum içindeki çözünürlüğü sıcaklıkla aşağıdaki gibi değişmektedir.

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	577	550	500	450	400	350	300	250
Silisyum (%)	1,65	1,30	0,80	0,48	0,29	0,17	0,06	0,0008

Bu alaşımlardan AlSi12 ötektik bir alaşımdır. Döküm kabiliyeti çok iyidir. İyi kaynak edilebilir ve kimyasal dayanıklılığı fazladır. Kokil dökümde bu ötektik alaşım aşırı soğumadan dolayı ince tanelidir. Buna karşılık kum dökümde büyük Si iğnecikleri ve iri taneli olarak katılır. Bu durumu yok etmek üzere Al-Si alaşımları modifiye edilir. Al-Si alaşımlarına Mg katıldığında sertleşebilen alaşımlar elde edilir.



Şekil 2.6 Al-Si denge diyagramı

Bu alaşımlar en önemli alüminyum alaşımlarındandır. Silisyum alüminyumdan hafif olduğu için, özgül ağırlıkları alüminyumdan düşük olur. %12 silisyumla alaşım bir ötektik doku verir. Bu alaşıma "Alpaks" veya "Silumin" adları verilir. Akıcılığı çok iyidir. Katılma aralığı, ötektik olduğu için sıfırdır. Çekmesi çok azdır (%1,1 dolayında).

Soğukta dayanımı iyi, sıcakta düşüktür, ince çatlaklar meydana getirme tehlikesi vardır. Korozyon dayanımı bakırlı alaşımlardan daha iyidir. Özellikleri sıvı metalin arılaştırılması ile iyileşir. Arılama işlemi doğru yapılırsa, kırığı ince taneli ve mat olur. Mikroskopla bakıldığı zaman homojen ve ince görülür. Serbest silisyum bulunmaz. Arılama sodyum, flüorürler ve alkali maddelerle yapılır. Kokile dökümlerde arılama işlemine pek gerek görülmez. Bazı durumlarda arılama, hızlı bir ısıtma ile de sağlanabilir.

Bu alaşıma giren çok az miktardaki demir, iğneli doku biçiminde kristallenmiş bir bileşik verir ve alaşımı önemli ölçüde zayıflatır. Az miktar da manganez katılması ile kristallenme daha az tehlikeli olan küresel şekle çevrilebilir. Yorulma sınırı, biraz bakırla manganez katılarak yükseltilebilir:

%12 Si %0,8 Cu %0,5 Mn
 %12 Si %0,05 Cu %0,3-0,5 Mn

Silisyumu yüksek alaşımlar (%18-22 Si) daha hafif olurlar. Silisyum alüminyumun genleşme katsayısını düşürür ve sertliğini artırır. Uçak ve otomobil endüstrisinde ve genleşme katsayılarının düşüklüğü yüzünden piston yapımında geniş ölçüde kullanılırlar.

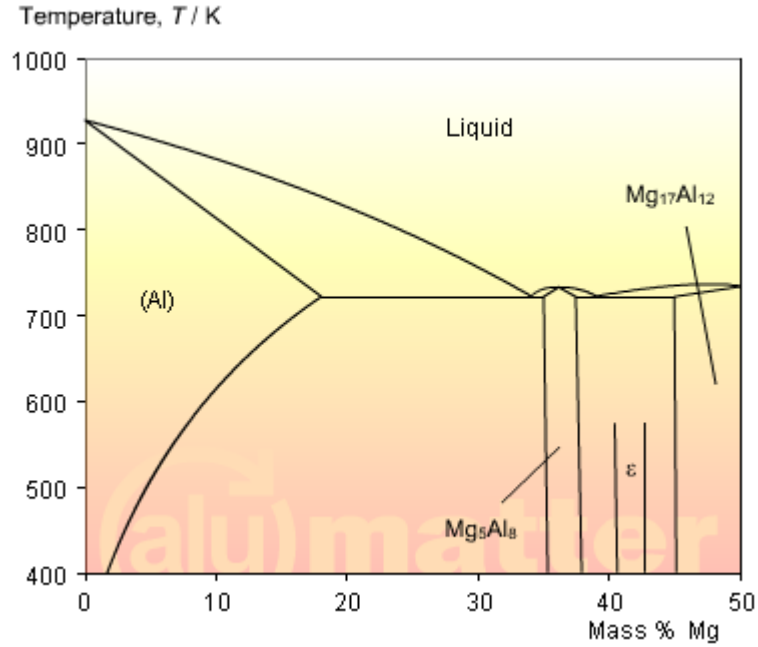
- **Alüminyum-Magnezyum alaşımları**

Magnezyum, alüminyumla 437°C'de %66,7 Mg ve 450°C'de %35 Mg içeren iki ötektik ihtiva eden bir denge diyagramı yapar. Bu diyagramın hem alüminyum hem magnezyum tarafı oldukça ilginçtir. Oda sıcaklığında magnezyumun alüminyum içindeki çözünürlüğü %1,4'dür. Alüminyum-magnezyum alaşımları, alüminyum-bakır alaşımında olduğu gibi, ısıtma işlemi uygulanacak alaşımlardan istenen karakteristik bir katı eriyiğe sahiptir. Alüminyum alaşımlarında %8'in üstünde magnezyum, alaşımın ısıtma işlem özelliklerini iyileştirir. Bu değerin altında magnezyum içeren alaşımlar ısıtma işleme uygun değildirler. Ancak bakır ve silisyum gibi bazı alaşım elementleri içeriyorsa ısıtma işlem uygulanabilir. Al-Mg alaşımları deniz suyuna karşı oldukça dayanıklıdır.

Al-Mg alaşımları, alüminyum alaşımlarının en yenileridir, %3-12 magnezyumludur. Amerika'da %8-12, Fransa'da %3-6 magnezyumlu alaşımlar yaygındır. Isıtma işlemi uygulanmadan kullanılırlar. Dikkate değer bir korozyon dayanımları vardır. Yorulma sınırı

yüksektir. Akıcılıkları alüminyum üçte biri kadardır. Bu alaşımların çok arı madenlerden hazırlanması gerekir.

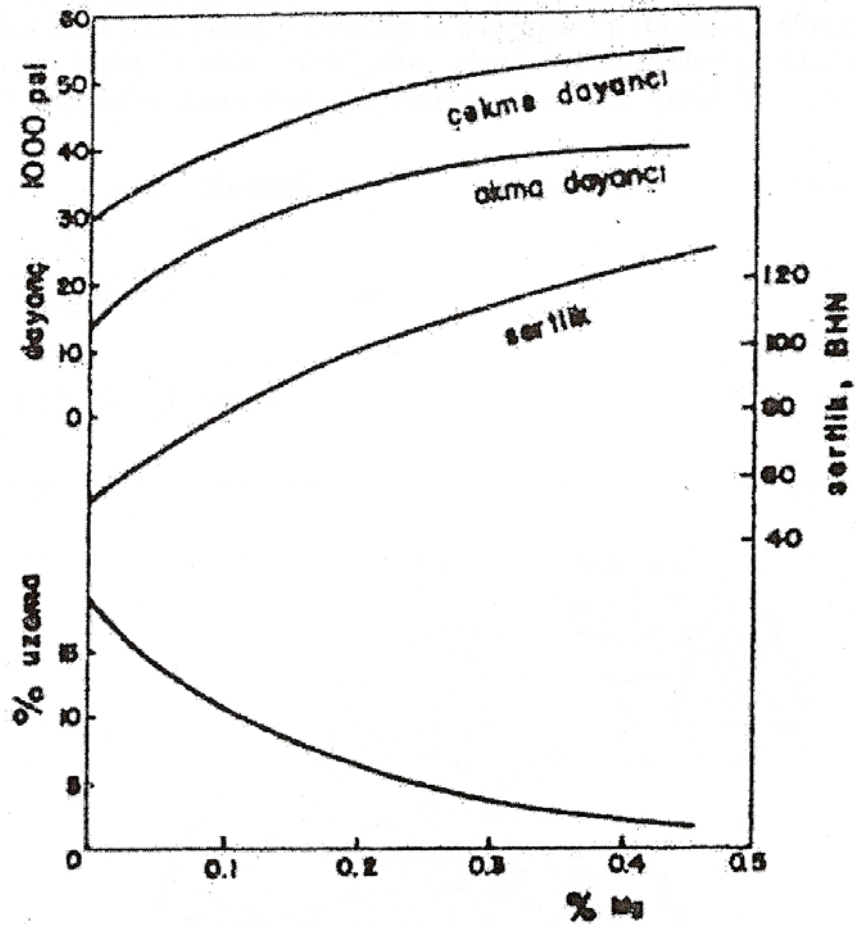
Döküm kabiliyeti Mg miktarı arttıkça azalır. Teknik olarak Al-Mg alaşımlarını iki ana grupta toplamak mümkündür. Al-Mg-Mn alaşımı %3-5 Mg içerir, diğeri de Al-Mg-Cu alaşımıdır ve %10-12 Mg içerir. Magnezyum miktarı arttıkça alaşımların kokil dökümü zorlaşır. Mesela %3-5 Mg'li alaşıma %1 Si ilavesiyle döküm kabiliyetinin fark edilir derecede düzeldiği görülür. %4'lük Mg'li alaşıma %2 Zn ilave edilirse daha iyi kokil döküm yapmak ve güzel bir beyaz renk tonu elde etmek mümkündür. Korozyon dayanıklılığı deniz suyu ve alkalilere karşı oldukça yüksektir. Şekil 2.7'de Al-Mg denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.7 Al-Mg denge diyagramı

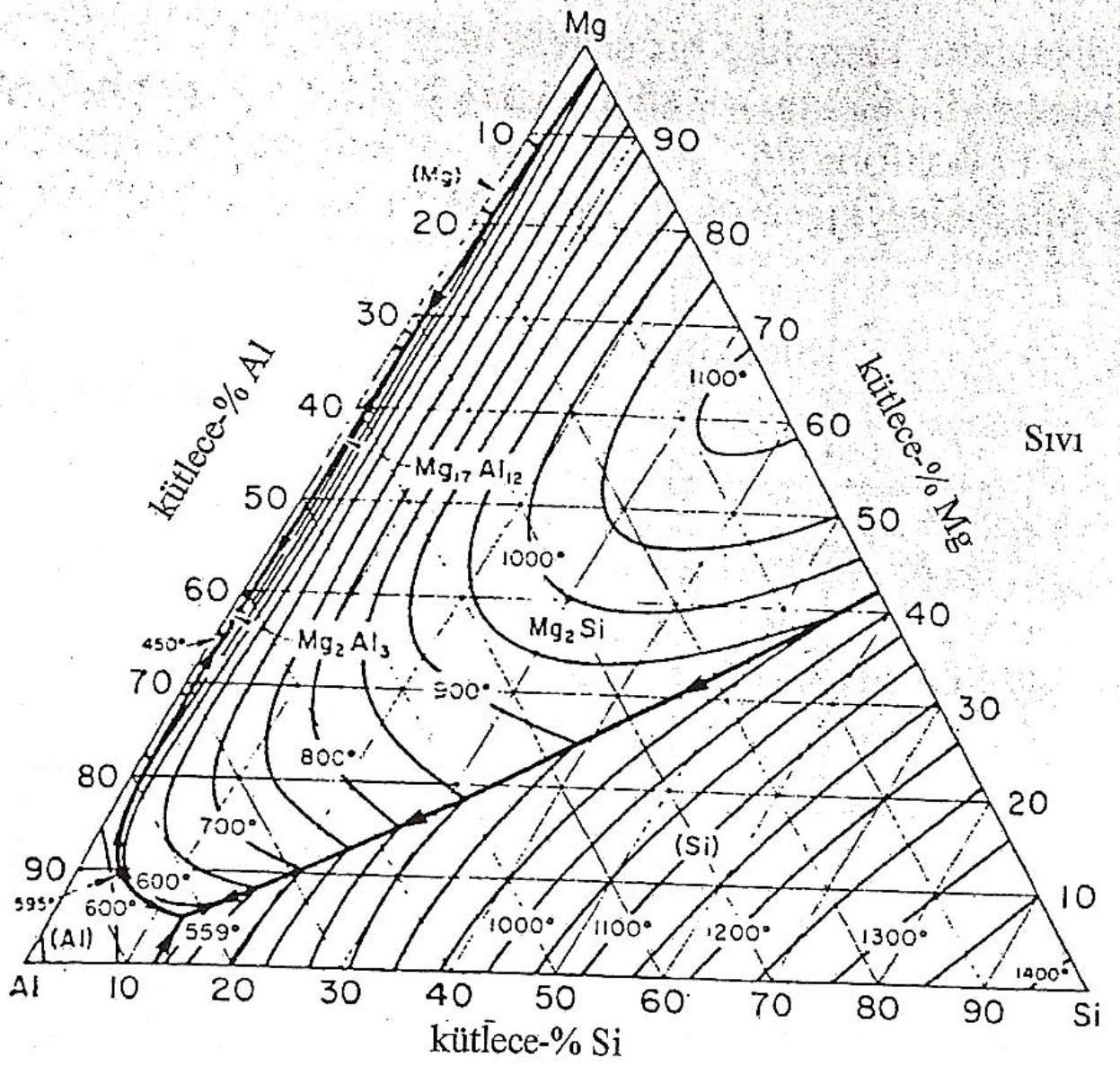
- **Alüminyum-Silisyum-Magnezyum alaşımları**

Bu tip alaşımlar yüksek döküm kabiliyeti, sızdırmazlık, iyi korozyon direnci gibi özellikler gösterirler. %0,2-0,6 Mg ve %5-9 Si içerirler. Magnezyum miktarındaki artışın alaşımın mekanik özelliklerine etkisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Mg miktarı arttıkça alaşımın direnci artmakta, buna karşılık % uzama miktarı azalmaktadır.

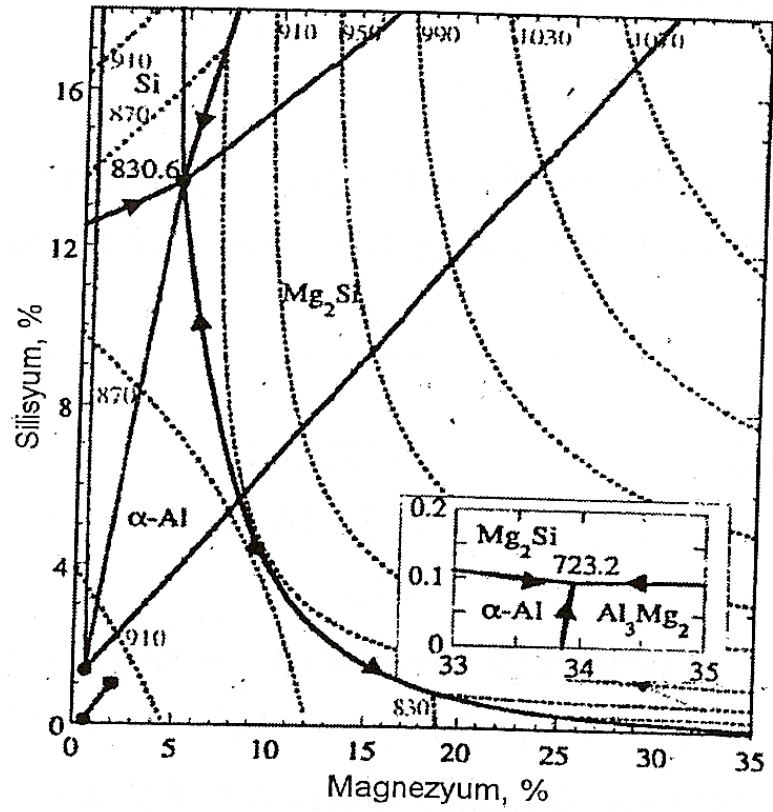


Şekil 2.8 Al-Si alaşımına Mg ilavesinin mekanik özelliklerine etkisi

Al-Si-Mg denge diyagramının esası, Al ve belli bileşimdeki Mg_2Si 'nin, üçlü diyagramı bir ikili sistem gibi iki kısma ayırması üzerine oturur. Her kısım aşağıda belirtilen şekilde bir üçlü ötektik gösterir. Al-Si-Mg sistemi, oluşan Mg_2Si bileşiğinin etkisiyle aynı ikili sistemler gibi davranır. Mg_2Si bileşiği uzun süre iyonik bir bileşim gibi düşünülmüş, yeni yapılan çalışmalardan sonra bir yarı iletken olduğu anlaşılmıştır. Mg_2Si bileşiğinin alüminyum içindeki erirliği, Mg_2Si 'nin ağırlık oranı, sıcaklık etkisi ve fazla magnezyum miktarıyla değişir. Buna karşılık silisyumun bu erirlik üzerinde önemli bir tesiri yoktur. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da Al-Si-Mg alaşımının denge diyagramı ve alüminyumca zengin köşesi gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Al-Si-Mg faz diyagramı



Şekil 2.10 Al-Si-Mg faz diyagramının alüminyumca zengin köşesi

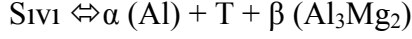
- Alüminyum-Çinko-Magnezyum alaşımı

Al-Zn-Mg alaşımlarının başlıca özellikleri oda sıcaklığında bir ay içinde doğal yaşlanmanın oluşması, yaşlanma sonucunda çekme ve akma mukavemetlerinin artması ve sünekliğinin azalmasıdır. Al-Zn-Mg faz diyagramı komplike bir sistemdir. Sistemde β (Al_3Mg_2), γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$), δ (MgZn_5), μ (MgZn_2), ϵ (MgZn) metaller arası ikili bileşiklerden başka formülü $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ olarak tahmin edilen ve $(\text{AlZn})_{49}\text{Mg}_{32}$ olarak belirtilen üçlü bileşimler mevcuttur.

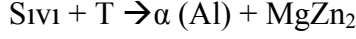
Ötektik	Sıcaklık °C	% Mg	% Si
$\text{Sıvı} \Leftrightarrow \alpha (\text{Al}) + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si}$	556	4,97	14
$\text{Sıvı} \Leftrightarrow \alpha (\text{Al}) + \text{Mg}_2\text{Si} + (\beta) \text{Al}_3\text{Mg}_2$	450	33,5	

Bu alaşımlarda likidüslerin bütünü çok sayıda ötektik noktaları ve üçlü peritektikler içerirler. Alüminyumcu düşük alaşımlarda üçlü olan ve değişmeyen iki nokta vardır. Bunlar

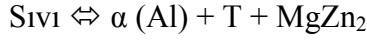
%30 Mg, %12 Zn oranında üçlü ötektik:



%11,3 Mg, %60,4 Zn oranında 475 °C'de üçlü peritektik:



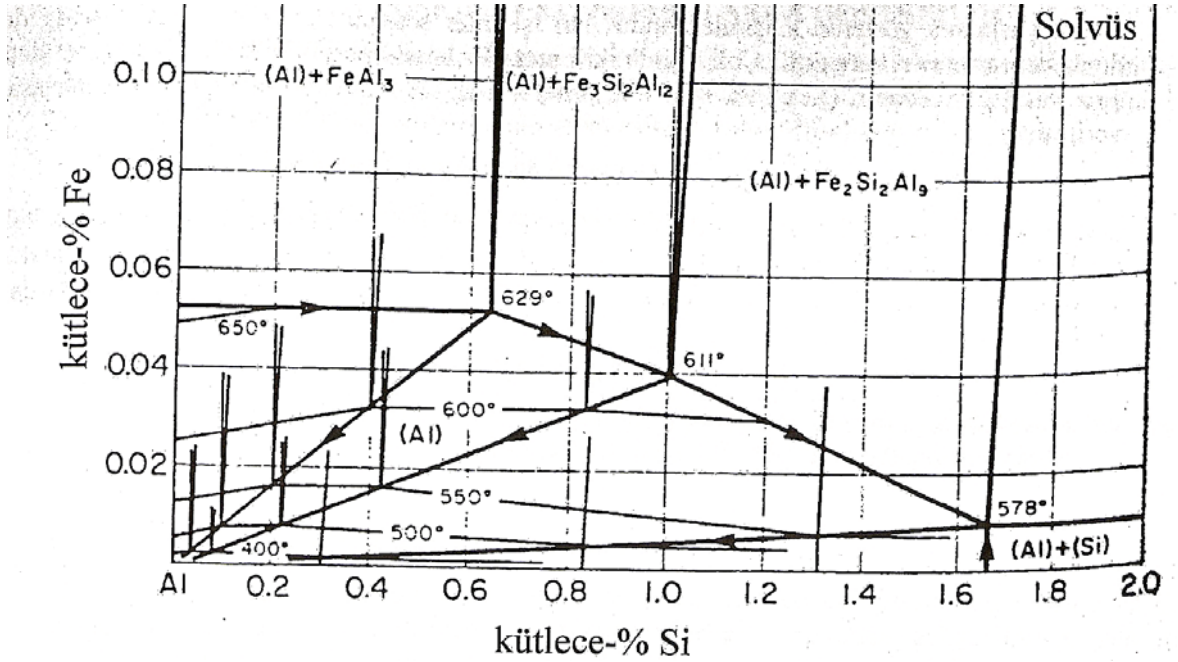
veya



(α -Al) katı eriyiğinin geniş alanı yüzde birkaç Zn ve Mg içeren bir alaşımda bile yaşlanma sıcaklığı civarında veya çok düşük ısıtıl işlem sıcaklığında ısıtıl işlem kabiliyeti sağlar.

- **Alüminyum-Demir-Silisyum alaşımı**

Al-Fe-Si denge diyagramında Al, Si, Al_3Fe fazlarından başka alüminyumca zengin üçlü metaller arası üç bileşiğe rastlanır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Al-Fe-Si denge diyagramının alüminyum tarafındaki solvüsü

Metaller arası üçlü bileşiklerin formülleri ve bileşimleri aşağıda verilmiştir.

Formülü	% Fe	% Si
α	32,12-32,45	8,41-10,32
β	26,65-27,18	13,82-14,93
δ	25,4	25,5

Ayrıca ikili Al-Si ötektğine benzer bir ötektik vardır.

Sıvı $\Leftrightarrow$ Al + Si (%0,75 Fe, %0,11 Si için)

Yapılan işleme göre faz alanı üç kısma ayrılır.

Çizelge 2.3 Al-Fe-Si alaşımasının üç fazı ve bileşimleri

Fazlar	% Fe	% Si
α_1	27,3	7,0
α_2	29,2	11,3
α_3	35,3	12,8

Alaşıma az miktarda demir ilavesi silisyumun alüminyum içindeki çözünürlüğünü belirgin bir şekilde azaltır.

- **Alüminyum-Bakır-Magnezyum alaşımı**

Doğal yaşlanma gösteren alaşımlardandır. Isıl işlemler sonucu sertliği artar. Al-Cu-Mg denge diyagramı nispeten karışıktır. Çok sayıda ikili metaller arası bileşiklere ve beş tane üçlü metaller arası bileşiğe rastlanır. İkili bileşimler CuAl_2 ve Al_3Mg_2 'dir. Üçlü bileşimler ise Al_6CuMg_4 , $\text{Al}_7\text{Cu}_3\text{Mg}_6$, Al_2CuMg , $\text{Al}_5\text{Cu}_5\text{Mg}_2$, AlCuMg 'dir. Ancak solidüs sıcaklıklarında CuAl_2 , Al_3Mg_2 , Al_2CuMg , Al_6CuMg_4 bileşiklerine denge halinde rastlamak mümkündür. Bu fazlardan itibaren alüminyum katı eriyiği ile birlikte üçlü ötektikler meydana gelir. α -Al katı eriyik bölgesi nispeten dardır ve sıcaklığa bağlı olarak hızla daralır.

Çizelge 2.4 Çeşitli Al alaşımları, mekanik özellikleri ve kullanım yeri örnekleri
(DIN 1725)

Al-Alaşımları	Malzeme durumu	Çekme muk.	Akma muk.	Kopma uzaması	Kullanım yerleri
		N/mm ²	N/mm ²	A (%)	
Al99,5	Y	70	25	50	E-Teknik, ekstrüzyon, derin çekme parçaları, paketleme teknolojisi
AlMn	Y	100	40	22	
AlMg3	Y	180	80	17	Cihazlar, gemi ve taşıt tekniği, inşaat ve gıda sanayii
AlMgMn	Y	180	80	17	
AlMgSi1	S ₁	320	260	10	İnşaat, otomotiv ve gıda endüstrisi, makine konstrüksiyonu
AlZnMg1	S ₁	360	280	10	Kara taşıtları ve diğer makine mühendisliği kons.
AlCuMg2	So	430	280	10	Uçak vb. makine müh. kons
AlZnMgCu1,5	S ₁	520	460	6	Uçak ve kara taşıtları, makine ve maden mühendisliği alanları
G-AlSi12	D	180	85	8	Karışık şekilli parçalarda ve yüksek dökülebilirlik beklentileri olan yerlerde
G-AlSi10Mg	S ₁	280	250	3	
D-AlCu4TiMg	S ₁	380	290	6	Basit fakat yüksek mukavemetli döküm parçaların üretiminde, uçak, taşıt, madencilik parçaları
G-AlMg5	D	190	110	6	Yüksek korozyon dayanımlı basit parçalar, gemi inşası, gıda sanayi ve inşaat sektörü
G-AlSi12 CuNiMg	S ₁	70 (R _{p0,2} /1000 h /200 cC)			Motor pistonları

Y: Yumuşak, S₁-So: Sıcak ve soğuk yaşlandırılmış, D: Dökülmüş

Çizelge 2.5 Birincil döküm alaşımları

EN 1676' a göre kimyasal spesifikasyonlar (ağırlık - %) * (Hydro standart)							
AlSi- alaşımları	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Diğer
							Herbiri Toplam
AlSi5Mg	5,0-6,0	0,15	0,01	0,05	0,4-0,8	0,2	0,03 0,1
AlSi7Mg0.3	6,5-7,5	0,15	0,03	0,1	0,30-0,45	0,10-0,18	0,03 0,1
AlSi7Mg0.6	6,5-7,5	0,15	0,03	0,1	0,50-0,70	0,10-0,18	0,03 0,1
AlSi10Mg(a)	9,0-11,0	0,4	0,03	0,45	0,25-0,45	0,15	0,05 0,15
AlSi9Mg	9,0-10,0	0,15	0,03	0,1	0,30-0,45	0,15	0,03 0,1
AlSi11(Mg)	10,0-11,8	0,15	0,03	0,1	0,45	0,15	0,03 0,1
AlSi12(a)	10,5-13,5	0,4	0,03	0,35	-	0,15	0,05 0,15
AlSi6Cu4	5,0-7,0	0,9	3,0-5,0	0,20-0,65	0,55	0,2	0,2 0,35
AlMg- alaşımları							
AlMg3(a)	0,45	0,4	0,03	0,45	2,7-3,5	0,15	0,05 0,15
AlMg5	0,35	0,45	0,05	0,45	4,6-6,5	0,15	0,05 0,15
AlCu- alaşımları							
AlCu4TiMg	0,15	0,13	4,2-5,0	0,1	0,2-0,35	0,15,0,25	0,03 0,1
AlCu4Ti	0,15	0,15	4,2-5,2	0,55	-	0,15-0,25	0,03 0,15
Rotor-Al							
Al 99,5/99,7	0,06	0,17-0,25	0,01	0	0,02	0,03	0,03 0,1

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri, malzemenin özelliklerini daha da iyileştirerek diğer metallere göre üstün olmasını sağlar. Alüminyum ve alüminyum alaşımları dünyada demir esaslı malzemelerden sonra en önemli metal grubunu oluşturur. Ayrıca hafif metaller arasında da gerek saf halde gerekse alaşım olarak en çok kullanılanıdır.

2.2.1.3 Alüminyum Alaşımlarının Döküm Özellikleri

Alüminyum alaşımlarının döküm özelliklerinin iki nokta üzerinde incelenmesi uygun olur.

- **Akıcılık**

Akıcılık, sıvı metalin kalıp boşluğunu tam olarak doldurmaya elverişliliği şeklinde tanımlanır.

Bu özellik çeşitli faktörlerden etkilenir.

- Malzemenin özelliği
- Malzemenin bileşimi
- Sıcaklık

- Dökülen parçanın biçimi
- Kalıbın özellikleri
- Kalıp ile malzemenin temas durumu
- Döküm koşulları

Döküm koşulları denince, sıvı metalin sıcaklığı, döküm yüksekliği, sıvı metalin yapacağı basınç gibi faktörler düşünülür.

Metalin akıcılık özelliği, spiral deneyi ile değerlendirilir. Alüminyum alaşımlarının bu özelliği, bir dereceye kadar zayıftır. Alaşımların bileşimleri ile değişir. Ötektik bileşimler en büyük akıcılıkları verir. Alaşımda bulunan pislikler, akıcılığı olumsuz yönde etkileyebilir.

Alaşımlarda meydana gelen alümin, sıvı metalin yüzeyinde, zar şeklinde bir kabuk oluşturur. Bu kabuk sıvının akıcılığını azaltır. Bu etki, sıvı yüzeyinin büyüklüğü ile artar. Alaşımların tekrar ergitilmelerinde, alümin artacağı için, akıcılık azalabilir. Bu durum, aynı zamanda alaşımların dokusunu kabalaştırır ve mekanik özelliklerini düşürür. Kalıp kumlarının özellikleri de alaşımların akıcılığını etkileyen bir diğer etkidir.

- **Çekme (Katılaşmada Hacim Küçülmesi)**

Hacim küçülmesi, diğer alaşımlardaki gibi gerçekleşir. Fakat bu özellik alüminyumda daha fazladır. Alaşımlarında azalmakla beraber, birçok alaşımlara göre yine yüksektir (%1,7). Bu yüzden birçok hatalar meydana getirebilir. Çöküntüler, çatlama ve çarpılmalar olabilir. Özgül ağırlığın azlığı, besleme zorluğunu da ortaya çıkarır. Bunun için dökümde, bu özellikler göz önüne alınmalıdır. Alüminyum alaşımlarında en az çekme, doymuş katı eriyik içindir.

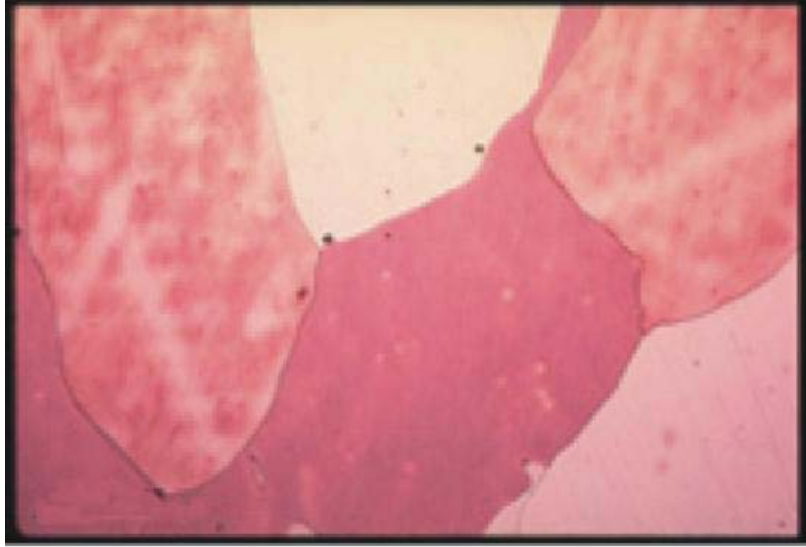
2.2.2 Bakır Alaşımları

Bakıra değişik özellikler kazandırabilmek için çeşitli metallerle alaşımlanabilir, ancak en çok bilinenleri Bakır-kalay ve Bakır-çinko alaşımlarıdır. Bakır-kalay alaşımlarına bronz denir. Bakır-çinko alaşımları ise pirinç olarak bilinir. Cu-Sn bronzları bakır içerisine %1-10 arasında kalay katılarak elde edilirler. Özellikle soğuk işlenmiş halde pirinçlerden daha yüksek dayanıma sahip ve korozyona daha dayanıklıdır. Bakırın döküm özelliğini iyileştirdiklerinden bir takım dişlilerin dökülerek üretilmesinde kullanılırlar. Endüstride bakırın diğer metallerle yaptığı alaşımlara da bronz denmektedir.

Endüstride kullanılan başlıca bakır döküm alaşımları aşağıda sıralanacaktır.

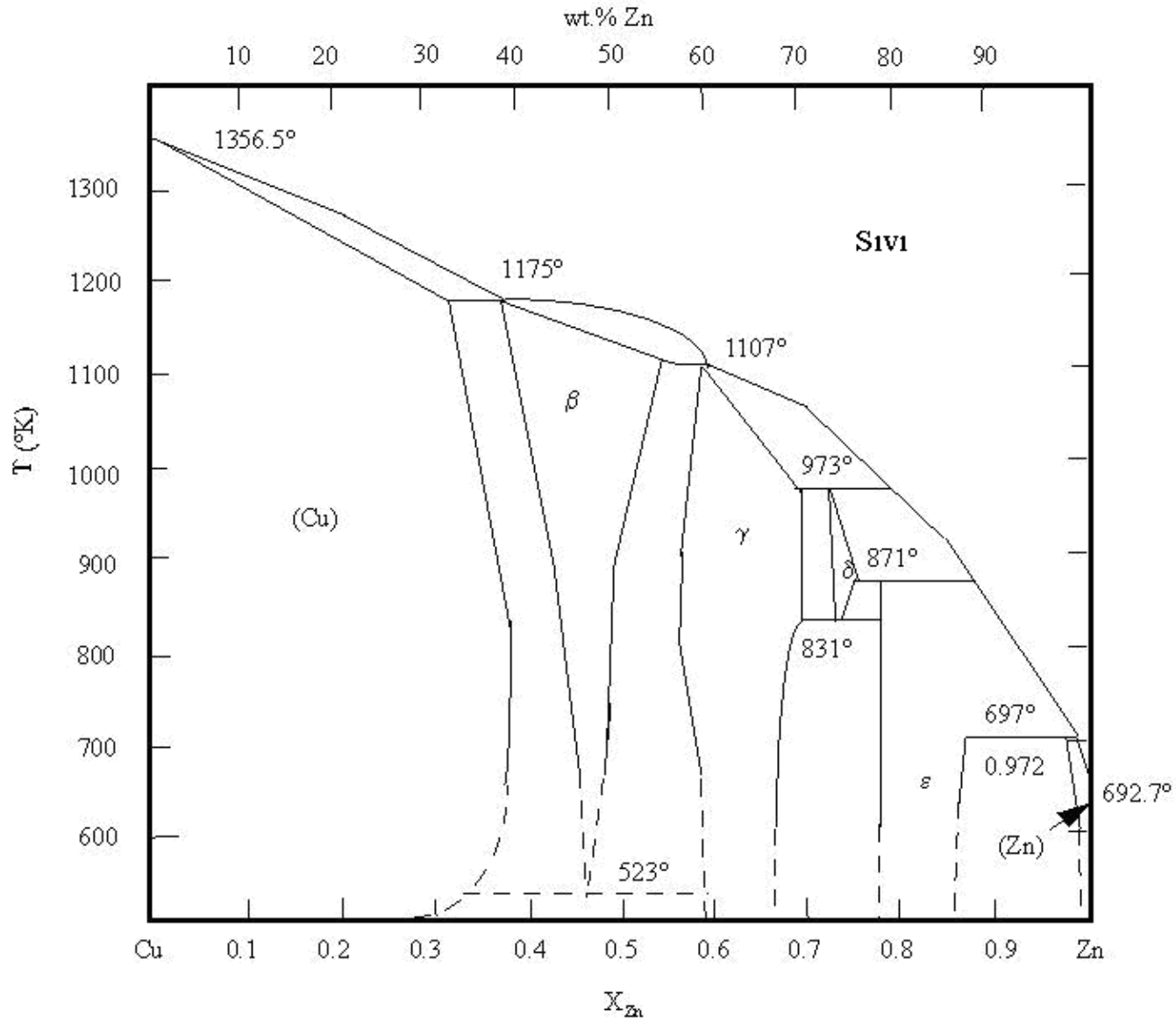
2.2.2.1 Bakır-Çinko Alaşımları (Pirinçler)

Bakır çinko ile her oranda alaşım yapabilmektedir. Bileşiminde en az %53 bakır bulunan Cu-Zn alaşımları olan pirinçlerde, artan çinko miktarı ile dayanım, sertlik ve kopma uzaması artar, döküm sıcaklığı ise düşer. Belli bir çinko yüzdesinden sonra malzeme gevrekleşmeye başlar. Pirinçlerin katılma aralığı dar olduğundan mikrosegregasyon ve gözeneklilik tehlikesi azdır. Al, Pb, Fe, Mn, Si gibi alaşım elementleri katılarak dayanım ve korozyon özellikleri geliştirilmiş değişik özel dökme pirinçler de mevcuttur. Çinko oranı arttıkça alaşım kırmızıdan sarıya doğru renk değiştirir.



Şekil 2.12 Pirinç döküm yapısı

%97-98 Cu, %1,9-3,0 Zn, ölçek boyut uzunluğu: 500 mikron



Şekil 2.13 Cu–Zn denge diyagramı

2.2.2.2 Bakır-Kalay Alaşımları (Bronzlar)

Bronzlar esas olarak kalay içeren bakır esaslı alaşımlardır. Bakırın çinko içermeyen diğer alaşımlarına genel olarak bronz denilmekte ve çeşitleri ana alaşım elementleriyle belirtilmektedir. Geleneksel bronzlar bakır-kalay alaşımlarıdır ve kalay bronzu ya da çoğu zaman fosforla deokside edildiklerinden, fosfor bronzu olarak adlandırılırlar.

Bağlıca döküm bronzları şunlardır:

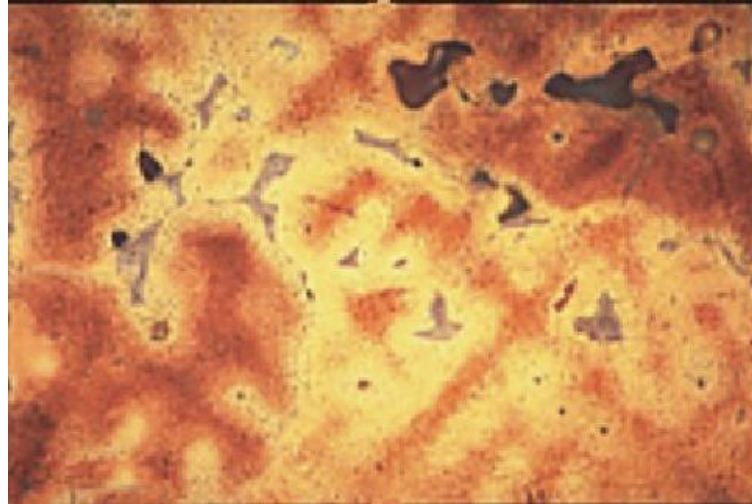
- o Bakır-kalay alaşımları (Cu-Sn): kalay bronzları
- o Bakır-kalay-kurşun alaşımları (Cu-Sn-Pb): kurşunlu ve yüksek kurşunlu kalay bronzları

- o Bakır-kalay-nikel alaşımları (Cu-Sn-Ni): nikelli kalay bronzları
- o Bakır-alüminyum alaşımları (Cu-Al): alüminyum bronzları

- **Kalay Bronzları:**

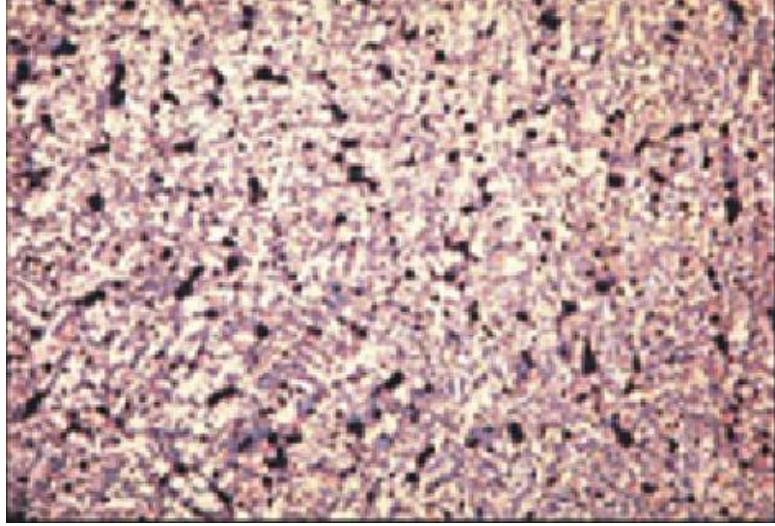
• Kalay miktarı belirli sınırlar içerisinde olan bakır-kalay alaşımları endüstriyel açıdan en önemli bronzları oluşturmaktadır. Bakır-kalay alaşımlarının faz diyagramları fazlasıyla karmaşıktır. Alfa fazı ihtiva eden alaşımlar (Cu %87-100, kalay %0-13) haddelemeye ve soğuk preslemeye uygun düşmektedir. Alfa + beta alaşımları %78-87 bakır, %13-22 kalay içerir.

Kalay bronzlarının en belirgin özellikleri atmosferik ve su korozyonuna karşı iyi dirençli ve aşınmaya karşı fazla dirençli olmasıdır. Aynı zamanda mükemmel yağlama kabiliyetleri vardır. Endüstride en çok kullanılan bakır alaşımlarından biridir. Ülkemizde kalay bronzu imal edilmekte ancak düşük kalay içeren cinsleri üretimdeki kolaylığı nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Bu tür bronzlar ise çok çabuk aşınarak veya sarma adı verilen sertliğinin düşük olmasından kaynaklanan yapışma yaparak verimlilikte azalmaya sebep olmaktadır. %6 kalay ihtiva eden bronzlar soğuk ve sıcak işlenmeye müsaittirler. Kalay miktarının artması malzeme mukavemetini artır, diğer taraftan uzama kabiliyeti bir hayli azalır. %10-12 kalay içeren bronzlar mekanik özellikler açısından en ideal olanlarıdır. Bu tip bronzlar döküm parçalarında tercih edilirler. Döküm bronzları kalay, kurşun, fosfor ve nikel ihtiva eder.



Şekil 2.14 Kalay bronzu döküm yapısı

Kimyasal analizi: %88-90 Cu, %10-12 Sn, %0,50 Pb, %0,50 Zn, %0,50 Ni, %0,30 P, %0,20 Sb, %0,15 Fe

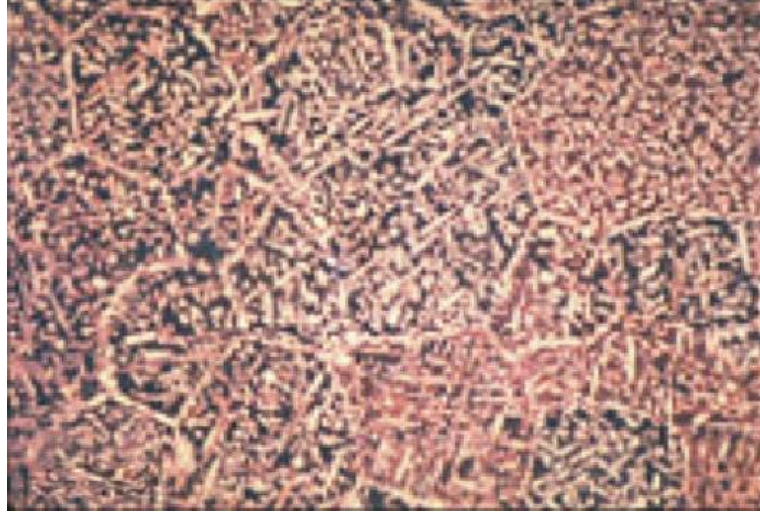


Şekil 2.15 Yüksek kurşunlu kalay bronzu sürekli döküm yapısı

Kimyasal analizi: %78-82 Cu, %8-11 Pb, %9-11 Sn, %0,8 Zn, %0,5 Ni, diğer elementler cüzi miktarda.

- **Alüminyum Bronzları:**

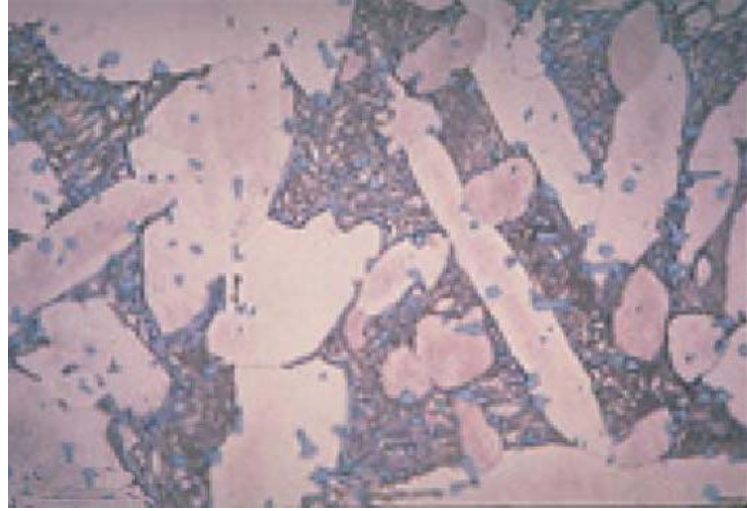
Alüminyum bronzları %14'e kadar alüminyum içeren bakır esaslı alaşım ailesidir. Diğer alaşımların sunamadığı mekanik ve kimyasal özellikleri alüminyum bronzları sunar. Bu özellikler alüminyum bronzlarına birçok üstünlükler sağlar. Bu malzemelerin aşınma dayanımı da yüksek olduğundan kalıpcılıkta ve makine imalatında çeliğe alternatif teşkil etmektedir. Çelikten daha iyi ısı iletkenliğinin olması sayesinde özellikle plastik kalıplarında çeliğe alternatif olarak kullanımı yaygındır. Örneğin plastik kova kalıplarında çekirdek tamamıyla bronzdan yapılabilir. Sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle, paslanmaz sacların derin sıvama kalıplarında kullanılan malzemedir.



Şekil 2.16 Alüminyum bronzu

Dökülmüş, 621°C'de tavlanmış ve suda soğutulmuş

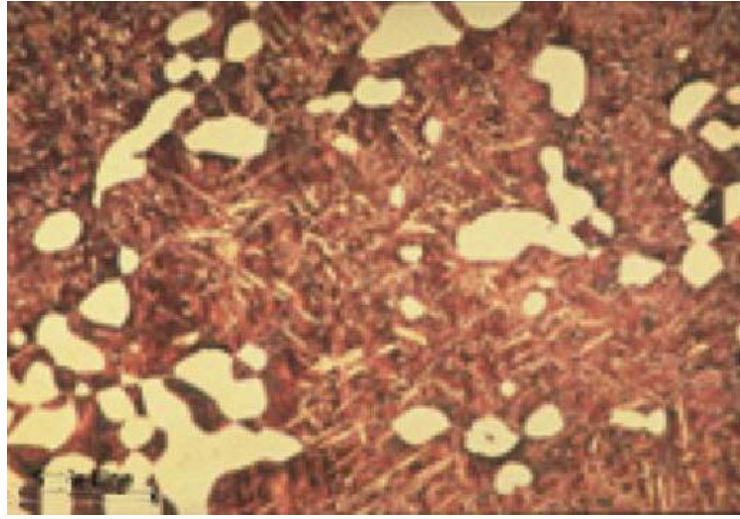
Analiz: %85 Cu, %10,2 Al, %4-4,7 Fe, %1 Mn



Şekil 2.17 Alüminyum bronzu

Dökülmüş, tavlanmış ve fırında soğutulmuş

Analiz: %85 Cu, %10,2 Al, %4 Fe



Şekil 2.18 Nikelli alüminyum bronzu

Ekstrüzyonlu, Analiz: %80,4 Cu, %8,9 Al, %5 Ni, %4,7 Fe, %1 Mn

- **Nikel Bronzları**

Nikel, demir dışı döküm alaşımlarına gün geçtikçe daha fazla ilave edilmektedir. Genelde çekme dayanımını ve önemli ölçüde akma sınırını artırır ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasını önler. Ayrıca malzemenin tane büyüklüğünü azaltır, korozyon dayanımını yükseltir ve bazı alaşımlarda, ısıtılma işlemi sayesinde alaşıma üstün fiziksel özellikler kazandırır.

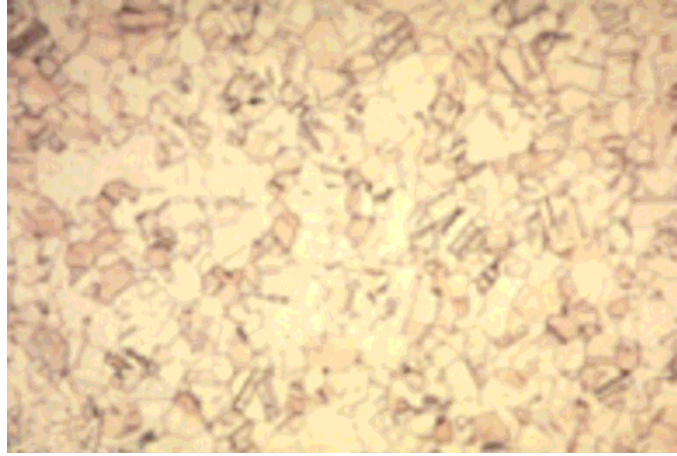
Düşük miktarlarda nikel kullanımı kurşun segregasyonunu azaltır. Doğrudan kullanılacak yataklar %2'den fazla nikel içermemelidir. Bu miktarın üzerindeki değerlerin malzemenin yataklık özelliklerini kötüleştirme eğilimi olduğuna inanılmaktadır.

Çizelge 2.6 %10'dan fazla nikel içeren bronzlar

Alaşım	Kompozisyon %				
	Ni	Sn	Zn	Pb	Cu
%20 Nikel bronzu	20	6	1	-	73
%40 Nikel-kurşun bronzu	40	6	1	8	45
	40	10	1	8	41
%50 Nikel bronzu	50	5	1	-	44
	50	10	1	-	39



Şekil 2.19 Bakır-nikel alaşımlarının mikro yapıları
Tavlanmış: %86,5 Cu, %9-11 Ni, %1-1,8 Fe, %1 Zn, %1 Mn

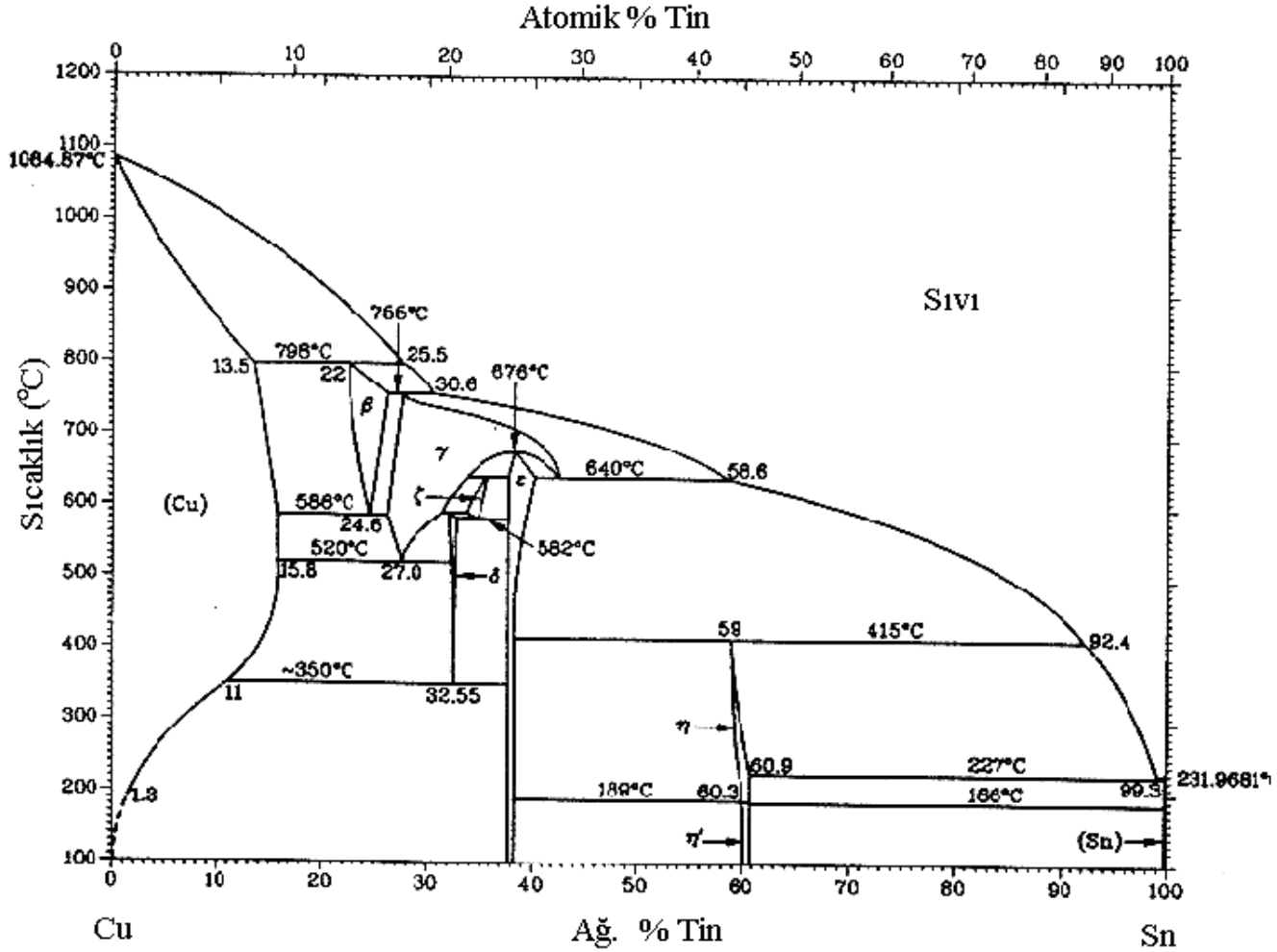


Şekil 2.20 Bakır-nikel alaşımlarının mikro yapıları
Dövme: %85,35-88,35 Cu, %8,5-10,5 Ni, %1,2-2,8 Sn, %0,5 Zn, %0,6 Fe ve %0,05 Pb

Denge diyagramından da görüldüğü gibi kalayın çözünürlük sınırı 20°C'de %1'den az iken, sıcaklığın artışı ile hızla artarak ötektoid yatayında %15,8 kalay olur.

Bakır-kalay alaşımları bakırca zengin α , β , δ , ϵ fazlarından oluşur. Dökülmüş alaşım α , katı eriyik matrisi içinde tipik öbekenme ve dendrit içeren tanecikler şeklinde oluşan $\alpha+\beta$ ötektoid yapısını gösterir. Bu faz sert ve mavi renktedir. Ötektoid yapıya mikroskopta büyütülerek bakıldığında, δ ana fazı içinde α hücreleri şeklinde görülür. Yüksek sıcaklıklarda bekletilen alaşımlarda kalay çözünürlüğünü azaltan $\alpha+\delta$ çökmesi oluşur.

Kalay miktarının artması ile kalayca zengin dendritler arası bölgeler oluşur. Düşük kalaylı alaşımlarda ise dendrit içerisinde çözünmüş kalayın yüksek sıcaklıklarda uzun bekletmelerle dendritler arası bölgelere difüzyonu sağlanır. Bunların iyi yatak malzemesi olmamasının nedeni yumuşak ana yapı içindeki δ çökeltileridir.



Şekil 2.21 Cu-Sn denge diyagramı

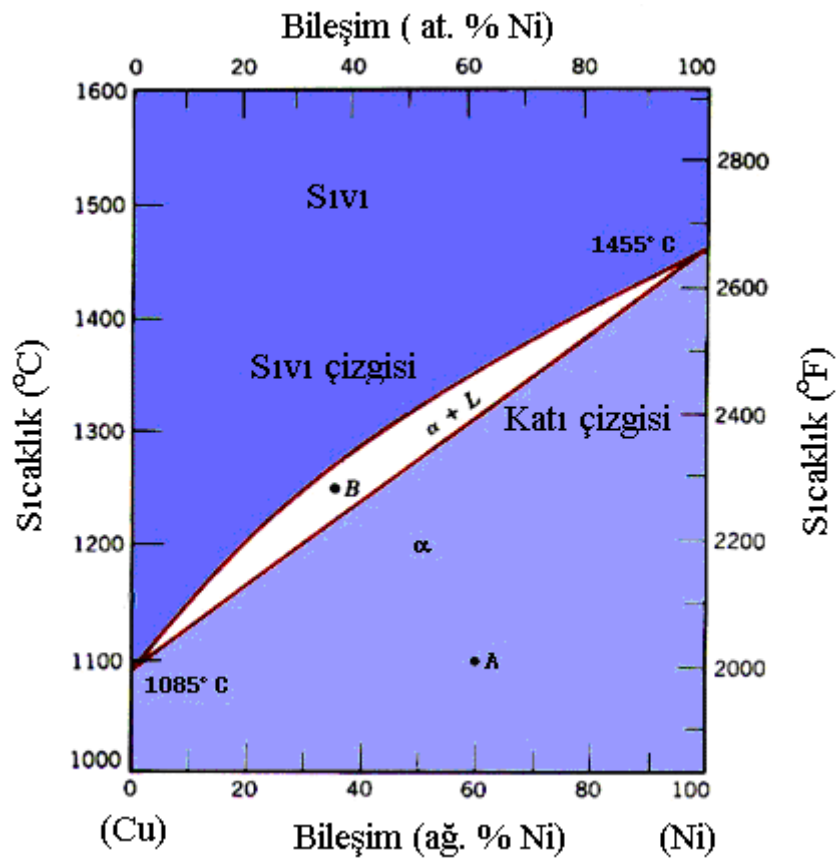
2.2.2.3 Bakır-Nikel Alaşımları

Katı ve sıvı halde her oranda birbirleri içinde sürekli çözünerek sürekli katı eriyik oluştururlar. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri çok iyidir. Bu sebeple buhar kazanları tesisatlarında, kimyasal tesislerde, kondenser boru malzemelerinde ve korozyon direncinin yüksek olması istenen yerlerde kullanılırlar. Nikel miktarı %30' a kadar çıkabilir. %0,5-1 demir ilavesi korozyon direncini azaltır. %25'ten fazla nikel içeren alaşımlar para yapımında kullanılır. Yüksek nikelli alaşımlara Mn ilavesiyle

elektrik direnç malzemesi teller üretilir. Çok az Si deoksidasyon amacıyla kullanılır. Bu alaşımlar özellikle 0°C'nin altında yüksek mukavemetlidir.

2.2.2.4 Bakır-Nikel-Çinko Alaşımları (Nikel Gümüşü)

Nikel gümüşü Cu-Ni-Zn alaşımıdır. Bakır ana elementtir. Nikel miktarı arttıkça ergime sıcaklığı yükselir, korozyon direnci artar, bakırın rengi yok olarak alaşım gümüş rengi alır, mukavemetine olumlu etki yapar. Ancak elektrik iletkenliği düşer. Çinko mukavemeti artırır. Maliyeti azaltır. Çinko %37'i geçince süneklik azalır.



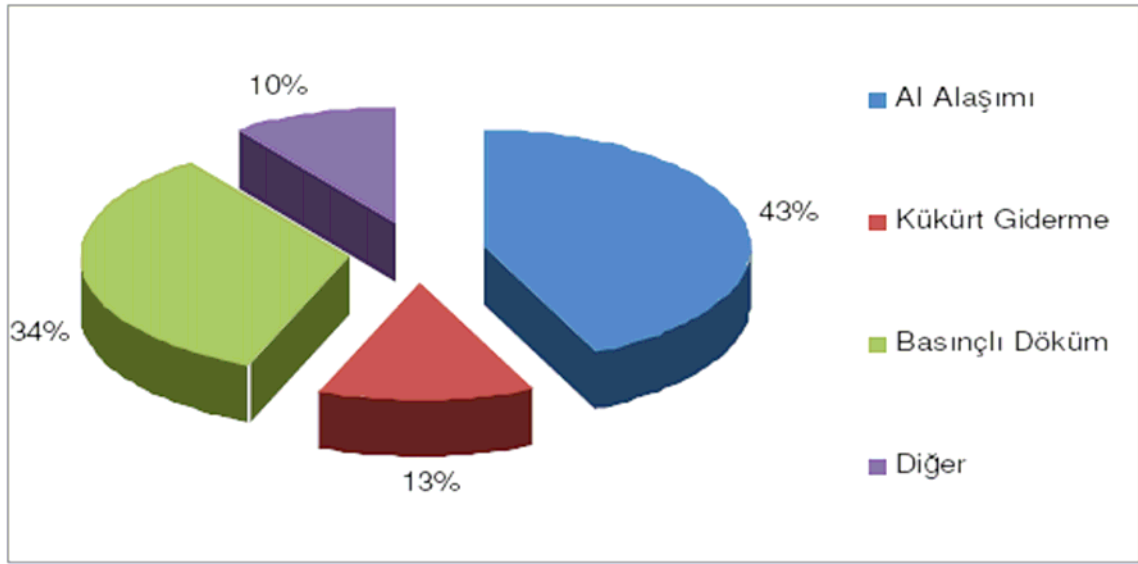
Şekil 2.22 Cu-Ni denge diyagramı

2.2.3 Magnezyum Döküm Alaşımları

Tüm konstrüksiyon metalleri içinde en hafif olan metal magnezyumdur. Bu malzeme bir plastik kadar hafif fakat bir metal kadar da dayanıklıdır. Çelik ve çinkodan %75, alüminyumdan ise %33 daha hafif olması, birçok sektörde yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. Magnezyum doğada en çok bulunan sekizinci elementtir, ayrıca

alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan yapı metalidir. Tuzlu su tortuları, tuz gölleri ve okyanuslar baz alındığında ise magnezyum büyük bir farkla en çok bulunan metal haline gelir (Zeytin, 1999).

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu durum kolay olmamış, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Düşen maliyetler neticesinde magnezyum da endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır. Şekil 2.23 2001 yılında Avrupa’da magnezyum metalinin kullanım alanlarını göstermektedir (Plano, 2002). Çizelge 2.7’de magnezyumun bazı fiziksel özelliklerinin ve maliyetinin diğer bazı mühendislik metalleriyle kıyaslaması verilmiştir (Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001).



Şekil 2.23 2001 yılında Avrupa’da magnezyum kullanım alanları
(330.000 ton) (Plano, 2002)

2001 yılında en büyük kullanım alanı 143.190 ton/yıl ile Al-alışımlandırma, 112.200 ton/yıl ile basınçlı döküm, 42.900 ton/yıl ile kükürt giderme işlemi, 33.000 ton/yıl ile de küresel dökme demir ve dövme ürünleri yapımıdır (Plano, 2002).

Magnezyumun $1,74 \text{ g/cm}^3$ ’lük yoğunluğu ve 650°C ’lik ergime sıcaklığı, çelik ve alüminyum gibi diğer konstrüksiyon metallerine göre dökümde ve talaşlı imalatla önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin magnezyum metali alüminyumdan iki kat daha hızlı dökülebilmekte ve işlenebilmektedir. Magnezyumun düşük yoğunluğundan kaynaklanan düşük eylemsizliği,

hızlı hareket eden parçalar için bir avantajdır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir (ASM Speciality Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum, yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Ayrıca magnezyum, mühendislik plastiklerine göre çok daha rijit ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir (Martchek 2000, Westengen 2006).

Mg ve alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra, iyi süneklik, dayanım ve iyi korozyon direncine sahip demir dışı metallerdir. Ancak, magnezyumun kristal yapısının hegzagonal sıkı paket (HSP) olmasından kaynaklanan şekillenebilirlik ve ergitme sırasında yanma gibi döküm problemleri nedeni ile üzerinde alüminyum kadar çalışmalar yapılamamıştır (Westengen and Aune 2006).

Çizelge 2.7 Bazı mühendislik metallerinin fiziksel özellikleri ve maliyetleri
(Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001)

Metal	Yoğunluk 20°C'de g/cm³	Erime Noktası °C	Kristal Yapısı	Maliyet \$/kg (1994)
Magnezyum	1,74	651	SDH	3,37
Alüminyum	2,70	660	YMK	1,65
Titanyum	4,54	1675	SDH↔HMK*	7,70 – 10,00
Nikel	8,90	1453	YMK	3,00
Demir	7,87	1535	HMK↔YMK**	0,50 – 0,57
Bakır	8,96	1083	YMK	2,50

* Dönüşüm 883°C'de ** Dönüşüm 910°C'de

Alaşımlama elementi olarak alüminyum, çinko, kurşun ve diğer demir dışı metaller de kullanılır. Nikel ve bakır alaşımlarının üretiminde oksijen tutucu ve desülfirazör olarak, demir-çelik sanayiinde desülfirazör olarak ve ayrıca berilyum, titanyum, zirkonyum, hafniyum ve uranyum üretiminde indirgeyici eleman olarak kullanılır (ASM Handbook Volume 2, 1996).

Gri dökme demir dökümünde dökümden hemen önce potaya magnezyum ve magnezyum içeren alaşımlar katılarak magnezyumun grafit parçacıklarını küreselleştirerek dökme demirin tokluğunu ve sünekliğini artırması sağlanır.

Alüminyum ve çinko katı magnezyum içinde oldukça iyi çözünürler ama çözünürlükleri düşük sıcaklıklarda azalır. Alüminyumun ağırlıkça çözünürlüğü 437°C’de %12,7 ve 93°C’de %3’tür. Çinkonun ağırlıkça çözünürlüğü ise 340°C’de %6,2 ve 204°C’de %2,8’dir. Mangan, zirkonyum ve seryum ise 482°C’de ağırlıkça %1’den daha az çözünürler. Ötektik noktada ise %4,5 toryum magnezyum içinde çözünebilir (ASM Handbook Volume 2, 1996).

Alüminyum ve çinko içeren magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını artırmada mangan oldukça etkilidir. Mangan içeren bu alaşımlar, demirin alaşımdaki içeriği ve aktivitesi kontrol altında tutulduğundan, oldukça kullanışlı ve korozyona dirençlidirler. Ayrıca alüminyum ve çinko içermeyen magnezyum-itriyum alaşımları da korozyona karşı oldukça iyi direnç gösterirler (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Silisyum, ergimiş alaşımların akıcılığını artırır. Demirle birlikte bulunduğu zaman ise korozyon direncini azaltır. Çok az alaşımda kullanılır.

Toryum ilavesi, döküm kabiliyetini iyileştirir. Alaşımları, kaynak edilebilir özelliktedir. Toryumun radyoaktifliğinden dolayı kullanımı yavaş yavaş terk edilmektedir.

2.2.3.1 Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri

Magnezyum alaşımları için çok değişik döküm yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, kum kalıba döküm, hassas döküm, sürekli kalıba döküm, düşük basınçlı döküm, vakumlu döküm, yarı-katı metal döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleridir. Son yıllarda basınçlı döküm alaşımlarının kullanımı oldukça artmıştır. Özel bir parça için döküm yöntemi seçiminde, tasarım şekli, arzu edilen mekanik ve yüzeysel özellikler, üretilecek toplam parça sayısı ve alaşımların dökülebilirliği belirleyicidir. Dökümde kullanılabilecek çok fazla alaşım çeşidi bulunmasına rağmen, her alaşım her döküm yönteminde kullanıma uygun değildir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Döküm Yöntemi	Özellikler
Kum Kalıp	Karmaşık şekiller, düşük hacme uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkün
Kabuk Kalıp	Karmaşık şekiller, yüksek hacme uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkün
Düşük-Basınçlı Döküm	Karmaşık şekiller, yüksek kalite, orta boy parça dökümü, düşük maliyet
Yüksek-Basınçlı Döküm	Nihai boyutlar, gerektiği kadar yüksek hacim, ortalama büyüklükte parçalar, orta kalite, düşük maliyet
Hassas Döküm	En hassas nihai boyut, yüksek kalite, çok karmaşık şekilli parça üretimi, yüksek maliyet

Magnezyum alaşımlarının kum kalıba döküm yöntemiyle üretimi çok sayıda alaşıma uygulanabilmekte ve farklı boyutlarda parçalar elde edilebilmektedir. Ancak yöntem, kalıp kumu ile ergiyik magnezyum arasındaki reaksiyonlardan dolayı inhibitör kullanımını gerekli kılar. Yüksek adetlerde parça üretimi için uygunken, yüzey bitirme ve tolerans değerleri açısından çok iyi özellikler sağlanamaz.

Kum kalıba döküm yöntemiyle sağlanamayan bazı özellikler, hassas dökümle sağlanabilir. Ancak hassas döküm yöntemi için parça başına maliyet ve ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Magnezyum alaşımlarının sürekli kalıba döküm yöntemiyle üretiminde ise, kalıbın tekrar kullanılabilmesi maliyetler açısından bir avantaj gibi gözükse de, kalıpların yüksek ilk yatırım maliyetlerinin amortismanı, bir kalıptan alınabilecek parça sayısı ile karşılanamayabilir. Yüzey bitirme özellikleri ve boyutsal toleranslar açısından iyi sonuçlar alınmasının yanında, çok sayıda alaşım türüne uygulanabilir bir yöntemdir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunar. Magnezyum basınçlı döküm yöntemiyle üretildiğinde, alüminyum ve çinkoya kıyasla, aynı ağırlıktaki hammadde ile daha fazla ürün elde edilir. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli üretimler için ideal bir yöntemdir. Alüminyum ve çinkoya kıyasla magnezyum alaşımlarının hacimsel özgül ısısı daha düşüktür. Bu da dökümün daha hızlı soğuması, daha yüksek çalışma hızı ve daha az kalıp aşınması demektir.

Magnezyum alaşımlarına uygulanan farklı döküm yöntemleri, elde edilen özellikler, üretilen parça boyutları, yüksek üretim hacmine uygunluk gibi yönlerden karşılaştırıldığında, yöntemlerin üstün ve zayıf yönleri çizelge 2.9'daki gibidir.

Çizelge 2.9 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi

Karşılaştırılan Özellikler	Basınçlı Döküm	Kum Kalıba Döküm	Hassas Döküm	Sürekli Kalıba Döküm
Uygun alaşım çeşitliliği	+	+	+	+
Değişken boyutlu parça üretilebilirliği	+	+	–	–
Yüzey bitirme özellikleri	+	–	+	+
Yüksek üretim hacmine uygunluk	+	+	–	–
Parça başına birim maliyetler	+	+	–	–
Hassas toleransların elde edilmesi	+	–	+	+
İyi mekanik özelliklerin elde edilmesi	+	+	+	+
Karmaşık şekilli parça üretimi	+	–	+	–

Çizelge 2.10 Magnezyum alaşımları standartları ve bileşimleri
(ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94)

[illegible]

2.2.4 Dökme Demirler

Yüksek fırından elde edilen sıvı ham demirin kalıplara dökülerek katılaşmasından elde edilen yarı mamule pik, pikin ergitme fırınlarında tekrar ergitilerek ve gerekirse bileşimini de değiştirmek suretiyle, belli bir modele göre önceden hazırlanmış bir kalıp içerisine dökülmesi ve kalıp boşluğunun şeklini alarak katılaşmasıyla meydana gelen malzemeye dökme demir denilir. Yüksek fırından alınan ham demir, dayanıksız ve kırılgan olduğundan makine imalatında ve konstrüksiyon işlerinde kullanılmaya elverişli değildir. Bu nedenle genel olarak ham demir yüksek fırından alındıktan sonra büyük potalara dökülür, daha sonra kupol ocaklarına gönderilir ve karbonu yakılarak %1,7 ile %3'e kadar düşürmek suretiyle, düşük sıcaklıklarda ergiyen ve döküm işlerinde kullanılmak üzere akıcılığı iyi olan dökme demirler elde edilir veya çelik fırınlarında çelik elde edilir.

Döküm endüstrisinin en yüksek tonaja sahip ürünü dökme demirlerdir. Dökme demirlerin iyi bir mühendislik malzemesi oluşu ve üretim maliyetinin düşük olması bu malzemenin yüksek miktarda kullanılmasının en genel nedenidir. Dökme demirler çok geniş bir aralıkta değişen mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci, korozyon direnci ve diğer özelliklere sahip olabilirler. Dökme demirler grubunun bu çok değişik mühendislik özellikleri sağlaması, kullanış sahasının genişliğinin devamlılığına neden olmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü döküm endüstrisinin en büyük kapasitesi dökme demirlere aittir. Dökme demirlerin gerek döküm ve gerekse mamul parça özellikleri bakımından sağladıkları bazı üstünlükler şunlardır:

- a) Alçak ergime sıcaklığı (1150-1300°C)
- b) İyi akışkanlık (ötektik bileşimine yakınlık)
- c) Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin üstünlüğü
- d) Ergitme ve döküm işlemlerinin ucuzluğu
- e) Kimyasal bileşim sınırlarının genişçe tutulabilmesi ve yakın özellikler elde edilebilmesi
- f) Çeşitli kısımlardan ibaret bir iş parçasının tek bir işlemle elde edilebilmesi
- g) Talaşlı imalat tekniğinde iyi işlenebilmesi
- h) Titreşim söndürme özelliğinin çok iyi olması
- ı) Basma mukavemetinin yüksek olması
- i) Aşınma ve korozyona dayanıklılığı

İçerisinde karbonun yanı sıra silisyum, manganez, kükürt ve fosfor vardır. Dökme demirlerde C'nin yanı sıra Si de bulunduğu ve soğuma hızının yavaş olması nedeniyle katılaşma

sırasında C elementel yani grafit halinde katılır. İçerisindeki C'nin sementit halinde olması nedeniyle çok serttir, dövülerek biçimlendirilemez.

Dökme demirler birçok farklı özellik içeren bir demir alaşım ailesidir ve isimlerinden de anlaşılacağı gibi, katı halde çalışılmayıp istenilen şekle dökülerek getirilirler. %2'den ve genellikle %1'den de daha az C içeren çeliklerin aksine %2-%4 arası C ve %1-%3 arası Si içerirler. Belirli özellikleri kontrol etmek ve çeşitlendirmek için başka metalik ve ametalik alaşım elemanları da ilave edilir. Kimyasal yapının yanı sıra özelliklerine etki eden diğer önemli faktörler katılma işlemi, katılma derecesi ve ısıtma işlemlerdir. Dökme demirler mükemmel dökme alaşımları olurlar, geniş bir güç ve sertlik yelpazeleri vardır. Bununla birlikte makinelerde kullanılmaları da kolaydır. Aşınmaya, çizilmeye ve oksitlenmeye karşı alaşımla kullanıldıkları takdirde büyük direnç gösterirler.

Dökme demirlerin kimyasal bileşimlerinin kaba sınırları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.11 Dökme demirlerin kimyasal bileşimleri

Element	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Yüksek dayanımlı Gri dökme demir	Küresel Grafitli Dökme Demir
Karbon	%2,5-4,0	%1,8-3,6	%2,8-3,3	%3,0-4,0
Silisyum	%1,0-3,0	%0,5-1,9	%1,4-2,0	%1,8-2,8
Manganez	%0,4-1,0	%0,25-0,80	%0,5-0,8	%0,15-0,90
Kükürt	%0,05-0,25	%0,06-0,20	%0,12(max)	%0,03(max)
Fosfor	%0,05-1,0	%0,06-0,18	%0,15(max)	%0,10(max)

Tablodan görüldüğü gibi aynı kaba bileşim sınırları içinde birbirine yakın bileşimde fakat değişik özelliklere sahip dökme demirler bulunmaktadır.

Dökme demirlerin özellikleri ve kullanılışları üzerinde kimyasal bileşimin etkisi büyük ölçüde iki alaşım elementine (C ve Si) ve bunların grafit oluşumuna olan etkilerine bağlıdır. Her iki element de artan yüzdelerde grafit oluşumunu artırıcı rol oynarlar. Karbon dökme demirde demir karbür (sementit) halinde bulunabilir ve bu durumda birleşik karbon olarak tanımlanır, veya serbest şekilde grafit halinde de oluşabilir, dolayısıyla grafitleşme olayı ya serbest karbonun çökmesi ya da kimyasal bileşik halindeki karbonun serbest hale dönüşmesi

olayıdır.

- **Küresel Grafitli Dökme Demir (Sfero Döküm)**

İyi olarak nitelendirdiğimiz özelliklerden dolayı döküm endüstrisinin vazgeçilmez malzemesi olan dökme demirlerin mukavemet, esneklik ve plastiklik gibi mühendislik özelliklerini de istenen seviyeye ulaştırmak amacı ile bu alanda yapılan çalışma ve kaydedilen gelişmeleri şöylece özetleyebiliriz:

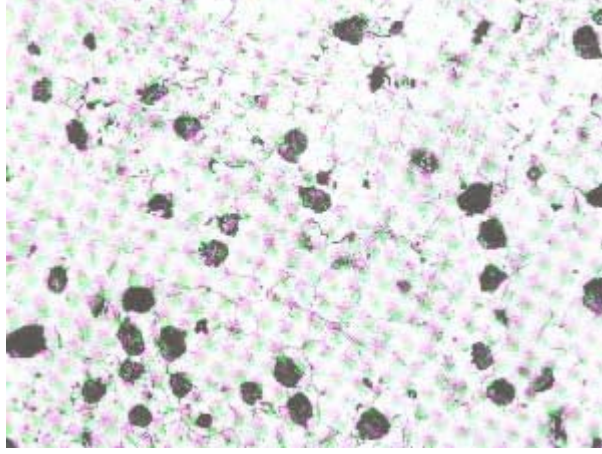
- Gri dökme demirler, karbonun lamel tipi grafitler halinde çökmesi ve bu grafitlerin malzemenin esas yapısında bir devamsızlık meydana getirmelerinden dolayı, daha evvel belirtilen kötü özelliklere sahip olmaktadır. Gri dökme demirlerin imalatı esnasında aşınma, aşırı ısıtma, bileşimi kontrol ve alaşımlandırma gibi tatbikatlar neticesinde özelliklerin istenen ölçüde olmamakla beraber bir miktar düzeltilebilmesi mümkün olmaktadır.
- Dökülmüş vaziyette yapısında grafit ihtiva etmeyen ve beyaz dökme demir diye isimlendirilen dökme demir tipinin temperleme ısı işlemi neticesinde, yapıdaki karbürleri parçalamak ve katı fazlar içerisinde küreye benzeyen biçimde grafitler meydana getirmek mümkün olmaktadır. Bu yolla elde edilen malzemeye temper dökme demir adı verilir. Grafitlerin mahzurlu lameller halinde olmayıp daha küçük yüzeylere sahip yumru şekillerinde olması, malzemenin mukavemetinde ve kopma uzamasında hayli yükselmelere sebep olmaktadır.

Bu görüşten hareketle, dökme demir yapısındaki grafitlerin küçük boyutlu ve küresel biçimli olarak muntazam bir şekilde taşınımının sağlanması ve böylece malzeme özelliklerinin çok daha iyi seviyelere yükseltilmesi amacıyla küresel grafitli dökme demir malzemesi ortaya çıkarılmıştır. Genel olarak, gri dökme demir bileşimindeki malzemenin içerisinde çok küçük miktarlardaki Mg ve Ce gibi alaşım elementleri ilavesiyle küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmeleri mümkün olmaktadır.

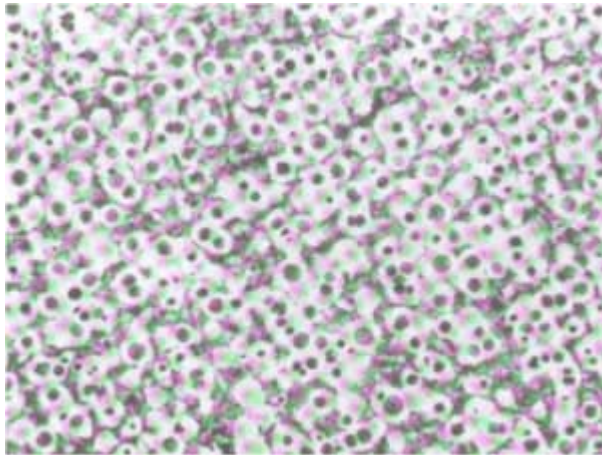
Küresel grafitli dökme demirler, adlarından da anlaşıldığı gibi dökülmüş vaziyette yapılarında küresel biçimli grafit ihtiva ederler. Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerin iyi özellikleri ile çeliğin mühendislik alanlarındaki üstünlüklerinin (yüksek mukavemet,

sağlamlık, esneklik ve ısıl işlemle sertleştirilebilme) birleştirilmiş üstün kaliteli mühendislik malzemeleridir.

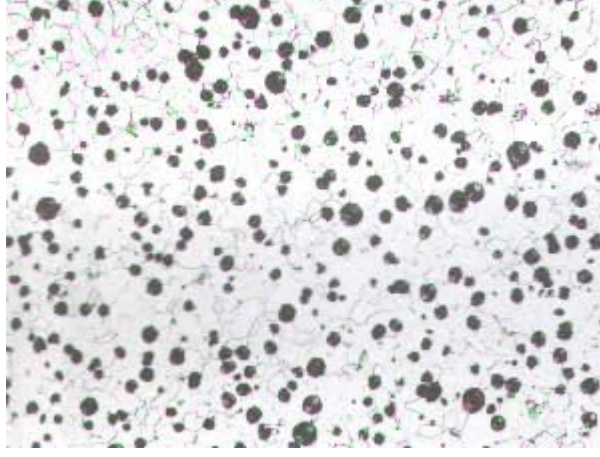
Grafitlerin lamel form yerine küresel formda düzenlenmesi ile gerek dayanım değerleri ve gerekse dökümün sürekliliği çok iyileştirilebilmektedir. Isıl işlem de uygulanmak suretiyle, çeliklerle karşılaştırılabilecek özellikte malzeme elde edilebilmektedir. Uygun ısıl işlem uygulandığında, lamel grafitli dökümde en fazla 400Mpa çekme dayanımına ulaşılırken sfero döküm adı da verilen küresel grafitli dökme demirde rahatlıkla 700Mpa değerleri, hatta daha yüksek değerler sağlanabilmektedir. Grafitlerin küresel formda olması, çentik etkisini azaltmakta ve yapı daha iyi yük taşıyabilir duruma gelmektedir.



Şekil 2.24 Ferritik küresel grafitli dökme demir yapısı



Şekil 2.25 Perlitik küresel grafitli dökme demir yapısı



Şekil 2.26 Östenitik küresel grafitli dökme demir yapısı

2.2.4.1 Demir Döküm Usulleri

Demir dökümü başlıca kum kalıp, kabuk kalıp ve savurma usulleri ile gerçekleştirilir. Bu döküm usullerinden kum kalıp metodu bugün Türkiye’de en fazla tatbikat sahası bulanıdır. Bunun da sebebi kum kalıp usulünün çok farklı ağırlıktaki iş parçalarına uygulanabilmesi yanında kalıplama maliyetinin de çok düşük olmasıdır. Bununla beraber diğer döküm usullerinin de kendilerine göre avantajları vardır. Ancak, avantajlarının belirli sahalarda olmaması, bu usullerin sadece belirli parça formlarını, metalürjik veya ekonomik amaçları gerçekleştirmek için tatbik edilmelerine sebep olmaktadır.

Savurma döküm yöntemi sadece silindirik parçaların dökümü için uygulanmaktadır. Demir, bir fırında ergitilip, içerisi kalıp kumu ile astarlanmış, yüksek devirle dönen yatay eksenli bir silindire boşaltılır. Sıvı demir merkezde kuvvetin etkisi altında cidarlara yapışır ve orada katılaşır. İşlem bittikten sonra iş parçası dışarı alınır. Bu şekilde dökülen parçaların iç kısımları daima boş ve silindiriktir. Sıvı metal cidarlara yüksek bir hızla fırlatıldığı için taneler ince yapılı olup, gaz boşluğu yoktur. Soğuma, kalıp yüzeyinden savurma makinesinin eksenine doğrudur. Bu sebepten, farklı soğuma ortamlarındaki farktan dolayı, malzemenin cidarının dış çevresi ile iç çevresi arasında yapı farkı mevcuttur.

Savurma döküm usulü ancak silindir gömleği, boru gibi silindirik iş parçalarına tatbik edilebilmektedir. İş parçalarının da dış yüzeylerinin tam silindirik olması icap etmez. Bunlar şekilli olabilir, fakat her ayrı yüzey şekli bir ayrı kalıbı gerektirir.

Kabuk kalıp usulü ikinci dünya savaşından sonra gerçekleştirilmiş yeni bir usuldür. Bu metodun tercih sebepleri arasında en önemlisi boyutların dar tolerans sınırları içinde tutulmasıdır. Kabuk kalıp ile döküm daha ziyade işlenmesi güç olan sert dökmelelere uygulanır.

3. DÖKÜMDE KATILAŞMA

Günümüzde, mevcut döküm yöntemlerinin biri veya birden fazlası ile her türlü geometrik şekle sahip parçaların imali mümkündür. Ancak tüm üretim yöntemlerinde olduğu gibi, yüksek kalite ve düşük maliyete, imalat mühendisinin değişik dizayn opsiyonlarını anlaması, değerlendirmesi, en uygun şekillendirme yönteminin seçimi ve bu yöntemin verimli şekilde kullanımı suretiyle ulaşılabilir. Değişik döküm metotları arasındaki ana farklılıklar kalıp malzemesi (kum, metal veya diğer bir malzeme) ve sıvı metalin kalıba giriş şekline dayanır (yerçekimi, vakum, düşük veya yüksek basınç). Bütün yöntemlerde ergitme ve katılaşmanın, inklüzyon, gaz ve çekilme boşluğu gibi potansiyel hataların oluşumunu önleyecek ve özellikleri maksimize edecek şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır. Bu sebeple döküm yöntemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve aralarındaki farklılıkların kavranabilmesi için katılaşma prosesi olarak bilinen ve dökümcülüğün esasını teşkil eden sıvı-katı dönüşümünün bu aşamada incelenmesi uygun olacaktır.

Bu sebeple dökümde akıcılık kavramının daha iyi anlaşılabilmesi ve kavranabilmesi için katılaşma prosesi olarak bilinen ve dökümcülüğün esasını teşkil eden sıvı-katı dönüşümünün bu aşamada incelenmesi uygun olacaktır.

Genel anlamda ergitme işlemini takiben kalıp boşluğuna sevk edilen ergiyik metalin sıvıdan katıya dönüşmesi olayı katılaşma olarak tanımlanırken spesifik olarak atomların sıvı faz içinde uzak mesafeden kısa mesafeye veya kısa düzenden uzun düzene geçişleri olarak tanımlanır. Ürün özelliklerini kontrol eden yapısal karakteristiklerin çoğu bu aşamada meydana gelir. Aynı zamanda gaz ve çekilme porozitesi, segregasyon ve benzeri hatalar bu esnada vuku bulurlar. Bunların azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması katılaşma prosesinin kontrolü ile mümkündür.

Metallerin ve alaşımların tamamı ve çoğu yarı iletkenler, kompozitler, seramikler ve polimerler proses (fabrikasyon) hattının bir kademesinde sıvı haldedirler (Ham veya yarı mamul malzemeler bitirilmiş uç ürünlere dönüştürülürken genellikle proseslerin başlangıç kademesinde veya herhangi bir noktasında sıvı haldedirler). Sıvı daha sonra sıcaklığın sıvı-katı dönüşüm noktasının altına inmesiyle birlikte katılaşır. Katılaşan malzeme bu şekilde (döküm halinde) kullanılabileceği gibi çeşitli termo-mekanik işlemlere de uğratılabilirler. Katılaşma sürecinde oluşan yapılar ingot dökümlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini tayin ettiğinden, istenen özelliklere sahip parça üretimi için malzeme üzerinde

yapılması gereken ileriki proseslerin rotasını da etkiler. Bunlara ilaveten döküm sonrası termo-mekaniksel prosesler esnasında malzemelerin davranışı döküm yapıları tarafından belirlenir.

Katılaşma çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki kademedен meydana gelmektedir.

3.1 Çekirdeklenme

Çekirdeklenme sıvı içerisinde çevresinden belirgin sınırlarla ayrılmış yaklaşık olarak 200 atomdan oluşan ve atom salkımı olarak nitelendirilen kararlı bir katının teşekkülü olayıdır. Daha sonra oluşan çekirdek tüm sıvı katı hale dönüşüncüye kadar büyür. Burada bir itici kuvvetin etkisi altında kararlı veya yarı kararlı bir denge halinden diğerine geçiş söz konusudur. Sistemin serbest enerjisinde bir azalma olarak ortaya çıkan itici kuvvet, dönüşümün meydana gelebileceğini gösterir. Bu kuvvet gerekli fakat yeterli değildir. Dönüşümün olup olmayacağı kinetik faktörler tarafından belirlenir.

Katı kristal yapının serbest enerjisi sıvının enerjisinden daha düşük olduğu için sıcaklık dönüşüm noktasının altına indiği zaman sıvı katılaşır. Sıcaklık düştükçe sıvı ile katı arasındaki serbest enerji farkı daha da büyür ve katı faz daha kararlı hale gelir. Bu enerji farkına hacim serbest enerjisi adı verilir (AG_v). Ancak, katının oluşabilmesi için katı ve sıvıyı birbirinden ayıran bir ara yüzeyin meydana getirilmesi gerekir. Yüzey serbest enerjisi bu ara yüzeyle ilgilidir; yüzey alanındaki artışla birlikte bu enerji de artar. Sıvının sıcaklığı katılaşma noktasına ulaştığı anda sıvıdaki atomlar toplanarak salkım oluştururlar ve katıya benzer küçük bir bölge meydana getirirler. Bu küçük katı partikül embriyo (nüve veya çekirdekçik) olarak adlandırılır ve çapı belirli bir kritik değere ulaştığı anda çekirdek adını alır.

3.1.1 Homojen Çekirdeklenme

Çekirdeklenmenin en basit şeklidir. Homojen çekirdeklenme sıvı ergiyikte metal atomlarının kendi kendilerine bir araya gelmeleri ile oluşur. Önce saf bir metalin katılaşmasını ele alalım:

Sıvı metal denge katılaşma sıcaklığının altında yeterli bir dereceye soğutulursa, çok sayıda homojen çekirdekçik atomların yavaş hareketleri ile teşekkül eder. Homojen çekirdeklenme bazı metaller için genellikle yüzlerce dereceye varabilen alt soğutmaları gerektirir ve alt soğutma miktarı yaklaşık olarak $0,2T_m$ (T_m : ergime sıcaklığı) değerine eşdeğerdir. Bir

embriyonun kararlı bir çekirdek ve takiben bir kristal (tane) şeklinde büyüyebilmesi için kritik bir boyuta ulaşması gerekmektedir. Embriyolar (nüve) sıvıda sürekli olarak oluşur ve tekrar çözünürler. Ancak kritik çapa ulaşabilenler büyüyerek nihai tane şeklini alırlar.

3.1.2 Heterojen Çekirdeklenme

Heterojen çekirdeklenme, çekirdeklenme hadisesinin, kararlı bir çekirdek oluşumu için gerekli kritik serbest enerji değerini düşüren kalıp duvarı, çözünmeyen metaller arası bileşikler, inklüzyon (metal oksitler ve metal sülfürler) ve diğer katkı malzemeleri (yapay olarak dışarıdan ilave edilen çekirdekleyiciler) yardımıyla meydana gelmesi olayıdır. Endüstriyel döküm proseslerinde yüksek oranlarda alt soğuma meydana gelmez ve genellikle alt soğuma $0,1$ ile 10°C arasındadır (yaklaşık olarak $0,02T_m$). Bu yüzden pratikte çekirdeklenme homojen çekirdeklenme ile değil heterojen çekirdeklenme ile meydana gelmektedir.

Heterojen çekirdeklenmenin oluşabilmesi için, çekirdekleyici ajan (katı empürite veya kalıp iç yüzeyi) sıvı metal tarafından ıslatılabilmelidir. Heterojen çekirdeklenme, çekirdekleyici ajan (altlık) üzerinde oluşur, çünkü kararlı bir çekirdeği oluşturmak için gerekli serbest enerji değişimi değeri homojen çekirdeklenme için gerekli olandan daha düşüktür. Heterojen çekirdeklenmede yüzey serbest enerjisi ve net serbest enerji değeri daha düşüktür. Buna paralel olarak kritik yarıçap değeri de azalmaktadır. Çekirdeklenme için daha küçük alt soğutmalar yeterli olmaktadır.

3.2 Sıvı Metalde Kristalin Büyümesi ve Tane Yapısının Oluşumu

Katılaşmakta olan bir metalde kararlı bir çekirdek teşekkül ettikten sonra büyüme kademesi başlar. Her katılaştıran kristalde atomlar düzenli bir şekilde dizilmişlerdir, ancak kristallerdeki x, y, z yönleri komşu kristale göre belirli oranda açı yaparlar. Katılaşma tamamlandığında taneler birbirleriyle temas ederek birkaç atom boyutu genişliğindeki tane sınırlarını meydana getirirler. Çok sayıda taneden oluşan katılaşmış metal çok kristalli malzeme olarak adlandırılır. Katılaşmış metaldeki kristaller tane, bunların arasındaki geçiş bölgesi ise tane sınırı olarak nitelendirilmektedir.

Muhtemel çekirdeklenme yerleri veya çekirdek sayısı katı metaldeki tane yapısını belirler. Eğer çok az sayıda çekirdeklenme olursa, nihai döküm yapısı az sayıdaki büyük tanelerden

meydana gelir. Çekirdeklenme yeri ve sayısı artışı ile çok ince bir tane yapısına ulaşılabilir. Hemen hemen bütün mühendislik malzemelerinde, yüksek mukavemet ve özelliklerde homojenlik sağladığından ince taneli yapılar istenir.

Bir metal, tane inceltici veya çekirdekleyici ilave etmeden bir kalıba döküldüğü zaman, döküm ve katılaşma koşullarına göre (katı-sıvı ara yüzeyi önündeki kompozisyonel ve ısı gradyanların etkileşimi) iki tip tane yapısı meydana gelir;

- 1) Eş eksenli taneler
- 2) Kolonsal (bir yönde tercihli olarak büyümüş) taneler

Sıvı metaldeki çekirdeklenme ve büyüme şartları kristallerin tüm yönlerde büyümelerine fırsat vermesi halinde eş eksenli taneler meydana gelir. Eş eksenli çil taneleri genellikle soğuk kalıp duvarına bitişik olarak bulunurlar. Katılaşma başlangıcında kalıp duvarı civarında oluşan çok yüksek derecelerdeki alt soğuma, aşırı derecede hızlı çekirdeklenmeye yol açarak eş eksenli tane yapısının teşekkülü için uygun koşulları oluşturur. Dökümlerin yüzeylerinde bu şekilde oluşan eş eksenli ve ince tanelerden oluşmuş bölge çil bölgesi olarak adlandırılır. Kolonsal taneler uzun, ince ve kabadır. Bu taneler sıvı içerisinde sıcaklık gradyanının yüksek (dik) ve katılaşma (soğuma) hızının düşük olması halinde meydana gelirler. Kolonsal taneler, yüksek sıcaklık gradyanının varlığı nedeniyle kalıp duvarına dik ve ısı transferi yönüne paralel olarak büyürler. Geleneksel bir metotla dökülen bir dökümde, yüzeyden merkeze doğru çil bölgesi, kolonsal bölge ve eş eksenli bölge bulunur. Kolonsal büyümenin sonuna doğru, merkezde sıvı halde bulunan metalin sıcaklığında bir düşme görülür, dik sıcaklık gradyanları kaybolur ve alaşım elementi zenginleşmesi olduğundan yapısal aşırı soğuma veya çökeltme neticesinde bağımsız çekirdeklenme meydana gelir ve bu çekirdekler çil bölgesindeki tanelere göre daha büyük boyutlu eş eksenli taneleri meydana getirirler.

Eğer sıvı metal havuzundaki çekirdeklenme ve katılaşma ısı ve kompozisyonel değişimlerin etkilerine bırakılmayıp çekirdekleyici ilavesi gibi dış müdahalelere maruz kalırsa kolonsal taneler meydana gelmez ve dökümün tamamı eş eksenli tanelerden oluşur. Bunun tam tersini de gerçekleştirmek mümkündür; kalıp dizaynı ve katılaşma koşulları kontrol edilerek yönlendirilmiş katılaşma neticesinde tamamen kolonsal tanelerden ibaret bir döküm elde edilebilir. Yönlendirilmiş katılaşma olarak adlandırılan bu yöntemle bazen döküm parçanın tek bir taneden meydana gelmesi sağlanabilir (tek kristal üretimi). Bu yöntem türbin kanatlarının üretiminde yaygınca kullanılmaktadır.

Katı çekirdek teşekkül ettikten sonra, büyüme atomların katı-sıvı ara yüzeyine ilaveleri ile gerçekleşir. Saf metallerde, katılaşma esnasında çekirdeğin büyümesi (katı-sıvı ara yüzeyinin ilerleme şekli) katı-sıvı ara yüzeyinden ısının transfer ediliş şekline bağlıdır. İki tip ısı, sıvı metalden uzaklaştırılmalıdır. Sıvının özgül (spesifik) ısısı ve ergime gizli ısısı. Spesifik ısı malzemenin birim ağırlığının sıcaklığını 1°C yükseltmek için gerekli ısıdır. Spesifik ısı, sıvı katılaşma sıcaklığına soğuyana kadar ya radyasyonla çevreye ya da kondüksiyonla kalıp duvarından ilk olarak uzaklaştırılır. Düzensiz sıvı yapısının daha düzenli ve kararlı kristal yapısına dönüşümü esnasında ortaya çıkan enerjiyi simgeleyen ergime gizli ısısı, katı-sıvı ara yüzeyinden katılaşma tamamlanmadan önce uzaklaştırılmalıdır. Ergime gizli ısının sistemden alınış şekli büyüme mekanizmasını ve sonuç tane yapısını belirleyici en önemli etkenlerden biridir. Şimdi sıvı ile katıyı birbirinden ayıran ara yüzeyin katılaşma esnasında alabileceği muhtemel formları ele alarak bunların neticesinde ortaya çıkacak tane şekillerini inceleyelim.

3.2.1 Düzlemsel Cephede Büyüme

Homojen bir sıvının denge koşulları altında düşük bir hızla soğuduğunu varsayalım. Sıvının sıcaklığı katılaşma sıcaklığından daha yüksek ve katının sıcaklığı katılaşma sıcaklığına eşdeğer veya hemen altındadır. Katılaşmanın devam edebilmesi için ergime gizli ısısı katı-sıvı ara yüzeyinden katılaşmış kısma iletilir ve buradan da çevreye salıverilir. Katı-sıvı ara yüzeyinde teşekkül edecek herhangi bir çıkıntının etrafı sıcaklığı ergime noktasının çok üzerinde olan bir sıvı tarafından sarılmıştır. Bu nedenle ya çıkıntının büyümesi çıkıntının sıvı içindeki en uç noktası ile ara yüzeyin kalan kısmı aynı hizaya gelene kadar durur, ya da çıkıntı hemen ergiyerek katı-sıvı ara yüzeyi eski düzlemsel şeklini alır. Bu tip büyüme mekanizması düzlemsel cephede büyüme olarak bilinir. Katı-sıvı ara yüzeyi bir çizgi şeklindedir ve sonuç döküm yapısı kolonsal tanelidir.

3.2.2 Dendritik Büyüme

Çekirdeklenmenin zayıf olduğu hallerde, sıvının sıcaklığı katı teşekkül etmeden, katılaşma noktasının altındaki bir sıcaklığa yükselir. Bu şekilde sıcaklık yükselmesine ısıl dalgalanma denir. Soğuma eğrisinin şekli dökülen malzemenin çeşidine (malzemenin katılaşma karakteristiğine), çekirdeklenme tipine, kalıptan ısı transfer hızı ve şekline bağlıdır. Deneysel

olarak kaydedilen soğuma eğrilerinin analizi ile katılaşma prosesi ve döküm hakkında çok değerli bilgiler elde edilebilir. Yüksek katılaşma hızları ince yapılı ve mekanik özellikleri yüksek dökümlerin üretimini sağlamaktadır.

3.3 Katılaşma Zamanı

Katılaşmanın gerçekleştirilebilmesi için iletilmesi gereken ısı miktarı; süper ısı miktarı, kalıptaki sıvının miktarı veya döküm parçanın hacmi ile doğru orantılıdır. Bir döküm parçasındaki ısıнын çevreye yayılım kabiliyeti ise parçanın yüzey alanı ve kalıbın ısı iletim karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Bu bulgular Chvorinov kuralı ile ifade edilir. Chvorinov kaidesi dökümde besleyici dizaynında ve besleyicilerin yerleşim noktalarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Katılaşma büzülmesinin besleyici içerisindeki sıvı metal ile etkin bir şekilde karşılanabilmesi Chvorinov kaidesinin uygulanması halinde mümkündür.

Farklı soğuma hızları ve katılaşma zamanları döküm yapısının ve özelliklerin değişimine neden olmaktadır. Örneğin kokil kalıba dökülen parçalar kum kalıba dökülenlere oranla daha yüksek mukavemete sahiptir. Değişik kalıp kumları farklı katılaşma veya soğuma hızı sağlarlar. Örneğin yüksek rutubete sahip kum kalıplardaki ısı transfer hızı, düşük oranlı rutubete sahip kum kalıplardan daha yüksektir.

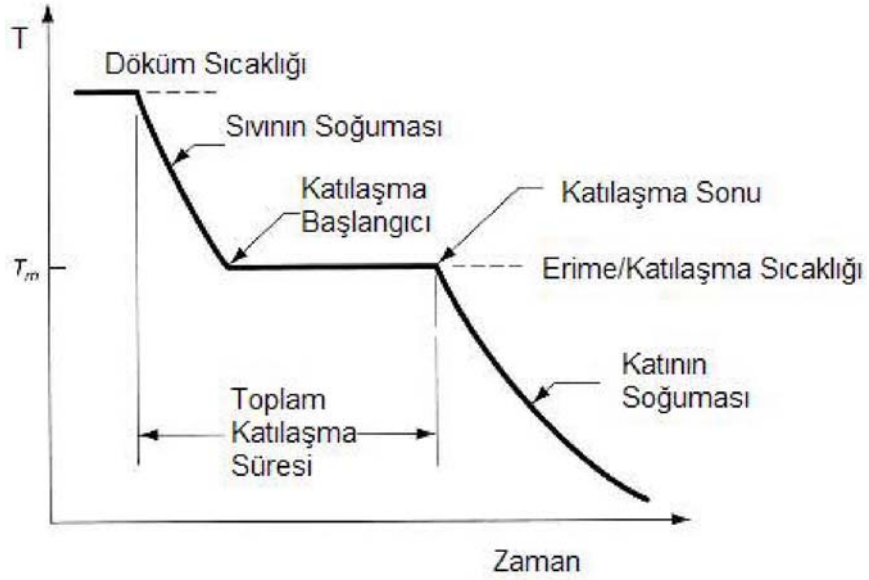
3.4 Saf Metallerde ve Alaşımlarda Katılaşma

Metal malzemelerin özellikleri büyük ölçüde katılaşma sırasında oluşan içyapı ile belirlenir. Dolayısıyla özellikle döküm malzemelerin özelliklerinin kontrol edilebilmesi için katılaşma olayının (kristalleşme) iyi bilinmesi gerekir. Bir sıvı metalin katılaşması birincil kristalleşme (katılaşma) ve bu sırada oluşan katılaşma içyapısı (döküm içyapısı) birincil içyapı olarak adlandırılır. Döküm parçalarda birincil içyapı, parça ömrü boyunca hiç değişmeyeceğinden katılaşma olayının çok iyi kontrol edilmesi zorunludur.

Haddeleme, dövme gibi plastik şekil verme yöntemleri sonrasında bu içyapı ısıl veya termomekanik işlemler (örneğin normalizasyon, sıcak şekil verme gibi) ile yeniden oluşturulabilir (yeniden kristalleşme) ve bu şekilde ortaya çıkan içyapı ikincil içyapı olarak adlandırılır. Döküm parçalarda bu imkan genellikle olmadığından katılaşmanın iyi kontrolü ile uygun bir birincil içyapının elde edilmesi çok önemlidir.

3.4.1 Saf Metallerde Katılaşma

Sıvı metal içindeki atomlar düzensiz (amorf) halde olup, sürekli olarak hareket ederler. Soğuma sırasında ısının uzaklaştırılması ile eriyiğin enerjisi giderek azalır. Saf metallerde katılaşma sabit sıcaklıkta olur. Bu sıcaklığa inildiğinde, eriyik içinde kristalleşme merkezi veya çekirdek denilen bir takım düzenli atom grupları oluşmaya başlar ve eriyiğin diğer atomları zamanla bunlara eklenerek taneler ortaya çıkar. Dolayısıyla katılaşma olayı, yani içyapıdaki tanelerin ortaya çıkışı, çekirdeklenme ve kristal büyümesi diye iki safhaya ayrılabilir. Her biri ayrı bir çekirdek etrafındaki büyüme sonucu meydana gelen taneler, metal malzemenin içyapısını oluşturur (Şekil 3.2).

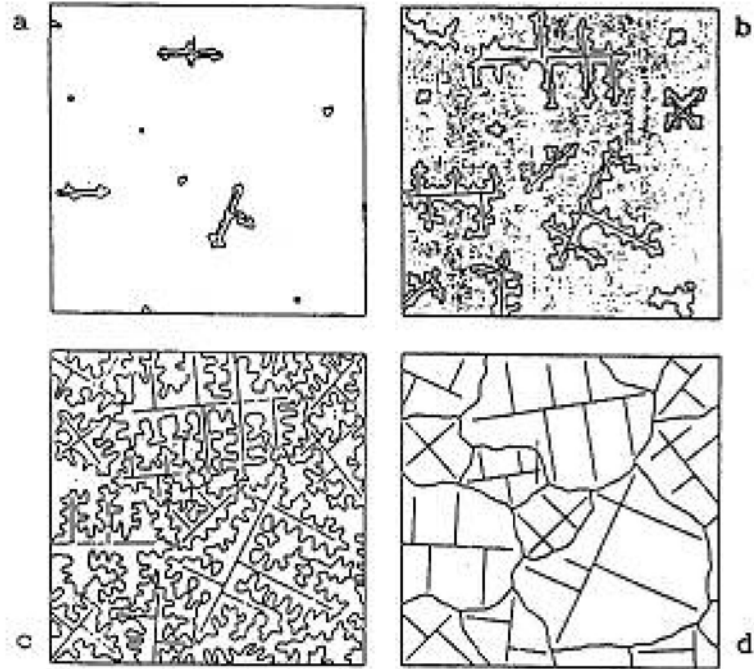


Şekil 3.1 Saf bir metalin soğuma eğrisi

3.4.1.1 Çekirdeklenme

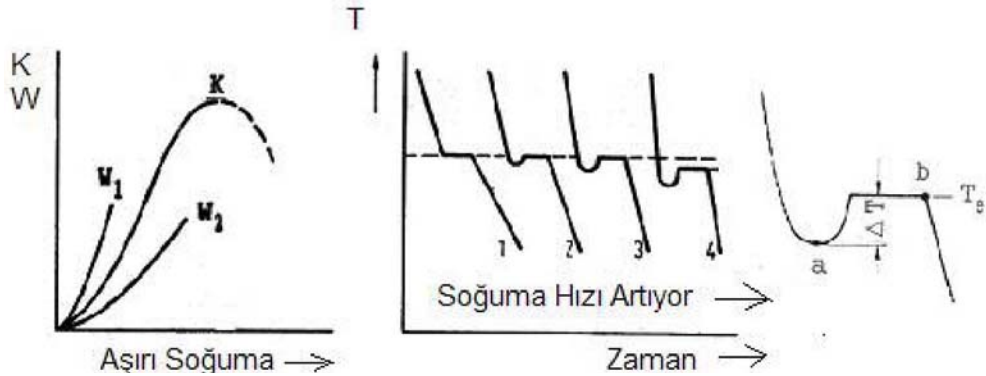
Çekirdekler çok küçük katı parçacıklar olup kararlılıkları, yani tekrar erimeden büyümeye devam etmeleri, ancak yeterli bir büyüklüğe sahip olmalarına bağlıdır. Bu durum, serbest enerji yardımıyla açıklanabilir. Herhangi bir olayın kendiliğinden devam edebilmesi için, bu olayla ilgili serbest enerji toplamının azalması gerekir. Katı durum, sıvıya göre daha düşük enerjili olduğundan, eriyikte katı parçacıkların oluşması sırasında kristalleşme ısısı açığa çıkar. Öte yandan yeni yaratılan sıvı/katı ara yüzeylerinin oluşumu için enerjiye ihtiyaç vardır ve açığa çıkan enerji burada kullanılır. Dolayısıyla çekirdeklenme sırasında sistemin serbest enerjisi kristalleşme nedeniyle azalırken, yaratılan yeni yüzeyler dolayısıyla artma

eğilimindedir. Çekirdekler çok küçük iken yüzeyleri hacimlerine oranla büyüktür ve kristalleşme sırasında açığa çıkan enerji, bu yüzeylerin yaratılması için yeterli olmaz. Çekirdek yarıçapı kritik bir r_0 değerine ulaştığında, artı ve eksi işaretli enerji değişimleri birbirine eşit olur ve bu r_0 değerinden daha büyük yarıçaplı çekirdeklerde açığa çıkan enerji yüzeylerin yaratılması için gereken enerjiden büyük olacağından ve dolayısıyla toplam serbest enerji katılma ile azalacağından katılma olayı kendiliğinden devam eder. Özetle çekirdek tekrar erimeden, kristalin büyümeye devam edebilmesi için, en az r_0 yarıçapına ulaşmış bulunması, veya diğer bir deyişle söz konusu yarıçapa ulaşana kadar gerekli aktivasyonun dışardan sağlanmış olması zorunludur.



Şekil 3.2 Katılma sırasında oluşan taneler ve tane sınırları

(a) çekirdeklenme, (b,c) dendritik büyüme, (d) katılma cephelerinin birleşmesi



Şekil 3.3 Aşırı soğumanın birim zamanda oluşan çekirdek sayısı ve büyüme hızına etkisi
 Saf metallerde artan soğuma hızının aşırı soğuma miktarına etkisi
 ΔT : Aşırı soğuma, K: birim zamanda oluşan çekirdek sayısı, W: büyüme hızı

- **Homojen çekirdeklenme**

İçinde çekirdek görevi yapabilecek parçacıklar (karbür, nitrür, oksit ve diğer katı bileşikler gibi) bulunmayan ideal ve homojen bir eriyikte kararlı çekirdeklenmeye ilişkin aktivasyon enerjisi, eriyiğin kendi enerji içeriğinden karşılanmalıdır. Bu nedenle homojen çekirdek oluşumu (öz çekirdeklenme) için bir miktar ısı aşırı soğuması (ΔT) gereklidir. Yani eriyik katılaşmaya T_e erime sıcaklığında değil, daha düşük bir $T = T_e - \Delta T$ sıcaklığında başlar.

Aşırı soğumanın (ΔT) artırılması ile, birim zamanda oluşan çekirdek sayısı (K) yükselir (Şekil 3.3). Ancak sıcaklığın çok düşmesi halinde bu kez atomların hareketleri çok yavaşlayacağından, bunların yan yana gelip çekirdek oluşturması güçleşir ve aşırı soğuma çok artarsa K değerinde tekrar düşme görülür.

Birincil içyapının tane büyüklüğü, hem birim zamanda oluşan çekirdek sayısına (K) ve hem de kristallerin büyüme hızına (W) bağlıdır. K ne kadar büyük ise, o kadar ince taneli bir içyapı oluşur. Kristal büyüme hızının (W) çok büyük olması halinde ise ilk oluşan çekirdekler büyüyerek tüm içyapıyı kaplayacağından yeni çekirdek oluşumuna zaman kalmaz ve içyapı daha kaba taneli olur. Şekil 3.3'de W_2 olarak gösterilen büyüme hızına sahip malzemenin içyapısı W_1 'inkine oranla daha küçük tanelidir.

Teknikte kullanılan döküm alaşımlarında soğuma hızı kontrol edilerek içyapıdaki tane büyüklüğü büyük ölçüde ayarlanabilir. Soğuma hızlı ise (örneğin kokil kalıba döküm) aşırı soğuma miktarı ve dolayısıyla çekirdek sayısı artar. Daha yavaş soğuyan kum kalıba dökümde ise durum bunun tam tersidir. Ayrıca bir parçanın farklı bölgelerinde farklı soğuma koşullarının bulunması, aynı parça içinde farklı özelliklere sahip içyapıların ortaya çıkmasına neden olacaktır.

Şekil 3.3'de saf metallerde soğuma hızının aşırı soğumaya (ΔT) olan etkisi özetlenmektedir. Eğrinin (a) noktası çekirdek oluşumunun, yani kristalleşmenin başlangıcını temsil etmektedir. Açığa çıkan kristalleşme ısısı nedeniyle sıcaklık, erime sıcaklığına kadar artar. Daha sonra T_e sıcaklığı sabit kalarak katılaşma devam eder ve (b) noktasında sona erer.

- **Heterojen Çekirdeklenme**

Teknik saflıktaki sıvı metallerin içinde hemen her zaman kristalleşmenin başlayabileceği yeterli sayıda “yabancı yüzey” bulunduğundan, çekirdeklenme yukarıda anlatılan öz çekirdeklenme (homojen) ile değil, heterojen çekirdeklenme yoluyla gerçekleşir. Çekirdek olarak görev yapabilecek bu "yüzeyler" şunlar olabilir:

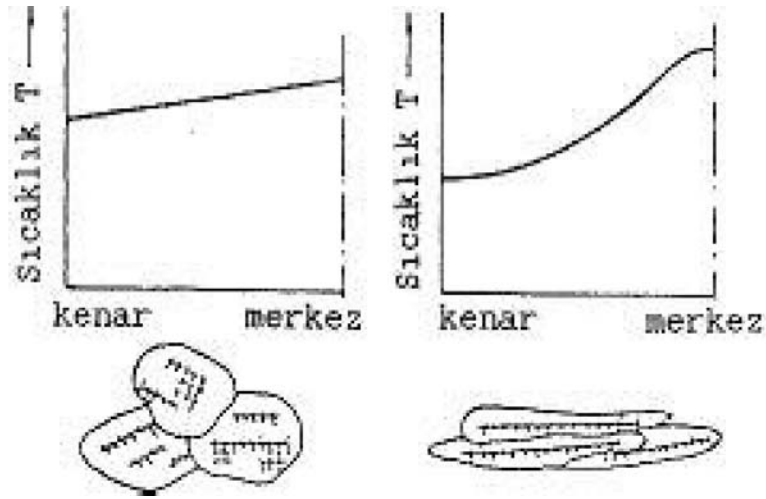
- Eriyiğin içinde bulunduğu kabın duvarları (örneğin dökümde kalıp yüzeyleri),
- Erime sıcaklığı yüksek olan ve eriyik içinde katı halde bulunan bileşikler (karbürler, nitrürler, oksitler),
- Bazı durumlarda eriyiğe döküm sırasında katkılar yapılarak çekirdek görevi yapacak parçaların varlığı sağlanır ve bu şekilde ince taneli bir içyapı garanti edilir. Bu işleme aşılama adı verilir.

3.4.1.2 Kristal Büyümesi

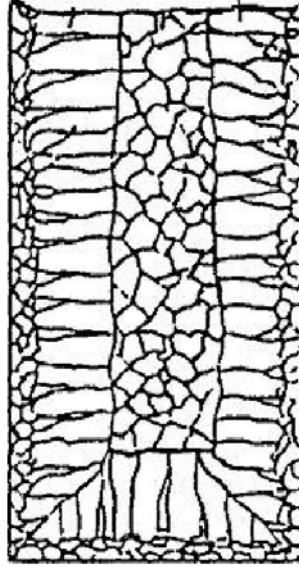
Çekirdek oluşumundan sonra bu çekirdeklere diğer atomların düzenli olarak eklenmesi ile katılaşma olayı devam eder. Kübik kristale sahip olan metallerde büyüme, bazı tercihli yönlerde (küp yüzeyine dik doğrultularda) çok hızlı, diğer yönlerde ise daha yavaş olur ve bu şekilde büyüyerek ortaya çıkan kristallerin hacimsel düzeni dendrit olarak adlandırılır.

Yapılan araştırmalar, kristalleşme biçimlerinin büyük oranda soğuma koşullarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Eriyik ısının her taraftan uzaklaştırılması ile soğursa eşeksenli, yani toparlak taneler, düzgün olmayan (yönlenmiş) ısı iletiminde ise uzun (çubuksu) taneler meydana gelir (Şekil 3.4). Çekirdeklenme ve dendritik büyüme ile kristalleşme cephelerinin birbiriyle birleşmesi sonucu içyapının ortaya çıkışı Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.

Döküm parçaların içyapısı da, katılaşmadaki soğuma koşulları ile belirlenir. Burada üç ayrı bölge söz konusu olabilir. Kalıp cidarlarında ani soğuma (chill) etkisi ile küçük ve eşeksenli tanelerden oluşan bir kabuk, bunu izleyen bölgede sıcaklık gradyeninin etkisiyle uzun çubuksu taneler, orta kısımda ise soğuma her taraftan olduğundan, tekrar eşeksenli taneler görülür (Şekil 3.5).



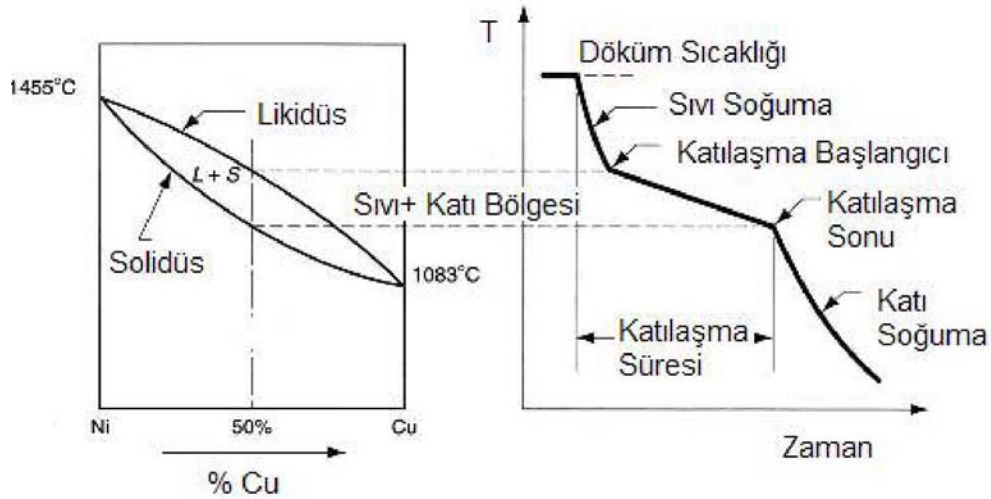
Şekil 3.4 Soğuma sırasında sıcaklık gradyeninin tane oluşumuna etkisi



Şekil 3.5 Kalıp içinde katılaşmada farklı bölgelerin tane biçimleri

- (a) Hızlı soğuma etkisiyle oluşan küçük ve eşeksenli tanelerin bulunduğu kabuk
- (b) Sıcaklık gradyeni etkisiyle oluşan uzun çubuk taneler
- (c) Soğumanın her taraftan olması ile ortaya çıkan eşeksenli taneler

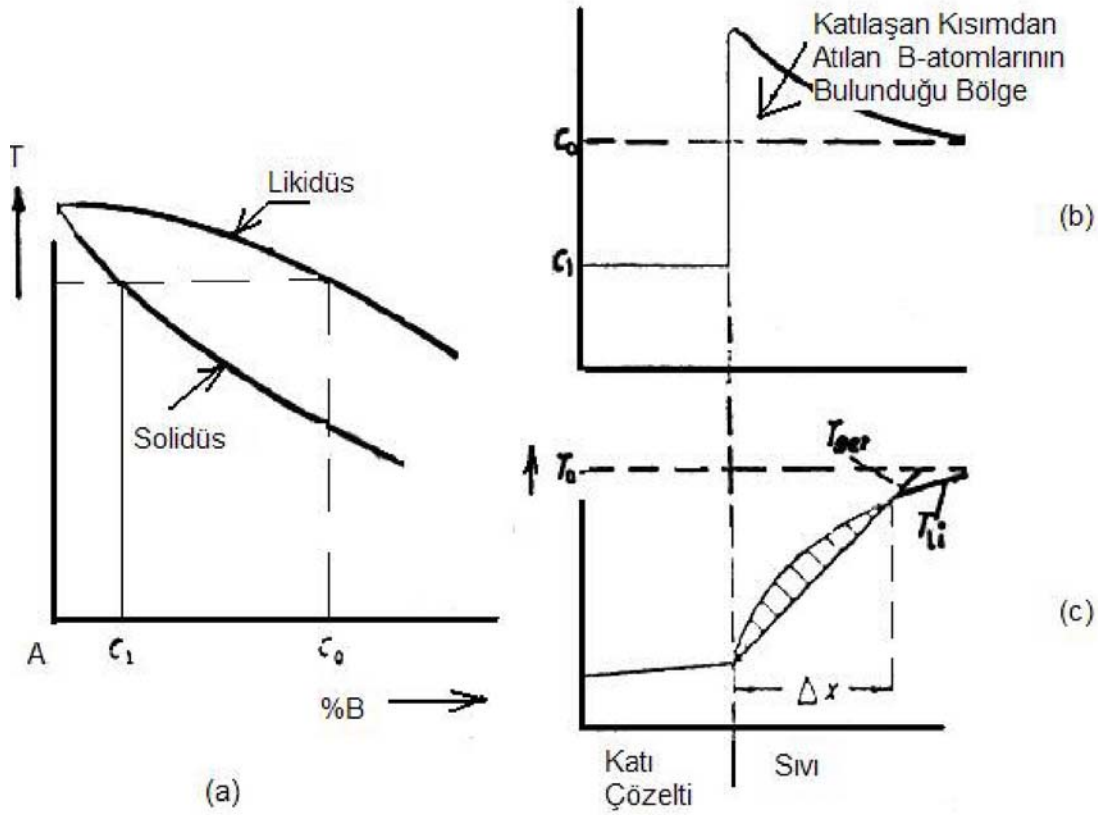
3.4.2 Alaşımlarda Katılaşma



Şekil 3.6 Cu-Ni sisteminin faz diyagramı ve %50'lik alaşımın soğuma eğrisi

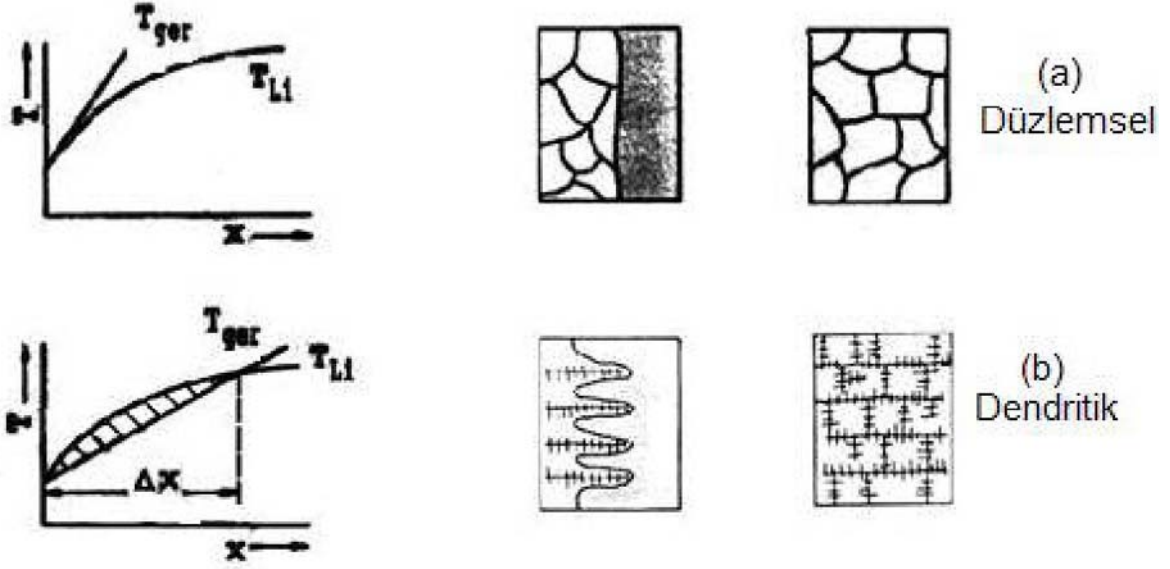
En az iki tür atomun birlikte bulunduğu alaşımların katılaşması saf metallerden daha farklı olup, katılaşma olayı belli bir sıcaklık aralığında (Sıvı + Katı bölgesi) gerçekleşir. Alaşımlar arasında sadece ötektik bileşime sahip alaşımlar sabit sıcaklıkta katılaşırlar ve bu bölümde açıklanan birçok olumsuzluk bu bileşimlerde görülmez. Döküm malzemesi olarak ötektik bileşimlerin tercih edilmesinin temel nedeni budur. Alaşımların kendilerine özgü katılaşmalarında sıvı/katı ara yüzeyinde bileşim farklılıkları ortaya çıkar. Şekil 3.7'deki faz diyagramından da görüldüğü gibi eriyik T_0 sıcaklığına soğutulduğunda, katılaşan ilk katı çözelti kristallerinin (Şekil 3.7a) B-atomu yüzdesi (c_1), eriyiğin ortalama değerinden (c_0) çok daha düşüktür. Yani ilk kristalleşen katıda B atomları yüzdesi düşük olmaktadır. Bu ilk kristalleşmeden arta kalan B-atomları eriyiğe geçeceklerinden, katılaşmanın devam edeceği ara yüzey civarındaki eriyik, B-atomu bakımından zenginleşir (Şekil 3.7b). Alaşımın ortalama bileşimine göre daha fazla B-atomu içeren ($c > c_0$) bu eriyik tabakasında katılaşmanın başlayacağı likidüs sıcaklığı (T_{Li}) ise B yüzdesi yüksek olduğu için eriyikten daha düşük ($T_{Li} < T_g$) hale gelir. Şekil 3.7c'de bu değişimi gösteren eğri ile eriyik içindeki gerçek sıcaklık dağılımı (gradyeni) T_{ger} birlikte görülmektedir. Eriyik içinde katılaşma cephesine yakın bölgelerde de gerçek sıcaklık T_{ger} , soğuma nedeniyle T_0 'dan daha düşük olup bir sıcaklık gradyeni söz konusudur. Bu gradyeni belirleyen parametrelerin başlıcaları döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, eriyiğin ısı içeriği ve kalıbın ısı uzaklaştırma özellikleridir. Sonuçta bu iki eğrinin kesişme noktasından sıvı /katı ara yüzeyine kadar (Δx) kalınlığındaki bölgede alaşımın gerçek sıcaklığı (T_{ger}), katılaşmanın başlayacağı likidüs sıcaklığından (T_{Li}) daha düşük olduğu, yani bir aşırı soğumanın varlığı görülmektedir (Şekil 3.7c). Bu bölgede malzemenin katılaşması için koşullar hazırdır ve katılaşma cephesi hızla ilerleyebilir.

Katılaşmadaki derişiklik farkları nedeniyle oluşan bu olay, yapısal aşırı soğuma adını alır ve alaşımlarda ısıl aşırı soğumaya göre çok daha büyük önem taşır.



Şekil 3.7 Metal eriyiklerinde yapısal aşırı soğuma

Bir eriyiğin soğuma hızı, yani eriyik içindeki gerçek sıcaklık dağılımı (gradyeni), yapısal aşırı soğuma bölgesinin büyüklüğünü belirler ve farklı soğuma koşullarında birbirinden çok farklı özelliklerde içyapılar ortaya çıkar. Eğer ısı iletimi, yapısal aşırı soğuma bölgesi yaratmayacak şekilde yavaş olursa, düzlemsel katılaşma meydana gelir (Şekil 3.8a). Burada çabuk büyüme eğilimindeki herhangi bir kristal, önündeki yüksek sıcaklık bölgesi tarafından engelleneceğinden, kristalleşme hızı düşük ve cephenin her noktasında aynı olur. Teknik uygulamalarda genellikle yapısal aşırı soğuma hemen her zaman vardır. Eriyik geniş bir Δx bölgesinde aşırı soğuduğundan, bu bölge içine katılaşarak uzamış her kristal, ısıнын çekildiği yönde daha hızlı olarak büyümesine devam eder ve sonuçta dendritik bir içyapı oluşur.

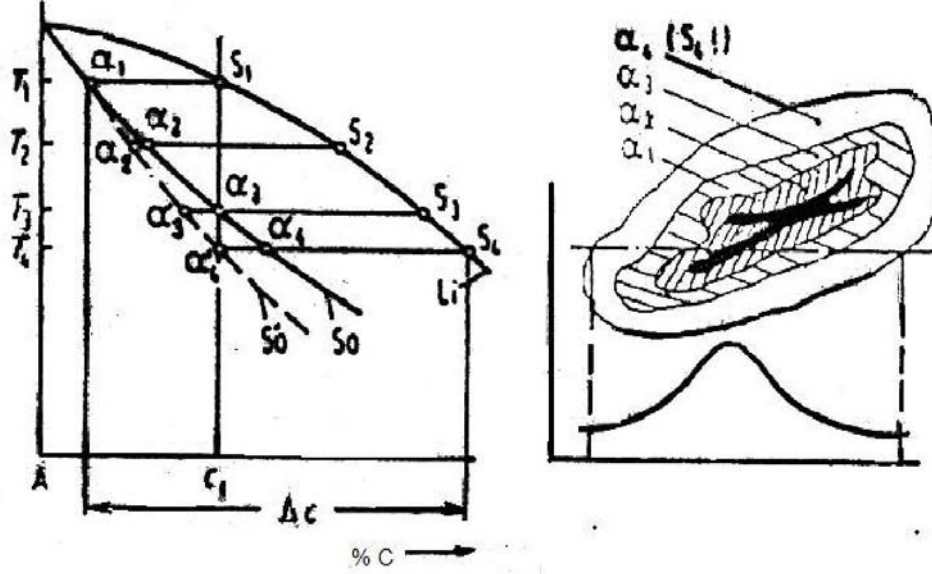


Şekil 3.8 Katılaşma cephesi ve içyapının yapısal aşırı soğumayla olarak değişimi

- a) Soğuma yavaş, T_{ger} gradyeni dik $\gg$ düzlemsel katılaşma
- b) Soğuma hızlı, T_{ger} gradyeni yatık $\gg$ dendritik katılaşma

3.4.2.1 Mikrosegregasyon

Alaşımların katılaşması sırasında bileşim farklılıklarının ortaya çıkışının bir diğer sonucu da, katılaşan taneler içinde çekirdekten dışarı doğru derişikliğin değişmesidir. Bu olaya mikrosegregasyon (kristal segregasyonu), ortaya çıkan içyapıya da tabakalı katı çözelti denir. Şekil 3.9'daki L alaşımı, sıvı durumdan soğutulurken T_1 sıcaklığında oluşan ilk katı çözeltinin bileşimi α_1 olur. T_2 sıcaklığına inildiğinde ise, faz diyagramına göre o anda katılaşanlar ve daha önce ayrılmış katı çözeltilerin tümünün ortalama bileşimi α_2 olmalıdır. Bunun gerçekleşmesi için bir miktar B-atomunun yayınma yolu ile önceden ayrılmış α_1 'e ulaşarak içinde çözünmesi zorunludur. Ancak soğuma hızlı olduğundan ve yayınma için gerekli zaman bulunmadığından, bu kütle transferi genellikle gerçekleşemez. Yani ilk ayrışan α_1 -katı çözeltileri, α_2 bileşimine ulaşamazlar. T_2 sıcaklığında oluşan α_2 katı çözeltisi kristalleri, α_1 çekirdeklerinin çevresine tabakalar halinde yerleşirler. Böylece tüm katı çözeltinin ortalama bileşimi yaklaşık α_1 ' civarında olur. Katılaşma olayının bitmesi gereken T_3 sıcaklığında da ortalama bileşim α_3 değil, α_3' değerindedir, yani kaldıraç kuralına göre geriye bir miktar S_3 eriyiğinin kalması söz konusudur.



Şekil 3.9 İki bileşenli alaşımlarda mikrosegregasyon oluşumu

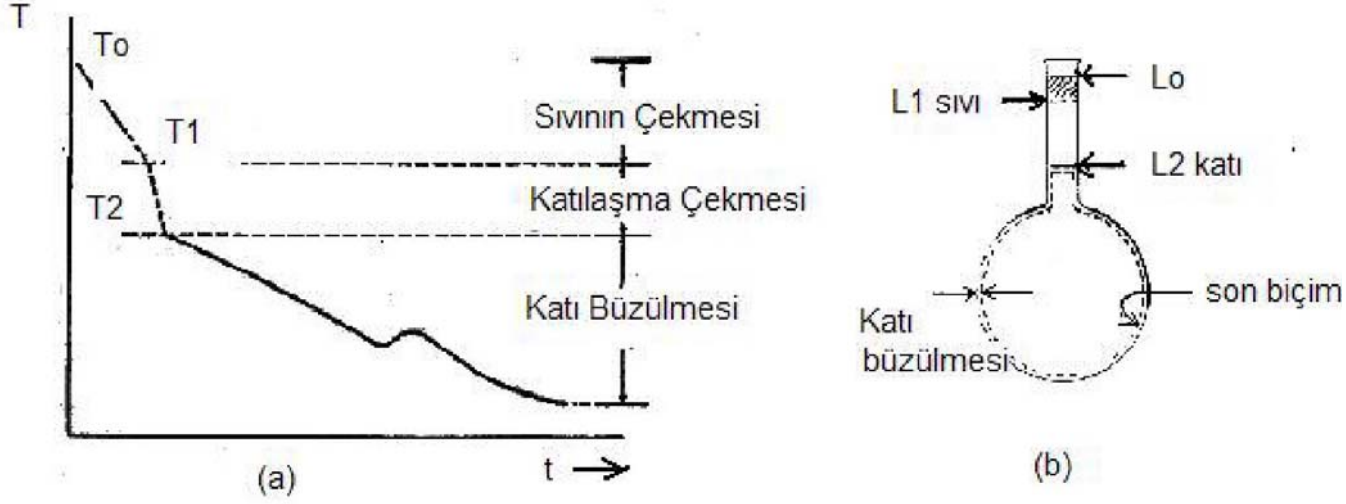
Bu nedenle eriyik katılaşmasını solidüs sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda tamamlayabilir (solidüs sürüklenmesi). Son olarak tanelere T_4 sıcaklığında α_4 katı çözeltilisi tabakaları eklenir, bu tabakanın B-atomu derişikliği başlangıçta sıvının bileşiminden daha yüksektir. Ancak bu şekilde tanelerin ortalama bileşimi ilk eriyiğin derişikliğine ulaşır ($a_4' = c_0$)

Katılaşma aralığı olan her alaşımın döküm yapısında görülebilen mikrosegregasyon veya tabakalı katılaşma olarak adlandırılan bu olay, istenmeyen özellik derişimlerine neden olur. Bu olumsuzluk,

- Katılaşma aralığı ne kadar büyük,
- Soğuma ne kadar hızlı,
- Olaya katılan elemanların yayınma katsayıları ne kadar düşük ise, o kadar belirgin olarak ortaya çıkar.

Katı çözeltilerin tabakalı olarak katılaşması sonrasında, mikrosegregasyonun malzeme özelliklerindeki olumsuz etkilerini gidermek için solidüs sıcaklığının hemen altında bir homojenleştirme tavı uygulanabilir. Ancak tutma süresi çok uzun olan bu ısıt işlem, ekonomik nedenlerle çok zorunlu durumlarda uygulanır.

3.4.3 Katılaşma Sırasında Oluşan Hacim Azalmaları



Şekil 3.10 Katılaşma sırasında hacim değişimleri
Çekme ve büzülme olaylarının şematik gösterilişi

Katılaşma ve soğuma sırasında bazı özel durumların dışında metallerde daima hacim azalmaları söz konusudur. Bu hacim azalmaları üç aşamada oluşurlar (Şekil 3.10):

- a) Sıvının Kendini Çekmesi ($T_0 - T_1$):** Döküm sıcaklığından itibaren katılaşmanın başlayacağı sıcaklığa kadar olan soğuma sırasındaki hacim azalmasıdır.
- b) Katılaşma Çekmesi ($T_1 - T_2$):** Sıvı/katı dönüşümü sırasında atomların yeniden düzenlenmesi ile ortaya çıkan hacim azalmasıdır.
- c) Katının Büzülmesi ($T_2 - \text{Oda Sıc}$):** Katılaşmasını tamamlamış parçanın oda sıcaklığına kadar soğuması sırasındaki hacim azalmasıdır.

Sıvının kendini çekmesi ve katılaşma çekmesi nedeniyle döküm boşlukları, gözenekler, sıcak yırtılmalar ve iç gerilmeler gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Katının büzülmesi ise parçanın küçülmesine, yani boyut değişimlerine neden olur, fakat bu durum kalıp boşluğunu oluşturmak için kullanılan modellerin boyutlandırılması sırasında dikkate alınarak istenilen son boyutların elde edilmesi kolaylıkla sağlanır. Ancak katılaşmış parçanın kalıp içinde büzülmesi serbestçe gerçekleşemez ise çarpılmalar, çatlaklar ve iç gerilmeler ortaya çıkacaktır.

Çizelge 3.1 Bazı malzemeler için katılaşma sırasında oluşan hacim azalmaları

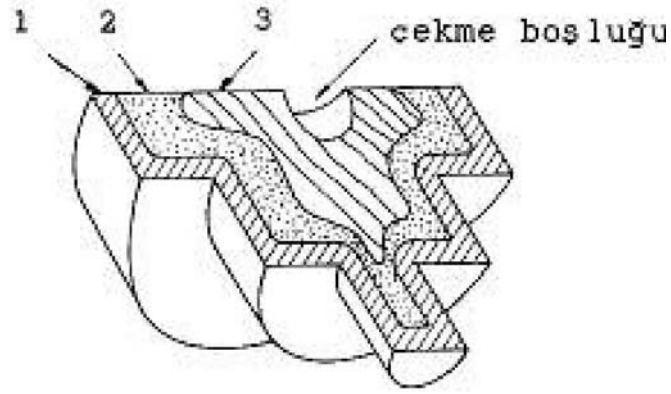
MALZEME	Katılaşma Çekmesi (%)	Katının Büzülmesi (%)
Kır dökme demir	1,8	3,0
Basit karbonlu çelik	3,0	7,2
Alüminyum alaşımları	7,0	5,0
Bakır alaşımları	5,0	6,0

Kalıp içine dökülmüş metalin katılaşması, önce ısının hızla uzaklaştırıldığı cidarlarda katı bir kabuğun oluşumu ile başlar ve bu kabuğun kalınlaşması ile devam eder (Şekil 3.11). En son katılaştıran bölgede ise hacim azalmaları nedeniyle bir çekme boşluğu oluşur. Hacim azalması çok az ve son katılaşma bölgesi iç kısımda ise, boşluk yerine sıcak yırtılma veya iç gerilmeler meydana gelebilir.

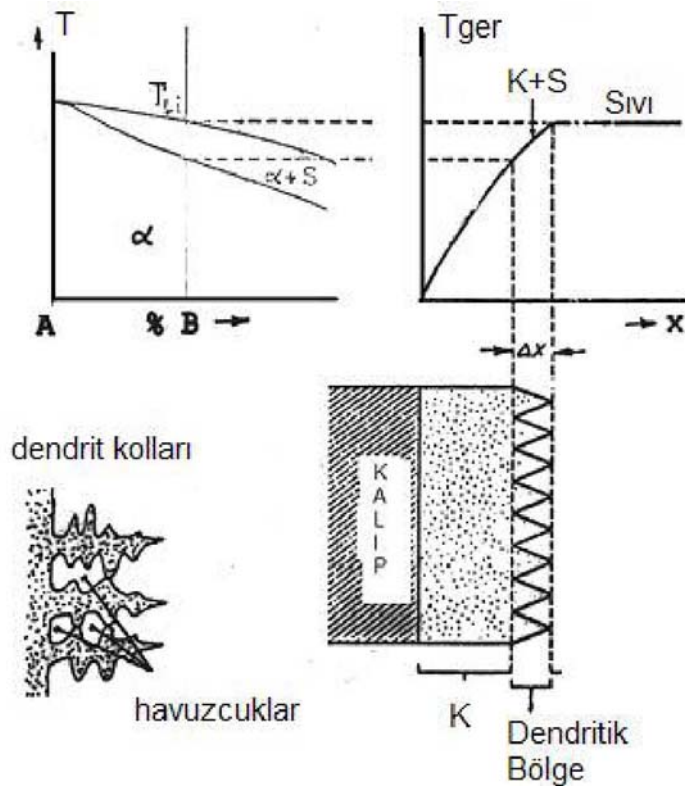
Alaşımlarda sıvı/katı dönüşümü T_{Li} ile T_{So} arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleştiğinden, katılaşma cephesinde sıvı ve katı fazların birlikte görüldüğü bir katılaşma bölgesi (Δx) söz konusudur (Şekil 3.12). Kristal büyümesi dendritik ise katılaştıran dendrit kolları arasında küçük sıvı metal havuzcukları hapsolacak ve bu havuzcuklardaki katılaşma sonrasındaki çekme boşlukları mikro gözenekler olarak ortaya çıkacaktır.

Mikro gözeneklerin miktarı, katılaşma cephesinin genişlemesiyle artar. Sıvı ile katının birlikte bulunduğu bu bölgenin dar olması için:

- a) Katılaşma aralığı dar olmalıdır. Dolayısıyla döküm malzemesi olarak örneğin ötektik bileşimdeki alaşımlar tercih edilmelidir.
- b) Isı uzaklaştırılması yavaş, yani sıcaklık gradyanı dik ise yapısal aşırı soğumanın söz konusu olduğu katılaşma cephesi ortadan kalkar veya genişliği azalır ve mikrosegregasyon önlenir. Söz konusu sıcaklık gradyanını kontrol eden parametrelerin başlıcaları döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, eriyiğin ısı içeriği ve kalıbın ısı uzaklaştırma özellikleridir.



Şekil 3.11 Katılaşma sırasında çekme boşluğu oluşumu



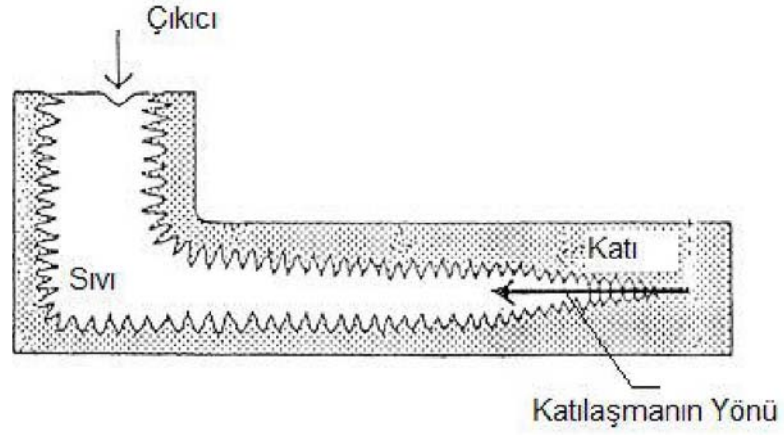
Şekil 3.12 Alaşımlarda katılaşma cephesi

3.4.4 Kalıp İçinde Katılaşmanın Yönlendirilmesi

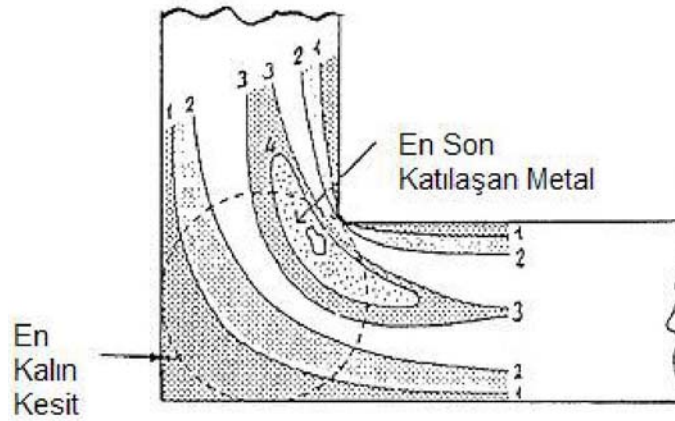
Kalıp içine doldurulan sıvı metalin tümü aynı anda katılaşmaz. Katılaşmanın hangi bölge veya bölgelerde başlayıp, nasıl ilerleyeceği ve nerede son bulacağı çekme boşluklarının oluşacağı yerleri belirler. Kalıbın ısı uzaklaştırma özellikleri her yerde aynı ise, katılaşma öncelikle soğumanın hızlı olduğu ince kesitlerde başlar ve bu sırada oluşan hacim azalmaları nedeniyle o ana kadar katılaşmamış olan kalın kesitlerdeki sıvı metal bu bölgeleri besler. İyi tasarlanmış

bir kalıpta, katılaşma kalın kesitlerin ince kesitleri beslemesiyle kademeli olarak ilerlemeli ve en son katılaştan bölgelerin dışa açık olan yolluk ve çıkıcılarda kalması sağlanmalıdır. Böylece çekme boşluğu veya diğer kusurların parça içinde oluşması önlenir. Döküm kalıplar için çok önemli olan bu tasarım prensibi, katılaşmanın yönlendirilmesi olarak adlandırılır (Şekil 3.13). Döküm yöntemiyle üretilcek parçaların tasarımında da boyutlandırma ve biçimlendirmelerde bu durum dikkate alınmalıdır.

Katılaşmada en sorunlu bölgelerden biri de köşelerdir. Birleşme noktasındaki kesit, genellikle birleşen kesitlerden büyük olduğundan, bu bölgeler en son olarak katılaşır ve iç kısımlarında çekme boşlukları oluşabilir (Şekil 3.14). Dolayısıyla bu bölgelerde ya kesit inceltilmeli, ya da soğutma plakaları yardımıyla buralarda soğuma hızlandırılarak katılaşmanın köşelerden başlaması ve kollara doğru devam etmesi sağlanmalıdır.



Şekil 3.13 Yönlendirilmiş katılaşma

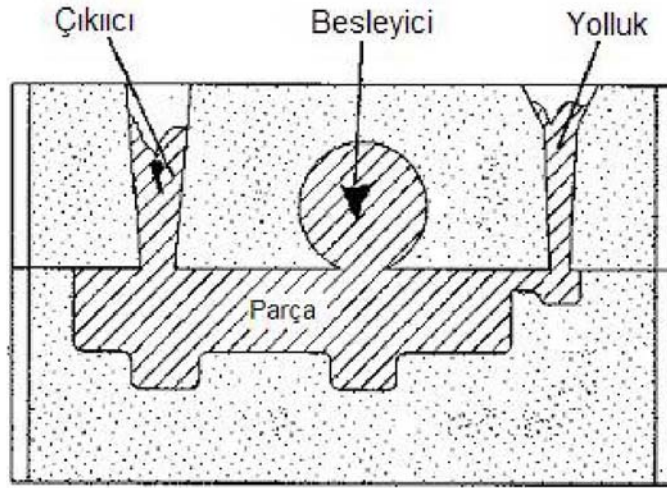


Şekil 3.14 Köşelerde katılaşma

Parça geometrisi nedeniyle kalıp içindeki katılaşmanın istenildiği gibi yönlendirilmesinin mümkün olmadığı durumlarda, katılaşmanın istenen bölgelerde başlayıp istenilen yerlerde sonlanması için soğutma plakalarından veya çekme oluşabilecek yerlerin sıvı metal ile beslenebilmesi için çıkıcı ve besleyicilerden yararlanılır.

3.4.4.1 Çıkıcı ve Besleyiciler

Çıkıcı ve besleyicilerin görevi, kalıp içinde katılaşan parçanın iç ve dış çekme boşlukları oluşabilecek bölgelerini sıvı metal ile beslemektir. Yani çıkıcı ve besleyiciler, sıvı metal depoları olup en son katılaşacak bölgeler olarak tasarlanmışlardır. Çıkıcılar atmosfere açık, huni biçiminde; besleyiciler ise dışarıya kapalı ve genellikle küresel kalıp elemanlarıdır (Şekil 3.15). Besleyiciler biçimleri gereği daha yavaş soğuduklarından, döküm sonrasında parçadan ayrılmaları daha kolay olduğundan ve kalıbın istenilen her bölgesine yerleştirilebildiklerinden daha çok tercih edilirler.



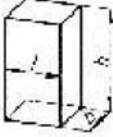
Şekil 3.15 Çıkıcı ve besleyiciler

Çıkıcı ve besleyicilerin hacmi ve şeklini, sıvı metal ile besleyecekleri bölgenin büyüklük ve biçimi belirler. Çıkıcı veya besleyiciler her zaman en son katılaşan bölgeler olmalı, yani bunların katılaşma süresi besledikleri bölgenin katılaşma süresinden daha uzun olmalıdır. Kalıp içinde soğuyan bir parçanın tümünün veya belirli bir bölgesinin katılaşmasının tamamlanması için gereken süre Chvorinov kuralı olarak tanınan bağıntı ile hesaplanabilir:

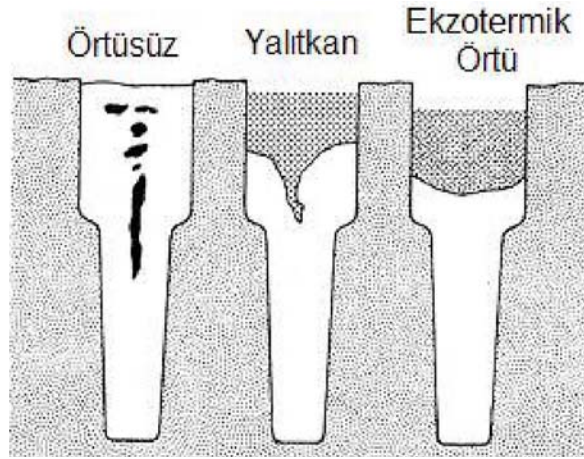
$$KS = C_k (V/A)^n$$

Burada KS katılma süresi, C_k kalıp katsayısı, V katılan parçanın hacmi, A ise katılan parçanın yüzey alanıdır. Görüldüğü gibi parça geometrisi bakımından katılma süresini parçanın V/A (hacim/soğuma yüzeyi) oranı belirlemektedir, dolayısıyla bu oran $M = V/A$ katılma modülü olarak adlandırılabilir. Diğer koşulların aynı kalması durumunda M değeri büyüdükçe katılma süresi artar. Çizelge 3.2'de bu modülün değişik geometriler için hesaplanmış değerleri verilmektedir. Çıkıcı ve besleyicilerin besledikleri bölgelerden daha geç katılmaları gerektiğinden, katılma modülleri daha büyük olmalı, yani $M_{\text{besleyici}} > M_{\text{parça}}$ olarak seçilmelidir.

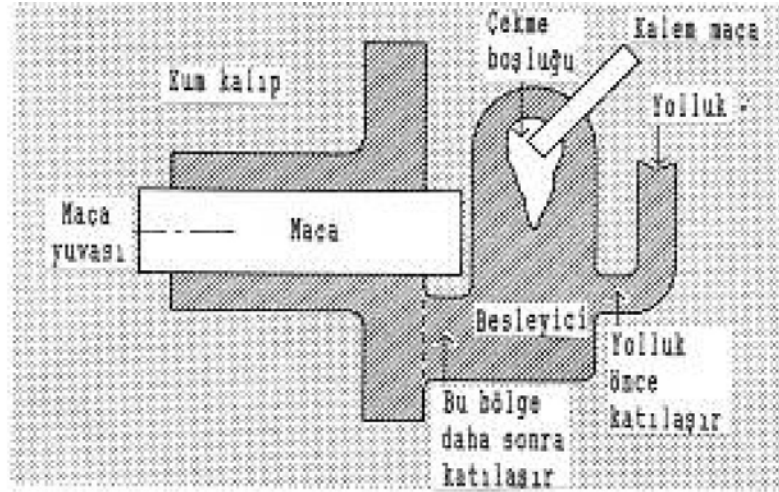
Çizelge 3.2 Değişik geometrilere sahip parçaların katılma modülleri

	M		M
	$d/6$		$\frac{d \cdot h}{2d + 4h}$
	$l/6$		$\frac{l \cdot b}{2(l + h)}$

Besleyici ve çıkıcıların, katılırken hacmi azalan parçayı sıvı metal ile besleyebilmeleri için atmosfer basıncı ile sürekli temasta olmaları gereklidir. Bu nedenle çıkıcının üstünde bir kabuk oluşmaması için yalıtkan veya egzotermik örtülerden yararlanılır (Şekil 3.16). Besleyicilerde dış kısımda daima bir kabuk oluşur, bu nedenle besleyicinin atmosfer basıncı ile temasını sağlamak için de kalem maçalardan yararlanılır (Şekil 3.17). Gözenekli olan kum kalıp ve kalem maça gaz geçirgenliğini sağladığından, besleyici içinde atmosfer basıncı hakim olur.



Şekil 3.16 Çıkıcılarda yalıtkan ve ekzotermik örtülerin kullanılması

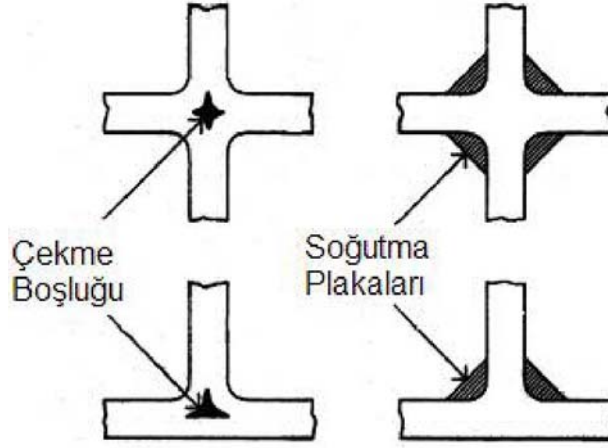


Şekil 3.17 Besleyicilerde kalem maçaların kullanılması

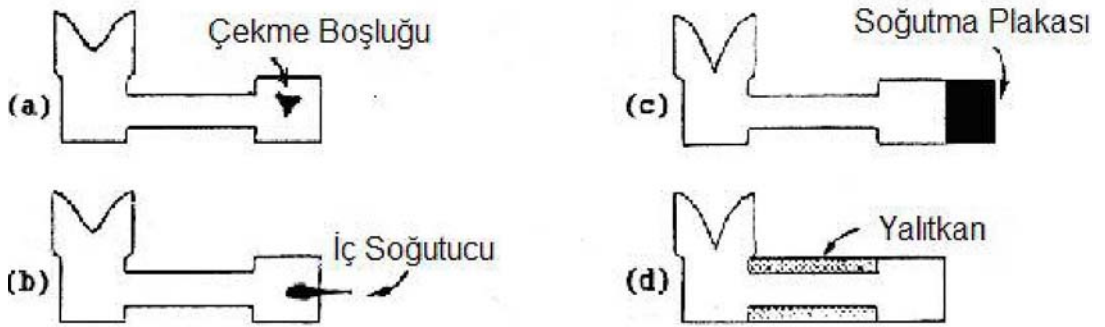
3.4.4.2 Soğutucular

Katılaşmayı yönlendirmek ve çekme boşluklarının oluşmasını önlemek için, bazı durumlarda çıkıcı ve besleyiciler yerine soğutucu plakalar veya iç soğutuculardan yararlanılır. Bunlar çelik, dökme demir, bakır v.b. malzemelerden yapılmış kalıp elemanları olup, kalıplamada kalıp boşluğunun duvarına yerleştirilirler. Bu sayede en son katılaşması beklenen ve normal soğumada çekme boşluğu oluşacak bölgeler daha hızlı soğutularak katılaşmanın buralardan başlatılması ve istenilen şekilde yönlendirilmesi mümkün olur (Şekil 3.18).

Soğutma plakalarının yerleştirilmesinin güç olduğu bölgelerde iç soğutuculardan yararlanılabilir. Bir diğer çözüm de kalıbın bazı bölgelerinin yalıtılması yoluyla katılaşmayı yönlendirmektir. Şekil 3.19’da bu seçeneklerin tümü toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.18 Çekme boşluklarının soğutma plakaları yardımıyla önlenmesi



Şekil 3.19 Çekme boşluklarının önlenmesi için soğutucu ve yalıtkanlardan yararlanılması

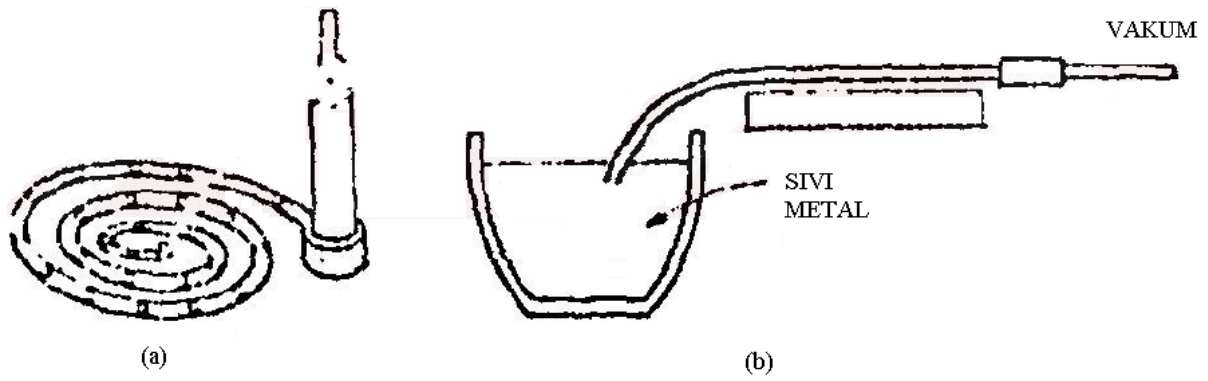
4. AKICILIK

Kaliteli dökümlerin üretimi, birçok metalürjik etkenlerin yerine getirilmesiyle mümkündür. Dökümcülükte hatasız bir döküm elde edebilmek için sıvı metalin oluşturulan kalıpta en uç köşelere kadar katılaşmadan yürüyebilmesi gerekir. Metalin kalıbı tam olarak doldurmadan katılaşması sakat dökümlerin üretimine neden olmaktadır. Bu yüzden, dökümhanelerde pratik olarak yapılabilen akışkanlık testi ile sıcaklık ve bileşime bağlı olarak döküm şartları belirlenmelidir.

Metalin akıcılığı, ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda artmakla birlikte, sıcaklığın aşırı artışı birçok olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Katılan alaşım elementlerinin değişik reaksiyonlarla sıvıdan uzaklaşması, kalıbın deformasyonu, tane büyümesi gibi etkiler görülebilmektedir. Bunun için bir optimum sıcaklığın tespiti gerekir. Ergime sıcaklığının 100-150°C üzerindeki bir sıcaklıkta döküm yapılmalıdır. Bileşimin akıcılığa etkisi ise farklı olmaktadır. Örneğin dökme demirlerde karbon eşdeğerini artıran elementlerin katılması akıcılığı olumlu yönde etkilemektedir.

Geniş anlamda akışkanlık; sıvı metalin kalıp geçitlerinden akarak, kalıbın girinti çıkıntılarını doldurabilme özelliğidir. Akıcılık; viskozite ve yoğunluk gibi sıvının sadece kendisinin bir özelliği değil, fakat döküm kalıbının içindeki belirli koşullardaki karmaşık davranışdır (Kınikoğlu, 1993).

Metal, kalıba bir veya daha fazla sayıda yolluk vasıtasıyla girer. Yolluktaki metal katılaşmadan önce kalıp boşluğu dolduramazsa, "metal yeterince akıcı değildir" denir. Dolayısıyla, akıcılık terimi dökümcüye fizikçiden farklı bir anlam ifade eder. Fizikçiye göre akıcılık viskozitenin tersidir. Dökümcüye göre ise işlem karakteristiğinin ampirik bir ölçüsüdür. Dökümcü bu özelliği çeşitli akıcılık deneylerinden biriyle ölçer. Bu deneylerde sıcak metal, kesiti küçük olan uzun bir kanal içine akıtılır (kanal oda sıcaklığındadır). Akışın katılaşma dolayısıyla durmasından önce kat ettiği mesafe akıcılığın ölçüsüdür. Genel tipte iki akıcılık deneyi, akıcılık spirali ve vakum akıcılık deneyi Şekil 4.1’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.1 Spiral ve vakum deneyi
(Flemings, 1976)

Akıcılık deneyi kanalına, ergime noktasında dökülen saf bir metalin akma ve katılaşması incelendiğinde katılaşmanın metalin kanala girdiği anda kanal girişinde başladığı görülür. Bu nedenle, katılaşmanın öncelikle kanal girişinde başlamış olması sebebiyle burada akış tıkanır. Metalin durmadan aktığı toplam uzunluk akıcılığı verir (Flemings, 1976).

Her metalin ve alaşıminin belirli bir kalıp doldurma sıcaklığı vardır. Sıvı metal düşük sıcaklıklarda boşaltılırsa kalıp içerisinde nispeten çabuk katılaşır ve ince kesitleri doldurmaz. Eğer metal çok aşırı ısıtılmışsa, yolluk sistemindeki ve kalıp boşluğundaki kum, çok pürüzlü çıkar. Kalıp doldurma sıcaklığının özenle belirlenmesi gerekir. Fakat sağlam bir döküm elde etmek için sadece döküm sıcaklığının iyi tespit edilmesi, yolluk sisteminin ve besleyici boyutlarının doğru hesaplanması yetmez. Katılaşma sırasında oluşan sıcak çatlamlar, kalıcı gerilmeler veya talaş kaldırma esnasındaki distorsiyonlar gibi problemlerle de karşılaşılabilir (Ersümer, 1976).

4.1 Cürufun Akıcılığı

Yapışkan ve sürtünme katsayısı yüksek olan cürufların bu özelliklerini gidermek amacıyla fırın veya potalara cüruf yumuşatıcı maddeler katılır. Bu maddelerin ergime sıcaklıkları düşük olup cürufu oluşturan ana maddelerle birleşerek onların akıcılığına etki eder ve ergimiş madenden ayrılmasını kolaylaştırır. Silikatlar ve kok külünden oluşan kupol cürufunun akıcılığı kireç taşı ilavesiyle ıslah edilir. Bu iş için kullanılan kireç taşının, SiO_2 ve Al_2O_3 miktarı düşük olmalıdır. Az miktarda flospar ilave edilerek fırın cüruflarını akıcı hale getirmek de mümkündür. Flosparda %85 oranında CaF_2 bulunur. Fazla olmamakla birlikte kupol ocaklarında cürufu daha akıcı yapmak ve ergimiş dökme demirdeki kükürdü cüruf

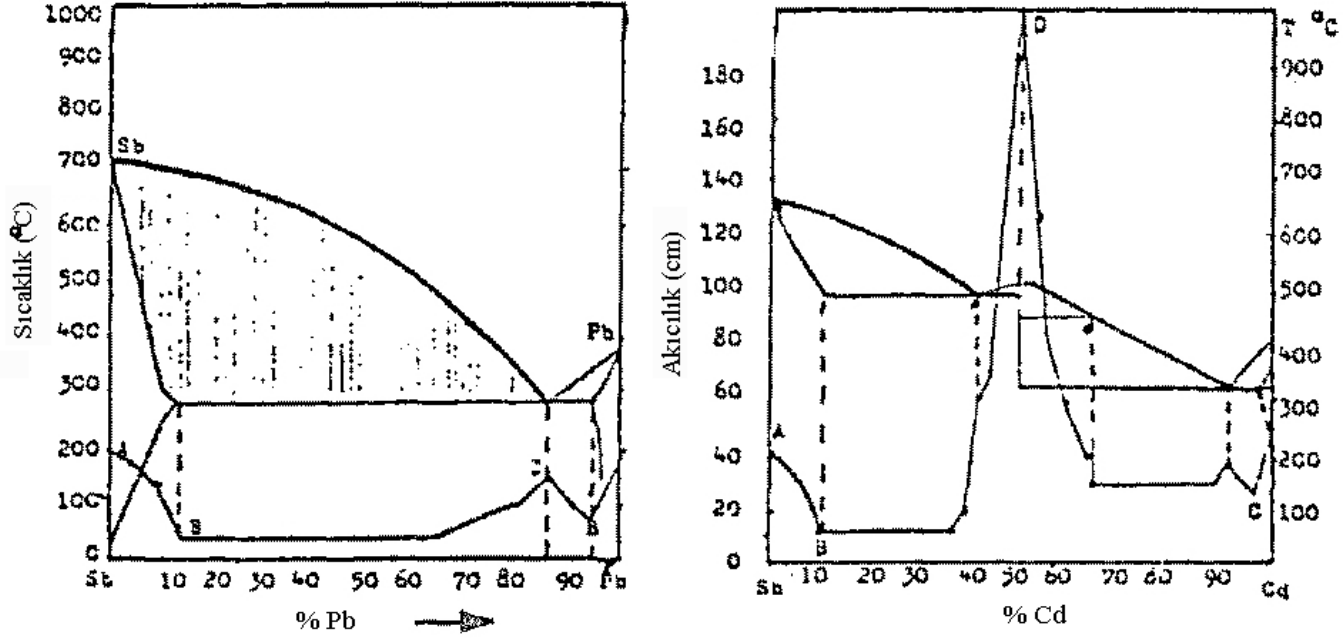
içinde tutmak suretiyle kükürt miktarını daha da düşürmek için, bu ocaklara soda (Na_2CO_3) ilave edilir

4.2 Metallerin Akıcılığı ve Akıcılığı Etkileyen Faktörler

Akıcılığın belirlenmesinde metal ve kalıp karakteristikleri göz önünde tutulur. Metal karakteristikleri söz konusu edildiğinde, akıcılık üzerine az veya çok etki eden faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- 1-Alaşımanın bileşimi
- 2-Ergimiş alaşımanın sıcaklığı
- 3-Sıvı metalin sürtünme katsayısı
- 4-Ergimiş alaşımanın yüzey gerilimi
- 5-Yüzeyde oluşan oksit tabakası
- 6-Sıvı metal yüzeyinde tutulan gaz tabakası
- 7-Sıvı metalin içinde yüzen cüruf parçacıkları
- 8-Sıvı metal içerisinde süspansiyon halinde bulunan yabancı maddeler
- 9-Katılaşma esnasında yapı içinde oluşan çökelekler
- 10-Kalıbın özellikleri

Bu faktörlerden ilk ikisi çok önemlidir. Aşırı ısı göz önüne alınırsa, aşırı derecede ısıtılan metal kalıp içinde sıvı halde daha uzun süre kalacağından, helisel kalıp içinde kat edilen mesafe daha büyük olacaktır. Ancak, alaşımanın bileşiminde meydana gelen değişme katılaşmayı nasıl etkiliyorsa, akıcılığı da öylece etkileyecektir. Örneğin, Şekil 4.2’de verilen Kurşun-Antimon ve Antimon-Kadmiyum alaşım sistemlerinin denge diyagramları üzerinde gösterilen akıcılık-bileşim ilişkisi incelenecek olursa, en iyi akıcılık saf metaller ve ötektik bileşimlere sahip sıcaklıkta katılaşan alaşımlarda, en kötü akıcılık ise katılaşma aralığı en geniş olan alaşımlarda görülür. Bu tip malzemelerde katılaşma mekanizması alaşımınkinden farklı olduğundan ve katılaşma kalıp duvarından içeriye doğru ilerlediğinden sıvı metalin helisel kalıp içindeki akışına bir engel teşkil oluşturmaz. Ötektik bileşime sahip alaşımların katılaşması bazı yönlerden saf metallerinkine benzediğinden akıcılıkları da benzemektedir. Buna karşılık katılaşma sıcaklık aralığı en geniş alaşımlar, etrafı sıvı ile çevrili dendritlerden oluşan yarı katı halde bulunacağından, en düşük akıcılığa sahip olurlar. Yüksek sıcaklıklarda katı cisimler yumuşak, sıvılar ise daha akıcı halde bulunur (Arıkan, 1991).

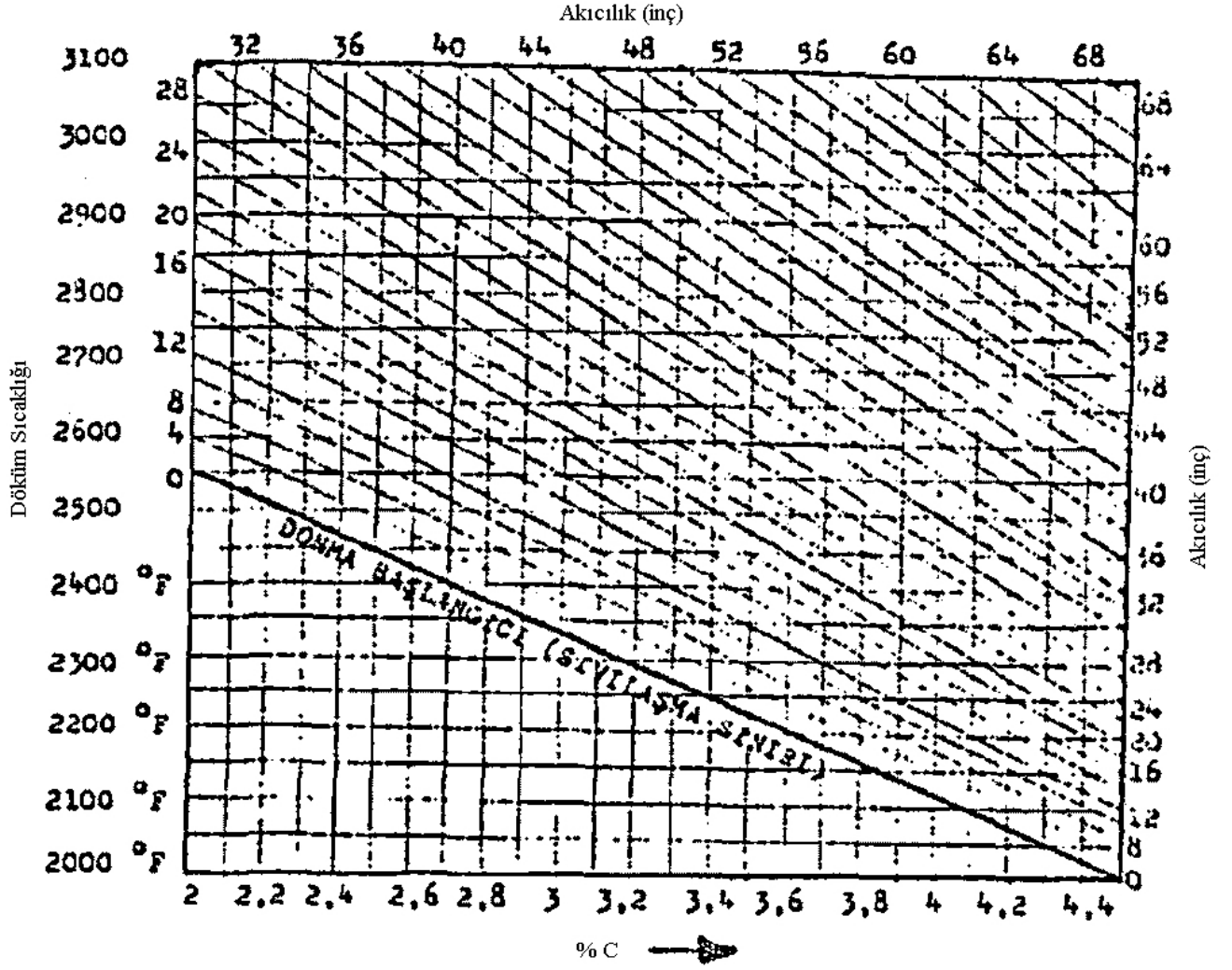


Şekil 4.2 İkili diyaigramlar üzerine işlenmiş bulunan akıcılık eğrileri
(Arıkan, 1991)

Geniş katılma sıcaklık aralığına sahip alaşımlar dar katılma aralığına sahip olanlardan daha düşük akıcılığa sahiptirler. Hatta çeşitli alaşımların akıcılığını basit olarak katılma aralığı ile ilgili bilgilerden yararlanarak kabul edilebilir doğrulukta hesaplamak mümkündür (Kınıkoğlu, 1981).

Diğer şartlar aynı kalmak kaydıyla iki farklı sıcaklıkta dökülen aynı cins malzemedен sıcaklığı yüksek olanın sıcaklığı düşük olandan daha fazla akıcı olduğu ve akıcılık spiralinde daha uzun yol aldığı deneylerle ispatlanmıştır. Şekil 4.3'de kır ve yumuşak dökme demirler için akıcılığın döküm sıcaklığı ve kimyasal bileşimle nasıl değiştiği gösterilmiştir.

$$\text{Bileşim Faktörü} = \%C + 1/4 \%Si + 1/2 \%P$$



Şekil 4.3 Kır ve yumuşak dökme demirlerde döküm sıcaklığı ve bileşimin akıcılığa etkisi

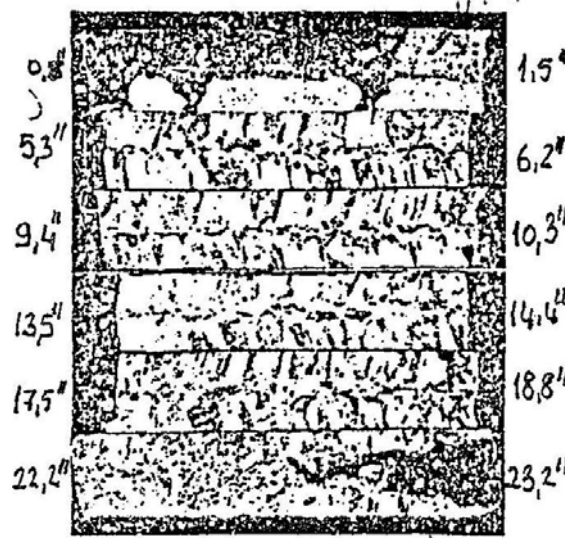
(Arıkan, 1991)

Kimyasal bileşim ve sıcaklık dışında diğer faktörlerin akıcılığa etkileri oldukça az sayılır. Oksit tabakaları, cüruf ve enklüzyonlar gibi metalin kalıp boşluğuna serbestçe akışını önleyen maddeler örneğin uygun yolluk biçimleri, süzme, kepçe altından akıtma ve üstten sıyırma gibi yollarla bertaraf edilmelidir. Kalıbın özellikleri de bazen döküm esnasında zorluklara neden olabilir. Örneğin, yüksek ısı iletkenliğine sahip kalıp, ergimiş metalin çabucak soğuyarak kalıp boşluğunu tam olarak doldurmadan önce katılaşmasına sebep olabilir. Bu nedenle kalıp malzemesi, kalıp biçimi ve yolluk düzeni gibi hususların da akıcılıkta dikkate alınması gerekir (Flemings, 1976).

Akıcılık metallerin özelliklerinden birisidir ve metallerin serbest ve eşit bir şekilde kalıp içerisine akmasını sağlar. Akmaya karşı direnç olmadan, metal donmadan evvel kalıbın dolması istenir. Bu özellik için geçmişte dökülebilirlik, akabilirlik, akış gücü ve sıvı hayatı

gibi kelimeler tercih edilmiştir ve viskozitenin tersi olarak adlandırılan fiziksel özel bir manayı ifade ederler. Fakat son yıllarda literatürde sıvılık katsayısı terimi akışkanlık için kullanılmaktadır. Böylelikle akışkanlık teriminin kapsadığı alan artmıştır.

Akıcılık deneyi dökümlerinin yapısı yukarıda incelenen katılaştırma mekanizmasını aksettirir. Şekil 4.4 hemen hemen saf bir alüminyumda uzunluk boyunca enine kesitleri göstermektedir. Kendini çekme boşluğu dökümün önde giden kısmındadır, çünkü bu kısım Şekil 4.5'de çizildiği gibi, akış kesildiği anda tamamen sıvı haldedir. Bütün döküm boyunca taneler hafifçe akıntı yukarısına doğrudur. Daha ileride bu bölümde incelendiği gibi bu durum akış esnasında tanelerin büyüdüğünü göstermektedir. Kanal girişi yakınındaki bölgeler iri taneli olup bunlar akıntı yukarısını göstermez. Bu bölge dökümün aşırı ısısının dağıtıldığı bölgesidir, bu bölge akış kesildikten sonra katılaştır.



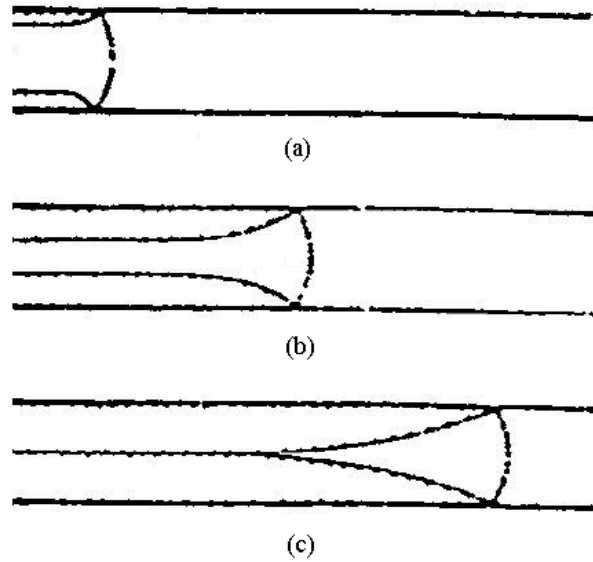
Şekil 4.4 Aşırı ısıyla dökülmüş hemen hemen saf bir alüminyumda makro yapı

(Flemings, 1976)

Burada verilen analiz, esas itibariyle Ragone ve arkadaşları tarafından çıkarılan ve daha sonra diğer kimseler tarafından geliştirilen bir analizin basitleştirilmiş halidir. Bu analizler problemi sıvı akımı bakımından daha ayrıntılı bir şekilde incelemekte ve kontrol dışındaki ısı akışı durumlarını içine almaktadır. Pratikte, akıcılığa tesir eden iki önemli faktör vardır; yüzey gerilimi veya yüzey zarları ve kalıp gazlarından gelen art basınç. Çok küçük kanallar (hemen hemen 2,54 mm'nin altındaki çaplar) bir tarafa, yüzey geriliminin önemli bir tesiri yoktur. Bununla beraber, dökümlerde kafa basıncı üstüne gelecek şekilde artıncaya kadar yüzey gerilimi ince kesitlerin meydana gelmesine mani olabilir. Efektif kafa basıncını artırma

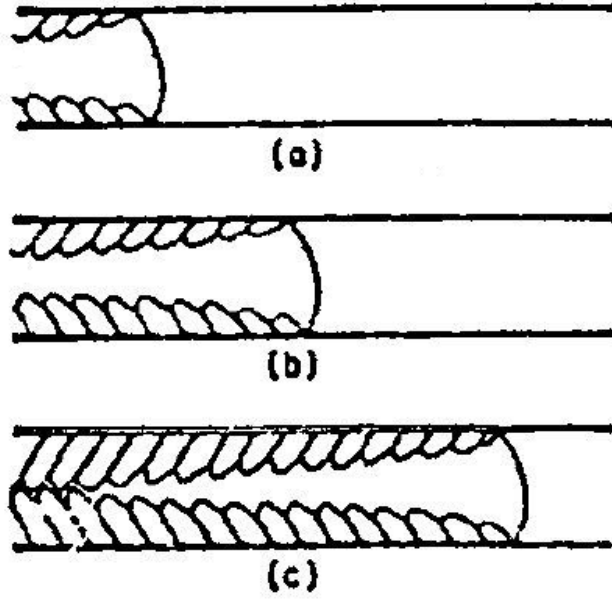
metotları titreşimi, santrifüjü ve dökümün kalıp duvarlarına vakum tatbikini (kalıp gazlarının art basıncını azaltmak için) içine alır. Bütün bu teknikler, bilhassa son ikisi, mücevherat gibi ayrıntının önemli olduğu çok ince kesitteki özel dökümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılır. Pres dökümde ise gerekli basınç, mekanik bir pistonun veya gaz basıncının sıvı metal üzerine tatbik edilmesiyle farklı bir şekilde elde edilir.

Saf metale alaşım elemanlarının ilavesi akıcılığı daima azaltır (belli bir aşırı ısıtma için). Akıcılığın azalmasına sebep katılaştırmanın artık düzlemsel cephede olmamasıdır. Katılaştırmanın başlarında teşekkül eden dendritler sıvı akışına karşı daha çok direnç yaratır. Şekil 4.6 bu durumu sütunsal taneler için (genellikle seyreltik, tane küçültmesi yapılmamış alaşımların akıcılık deneyi dökümlerinde) şematik olarak göstermektedir. Tane küçültmesi yapılmış alaşımlarda, bazı küçük taneler akan sıvının ucuyla beraber taşınır. Böylece, sıvı ucunda yeterli miktarda katının teşekkül etmesiyle akış tıkanıklığı olabilir. Alaşımın bileşimi ötektikçe yaklaştıkça akıcılığın genellikle arttığı saptanmıştır. İlk fikirler, ötektik yakınında metal viskozitesindeki değişmelerin buna sebep olduğu şeklindeydi. Fakat şimdi bu artışın sadece katılaştırma davranışından ileri geldiği bilinmektedir. Ötektik daha çok Şekil 4.5’de gösterilen saf metale benzer şekilde katılaşıp (Flemings, 1976).



Şekil 4.5 Aşırı ısısız saf bir metalin bir akıcılık kanalında katılaştırılması

a) akış başlangıcı b) akış esnasında c) akış sonu (Flemings, 1976)



Şekil 4.6 Seyreltik bir alaşımın akıcılık kanalında akışı ve katılaştırılması

a) Akış başlangıcı b) Akış esnasında c) Akış sonu (Flemings, 1976)

Akıcılık, çeşitli alaşımlardan uygun şekilde dökülebilecek dökümlerin kalınlığını sınırlandırır. Kum dökümlerde bu sınır yaklaşık olarak demir olmayan alaşımlar ve dökme demir için 3 mm, çelik için 6 mm'dir. Özel kalıp malzemelerinde, kalıpların ısıtılmasıyla ve daha önce tarif edildiği gibi basınç tatbiki ile çok daha ince dökümler yapılmıştır. Çelik akıcılığı (belli bir aşırı ısıda) dökme demirinkine yakın olmasına rağmen, ince kesitteki bir kalıp boşluğunu çelik ile doldurmanın dökme demire nazaran zor olması ilgi çekicidir. Buna sebep, genellikle çelik için kullanılan refrakter ve fırınlar vasıtasıyla, ince kesitteki demir dökümlerin dökümünde düzenli bir şekilde kullanılan yüksek miktardaki aşırı ısıları elde etmek mümkün değildir (Arıkan, 1991).

Akışkanlık çok yönlü ele alındığında, viskozite olarak gösterilmemelidir. Fiziksel manada bir sıvının viskozitesi, sıvı içerisindeki hareketlerle ilgilidir. Dolayısıyla verilen bir sıcaklıkta belli bir değeri vardır. Sıvı demir ve çelik için, yüksek sıcaklıklarda viskozite testi zordur. Fakat düşük sıcaklıklarda oldukça basit doğru sonuçlara ulaşılır. Dolayısıyla bir fabrika işçisi, akışkanlıkla ilgili çalışma için basit metotlar kullanmalıdır. Genellikle bu test kanal şeklinde boşluklar içeren kalıplara sıvı metalin dökülmesinden ibarettir. Bu test öncelikle sıvı hayatının ölçülmesiyle alakalıdır. Ölçümler metal ve kalıba bağlıdır. Metalin akışkanlığı iki temel faktöre bağlıdır.

1-Metalin özellikleri

2-Yapılan testin değişkenleri

Metalle alakalı faktörler olarak viskozite, yüzey gerilimi, yüzey filmleri, gaz miktarı, asılı kalıntılar, inklüzyon, katılaşma ve kristalleşme şekli sayılabilirken ikinci grup faktörler ise test parçası, döküm başı, kalıbın özellikleri, dökme hızı ve aşırı ısı olarak düşünülebilir.

4.2.1 Viskozite

Sıvı metallerin viskozite bakımından oldukça farklı değerler aldığı ve kötü ve yavaş akan metalin yüksek viskoziteye sahip olduğuna dair inanış vardır. Gerçekte metallerin viskozitesi oldukça düşüktür. Metallerin kinematik viskozitesi suyunkinden daha azdır. Ayrıca viskozitesi sıcaklıkla çok az değiştiğinden dökümlerde önemsiz bir faktördür. Viskozite ölçümlerinde iki temel metot uygulanır. Birinde sıvı metal sabit bir baş altında tüp içinde akmaya bırakılır. Diğer metotta torsiyon sarkacı kullanılır. İlk metot erime noktaları düşük metallerde kullanılır. Çünkü tüpler cam veya kuvarstan yapılmaktadır. İkinci metot daha yüksek erime noktası olan metallerde başarıyla uygulanır. Çünkü kullanılan aparat sıvı metal içerisinde asılmış refrakter silindir ve diskler içerir. Torsiyonel salınım içerisinde çalışır. Kalay, kurşun, bronzlar, bakır ve dökme demirlerin viskozitesi torsiyonel sarkaç metodu kullanılarak ölçülür. Viskozite ile ilgili önemli veriler Andrade tarafından hazırlanmıştır. Bu metotta bu doluş sıvıların viskozitesinin iç mekaniği hakkında yeni bir teori geliştirmiştir. Enabled ve Andrade pek çok metalin vizkozite değerlerinin hesaplanmasında başarılı olmuşlardır. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Bazı sıvıların viskozitesi

(Metals Handbook, 1978)

Madde	Viskozite (Poise)
Su (Atmosferik basınçta)	0,0105
Civa (Ergime noktası üzerinde)	0,021
Kurşun	0,028
Kalay	0,020
Bakır	0,038
Demir	0,040

4.2.1.1 Belli Metallerin Viskoziteleri

Metallerin viskozitesi suyun viskozitesinin birkaç katıdır. Kinematik viskozite

$$\nu = \mu / \rho = \text{Vizkozite/Yoğunluk}$$

olarak hesaplanır. Burada ν kinematik viskozite, μ dinamik viskozite ve ρ yoğundur.

Akan sıvının viskozitesinden kaynaklanan gerilim etkisiyle karşılaştırılan kinematik viskozite, suyun viskozitesinden daha azdır. Öyleyse metallerin viskozitesi döküm davranışlarıyla ilgili değildir ve viskoziteye ait özellikler ya da etkiler daha başka sebeplerden kaynaklanır (Metals Handbook, 1978).

4.2.2 Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi, komşu atomlar arasındaki çekim kuvvetinden doğar. Sıvılarda her bir atom, komşu atomlarla çevrildiğinden dinamik bir denge sağlanabilir. Sıvı malzemenin yüzeyindeki atomlar, yüzey ile temas eden buhar tabakasındaki atomlarla temas halindedir. Çok karışık ve ince parçaların dökümünde yüzey gerilimi önemlidir. Yüzey gerilim değerinin büyük oluşu zorluk çıkarabilir. Bazen metallere, alaşım elementleri katılarak yüzey gerilimi iyileştirilir. Örneğin, matbaa alaşımının yapımında antimuan aynı zamanda yüzey gerilimini azaltır. Fosforlu bronzlar eridiği zaman yüzeyde oldukça akışkan bir fosfat tabakası meydana gelir. Bu tabaka yüzey gerilimini fazlasıyla düşürür. Fakat yüzey geriliminin çok düşük olması, kalıp malzemesinin metal içerisine nüfus etmesine, dolayısıyla çok pürüzlü olmasına sebep olur. Bu nedenle optimum bir yüzey geriliminin oluşturulması gerekir (Arıkan, 1991).

Sıvı metal kum kalıba döküldüğünde kalıp yüzeyi ıslanmaz. Dar bir kanalda çeliğin yükselmesi sıvının yüzey gerilimi tarafından engellenir. Bu etki geçilen çapın artmasıyla düşer. Bircumshaw çok bilinen metallerin erime noktaları ve yüzey gerilimi değerlerini tablolamıştır.

Çizelge 4.2 Bilinen bazı metallerin yüzey gerilimleri
(Metals Handbook, 1978)

Metal	Sıcaklık (°C)	Yüzey gerilimi (dynes/cm)
Antimuan	640	350
Bizmut	269	378
Kurşun	327	452
Civa	20	465
Kalay	232	526
Kadmiyum	320	630
Çinko	419	758
Gümüş	998	923
Bakır	1131	1103
Altın	1120	1128
Demir (%2,2 C)	1420	1500
Demir (%3,9 C)	1300	1150

Bu tablodan şu sonuçlar çıkarılabilir. Erime noktası arttıkça metallerin yüzey gerilimi artar. Demir ve karbonun iki alaşımı için çeliğin yüzey gerilimi dökme demirin yüzey geriliminden fazladır. Ayrıca sıcaklık arttıkça yüzey geriliminin düştüğü görülmüştür. Yüzey geriliminin yüksek olması metalin dar bir kanala girmesi ve kanal boyunca akması için gereken basıncın artmasını gerektirir.

4.2.3 Yüzey Oksit Filmleri

Özellikle demir dışı alaşımlarda yüzey filmlerin akış gücünü etkilediği tespit edilmiştir. Genders ve Bailey'nin pirinç ingotlar üzerindeki çalışması göstermiştir ki, sıvı metal kalıntılarının hava ile temasında oksitlenmesi, metalin görünen yüzey gerilimini artıran, akışını engelleyen, ingotta önlenemez hatalar oluşturan çinko oksit yüzey filmleri oluşturur. Oksitlenmemiş temiz sıvı alüminyumun yüzey geriliminin belirlenmesi Portevin ve Bastien tarafından gerçekleştirilmiştir. Oksit filmlerinin etkisinin yüzey gerilimi değerini yaklaşık üç katına çıkarmak olduğu tespit edilmiştir. Alüminyumun bu yüzey film özellikleri bulunduğu alaşımı da etkiler. Desch'e göre alüminyum bronzlarının dökülmesindeki zorluğun kabuk oluşumundan kaynaklandığı ve hatta dökümü engellediği, parçalandığı zaman metale karıştığı kirliliği bir döküm tespit edilmiştir. Bu oksit sıvı metalde çözülüyor ise film oluşması söz konusu değildir. Dolayısıyla dökme demir, bakır ve nikel temiz bir döküm ile dökülür. Greaves'e göre alüminyum ile söndürülmüş aşırı oksitlenmiş çeliklerde film varlığı belirlenmiştir. Bu

yüzey filmi akışkanlığı düşürür. Kromca zengin oksit kabuğunun da çeliğin akışkanlığında etkili olduğu düşünülmektedir (Metals handbook, 1978).

4.2.4 Oksitlenme

Genellikle tüm sıvı metaller oksitleyici ortamlarda az çok oksitlenir ve yüzeyde bir oksit tabakası oluşur. Oksitlerin en büyük zararları, malzeme kaybına yol açmaları ve bazı hallerde yolluk düzenini tıkayarak sıvı madenin akışını engellemeleridir. Bu yüzden bazı özel durumlarda döküm, havası boşaltılmış bir ortamda yapılır.

Dökümhanelerde iki tür oksitlenme görülür. Bunlara örnek olarak, alüminyum ve bakırın oksitleri gösterilebilir. Alüminyum oksit kuru ve yapışkan, buna karşılık bakır oksit sıvı ve akıcıdır. Alüminyum oksidin bu özelliğinden dolayı dökümden önce büyük ölçüde sıvı metalin yüzeyinden kepçeyle sıyrılabilir. Fakat bakır oksit akıcı olduğu için yüzdürülerek alınır. Bakır alaşımlarında dökümden önce oksijen giderilebildiği halde alüminyum ve alaşımlarında oksijen giderilemez. Bazı alaşım sistemlerinde bazı elementler oksitlenmede önceliğe sahiptirler. Mg ve Zn içeren alaşımlar buna örnek gösterilebilir.

Oksitlenme hızının oksidin özelliklerine bağlı olarak değiştiği deneylerle ispat edilmiştir. Eğer oksit tabakasının hacmi, metal hacminden daha küçük ise oksitlenme zamanla doğrusal olarak artar. Oksit hacmi metal hacminden büyükse oksitlenme reaksiyonu parabolik olarak değişir. Parabolik kuralın geçerli olduğu durumlarda, oksijenin metal içerisine veya metal atomlarının dışarıya doğru yayılması oksitlenme hızını etkiler. Sıvı metallerin çoğunlukla bu kurala uyduğu görülür. Bazı alaşım sistemlerinde her iki kural da belirli kademelerde geçerlidir. Örneğin, bizmut (Bi) ısıtıldığında 709-821°C arasında oksitlenme yavaş olur ve parabolik kurala uyar. 821°C'nin üzerine çıkıldığı zaman sıvı bir oksit tabakası oluşur. Oksijen bu sıvı oksit tabakası içinde daha hızlı ve kolay hareket etme imkanına sahip olduğundan bu durumda doğrusal bağıntı geçerlidir. Alaşım sistemlerinde oksitlenme karakteristikleri Al-Mg sisteminde olduğu gibi, bazı alaşım elementlerinin ilavesiyle değişikliğe uğrar (Ersümer, 1976).

4.2.5 Yoğunluk

Genel olarak metaller eridiği takdirde hacimlerinde bir artış gözlenmektedir. Bu durum sıvının yoğunluğunun katıninkinden düşük olduğunu gösterir. Yoğunluğun döküme olan etkisi incelenirken doğrudan sıvı metalin yolluk ve besleyicilerde meydana getireceği hidrostatik basıncın muhtemel etkileri hesaba katılmalıdır. Hidrostatik basınç, malzemenin yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğundan döküm kumu seçimi buna göre yapılmalıdır (Arıkan, 1991).

4.2.6 Gaz Miktarı

Bir kanal içerisinde akan metalin yüzey gerilimi etkisi ile ilgili veri uygulamasında bir zorluk şuradan kaynaklanır. Metal ile kalıp tam olarak temas etmeyip, aradaki bir ince tabaka ile ayrılmaktadır. Bu tabaka gerek kalıbın gerekse metalin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Döküm sırasında metalden ortaya çıkan gazlar akışa karşı direnci artırır. Fakat bu gazların oksit filmlerini kırması ya da oluşmasını engelleyerek akışkanlığı artırması da mümkündür (Metals Handbook, 1978).

Vakum altında yapılan ergitme hariç, diğer bütün ergitme işlemlerinde gazlar ergimiş metallere etki ederler. Bu gazlar yakıtın yanması için gerekli olan gazlar, gaz yakıtın bizzat kendisinde mevcut olan gazlar veya havadaki gazlar olabilirler. Bunlar, herhangi bir sıvı veya gaz yakıtın yanması sonucunda oluşan gazların buharını da ihtiva ederler.

Bakır esaslı alaşımlardan pirinç ve bronzun ergimiş halde bulundukları sıcaklıklarda, su buharının bir kısmı atomik hidrojen ve oksijen şeklinde parçalanabilir. Bu halde bulunan oksijenin bazı metalleri oksitlemesi mümkündür. Gazlar içinde su buharından başka, diğer yanma ürünleri olarak, karbon gazları ve tam olmayan yanma dolayısıyla diğer ürünler bulunur. Oluşan çeşitli gazlar üzerinde, yanmaya tesir eden faktörlerden en tesirlisi ergimiş halde bulunan gazlara karşı en büyük ulaştırıcı etkiyi sağlayan, en yüksek sıvı metal sıcaklığıdır. Ayrıca alaşımlar veya metaller, gazları değişik biçimlerde ve oranlarda eritirler. Bakır ile beraber kalay, kurşun, çinkonun bulunduğu durumlarda, bakır içinde erimiş halde oksijen bulunmalıdır. Deneyler göstermiştir ki, saf bakır içerisinde hidrojen, oksijen miktarından daha fazla miktarda erir.

Diğer bir deyişle, azotun sıvı veya katı durumlardan birinde erimemesi mümkün değildir. Bilindiği gibi karbon gazlarının bakır alaşımlarındaki erirliği minimumdur ve erimiş halde bulunan gazların sülfür halde bulunması daha akla yatkındır. Gazların erirlikleri arasındaki

farklılık, ergimiş metaller içerisinde bazı olaylara neden olur. Bakır esaslı alaşımların içerisindeki gazların davranışlarının, demir, çelik, alüminyum ve diğer metallerdeki gazların davranışlarındaki olduğu gibi düşünülebilir. Şu da iyi bilinir ki, bazı metaller minimum derecede gaz eritirler (Ersümer, 1976).

4.2.7 Döküm Süresi

Metalin kesikli akması veya düşük sıcaklıkta dökülmesi kesinlikle istenmez. Çünkü bu durumda metalin henüz kalıbı tamamen doldurmadan donma tehlikesi vardır. Bu da soğuk çatlamalara neden olur. Kalıbın çok çabuk doldurulması da bazı sorunlara sebep olacağından istenmeyen bir durumdur. Çünkü kısa zamanda gereğinden fazla metal yolluk sisteminden geçeceğinden kalıp duvarının erozyonu, pürüzlü yüzey, aşırı derecede büzülme ve diğer bozukluklar kaçınılmaz olur. Böylece, deneme ve sınamalarla bulunabilen optimum bir zaman veya zaman aralığı vardır. Metalin basınç altında kalıba zorlandığı pres döküm veya özel döküm metotlarında, üst limit metalin akıcılığıyla tayin edilir.

Normal kum dökümlerde optimum döküm süresinin tayin edilmesi yolluk sistemi tasarımında ilk adımdır. Bundan sonra yapılacak iş, yolluk sisteminin çeşitli kısımlarının tanzimi ve uygun bir şekilde orantılanmasıdır. Çeşitli döküm alaşımlarının özelliklerine bakıldığında, optimum döküm süresinin ne derece önemli olduğu görülecektir. Döküm parçasının geometrik şekli de önemli bir etken teşkil etmektedir.

Dökme demir gibi bazı metaller, diğer metaller kadar döküm süresine karşı duyarlı değildirler. Fakat yine de dökme demirde optimum döküm süresi, döküm parçasının boyut ve şekli ile yakından ilgilidir. Çelikler, dökme demirden daha geniş bir donma aralığına sahip olduğundan, vaktinden önce donmayı önlemek amacıyla özellikle çabuk dökülmelidir. Al ve Mg alaşımları ise çok yavaş dökülebilir. Böylece çalkantı, oksitlenme ve gazların karışması gibi sakıncalı durumlar önlenmeye çalışılır.

Bütün ticari döküm alaşımlarında etkin döküm süreleri henüz tespit edilmiş değildir. Döküm süresi, dökümcülük tekniğinin gelişmişlik düzeyine, dökümün geometrik şekline ve mevcut teknik personelin yeteneğine bağlıdır. Dökme demir, çelik, pirinç ve bronz için döküm süreleri yaklaşık olarak şöyle verilmiştir.

- Yumuşak kır dökümler için: (500 kg'dan az döküm için)

Döküm süresi; $t(\text{sn}) = k(0,95 + L/0,853) \sqrt{w}$

Burada k akıcılık faktörü olup ötektik bileşimindeki demirin (%4,3 C) sahip olduğu akıcılığın 40 ile bölünmesiyle elde edilir. 40 sayısı 2600°F'de ve ötektik bileşimde demirin akıcılığıdır. Bu faktör demirin bileşimi ile döküm sıcaklığına bağlıdır. L ortalama döküm kalınlığını, w ağırlığı göstermektedir.

- 500 kg'dan fazla yumuşak kır dökümler için:

Döküm süresi; $t(\text{sn}) = k(0,95 + L/0,853) \sqrt[3]{w}$

- Kabuk kalıplara dökülen sfero dökümler için (düşey döküm):

Döküm süresi; $t(\text{sn}) = k \sqrt{w}$

Burada, $k = 1,8$ (3/8 ile 1 inç arasındaki kesitler için)

$k = 1,4$ (Daha ince kesitler için)

$k = 2,0$ (Daha kalın kesitler için)

- Çelik dökümler için;

Döküm süresi, $t(\text{sn}) = k \sqrt{w}$

Burada k, 50 kg'lık dökümler için 1,2'den, 50 tonluk dökümler için 0,4'e kadar değişmektedir.

1 inç kalınlığında ve 200 kg (400 lb) ağırlığındaki bir döküm için aşağıdaki döküm süreleri bulunmuştur.

- 2700°F'da dökülen %4 karbon içeren kır dökümler için;

$$t = (0,95 + 1/0,853) \sqrt{400} = 42 \text{ sn.}$$

- Kabuk kalıplara dökülen sfero dökümler için:

$$t = 1,8 \sqrt{400} = 36 \text{ sn.}$$

- Çelik için:

$$t = 1,0 \sqrt{400} = 20 \text{ sn.}$$

Bir karşılaştırma yapmak üzere 300 lb'den daha hafif pirinç ve bronz dökümler için 15-45 sn'lik süreler tavsiye edilmektedir.

Hangi yoldan olursa olsun, optimum döküm süresi başarıldıktan sonra atılacak ikinci adım, arzu edilen döküm sağlamlığını temine yönelik olarak, yukarıda sıralanan yolluk sisteminin diğer unsurlarını da dikkate alarak döküm sistemini en uygun şekilde kurmaktır (Arıkan, 1991).

4.2.8 Asılı İnklüzyonlar

Asıntı parçalar akmayı engellediğinden, askıdaki katı maddeler sıvının viskozitesini oldukça artırır. İçerisinde ufak miktarda asıntı parça bulunan bir sıvı hiç bir parça bulunmayan bir sıvıdan daha yüksek viskoziteye sahiptir. Pek çok fabrika çalışanı akışkanlığın özelliğini çözülmüş oksitlerin etkisine bağlar. Çözelti içindeki oksitlerin dökme çeliğin akışkanlığını arttırdığına dair bir sonuç yoktur.

4.2.9 Kristalleşmenin Şekli ve Katılaşma

Portevin ve Bastien'in ikili alaşımlar üzerinde yaptıkları testler şu iki kuralın termik etkisiyle sonuçlanmıştır.

1-Akışkanlık katılaşma aralığı ile ters orantılı olarak değişir. Akışkanlık sıvı metal homojen olduğunda, yani saf metal ve ötektiklerde en yüksektir.

2-Akışkanlık katılaşmanın kristal yapısına bağlıdır ve sıvının, dış bükey yüzeyli kristal oluşturduğundaki yapı, dendrit kristal oluşturduğundaki yapıdan daha fazla akışkanlığa sahiptir. Bu iki prensip başka araştırmacılar tarafından da onaylanmıştır.

Geçmişte pek çok çeşit test parçası akışkanlık ölçümünde kullanılmıştır. Ne yazık ki pek çok araştırmacı yeni parçalar denemiş ve eski parçaları kullanmamıştır. Böylece bulunan sonuçların karşılaştırılması imkansızlaşmıştır.

Görünen odur ki; standart test prosedürü belirlenmesi, akışkanlık değerlerinin karşılaştırılması için önemlidir. Şimdiye kadar sıvı metallerin akışkanlığını hesaplamak için, sıvı metalin içinden aktığı dar bir kanal kullanılmıştır. Bu kanal metalin katılaşmasını sağlamak için yeterli metali katılaştıracak, ısı kaybını sağlayacak ve akışı durduracak derecede uzun olmalıdır. Metalin akma kanalındaki uzunluğu akışkanlığın ölçüsüdür. Test parçasından hassaslık beklenirse metali akma kanalına çeken kuvvet faktörü, kanalın boyutları (ölçüleri) ve kalıp malzemesinin karakteristiği arasındaki ilgiler göz önünde bulundurulmalıdır. Akma kanalı test parçalarının çoğu spiral şeklindedir. Kısa boylu düz kanallar da mevcuttur. Şekil ve ölçüler üzerinde yapılan çalışmalar yuvarlak, yarı yuvarlak, yamuk kesitli parçaların tercih edildiğini çünkü bunlarda metalle kalıp arasında temas yüzeyinin minimum olduğunu göstermiştir. Akma kanalının kesit alanı genellikle $1/12$ ile $1/7$ inç² arasında değişir.

4.2.10 Yolluk Sistemi

Hatasız bir döküm parça üretebilmenin en başta gelen koşullarından biri de yolluk sisteminin parçanın özelliklerine uygun olarak dizayn edilmiş olmasıdır. Yolluk sistemi kalıp boşluğunun bir ekidir. Bu ek vasıtasıyla ergimiş metal kontrollü olarak kalıp boşluğuna gönderilir. İdeal bir yolluk sistemi şu işlevleri yerine getirmelidir (Kural, 1981) .

- Sıvı metal kalıp boşluğuna katılma başlamadan evvel dolmuş olmalıdır.
- Sıvı metalin akışı sakin, sabit debili ve minimum türbülanslı olmalıdır. Böylece kalıp gazlarının sıvı metale emilmesi, metalin oksitlenmesi ve kalıbın erozyonu önlenmiş olur.
- Sistem, kalıpta yönsel katılaşmayı sağlayacak şekilde sıcaklık dağılımı yaratmalıdır.
- Sistem, metal ile gelen veya metalin dağılımı sırasında ortaya çıkan cüruf, tortu, kalıp kumu vs.yi tutacak ve kalıba bunlardan arınmış temiz metalin girmesini sağlayacak önlemleri içermelidir.
- Sistem hem kalıplama ve hem de ağırlık açısından ekonomik olmalıdır.

Yolluk çıkış kesiti daima küçük olmalıdır. Pratikte bu yolluğu konik yapmakla çözümlenir. Yapılan incelemeler konik dökücü yolluğundan geçen sıvı metal debisinin düz dökücü yolluktan geçen sıvı metal debisinden %15 daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu olay şu pratik sonuçları içermektedir. Aynı çıkış kesitine sahip olan dökücü yolluklardan konik olanı düz olanından boyca %15 daha kısa olabilir, dolayısıyla sıvı metal düşük bir seviyeden döküleceği için çıkış hızı daha az olacaktır ve tabiki türbülans yaratma olasılığı da azalacaktır (Kural, 1981).

4.2.11 Üst Isı

Dökümhanelerde, katı metalin döküme elverişli sıvı metal haline getirilmesi, bir yakıtı yakarak (gaz, sıvı, elektrik enerjisi) metali ergime sıcaklığına yükseltmekle mümkündür. Şimdiye kadar anlatılanların ışığında, normal bir döküm sıcaklığı ve kompozisyonu elde etmek için ergitme işlemini gözden geçirelim.

Bakır esaslı alaşımlar, herhangi bir ergitme fırınında çok özel bir durum arz ettirmeden ergitilebilirler. Pota ocakları kullanıldığında, fırın atmosferi yönünden özel dikkat icap eder. Bütün bakır alaşımları, pota ocağında hafif oksidan atmosfer altında ergitilir. Bu da fazla hava kullanılacağı anlamına gelir. Pota şarj edilirken yolluk, çıkıcı vs. gibi artıklar önce, ingotlar sonra şarj edilmelidir. Ergitmenin hiçbir safhasında flux (cüruf örtüsü) veya odun kömürü kullanılmamalıdır. Tecrübeler kötü sonuçlar vermiştir. Bakır alaşımlarının ergitilmesinde dikkat edilecek başlıca pratik hususlar:

- 1- Temiz ve buharlaşmayan potalar kullanmak
- 2- Oksidan atmosfer altında ergitmek
- 3- Çubuk ergitmek
- 4- Asla çok aşırı ısıtmamak
- 5- Ergimiş metali yüksek sıcaklıkta uzun süre tutmamak
- 6- Metal ergidikten sonra döküm yapmak
- 7- Ajitasyona mani olmak
- 8- Metalin döküm sıcaklığına kadar soğumasını açık havada yapmak ve soğutma amacı ile katı ilavesi yapmamak
- 9- Deoksidan maddeleri tavsiye edilen miktarlardan fazla kullanmamak
- 10- Ergimiş metali dökümden hemen evvel asla karıştırmamak

Her metal veya alaşıımı ergime noktasına yükseltmek için sıhhatli ısı vermek, ayrıca bu noktada metalin katıdan sıvıya dönüşmesini sağlamak için daha fazla bir ısı miktarı vermek gerekir.

Eğer ergimiş metale ısı vermeye devam edersek, tatbikatta aşağıdaki durumlarla karşılaşmamız mümkündür.

1-Sıvı metale ısı ilavesine devam edildikçe, sıvının sıcaklığı diğer bazı reaksiyonlar vuku buluncaya kadar artar.

2-Metal daha akışkan hale gelebilir.

3- Isı ilavesine devam edilecek olursa, bir müddet sonra banyodaki bazı maddelerin buhar basınçları artar ve bu metal buharları ortamı terk eder.

4-Metal veya alaşımanın bir kısmı oksitlenebilir. Mevcut çeşitli elementler sıcaklık arttıkça oksijen tedarik ederek oksit hale gelmeye meylederler.

5-Gazların erime eğilimi artar. Katı metaller çok az oranda gaz eritebilirler. Sıvı metaller ise bileşime bağlı olarak çok büyük oranlarda gaz eritebilirler (Ersümer,1976).

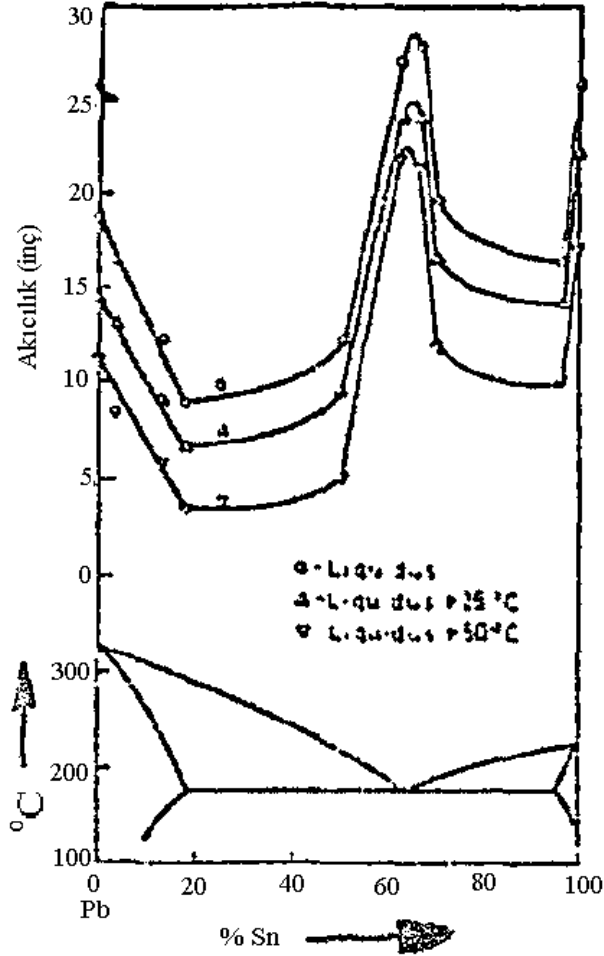
Bir alaşımanın akışkanlığı onun üst ısısına doğrudan bağlıdır. Üst ısı katılaşma başlamadan önce yayılması gereken ısının miktarını belirlediğinden katılaşmanın doğal bir sonucu olarak akışkanlığı etkiler (Kınıkoğlu, 1981).

Sıvı metal sıcaklığı yükseldikçe, ortaya çıkan akma kanalı boyu uzar. Bu sonuç metal yüksek sıcaklıkta daha akışkandır demek değildir. Olabilir de, olmayabilir de. Çünkü fazla spiral boyu sıcaklık aralığı artışı dolayısıyla dolmuş olabilir. Bu olay metalin akış kanalında soğuması yoluyla olur. Üst ısıtma derecesi metal kompozisyonunu bozabilir ya da yüzey oksit filmlerini ve gaz miktarlarını artırabilir. Böylece kanal boyu bundan etkilenir. Somut bulgular gösterir ki alaşımlar sıvı sıcaklığı üzerinde eşit olarak ısıtıldığında aynı akışkanlığa sahiptir (Metals Handbook, 1978).

4.2.12 Bileşim

Bir diğer önemli etkidir. Yüksek akışkanlık genellikle saf metaller ve ötektik bileşimdeki metallerin bir özelliğidir. Katı çözelti oluşturan bilhassa geniş katılaşma aralığına sahip

alaşımlar düşük akışkanlık göstermek eğilimindedirler. Pb-Sn sisteminde akışkanlık-bileşim ilişkisi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bununla beraber her zaman durum böyle değildir. Akma mesafesini, özgül hacim, ergime gizli ısı, alaşımların ısı iletkenliği de etkilemektedir. Isıl özelliklerin etkisine bir örnek olarak alüminyum-silisyum alaşımı gösterilebilir ki burada en yüksek akışkanlık ötektik bileşimde değil birincil silisyumun yüksek ergime ısısı nedeniyle ötektik üstü bir bileşimde meydana gelmektedir. Alaşımların katı hal özellikleri bu gibi katılaşma özelliklerine büyük çapta bağlıdır (Kınıkoğlu, 1981).



Şekil 4.7 Kurşun-kalay alaşımında bileşim ve akışkanlık bağıntısı
(Kınıkoğlu, 1981)

Alaşım elementlerinin Al'nin akışkanlığına etkisi ile ilgili bilgiler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Bazı alüminyum alaşımlarının akıcılığı
(Metals Handbook, 1978)

Alaşım elementleri (%)	İlgili Akıcılık	
	1350°F'de	1450°F'de
5 Si	100	100
10 Cu	103	103
3,75 Mg	77	92
3,75 Mg, 1 Ni	93	99
4,3 Cu	87	92
6 Mg, 1 Mn, 1,5 Ni	103	110

4.2.13 Gaz Problemi

Ergimiş bir bronz içerisinde önemli miktarda oksit bulunması, bronzların akışkanlığını veya dökümün kalitesini önemli ölçüde düşürebilir. Ayrıca akışkan ve döküme uygun alaşımlarla, içerisinde fazla miktarda oksit bulunan akışkan olmayan metaller gibi olan alaşımlar arasındaki farklılığa, bunun sebep olduğu söylenbilir.

Eğer dökümün makinede işlenmesi ve parlatılması veya kaplanması gerekiyorsa, gaz boşluklarının mevcudiyeti büyük bir mahzur teşkil eder. Gaz boşlukları, yzeeye yakın ve genellikle karşılaştığı döküm st derecesinin kenarında bulunur. Bu ince gaz çukurları makine ile işlemenin birinci kademelerinde bariz olarak ortaya çıkabilir. Gaz boşlukları bütün yüzey boyunca devam edebilir. Yukarıda bahsedilen hususlar parlatılacak veya kaplanacak yüzeyler için önemlidir. Gaz boşluklarına göz yumulmaz. Muhakkak giderilmeleri gerekir. Ayrıca gaz boşlukları çatlamaya sebep olabilmektedir (Ersümer, 1976).

4.2.14 Kalıbın zellikleri

Yapılan araştırmalarda özellikle düşük ergime noktalı alaşımlar için önemli veriler kayıt edilmiştir. Bu araştırmalarda sabit kalıplar kullanılmıştır. Fakat son yıllarda tamamen kum kalıplar kullanılmaktadır. Hassaslık nedeniyle kalıp serinlemeye istekli olmamalıdır.

Kalıp sıcaklığında ve kalıbın kuruluk durumundaki ufak sapmalar ve değişmeler elde edilecek spiralin uzunluğunu etkilemez. Kalıp ile sıvı metalin teması sonucu oluşacak gazların kaçışını

sağlamak için kumun geçirgenliği yeterli olmalıdır. Kalıpta gaz ve hava çıkışından emin olmak için spiralın sonu güzel bir şekilde delinmelidir.

Kalıp kumu bağ direnci, sıvı metalin kumu aşındırmasına dayanacak yeterlikte olmalıdır. Kalıp yüzeyi, elde edilen spiralın uzunluğunda oynamalara sebep olabilir. Bu sonucu etkileyen faktörler kumun tane büyüklüğü, kalıp yıkanması ve yüzey kaplamasıdır (Metals Handbook, 1978).

4.2.15 Kalıp Yüzeyi Etkisi

Kalıp kanalları içinden akış, kalıp boyaları ile değiştirilebilen kalıp yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlı olan sürtünme kuvvetlerinden etkilenir. Sıvıda çözünmüş gazların ve metal olmayan kalıntıların varlığı da akışkanlığı bir dereceye kadar etkiler (Kınıkoğlu, 1981).

4.2.16 Boşalma Hızı

Bir parçanın döküm hızı; ağırlık, parça büyüklüğü ve dökümü yapılacak alaşımın tipi gibi faktörlere göre ayarlanır. El kepçesiyle yapılan dökümlerde, hız 4 litre/sn'yi aşar. Genellikle döküm hızı, oluşabilecek sarsıntılardan sakınmak gayesiyle mümkün olduğu kadar düşük tutulur. Düşük tutulan hız, kalıp aşınmaları ile metalin çalkalanmasını minimuma indirir ve özellikle arzu edilen dar katılaşma aralığına sahip alaşımlarda yönlenmiş katılaşmayı destekleyecektir. Diğer bir deyişle, geniş bir katılaşma aralığına sahip alaşımlarda yüksek bir döküm hızı ile birleşik birçok giriş yolluğunun kullanılması döküm içerisinde mikroporozitenin dağılmasına yardım eder. Sarı pirinçlerde, döküm üzerinde istenmeyen sonuçlara sebep olan kalıp cidarlarındaki aşırı çinko oksit birikimlerinden sakınmak gayesiyle yüksek döküm hızı tercih edilir (Metals Handbook, 1978).

Eğer büyük ve geniş bir dökümde, metalin kalıp boşluğunda yavaş yükselmesi ile uzun müddet ısıya maruz kalmasından, döküm kumu kabuğu ve bel vermeler oluyorsa hızlı bir döküm gerekir. Bu tatbikat özellikle nikel bronzları gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımlar için yeterlidir.

Döküm hızı hakkında bir fikir edinmek gayesi ile şu ifadeden faydalanılabilir:

$$V = W/L$$

V=Döküm hızı

W=Döküm ağırlığı

L=Döküm kalınlığı

Test parçasının uzunluğu aynı zamanda akan metalin akma kanalındaki hızına da bağlıdır. Aynı zamanda bu hız kalıbın dökülüş hızına da bağlıdır. Boşaltma hızı bir testten diğerine değişirse aynı yönde uzunluk ta değişir. Öyleyse oldukça dikkatli bir şekilde bütün döküm kalıplarında aynı hızda (yüksek hız tercih edilir) olmalıdır ve kalıp üstündeki dökme yüksekliği daima aynı olmalıdır (Arıkan, 1991).

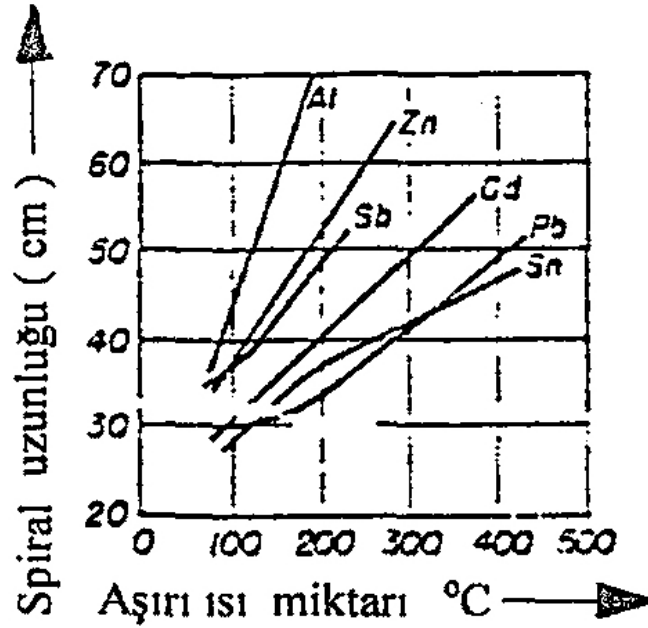
4.2.17 Döküm Başı

Kalıbın temel parçalarından biri döküm başı ve metal haznesidir. Akma kanalının üstündeki bu parçaların yüksekliği spiralın uzunluğunu etkiler. Potadan metalin dökülmesini kesmek ve kalıbın alt kapağına metalin eşit akmasını sağlamak için bir hazne bulunmalıdır (Metals Handbook, 1978).

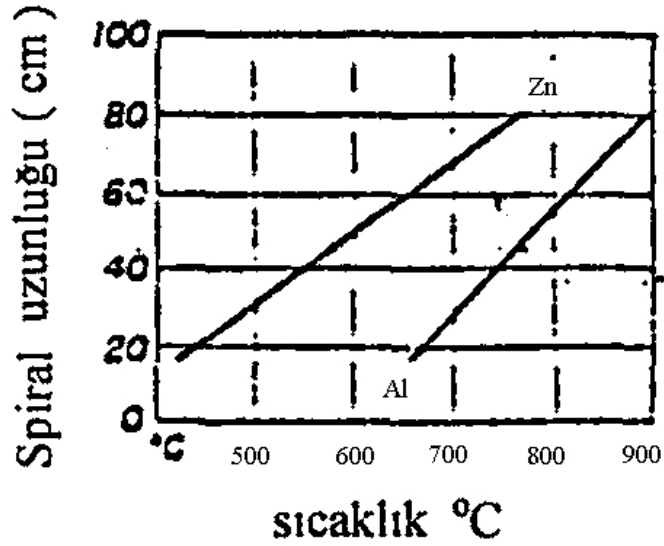
5. METALLERİN AKICILIĞI

5.1 Ergime Sıcaklığı Düşük Olan Metallerin Akışkanlığı

Düşük ergime sıcaklığına sahip olan metallerin üzerinde yapılan çalışmaların çoğu Portevin ve Bastien tarafından sabit kalıp kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.1'deki değerler akışkanlığın doğru bir biçimde hesaplanacağı şekilde bulunmuş ve çizilmiş tam değerlerdir. Şekil 5.2'deki alüminyum ve çinko için çizilmiş eğriler sıcaklık karşısında doğrudan çizilmiş ve Şekil 5.1'deki eğrilerle karşılaştırılabilecek durumlar içerir.

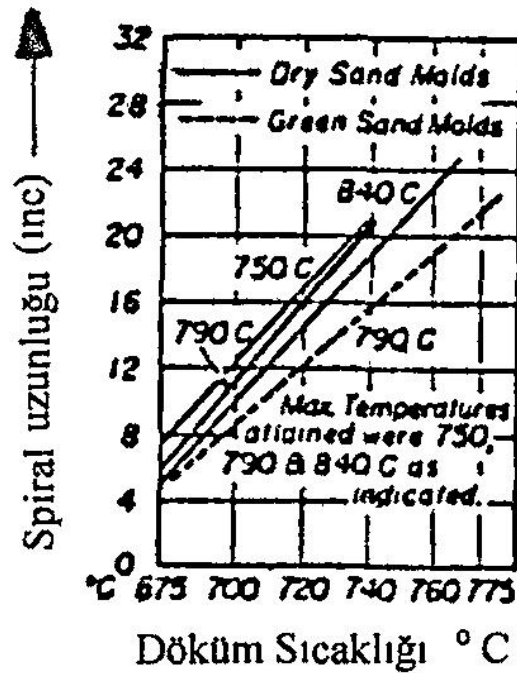


Şekil 5.1 Ergime sıcaklığı düşük olan metallerin akışkanlığı
Sabit kalıpta dökülmüş, spiral kesit alanlı 0,170 inc² (Metals Handbook, 1978)



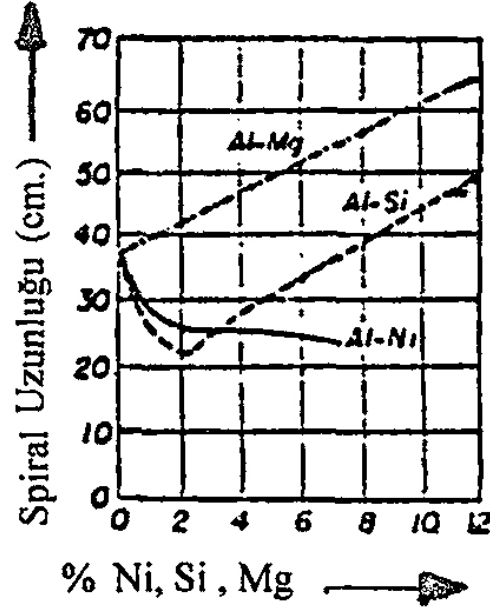
Şekil 5.2 Sabit kalıpta dökülmüş alüminyum ve çinkonun akışkanlığı
(Metals Handbook, 1978)

Alüminyumun kum kalıpta dökümü ile ilgili olarak birkaç çalışma yapılmıştır. Klasik alüminyumdan beklenecek davranış Saeger ve Krynitsky'nin çalışmalarının Şekil 5.3'de görülen sonuçlarıdır. Saeger ve Krynitsky maksimum sıcaklıkların akışkanlık üzerindeki etkisini araştırmış ve akışkanlıktaki düşüş ve buna bağlı olarak ısıtma sıcaklığındaki artışın absorbe edilen gazlardan kaynaklandığı sonucuna ulaşmışlardır (Metals Handbook, 1978).



Şekil 5.3 Klasik alüminyumun spiral kesitte kum kalıptaki akışkanlığı

(Metals Handbook, 1978)



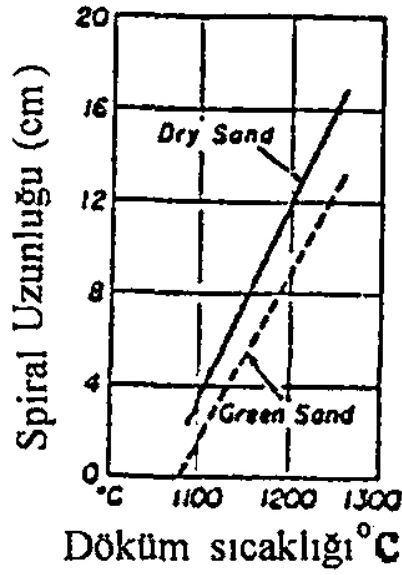
Şekil 5.4 Alaşım elementlerinin alüminyum dökümün akışkanlığı üzerindeki etkisi

(Metals Handbook, 1978)

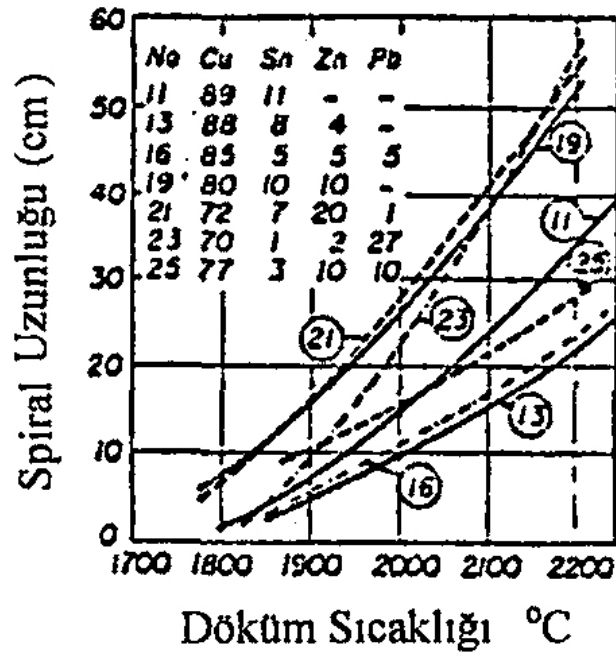
5.2 Pirinç ve Bronzun Akıcılığı

0,066 inç'lik spiral kesit alanlı standart Bureau kalıbını kullanarak Saeger ve Krynitsky pirincin akışkanlığını çalışmıştır (Şekil 5.5). Bu çalışma sonunda düz bir çizgi elde etmişlerdir.

Pilling ve Kihlgren standart Bureau kalıbının değişik bir şeklini kullanarak 0,098 inç²'lik spiral kesit alanlı kalıbı kullanarak bu alaşımlar için hafif eğri parabol bulmuşlardır (Şekil 5.6). Alüminyum ve antimuanın dökme kırmızı pirincin akışkanlığı üzerindeki etkisi yaş kum kalıplarında çalışılmıştır. %0,025'lik alüminyum akışkanlığı en fazla 1065°C ve 1150°C'de artırmıştır. Fakat 1230°C'de 0,05'lik Al eklenmesi en uzun akışı sağlamıştır. %0,25'e kadar antimuan eklenmesi kırmızı pirincin akışkanlığını bütün test sıcaklıklarında kayda değer biçimde artırmıştır (Metals Handbook, 1978).



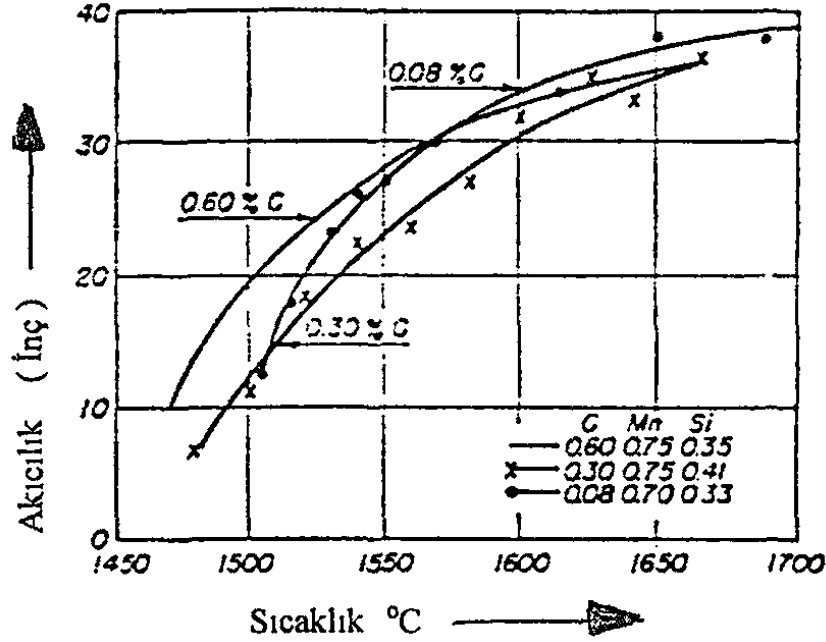
Şekil 5.5 Bronzun akıcılığı
(Metals Handbook, 1978)



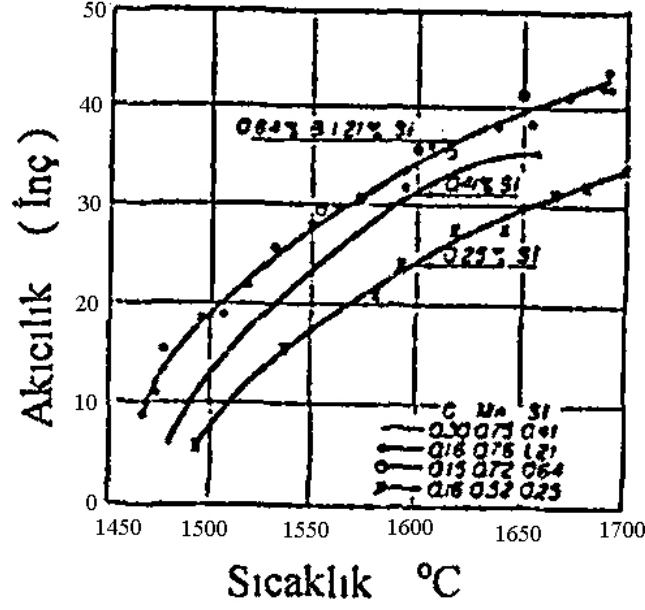
Şekil 5.6 Yaş kum kalıptaki bronzun akıcılığı
(Metals Handbook, 1978)

5.3 Çeliğin Akıcılığı

Son yıllarda çeliğin akışkanlığı ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Ruff akışkanlık test parçası (düz akışkanlık kanalı) kurmuştur. Andrews ve çalışma arkadaşları karbon miktarındaki % 0,9 kadarki değişmelerin dökme çeliğin akışkanlığını çok az miktarda arttırdığını bulmuşlardır. Si, Mn, Cu, Cr, Ni ve P eklemelerinin akışkanlığı eklenen miktar oranında arttırdığını tespit etmişlerdir. Walker düz akma kanalını kullanarak sanayideki tecrübelerden yararlanmıştır. Çelik sıcaklığını ölçmedeki yetersizliklerden dolayı Walker'ın buldukları yetersiz kalmıştır. Sarjant ve Midlleham düz kanallı test parçası kullanarak kullanılan metalin yeterince basit ve fabrikalarda kullanıma uygun olduğunu göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmalar %0,15, %0,43, %0,83 C miktarının akışkanlığı arttırdığını, %2 kadar eklenen bakırın dökme çeliğin akışkanlığını arttırdığını ve yüksek Mn oranının çeliğe yüksek sıcaklıklarda iyi bir akışkanlık kazandırdığını göstermiştir. Kron ve Lorig düz akma kanalı kullanarak akışkanlık ile sıcaklık ve kompozisyon arasındaki ilişkiyi değişik çelik kompozisyonlarında çalışmışlardır. Çalışmaları karbon çeliğinin akma kalitesinin Mn, Si ve Cu'nun miktarlarının artmasıyla arttığını göstermiştir. Çeliğin akışkanlığı ile ilgili tam bir çalışma Tayler, Rominski ve Briggs tarafından yapılmıştır. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi C çeliğin akışkanlığı üzerinde çok az bir etkiye sahiptir.



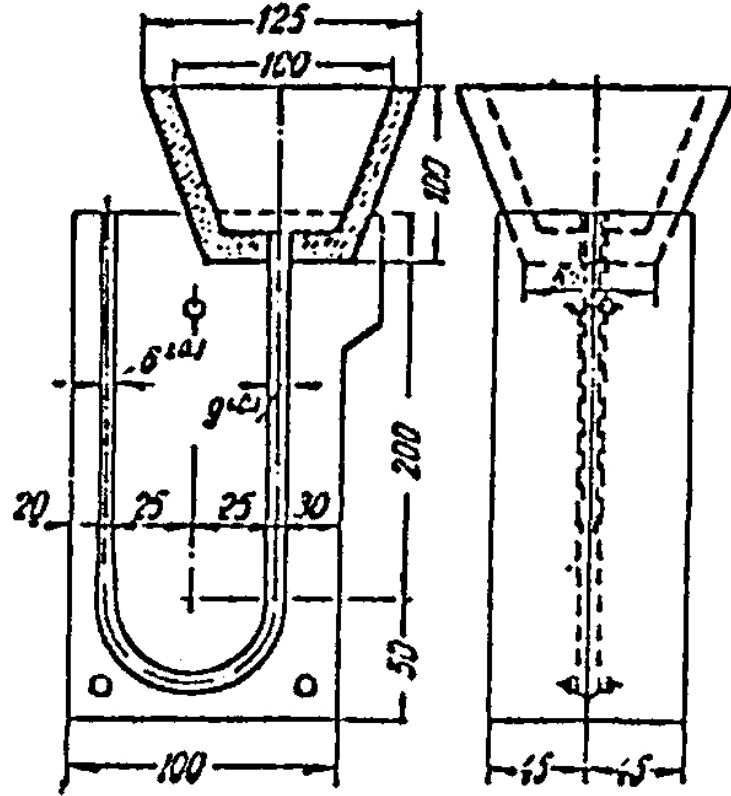
Şekil 5.7 Karbonun çeliğin akıcılığı üzerindeki etkisi
(Metals Handbook, 1978)



Şekil 5.8 Silisyumun çeliğin akıcılığı üzerindeki etkisi
(Metals Handbook, 1978)

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi Si kayda değer bir etkiye sahiptir. Daha büyük akışkanlık ise orta karbon çeliklerinde Si %0,25'ten %0,45'e çıkarıldığında görülür. Bu etki Si eklenmesinden ziyade, çeliğin deoksidasyon durumundan kaynaklanır. Ni %3,25'e kadar çeliğin akışkanlığını artırır. %5 Ni gibi yüksek konsantrasyonlar akışkanlıkta azalmaya sebep olur. %2 ile %14 arası Mn içeren çelikler düşük sıcaklıkta iyi akışkandır. Mn miktarı arttıkça 2900°F ve üstünde yüksek mangan çeliklerinin akışkanlığı, yalın karbon çeliklerinin akışkanlığından daha düşüktür. %4 Cu'ya kadarki Cu miktarındaki artış yalın karbon çeliğinin akışkanlığını artırır. Çeliğe fazla krom eklenmesi yalın karbon çeliği ile karşılaştırıldığında akışkanlığı düşürür. %1,5 Cr'den az ekleyişler akışkanlık üzerinde menfi bir etki yapmaz. Mo ve V yalın karbonlu çeliğe %0,25 ile %1 arasında eklendiğinde, akışkanlıkta düşmeye sebep olur. Al, Si'ye göre özellikle düşük sıcaklıklarda ve az miktarda kullanıldığında daha etkilidir. %0,2 'yi aştığında ve deoksidasyonda %1,2 Al bulunduğu akışkanlık sürekli düşer bu da maksimum akışkanlık için belli bir kritik Al miktarı olduğunu gösterir. Alaşım elementi ilavesinden önceki durumu, banyonun oksidasyon değerine bağlıdır. İyi akışkanlık için çelik iyi deokside edilmelidir. Kaynar çelikler, ölü çeliklere (sönmüş) göre akışkanlıkta daha kötüdür. Aynı şekilde deokside edici Al ve Si elementi fazla olan sönmüş çeliklerin akışkanlığı da, tam dengeli Si ve Al içeren sönmüş çeliğin akışkanlığından daha azdır (Metals Handbook, 1978).

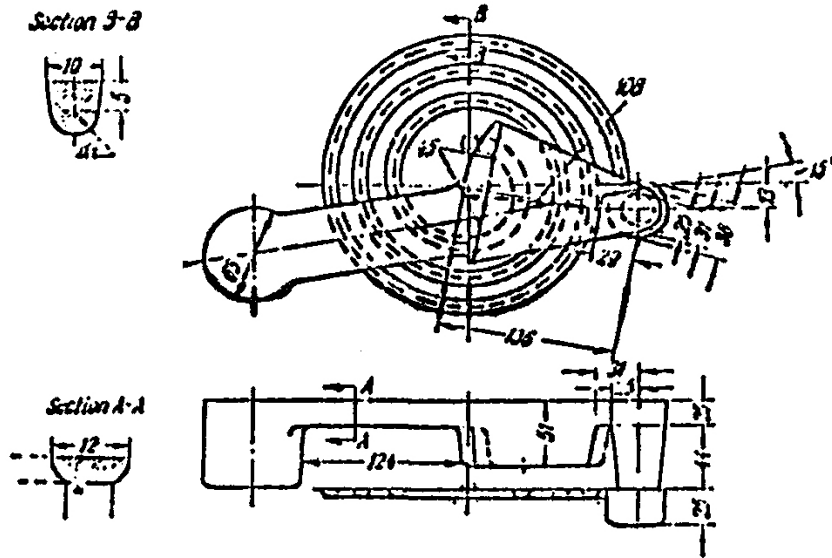
Şekil 5.9’da dağılmış metal dışı katışıkların boyutu, sayısı ve şeklinin bir fonksiyonu olarak çeliğin akışkanlığı U şekilli bir test parçası kullanılarak test edildiğinde akışkanlığın katışıklar (özellikle keskin köşeli olanlar) ortamdan uzaklaştırıldıkça arttığı görülmüştür.



Şekil 5.9 U şekilli akıcılık test parçası

(Heine, 1955)

Sabit basınç, ısı ve doldurma hızı altında su seviyesinin yardımıyla akışkanlık ölçülür. Helisin iki yarısı bir araya getirilir ve sıvı metale daldırılır.



Şekil 5.10 Cury spiral akışkanlık testi

(Heine, 1955)

Metal akış esnasında soğurken, katı faz kristallerinin devamlı iskeleti oluştuğundan, akışı durdurur (sıfır akışkanlık). Statik açıdan ise metal akmayı, akışın başındaki mukavemet baştaki basınca eşit olunca durdurur.

Havada oksitlenmeye hazır alüminyum ve demir gibi metaller, üst ısılarda bile kötü akışkanlığa sahiptir. Zamanla testler bozulmayı ve üretim kayıplarını önleyebilir. Filmler ve katışıklar, akışkanlığı azaltır. Solidus sıcaklığının üstündeki aynı üst ısıda dökülen çeliğin akışkanlık testlerinin karşılaştırılması akışkanlığın küçük bir katılma aralığında arttığını göstermektedir. %0,20 C içeren bir peritektik kompozisyonlu çelik, en düşük akışkanlığa sahiptir. %1'lik Si miktarındaki artış akışkanlığı düşürür. Bu değerden sonra Si miktarındaki artış, akışkanlığı artırır. Mn, Cu, Ni, Nb ve P akışkanlığı arttırırken Al, Cr, Ti ve S azaltırlar. Sıcaklık 1600°C'ye ulaştığında belli çelik çeşitlerinin akışkanlığı artar ve daha sonra bu artış dereceli olarak azalır.

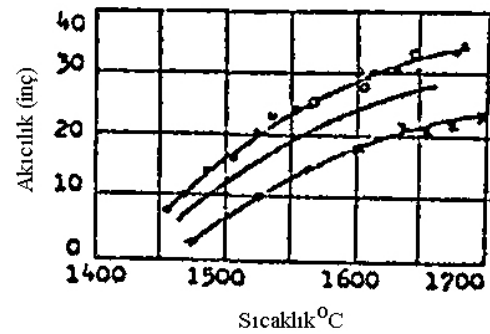
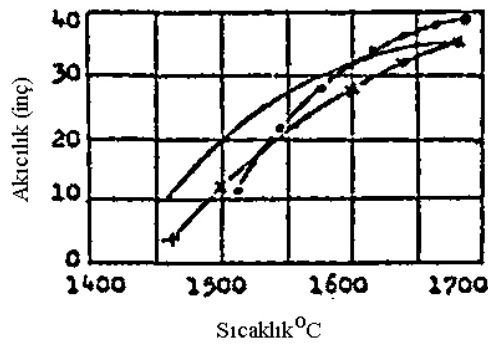
Akışkanlık testlerinde karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek için, test parçası ağzına kadar dolu bir dökme kabıyla dökülmelidir. Aynı bileşim ve döküm sıcaklığına sahip alaşımların akışkanlığı kum kalıplarda metal kalıplardan daha yüksektir.

Çeliğin akıcılığı üzerinde en büyük etki gösteren faktörler döküm sıcaklığı ile bileşimdeki elementlerdir. Bu elementlerin başında karbon ve silisyum gelir. Şekil 5.11'de karbon ve

silisyumun değişik sıcaklıklarda çeliğin akıcılığı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu eğrilere göre;

- 1- Sıcaklık arttıkça akıcılık artmaktadır (Şekilde bunun belirli bir karbon oranı için düşük döküm sıcaklıklarında geçerli olduğu görölmektedir).
- 2-Karbon ve silisyum miktarı arttıkça akıcılık artmaktadır.
- 3-Akıcılığın artış hızı sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

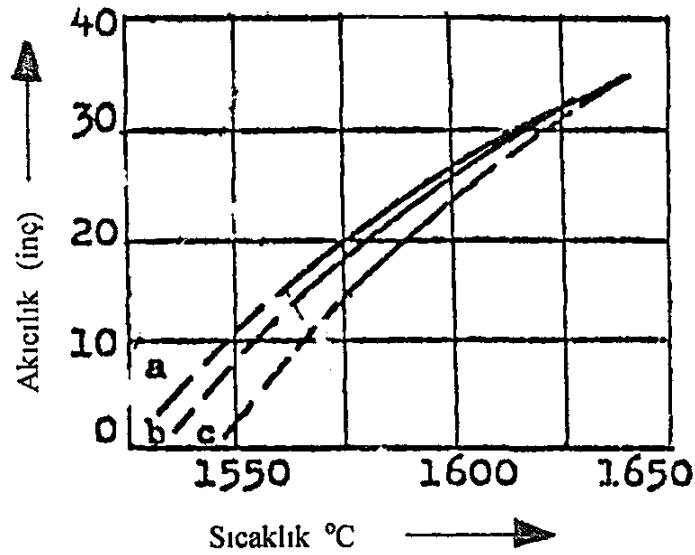
Ayrıca akıcılığın üretim şekli ile de değişebileceği Şekil 5.12'deki sonuçlardan görölmektedir. Buna göre yaklaşık 1620°C'ye kadar asidik elektrik ark fırını çeliği (EA) endüksiyon fırını çeliğinden (EF), ve bu da bazik Siemens-Martin çeliğinden (SM) daha akıcıdır. Her üç çeliğin akıcılık eğrileri 1600°C'nin üzerinde bir noktada birleşme eğilimi göstermektedir. Çelik, kır dökme demirin tersine, daha az akıcıdır. Döküm sıcaklığı ergime sıcaklığına düştükçe, akıcılığı daha da azalacağından kalıp boşluğunun tamamen dolması için maden hızla, çalkantısız bir şekilde dökülmelidir (Arıkan, 1991).



İşaret	% C	% Mn	% Si
—•—	0,60	0,75	0,35
—x—	0,30	0,75	0,41
—Δ—	0,08	0,70	0,33

İşaret	% C	% Mn	% Si
—•—	0,30	0,75	0,41
—x—	0,16	0,76	1,21
—o—	0,15	0,72	0,64
—Δ—	0,16	0,52	0,25

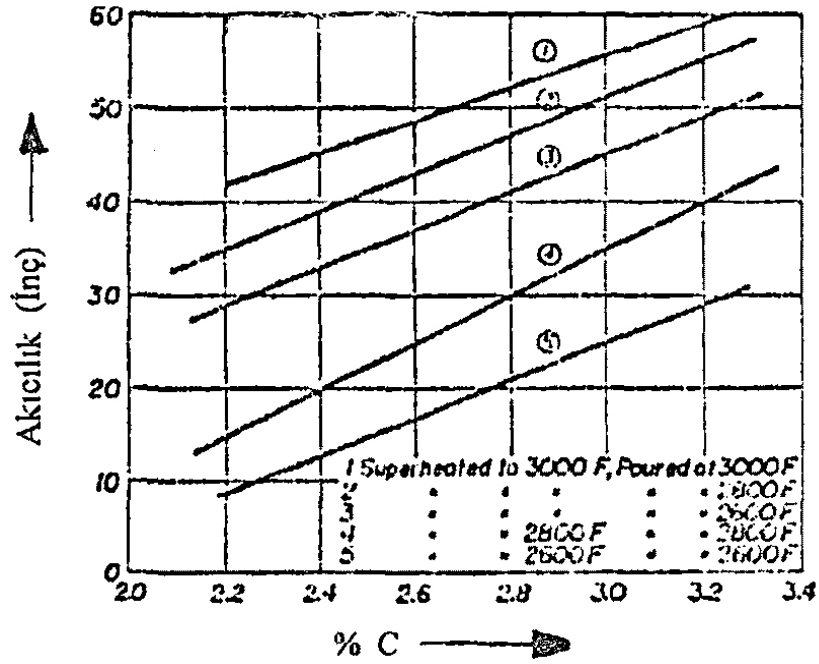
Şekil 5.11 Sıcaklığın ve kimyasal bileşimin çeliğin akıcılığı üzerindeki etkileri
(Arıkan, 1991)



Şekil 5.12 Çeşitli çelik üretim yöntemlerinin akıcılık üzerindeki etkileri
(Arıkan, 1991)

5.4 Dökme Demirin Akıcılığı

Dökme demirin akışkanlığı üzerindeki çalışmalar pek çok araştırmacı tarafından sabit kalıp ve kum kalıplar kullanılarak yapılmıştır. Fakat tam veri setleri Perin ve Berger tarafından hazırlanmıştır. Şekil 5.13'de sıcaklık, akışkanlık ve C miktarı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi eğer döküm sıcaklığı sabit tutulursa ötektik konsantrasyona ulaşınca kadar, C miktarının artmasıyla akışkanlık artar. Ötektik noktadan sonra (%4,3 C) daha yüksek C miktarında akışkanlık düşer. Ayrıca %4 C'lik hipoötektikte akışkanlıkta ani bir artış vardır. Tabiki Fe ve C dışında dökme demirde pek çok element vardır. Berger, bu elementlerin akışkanlık ve diğer özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. P ve Si eklenmesi likidüs sıcaklığını etkilediğinden, akışkanlık karşılaştırmaları oldukça karışıktır. Ötektik alaşımlar en fazla akıcılığı olan karışımlardır. Hipoötektik alaşımlar pratik öneme sahip ötektik alaşımlardır. Bunlarda akışkanlığı düzenleyen C'dir. Daha sonra P gelir. Belli bir ölçüde de Si gelir (%1'in altında). Mn'nin akışkanlık üzerindeki etkisi önemsizdir. Mn'nin etkisinin yönü ve miktarı dökme demirin kompozisyonunun fonksiyonudur. Modern eğilim düşük C'li metale olduğundan dökme demirin akışkanlığı, likidüs üzerinde sıcaklık artırımına bağlıdır. Yukarda saydığımız kontrol edilebilen faktörlerden ziyade, üç klasik dökme demir Sager ve Ash tarafından Şekil 5.15'de gösterildiği gibi incelenmiştir.



Şekil 5.15 Farklı sıcaklık ve karbon değerlerinin akıcılığa etkisi
(Metals Handbook, 1978)

Sager ve Ash demirin akış kalitesinin likidüs sıcaklığına bağlı olduğunu, düşük sıcaklıktaki akışkanlık testinin dökümden önce maksimum ısıtma sıcaklığına bağlı olmadığını söylemişlerdir. Gri dökme demir üzerinde yaptıkları çalışmalar (Şekil 5.15) göstermiştir ki, C miktarının akışkanlık üzerindeki etkisi doğru orantıya sahiptir ve akışkanlık sadece döküm sıcaklığından değil, aşırı ısının derecesinden de etkilenir. Sonuç olarak; dökme demirin akışkanlığı, C miktarının artması, döküm sıcaklığı ve aşırı ısının artmasıyla artar. Daha önce belirtildiği gibi yüzey özellikleri akışkanlığı etkiler. Courty tarafından yapılan çalışmalar, dökme demirin çelik bir spiral kalıba döküldüğünde kalıbın kaplaması değiştirilerek spiral uzunluğunun 51 cm'den 81 cm'ye arttığını göstermiştir. Kaplama olarak kullanılan malzemelerin etkisi sırası ile

- 1- Bezir yağı
- 2- Demir oksit
- 3- Grafit
- 4- Siyah kurşun
- 5- Asetilen ateşinden kalan ince kül tabakasıdır (Metals Handbook, 1978).

Dökme demirin akıcılık kabiliyeti, alaşımın özelliği ve kimyasal bileşiminden başka, kullanılan kalıp malzemesine de bağlıdır. Kurutulmuş kalıplara dökülen maden, daha geç soğuduğundan

kalıbın her tarafını daha iyi sarar ve daha uzun müddet sıvı halde kalabilir. Yaş kalıplara dökülen dökme demir, çabuk soğur ve döküm parçası ince kesitli olduğu takdirde kalıbın her tarafı dolmaz, eksik kalır. Kalıp yüzeyinde bulunan girinti ve çıkıntılarla, kalıp malzemesinin vermiş olduğu gazlar da metalin akıcılığını önleyen sebepler arasındadır (Baytaş, 1975).

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin döküm özellikleri birçok bakımlardan diğer dökme demirlere benzemekle birlikte, büzülme özelliği, cüruf veya metal olmayan oksit inklüzyonlarına yatkınlığı gibi bir takım özellikleri göz önünde tutularak, gri demir veya temper demir uygulanan yöntemlerin buna göre ayarlanması gerekir.

Özellikle yüksek döküm sıcaklıklarında, küresel grafitli dökme demirlerin bileşimindeki yüksek karbon oranı metale üstün bir akışkanlık özelliği sağlar. Diğer taraftan bileşimdeki magnezyum, özellikle 1380°C'nin altındaki dökümlerde, sıvı metalin yüzey gerilimini artırdığı veya üzerinde bir tabaka oluşturduğu için çok ince kesitli dökümlerde metalin akmasını önleyerek bozuk üretime neden olur.

Gri demirde olduğu gibi, aşılama verimine, bileşime ve döküm sıcaklığına bağlı olarak ince kesitler çil oluşumuna yatkındır. Bu oluşum sonucunda dökümlerde çatlama veya tavlama sırasında şekil bozukluğu gibi sorunlar ortaya çıkabilirse de, ısıtma işlemi uygulanacak parçalarda bir ölçüde kabul edilebilir.

Magnezyumun havadaki oksijenle yanarak oluşturduğu MgO ve ayrıca kükürtle yaptığı magnezyumsülfür bileşiği metal yüzeyi üzerinde yapışkan bir cüruf tabakası meydana getirir. Bu cüruf metal tarafından sarılarak döküm içinde inklüzyonlar oluşturabilir. Bu oluşum, fil derisi olarak bilinen yüzey bozuklukları veya kırılma yüzeylerinde siyah, isli bir görünüm sergileyen zayıf tabakalar halinde ortaya çıkabilir.

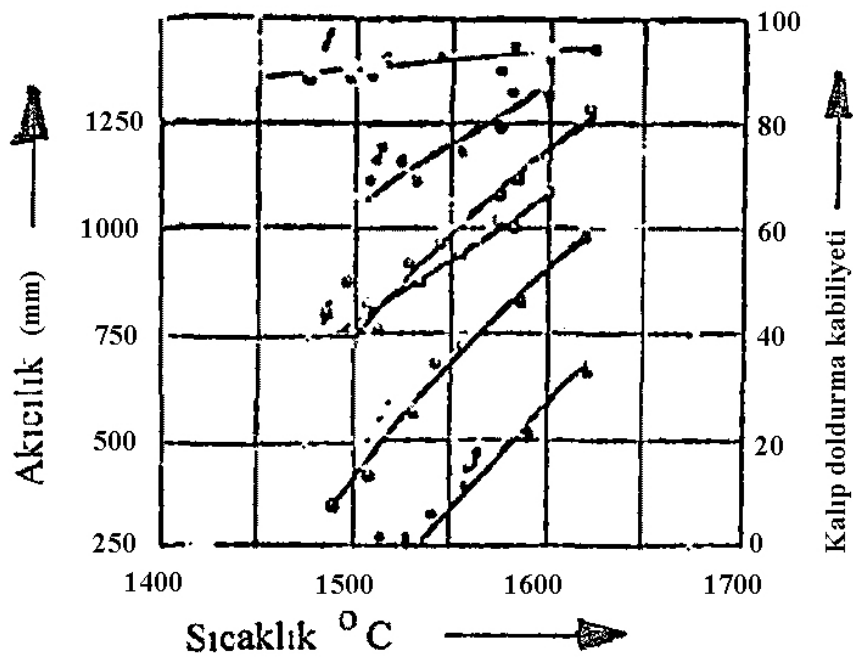
Metal bileşimindeki kükürt ve buna bağlı olarak magnezyum oranlarının düşürülmesi gereğinin yanında, yolluk sisteminin de kalıp içinde herhangi bir metal çalkalanmasına yol açmayacak biçimde tasarlanması şarttır.

Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Mg muamelesine uğratılmış eriyik, özellikle bileşiminde %0,07'den fazla Alüminyum içeriyor veya sıcaklığı 1360°C'nin altında ise, yaş kumun içindeki nem ile tepkimeye girerek hidrojen açığa çıkarmakta, bu da döküm yüzeyinde veya

yüzey altında karıncalanmaya yol açmaktadır. Çoğunlukla bu oluşum yukarıda anlatılan oksit hataları ile birlikte görülür (İkizer, 1980).

Dökümcülükte akıcılık ampirik metotlarla tayin edilir. Sıvı metal standart bir spirale farklı sıcaklıklarda doldurulur. Sıcaklık-spiral uzunluğu grafikleri elde edilir.

Sıvı metale belirli bir akıcılık kazandırmak için onu likidüs sıcaklığının üzerinde aşırı ısıtmak gerekir. O halde önce likidüs sıcaklığının tayini, sonra da aşırı ısıtma sıcaklık farkının tespiti lazımdır.



Şekil 5.16 Akıcılığı tespit için sıcaklık-spiral uzunluğu eğrileri
(Arıkan, 1991)

- | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| I numaralı döküm bileşimi: | % C = 2,13 | % Si = 2,07 |
| II numaralı döküm bileşimi: | % C = 3,46 - 3,60 | % Si = 2,08 - 2,24 |

Likidüs sıcaklığı ampirik metotlarla bulunmuş aşağıdaki formülle hesap edilir:

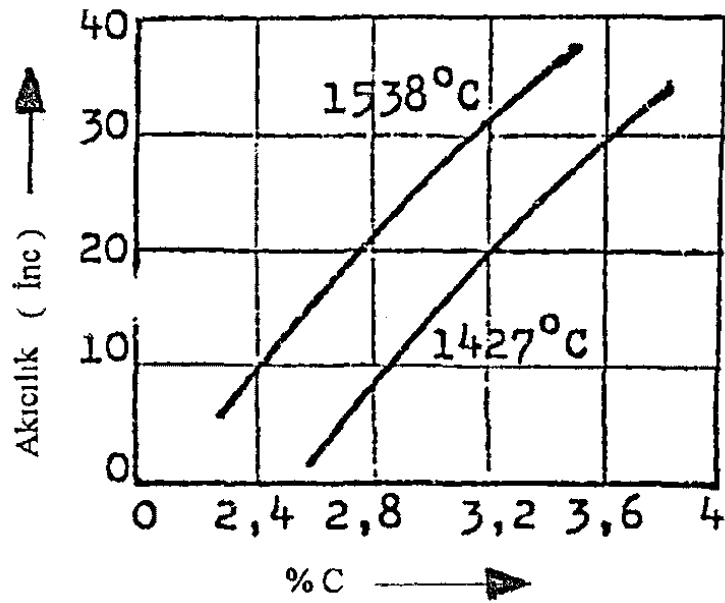
$$\text{Likidüs sıcaklığı (T)} = T_e - \%C.f_c - \%Si.f_{si} - \%Mn.f_{mn}$$

Yukarıdaki formüldeki (f) faktörleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Akıcılığı tespit için f faktörleri
Bütün f faktörleri negatif değerdedir (Arıkan,1991)

Eleman	f (faktörü)
C	120
Mn	9
Si	14
Cu	9
P	54
S	45

Likidüs sıcaklığını yukarıdaki gibi tespit ettikten sonra likidüs üzerinde aşırı ısıtma sıcaklığının spiral uzunluğuna etkisini gösterir eğri Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 Sıcaklığın ve kimyasal bileşimin beyaz dökme demirin akıcılığına etkisi
(Arıkan, 1991)

Ampirik bir kaide olarak:

- 1- İnce (12 mm'nin altında) ve karışık kesitler için likidüs sıcaklığı üzerinde 170-280°C ısıtmak.
- 2- İri parçalar için likidüs sıcaklığının üzerinde 50-175°C ısıtmak suretiyle kafi miktarda akıcılık sağlanabilir.

Genel olarak, bütün alaşımlarda ve dökme demirde katılaşma aralığı büyüdükçe akıcılık azalır (Arıkan, 1991).

Demir alaşımları içinde en yüksek akıcılığa sahip olan dökme demirlerden ince kesitli ve oldukça karmaşık şekilli parçalar dökülebilir. Kalorifer petekleri, motor gövdeleri, motor piston segmanları, ince kesitli ve geniş yüzeyli kapak ve muhafazalar gibi döküm parçaları dökme demirden imal edilirler. Çok ince kesitli ve hızlı soğuma ihtimali olan geniş yüzeyli döküm parçalarında çoğu kez metal, kalıp boşluğunu tam olarak doldurmaya zaman bulamadan katılaşır. Bu durum çoğu kez yanlış bir kanı olarak demirin akıcılığına yorumlanır. Böyle hallerde ergimiş malzemeyi kalıba en kısa yoldan ve çalkantısız bir şekilde ulaştıracak bir yolluk düzeninin geliştirilmesi gerekir.

Dökme demirin akıcılığı Şekil 5.10'dakine benzer helislerle birçok araştırmacı tarafından ölçülmüştür. Akıcılığın kimyasal bileşimle büyük oranda değiştiği ve ötektik yapıya sahip malzemelerin yüksek akıcılığa sahip oldukları artık bilinmektedir. Akıcılığın hesaplanmasında dökme demirin ötektik özelliğini ifade etmek için aşağıdaki formülden K bileşim katsayısı bulunur. En yüksek akıcılık için K değeri 4,55'dir.

$$C.E = \%C + 1/4 \%Si + 1/2 \%P$$

Akıcılık spiralinde inç olarak ölçülen akıcılık değerleri (A) ile C.E katsayısı ve °F cinsinden metalin döküldüğü andaki sıcaklık (T) arasındaki bağıntı aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$A = 14,9 C.E + 0,05 T + 155$$

Dökme demirlerin döküm sıcaklık aralığı 1260-1540°C arasında değişir. Sıcaklık (T) arttıkça akıcılık (A) değerlerinin de yukarıdaki formüle göre artacağı bir gerçektir. Dökme demirin bileşiminin, akıcılık üzerindeki etkisinin açıklanmasında yarar vardır. Şöyle ki, ötektik bileşime sahip dökme demirin yüksek bir akıcılığa sahip olduğu bilinmektedir. Ancak, hiper ötektik (ötektik üstü bileşimli) dökme demirlerde soğuma esnasında meydana gelen grafitleşme olayı akıcılığı büyük ölçüde düşürür. Bu çeşit madenler kalıba dökülüp sıcaklık düşmeye başlayınca madenin içinde pul pul grafit taneleri belirmeye başlar. Grafitleşme aşırı

düzeyde olursa iç yollukları tıkayarak metalin kalıp boşluğuna bile ulaşmadan katılaşmasına sebep olur.

Sonuç olarak yüksek karbon, yüksek silisyum miktarı ve artan döküm sıcaklığı ile birlikte döküm akıcılığı da artar. Kimyasal bileşimin mi yoksa sıcaklığın mı daha etkili olduğu sorulabilir. Karbon miktarı %0,2 oranında artırılırsa malzemenin akıcılık spiralinde ancak 2,5 cm kadar ilerleme sağlanabilmektedir. Aynı miktar ilerleme için döküm sıcaklığını 10°C arttırmak gerekir. Demir alaşımlarının akıcılığı, grafit çökmesinden dolayı karbon miktarına, ötektik bileşim ve dökümhane koşullarına bağlı olduğundan, pratikte dökümün 1260-1540°C arasında uygun bir sıcaklıkta yapılması tavsiye edilmektedir. Sıcaklığın bu belirgin etkisi kimyasal bileşim ile diğer faktörlerin etkilerini ikinci plana itmektedir. Onun için tüm faktörlerin göz önüne alınarak en uygun (optimum) bir çözüm yolunun bulunması gerekir (Arıkan, 1991).

5.5 Alüminyum Alaşımlarının Akıcılığı

Alüminyum alaşımlarını ıslah etmek için kullanılan esaslı katkı elamanlarından biri bakırdır. Bakır ilavesiyle, akıcılık artar ve çekilme azalarak döküm işi kolaylaşır, fakat şunu da işaret etmek lazım ki, bakır ihtiva eden alaşımlar önemli katılaşma entervalinden dolayı sıcakta kolaylıkla çatlar. Bakır, kopma mukavemeti, elastiklik limiti ve bilhassa sertlik gibi mekanik özellikleri göze çaracak derecede artırır. Buna mukabil, deformasyon kabiliyeti ve süneklik üzerinde bakır yüzdesinin tesiri bilhassa iki bileşenli alaşımlar için fazladır. Hayati önemi itibari ile çok karışık olan alüminyum-bakır diyagramının alüminyumca zengin olan sanayi alaşımları kısmı, nispeten basittir (Ersümer, 1976).

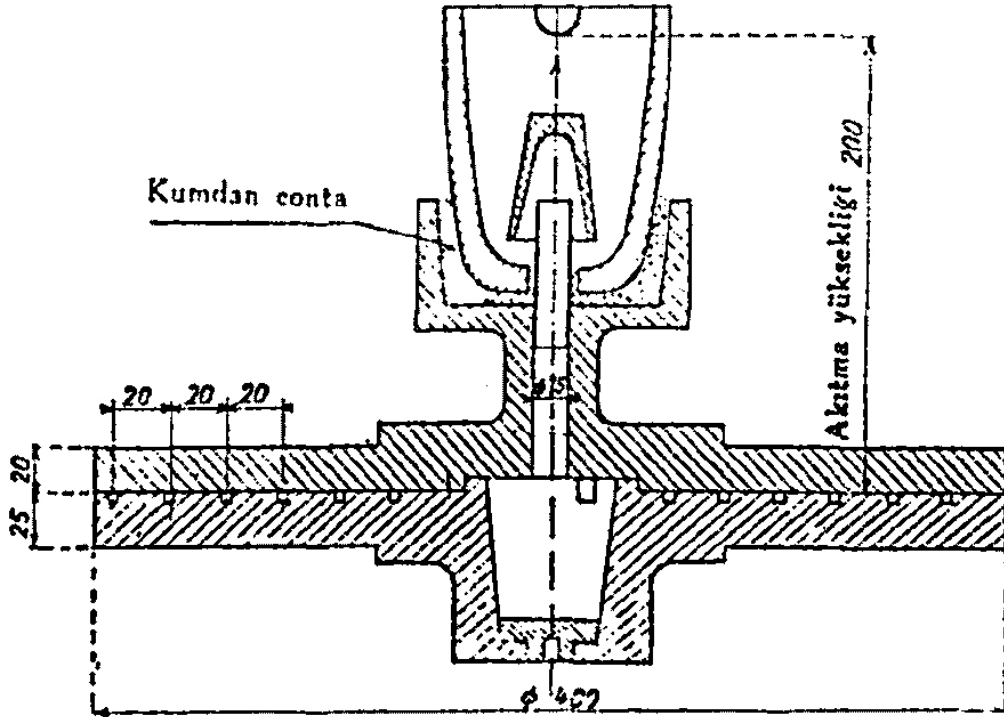
Hemen hemen tüm alüminyum alaşımları bilinen usullerden biri ile istenilen biçimde dökülebilir. Ancak her alüminyum alaşımının döküme elverişliliği aynı derecede değildir. Yüksek akıcılığa sahip olması, ısıya ve sıcak çatlamalara mukavemetleri nedeniyle Al-Si alaşımları birçok yerlerde kullanılır. Kokil kalıplara dökülen alüminyum alaşımlarının çoğu silisyum bakımından zengin olan malzemelerdir. Alüminyuma %3-5 oranında bakır ilave edilirse akıcılığı düşer. Bakır miktarı %5'den %12'ye doğru arttıkça akıcılık da artar. Mukavemetin gerekli olduğu yerlerde %3-5 bakır içeren alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılır. Ancak bu malzemelerin döküm sırasında kalıbı kolayca doldurmalarını temin için %5 kadar silisyum ilave edilir. %2 kadar ilave edilen silisyum, alüminyumun kalıp ve yolluklarda yürümesini zorlaştırır. Ötektik bileşime sahip alaşım %12,5 Si içermekte olup çok

akıcı kolay beslenebilen ve sıcak çatlamalara mukavemetli bir yapıya sahiptir. Alüminyum alaşımlarına Ti veya Ti ile birlikte bor ilave etmek suretiyle sıcak çatlama ve besleme problemleri önlenebilse de, malzemenin akıcılığı büyük ölçüde düşme göstermektedir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları gibi oksitlenme eğilimi olan malzemeler, ergime ve döküm esnasında oluşan oksit tabakaları nedeniyle çoğu kez yolluk düzenini tıkayarak sıvı metalin akışına engel olurlar. Bu tür olaylara özellikle Al-Mg alaşımlarında çok rastlanır. Bu sorunun çözümü için Al-Mg alaşımlarına %0,0005-0,005 arasında berilyum ilave edilir. Berilyum daha çabuk oksitlenerek sıvı yüzeyinde alaşımın oksitlenmesini önleyen koruyucu bir oksit tabakası oluşturur. Diğer örneklerde olduğu gibi burada da sıcaklığın akıcılık üzerindeki etkisi büyüktür. 679°C ile 760°C arasında, kimyasal bileşim ne olursa olsun, akıcılığın döküm sıcaklığı ile doğru orantılı olarak arttığı ileri sürülmektedir (Metals Handbook, 1978).

5.6 Alüminyum-Bakır Alaşımlarının Akıcılığı

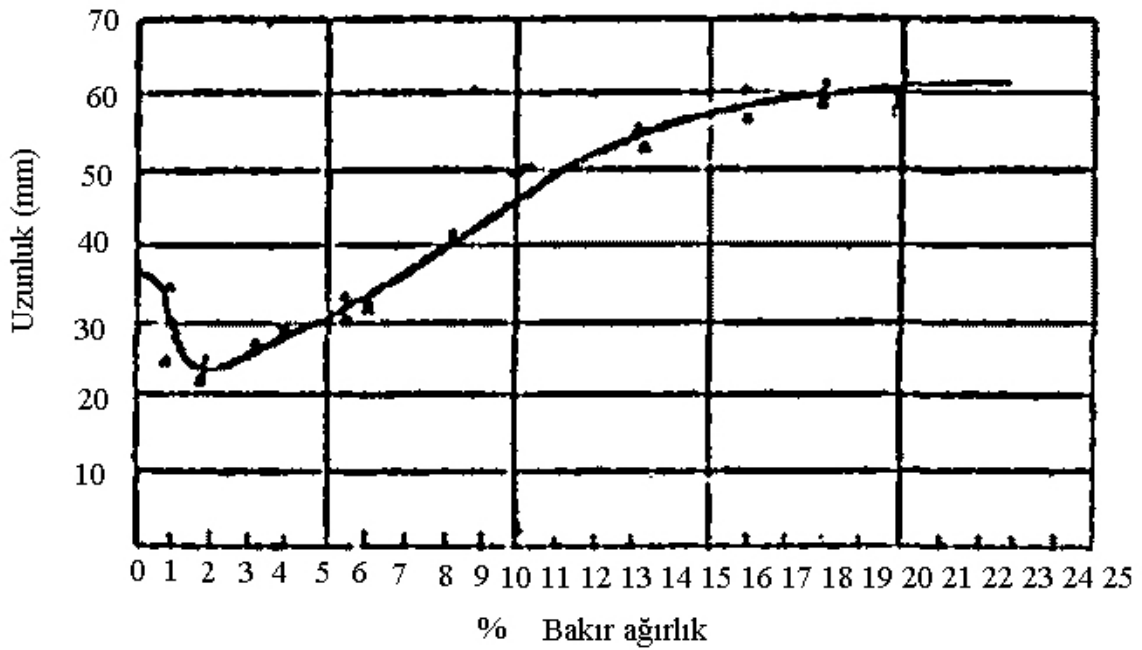
Akıcılık, bir metalin veya bir alaşımın kalıbı doldurabilme kabiliyetidir. Bu akıcılık, belirli şartlarla akıtılan yatay bir spiralin uzunluğu ile tespit edilir.



Şekil 5.18 Akıcılık deneyi için kalıp

Şekil 5.18 akıcılığı denenecek parçanın kalıbını göstermektedir. Bastien'in tarifine göre yapılan bu kalıp umumiyetle hafif alaşımlar için kabul edilmiştir.

Alüminyum-Bakır alaşımlarının akıcılık özellikleri oldukça yüksektir. Şekil 5.19 akıcılığın bakır yüzdesine tabi olarak değişimini verir.



Şekil 5.19 Alüminyum-bakır alaşımlarında bakır yüzdesine göre akıcılığın değişimi
(Ersümer, 1976)

Görülüyor ki %2,5 bakır için akıcılık minimumdan geçer, sonradan %12'ye kadar hızla yükselir. Bu miktardan sonra, akıcılık çok yavaş artar.

Katılaşma aralığı %4-5 bakırlı alaşımlar için oldukça önemlidir. Çünkü bu katılaşma aralığı 100°C'den fazladır, dolayısıyla bu terkipteki alaşımlar sıcakta çatlamaya meyil gösterirler. Nihayet bakır yüzdesi arttıkça katılaşma aralığı da azalmaktadır (Ersümer, 1976).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Malzeme bileşiminin dökümde akıcılığa etkisinin incelenmesi amacıyla Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Eskişehir Döküm Fabrikası'nda deneysel bir çalışma yapılması imkanı bulunmuştur. Bu deneysel çalışmada çelik dökümlerde bileşimin akıcılığa etkisinin araştırılması amaçlanarak spiral bir model imal edilmiş ve bu modelin kalıplanmasıyla farklı alaşımlarda on adet çelik döküm uygulaması yapılmıştır. Uygulamaya ilk olarak AISI 1040 alaşımsız çeliğinin belirli döküm şartlarında dökülmesi ile başlanmış, daha sonra, döküm şartları sabit tutularak, sadece malzeme bileşimindeki değişimin sıvı metalin akıcılığına etkisini anlamaya yönelik olarak, alaşımsız çelik farklı oranlarda alaşımlandırılarak dokuz adet daha çelik döküm uygulaması yapılmıştır. Aşağıda deneysel çalışmanın sonuçları yorumlanacak, bu amaçla döküm şartları ve malzeme bileşimleri de belirtilerek uygulamalar sonucunda elde edilen akıcılık değerleri resimlerle birlikte verilerek gerekli kıyasların yapılması sağlanacaktır.

1. Döküm:

İlk döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğinin aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: Alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan alaşımsız çeliğin akıcılığı 68 cm olarak ölçülmüştür. Yapılan on adet döküm arasında minimum akıcılık bu dökümün sonucunda elde edilmiştir. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

Alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,382	0,214	0,665	0,030	0,030	0,134	0,009	0,087
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,014	0,011	0,310	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	98,13

Alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.1 Alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 68 cm

2. Döküm:

İkinci döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %2 Cr ve %2 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %2 Cr ve %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %2 Cr ve %2 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 92 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %2 Cr ve %2 Ni ilavesi ile akıcılığın dikkate değer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%2 Cr ve %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,392	0,211	0,705	0,045	0,060	2,005	0,005	1,954
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,014	0,011	0,210	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	94,39

%2 Cr ve %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.2 %2 Cr, %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 92 cm

3. Döküm:

Üçüncü döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %5 Cr ve %5 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %5 Cr ve %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %5 Cr ve %5 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 88 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %5 Cr ve %5 Ni ilavesi ile

akıcılığın arttığı fakat %2 Cr ve %2 Ni ilaveli düşük alaşımlı çelikten daha az akıcı olduğu gözlemlenmiştir. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%5 Cr ve %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,401	0,305	0,666	0,045	0,044	5,095	0,005	4,899
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,004	0,020	0,110	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	87,89

%5 Cr ve %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.3 %5 Cr, %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 88 cm

4. Döküm:

Dördüncü döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %9 Cr ve %9 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 98 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %9 Cr ve %9 Ni ilavesi ile akıcılığın önemli miktarda arttığı gözlemlenmiştir. On adet döküm içinde en büyük akıcılık değeri bu döküm sonucunda elde edilmiştir. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,398	0,295	0,612	0,051	0,044	9,095	0,005	8,889
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,011	0,020	0,110	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	80,13

%9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.4 %9 Cr, %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 98 cm

5. Döküm:

Beşinci döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %2 Cr ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %2 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %2 Cr ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 75 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %2 Cr ilavesi ile akıcılığın bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. On adet döküm içinde alaşımsız çelikten sonra en az akıcılık bu döküm sonucunda elde edilmiştir. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%2 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,389	0,300	0,599	0,050	0,050	1,980	0,005	0,055
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,010	0,017	0,220	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	96,11

%2 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.5 %2 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 75 cm

6. Döküm:

Altıncı döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %5 Cr ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %5 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %5 Cr ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 84 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %5 Cr ilavesi ile akıcılığın arttığı gözlemlenmiştir. %5 Cr ilavesinin, akıcılığı, %2 Cr ilavesine oranla daha fazla artırdığı elde edilen diğer bir sonuçtur. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%5 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,389	0,321	0,784	0,020	0,030	4,876	0,025	0,068
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,015	0,005	0,098	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	93,45

%5 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.6 %5 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 84 cm

7. Döküm:

Yedinci döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %9 Cr ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %9 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %9 Cr ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 85 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %9 Cr ilavesi ile akıcılığın arttığı gözlemlenmiştir. %9 Cr ilavesinin, akıcılığı, %2 Cr ilavesine oranla daha fazla artırdığı, fakat %5 Cr ilavesine oranla akıcılığı fazla etkilemediği elde edilen diğer bir sonuçtur. Buradan çıkarılan bir başka sonuç ise, %5'den fazla Cr ilavesi çelik dökümde akıcılığı etkilememekte, fakat %5'e kadar Cr ilavesi çeliğin akıcılığını artırmaktadır. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%9 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,401	0,321	0,786	0,020	0,030	8,954	0,025	0,070
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,015	0,005	0,098	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	89,51

%9 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.7 %9 Cr ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 85 cm

8. Döküm:

Sekizinci döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %2 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %2 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 77 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %2 Ni ilavesi ile akıcılığın arttığı gözlemlenmiştir. %2 Ni ilavesinin, akıcılığı, %2 Cr ilavesine oranla daha fazla artırdığı elde edilen diğer bir sonuçtur. Buradan çıkarılan bir başka sonuç ise, Ni ilavesinin çelik dökümlerde akıcılığı Cr ilavesine oranla daha fazla artırdığıdır. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,395	0,215	0,586	0,020	0,030	0,091	0,015	2,068
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,017	0,005	0,120	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	95,74

%2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.8 %2 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 77 cm

9. Döküm:

Dokuzuncu döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %5 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %5 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 86 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %5 Ni ilavesi ile akıcılığın arttığı gözlemlenmiştir. %5 Ni ilavesinin, akıcılığı, %2 Ni ilavesine oranla daha fazla artırdığı elde edilen diğer bir sonuçtur. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,415	0,455	0,585	0,010	0,010	0,154	0,025	5,002
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,012	0,015	0,198	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	93,40

%5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.9 %5 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 86 cm

10. Döküm:

Onuncu döküm uygulaması alaşımsız AISI 1040 çeliğine ferro alaşımlar vasıtasıyla %9 Ni ilavesi ile aşağıda belirtilen döküm şartlarında dökülmesiyle yapılmıştır.

Döküm şartları:

Malzeme: %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliği

Kalıp kumu: Havada sertleşen furan reçineli bağlayıcılı silis kumu

Kalıp sıcaklığı: Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı: 20°C

Ergitme fırını: İndüksiyon ocağı

Döküm sıcaklığı: 1600°C

Yolluk sistemi: Spiralin dışında tek düşey yolluk

Değerlendirme:

Yukarıda belirtilen döküm şartlarında dökümü yapılan %9 Ni ilaveli alaşımsız çeliğin akıcılığı 92 cm olarak ölçülmüştür. Alaşımsız çeliğe %9 Ni ilavesi ile akıcılığın arttığı

gözlemlenmiştir. %9 Ni ilavesinin, akıcılığı, %5 Ni ilavesine oranla daha fazla artırdığı elde edilen diğer bir sonuçtur. Spektrometreden elde edilen malzeme bileşimi değerleri aşağıda verilmiştir.

%9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin bileşimindeki elementler ve oranları şöyledir.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,399	0,412	0,601	0,030	0,025	0,058	0,022	8,895
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Fe
0,012	0,015	0,098	<0,001	0,001	<0,001	<0,004	89,44

%9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.10 %9 Ni ilaveli alaşımsız AISI 1040 çeliğinin spiral kalıpta dökülmüş hali
Döküm sıcaklığı: 1600°C, Akıcılık: 92 cm

Uygulamalar sonucunda gözlemlenen genel sonuçlar kısaca şöyle özetlenebilir:

- Ni ilavesi elik dökümün akıcılığını artırmıştır.
- Cr ilavesi elik dökümün akıcılığını bir değere kadar (%5) artırmış, bu değerden daha fazlası akıcılığı etkilememiştir.
- Cr ve Ni ilavesi elik dökümde akıcılığı sadece Cr ve sadece Ni ilavesinden daha fazla artırmıştır.
- Ni ilavesi elik dökümlerde akıcılığı Cr ilavesinden daha fazla artırmıştır.
- En düşük akıcılık değeri alaşımsız çelikte ölçülmüştür.
- En yüksek akıcılık değeri %9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımlı çelikte ölçülmüştür.

7. SONUÇLAR

Yaptığım teorik ve deneysel çalışmalar ve araştırmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Dökümde akıcılığı etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Sıcaklık artışı akıcılığı artırır. Daha yüksek sıcaklıklarda dökülen ergimiş metalin kalıp içinde sıvı halde alacağı mesafe daha uzun ve kalıp doldurma kabiliyeti daha yüksek olacaktır. İnce kesitli parçalarda döküm sıcaklığının akıcılığa etkisi daha az iken, kalın kesitli parçalarda sıcaklığın aynı miktardaki artışı ile akıcılık daha fazla artar. Alaşımın bileşiminde meydana gelen değişim katılaşmayı etkilediği gibi akıcılığı da etkiler. Sıcaklıktan sonra akıcılığı etkileyen en önemli faktör malzeme bileşimidir.
- 2) Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller genellikle kötü akıcılığa sahiptir. Ergime sıcaklığı düşük olan metaller genelde daha iyi kalıp doldurucudurlar. Saf metaller ve ötektik alaşımlar çok yüksek kalıp doldurma kabiliyetine sahiptirler. Metallerin alaşımları genellikle iyi akıcı olmasına rağmen, karışık kristalli alaşımlar nispeten kötü kalıp doldurucudurlar. Katılaşma aralığı en geniş olan alaşımlar en kötü akıcılığa sahip alaşımlardır.
- 3) Kalıbın ısıtılması akıcılığı artırır. Kalıp sıcaklığının artışı döküm parçanın kalın kesitlerinde ince kesitlere göre akıcılığı daha fazla artırmaktadır. Basınç tatbiki akıcılığı artırıcı bir diğer etkidir. Metallere alaşım elemanı ilavesi genellikle akıcılığı azaltır. Ergimiş metalin viskozitesi ne kadar yüksekse akıcılığı o oranda düşüktür. Çelik kalıplarda akıcılık kum kalıplara nazaran daha yüksektir. Dökülecek parçanın kesit kalınlığına bağlı olarak akıcılık artar. İnce kesitli parçalarda kesit kalınlığı yükseldikçe akıcılık çok az artmasına rağmen, kalın kesitli parçalarda kesit kalınlığı arttıkça akıcılık oldukça yükselir.
- 4) Dökme çeliğin akıcılığı düşüktür. Karbon miktarındaki artış dökme çeliğin akışkanlığını az miktarda arttırır. Si, Mn, Cu, Cr, Ni, Nb ve P ilavesinin çelik dökümde akıcılığı arttırdığı tespit edilmiştir. Ti, S, Al, Mo, V ilavesi çelik dökümlerde akıcılığı olumsuz etkiler. Ayrıca, akıcılığın üretim şekli ile de değiştiği, asidik elektrik ark fırını çeliğinin endüksiyon fırını çeliğinden ve bunun da bazik Siemens - Martin çeliğinden daha akıcı olduğu elde edilen bir başka sonuçtur.
- 5) Yapılan uygulamalarda alaşımsız çeliğe sırasıyla %2, %5 ve %9 Ni ilavesi 1600°C'de çeliğin akıcılığını artırmıştır. Alaşımsız çeliğe %5'e kadar Cr ilavesi 1600°C'de çeliğin

akıcılığını artırmış, %5'den fazla Cr ilavesi akıcılığı etkilememiştir. Cr ve Ni ilavesi çelik dökümde akıcılığı yalnız Cr veya yalnız Ni ilavesine nisbeten daha fazla artırmıştır. Ni ilavesi çelik dökümde akıcılığı Cr ilavesine oranla daha fazla artırmıştır. Uygulamalarda 1600°C'de en düşük akıcılık değeri alaşımsız çelikte ölçülürken (68 cm), aynı sıcaklıkta en yüksek akıcılık değeri %9 Cr ve %9 Ni ilaveli alaşımlı çelikte ölçülmüştür (98 cm).

KAYNAKLAR

- Ahuja, S., Domanus, H.M., Schmitt, R.C., Chuzhoy, L. ve Grabel, J.V., (1994), "Solidification Modeling of a Spiral Casting to Determine Material Fluidity", Argonne, Illinois.
- Algül, E., (1992), "Metal Eriyiklerinde Katılaşma Mekanizmaları ve Soğuma Hızının Dökme Demir Dokularına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Altinel, A.İ., (1999), "The Mechanical Properties of Some Cast Aluminium Alloys", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Aran. A., (1991), Metal Döküm Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aran. A., (2007), İmal Usulleri Ders Notları: Döküm Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aran. A., (2007), Manufacturing Properties of Engineering Materials, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Askeland, D.R., Trojan, P.K., Herron, J.L. ve Flinn, R.A., (1968), Casting Techniques for Cusisbe Metal, The University of Michigan, Michigan.
- Askeland, D.R. ve Phulé, P.P., (1998), The Science and Engineering of Materials (Fourth Edition), Nelson Thornes Ltd., Cheltenham.
- ASM Handbook Volume 3, (1996), Alloy Phase Diagrams, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Handbook Volume 15, (1998), Casting, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Specialty Handbook, (1999), Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- Atasoy, Ö.A., (1990), Ötektik Alaşımlar: Katılaşma Mekanizmaları ve Uygulamaları (Cilt 1), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Brady, G.S., Clauser, H.R., Vaccari, J.A., (2002), Materials Handbook (Fifteenth Edition), Mcgraw-Hill Professional Publishing, New York, United States of America.
- Brandes, E. A. ve Brook, G.B., (1992), Smithells Metals Reference Book (Seventh Edition), Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Beddoes, J. ve Bibby, M.J., (1999), Principles of Metal Manufacturing Processes, Arnold, London.
- Campbell, J., (2003), Castings: The New Metallurgy of Cast Metals (Second Edition), Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Cantor, B. ve O'Reilly, K., (2003), Solidification and Casting, The Institute of Physics Publishing, Bristol.
- Carvill, J., (1993), Mechanical Engineer's Data Handbook, Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Çadırlı, E., (1992), "Hücrel Ötektik Katılaştırma", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Çavuşoğlu, E.N., (1992), Döküm Teknolojisi I, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ersümer, A., (1986), Demir Dökümü, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Flemings, M.C., (1976), Döküm ve Katılaştırma Tekniği (Çev. M. Başaran), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Güner, A., (1997), “Al-Fe Alaşımlarının Hızlı Katılaşması”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güven, O., (2005), “Alüminyum Silisyum Magnezyum Döküm Alaşımlarının Yapı İncelemesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kaplan, B., (1987), “Hücrel ve Dendritik Katılaşma”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Koç, E., (2008), “Alaşımların Elementlerinin Magnezyum Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kural, V., (1981), “0-1000 kg Ağırlıktaki Pik Döküm Parçalarda Yolluk Sistemi Hesaplama Tekniği”, I. Ulusal Döküm Sempozyumu, 28-30 Eylül 1981, İTÜ Maçka.
- Kurt, H., (1997), “Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarının Talaş Kaldırma Kabiliyeti”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kurz, W. ve Fisher, D.J., (1998), Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publications, Uetikon-Zuerich, Switzerland.
- Marghitu, D.B., (2001), Mechanical Engineer's Handbook, Department of Mechanical Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Moore, A.D., (1961), Fluid Mapper Manual, The University of Michigan, Michigan.
- Ragone, D.V., Adams, C.M. ve Taylor, H.F., (1955), Factors Affecting the Fluidity of Metals, The University of Michigan, Michigan.
- Sabatino, M. D., (2005), “Fluidity of Aluminium Foundry Alloys”, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Smith, E.H., (1994), Mechanical Engineer's Reference Book (Twelfth Edition), Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Tiryakioglu, E., (1970), Sıvı-katı Hal Dönüşümlerinde Biçim, Büyüklük ve Aşırı Isının Katılaşma Süresine Etkisi, Tübitak, İstanbul.
- Tokgöz, B., (1994), “Döküm Tekniğinde Sıvı Akımı, Akıcılık ve Akıcılığı Etkileyen Faktörler”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tüzüenalp, K.K., (1996), “Katılaşmanın Üç Boyutlu Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tüzüenalp, K.K., (2002), “Alüminyum Alaşımlarının Yönlü Katılaşması ve Süreç Parametrelerinin İrdelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, M., (1999), “Alüminyum Bronzunda Farklı Katılaşma Hızlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, M., (2008), “Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yalım, Ü., (1988), “Dökümde Yolluk Dizaynı, Yolluk Dizaynına Etki Eden Faktörler ve Etki Yönlere İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 13.08.1982

Doğum yeri Balıkesir

Lise 1997-2000

Bandırma Şehit Mehmet Gönenç Lisesi

Lisans 2000-2005

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
Endüstri Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum

2008-

Standart Conta. San. Tic. Ltd. Şti.