

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ DÖKÜMDE KATILAŞMA VE SOĞUTMANIN
İNCELENMESİ

Makina Mühendisi Güney ATALAY

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Malzemesi
Ve İmalat Teknolojisi Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ (YTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tarihçe.....	1
1.1.1. Dünyada sürekli döküm yönteminin tarihçesi.....	1
1.1.2. Türkiye’de sürekli döküm yönteminin tarihçesi.....	3
2. SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMLERİ VE DONATIMLARI.....	5
2.1. Düşey Sürekli Döküm Yöntemi	5
2.1.1. Avantajları	8
2.1.2. Dezavantajları.....	8
2.2. Yatay Sürekli Döküm Yöntemi	8
2.2.1. Avantajları	9
2.3. Sürekli Döküm Yöntemi Donatım ve teçhizatları	10
2.3.1. Kalıp	10
2.3.2. Döküm potası.....	12
2.3.3. Tandış (Ara, dağıtıcı pota).....	13
2.3.4. Daldırılmış döküm borusu	14
2.3.5. Püskürtme nozülleri.....	14
2.3.6. Destek plakaları	17
2.3.7. Makine soğutma devresi.....	17
2.3.8. Yedek soğutma devresi.....	17
2.3.9. Asal gaz ve üflenmesi.....	18
3. SOĞUTMA	19
3.1. Giriş	19
3.2. Sürekli Döküm Prosesi Sırasında Isı Transferi	23
3.2.1. Kalıp (Birincil) Soğutma	25
3.2.1.1. Kalıp - döküm parçası ısı akışı	34
3.2.1.1.1. Kalıbın üst kısmından transfer edilen ısı	35

3.2.1.1.2.	Kalıbın alt kısmından transfer edilen ısı.....	35
3.2.2.	Su ile (ikincil) soğutma bölgesi.....	37
3.2.2.1.	100 °C ‘nin altındaki sıcaklıklarda ısı iletimi ile soğutma.....	43
3.2.2.2.	100 °C-Kaynama sıcaklığı arasındaki çekirdek kaynaması.....	44
3.2.2.3.	Yanma ile Leidenfrost sıcaklıkları arasındaki geçiş kaynaması.....	44
3.2.2.4.	Yüksek sıcaklıklarda ince tabakanın kaynaması (> Leidenfrost sıcaklığı).....	44
3.2.3.	Çeliğin sürekli dökümü sırasında radyasyon ile soğuma.....	46
3.2.4.	Alüminyum alaşımlarının DC sürekli dökümü sırasında ingot taban soğutması....	47
3.2.5.	Döküm parçası soğuma davranışı.....	48
3.2.6.	Sürekli dökümde ısı akış hesabı.....	52
3.2.6.1.	Tam Temas Bölgesi.....	53
3.2.6.2.	Hava Aralıklı Bölge.....	53
3.2.6.3.	Su Püskürtme Bölgesi.....	55
3.2.6.4.	Hareketli Plakalar Bölgesi.....	55
3.2.6.5.	Merdaneler Bölgesi.....	56
3.2.7.	Soğutma devreleri için gerekli su ihtiyacı.....	56
3.2.8.	Model uygulamalar.....	58
3.3.	Su İle Soğutmanın Optimizasyonu.....	62
4.	KATILAŞMA.....	64
4.1.	Çekirdeklenme.....	64
4.1.1.	Homojen çekirdeklenme.....	65
4.1.2.	Heterojen çekirdeklenme.....	70
4.2.	Büyüme.....	73
4.3.	Arayüzey Kararlılığı.....	73
4.4.	Hücresel Büyüme.....	73
4.5.	Dendritik Büyüme.....	74
4.6.	Alaşımların Katılaşması.....	75
4.6.1.	Düzlemsel ara yüzeyde katılaşma.....	75
4.6.1.1.	Dengeli katılaşma.....	75
4.6.1.2.	Katı fazda yayınmanın olmadığı durum.....	76
4.6.1.3.	Sıvı fazda yayınmanın sınırlı olduğu durum.....	77
4.6.1.4.	Konveksiyonun etkisi.....	78
4.6.2.	Düzlemsel olmayan ara yüzeyle katılaşma.....	79
4.6.2.1.	Yapısal aşırı soğuma.....	79
4.6.2.1.1.	Tek fazlı alaşımlarda.....	79
4.6.2.1.2.	Çok fazlı alaşımlarda.....	81
4.6.2.2.	Bozulma (Pertürbasyon) Analizi.....	81
4.6.3.	Hücresel tipte katılaşma.....	82
4.6.4.	Hücre - Dendrit geçişi.....	84
4.6.5.	Dendritik katılaşma.....	85

4.7	Büyüme.....	87
4.8.	Sürekli Dökümde Katılaşma Mekanizması	88
4.9	Sürekli Dökümde Katılaşmada Tane Büyüklüğü Kontrolü.....	94
4.9.1	Çekirdeklenme analizinin zorlukları	96
4.9.2	Spontane tane iyileşmesi	101
5.	SOĞUTMANIN DÖKÜM KALİTESİNE ETKİSİ	105
6.	SONUÇ.....	105

SİMGE LİSTESİ

K	Isı iletim katsayısı
S	Kalınlık
λ	Isı geçirgenlik katsayısı
L	Isı iletim katsayısı
Q	Transfer edilen ısı miktarı
T	Sıcaklığı
δ	Z süresi içinde katılaşmış tabaka kalınlığı
Z	Katılaşma süresi
C	Katılaşma sabiti
ΔT	Sıcaklık farkı
Vd	Döküm hızı
ρ	Yoğunluk
C_p	Isıl sabit
R	Döküm boyutu
k	Isıl iletkenlik
Rewaterf	Soğuk kalıp yüzeyi ve soğutucu sıvının ortalama Reynold sayısı
Prwaterw	Soğuk kalıp yüzeyi Prandtl numarası
Hspray	Isı tranfer katsayısı
W	Su akış hızı
Σ	Birim yüzey alanı başına düşen serbest enerji artırımı
Tm	Çözünen metalin ergime derecesi
Vs	Molar hacim
ΔH	Entalpi
ΔG	Katılaşma termodinamik itici kuvvet
W*	Kritik çekirdeği çevreleyen atom sayısı
V_{1s}	Sıvı-katı arayüzeyinde bir taraftan diğer tarafa atomların atlama frekansıdır.
C_s^*	Sıvı – katı arayüzeyinde sıvı bileşimi
C_k^*	Sıvı – katı arayüzeyinde katı bileşimi
k	Denge paylaşım oranı
C_0	Alaşım bileşimi
f_k	Katı fazın ağırlık oranı
Gs	Sıvı içindeki sıcaklık gradyanı
R	Büyüme hızı
Ms	Likidüsün eğimi
Ds	Sıvı içinde çözünen elementin yayınma katsayısı
Co	Alaşım bileşimi
K	Denge patlaşım oranı
Ss	Sıvının yoğunluğu
H	Ergime ısısı
Kk	Katının ısı iletkenliği
Ks	Sıvının ısı iletkenliği
ξ	Boyutsal kararlılık faktörü
σ	Sıvı-katı yüzey enerjisi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Klasik düşey sürekli döküm tarzı 6
Şekil 2.2	Eğmeli düşey sürekli döküm tarzı 6
Şekil 2.3	Çember kavisli düşey sürekli döküm tarzı 7
Şekil 2.4	Kalıp ve döküm yolu oval kavisli düşey sürekli döküm tarzı 7
Şekil 2.5	Yatay sürekli döküm makinesi 9
Şekil 2.6	Döküm Potası ve Kesiti (Kapasite 70 ton) 13
Şekil 2.7	Tandış ve Tandış Taşıma Arabası 13
Şekil 2.8	Püskürtme nozülleri 14
Şekil 2.9	Dolu koni püskürme şekli 15
Şekil 2.10	Boş koni püskürme şekli 15
Şekil 2.11	Püskürtme nozülleri yerleşimi 16
Şekil 2.12	Püskürtme nozül kesiti 16
Şekil 2.13	Potaya asal gaz üflenmesi 18
Şekil 3.1	Geleneksel sürekli döküm 20
Şekil 3.2	Çeliğin ve Alüminyum sürekli dökümü 22
Şekil 3.3	Kalıp içerisindeki ergimiş metalin davranışı 25
Şekil 3.4	Birincil soğuma bölgeleri şematik gösterimi 26
Şekil 3.5	Döküm parçaları yüzey morfojileri 27
Şekil 3.6	Sürekli dökümünde kalıp içindeki ısı transferi şeması 28
Şekil 3.7	Akış düzenleri 29
Şekil 3.8	UCD 'de menüsküs seviyelerinin etkisi ve DC dökümde kalıp bölgesindeki sıcaklık çizgileri 31
Şekil 3.9	Birincil soğutma bölgesinden ikincil soğutma bölgesine geçiş kesiti 37
Şekil 3.10	Püskürtme açısı ve kaplama alanı 38
Şekil 3.11	Çeliğin sürekli dökümünde, nozüllerin ve merdanelerin tipik yerleşim planı 40
Şekil 3.12	Alüminyumun DC sürekli dökümünde soğuma rejimi 41
Şekil 3.13	Değişik ısı aktarımı rejimlerinde soğutma suyunun genel kaynama eğrisi 43
Şekil 3.14	Su tabakasının kaynaması 45
Şekil 3.15	DC dökümde değişik kaynama tipleri, yarı elips şeklindeki ayırıcı sınırın oluşumu ve zamanla değişimi 46
Şekil 3.16	DC döküm sırasında soğutma ve tabanın deformasyonu 47
Şekil 3.17	Sürekli çelik dökümde tipik yüzey sıcaklıkları ve soğutma rejimleri 48
Şekil 3.18	Sürekli Al. dökümde tipik yüzey sıcaklıkları ve soğutma rejimleri 49
Şekil 3.19	DC alüminyum döküm ve çeliğin sürekli dökümü için ikincil soğutma rejiminde çalışma sıcaklığı ve kaynama eğrileri 50
Şekil 3.20	Kaynama eğrilerinde başlangıç sıcaklığının etkisi 52
Şekil 3.21	Çeliğin sürekli dökümü sırasında kabuğun değişik noktalarındaki ısı kaçışının dağılımı 58
Şekil 3.22	Çeliğin sürekli dökümünde ikincil soğutma bölgesindeki kalıp çıkışındaki sıcaklık ve kabuk kalınlığı değişimleri 59
Şekil 3.23	Değişik ısı aktarımı rejimlerinde soğutma suyunun genel kaynama eğrisi 60
Şekil 3.24	Alüminyumun DC dökümünde başlangıçtan 375 sonraki sıcaklık ve kabuk kalınlığının tahmini 61
Şekil 3.25	Alüminyumunun DC dökümünde başlangıçtan 375 saniye sonraki dar ve merdane temas yüzeyindeki yüzey sıcaklıkları 62
Şekil 4.1	Çekirdeklenmeye karşı serbest enerji engeli 68

Şekil 4.2	Metal gibi viskoz olmayan sıvılarda çekirdeklenme hızı eğrisinin karakteristik görünümü.....	71
Şekil 4.3	Heterojen çekirdeklenme	72
Şekil 4.4	Bir cisim üzerinde bir kümenin meydana gelmesi	73
Şekil 4.5	Katı ve sıvının hacim serbest enerjilerinin sıcaklık ile değişimi, G_s ve G_L = katı ve sıvının serbest enerjileri.....	74
Şekil 4.6	Katı-sıvı ara yüzeyindeki çıkıntıların gren hudutlarından başlayışı, oklar mikro segregasyon hareketini göstermektedir	86
Şekil 4.7	Büyüme hızına bağlı olarak ara yüzey morfolojisinin değişimi.....	85
Şekil 4.8	Büyüme basamakları	91
Şekil 4.9	Katılaştan çeliğin şekli.....	92
Şekil 4.10	Kalıp cidarı ile katılaştan malzemenin şematik görünümü.....	93
Şekil 4.11	Sıvı ve katı sürtünme bölgeleri	94
Şekil 4.12	Birincil soğutma bölgesi altındaki ikincil soğutma bölgesi ile hava soğutmalı bölgelerde yarımamülün katılma şekli	95
Şekil 4.13	Soğutma bölge kademelerinde, yarımamül sıcaklık değişimleri.....	95
Şekil 4.14	Yarımamülün yüzeyi ile iç kısımları arasındaki sıcaklık farkı.....	96
Şekil 4.15	Soldan sağ tarafa doğru yönlü katılma.....	97
Şekil 4.16	Heterojen Çekirdeklenmenin klasik şematik gösterimi.....	101
Şekil 4.17	Belirli alt soğuma noktalarında katılmanın tetiklenmesi ile oluşan tane boyutları.....	107
Şekil 4.18	Döküm alaşım mikro yapılarında tane büyüklüklerinin ve birim hacimdeki tane sayılarının şematik gösterimi.....	108
Şekil 5.1	Çeliğin sürekli dökümünde çatlak hatalarının şematik gösterimi	108
Şekil 5.2	Alüminyumun DC dökümünde ikincil soğutmaya bağlı olarak yaşanan soğuk çatlama hatalarının şematik gösterimi	109

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Çelik ve Alüminyumun termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	21
Çizelge 3.2 Meme Ağzından Çeşitli Uzaklıklarda Teorik Kaplama Alanı	39
Çizelge 3.4 Çeşitli metallerin maksimum aşırı soğuma ve yüzey enerjileri değerleri.....	72

ÖNSÖZ

"Sürekli dökümde katılaşma ve soğutmanın incelenmesi" konulu yüksek lisans tezimde, benden bilgi ve deneyimlerinin esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ'e, Metalurji Mühendisliği anabilim dalından Sayın Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e, Sayın Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU'na, İÇDAŞ firmasından Sayın Enver ÖZGÜN'e, değerli aileme ve Özge AKSÜZEK'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

SÜREKLİ DÖKÜMDE KATIŞMA VE SOĞUTMANIN İNCELENMESİ

Güney ATALAY
Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Çelik slabın sürekli dökümünde ve alüminyumun alaşımlarının ingot DC dökümünde, katılmanın başlangıç seviyelerinden itibaren kalıbı soğutmak amacıyla su kullanılır. Kalıbın aşağı seviyelerinde ise metalin katılma yüzeyine su püskürtülmesi ile soğutma sağlanır. Su ile soğutma katılma kabuğun oluşmasını ve ısı kaçışını kontrol ettiği için ürün kalitesini direk olarak etkilemektedir. Bu olayda katılma malzeme içerisinde gerilim ve gerinimlerin oluşmasına neden olur. Bu inceleme su ile soğutma sürecindeki en son çalışmaları göz önüne koymaktadır ve her iki döküm yöntemindeki farklılıkları ve benzerliklerine ışık tutmaktadır.

İkincil soğutma bölgesindeki ısı kaçış katsayısı, su kaynama eğrilerinden de görüldüğü gibi ingot yüzeyindeki sıcaklığa bağlıdır. Isı kaçışı zamanla slab ve ingot yüzey sıcaklığı değiştikçe önemli ölçüde değişmektedir. Katılma çelik içinde sıcaklık değişimindeki ani dalgalanmalar özellikle ön yüzeyde çatlamalara veya sıcak yırtılmalara neden olan ısıl gerilmelere yol açar. Çeliğin su püskürtme ile soğutulmasının ve alüminyumun CO₂ enjeksiyonu ve suyun çarpması ile soğutulmasının sıkı kontrolü metal yüzey sıcaklığının ani değişimini engellemektedir.

Bütün süreçlerin ana amacı, gizli ve hissedilen ısının iç desteği ile metal yüzey sıcaklığını kontrolümüz dahilinde belirli bir ivme ile azaltarak, soğutma işlemi son bulana kadar yüzeyden ısı kaçış hızını sabitlemektir.

Anahtar Kelimeler: Katılma, soğutma, sürekli döküm, su ile soğutma, DC döküm

J JÜRİ:

1. Prof. Dr. HÜSEYİN SÖNMEZ
2. Prof. Dr. AYŞEGÜL AKDOĞAN EKER
3. Prof.Dr. AHMET EKERİM

Kabul tarihi:
Sayfa Sayısı: 110

THE ANALYSIS of SOLIDIFICATION AND COOLING in CONTINUOUS CASTING

Güney ATALAY
Mechanical Engineering, M.Sc. Thesis

In both continuous casting of steel slabs and direct chill (DC) casting of aluminum alloy ingots, water is used to cool the mold in the initial stages of solidification, and then below the mold, where it is in direct contact with the newly solidified surface of the metal. Water cooling affects the product quality by (1) controlling the heat removal rate that creates and cools the solid shell and (2) generating thermal stresses and strains inside the solidified metal. This work reviews the current state of- the-art in water cooling for both processes, and draws insights by comparing and contrasting the different practices used in each process.

The heat extraction coefficient during secondary cooling depends greatly on the surface temperature of the ingot, as represented by boiling water-cooling curves. Thus, the heat extraction rate varies dramatically with time, as the slab/ingot surface temperature changes. Sudden fluctuations in the temperature gradients within the solidifying metal cause thermal stresses, which often lead to cracks, especially near the solidification front, where even small tensile stresses can form hot tears. Hence, a tight control of spray cooling for steel, and practices such as CO₂ injection/pulse water cooling for aluminum, are now used to avoid sudden changes in the strand surface temperature.

The goal in each process is to match the rate of heat removal at the surface with the internal supply of latent and sensible heat, in order to lower the metal surface temperature monotonically, until cooling is complete.

Keywords: Solidification, cooling, continuous casting, spray cooling, direct chill

J JÜRİ:

1. Prof. Dr. HÜSEYİN SÖNMEZ
2. Prof. Dr. AYŞEGÜL AKDOĞAN EKER
3. Prof.Dr. AHMET EKERİM

Kabul tarihi:
Sayfa Sayısı: 110

1. GİRİŞ

Sıvı çeliğin, direkt redüksiyon ve oksijen üflemleri konverterlerin kullanılmasıyla üretimi bugün çok yüksek bir düzeye ulaşmıştır. Buna paralel olarak sıvı çeliğin kütük, blum, platin veya H, I profilleri gibi daha kolay ve seri halde biçimlendiremeye yarayan sürekli döküm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu sayede eski klasik yöntemlere göre büyük ölçüde işlem sayısı azalmış, malzeme, enerji ve zaman tasarrufu sağlanmıştır.

Sürekli döküm yönteminde insan gücü ihtiyacı azaldığı gibi çalışma şartları da çok iyileştirilmiştir. Halen gelişme halinde olan bu yöntemin en üstün yönlerinden biri döküm veriminin çok yüksek olmasıdır. Bilindiği gibi blok dökümünde ingotlarda katılaşma esnasında kof bölge oluşmaktadır. Merdanelere temas ettikten sonra parçalardaki bu boşluklu kısımların kesilmesi gerekmektedir. Sürekli dökümde ise söz konusu blok, sürekli olarak döküldüğünden katılaşma da bloğun bir tarafından sürekli devam etmekte dolayısıyla boşluk kayıpları ortadan kalkmaktadır. Böylece klasik ingot dökümüne göre verim sürekli döküm yönteminde %95'in üzerinde çıkmaktadır.

Bugün artık sıvı çeliğin genel anlamda biçimlendirilmesi sürekli döküm yöntemi sayesinde her kapasitedeki çelik dökümhanesinde mümkün hale gelmiştir. Bu yöntemin esasını, iki tarafı açık, su ile soğutmalı, istenen profil kesitli bir kalıp ile bu kalıptan kısmen katılaşmış iş parçasını sürekli çekmeye yarayan merdaneler oluşturur. Kalıbı sürekli, sıvı metalle besleyen bir ara pota (dağıtıcı, tandiş) soğutma, su püskürme donanımı ve kesme mekanizması sistemi tamamlayan elemanlardır.

Bu tezde öncelikle sürekli döküm yönteminde genel bir giriş yapıp sistemin nasıl bir süreçten geçtiği incelenecek ve daha sonra esas konusu olan soğutma ve katılaşma olaylarında çelikte ve alüminyumda ayrı ayrı incelenecektir.

1.1. Tarihçe

1.1.1. Dünyada sürekli döküm yönteminin tarihçesi

1846 yıllarında, cam levhaların sürekli şekilde üretimine başlanmıştır. Plastik haldeki cam hammaddesinin, hızla sert ve kırılabilir hale gelebilen bir malzeme olmasına rağmen sürekli döküm sistemi esasına benzer yolla katılaştırılabiliyordu. Bu örnek dikkati çekmiş ve katılaşma sonucu cam gibi kırılabilir olmayan çeliğinde benzer yöntem ile daha kolay katı halde elde edilebileceği düşünülmüştü.

Aynı yıllarda, kurşunun, ince varak ve levha halinde dökümüne ilişkin yöntemin patenti Sır Henry BESSEMER tarafından alınmıştı. Bu patentin 1857 yılında geliştirilmesi ile çelik sac dökümünde mümkün olabileceği anlaşılmıştır. Bessemer tarafından çeliğin sürekli döküm denemelerine geçilmiştir. St. Pancras'daki atölyedeki denemelerde H. Bessemer 20lb kapasiteli potayı konverter olarak kullanmış ve 6–8 lb'lik sıvı pik demiri dönen iki merdane arasından sürekli olarak geçirmeye çalışmıştır. Ancak sıvı metalin tamamen dekarbürize olmaması nedeniyle bunu başaramamıştır. Daha sonra pirinç alaşımlarının benzer sistem ile dökümü için denemeler yapılmış ve sonunda su soğutmalı iki merdane sistemi geliştirilerek 1/10 inc kalınlığında çelik sac dökümü başarılmıştır.

1889–1890 yıllarında Rainer DAELN, sistemin dahada gelişmesini sağlayan çalışmalar yapmıştır. Nihayet 1950–1955 yılları arasında ise S.JUNGHANS VE I.ROSSI çeliğin sürekli dökümünde endüstriyel ölçülerde gerçekleşmesini sağlayan çalışmalar yapmışlardır. İlk defa dikey kalıplı yatay tesis tipini geliştirmişlerdir.

1957 yılında S.JUNGHAS ve I.ROSSI, o tarihe kadar yalnız düşey tipteki döküm tesislerine karşılık, yarı mamulün iç bükey kıvrılıp doğrulmasına ve yatay olarak kesme kısmına gidişini sağlayan yatay tesis tipini ortaya koymuşlardır. Böylelikle sürekli döküm tesislerinin yapım zorluğu ve ilk yatırım fazlalıklarının giderilebileceğini düşünerek sistemin patent hakkını almışlardır.

1958'de Sovyetler Birliği dışında batı dünyasında 17 sürekli döküm tesisi çalışır halde ve 6–7 tesis ise kuruluş halindeydi. Bunlar harici 1964'lerde 104 tesis ise çalışır halde yada kuruluşunun tamamlamak üzere olduğu görülmektedir. 1958 yılında The Iron and Steel Institu tarafından Londra'da ilk defa sürekli döküm konferansı düzenlenmesi bu konuya duyulan ilginin yeniliğini, buna karşın önemini belirtmektedir.

1959 yılında, yalnız iki demir çelik tesisi yüksek alaşımlı, paslanmaz çelikler, çelikleri sürekli dökümü konusunda incelemeler yaparken, 1965 yıllarında paslanmaz çeliklerin sürekli dökümü, kabul edilen ve yaygın bir yöntem haline gelebilmiştir. Bu yıllarda, vakum ile çeliğin gazsızlaştırma üniteleri sürekli döküm tesisleriyle paralel çalışır hale gelmiş ve artık bu yöntemin:

- Üretim miktarına etkisi
- Sağladığı tasarruf
- Gerekli teknolojik bilgi
- Sağladığı üretim kalitesi

Konularında belirgin bilgiler yaygınlaşmaya başlamıştır.

Mannesman firması sürekli döküm makinesinin dikeyden, yatay hale geçişinden yararlanarak Huckingen çelik fabrikasında, dört yollu dikey sürekli döküm tesisinde, bir yol iç bükey kalıplı yatık tip haline getirilerek 1963 yılında 200x200mm'lik blum dökümüne geçilmiştir. Bu uygulama dünyada yatık tipteki ilk başarılı uygulamadır. Tesis 7,5 m yarıçapında iç bükey kalıp ve makaralı ikincil soğutma bölgesinden oluşmaktaydı. Böylelikle, dökülen blum kalıptan çıktığı anda çelikhane zemininden 3m kadar yüksekte kalmaktaydı. Aynı tarihlerde, The United Steel Corp.(Borrow) ve Von Moos Eisenwerke (Lucerne) tesislerinde de iç bükey kalıplı yatay sürekli tesislerinde endüstriyel ölçüde çalışmaya başladığı görülmektedir.

Yatay tipteki sürekli döküm tesislerinin tasarımındaki gelişmeler CONCAST firmasınca yapılmış olup 2–9 inc kenar uzunluğunda, kare şeklindeki kütük ve blum dökümünde kullanılan bu tip tesisler yaygınlaşmıştır.

Sürekli döküm sisteminin geliştirilmesinde, kalıp tasarımı ve kalıp hareketi konusunda yoğun çalışmalar yapıldığı görülmektedir. İki merdane arasındaki boşluğun kalıp olarak kullanılması düşüncesi su soğutmalı merdane haline dönüşmüştür. Giderek su ceketli bakır kalıplar kullanılmaya geçilmiştir. Böylelikle, kalıp içerisindeki sıvı metalden daha fazla ısı iletimi sağlanarak döküm hızı arttırılabilmektedir. Daha sonraları bakır kalıp'ın düşey yönde hareketlendirilmesi düşünülerek önceleri yaylı sonraları salınımlı hareket şekline geçilerek daha yüksek döküm hızına erişilmiştir. Sonraları dökümü hızını ve kapasitesini, maliyetleri düşürecek şekilde çalışmalar izlemiştir.

1.1.2. Türkiye'de sürekli döküm yönteminin tarihçesi

Türkiye'de demir-çelik endüstrisi oldukça yenidir. İlk çelik fabrikaları 1930'dan sonra karabükte kuruldu. Bundan 20 yıl sonra özel şirketler çelik üretimine katıldılar. Türkiye'de ilk defa sürekli döküm tesisi İzmir'de Metaş Metalurji Fab. A.Ş.'de 1964'te kurulmuştur. Tesisin kuruluş yılı ve konunun tarihçesi dikkate alındığında bu tür tesislerin dünya çelik endüstrisinde ilk kullanılmaya başladığı yıllara rastladığı görülmektedir. Metaşta 4m çapında 3 yollu bir adet, 2 yollu 1 adet, 7.5m yarıçapında, içbükey kalıplı yatık tip sürekli döküm makinesi vardır. 220m uzunlukta 100 ve 160 mm kütükler üretilmektedir. Yarı mamul istenen boyda hidrolik-mekanik yolla kesilmektedir.

İskenderun Demir çelik fabrikaları 1979'da SSCB tarafından kurulan dikey ve Japonlar tarafından yeni kurulan yatay blum sürekli döküm makineleri vardır. 260x340mm ve 260x260 kesitlerinde 3 tane 4 yollu dikey 3 tane 4 yollu radyal olmak üzere. İskenderun demir Çelik fabrikasında her biri 1,25 Milyon Ton/Yıl kapasiteli 2 adet kütük döküm makinesi ve 2,5

Milyon Yon/yıl kapasiteli 1 adet slab döküm makinesi bulunmaktadır. Çukurova çelik endüstrisi A.Ş.1982 yılında üretime geçti. 2 tane 4 yollu concast kütük makinesi vardır. 100–150 mm büyüklüğünde ve eğrilik yarıçapı 6m'dir.

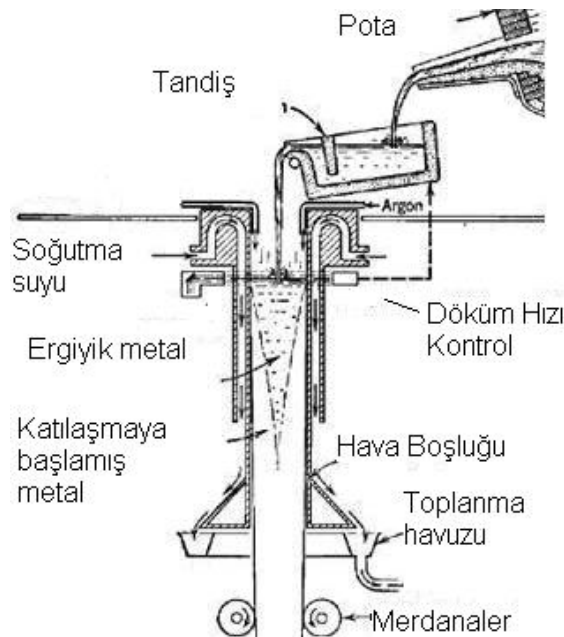
Kardemir Demir-çelik A.Ş' de ise şu kütük ve blum sürekli döküm makineleri mevcuttur; Danieli 2 BLC 706, 6 yollu, 7m radyuslu, 100 x 100 mm, 120 x 120 mm, 130 x 130 mm kesitler dökülebilmektedir. Döküm hızı 0,7 – 7,0 m/dakikadır. Seviye Kontrolü Radyoaktif (Co 60) olup, kütük kesme LPG'li şaloma ile yapılmaktadır, kesme boyu 6 – 12 metre arasındır ve sıcak tandiş uygulaması vardır. Sürekli döküm blum makinesi 10 metre radyuslu, 3 yollu, elektromanyetik karıştırıcı bulunan ve 150 x 150 mm kütük açık döküm, 260 x 360 mm blum açık ve tam kapalı döküm, 280 x 360 x 90 mm hazır profil taslağı dökülebilmektedir. Ereğli demir-çelik T.A.Ş. 1961'de üretime geçti. 2 tane sürekli döküm makinesi vardır. 9.8m eğrilik yarıçapında 1. makinede 850cm uzunlukta 1300x200mm, 2. makinede ise 1000cm uzunlukta 1600x200 mm'dir. Bunlar haricinde Çolakoğlu, İstanbul demir çelik, İzmir demir çelik, İçdaş gibi birçok özel firmada sürekli döküm yöntemi ile üretim yapmaktadır.

2. SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMLERİ VE DONATIMLARI

Sürekli döküm donatımları genellikle yatay ve düşey olmak üzere iki tarzda kurulurlar. Yatay döküm tarzının düşey döküm tarzlarına göre birçok üstün yönleri vardır. Bu nedenle döküm malzemesi imkân verdiği ölçüde donatım yatay döküm donatımı olarak kurulur. Demir olmayan metallerin tümünü yatay döküm tezgâhlarında dökmek mümkündür. Ancak çeliğin yatay sürekli dökümünde bazı güçlükler mevcuttur. Bu güçlüklerin en önemlisi dağıtıcı kalıba bağlayan geçiş kısmından kaynaklanmaktadır. Çeliğin döküm sıcaklığı, yüksek olduğundan bu sıcaklığa dayanan, az aşınan, kolay bağlanabilen, uzun ömürlü geçiş kısmına ihtiyaç vardır. Bu özelliklere sahip bir geçiş kısmı geliştirilinceye kadar çeliğin sürekli dökümü düşey donatımlar yardımıyla yapılmıştır.

2.1. Düşey Sürekli Döküm Yöntemi

Düşey döküm işlemi şu an mevcutta kullanılan, en çok tercih edilen yöntemdir. Sistem aşağıda gösterilen sıra ile iyileştirmelere uğramış ve son halini almıştır. Temel olarak prensibini anlatmak gerekir ise; döküme başlarken önce sıvı metal potadan dağıtıcıya alınır. Dağıtıcıdan kalıba sıvı metal akışı metalin potadan dağıtıcıya geçişini el ile veya otomatik olarak ayarlayarak sağlanır. Kalıptan çıkarken kısmen katılaşmış olan döküm, merdaneler ile düşey olarak aşağıya doğru çekilir. Kalıptan çıktıktan sonra üzerine su püskürtülerek hızla katılaşması sağlanır. Sürekli bir çubuk olarak aşağıya doğru ilerleyen döküm alt ucundan belirli bir uzunlukta kesilerek parçalar halinde uzaklaştırılır.

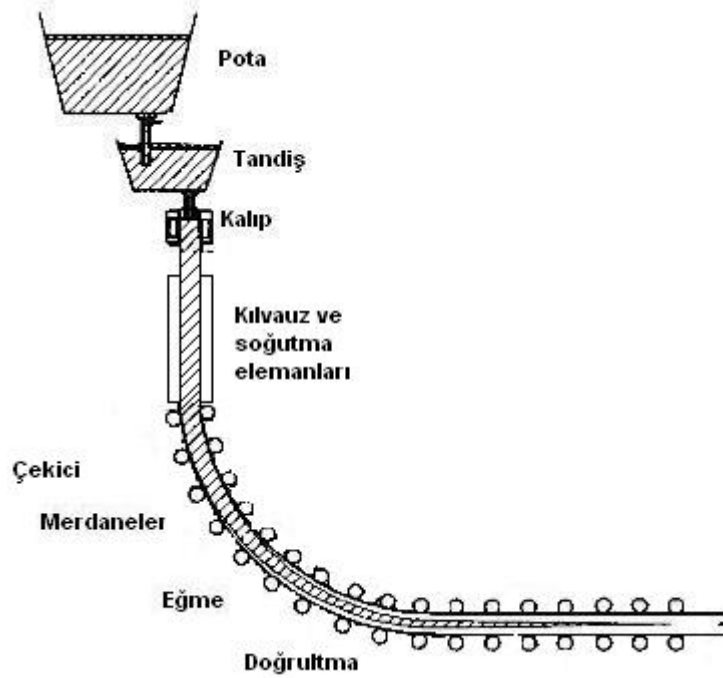


Şekil-2.1 Klasik düşey sürekli döküm tarzı (A.Ulvi AVCI, 1993)

Döküm sıcaklığı, normal döküm işleminde olduğu gibi sürekli dökümde de hatasız ve arızasız bir döküm için malzeme çeşidine bağlı olarak en uygun döküm sıcaklığının saptanması ve sağlanması gereklidir. Bu sıcaklığın saptanmasında dökülen çelik türünden başka pota hacmi, pota taşıma ve boşaltma süresi önemli faktörlerdir. Döküm parçasının kalıptan çıktıktan sonra eşit soğuma şartlarında daha kısa mesafede katılaşması istenir. Bu ise döküm sıcaklığının mümkün olduğu kadar düşük tutulması ile sağlanır. Ancak döküm sıcaklığının belirli bir değerin altına düşürülmesi erken katılaşarak memeleri tıkama, akışın kötüleşmesi gibi sorunlara yol açabilir.

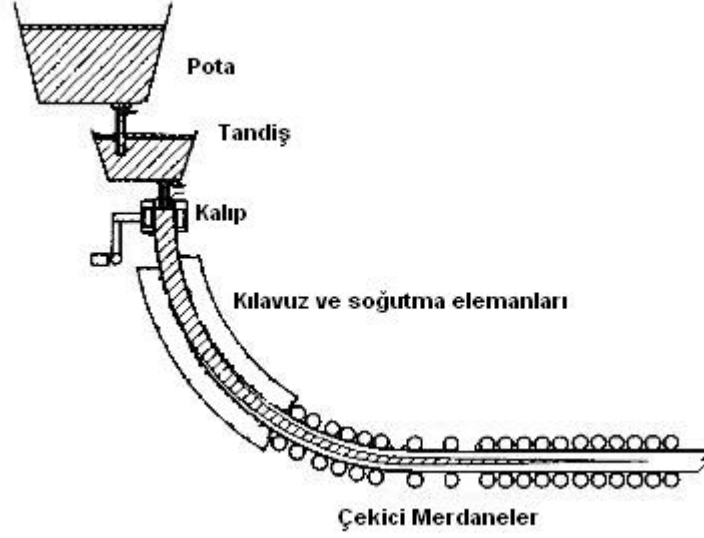
Döküm süresi kısaltılabildiği oranda aşırı ısıtma sıcaklığı da düşürülebilir. Böylece enerjiden ve refrakter malzemeden tasarruf sağlamak da mümkün olur.

Eğmeli düşey sürekli döküm, çember kavisli sürekli döküm, oval kavisli sürekli döküm tarzları da ayrıca sanayide kullanılan yöntemlerdir. Eğmeli sistemde eğme doğrultma makaralı sistemi aşağıya kadar düşey olarak ilerleyen döküm parçası çekme makaralarını geçtikten sonra eğme makaraları yardımı ile bükülerek yatay konuma geçirilir.



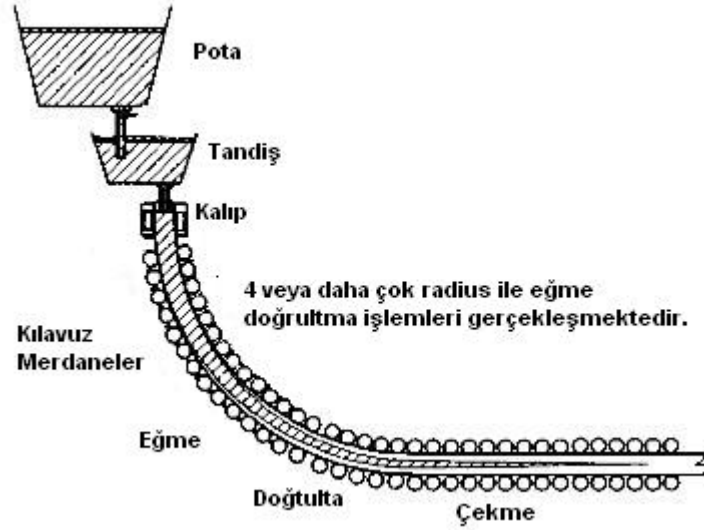
Şekil- 2.2 Eğmeli düşey sürekli döküm tarzı (G.Atalay, 2008)

Böylece istenen uzunlukta parça dökülebilir. Parça eğme bölgesine geldiğinde tamamen veya hemen hemen katılaşmış durumdadır.



Şekil- 2.3 Çember kavisli düşey sürekli döküm tarzı (G.Atalay, 2008)

Çember kavisli döküm tarzında ise yapı yüksekliği %50 oranında azaltmış, çekme ve doğrultma işlemlerinin tek bir merdane grubunun yapması sağlanmıştır. Kalıp kavisli olarak imal edilerek, döküm boruları kullanılmakta veya düz imal edilerek kavisli döküm yolu kullanılmaktadır.



Şekil–2.4 Kalıp ve döküm yolu oval kavisli düşey sürekli döküm tarzı (G.Atalay, 2008)

Oval kavisli yöntemde ise, kalıp kavisli imal edilerek sıvı metalin kalıba giriş asimetriktir. Merdaneler yardımıyla doğrultulan ve çekilen parçanın yatay olarak bükülmesi yapılır.

Sürekli döküm tesisatının ana yapı elamanları şunlardır;

1. Pota
2. Dağıtıcı pota (tandiş)
3. Döküm kalıbı
4. İlk hareket başlığı
5. Çekme ve doğrultma merdaneleri
6. Kesme donatımları
7. Soğutucu ızgaralar
8. Karıştırma donatımları
9. Soğutma donatımları
10. Ölçme ve kontrol donatımları

2.1.1. Avantajları

1. Sıvı metal kalıba tamamen simetrik olarak girer ve katılaştır
2. Düz kalıbın imalatı kolaydır.
3. Basit, düz bir çekme başlığı kullanılır.

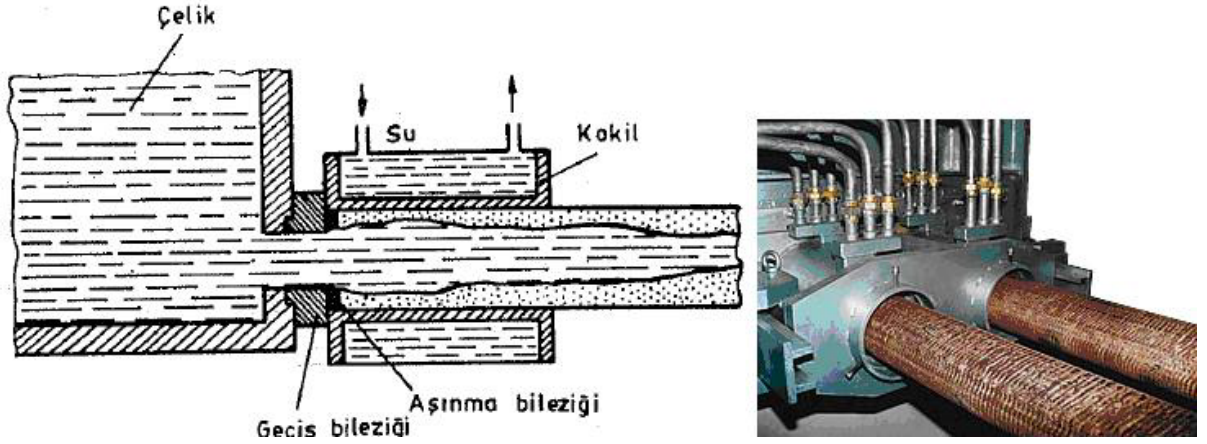
2.1.2. Dezavantajları

1. 30 metreyi aşan yapı yüksekliği ile tesis masrafını çok artırır
2. Döküm parçalarının maksimum yüksekliği bina yüksekliği ile sınırlıdır.
3. Kesme donatımındaki kısa süreli bir arızada bile döküm işlemi durur.
4. Kesilen parçaları yana yatırmak için bir donatıma ihtiyaç vardır.
5. Döküm esnasında pota zeminden çok yüksekte bulunur.

2.2. Yatay Sürekli Döküm Yöntemi

Metallerin sürekli dökümünde döküm kalıbı bütün gelişim evrelerinde düşey olarak düşünülmüştür. Bunun teknik ve ekonomik açıdan olumsuz yönleri vardır. Yatay sürekli döküm yönteminde kalıp yatay durumdadır. Konveksiyonel yöntemdeki gibi kalıp ile tandiş bağlantısı arasında boşluk olmaktadır. Buda yatay sürekli döküm işlemine bazı avantajlar sağlamaktadır. Özellikle Tandiş ile kalıp arasındaki metal oksidasyonu ortadan kalkmakta, tandiştan kalıba metal akışının kontrolünün yapılmasına gerek kalmamakta ve tandiştan kalıba kaçan parçacıkların yavaş akış dolayısı ile azalması örnek olarak verilebilir. Bu yöntemde kullanılan kalıplar yüksek oranda sertleştirilmiş, alaşımlandırılmış ve ısısal direnç kazandırılmış bakırdan imal edilmektedir. Kalıplar su soğutma donatımları ile çevrelenmiştir. Yatay sürekli dökümde bu zamana kadarki gelişmeler daha çok döküm hızının ve parça kesitinin artırılması yönünde olmuştur. Isı iletimi, difüzyon, dayanım ve ekonomik şartlar gelişmeyi sınırlayan başlıca faktörlerdir. Dağıtıcı pota ile kalıbı bağlayan seramik geçiş kısmının dayanımını arttırmak, parça yüzey hatalarını azaltmak için kalıptan çekme mekanizmalarını geliştirmek için çalışmalar sürmektedir.

Yatay sürekli döküm sistemleri için geliştirilmiş birkaç farklı yöntem vardır. Bunlar; General Motor firmasının geliştirdiği iki parçalı kalıplı sistemler, Davy-Loewy in geliştirdiği 75-150 mm çapında veya eninde kare kesitlerin dökülebildiği sistem, Horicast denilen katılaşma bantlarının kullanıldığı sistem, Böhler yöntemi ise kalıp içerisinde mümkün olduğu kadar çabuk bir hidrostatik basınç oluşturmak için dağıtıcı tabanı çıkış ağzına doğru daralmaktadır. Tulachermet sistemi ise Rusyada geliştiren bir sistemdir ve bu yöntem ile 60-150mm çaplı veya 80-120mm kare kesikli paslanmaz çelik kütükler dökülebilmektedir. IRSID sistemi ise Fransada geliştirilmiş ve geçiş kısmındaki sıvı metalin havadan gaz emmesini önlemek için bu bölgeye koruyucu asal gazlar gönderilir. Technikon sisteminde ise kalıp direk olarak dağıtıcıya bağlı değildir ve bir araba üzerinde bulunmaktadır. Kalıp dolduktan ve katılaştıktan sonra, araba ile beraber, belirli bir hızda çekilir. Stewarts-Lllyds sisteminde ise yatay konumdaki kalıp dirsek şeklinde bir geçiş kısmı ile bir basınçlı pota altına bağlanarak, sıvı metal üzerine pülzasyon şeklinde yapılan basınç ile döküm parçasının ilerlemesi sağlanır. Bunlar dışında Concast firmasının geliştirdiği osilasyon hareketi yapan yatay kalıba dağıtıcı potadan sıvı metal elektromanyetik kuvvetlerle bağlantı yapılmadan sağlanmaktadır. Diğer bir firma Voest ise yatay silindirik kokili ekseni etrafında osilasyon hareketi ile döndürerek daha düzgün bir yüzey kalitesi sağlamıştır. Burada dönen kalıpla geçiş bileziği arasındaki sızdırma, ikisi arasında preslenen bir yağlama ise önlenir.



Şekil-2.5 Yatay sürekli döküm makinesi (A.Ulvi AVCI, 1993)

2.2.1. Avantajları

1. Tesisatın yüksekliği çok az olması nedeniyle mevcut herhangi bir çatı altına kurulabilir. Böylece ilk tesis masrafları %30 oranında düşer.
2. Tandış ile kalıp birbirine bağlı bir birim oluşturduğundan, normal yöntemlerdeki sıvı metalin ara potadan kalıba geçişteki oksidasyon tehlikesi ve önlemleri söz konusu

değildir. Bu yöntem parça boyutları 100 mm ‘den küçük yuvarlak ve kütük dökümünde büyük avantaj sağlar.

3. Sürekli döküm parçasını eğme ve yöneltme zorunluğu olmadığından düşey olmadığından, düşey yöntemde kalite sorunları yaratan alaşımlar bu yöntemde dökülebilir.
4. Hiçbir döküm yardımcı malzemesi kullanılmadığından, düşey sürekli döküme göre ısı iletimi daha büyüktür.
5. Tesisatın yüksekliğinin çok az olması, kullanma ve bakım işlemlerini kolaylaştırır. Pota-dağıtıcı-kalıp sistemi otomasyonla kontrole çok müsaittir. Böylece personele olan bağımlılık ortadan kalkar.
6. İlk tesis masraflarının %30 kadar daha düşük olması, küçük siparişli parçalarında bu yöntem ile ekonomik olarak üretilebilmesini sağlar.

2.3. Sürekli Döküm Yöntemi Donatım ve teçhizatları

2.3.1. Kalıp

Kalıp sürekli döküm sürecinin en önemli parçasıdır. Burada başlayacak bir hata sürekli döküm mekanizmasının diğer kısımlarına doğru giderek artmaktadır. Kalıbın ana görevi sürekli dökümde, dökülmekte olan metale şekil vermesidir. Bu şekil verme işlemi yüksek sıcaktaki sıvı çeliğin kalıbın cidarları tarafından soğutulmasıyla olmaktadır.

Kalıp yüksekliği 500–1500 mm arasındadır, bu yükseklik üretilen ürüne göre değişmektedir. Slab için 1200 mm civarındadır. Blum için daha küçük boyutta olabilir. Kalıbın çalışma bölgesinin, yani sıvı çelikle temas eden bölgesinin (bakır cidarın) ısı geçirgenliği mümkün olduğu kadar yüksek olmalı aynı zamanda yüksek mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Soğutma suyu kalıba alttan girip üstten çıkmaktadır. Dolaşım sırasında su 4°C–12°C ısınır, dolaşım hızı 6000–10000 mm/sn’dir. (15°C–20°C) Daha sıcak ve daha düşük hızla dolaşır ise soğutmayı iyi sağlayamadığı gibi su içindeki kireç vb. empirüteler kanalları daha kısa zamanda tıkarlar.

Kalıptan geçen çelik, kalıbın hemen bitiminde 20-30 mm’lik katılaşmış bir kabuğa sahip olmalıdır. Bu onun kalıptan sonra gelen işlemlerde deformasyonlara uğramaması için yani külçenin içindeki sıvı faz ile sürekli döküm makinesinin mekanik teçhizatına ait basınçlara dayanabilmesi için gereklidir. Bundan dolayı kalıpların yüksekliklerini tespit ederken külçenin kalıp bitiminde belli bir kabuk kalınlığına sahip olması esas göz önüne alınmalıdır. Ayrıca belirli bir kabuk oluşması ile malzeme kendini çekerek çıkışa doğru profil boyutları küçülür ve parçanın kalıp iç yüzeyleri ile teması kesilir. Bunun sonucu ise daha yavaş

katılaşması ve soğuması, daha ince bir kabuk oluşmasıdır. Bunu önlemek için kalıbın kesiti çıkış yönüne doğru döküm metalin kendine çekme özelliğine göre konikleştirilir. Böylece döküm parçasının kalıptan çıkıncaya kadar kalıp yüzeyi ile sürekli temas sağlanır.

Kalıptan kesitinin çıkış yönündeki bu kesit daralmasına kalıbın konikliği denir. Döküm malzeme türünden başka, döküm hızı, döküm sıcaklığı (aşırı ısıtma) verilecek koniliği belirleyen önemli faktörlerdir.

Pratik tecrübelerle göre daire kesitli kalıplarda koniklik %0,4–0,9 mm arasında değişmektedir. Prizmatik kesitli kokillerde dar kenarlara aşağıya doğru %0,9–1,3 mm arasında verilen bir koniklik yeterli olmaktadır. Geniş kenarlar sıvı metalin hidrostatik basıncı ile kalıp yüzeyine bastırılabilirdiğinden bu kenarlara koniklik verilmez

Döküm parçasının kalıptan çıktığı andaki katılaşmış cidar kalınlığı iç kısımdaki halen sıvı halde bulunan sıvı metal üzerine gelen hidrostatik basıncı taşıyacak dayanımda olması gerekir. Bu katılaşan kabuk kalınlığı ile döküm hızına, malzeme özelliklerine ve soğuma şartları ile kalıp kesit boyutları ve şekli gibi birçok faktöre bağlıdır.

Kalınlık yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir;

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (\text{ya da } x = 0.155 \cdot \sqrt{H_o}) \text{ mm} \quad (2.1)$$

Burada;

x: Katılaşan kabuk kalınlığı, mm
k: katılaşma sabiti (18,3–29,7 mm/dak^{1/2})
t: Katılaşma süresi, dak
Ho: Kalıptan ısı akışı, kcal/mm²

Küçük kesitler için (yaklaşık Ø100) x=10mm yeterli olmaktadır. Büyük kesitlerde x=25mm'ye kadar çıkmaktadır. Diğer taraftan pratikteki tecrübelerle göre döküm hızı ile kalıp boyu arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı olduğu saptanmıştır.

$$l = k \cdot V_d \quad (2.2)$$

L: Kalıp boyu, mm
Vd: Döküm hızı, mm/dak
K: Kalıp sabiti (0,18–0,20)

Kalıp boyu sürekli çelik dökümlerinde 700–900 mm arasında değişmektedir. Yukarıdaki bağıntılara göre yapılan hesaplarda çıkan değerlerin emniyet açısından %10–20 mm kadar artırılması tavsiye edilir.

Kalıpta yapılan işlemler aşağıdaki gibidir.

Kalıp önce kalıp yağı ile yağlanır. Bu yağlamanın amacı yapışmanın önlenmesidir. Kukla kafası kalıp içine belli bir miktar girdikten sonra, kalıp ile arasında kalan boşluk asbest ipe kapatılır. Kalıba gelen ilk çelik kukla kafasına çarpıp orda katılaştır. Burada ilk katılaşmayı sağlamak amacıyla çelik talaşı ve çelik bilyalar konur.

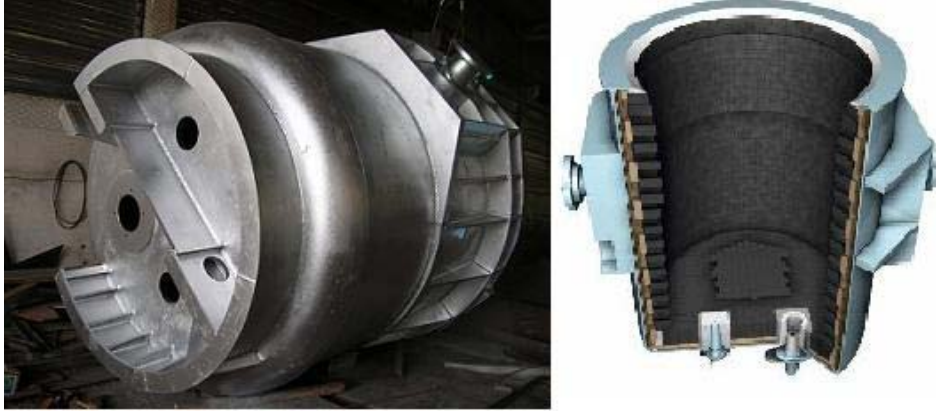
Döküm başlayınca, kukla kafası katılaştıran çeliği döküm hızıyla aşağı doğru çeker. Kalıpta yapışmayı önlemek için devamlı yukarı aşağı osilasyon hareketi vardır. Döküm sırasında kalıba devamlı döküm tozu atılır. Bunun amacı kalıptaki sıvı çeliğin oksitlenmesini önlemek, ısı kaybının önlemek, çelik ile kalıp arasında yağlama yapmak ve çelikteki pislikleri alıp çelik yüzeyine vererek ince bir cüruf tabakası oluşturmaktır. Yağlama işlemi bilhassa yüksek sıcaklıktaki çelik dökümlerinde büyük önem kazanır. Yeterli derecede yağlama yapılmazsa sıvı çeliğin kalıp yüzeyine yapışması bu çeşit çelik dökümünde daha kolaydır. Yağlamada kullanılan malzemeler bir takım özelliklere sahip olmalıdır. Sıvı ve katı olarak iki çeşit yağlayıcı malzemeler kullanılır. Bunlar doğal, madeni, parafin, kauçuk ve grafit olabilir. Kalıplar sürekli dökümde üç tip olarak kullanılmaktadır;

1. İnce cidarlı yekpare çekme kalıplar
2. Plaka kalıplar
3. Dövme blok tipi kalıp

Bu kalıpların tümü dörter cidardan oluşmaktadır. Cidarlar dökülecek malzemenin cinsine göre boyut alırlar. Isı iletkenliğinin yüksek oluşu nedeniyle sürekli döküm tesislerinde su soğutmalı kalıp malzemesi olarak bakır seçilmektedir. Isıl iletkenliğinin biraz daha az olmasına karşın ömürlerinin daha uzun olması nedeniyle Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Zr gibi alaşım elementleride kullanılırlar. Örneğin %0.5–0.3 Cr alaşımlı bakır kalıpların sertliği 130 HB'dir. Sert Cr kaplamayla kalıp iç yüzeylerinin sürtünme katsayısı düşürülerek ve daha dayanıklı 230-250 HN Cu kalıp tipleri geliştirilmiştir. Kaplanan Cr tabakasının kalınlığı 0.07mm olması yeterlidir. Bunların dışında iç yüzü Mo püskürtülerek kaplanmış kalıp türleride vardır.

2.3.2. Döküm potası

Sürekli dökümde kullanılan potalar sürekli akışlı potalardır. Çünkü devirmeli potalarda, sıvı metal banyosunda istenmeyen çalkantılara ve metalin havadan gaz emişine böylece oksidasyonuna sebep olurlar.

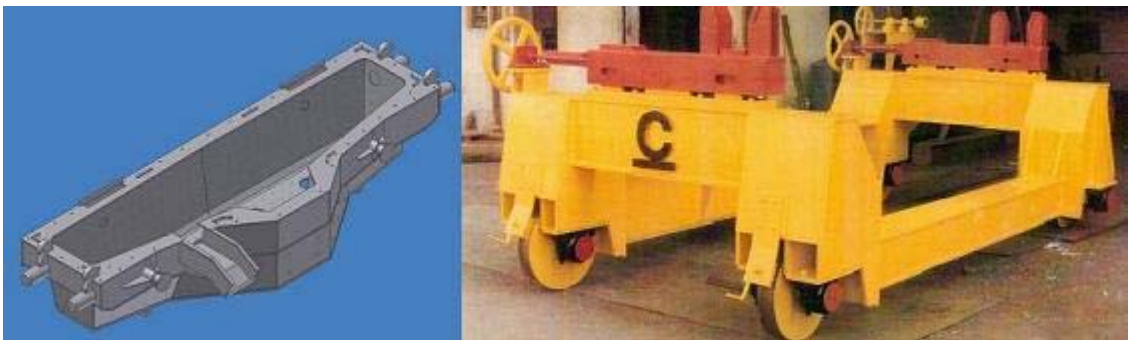


Şekil-2.6 70 Ton kapasiteye sahip döküm potası (Dökermak, 2005)

Sıvı metal pota tabanından alınması için tabanda bir delik bulunur. Bu delik tıkaçlı veya sürgülü olarak açılıp kapanabilir. Metalin delikten akış debisi ayarlanabilir. Potada sıcaklık ayarı önemlidir. Ocaktan veya konvertörden gelmiş olan sıvı metalin tandişe geçmeden önceki sıcaklığı çok önemlidir. Sorunsuz uygun bir katılaşma için bu sıcaklık dökülecek olan malzeme için ısı kaçışları dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

2.3.3. Tandiş (Ara, dağıtıcı pota)

Kalıp ve Pota arasında kalan bu elemanın görevi, sıvı metali depo ederek bir veya birkaç kalıba istenilen şekilde dağıtmaktır. Kalıpların belirli bir basınç ve debide kesintisiz beslenmesi gerektiğinden, bu işi sıvı metali bir yerden bir yere taşımaya yarayan potalarla yapmak mümkün değildir.



Şekil-2.7 Tandiş ve tandiş taşıma arabası (Dökermak, 2005)

Boyutları kalıpların döküm kapasitelerinin toplamına göre saptanır. Önemli olan nokta sıvı metalin dağıtıcı içinde mümkün olduğu kadar homojen bir sıcaklıkta ve en az kayıpla tutulmasıdır. Bu amaçla içine refrakter tuğla ve ısı yalıtım elemanları bulunmaktadır. Eskiden

ısı kayıplarını engellemek zor olduğundan, bürlörlere ile ısıtarak bu ısı kayıpları telafi edilmektedir. Günümüzde yalıtım teknolojisi çok geliştiğinden gerek kalmamıştır.

2.3.4. Daldırılmış döküm borusu

Slab veya büyük kesitli dökümlerde sıvı metal, dağıtıcıdan kalıba bir boru içinden geçerek dolar. Sürgülü ve tıkaçlı dağıtıcılar kullanıldığı zaman, sıvı metalin kalıba geçişi bu boru ile olmaktadır. Bu borunun başlıca yararları, serbest düşüm ile kalıp banyosu arasındaki örtü, cüruf parçalanmaz, kalıbın türbülanssız dolması sağlanır, Sıvı metal demetinin akarken havadan gaz emmesi, okside olması ve soğuması önlenir. Bunun sonucunda sorunsuz bir döküm işlemi ve daha kaliteli parça üretimi mümkün olur. Boru genellikle belirli bir derinliğe kadar metal banyosu içine daldırılır. Borunun alt ucu çok kere kapalı olup, metal çıkışı yanlardan ve muhtelif açılarda olmaktadır. Döküm boruları zirkonsilikat ($ZrSiO_4$) ve zirkonoksitten tek parça halinde imal edilirler.

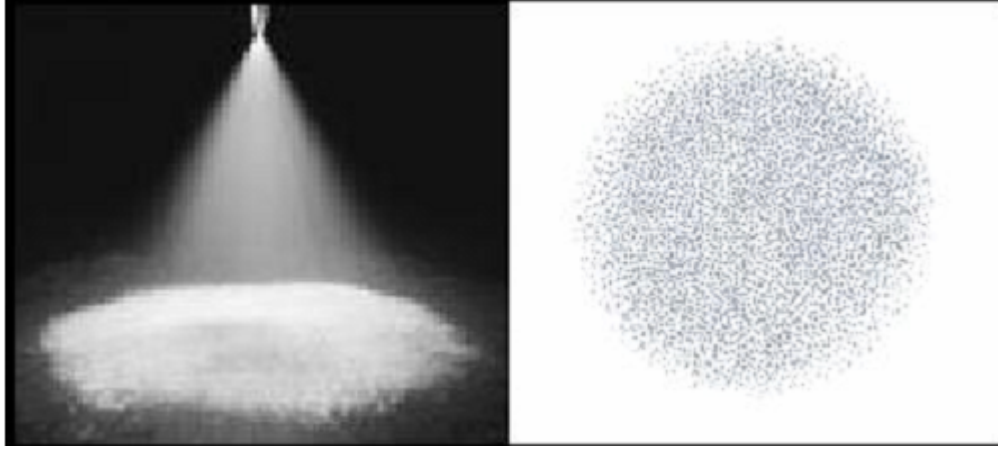
2.3.5. Püskürtme nozülleri

Soğutma suyu parça yüzeyine genellikle çeşitli meme biçimleri ile püskürtülerek gönderilir. Meme seçiminde; istenilen püskürtme tarzı, suyun parça yüzeyine çarpma enerjisi gibi faktörler rol oynar. Püskürtülen su demeti geometrisi, dolu koni, içi boş koni veya yelpaze şeklinde olabilir. Buna göre dolu koni biçimindeki bir püskürtmenin parça yüzeyindeki izi daire, diğerlerinde ise sırasıyla halka ve kenarları birbirine paralel birer banttır.



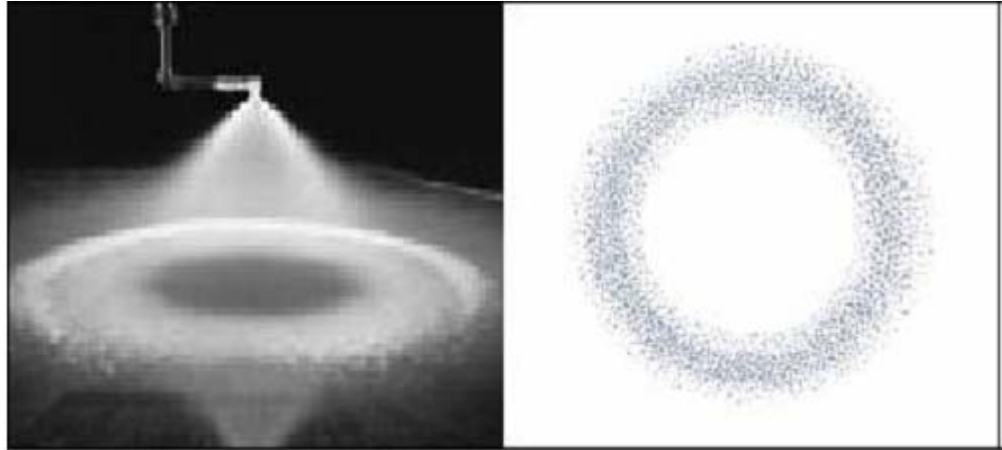
Şekil-2.8 Püskürtme nozülleri (Spraying Systems, 2007)

Meme tipini seçerken, parça şekli ve kalitesi, döküm hızı, kılavuz merdanelerin konstrüksiyonu dikkate alınır. Örneğin ikinci soğutma bölgesinde kılavuz merdaneleri seyrek dizilmiş bir kütük döküm tesisatında dolu koni biçimi püskürtme kullanılır.



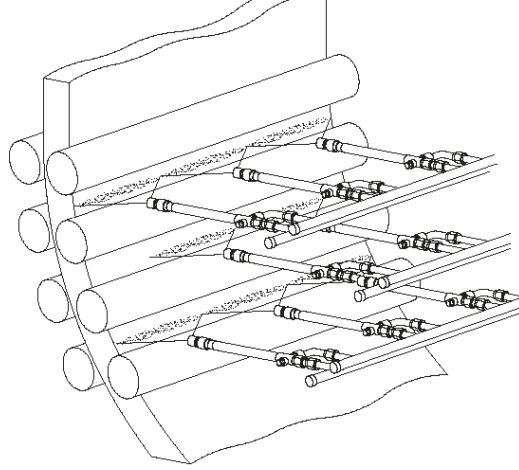
Şekil-2.9 Dolu koni püskürme şekli (Spraying Systems, 2007)

Bu biçimdeki parça yüzeyine çarpan su demetinin şiddeti parça kenarlarında zayıf orta bölgede kuvvetlidir. Yelpaze biçimindeki püskürtme, merdaneleri kısa aralıklara düzenlenmiş bütün makine tiplerinde kullanılmaktadır.



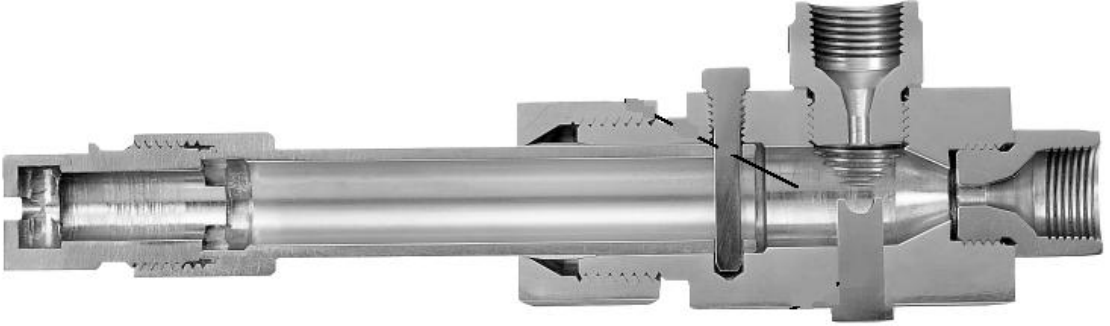
Şekil-2.10 Boş koni püskürme şekli (Spraying Systems, 2007)

İçi boş koni biçimindeki püskürtme köşeleri kuvvetli soğutulması istenen kütük dökümleri için kullanılmaktadır. Meme şekillerine bağlı püskürtme karakteristiklerinin sürekli dökümde değişen imalat programına göre kolayca seçilebilmesi için meme donatımlarında da gelişmeler devam etmektedir.



Şekil-2.11 Püskürtme nozülleri yerleşimi (Spraying Systems, 2007)

Etkin bir soğutma için döküm parçası yüzeyine püskürtülen suyun her bir damlası parça yüzeyinde soğutmayı güçleştiren buhar tabakasını parçalayacak şiddette olması gerekir. Suyun içinde parça yüzeyine çarpan su damlacıklarının belirli bir kinetik enerjiye ulaşması icap eder. Bu kinetik enerji ile önündeki su basıncına ve damla büyüklüğüne göre değişir. Örneğin kütük dökümü için oval yelpaze biçimindeki püskürtmede çarpma basıncının yaklaşık olarak $0.08-0.17 \text{ p/mm}^2$ civarında olduğu saptanmıştır.



Şekil-2.12 Püskürtme nozül kesiti (Spraying Systems, 2007)

Gereksiz su sarfiyatından kaçınmak için beher çift merdane başına nozül sayısı çok kere iki veya üç adetle sınırlandırılır. Yalnızca su püskürtme yerine son senelerde suyu basınçlı hava ile pülverize ederek püskürten nozüllerde geliştirilmiştir. Ancak burada havanın parça yüzeyinde oksidasyonu kolaylaştıracağı gözden uzak tutmamak gerekir. Isıl gerilmelere çok hassas olan çelikler su püskürtülmeden tamamen havada ışınlam yoluyla soğutulurlar.

2.3.6. Destek plakaları

Destek plakaları slab dökümlerinde kalıp çıkışında hem henüz ince bir kabuk tarafından taşınan parçayı desteklemek, hem de kalıpla püskürtme bölgesi arasında tedricî bir soğutma bölgesi sağlamak amacıyla kullanılırlar. Kalıptan sonra gelen bu plakalara soğutma plakaları da denir. Plakalar genellikle bakır veya çelikten yapılmaktadır. Su ile soğutulurlar. Üzerlerinde ayrıca parçayı su ile direk olarak soğutmaya yarayan deliklerde bulunur. Plakaların kendilerini kolayca soğutabilmek için dış taraflarına soğutma kanatları yapılmıştır. Bu çeşit plakalar aşınmaya dayanıklı çelik veya hematitten dökülerek imal edilirler.

Plakalar parçanın karşılıklı iki geniş yüzeyine 1.5–2 mm aralıklarla kalıbın bir uzantısı şeklinde arka arkaya dizilmişlerdir. Kalıbı ilk takip eden plaka çifti kalıba bağlı olup onunla beraber bir osilasyon hareketi yapar. Bu tür soğutma tarzı başlangıçta yalnızca slab dökümü için uygulanmış olmak ile birlikte bugün diğer bazı dikdörtgen kesitli parçalarda da kullanılmaya başlanmıştır.

Destek plakaları ile soğutma direkt ve endirekt olarak iki şekilde meydana gelmektedir. Direkt soğutma plakalar üzerindeki deliklerden parçaya püskürtülen su ile endirekt soğutma ise plakaların parçaya teması ile sağlanmaktadır. Plaka üzerindeki püskürtme delikleri plakaları soğutan 1 atü basınçlı su devresine bağlıdır. Püskürtme suyu bu devreden deliklere geçer.

Bu soğutma sisteminde karşılıklı her bir plaka çifti parçaya basarak ve çekerek onunla birlikte belirli bir süre aşağıya doğru hareket ederler. Daha sonra parçadan ayrılarak hızla ilk konumuna gelir ve tekrar parçayı kavrarlar. Örneğin 25mm/sn (1,5m/dak) bir döküm hızında plakaların parçadan ayrılıp geri hareket süresi 0.8 saniyedir. Destek plakaları sayesinde özellikle slab dökümlerinde yüzey deformasyonları, çatlaklar ve iç gerilmeler azaltılmıştır.

2.3.7. Makine soğutma devresi

Birincil ve ikincil soğutma devreleri dışında döküm donatımı ve makinesine ait diğer elemanların (Çekme, destek, eğme, doğrultma merdaneleri, kesme istasyonu hidrolik devreler vs.) soğutulması devre içinde incelenir.

2.3.8. Yedek soğutma devresi

Bu devre elektrik kesintisi gibi acil durumlarda otomatik soğutma devresine bağlanır. Bu devreye basınçlı su, yükseğe yerleştirilmiş bir su deposu veya bir dizel motor-pompa sistemi

ile temin edilir. Depo kullanıldığı takdirde, kalıbı en az 10 dakika sürekli soğutacak ve 2 atü'lük bir su basıncı sağlayacak yükseklikte olmalıdır.

2.3.9. Asal gaz ve üflenmesi

Potadaki sıvı metal içine aşağıdaki amaçlarla asal bir gaz, çoğunlukla Argon gazı, üflenir. Bu sayede sıvı metal içindeki deoksidasyon artıklarını temizlemek, sıvı metalin hidrojen miktarını azaltmak, üflenmiş gazın karıştırma etkisi ile potada homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanır. Potaya gaz iki yolla üflenir. Birincisi pota tabanına açılmış deliğe yerleştirilmiş gözenekli bir taş içinden, ikincisi potaya yukarıdan daldırılmış refrakter astarlı bir milin ortasındaki delikten üflenerek yapılır. 100 ton sıvı metal ihtiva eden bir pota için üfleme süresi 10 dakikadır. Üfleme işlemi, potada üfleme süresi ve debisine bağlı olarak yaklaşık olarak 1°C/dak'lık bir sıcaklık düşümüne sebep olur. Argon gazının eklenmesi ile karıştırma işlemi arttırılmış olur, nozüllerde tıkanma tehlikesi azalır ve katın inklüzyon parçacıklarının ayrılmasına yardımcı olur. Argon gazı bu işlemlere yardımcı olduktan sonra sıvı ergimiş çeliğin içerisinden kalıp döküm tozlarının arasından geçerek ortamdan uzaklaşır. Argon gazı akış modelini etkilemektedir.



Şekil 2.13 Potaya asal gaz üflenmesi (The AISE,2001)

Gazın üflenmesinin arttırılması veya baloncuk ölçülerinin küçültülmesi akış düzenindeki değişikliği arttırmaktadır. Baloncukların büyümesi ile gaz daha kolay yüzmeye başlamakta ve kolayca kalıbı terk ederek akış düzenine daha az etki yapmaktadır. Küçük baloncuklar ise katılaştıran kabuğun içine kaçma ihtimali olduğu için istenmeyen bir durumdur. Argon gazı eklenmesi döküm makinası içerisindeki süper ısının kaçışını hızlandırır ve geniş yüzey ve menisküs bölgesine daha çok ısının gitmesine sebep olur. Buda yüksek ısı transfer noktalarını azaltır.

3. SOĞUTMA

Sürekli dökümde soğutma çok değişik tipte ısı transfer yöntemlerinin bir araya gelmesi ile sağlanır. Su ile soğutma en önemli bölümü oluştururken, kalıbın ve havanın etkileride bu bölümde incelenmiştir.

3.1. Giriş

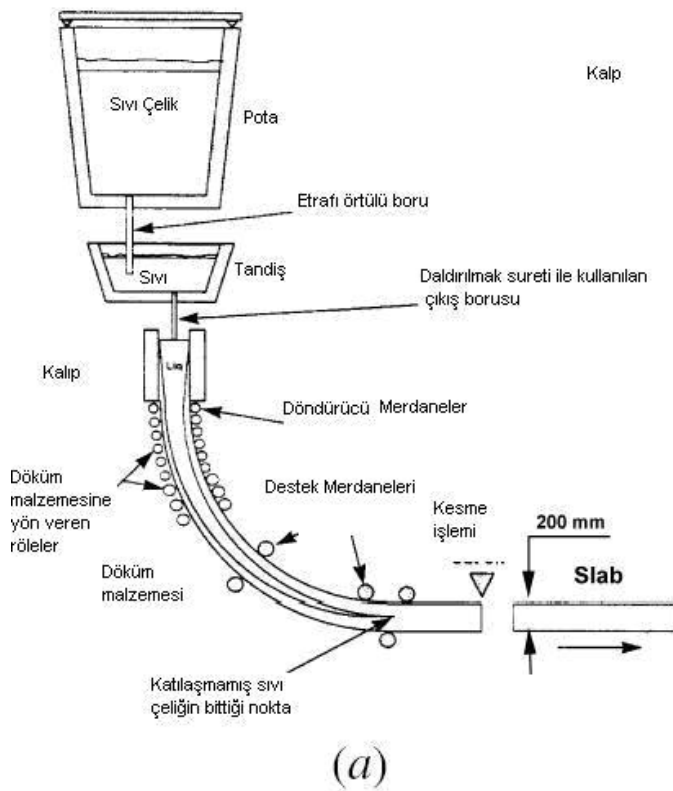
Çelikler ve alüminyum alaşımları için sürekli döküm, ekstrüzyon ve haddeleme gibi imalat yöntemleri için yıllardır yarımamül hazırlama yöntemi olmuştur. Bu yarı mamuller kütük (150mm ile 175mm arasında değişen kare kesitli çelikler), kalın levha/ingotlar (50mm ile 300mm arasında değişen kalınlıklarda geniş dikdörtgen çelikler veya 500mm-700 mm civarlarına çıkan alüminyum alaşımlar), ince levhalar (50mm ile 75mm arasında değişen kalınlıkta çelikler), çubuklar (kalınlığı 1mm ile 12mm arasında değişen çelik ve alüminyum malzemeler), yuvarlak kesitler (çapları 500mm hatta 700mm ye çıkabilecek şekilde alüminyum parçalar)'dir. Son on yıl içinde hem çelik hem alüminyum proseslerinde gelişmeler ivme kazanmıştır, özellikle enerji tasarrufunda ve üretilebilirliğinde yeni teknolojiler ortaya çıkmıştır.

Ancak bu ilerleme çelik ve alüminyum endüstrilerinde tamamıyla farklı bir yol izlemiştir. Bu ayrılık özellikle şu konularda kendini göstermiştir; döküm teknikleri, mekanizmalar, proses ve kalite kontrol yöntemleri.

İki endüstride de üretim her zaman döküm hızı tarafından kontrol edilmektedir, burda da yüksek hızlar her zaman aranan durum olmuştur. Ancak döküm hızı birçok sebepten hiçbir zaman keyfi olarak arttırılamaz. İlk olarak derinliği artan sıvı havuzu ve sıcaklığı artan döküm alanı ve soğutma malzemelerinin ihtiyacının artması başlıca sebepleridir. Uç durumlarda yapısal olarak zayıf katı kopmaya uğrayabilir ve buda kalıbın altındaki sıvı metalin patlamasına neden olabilir veya potanın dolması ile aşırı kabarma meydana gelebilir. İkinci olarak yüksek döküm hızları yüksek ısı gerilimleri yüzünden çatlaklara yol açabilir. Döküm hızları alaşım kompozisyonu ve parça geometrisine bağlı olarak bir menzilde değişir. Çelik levhalar için; döküm hızı kalınlığın azalması ile yükselir; 300mm için 10mm/s iken, 50mm için 80mm/s'ye çıkmıştır. Başlangıçta alüminyum ingotlarda çatlama ihtimaline karşı düşük hızlarda çalışılmalıdır, 7,5mm/s'den 1mm/s arası başlangıç hızı ve sabit çalışma hızı olarak 1mm/s'den 3mm/s değişen hızlar kullanılmaktadır.

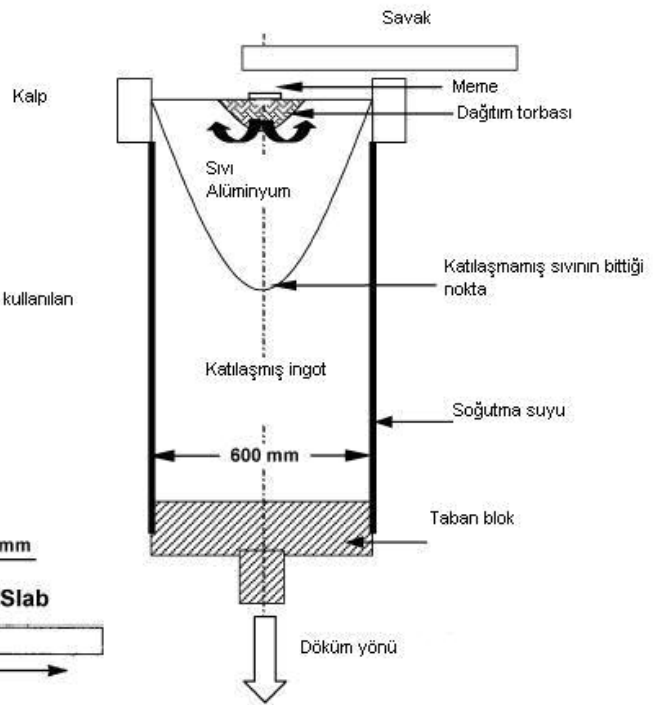
Sürekli döküm mekanizması birincil soğutma (kalıp) ve ikincil soğutma (su ile soğutma) bölümlerini kapsamaktadır. Bu mekanizma sıvı metalden ısıyı uzaklaştırmak (toplam ısının %5'ini içermektedir), Katılaşma sınırından uzaklaştırmak, (toplam ısının %20'sini içermektedir) ısı faz değişimi ve katılaştıran metaldeki hissedilen ısının (toplam ısının %75'ini içermektedir) alınması için tasarlanmıştır. Ancak çelikler ve alüminyumlar için soğutma sistemleri tasarımları değişiktir.

a) Çelikler için ;



(a)

b) Alüminyum için;



(b)

Şekil-3.1 Geleneksel sürekli döküm (MS&T,2004)

Şekil 3.1-a'da gözüken çeliğin sürekli döküm yönteminde, ergimiş metal, sıvı çeliği barındıran pota'dan tandış adı verilen daha küçük kapa dolmaktadır. Buradan da tandışın altındaki nozülünden sürgülü veya durdurmalı kontrol sistemine göre ayrılmaktadır. Buradan da sıvı metal kalıp içine akmaktadır (genellikle yaklaşık boyu 700mm ile 1200mm arasındadır) ve bu arada su ile soğutulmuş kalıp cidarları sayesinde (birincil soğutma) katılarak ince bir kabuk oluşur. Stabil durumda, kalıbı terk eden katılaşmış malzeme, gerekli mekanik dayanıma sahip olması gerekmektedir. Bu da malzeme kalınlığına ve döküm hızına bağlı

olarak 5000mm ila 30000mm arasında derinlikte olmaktadır. Malzeme haddeler üzerinde aşığı doğru çekilerek kalıptan uzaklaşmaya başlar.

Sık aralıklar ile yerleştirilmiş haddeler ferostatik basınç yüzünden sıvı metal zar üzerinden şişkinliklerin oluşmamasını sağlar. Yüksek basınç kapasiteli nozüllerden elde edilmiş su spreyleri, haddelerin arasına yerleştirilerek, katılşma prosesi süresince malzemenin soğutulmasını sağlar. Bundan sonra stratejik şekilde yerleştirilmiş haddeler malzemenin istenilen bir eğriyi takip edebilmesi için ve ayrıca kesicilerin rahat çalışabileceği yatay düzleme malzemeyi getirmesini sağlarlar. Bütün bu işlemler birlikte sürekli bir prosesi tamamlarlar.

Alüminyum alaşımlarındaki direk soğutmalı (DC) döküm prosesi şekil 3.1-b'de şematik olarak görölmektedir. Çeliklerin sürekli dökümüne göre, DC döküm sadece yarı devam edebilir şekildedir, bunu da açmak gerekir ise mamul dikey olarak çok kısa bir mesafe ilerler, 10 metre civarı, daha sonra ingot döküm çukuruna ulaşınca proses mutlaka durdurulmalı ve sonra tekrar başlatılmalıdır. Burada göröldüğü gibi dikkat edilmesi gereken deformasyonun en fazla meydana geldiği başlangıç bölgesidir. Prosesin başlaması için, alt kap dikdörtgen şeklindeki (~100mm–150mm boyunda) açık kalıbın içine oturtulur. Yüksek sıcaklığa ısıtılmış önceden belirlenmiş doldurma hızına bağlı olarak oluktan akarak nozülden geçerek dağıtım bölümüne oradan da kalıba ulaşır. Belirli bir yüksekliğe kadar doldurulan alt taban ve döküm ingot döküm çukuruna doğru alçaltılır. Alüminyum ingot un soğutulması, su tarafından soğutulan döküm kalıbın (70mm–90mm boyunda) ısıyı alması ve kalıbı terk etmesinden hemen sonra direk olarak soğutucu su ile teması ile olur. Buradaki soğutucu su, birçok delikten çıkarak kalıbı sarmaktadır.

DC dökümün en önemli tanımlayıcı özelliği burada kendini göstermektedir; normal çalışma durumlarında ısının %80'lik kısmı bu suyun direkt olarak ingot gövdesi ile çarpışması ile sistemden uzaklaştırılır. Bu şekilde yarı fasılalı devam eden süreç ısıl alan olarak iki ayrı bölgeye ayrılmıştır. Başlangıç bölgesinde veya I. Evrede, sıvı metal havuzu ve ısıl alan zamanla birlikte sürekli yayılır ve genişler. Normal çalışma şartlarında yani II. Evrede sıvı metal havuzu kalıba bağlı olarak (genellikle ingot ölçülerine ve alaşım bileşimine göre 200mm ile 500mm derinliğinde olur) ya sabit kalır veya en son alabileceği hale gelir. Normal çalışma şartlarına döküm boyu olarak 500mm ile 1000mm arasında ulaşılır. Son olarak, dökümün son işleminde, alt taban durarak, ingot döküm boşluğundan soğumak için çıkar.

Çeliklerin ve alüminyum alaşımlarının sürekli dökümünde, bu iki metalin termofiziksel özelliklerindeki farklılıklar kullanarak geliştirilmiş farkı özellikler vardır. Aşağıdaki çizelge 3.1'e göre şu şekilde özetlenebilirler;

Termofiziksel Özellikler	Sıvı Çelik	Sıvı Alüminyum	Katı Çelik	Katı Alüminyum
<i>Sıvılaşma Sıcaklığı (°C)</i>	1525	650	-	-
<i>Yoğunluk (kg m⁻³)</i>	7020	2400	8000	2600
<i>Özgül Isı (J/kg⁻¹ K¹)</i>	680	1300	690	900
<i>Isıl İletim (W m⁻¹ K¹)</i>	26	90	29	190
<i>Isıl Yayılma (m s⁻³)</i>	0.54 x 10 ⁻⁵	2.9 x 10 ⁻⁵	0.53x10 ⁻⁵	8.1 x 10 ⁻⁵
<i>Gizli Isı (J m)</i>	-	-	21.8x10 ⁻⁸	9.4 x 10 ⁸
<i>Katılaşma Çekme Payı (%)</i>	-	-	2.5	6.5
<i>Isıl Çekme Katsayısı (K¹)</i>	-	-	12x10 ⁻⁶	24 x 10 ⁻⁶

Çizelge–3.1 Çelik ve Alüminyumun termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

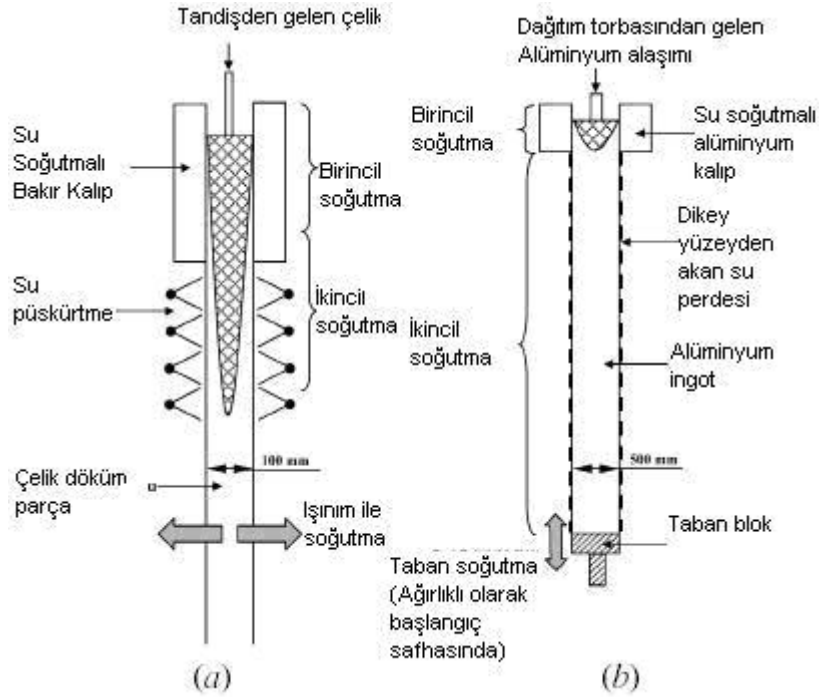
1. Alüminyumun ergime noktası sıcaklığı çeliğe göre çok küçüktür. Bir karşılaştırma yaparsak, alüminyum alaşımlarının sürekli dökümüne göre çeliklerin sürekli dökümünde çok yüksek sıcaklarda çalışıldığı için kütleye göre ısı daha fazladır.
2. Alüminyum alaşımlarında ısıl iletkenlik çelikliğe göre daha fazladır. Düşük döküm hızlarıyla birleşmesi ile (çeliğe göre yaklaşık 10 kat daha yavaş) içerdeki ısının dışarı atımı daha hızlıdır. Böylece daha önce anlatıldığı gibi daha küçük döküm havuzları oluşmaktadır. Çatlama riskine karşı katı, ingot bükülmeden dik olarak dökülmelidir. Buda sonuç olarak dökülebilecek maksimum boyu sınırlamakta ve yeni bir ingot dökümünün başlamasını sağlamaktadır. Karşılaştırma yaparsak, çeliğin sürekli dökümünde kalıp altından çıkan sıvı metal düzgün uzaması ile içi sıvı dolu kabuğun kolayca bükülmesine ve düzgün şekilde sorunsuz yarımamül oluşturmasına izin verir.
3. Sıvı alüminyumun ısıl yayılımı çeliğe göre 6 kat daha yüksektir. Böylece belirli bir sıvı akış düzenine göre sıvı alüminyum ısısını sıvı çeliğe göre daha hızlı kaybetmektedir. Buda yüzeydeki sıcaklığın daha hızlı şekilde değişmesini sağlar.
4. Alüminyum alaşımlarda katılaşma çekme payı deneyler ile çeliğinkine göre iki kat daha fazladır. Böylece, alüminyum alaşımlarında lapa gibi oluşan bölgeler yüzünden daha yüksek ısıl gerilmeler ortaya çıkar. Buda özellikle uzun donma menzilli alüminyum alaşımlarda sıcak yırtılma kırılmalarının oluşmasına sebep olur.
5. Alüminyumların hacimsel gizli (sınır) ısısı çeliğe göre daha düşük olduğundan, soğuma daha hızlıdır.

6. Alüminyumun ısıl büzülme katsayısı çeliğe göre daha yüksektir. İlk katılma sırasında katı kabuğun ekstra büzülmesi dolayısı ile derin yüzey darbeleri, kalıp soğuması sorunları ve yüzey kalite problemlerine neden olur. Ayrıca alüminyumun DC dökümünde yüksek ısıl büzülme Al ingotlarda çok sayıda makrodeformasyona yol açar. Örnek vermek gerekir ise başlangıçta soğutma suyunun ingot yüzeyine ulaştığı anda, “son kıvrılma (butt curl)” adı verilen karakteristik bir deformasyon oluşur. Stabil şartlar sağlandığı anda katılma yüzey merkezlerinden ingot büzülür. Bunun olmaması için katıyı çeken haddeler konulmalıdır. Çoğu kalıp dışbükey olarak üretilmektedir.

Bu bölümde hem çeliklerin hem de alüminyum alaşımlarının sürekli dökümünde ısı transfer konusunu özellikle su ile soğutmada ele alarak karşılaştırmalar, farklılıklar ortaya koyarak anlatılacak ve soğutma ile ilgili kalite problemleri göz önüne alınacaktır.

3.2. Sürekli Döküm Yöntemi Sırasında Isı Transferi

Çeliklerin ve alüminyumun sürekli döküm proseslerini göz önüne aldığımızda, daha önce açıkladığımız gibi, birçok farkının olmasının yanında, ergiyik ve katılmış metalden ısı kaçıışı yönünden benzer özellikleride vardır. Şekil 3.2’de çeliğin ve alüminyum alaşımının DC dökümünde soğutma bölgeleri sırası ile görülmektedir.



Şekil-3.2 Çeliğin (a) ve alüminyumun (b) sürekli dökümü (MS&T, 2004)

İki sürekli döküm yönteminde de birçok ısı transfer mekanizmaları çalışmaktadır,

Bunlar;

- Sıvı metal havuzuna dolan metal yüzünden oluşan momentum sayesinde konveksiyonel ısı yayılımı
- Havaya kaçanlar
- Hareket eden katı kabuk ile iletim
- İç taraflardan dışarıya doğru ısı kaçıışı
- Kalıba konveksiyon ile geçen ısı (Birincil soğutma)
- Soğutma suyuna geçen (İkincil soğutma)
- Alt tabana kaçan ısı (Sadece DC' de ve başlangıçta)

Fakat bu ısı kaçış mekanizmalarının soğutma için önemleri; Peclet (Pe) ve Biot (Bi) deneyleri yapılarak ölçülmüştür. Peclet sayısı atmosfere kaçan ısının, temas ile kaçan ısıya oranıdır.

$$Pe = \rho c_p VR/k \quad (3.1)$$

ρ : Yoğunluk (kg/m³)

c_p : Isıl sabit

V : Döküm hızı

R : Döküm boyutu

k : ısı iletkenlik

Alüminyum sürekli döküm için $1.8 < Pe < 4.5$ arasında değişmektedir. Buda aksel iletimin havaya kaçan ısı kadar kuvvetli olduğunu göstermektedir. Biot sayısı ise konveksiyon ile iletimin kondüksiyon ile iletme oranıdır.

$$Bi = hR/k \quad (3.2)$$

Burada h yüzeydeki konveksiyonel ısı iletim katsayısıdır. R ise kondüksiyon ile iletim yapan bölgenin uzunluğudur. DC için $2 < Bi < 60$ arasında değişmektedir. Buda su ve kalıp ile soğutma da sağlanan konveksiyonel ısı iletim direnci, ısı ile enine olarak çok güçlü şekilde etkilemektedir.

Karşılaştırma yapar isek, çeliklerin sürekli dökümünde, yüksek döküm hızları ve düşük ısısal iletim sebebiyle bu değerler çok yüksektir. (Pe için 1000 kat, Bi içinde 10 kat)

Buda havaya kaçan ısıya göre aksel doğrultularda kaçan ısının önemsenmeyecek seviyelerde olduğu göstermektedir. Böylece döküm malzemesi kalınlığı da ters yönde etkileyen ısı transferini yönlendirmektedir. Biot ve Peclet numaraları ayrıca sıvı metal özünün davranışını göstermektedir. $Bi > 10$ olması; sıvı metal havuzunun şeklini, Pe sayısının artması ile doğrusal uzamasını gösterir, fakat yüzey ısı kaçıışı ile bir bağlantısı yoktur. Buda daha önce belirttiğim gibi havuz derinliği, döküm hızı ile düz, metal iletkenliği ile ters orantılı olduğu

görülmektedir. Yarı katı (lapa) bölgenin kalınlığı ve sıcak yırtılma yatkınlığı da Peclet sayısı ile ilgilidir.

Isı transfer mekanizması sadece sıvı havuz şeklinin kontrolüne etki etmez, ayrıca üretim verimliliği üzerinde de büyük etkisi vardır ve soğutma sırasında metaldeki ısıl büzülme oluşan ısıl gerilim ve gerinimlerin büyüklüğü yüzünden meydana gelmektedir.

Katılaştıran kabuğun etkilendiği ani sıcaklık artışı ve azalışı, ısı kaçışlarına neden olduğu için ısıl genişleme ve yüksek ısıl gerilme ve gerinimler ortaya çıkar. Böylece nihai sonuç olarak döküm kalitesine etki eden iç ve yüzeysel hataların oluşmasına neden olur. Şimdi beş bölümde gerçekleşen ısı transfer mekanizmalarını detaylı inceleyeceğiz.

Bunlar:

- A- Kalıp (Birincil) ile soğutma
- B- Su (ikincil) ile soğutma
- C- Çeliklerin sürekli dökümünde radyasyonla havaya karışan ısı ile soğuma
- D- Alüminyumların sürekli dökümünde taban soğutması
- E- Döküm kolunun soğuma davranışı

3.2.1. Kalıp (Birincil) Soğutma

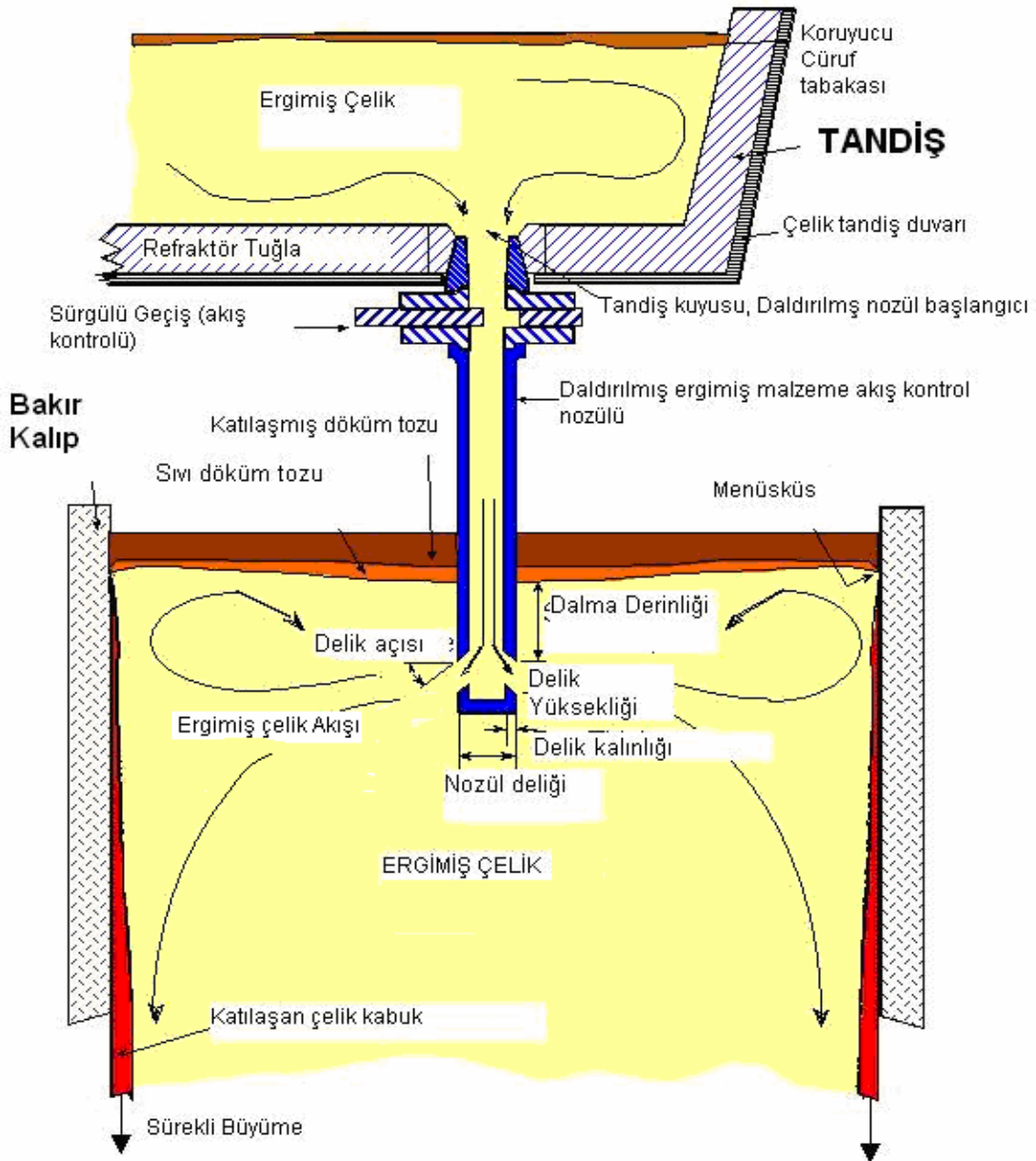
Kalıp soğutma devresine birincil soğutma devresi de denir. Bu devre, dolaşan suyun daha temiz ve miktarının da fazla olması nedeniyle kapalı bir soğutma devresi olarak çalıştırılır. Devrenin başlıca elemanları şunlardır: soğutma suyu deposu, ısı eşanjörü, makine soğutma suyu, kalıplar, ilave su girişi, debi ayarı, acil su deposu ve temizleme filtreleridir. Bu durumda buharlaşma yöntemi ile soğutmada gerçekleşmektedir.

Kalıp soğutma devresini az bir sirkülasyon suyu ile soğutmak için son yıllarda bu devrede buharlaştırma yöntemi denenmektedir. Bu şekilde sistem ısısından yararlanmak, işletme masraflarını düşürmek mümkün olmaktadır. Yoğuşma tankından kalıba gelen sıcak su burada kalıptan çektiği ısı ile buharlaşarak doymuş buhar olarak tekrar basınç kontrol ventili üzerinden aynı tanka döner. Bu tanktaki doymuş buhardan ısıtma amacı ile yararlanmak mümkündür.

Sürekli döküm prosesinde sıvı metal akış doğrultusuna göre su ile soğutulan kalıp içinden geçerek ısıyı kalıba transfer eder. Kalıp içinde sıvı havuzunun içindeki ısı transferi ve kalıp metal teması sırasında menisküsdeki ilk katılaşma ve katı kabuğun oluşumunu etkiler. Ergimiş metal kalıba genellikle seramik bir nozülünden geçerek kalıba ulaşır. Nozül deliğinin

şekli ve açısı metalin sıvı metal püskürüş yönünü ve türbülans oluşumunu kontrol eder, böylece sıvı metal akışı düzeni de kontrol edilir.

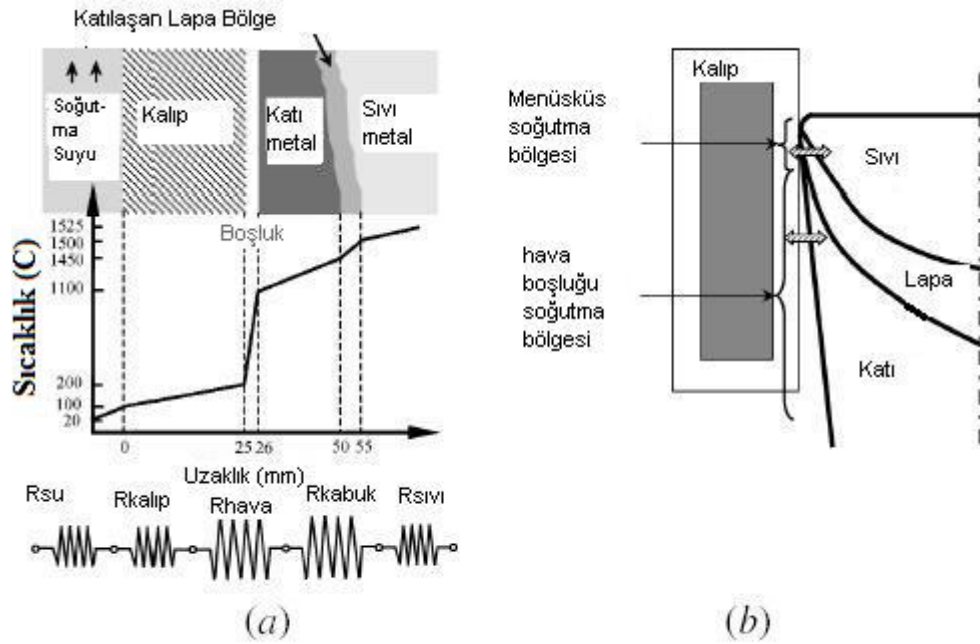
Akış düzeni menüsküsün kararlılığını ve titreşimini de kontrol eder; buda çukur derinliklerini, titreşim izlerini ve bunun gibi diğer yüzey şekillerini oluşumunda etkilidir. Akış düzeni ayrıca katılaştık kısmın su ile çarpıştığı yerde ısının atılmasıyla da ilgilidir. Katılaştık malzeme ile kalıp arasındaki sürtünmeyi düşürmek için kalıba ayrıca birde yağlama ortamı eklenir. Fakat bu durumda buhar ve sıvı tabakası oluşur, buda kalıp cidarları ile malzeme arasında direkt olarak teması engeller.



Şekil-3.3 Kalıp içerisindeki ergimiş metalin davranışı (TMS, 2005)

Metal-kalıp teması arasındaki ısı transferi kalıp ile veya birincil soğutma olarak adlandırılmaktadır. Zamana ve kalıp boyuna bağlı olarak değişerek; iki ayrı bölgeye ayrılmaktadır; şekil 3.4’de görülmektedir.

- 1- Kalıp-metal direk temas
- 2- Hava soğutma bölgesi

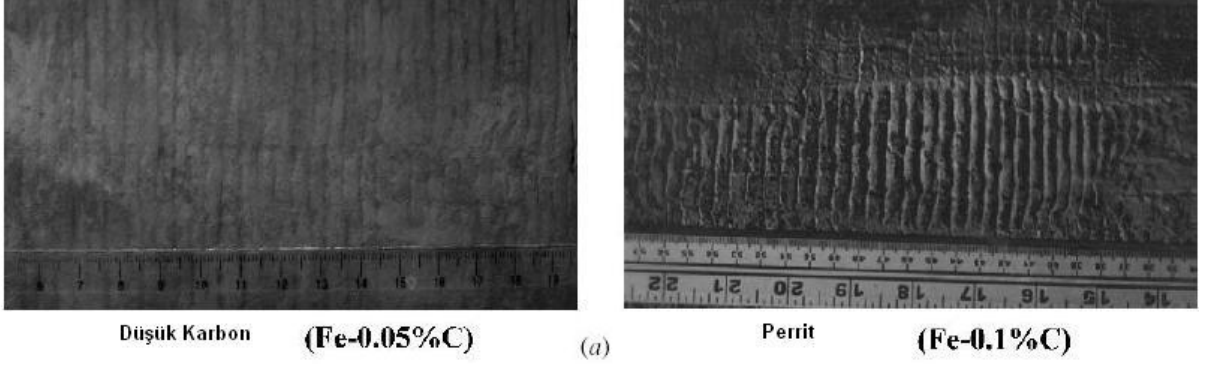


a) Çelik

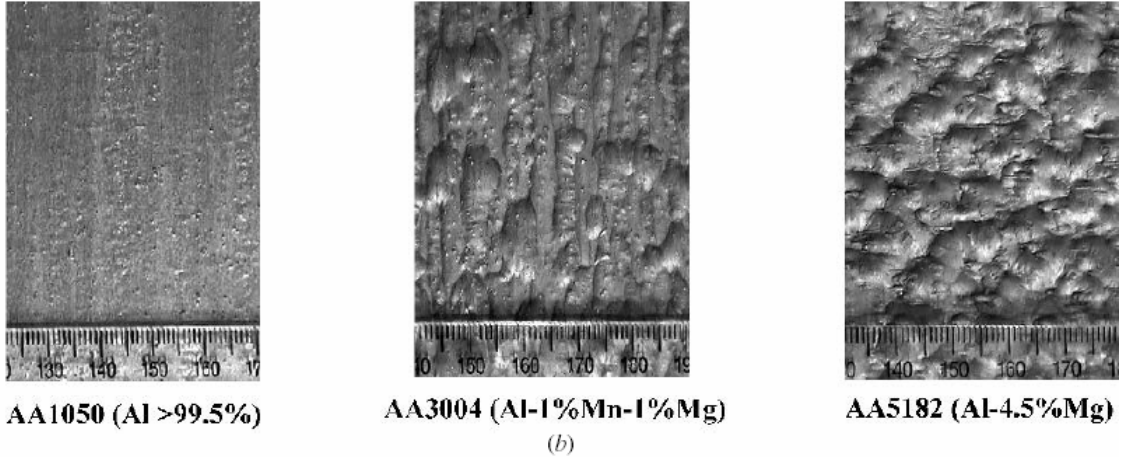
b) Alüminyum

Şekil-3.4 Birincil soğutma bölgeleri şematik gösterimi (MS&T, 2004)

Menüsküsün başında, katılaştırma metal kalıp ile direk olarak temastır, bu durumda ısı transfer hızı çok yüksektir. Çeliklerin sürekli dökümünde 10 MWm^{-1} , alüminyumun sürekli dökümünde ise 1 MWm^{-1} yi aşacak şekilde sıçramalar oluşabilmektedir. İlerleyen proseslerde birçok sebepten daha küçük değerler olur. İlk olarak, döküm yüzeyinin kabalığı alaşım kompozisyonuna bağlıdır, şekil 3.5 de görüldüğü üzere örnek olarak düşük ve yüksek karbonlu çeliklerde 0.25 ve peritektik dönüşümde 0.65, Al için AA1050 için 0.05 ve AA5182 için 0.45tir. Buda kalıptaki ısı akışına etki etmektedir.



a) Çeliğin sürekli dökümü (döküm yönü sağa doğru)



b) Alüminyumun sürekli dökümü (döküm yönü sağa doğru)

Şekil-3.5 Döküm parçaları yüzey morfojileri (MS&T, 2004)

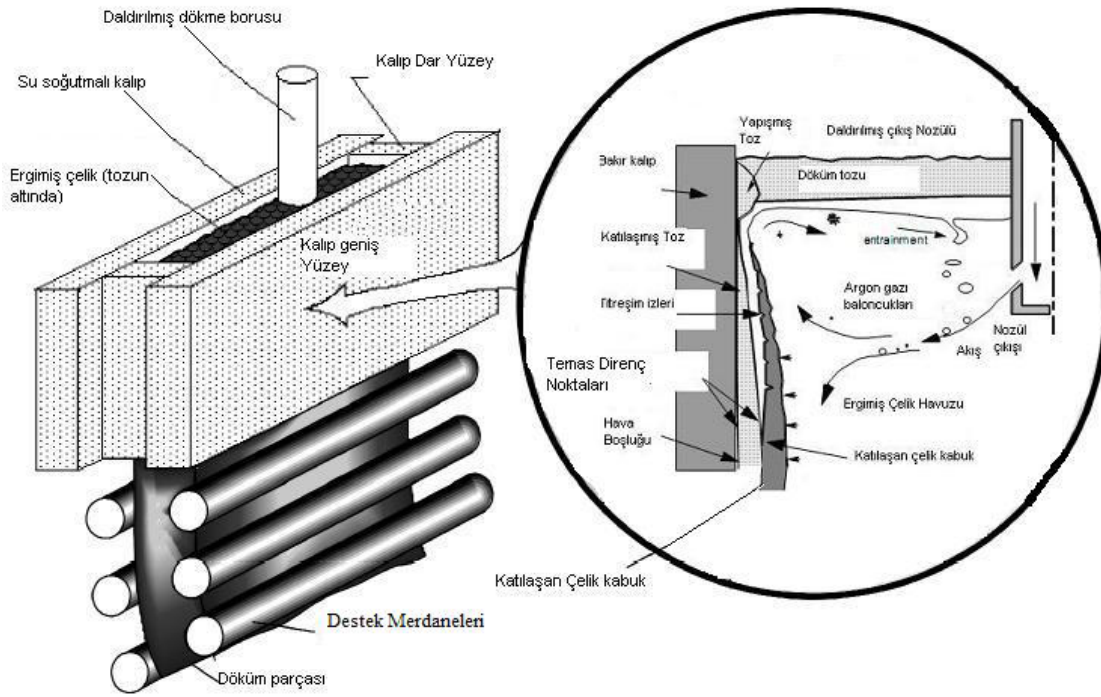
DC döküm yüzeyinde ara boşluğun direncini arttıran değişik özelliklere sahip daha kalın oksit tabakaları oluşmaktadır. Ayrıca alüminyum, kabuk ısı akışının tepe yaptığı çeliğe göre boyu daha kısa bölgelerden ısı kaçışını daha hızlı iletir. Çeliğin sürekli dökümünde yeni oluşmuş kabuk sıvı metal havuzunun yaptığı basınç yüzünden ve katılaşma sırasındaki büzülme payları yüzünden inceleşen kalıp ile çok iyi şekilde temas halindedir. DC dökümde ilk temas anı oldukça kısadır; yaklaşık olarak 80 mm civarında (döküm hızına, alaşım kimyasal bileşimine ve ingot'un geometrisine bağlı olarak değişmektedir.) metal-kalıp temasıda sonlanmaktadır.

Birinci bölge, döküm malzemesinin kalıptan çıkması ile yüzeyde yeterli mukavemete sahip kabuğun oluşması ve bununla birlikte hava boşluğunun oluşmasıyla sona erer. Çeliğin sürekli dökümünde, sadece kenarlara yakın köşelerde meydana gelir. DC döküm prosesinde kalın kabuğun büzülmesi bütün çevre boyunca boşluk oluşmasına sebep olur. Boşluk oluşmasıyla birlikte ısı transfer hızı hızla düşer. Buda katı kabuğun tekrar ısınması sonucunu doğurur. İkinci bölgede ısı kabuktan birçok bölge üzerinden iletilmektedir.

Bunlar;

- 1-Hava Boşluğu
- 2-Kalıp duvarı
- 3-Su ile soğutulan kalıp ara yüzü

Bu bölgeler %85 civarındaki ısıyı taşımaktadır yani görüldüğü üzere kalıp içindeki ısı transferinin kontrolü burada gerçekleşmektedir.Şekil 3.6’da çeliğin sürekli dökümünde kalıp içindeki ısı transferi ve akışkan akışı arasındaki karmaşık düzeni temsil etmektedir.



Şekil–3.6 Sürekli dökümünde kalıp içindeki ısı transferi şeması (MS&T, 2004)

Havuz içindeki akış düzeni ve türbülansı nozül deliği geometrisi ve daldırılmış döküm borusu derinliği ile kontrol edilmektedir. Nozülün tıkanmasını engellemek için genellikle argon gazı kullanılmaktadır; buda akış düzeni üzerinde çok etkisi olan hava kabarcıklarının oluşmasına sebep olur. Bu kabarcıklar son mamulde iç hatalara yol açabilecek nozülden içeri giren katı parçacıkları (alümina gibi)’da toplarlar. Nozülden fişkıran metal çok yüksek ısı taşıdığından bazen ince kabuk bölgelerini eriterek çatlamalara yol açabilir. Bu fişkırma yüksek derecede momentum taşıdığından; akış düzenini, dalgalanmaları ve üst yüzeydeki meniscusdeki katılaşmaların kontrolü sağlanır. Şekil 3.7’de alüminyumun DC dökümünde akış olayını temsil eden şemalar görülmektedir.

Metalin direkt ve eğri olarak akışı ile oluşan yüksek ve düzensiz türbülans uygun olmayan taneler ve eşit şekilde dağılmayan alaşım elementlerinin oluşmasına neden olur. Bu

oluşmasını geciktirir. Çelik kabuk ile kalıp duvarı arasındaki akış tabakaları aynı biçimde olmasına yardım eder ve genellikle ısı transferini yavaşlatır.

Kalıp cidarı ile çelik kabuk arasındaki ara erimiş katmanlar, çeliğin sürekli dökümünde kullanılan yağlayıcılara göre daha uniform ve genellikle yavaşlayan bir ısı transferini sağlarlar. Buda aralıklarla meydana gelen buhar boşlukları meydana getirme eğilimindedir. Boşluklardan ısı transferi ısısal özelliklere ve ara katmanların kalınlığına bağlıdır. Boşluğun büyüklüğü titreşim izlerine, yüzeyin pürüzlülüğüne, katılan kabuğun büzülmesine, kalıp çarpılmasına ve sıvı metalin oluşturduğu kalıp yüzeyindeki basınç'a bağlıdır. Kalıp duvarlarından uzakta kabuğun büzülmesi ile oluşan boşluk, köşelerden başlaması ve yüzeye yayılması ile en büyük halini alır. Bu durumda ısı transfer prosesini karmaşıktır. Kalıp duvarları, çeliğin büzülmesi ile oluşan boşlukları azaltmaya ve birincil soğumayı sağlamak için gitgide incelemektedir.

Tahminlere göre, birincil soğutma da sürekli dökümde toplam iç ısının %40'ı ve toplam hissedilen ısının ise %30'u transfer olmaktadır. Yüzey ısı transfer katsayısı kalıba uzunluğuna göre, menüsküs bölgesinde $1500-2000\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ den kalıbın alt kısmında $600-800\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e düşmektedir. Döküm parçasında enince çekme, köşe kırıkları gibi birçok döküm hatalarında meydana gelmektedir. Bu hatalar direk olarak kalıp içerisindeki birincil soğutma bölgesinde karşılaşılan, titreşim izleri, uygun olmayan kalıp yağlaması, metal seviyesi dalgalanması, uygun olmayan kalıp tasarımı gibi faktörlere bağlıdır.

Alüminyum alaşımının ingot sürekli dökümünde birincil soğutmada sadece %20'lik bir ısı kaçıışı sağlanabilmektedir ama ingot yüzeyinde mikroyapısal ve pürüzlülük olarak büyük bir etkilere sahiptir. Bu bölümde ingotun direk olarak kalıptan çıkış sıcaklığı belirlenmektedir. Daha sonra kalıp'ın altında kaynayan su ile ilgili olan ısı transferi koşullarını da etkileyecektir, bu durum daha sonra açıklanacaktır. Isı transfer katsayısı alüminyum ile soğutulmuş kalıp arasında $2000-4000\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ lere çıkmaktadır. Karşılaştırma yapar isek, hava boşluğunda ısı transfer katsayısı $150\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ civarlarına düşmektedir.

DC dökümde erimiş alüminyum, çeliğe göre yüksek ısı iletim, yüksek ısı yayılma ve alüminyumun yüksek çekme katsayısı yüzünden menüsküste hızlıca katılarak kalın katı kabuk oluşmaktadır. Daha öncede bahsettiğimiz gibi DC dökümdeki düşük Peclet numarası sayesinde soğuk su kalıp içerisinde alüminyum durduğu sırada bile ısının iletimine izin verir.

Kalıbın incelmesinin azalması, hava boşluğunun menüsküsün yanında oluşması ve kalıp boyunca uzamasına neden olur. Kalıp içerisindeki katı kabuğun uzunluğu akışa karşı iletim mesafesi (upstream conduction distance), (UCD) olarak adlandırılmaktadır. Kalıbın içindeki

Kalıp içerisindeki ısı transferini optimize etmek ve tabii ki menüsküs seviyesini kontrol altında tutmak için alüminyum endüstrisinde birçok yenilikler geliştirilmiştir. Üstü açık kalıplarda, metal seviyesi katlanma başlayana kadar düşük tutulmakta ve sonrasında yavaşça yükseltilmektedir. Yalıtılmış malzeme kalıbın üst yüzeyine yerleştirilmiştir ve UCD yalıtımının altındaki belirlenmiş bir noktaya gelmesine izin verilmektedir. Yüzey kalitesinin önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. Menüsküs temas noktasının kontrolünü sağlamak için geliştirilen bir diğer yenilik ise hava yardımcı sıcak üst kaplama sistemleridir. Elektromanyetik döküm işleminde kalıp tamamıyla ortadan kaldırılmıştır ve elektromanyetik kuvvetler metalostatik yükleri tutmaktadır. Kalıp ile metalin temasının azalması ile hava boşluğu oluşum problemini ortadan kaldırmakta ve böylece uniform döküm mikro yapısı oluşturmaktadır. Desteklenmeyen menüsküsün kararlılığını sağlamak için elektromanyetik kuvvetlerde düzenleme yapılarak yüzey akışları dengelenmektedir.

Diğer bir birincil soğutma bölgesinin kapsamını kontrol altında tutma faktörleri ise soğutma suyunun sıcaklığının etkisi ve kalıbın çarpılmasıdır. Çeliğin sürekli dökümü sırasında soğutma suyu dikey olan deliklerden akarak kalıptaki ısıyı uzaklaştırır ve sıcaklığı kontrol eder. Kalıp sıcak yüzeyinin sıcaklığı ara yüzeydeki boşlukların özelliklerini değiştirerek ısı uzaklaştırma hızına dolaylı olarak etki eder. Kalıp değişkenler direk olarak kalıp sıcaklığına etki eder fakat birincil bölgenin soğutma süreci çok karışıktır. Örneğin, soğuk suyun akış hızını düşürmek ile kalıbın soğuk yüzeyindeki ısı iletim katsayısını düşürerek, kalıp sıcaklığının artmasına neden olur. Sıcak yüzeyin sıcaklığının artırılması ile kenar cürufalarının erimesine neden olur. Böylece de kalıptan ısı kaçıışı artırılır. Bu etki tahminlere aykırı olarak birincil soğutma bölgesindeki daha az soğutma suyu kullanımı ile sağlanabilir. Sudaki pislikler menüsküs yakınlarındaki kalıp kenarlarında kireç tortuları oluşturur.

Buda kalıp sıcaklığının artmasına neden olur. Soğuk yüzün sıcaklığı çok fazla artar ise su kaynatarak kalıp duvarında kararlı bir tabaka şeklinde hava baloncukları ile kaplanır. Teorik olarak da bu işlem sonunda ısı kaçıışı durarak kalıbın tehlikeli şekilde ısınmasına neden olur.

Kanal içerisindeki ısı aktarımını açıklayan birçok temel deney yapılmış ve bunların sonuçları deneye dayalı ifadeler ile ortaya konulmuştur. Bu ilişkiler çeliklerin sürekli dökümüne de ısı aktarımını sayılara dökmek içinde uygulanmıştır. Aşağıdaki formül kullanılarak belirli bir çaptaki borunun içinden akan suyun oluşturduğu türbülanslı akıştan ısı aktarım katsayısı hesaplanabilir.

$$h_w = \frac{k_{water}}{D} \left[5 + 0.015 Re_{water}^{c_1} Pr_{water}^{c_2} \right] \quad (3.3)$$

D : Su kanalının eşdeğer çapı

Re_{water} : Soğuk kalıp yüzeyi ve soğutucu sıvının ortalama Reynold sayısı

Pr_{water} : Soğuk kalıp yüzeyi Prandtl numarası

C_1 ve C_2 : Ampirik katsayılar

Kalıp içerisindeki su akışını arttırmak ısı transfer hızını artırarak, kalıp sıcaklığını düşürmekte, böylece kalıp çarpılması azaltarak daha az yüzey çatlağı oluşmaktadır. Daha öncede değindiğimiz gibi, kalıp ısı kaçıışı direk olarak ara yüzdeki boşluk ve katılmış kabuğun kalınlığı ile kontrol edilmektedir. Çeliğin sürekli dökümünde bu ilişki daha iyi görülmektedir fakat DC döküm kalıplarda daha az dikkat gerektirmektedir.

Alüminyumun DC dökümünde birincil soğutma bölgesinin etkisi incelenmemiştir. Genellikle su ile soğutma veya ikinci bölge olarak da anılan bölgede incelemeler yoğunlaştırılmıştır.

3.2.1.1. Kalıp - döküm parçası ısı akışı

Sürekli dökümde ısı akışı düşey ve yatay döküm yöntemlerinde birbirinden farklıdır. Hatta düşey döküm yöntemlerinde de kalıbın düz veya kavisli olmasına göre yine farklılıklar mevcuttur.

Farklı ısı akışına sebep olan en önemli faktör döküm parçası ile soğutucu akışkan veya ortamlar arasındaki farklı temas derecesidir. Örneğin düşey kalıbın üst bölgelerinde sıvı ve katılmış metal tabakası ile kalıp iç yüzeyleri arasındaki tam bir temas mevcut iken, aşağıya doğru bu temas gittikçe zayıflar ve belirli bir noktadan sonra tamamen kesilir. Buna sebep katılmış tabaka kalınlığı arttıkça bu tabakanın büzülme miktarında artarak kalıp cidarlarında ayrılmasıdır. Bu istenmeyen durumu önlemek için kalıplar çıkış yönlerine doğru konik yapılırlar. Ancak buna rağmen ısı akış hesaplarında ısı iletimini güçleştiren bu hava tabakası hesaba katılmalıdır. Söz konusu büzülme olayı yatay döküm kalıplarında da aynen mevcut olmakla beraber parça ile kalıp yüzeyleri arasındaki temas derecesi ve şekli burada değişiktir. Büzülmeye rağmen parça kendi ağırlığının etkisiyle kalıp alt yüzeyi boyunca temas halindedir. Kalıp içindeki sıvı metalin hidrostatik basıncının katılan tabakayı yüzeylerin doğru şişirerek temas için bir dereceye kadar olumlu etkisi vardır. Böyle bir etki daha ziyade düşey kalıplar için söz konusudur. Düşey döküm yönteminde kullanılan kavisli kalıplara gelince, bunlar parça kalıp temas derecesi hakkında yukarıda yatay ve düşey kalıplar için söylenen hususları belirli derecede içerirler.

3.2.1.1.1. Kalıbın üst kısmından transfer edilen ısı

Sıvı çelik ile dolan kalıp yüzeyinden transfer edilen ısı miktarı;

$$Q = FK_1(t_1 - t_2) \quad (3.4)$$

F: Isı transfer yüzeyi (m²)

Q: Transfer edilen ısı miktarı (kcal/h)

$$K_1 = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{1}{L_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{1}{L_2}} \quad (3.5)$$

K₁: Isı iletim katsayısı (kcal/m²h°C)

S₁: Katılaştıran çelik kabuğun kalınlığı (m)

λ₁: Katılaştıran çelik kabuğun ısı geçirgenlik katsayısı (kcal/MHP°C)

S₂: Bakır kalıp cidar kalınlığı (m)

λ₂: Bakır kalıbın ısı geçirgenlik katsayısı (kcal/mh°C)

L₁: Sıvı çelik ile kalıp arasındaki ısı iletim katsayısı (kcal/m²h°C)

L₂: Bakır kalıpla soğutma suyu arasındaki ısı iletim katsayısı (kcal/m²h°C)

3.2.1.1.2. Kalıbın alt kısmından transfer edilen ısı

Kalıp içerisindeki soğutma-katılma sırasında, kalıbın üst kısımlarındaki bölgede çok yüksek hızlı bir ısı transferi söz konusu iken, alt bölgelerde (üstten 50mm-200mm) çeliğin kimyasal bileşimi, döküm sıcaklığı ve kalıp soğutma şartlarına bağlı olarak, kalıbın üst kısmında katılma olan sıvı çelikten transfer edilen ısı miktarı çok azalmaktadır. Alt kısımlarda transfer edilen ısı miktarı;

$$Q = FK_2(t_1 - t_2) \quad (3.6)$$

denklemleri ile tanımlanabilir.

$$K_2 = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} - \frac{1}{L_3} - \frac{S_3}{\lambda_4} - \frac{1}{L_4} - \frac{S_2}{\lambda_2} - \frac{1}{L_2}} \quad (3.7)$$

K₂: Isı iletim katsayısı(kcal/m²h°C)

L₃: Katılma çelik kabukla kalıp yüzeyi arasındaki hava filminin ısı iletim katsayısı (kcal/m²h°C)

S₃: Hava filminin kalınlığı (m)

λ₄: Hava filminin ısı geçirgenlik katsayısı (kcal/mh°C)

L₄: Hava filmi ile kalıp arasındaki ısı iletim katsayısı (kcal/m²h°C)

Uygulamada K_1 ve K_2 ısı iletim katsayıları;

$$K_1=1000-1500 \text{ kalori/ m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$K_2= 200-400 \text{ kalori/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

(3.6) ve (3.7) ifadelerinde, kalıpta soğutmanın teorik yönünün tam anlaşılması için verilmiştir. Uygulamada önem taşıyan noktalar ise, döküm hızına bağlı olarak kalıptaki soğutma şiddeti, döküm sıcaklığı, katılaştıran çelik yüksek sıcaklıklarda mukavemetin azalması ve kalıp konikliğiyle ilgilidir. Kalıp soğutma şiddeti, kalıbın döküm sayısına ve kalıp dış yüzeylerindeki kireçlenmeye bağlıdır. Bundan dolayı kalıp soğutma suyu hızının artmasının kalıbın soğutma şiddetinin artmasına etkisi yoktur. Kalıp soğutma suyu hızının 6m/sn'den daha fazla olması pratik değildir. Prensipte olarak 3.5m/sn değerinde tutulmalıdır. Döküm sıcaklığının, çelik cinsine, sıvı çelik miktarına ocak sürekli döküm makinesi arasında pota taşıma sırasında geçen zamana ve döküm zamanına göre düzenlenmesi gerekir. Genellikle tandişte sıvı çelik sıcaklığının 30°C üzerinde olmasına ve bu sıcaklığın 10 farkla korunmasına dikkat edilmesi gerekir. Kalıp konikliği, kütük ve blumlar için %0.4-0.9, slab için maksimum %3 olup, kalıbın daralan kesiti alt kısımda bulunacak şekildedir. Uygulamada genellikle bu bağıntı kullanılır;

$$Q = L(t_1 - t_2) \quad (3.8)$$

Q: Transfer edilen ısı miktarı (kcal /dak)

L: Kalıp soğutma suyu debisi (lt/dak)

t_1-t_2 : Kalıba giriş çıkış suyu sıcaklık farkı (°C)

Bu bağıntı biraz geliştirildiğinde;

$$Q = 9.150V^{0.583} + (29V + 5.8T) \quad (3.9)$$

Q: Transfer edilen ısı miktarı (kcal /dak)

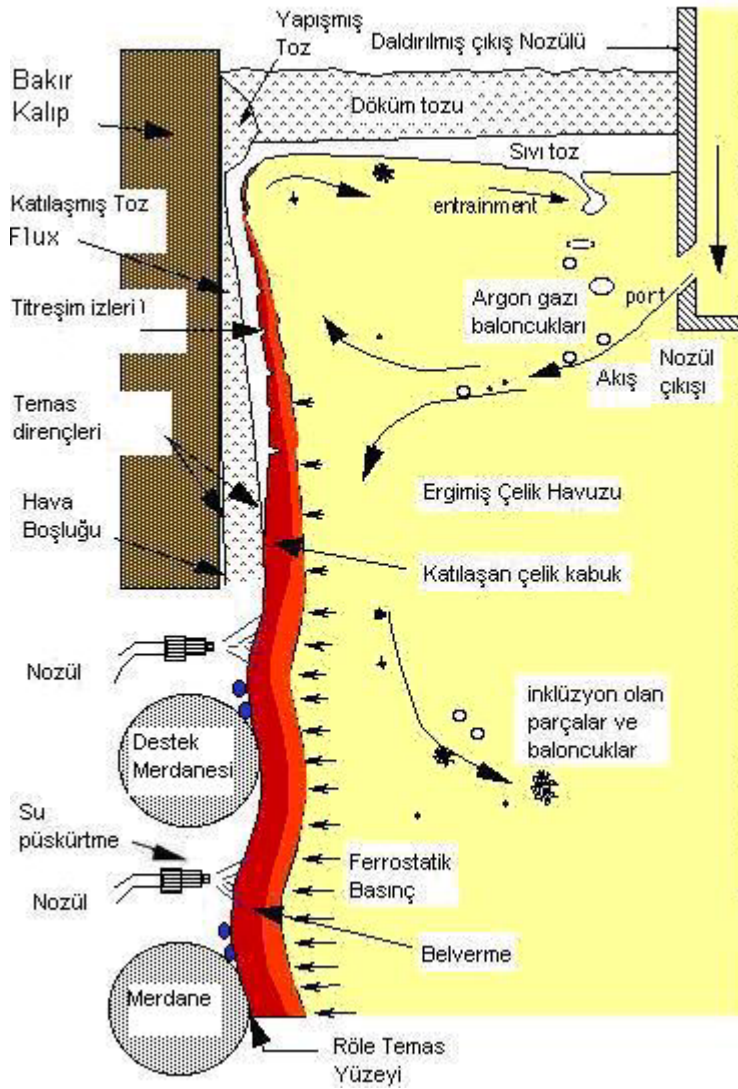
V: Döküm hızı (m/dak)

T: Sıvı çeliğin katılma sıcaklığı (°C)

Sonuç olarak söylenebilir ki, kalıptan transfer edilen ısı miktarı 9800kcal/dak değerinin üzerindeyse çatlama ve patlama olayları artmaktadır. O yüzden maksimum ısı transferi 9800 kcal/dak alır ise yukarıdaki (3.9) numaralı ifade ile suyun debisi hesaplanabilir.

3.2.2. Su ile (ikincil) soğutma bölgesi

Parçanın kalıptan çıktıktan sonraki bölgede su püskürtülerek direkt olarak soğutulduğu bölge ve buna ait devre ikincil soğutma devresi olarak adlandırılır. Basit çeliklerde bu devrede bir veya iki püskürtme bölgesi yeterli olurken, çatlama ihtimali yüksek olarak çeliklerde çok iyi kontrol edilen birkaç püskürtme bölgesi olmak zorundadır. Bu devredeki soğutma suyu miktarı genellikle birim zaman veya birim dökülmüş malzeme miktarı başına düşen değer olarak verilmektedir. Ayrıca suyun parça yüzeyine ne tarzda püskürtüldüğü belirtilmeden böyle bir verinin fazla bir anlamı yoktur. İkincil soğutma bölgesinde soğutmanın bütün parça çevresi boyunca ve uzunlamasına homojen yapılmasına dikkat edilir. Parça kesit ve uzunluğu boyunca büyük sıcaklık gradyanları ve dalgalanmaları iç ve dış çatlamalara sebep olabilir.



Şekil-3.9 Birincil soğutma bölgesinden ikincil soğutma bölgesine geçiş kesiti
(Symposium on Solidification Processing, 1990)

Kalıp çıkışından tam katılaşıncaya kadar çelik parça yüzeyindeki boyuna sıcaklık değişimi yaklaşık 1300°C veya 1200°C'tan 900°C-700°C kadar sürekli bir şekilde düşmesi istenir. Bu sıcaklık düşümü parça şekil, boyut ve kalitesine göre değişir. Soğutma yolu uzunluğunun ayarlanması da bu verilere bağlıdır. Soğutma suyu miktarını, parça yüzey sıcaklığını sürekli kontrol ederek ayarlamak en basit ve uygun yoldur. Yuvarlak ve kare kesitli parçalarda sıvı metal kolonu ucuna doğru daha yavaş soğutulması gerekmesine rağmen slab dökümlerinde dökümünde de alt bölgede daha yavaş bir soğutma yapılır. İkincil soğutma bölgesi alt bölgelere ayrılmaktadır. Her bir kısmi bölge farklı derecelerde soğutulmaktadır. Bu püskürtme bölgelerine soğutma suyu belirli bir oran dâhilinde püskürtülür. Bu oransal dağılım nozüllerdeki suyun basıncı değiştirilerek (2–15 bar) sağlanır.

Kalıp bölgesinde olduğu gibi ikincil soğutma bölgesinde de dökümün yatay ve düşey yapılışına göre soğutma şartları farklıdır. Bu bölgede soğutma daha çok parça üzerine su püskürtülerek yapılır. Su damlacıklarının parça ile temas süresi ve meydana gelen su buharının parçadan uzaklaştırılması düşey ve yatay döküm parçalarında farklı olması, soğuma şartlarını da değiştirir. Diğer taraftan düşey döküm yönteminde kalıptan sonra kullanılan destek plakalarının soğutma şartları üzerine etkisi vardır. Burdan anlaşılacağı üzere sürekli dökümde ısı akışını matematiksek olarak incelemek soğutma şartlarının çok farklı olması nedeniyle oldukça güçtür.

İyi bir ikincil soğutmadan şunlar beklenir;

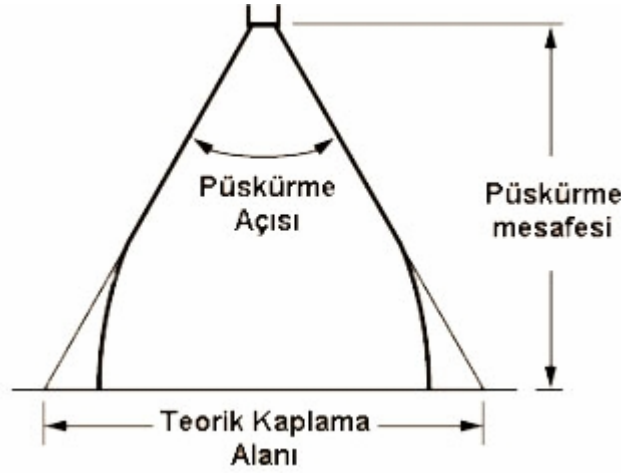
- Dökülen çelik genişliğinde, döküm yönünde ve yüzeyin eşit miktarda soğuması
- Yüzeyden buharlaşmayan suyun az bir bekleme süresi
- Büyük bir kısmı buharlaşan püskürtme suyunun yüksek bir etki derecesi

İkincil soğutma işlemi imalatın cinsine göre iki şekilde yapılır; ekran soğutması ve yüzey soğutması.

Ekran soğutması, destekleyici çubuğun arasında bulunan nozüllerden külçenin köşelerine doğru su püskürtülür. Bu esasa göre İskenderun demir firmasındaki örnekte 7–25 m³/saat miktarında ikincil soğutma suyu harcanmaktadır.

Yüzey soğutması, genelde slab döküm için uygulanır. İkincil Soğutmanın soğutucu kısmı genel olarak ana boru ve beklerden oluşmuştur. İkincil soğutma bölgesi yapılan işlemlere göre dört bölgeye ayrılmıştır. Her bir bölgede havalandırmayı sağlayan ve su sarfiyatını belirleyen cihazlar yerleştirilmiştir. Bekleyen külçe yüzeyine su püskürten nozüllerde suyun püskürdüğü ağız 2mm'lik bir yarıklık biçimindedir. Soğutma suyu külçe yüzeyine 70°lik bir açı altında

gönderilmektedir. İkinci soğutma bölgesinde kullanılan suyun teorik olarak %10'luk bir kısmının buharlaştığı kabul edilmektedir.



Şekil-3.10 Püskürtme açısı ve kaplama alanı (Spraying systems ltd, 2007)

Bu tablo, püskürtme açısı ile meme ağzı arasındaki uzaklık ile hesaplanan, püskürme şeklinin teorik kaplama alanını göstermektedir. Uygulamada etken püskürme açısı püskürme mesafesine göre değişmektedir.

Püskürtme Açısı	Meme Ağzından Çeşitli Uzaklıklarda Teorik Kaplama Alanı											
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	100 cm
70°	7	14	21	28	35	42	56	70	84	98	112	140

Çizelge 3.2 Meme Ağzından Çeşitli Uzaklıklarda Teorik Kaplama Alanı

İkincil soğutma bölgesinde, yarımamülün yüzeyi devamlı soğutulmalıdır. Yüzey sıcaklığındaki kısa süreli küçük değişikliklerin dâhili çatlaklara neden olmamasına karşın uzun süreli büyük farklılıklar yarımamülde iç çatlaklara neden olmaktadır. Dolayısıyla, İkincil soğutma (Sekonder) bölgesindeki soğutmanın yarımamül kalıbı terk ettiği andaki yüzey sıcaklığın (1200°C -1300°C) koruyacak şekilde kontrolü gereklidir. Yaklaşık olarak bu düzeyde sabit kalan yüzey sıcaklığı, ancak yarımamül hava soğutmalı kısmın sonlarındaki kesme istasyonuna ulaştığında 700°C–900°C değerine inmelidir.

İkincil (sekonder) soğutma bölgesinde, yarımamül yüzey sıcaklığının sabit tutulabilmesi için izlenecek yol; döküm çelik ağırlığı için gerekli su miktarı, dökülen çelik ağırlığı için, zaman birim esasına göre su miktarı şeklinde olmalıdır. Su püskürtmeyle soğutmayı etkileyen önemli faktörler ise, su püskürtme şekli, püskürtme karakteristiği ve yarımamül yüzeyinden iletilmesi

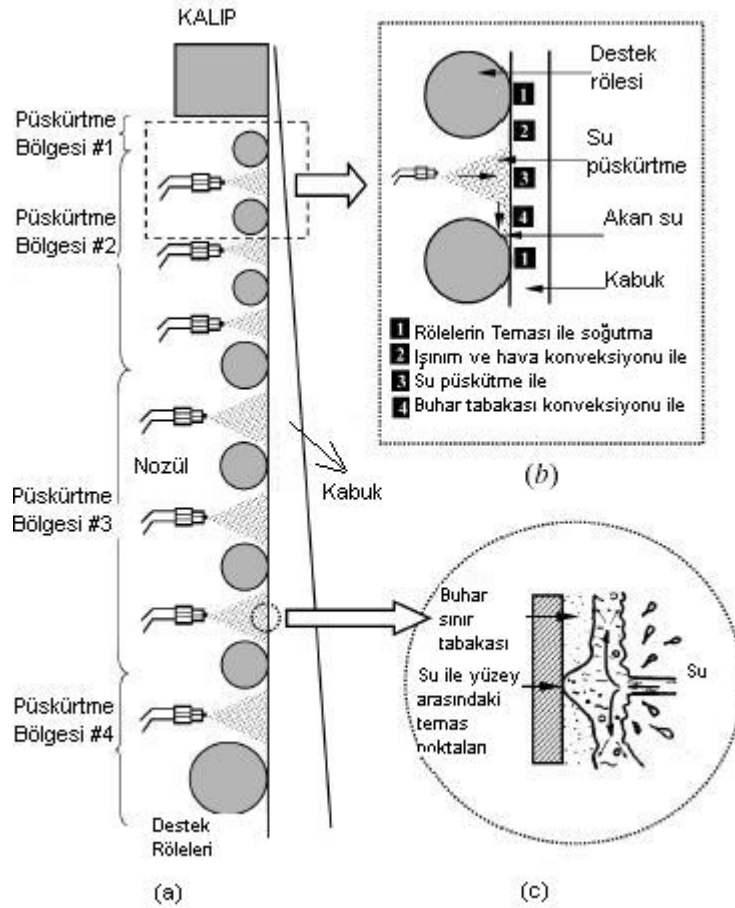
gereken enerji farklılıklarıdır. Diğer taraftan yarımamül kesitinin büyüklüğü, şekli, döküm yolu sayısı ve dökülecek çeliğin cinsinde soğutma işlemini etkileyen, tasarım yönünden dikkate alınacak konulardır. Örneğin östenitik paslanmaz çelikler için 1.5lt/kg çelik, ferritik paslanmaz çelikler için 1.1lt/kg çelik, karbon çelikler için 0.5–0.8lt/kg çelik, su püskürtülmelidir.

Mannesmann-Lachler tarafından geliştirilen iki maddeli püskürtme sisteminin getirdiği avantajlarada değinirisek; oluk temas çizgileri arasındaki çelik yüzeyindeki soğutma eşit olmaktadır. Aynı ısı miktarında çelik yüzeyinin soğutulma miktarı daha büyük bir yüzeyin soğutulma miktarına göre daha sınırlıdır.

Toplam ısı miktarına göre eşit olarak azaltılmasında daha az bir su miktarıyla çalışılabilir. Çelik yüzeyi üzerinden su damlalarının hızlı olarak taşınması sonucu arada kontrolsüz hareket suyu oluşmaz. Bütün normal dökümlerde döküm hızlarında ve ışın kalitesinde yalnızca bir tek püskürtücü tip gerekir. 1-10lt/dak su miktarında, hava miktarı yaklaşık 160Nlt/dak'tır. Yüksek bir işletme güvenliği, düşük bakım masrafı ve daha yüksek yatırım tasarrufu gerektirir.

Kalıptan döküm parçasının çıkması ile sıcak metal yüzeyine suyun direk olarak teması ile sürekli döküm parçasının soğuması sağlanır. Şekil 3.11-a ve Şekil 3.11-b'de görüldüğü üzere bu bölge ikincil soğutma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Çelik dökümü için, merdaneler arasındaki sıralı nozüller ilerleyen döküm parçasının üzerine su püskürterek soğutur. Su püskürtme nozülleri genellikle şekil 3.11-a' da görüldüğü üzere sıralar halinde veya soğutma bölgelerine ayrılmış durumdadırlar.

Su, yüksek basınç ile zorlanarak metal yüzeyine devamlı olarak sis oluşturacak şekilde etki eder. Her çift hadde arasındaki ikincil soğutma bölgesinde şekil 3.11'de görüldüğü gibi değişik ısı transfer mekanizmaları değişik alt soğutma bölgelerinde görülmektedir.



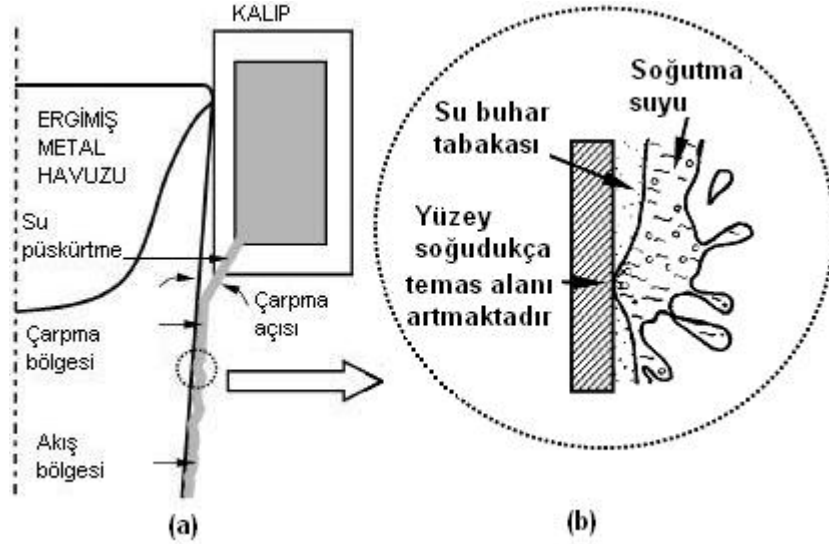
Şekil-3.11 Çeliğin sürekli dökümünde , (a) nozüllerin ve haddelerin tipik yerleşim planı, (b) bölgelerin şemalandırılması ve (c) su ile soğutma sürecinin detaylı görüntüsü (Chapter 15 in Modeling for Casting and Solidification Processing, 2001)

Bunlar ;

1. Merdanelerin teması ile soğutma
2. Radyasyon ve hava konveksiyonu ile nozülde püsküren suyun temasından önce
3. Nozülde püsküren su ile
4. Suyun aşağı doğru akması ile su konveksiyonu ile oluşan

Çelik döküm parçasının ferromagnetik basıncın etkisi ile şişmesi, alt soğutma bölgelerini özellikle çok uzun aralıklarla yerleştirilmiş merdanelerde kenarlarını etkileyebilir.

Alüminyumun sürekli dökümünde, su ile soğutulmuş kalıbın altına yerleştirilmiş olan deliklerden fışkıran su, metal döküm yüzeyi ile Şekil.3.12-a 'da şematik olarak görüldüğü şekilde direk olarak temas ederler.



Şekil-3.12 (a) Alüminyumun DC sürekli dökümünde soğuma rejimi , (b) Su tabakası ile soğutma süreci (Chapter 15 in Modeling for Casting and Solidification Processing, 2001)

Püskürtülen sular devamlı bir tabaka oluşturarak, dikey olarak ingot yüzeyini ve merdaneleri devamlı olarak ıslatırlar. Şekil 3.12'ye göre, ingot yüzeyinde iki adet alt bölge oluştuğu görülmektedir; bunlar

1. Suyun çarpma bölgesi; direk temas ile oluşan
2. Akış bölgesi; ısı yayılımının azaldığı ve su tabakasının çarpma bölgesinden uzaklaştıkça momentumunu kaybetmesi ile oluşan

Suyun çarpma bölgesinin uzunluğu ana kalıptaki su deliklerinin çapına ve çarpma açısına bağlı olarak genellikle 10mm ila 15mm arasında değişmektedir.

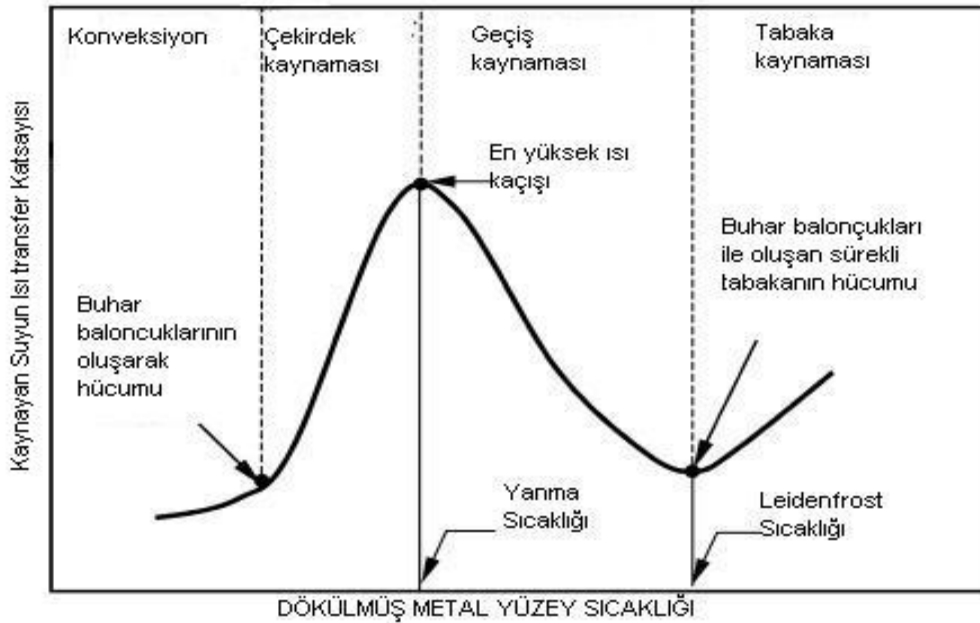
Çeliğe su püskürtülmesi ve alüminyumda su filmi tabakası oluşturulması ile sağlanan ikincil soğutma mekanizması şekil 3.11-c ' de ve şekil 3.11-b de görüldüğü gibi birbirinden farklı karakteristik bir yapıya sahiptir. Püskürtme ile soğutmada (Şekil 3.11-c), su zerrelere çok yüksek sıcaklıktaki yüzeye çarparak buharlaşmakta ve sınır çizgisi oluşturmaktadır. Buda yüzeyin su tarafından ıslatılmasını önlemektedir. Isının kaçması çarpışma bölgesine doğru daha yüksek seviyededir. Çünkü bu bölgede yüksek hızlı zerrelere buhar tabakasını delebilecek yeterli seviyede momentuma sahiptirler. Buhar tabakası sınırlarında oluşan düzensiz akış şartları, dalgalı ve seyrekleşen bir yapıya sahiptir. Suyun yükselen momentumu, suyu hızlandırdığı için su jeti zerrelere ile çelik dökümün kısa temas sayısını arttırmaktadır.

Böylece, ikinci soğutma bölgesindeki soğuma hızı, su jetinin akış hızının artmasıyla doğru orantılıdır ve hatta döküm yüzeyinin sıcaklığı ile bağımsızdır. İnce su tabakasıyla soğutma (Şekil 3.12-b) şartlarında ise su döküm parçası boyunca belirli bir hızda akmaktadır. Bunun sonucu olarak da su ince tabakası ile döküm yüzeyi arasında oluşan buhar ise kalınlaşarak

bozulamayacak bir hal alma eğilimindedir. Yüzeyin soğuması ile buhar filmi kırılarak, döküm yüzeyi ile su ince tabakası temas etmektedir. Döküm yüzeyinin sıcaklığının düşmesi ile temas yüzeyi artmaktadır. Buda ısı aktarımında ani artışlara neden olmakta böylece soğutma prosesinin süresiz olmasına ve kontrol edilmesini zorlaştırmaktadır.

Çeliğin sürekli dökümünde, ikincil soğuma bölgesinin amacı; çatlama oluşmasına neden olabilecek gerilim kuvvetlerinin oluşmasını engellemek için döküm yüzeyinde en düşük seviyede yüzey sıcaklığını değiştirerek, ısı kaçışını sağlamak ve kalıp da başlayan katılaşmayı devam ettirmektir. Bu bölgede toplam ısının %50-%60'ı aktarılmaktadır. DC dökümde ise bu bölgedeki ısının %80'i kararlı rejimde soğuk suya aktarılmaktadır. DC döküm için ikincil soğutma bölgesi terimi pek kullanılmamaktadır.

Su jeti ve ince su tabakası oluşturularak soğutma suyu ile ısı aktarımı oldukça karışıktır. Çünkü kaynayan suya özellikle sıcaklığına bağlı bir yapı içermekte, buda Şekil 3.13'de görüldüğü üzere sıcak yüzey ile temas eden soğutma suyu dört değişik ısı aktarımı mekanizması ile birbirinden ayrılmaktadır.



Şekil-3.13 Değişik ısı aktarımı rejimlerinde soğutma suyunun genel kaynama eğrisi (MS&T, 2004)

3.2.2.1. 100 °C 'nin altındaki sıcaklıklarda ısı iletimi ile soğutma

Bu rejimde, ısı aktarımı döküm yüzeyine yapışan ince su filmi ile doğal konveksiyon yöntemi ile gerçekleşmektedir. Isı aktarımı katsayısı çok küçüktür.

3.2.2.2. 100 °C-Kaynama sıcaklığı arasındaki çekirdek kaynaması

Yüzey sıcaklığının artması ile su buharının kabarcıkları metal yüzeyi üzerinde oluşmakta, kopmakta, ince su tabakası ile akmakta ve daha sonra serbest yüzeyden kaçmaktadır. Baloncuk oluşma ve kopma yoğunluğu, yüzey sıcaklığının artması ile devam ederek artarlar. Bu etki, ince su tabakası içindeki sirkülasyonun iyi olmasını sağlayarak, ısı transfer katsayısının ani olarak artmasına ve maksimum seviyeye (kaynama noktası) ulaşmasına neden olur. Çelik için kaynama noktası 500°C -700°C sıcaklıkları arasındadır, Alüminyum içinse 200°C civarlarında olup, artan su akış hızı ile artmaktadır.

3.2.2.3. Yanma (Burnout) ile leidenfrost sıcaklıkları arasındaki geçiş kaynaması

Yanma noktasından sonra, baloncuklar metal yüzeyine yapışmaya başlarlar ve ısı sirkülasyonunu kesen bir buhar tabakası oluşur. Artan sıcaklık ile birlikte, buhar tabakası oluştuğça, metal yüzeyini sarmaya devam eder ve su ile direk temas eden metal yüzeyi azaldıkça ısı aktarım katsayısı hızlıca azalmaktadır. Döküm yüzeyinin tamamı su buharı ile kaplandıktan sonra, ısı transfer katsayısı en düşük seviyeye gelmektedir. Bu sıcaklıkta leidenfrost noktası olarak adlandırılmaktadır. Leidenfrost sıcaklığı çelikler için 700°C ila 1000°C arasında, alüminyumda ise 300°C ila 500°C arasındadır.

3.2.2.4. Yüksek sıcaklıklarda ince tabakanın kaynaması (> Leidenfrost sıcaklığı)

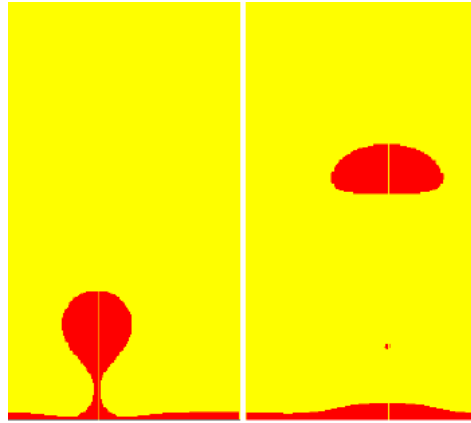
Leidenfrost sıcaklığının üstündeki noktalarda, kararlı bir buhar tabakasının içinden ısı transferi gerçekleşmektedir. Isı transfer katsayısı pek fazla değişmez ve yanma noktasıyla kıyaslandığında çok düşüktür.

Şekil 3.13'de 2 adet önemli nokta eğriyi karakterize etmektedir. Bunlardan ilki (1) yanma sıcaklığı, en yüksek ısı kaçışını (ısı transfer katsayısını) göstermektedir ve (geçiş) çekirdek kaynaması ile suyun döküm yüzeyini en fazla ne kadar soğutabileceğini göstermektedir. İkincisi ise (2) Leidenfrost sıcaklığı olarak adlandırılan geçiş bölgesinden buhar tabakası kaynaması ısı transfer şeklindeki değişimi göstermektedir. Isı transfer katsayısı ile yüzey sıcaklığı arasındaki güçlü ilişkiye bağlı olarak, ikincil soğutma ile ısı kaçış hızı Leidenfrost sıcaklığının yakınında zamanla hızla artar. Çekirdek kaynamasına bağlı olan yüksek ısı transfer hızları, yüzey sıcaklığının hızlıca azalmasına neden olur. İnce su tabakasının kaynamasıyla karşılaştırırsak düşük ısı transferleri, yüzey sıcaklığının artmasına neden olur. Sonuç olarak metal yüzey sıcaklığındaki beklenmedik değişimler leidenfrost sıcaklığının aşılıp aşılmadığına bağlı olarak çekirdek kaynamadan ince tabaka kaynamaya veya tam tersi

olarak bir kaynama karışıklığı oluşabilir. Ayrıca, soğutma için varyasyonlarda yerel kaynama şartlarına bağlı olarak metal yüzeyinde oluşabilmektedirler.

İkincil soğutma şartlarını optimize etmek gerekirse, metal yüzeyinden ısı transfer hızı monoton şekilde azalan kararlı bir yüzey sıcaklığı oluşturmak zorundadır. İnce tabakanın kaynaması çeliğin sürekli dökümünde ikincil soğutma sürecinde eğer çelik yüzeyi sıcaklığı çok düşük seviyelere iner ise kararlı olmayan yüzey sıcaklıklarının ve ısı aktarım hızlarının önüne geçmek için kasıtlı olarak desteklenmektedir. Bunun yanında DC döküm sürecinde, ikincil soğutma da ingot yüzeyinde kararlı şartlar altında yüksek ısı kaçış hızlarına ulaşabilmek için çekirdek kaynaması istenmektedir.

DC döküm sürecinin başında, endüstride genel olarak ingot üzerindeki gerilim ve gerinimleri engellemek için düşük su akış hızı sağlanarak yüzey sıcak tutulmaktadır. Buda ikincil soğutmayı karmaşıktırarak, kararlı bir tabakanın oluşmasıyla su perdesini ingot yüzeyinden uzaklaştırılmaktadır. Suyun dışarı atıldığı bölgede ısı transferi hızı çok düşük seviyelere inmektedir, çünkü bu bölgede su tabakası ile ingot yüzeyi arasında çok küçük bir temas veya hiçbir temas noktası olmamaktadır. Sonuç olarak çarpma bölgesinin altında ingot yüzeyinin bir kısmında en yüksek sıcaklıkta çok düşük soğutmaya sahip olan bir bölge oluşmaktadır. İngot yüzeyinin soğuması ile ince tabakanın kaynaması, geçiş kaynamasına oradanda çekirdek kaynamasına dönüşür. Su perdesi çıkartılmadan önce ingot yüzeyinden aşağıya doğru hareket edebilmektedir.



Şekil-3.14 Su tabakasının kaynaması, şekilde kırmızı renk ile gösterilmiş buhar kabarcığı oluşarak sarı renk ile gösterilmiş sıvıdan aşağıdan yukarıya doğru yükselmektedir. (MT-B, 1999)

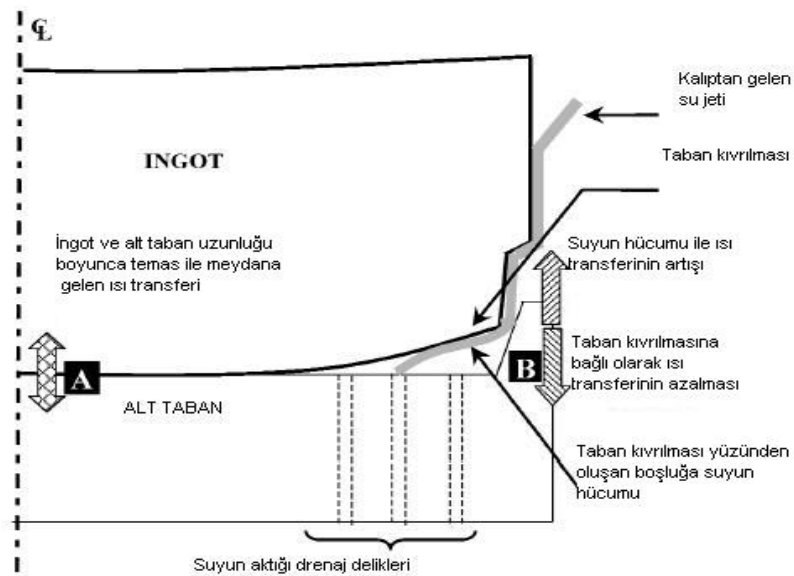
Daha sonrasında, yüzey su tabaka kaynamasını sağlayacak kadar sıcak olmamaktadır. Kararlı su tabakası çökmekte ve soğuma hızı artmaktadır. Bütün yüzey çekirdek kaynamasına sahip olan kararlı bir su perdesine sahiptir. Bu süreç şekil 3.15-a'da temsili olarak gösterilmektedir. Tabaka kaynama bölgesi ingot yüzeyinde kubbe oluşturacak şekilde çekirdek-geçiş kaynama

ısınınmasına neden olur. Buda döküm parçasının genişmesine sebep olur. Katılma tamamlanmadan önce yüzey çok fazla ısırırsa, östenitik kabuk ile yarı katılmış göbeğin genişmesi birbirine ayak uyduramaz. Böylece katılan parçanın ön yüzünde sıcak yırtılma çatlakları oluşur. Bu çatlaklarda iç segregasyon hatalarına yol açabilir veya daha sonraki haddeleme gibi süreçlerde yüzeye doğru yayılabilirler.

3.2.4. Alüminyum alaşımlarının DC sürekli dökümü sırasında ingot taban soğutması

DC dökümün çalıştırılma fazının başlangıcında ikincil soğutma çok önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı metal alt bloğa girdiğinden itibaren, başlangıç ısı aktarım hızı erimiş metalden soğuk alt bloğa doğru aşırı derecede artmaktadır. Kısa süre sonra, ara yüzde katılma ile birlikte büzülme sonucunda küçük bir boşluk oluşur ve ısı aktarım hızı düşer. İngot kalıptan çekilene kadar bu boşluk oldukça küçük kalır fakat sonra ingot tabanı büyük ısısal makroskobik bir distorsiyona uğrayarak, “dib kıvrımı” adı verilen bir oluşum meydana gelir.

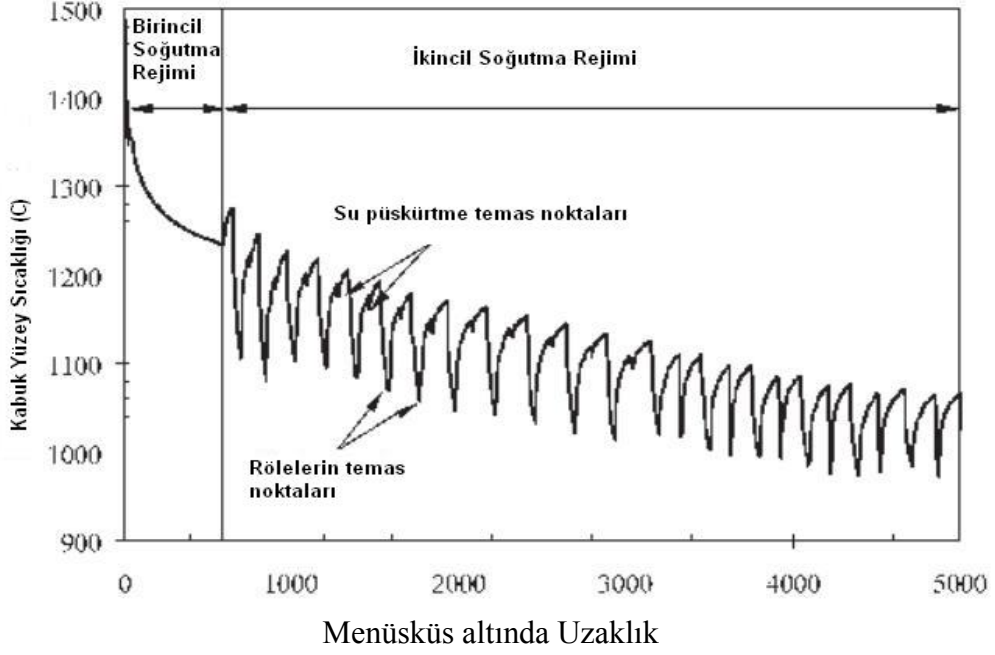
Tabandaki büyük boşluğun ve suyun azlığının, ingot dikey yüzeylerindeki yüksek ısı temas ile birleşmesiyle, düşük soğuma hızına neden olarak gittikçe şiddetlenir. Taban deformasyona uğramaya devam ettikçe (veya kıvrılmaya), su alt tabana ulaşarak (su hücumu) ingot tabanından ısı aktarımını artırır. Buda tekrar tabanın deformasyonunu artırır. Şekil 3.16’da görüldüğü üzere taban bölümündeki önemli temas ısı aktarımının detaylarını göstermektedir.



Şekil-3.16 DC döküm sırasında soğutma ve tabanın deformasyonu (MS&T, 2004)

3.2.5. Döküm parçası soğuma davranışı

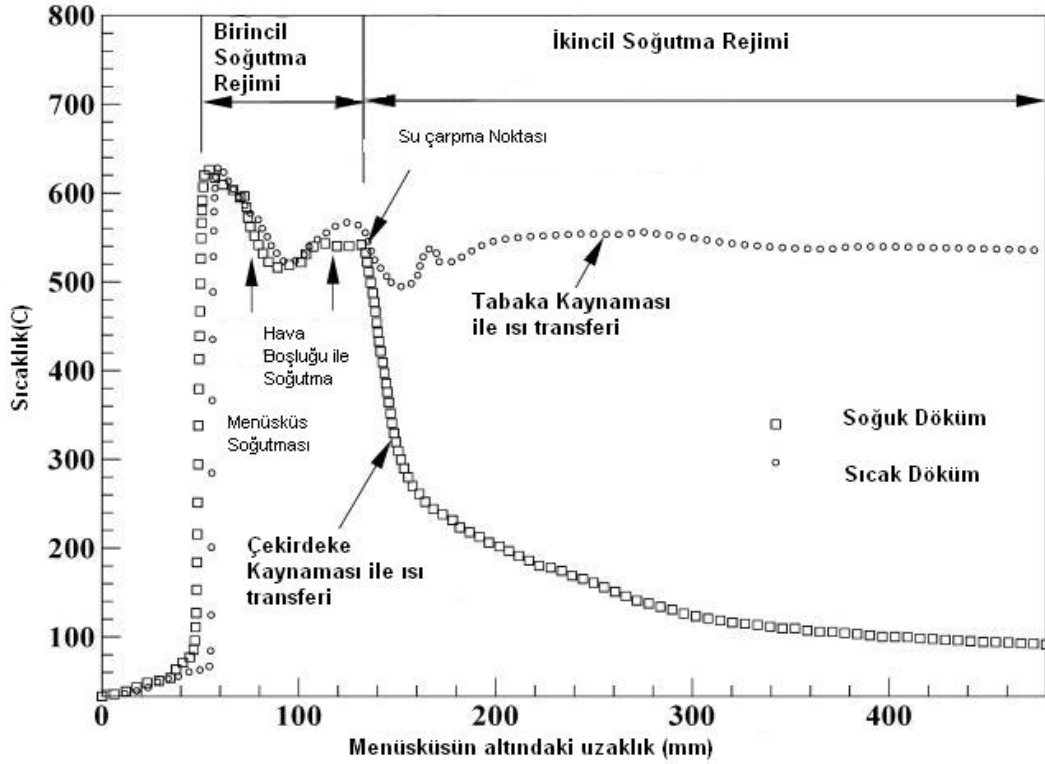
Alüminyum ve çeliğin sürekli dökümünde, döküm parçası boyunca tipik yüzey sıcaklıkları değişimi şekil 3.17 ve şekil 3.18’de sırayla gösterilmektedir. Ayrıca şekil 3.18’de DC döküm ile üretilen iki ayrı soğutma hızındaki (sıcak döküm için daha yavaş soğutma kullanılmıştır.) alüminyumun ingotun karşılaştırmasında yapmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi birincil ve ikincil soğutma eğrileri her iki süreç içinde rahatlıkla birbirinden ayrılabilir.



Şekil-3.17 Sürekli çelik dökümünde tipik yüzey sıcaklıkları ve soğutma rejimleri (MS&T, 2004)

Çelik için birincil soğutma bölgesinin uzunluğu önemlidir. ~250°C lik bir sıcaklık azalması görülebilmektedir. Alüminyumda ise bu bölgede sadece ~100°C lik bir azalma meydana gelebilmektedir. Bunu da uzun hava boşluğu yüzünden tekrara ısıtma takip etmektedir. Kalıbın altında, şekil 3.17’de görüldüğü üzere çeliğin sürekli dökümünde sıcaklık merdanelerin arasında ~100°C’lik bir sıcaklık farkı oluşmaktadır.

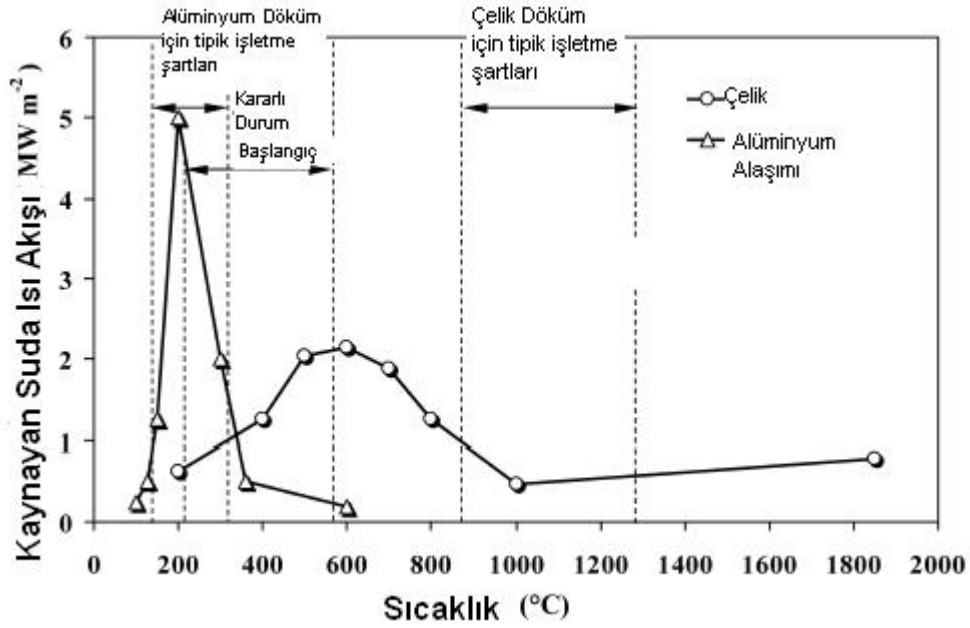
Merdanenin tepesinin yakınlarında, su püskürtülmesinin alt tarafında, merdaneler ile temasın en düşük olduğu bölgede en yüksek derecede yüzey sıcaklığı düşüşü gerçekleşmektedir. Merdanenin sonlarına doğru, büyüyen ferromagnetik basıncın etkisi ile yerel merdane temasları sayesinde ısı kaçışını artırır, buda su jeti ile merdane temas eğriliğini birbirine yaklaştırır.



Şekil-3.18 Sürekli alüminyum dökümde tipik yüzey sıcaklıkları ve soğutma rejimleri (MS&T, 2004)

DC döküm süreci sırasında, şekil 3.18'de görüldüğü üzere, sadece 300mm sonunda yüksek akış hızıyla suyun direk teması ile sıcaklık ingot yüzeyinde monoton şekilde $\sim 450^{\circ}\text{C}$ ile 500°C arasında bir düşüş gösterebilmektedir. Suyun azalmasıyla, sıcak döküm parça çarpışma bölgesinde soğutma için aynı başarıyı sağlayamayarak, ingot yüzey sıcaklığının Leidenfrost noktasını aşmasına izin vermektedir. Sonuç olarak, ısı aktarımı tabaka kaynama sahasında durmakta (Şekil 3.18), buda katılaştan kabuğun tehlikeli derece katılma sıcaklığında uzun süre beklemesine neden olmaktadır. Buda ayrıca ingot tabanında $\sim 50\text{mm}$ soğuk döküm, $\sim 6\text{mm}$ sıcak döküm için makro deformasyonlara neden olmaktadır.

Sürekli dökümde ikincil soğutma bölgesi yapılan temel araştırmalarda, laboratuvar ortamında oluşturulan küçük bir döküm merkezinde, çeliğin sürekli döküm yönteminde ve alüminyumun DC dökümü için küçük bir çelik ve alüminyum parçasında yapılan testler ile kaynayan suyun eğrilerini kontrol altında tutularak su ile soğutma ortamından kaçan ısıları rakamlara dökmek için deneyler yapılmıştır. Genellikle deneye dayalı ifadeler, döküm parçasının içine yerleştirilen ısı çiftleri kullanılarak ters ısı transfer analizleri ile yapılan ölçümlerin geliştirilmesiyle ulaşılmıştır.



Şekil-3.19 DC alüminyum döküm ve çeliğin sürekli dökümü için ikincil soğutma rejiminde çalışma sıcaklığı ve kaynama eğrileri (MS&T, 2004)

Şekil 3.19'da görüldüğü üzere alüminyum ile çeliğin laboratuvar çalışmalarında saptanan kaynama eğrilerini karşılaştırmaktadır. İki sisteminde kaynama eğrileri temelde birbirlerine benzese de, iki metalin değişik termofiziksel özellikleri, oksit tabakası ve yüzey pürüzlülüğü gibi farklı yüzey hataları yüzünden ısı akışının şiddeti ve leidenfrost sıcaklığı değişmektedir. Isı giriş faktörü k_{pc} , metal sıvı yüzeyinden ısı aktarımını karakterize etmek için kullanılabilir. Bu faktör alüminyumda çeliğe göre ~1,5 katıdır, bu yüzden alüminyumda ısı akışı yüzeye daha kolay ulaşır.

Çeliğin sürekli dökümünde ikincil soğutma ve suyun kaynama eğrileri için çalışmalar sonucunda şu gözlemlere ulaşılmıştır:

- 1) Farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde yanma sıcaklığı çevresinde 500°C - 700°C, ısı transfer katsayısı 2,0 ile 3,0 $KWm^{-2}K^{-1}$ arasında değişmektedir.
- 2) Su püskürtme ile soğutmada, 900°C ile 1200°C arasında istenen yüzey sıcaklığında, döküm parçasının yüzey sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerinde küçükte olsa bir etkisi vardır. Bu iki birbirine bağlı olmayan özelliği döküm parçasının yüzeyi ile üzerine yapışmış olan kararlı buhar tabakası (tabaka kaynaması) arasında oluşan konveksiyonel ısı aktarımının etkili olduğunu açıkça göstermektedir.
- 3) Tabaka kaynama rejiminde, ısı transfer katsayısı ile su akış hızının arasında çok güçlü bir ilişki vardır. Aşağıdaki ampirik ifade ile bu gösterilmiştir.

$$h_{Püskürtme} = AW^c \quad (3.10)$$

$h_{\text{püskürtme}}$: Isı tranfer katsayısı ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

A ve c: Düzeltme parametreleri A 0,45 ile 0,75 ve c ise 0,5 ila 1,0 arasında değişmektedir.

W: Su akış hızı ($\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

4) Su zerrelere çıkış hızının artırılması ile momentumları artarak, buhar tabakasını delerek, kararlı hale gelen tabaka kaynamasını önler, böylece ısı aktarım hızını artırır.

5) Suyun akış hızının artması ile aynı sebepten leidenfrost sıcaklığı $\sim 1000^\circ\text{C}$ civarlarına gelerek daha da artmaya devam eder

6) Püskürtülen suyun sıcaklığının azalması ısı aktarım katsayısı üzerinde küçük bir etkisi olmasına rağmen bir bağıntıda azalma göstermektedir.

7) Su püskürtme nozüllerinin ısı aktarım katsayısı üzerinde küçük bir etkisi vardır. Örneğin yukarı doğru püskürtme, aşağıya doğru püskürtmeye göre %15 daha azdır. Çarpma noktasından itibaren mesafenin artması ile birlikte ısı transfer katsayısı düşmektedir. Döküm yüzeyine dik olarak yerleştirilen nozüller ile azalma dengeli olmaktadır.

Alüminyumun DC sürekli dökümünde ikincil soğutma için çalışmalar sonucunda şu gözlemlere ulaşılmıştır:

1) Farklı ölçme metotları sonucunda ulaşılan genel sonuç, maksimum ısı akışı 1 ile 5 MWm^{-2} arasında ve maksimum ısı aktarım katsayısı 40 ile $50 \text{ KWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ arasında değişmektedir.

2) 220°C - 620°C arasında olan çalışma sıcaklığı çelikten daha geniş olduğu için yanma sıcaklığı daha düşük olur, böylece ingot yüzey sıcaklığının ısı aktarımını üzerinden daha büyük bir etkisi olur.

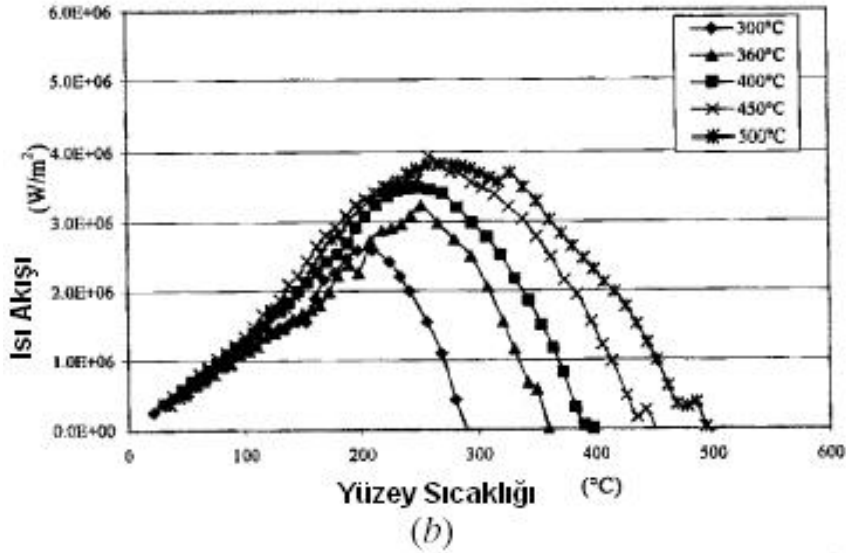
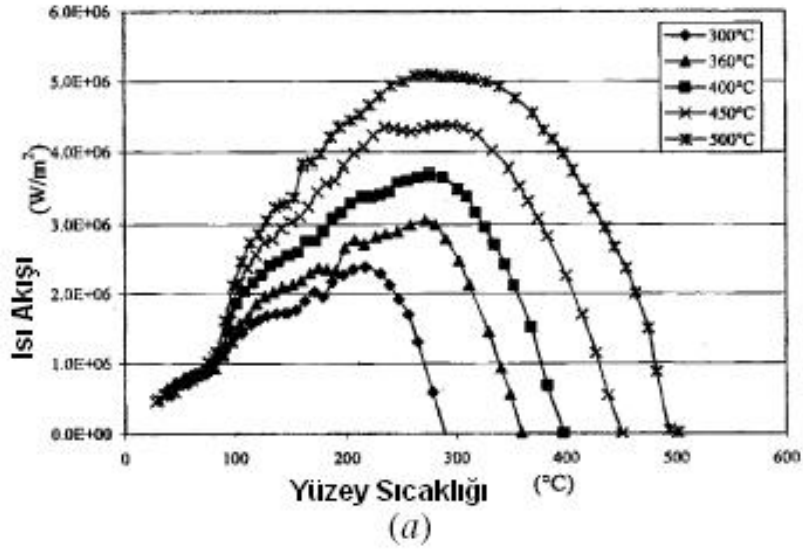
3) Leidenfrost sıcaklığı 250°C ile 350°C derece arasındadır ve artan su akış hızı ile çeliklerde olduğu gibi doğru orantılıdır. Düşük akış hızlarında leidenfrost sıcaklığı ısı aktarım katsayısına etkisi çok hassastır. Bu da DC dökümün başlangıcında tabaka kaynamasının mı yoksa suyun dışarı atılması mı olacağı suyun akış hızına bağlıdır. Leidenfrost sıcaklığı su kalitesinden ve tabii ki su sıcaklığından da etkilenmektedir.

4) Su nozüllerinin eğik olarak yerleştirilmesi DC döküm yönteminde ısı aktarımını büyük oranda etkilemektedir. Akış ingot yüzeyinden aşağıya doğru verildiğinde, ısı akışı çarpma noktasının maksimumunun alt ve üstü arasında mesafede değişmektedir. Çarpma noktasında üst tarafında düşmekte, çarpma noktasının altında ise suyun momentumunu kaybetmesi ile düşmektedir. Yüzeyden buhar oluşumu ile atılabilmektedir.

5) Isı kaçış hızı, metal yüzey sıcaklığının bir fonksiyonudur. Şekil 3.20' de suyun ilk sisteme eklendiği anda, ısı akışının su tabakası oluşumu ve metal yüzey sıcaklığına etkisi olan ilk sıcaklığa önemli şekilde bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

6) Geçiş dönemi için, ısı kaçış hızı alaşımın ısıl iletkenliğine bağlıdır. Sabit sıvı akışı ve yüzey sıcaklığında yapılan araştırmalarda yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin, en yüksek seviyede ısı kaçışı oluşturmaktadır.

7) İngot yüzeyinin yapısı, kaynama eğrilerine direk olarak etkisi vardır. Pürüzlü yüzeylerde ısı transfer hızı artmaktadır.



Şekil-3.20 Kaynama eğrilerinde başlangıç sıcaklığının etkisi (Malzeme= AA5182, su akış hızı=0.38 L s⁻¹) a) Çarpma noktasında b) Buharlaştırma bölgesi (MS&T, 2004)

3.2.6. Sürekli dökümde ısı akış hesabı

Bir düşey sürekli döküm tezgâhında, bakır kalıp dolaşımı ile ikinci bölge su püskürterek direkt olarak ve destek plakaları ile indirekt olarak, merdaneler bölgesinde ise ışınlım yoluyla soğutulmaktan olan çeliğin sürekli döküm yöntemiyle düşük karbonlu alaşımsız slab üretimine ait bir ısı akış hesabına göz atacak olursak;

Soğutma bölgeleri:

- | | | |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| a) Tam temas bölgesi | → | Kalıp soğutma bölgesi içerisinde |
| b) Hava aralıklı bölge | → | Kalıp soğutma bölgesi içerisinde |
| c) Su püskürtme bölgesi | → | İkinci soğutma bölgesi içerisinde |
| d) Hareketli plakalar bölgesi | → | İkinci soğutma bölgesi içerisinde |
| e) Merdaneler bölgesi | → | İkinci soğutma bölgesi içerisinde |

3.2.6.1. Tam Temas Bölgesi

$$q_a = k_a(t_1 - t_2) \quad (3.11)$$

Uygulamada $k_a=1000-1500 \text{ Cal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ değerleri alınmaktadır.

3.2.6.2. Hava Aralıklı Bölge

Katılmış tabaka kalınlığı belirli bir değeri aştığında parçanın burun kısmı büzülme sonucu bir hava aralığı oluşturarak kalıp iç yüzeylerinden ayrılır. Bu bölgedeki ısı akışı, iletimle ve ışımla meydana gelmekte olup aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$q_b = k_b(t_3 - t_4) + \sigma_1(t_3^4 - t_4^4) \quad (3.12)$$

$$k_b = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.13)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_1^{-3} + \varepsilon_2^{-1}} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki ısı akışı denkleminde birinci ifade hava aralığından kondüksiyon ile ikinci ifade ise ışımla geçen ısı miktarını vermektedir. Bu bölgedeki ısı akışını hesaplamak için denklemdeki k_b değeri uygulamada yaklaşık olarak

$k_b=200-400 \text{ Cal / m}^2 \text{ h }^\circ\text{C}$ arası alınabilir.

Hava aralığının oluşum şartları, kalıp tarafından çekilen ısı nedeniyle metal, kalıpla temas eden yüzeylerden içeri doğru katılaşmaya başlar. Kalıp içinde eksensel yönde hareket halinde bulunan döküm malzemesinin bu katılan dış tabakası iç kısımdaki sıvı metalin hidrostatik basıncı ile dışa kalıp yüzeyine doğru bastırılır. Katılma ve büzülme meydana gelen iki olaydır. Katılan tabaka kalınlığı arttıkça içeriye doğru olan büzülme kuvveti bu tabakayı dışarı doğru şişiren hidrostatik basıncına karşı koyar. Büzülme kuvvetinin hidrostatik sıvı metal basıncını geçtiği andan itibaren de parça, kalıp yüzeyinden ayrılır. Bu iki kuvvetin hesabı ve boşluk şartı aşağıdaki bağıntılarla bulunur.

Katılmış kabuğu dışa doğru şişiren hidrostatik sıvı metal basıncı;

$$P_1 = \rho.h.g \quad (\text{N/cm}^2) \quad (3.15)$$

Katılma ve soğuma esnasındaki parça içine yönelik büzülme kuvveti,

$$P_2 = \frac{a(t_e - t_3) \cdot E(1 - d_i^2 / d_a^2)}{2(1 - \nu)} \quad (3.16)$$

ν = Poission sayısı

$P_1 > P_2$ ise temas tamdır.

$P_1 = P_2$ ise ayrılma başlamak üzeredir.

$P_1 < P_2$ ise boşluk oluşmuştur.

Bu iki kuvvet arasındaki bağıntıları etkileyen en önemli faktör katılan tabaka kalınlığıdır. Bu kalınlık sonsuz olarak kabul edilir ise parçaların katılmasında Chvorinov'a göre şu şekildedir;

$$\delta = C\sqrt{Z} \quad (3.17)$$

δ : Z süresi içinde katılmış tabaka kalınlığı (mm)

Z: katılma süresi (s)

C: katılma sabiti (mm/ $\sqrt{\text{dak}}$)

Katılma sabiti ısı iletimi, katılma ısısı gibi malzeme özelliklerine ve aşırı ısıtma, döküm hızı, soğutma tarzı parça kesit şekli gibi birçok fiziksel ve geometrik faktörlere bağlı olarak değişir.

Uygulamada katılma sabiti $C=20-30$ mm/ $\sqrt{\text{dak}}$ değerleri arasında alınmaktadır. Düşük döküm sıcaklıkları ve hızları için bu değerlerin üst sınırı seçilir. Katılmış tabaka kalınlığını deneysel yollarla ölçmenin yanında hesap yöntemleri ile de mümkündür. Katılma sabiti kalıp bölgesinde diğer bölgelere göre daha büyüktür. Bunun anlamı katılma kalıp içinde daha hızlı meydana gelmektedir.

Tüm kalıp bölgesi için ısı akış denklemleri literatürde, birincil ve ikincil soğutma bölgelerini de kapsayacak şekilde bulunmaktadır.

$$Q=L \cdot \Delta T \quad (3.18)$$

Burada;

Q: Kalıptan soğutma suyu ile çekilen ısı miktar, kcal/dak

L: Kalıp soğutma suyu debisi, litre/dak

ΔT : Kalıp soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklık farkı, °C

Burada, parçadan kalıba geçen ısının tümünün soğutma suyu ile çekildiği, konveksiyon ve ışıma yoluyla ısı akışı ihmal edilmiştir.

Diğer bir yaklaşımda döküm hızı ve katılma sıcaklığını hesaba katarak yapılmaktadır.

$$Q=9150. V_d^{0.583} + (29 V_d+5,8 te) \quad (3.19)$$

Q: Hareket halindeki metalin kalıptan çıkış anına kadar kalıba bıraktığı ısı miktarı, (kcal/dak)

V_d : döküm hızı, (m/dak)

t_c : Sıvı metalin katılma sıcaklığı, (°C)

Uygulamada edinilen tecrübelerle göre kalıp soğutma suyu sirkülasyon hızı 3000-5000mm/s arasında seçilir. 6000mm/s' yi aşan hızların ve kalıp cidar kalınlığının kalıbı soğutma kapasitesi üzerine etkisi yoktur.

3.2.6.3. Su Püskürtme Bölgesi

Bu bölge kalıpla hareketli destek plakaları arasında kalan yaklaşık 30mm genişliğinde bir soğutma bölgesidir. Bu bölgeden ısı akışı eşitliği ile bulunur;

$$q_c=k_c (t_3- t_2) \quad (3.20)$$

3.2.6.4. Hareketli Plakalar Bölgesi

Plakalar periyodik olarak slab yüzeyinden ayrılır ve temas ederler. Parça ve plaka yüzeylerindeki pürüzlülük derecesine bağlı olarak temas alanı oldukça küçülür. Bu bölgede soğutma slab dar yüzeylerinde daima püskürtme ile geniş yüzeylerden ise kondüksiyon ve ışınlama meydana gelir. Dar yüzeylerdeki ısı akışı için püskürtme bölgelerindeki gibi hareket edilir. Buna göre bu yüzeylerdeki ısı akışını aşağıdaki gibi hesaplamak mümkündür.

Slab geniş yüzeylerinden ısı akışı

Plakalar temas halinde iken;

$$q_d=k_{d1} (t_3- t_5) \quad (3.21)$$

$$k_{d1} = (1 - \mu) \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \alpha \right) \cdot \mu \frac{\lambda_5}{\delta_4} \quad (3.22)$$

$$\alpha = \sigma_2 \cdot \frac{T_3^4 - T_5^4}{T_3 - T_4} \quad (3.23)$$

Plakalar ayrılmış halde:

$$q_d = \sigma_2 (T_3^4 - T_5^4) + \frac{\lambda_4}{\delta_5} (t_3 - t_4) \quad (3.24)$$

Slab dar yüzeylerde ısı akışı (su püskürtme)

$$q_d = k_{d2} (t_3 - t_2) \quad (3.25)$$

3.2.6.5. Merdaneler Bölgesi

Merdaneler slab yüzeyine yaklaşık olarak çizgisel bir hat boyunca temas ederler. Bu temas yüzey pürüzlülüğü sebebiyle ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu nedenle bu bölgede ısı akışının tamamen konveksiyonel ve ışımla meydana geldiği kabul edilerek aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$q_e = \sigma_2 (T_3^4 - T_6^4) + k_e (t_3 - t_6) \quad (3.26)$$

Bu eşitlikleri sayısal bir çözümde kullanabilmek için içerdiği büyüklüklerin bilinmesine ihtiyaç vardır. Isı akış katsayılarının her bir soğutma bölgesi ve şekli için saptanması oldukça güçtür. Ele alınan bir bilgisayar simülasyonu yardımı ile hareketli plakalar bölgesindeki ısı akış katsayısı $k_d = 360 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.

3.2.7. Soğutma devreleri için gerekli su ihtiyacı

Çizelge 3.1’de verilmiş olan kütük dökümü için gerekli su miktarları, aşağıdaki benzer bir hesap ile yaklaşık olarak da hesaplanabilir.

Düşey sürekli döküm makinesinde, soğutma karakteristiği ikinci bölgede hızlı sıcaklık düşümü olan, döküm hızı 10 mm/sn (0.6 m/dk), döküm sıcaklığı kalıp girişinde 1530°C ve çelik katılma sıcaklığı 1517°C , döküm parçası $250 \times 1800 \text{ mm}$ çelik slab, soğutma suyu $t_1 = 22^\circ\text{C}$ (kalıba giriş), $t_2 = 27^\circ\text{C}$ (kalıptan çıkış) için ikinci soğutma bölgesi ve makine devresi için soğutma suyu ihtiyacını hesaplamak istersek;

Üretim hızı; $0.25 \times 1.8 \times 0.6 \times 7.8 = 2.11 \text{ ton/dak}$ veya 126.6 ton /saat dir.

Kalıp devresi için soğutma suyu ihtiyacı kalıptan çekilen ısı;

$$Q_1 = 9,150. V_d^{0.583} + (29 V_d + 5,8 \text{ te}) \quad (3.27)$$

Buradan;

$$Q_1=9,150.(0,6)^{0,583}.(29.0,6+ 5,8.1517)$$

$$Q_1=20276 \text{ kcal/dak}$$

Bu ısı kalıp soğutma suyu tarafından çekilir. Kalıp suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları önceden tespit edildiğine göre suyun debisi bu sıcaklık farkını geçmeyecek şekilde ayarlanmalıdır.

Bu açıdan;

$$Q_1= L_1 (t_2-t_1) \quad (3.28)$$

$$t_1= 22 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \text{Soğutma suyu kalıba giriş sıcaklığı (}^\circ\text{C)}$$

$$t_2=27 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \text{Soğutma suyu kalıba çıkış sıcaklığı (}^\circ\text{C)}$$

L: Kalıp soğutma suyu debisi (lit/dak)

$$L = \frac{Q_1}{t_2 - t_1} \quad (3.29)$$

$$L_1 = 20276 / (27 - 22) = 4055 \text{ litre/dak veya } 243.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Soğutma devresi karakteristiğini istenilen şartlarda tutmak için 1kg parça başına yaklaşık 1.8 litre soğutma suyu alınabilir.

Dakikada 2110 kg metal döküldüğüne göre, $2110 \times 1.8 = 3798$ litre/dak veya $L_2 = 288 \text{ m}^3/\text{h}$ soğutma suyuna ihtiyaç vardır. Makina soğutma devresi için su ihtiyacı, genellikle ikinci soğutma bölgesinde kullanılan suyun %40 ı bu bölgenin soğutulması için yeterli olmaktadır.

$$L_3 = 288 \times 0.4 = 91 \text{ m}^3/\text{h}$$

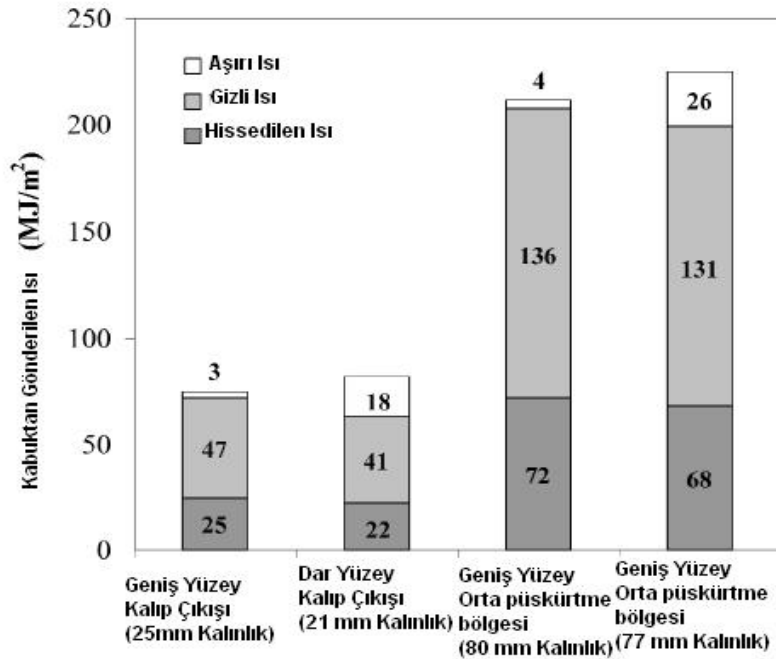
Toplam soğutma suyu ihtiyacı, toplam devrede kullanılan suyun buharlaşma ve kaçaıklardan olabilecek kayıplar göz önüne alındığında genellikle %10 artırılması önerilir.

$$L = (L_1 + L_2 + L_3) + 0.1 (L_1 + L_2 + L_3) = 717 \text{ m}^3/\text{h} \text{ suya ihtiyaç vardır.}$$

3.2.8. Model uygulamalar

Bu bölümünde açıklanan deneysel ölçümlerin sonucunda ulaşılan ısı aktarım ilişkileri sürekli döküm sürecindeki termomekaniksel davranışların matematiksel olarak modellenebilmesine izin vermiştir. Bu ilişkiler Cauchy tip koşullar kullanılarak sonlu farklar veya sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılarak soğutma prosesi tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu modeller ile sıcaklığın değişimi, kabuğun kalınlığı, gerilimler, gerinimlerini birincil ve ikincil soğutma bölgelerinde tahmin edilebilmesidir.

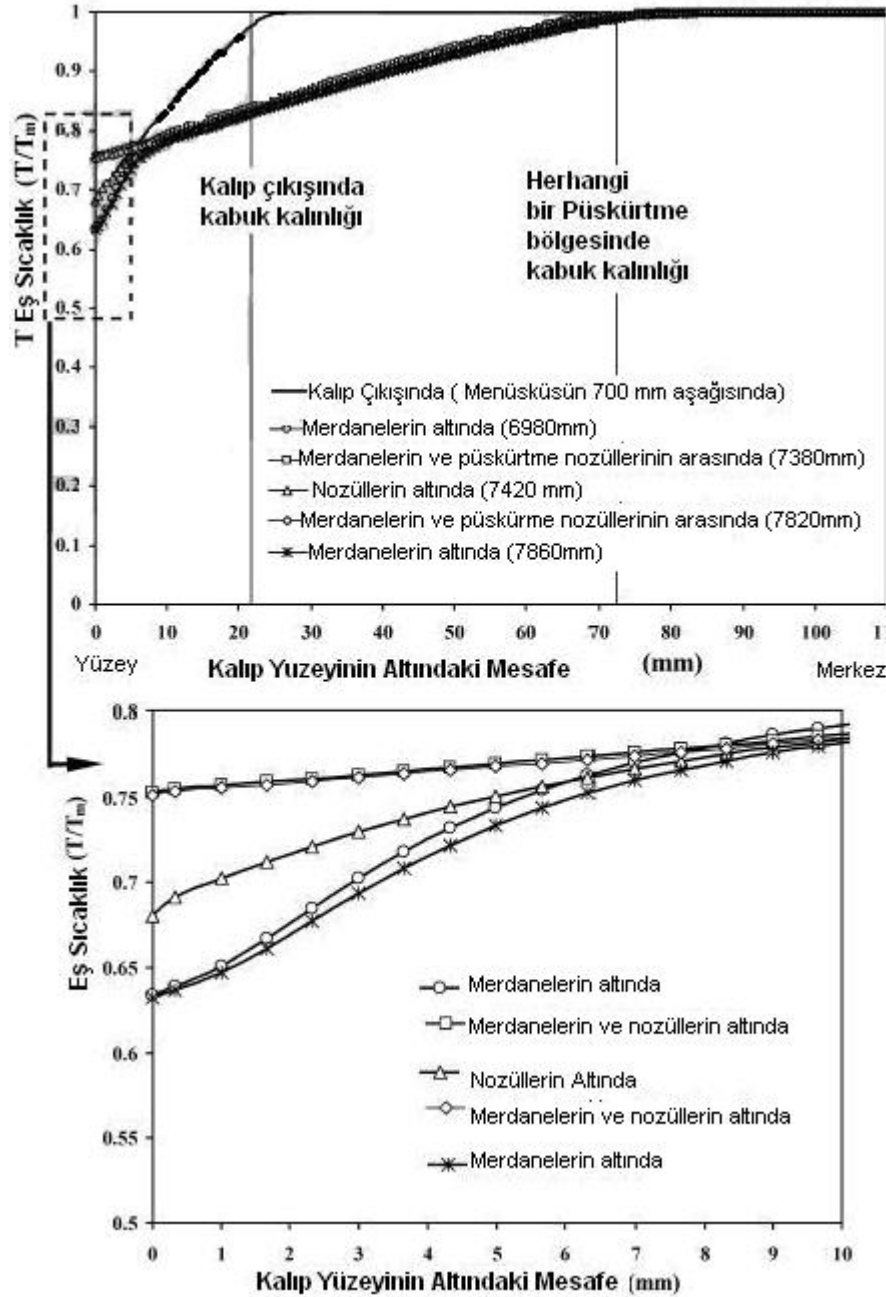
Bu modellerden birkaçıyla elde edilen sonuçlar çeliğin ve alüminyumun sürekli dökümü sırasındaki ısı aktarımı olayını iç yüzü kavranabilmektedir. Örneğin, çeliğin sürekli dökümü sırasında ısı kaçıışı tek yönlü sonlu farklar yöntemini kullanan CON1D kullanılmıştır. Şekil 3.21’de görüldüğü üzere, döküm süreci boyunca birim kabuk yüzeyini değişik noktalarından kaçan ısıyı göstermektedir.



Şekil-3.21 Çeliğin sürekli dökümü sırasında kabuğun değişik noktalarındaki ısı kaçışının dağılımı (Lechler Publications,2001)

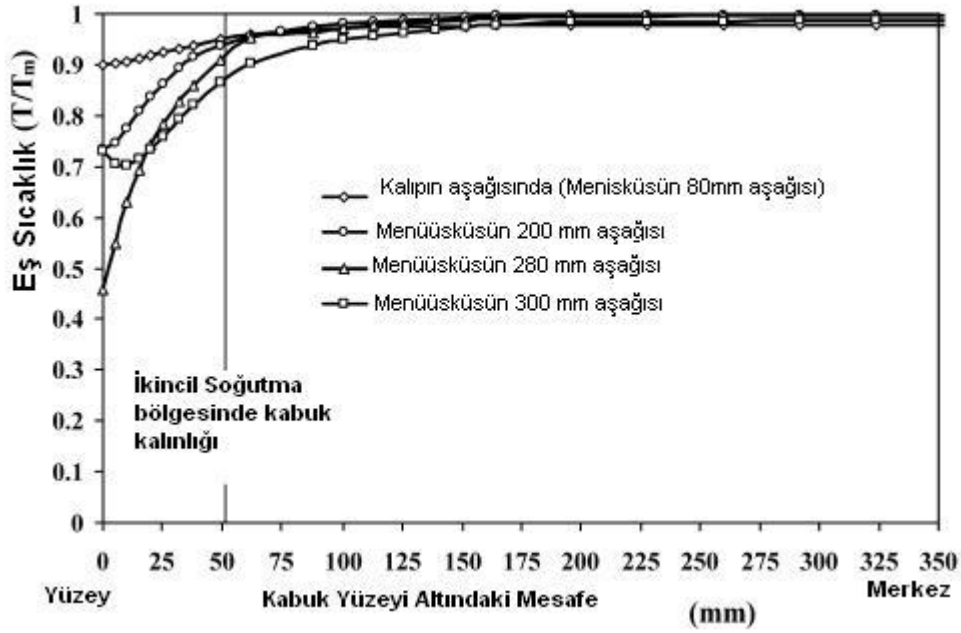
Ergimiş metalden kaçan süper ısının çoğu ya kalıp içerisinde ya da kalıp çıkışından kaçmaktadır. Geniş ve dar yüzeylerden birim ısı kaçıışı geniş ve dar yüzeylerde benzer şekildedir. Fakat dar yüzeylerden süper ısının daha büyük bir bölümü kaçmaktadır. Çünkü slab dökümünde erimiş çeliğin üzerine gelen su, nozüllerden iki kolla ayrılarak dar yüzeylere doğru püskürtülmektedir. İkincil soğutma, katılaştıran kabuk üzerinden gizli ısının ve azda olsa hissedilen ısının uzaklaştırılmasından sorumludur. Uzaklaştırılan gizli ısı her zaman

hissedilen ısının iki katı büyüklüktedir. Alüminyumun sürekli dökümünde de aynı olaylar gözlenmektedir. İki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar temelli ısıl modellemelere göre çeliğin ve alüminyumun sürekli dökümündeki kabuğun kalınlaşma tahminleri şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil-3.22 Çeliğin sürekli dökümünde ikincil soğutma bölgesindeki kalıp çıkışındaki Sıcaklık ve kabuk kalınlığı değişimleri (TMS Editor's choice, 2005)

Kalıp çıkışındaki ve ikincil soğutma bölgelerindeki durumlar karşılaştırılmıştır. Kalıp çıkışında sıcaklık değişimleri doğrusal olduğu görülmüştür.



Şekil-3.23 Alüminyumun DC dökümünde başlangıçtan 375 saniye sonraki sıcaklık ve kabuk kalınlığı tahmini (TMS Editor's choice, 2005)

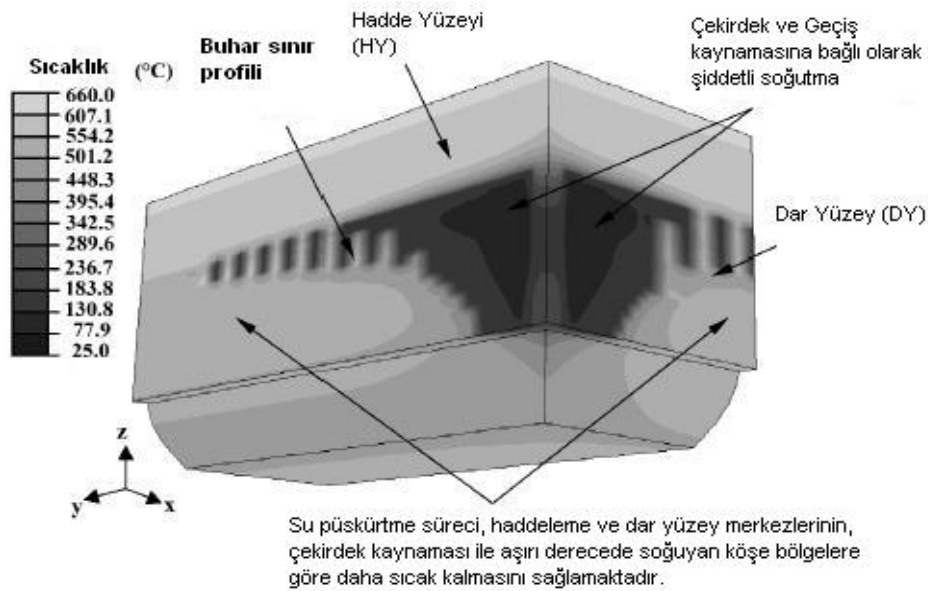
Kalıp çıkışındaki genel kabuk kalınlığı, ~20mm civarında şekil 3.23'de görüldüğü üzere değişmekte ve ergime sıcaklığının (T_m) %70'ine ulaşmaktadır. Buna karşın alüminyumun sürekli dökümünde, şekil 20'de görüldüğü gibi T_m sıcaklığının %85'inde iken kalıbı terk etmektedir. Buda eğer alaşımın katılaşma sahası büyük ise, örneğin AA5182 alaşımı için ~100°C, kabuğun lapa şekilde bırakabilmektedir. Soğutma suyu yüzünden yüzeyin büzülmesi, dendritik sıvı zerrelere uzaması döküm yüzeyinin kabalaşmasına neden olur. AA1050 alaşımı için, katılaşma sahası 20°C den küçüktür, bu yüzden yüzey görünüşü daha düzgündür.

Kalıbın içerisinde, ara yüzeydeki boşluk ısı aktarımı için en büyük direnci göstermektedir. Kalıp çıkışının devamında, ikincil soğutma bölgesindeki kabuğun kalınlaşması her iki sürekli döküm yönteminde de döküm parçasından ısı kaçış hızını sınırlandırıcı bir faktördür. İkincil soğutma bölgesinde sıcaklık değişimleri istenmeyen bir durumdur çünkü bu bölgede doğrusal bir sıcaklık değişimi olmaz ise yerel bölgelerde ısıl gerilmeler ve çatlaklar oluşabilir. Şekil 3.23'de çeliğin sürekli dökümünde haddelerin arasında, kabuk boyunca modellenmiş sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Merdaneler üzerinde ilerlerken, şiddetli ve az şiddetli püskürtme ile soğutmada çelik kabuk üzerindeki ısı atım hızında hızlı değişimler görülmektedir. Buda yüzeye yakın bölgelerde (~10mm) ısıl alanları önemli ölçüde etkilemektedir.

Püskürtme işleminin şiddetini arttırmak, katılaşma hızının arttırmamaktadır. Şekil 3.23'de görüldüğü gibi sıcaklık değişimi kabuğun derinlerinde doğrusaldır. Kabuk yüzeyine

yaklaştıkça yüzey sıcaklığının değişmesiyle çatlak sorunlarını arttırabilecek, yerel ısıl gerilimlere neden olur. Yüzey sıcaklığında ani değişimler çatlamalara neden olur ve daha önce olanları devam ettirir. Çelik döküm yüzeyinin Ar_3 sıcaklığı civarı da ısıl çevrim tehlikelidir çünkü AIN (alüminyumnitritten) gibi zarar verici fazların çökmesi ve östenit ferrit faz dönüşüyle ilgili hacim değişikliğine bağlı yüksek ısıl gerilmeleri arttırmaktadır.

DC döküm sürecinin başlangıç fazı sırasında, kalıbın alt kısmında alüminyum kabuk şekil 3.20'de görüldüğü gibi tekrar ısınmaktadır. Buda hadde yüzünde ısı aktarım katsayısını düşüren ve katılaşmayı geciktiren bir kararlı bir tabaka kaynaması olduğunu göstermektedir. Bu etki şekil 3.24'te modellenen sıcaklıklarla birlikte başlangıç safhası için açıkça görülmektedir.



Şekil-3.24 Alüminyumun DC dökümünde başlangıçtan 375 saniye sonraki dar ve haddelenme yüzeyindeki yüzey sıcaklıkları (MS&T, 2004)

Kalıbın 20mm aşağısında Leidenfrost sıcaklığının üstünde dik yüzeylerde, ingot yüzeyinden su tabakasının atılması ile (buharın oluşması ile birlikte) buhar duvarı oluşmaktadır. Şekil 3.24 de görüldüğü üzere ingotun merdane temas ve dar yüzeyi, köşe bölgelerden daha uzun süre sıcaklığı tutmaktadır. Buda yüksek gerilime sahip kabuk yüzeyinden aşağıda dik yüzlerin orta bölgelerinde sıcak noktaların oluşmasına neden olur. Buda bu bölgelerde niye sıcak yırtılmalara çok rastlandığının bir sebebidir. Ayrıca bu gözlemler çeliklerin ve alüminyumun sürekli dökümünde, ikincil soğutma sürecinin dizaynının öneminin altını çizmektedir. Bu bölgede olması gerekenler, kabuğun monoton olarak soğutulması ve çatlakların oluşmasının engellenmesidir.

3.3. Su İle Soğutmanın Optimizasyonu

Su ile soğutma, çeliklerin sürekli dökümünde ve alüminyumun sürekli dökümünün başlangıç fazında çok önemli bir rol oynamaktadır. Soğutma süreci parametrelerini düzenlemek hatasız döküm yapabilmek için önemlidir. Kalıp geometrisi ve çalışma değişkenleri menisküsten çıkıştaki kalıbın sıcak yüzeyinin sıcaklığını ve kabuğun birincil soğutulmasını kontrol edebilmek için tasarlanmıştır. Sürekli çelik döküm kalıbındaki su kanalları, soğutma suyu ile kalıp yüzeyleri arasında ısı transferini optimize etmek için ayarlanmıştır. Örneğin, kanal derinliğini düşürmek, boşluğu arttırmak ve genişliğini düşürmek daha sıcak yüzeylerin oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek hızları ile sıcak yüzeyin sıcaklığı düşmektedir. Bazı işlemler çevrimiçi olarak su hızını ayarlayarak kalıbın sıcak yüzeyinin sıcaklığını kontrol edebilmektedir.

Çeliklerdeki ikincil soğutma sürecini kontrol etmek alüminyumun DC dökümüne göre daha kolaydır. Çünkü soğutma tabaka kaynaması olayına bağlı olduğundan, ısı transfer katsayısı döküm yüzey sıcaklığından oldukça bağımsızdır. Nozül tipi, nozüller arası boşluk, püskürtme suyunun akış hızı ve nozüllerin döküm yüzeyinden olan uzaklığı ile ısı akışı arasındaki ilişkiler literatürde verilmiştir. Normal çalışma şartları altında, püskürtmenin uygulanması, soğutma şartlarının hata oluşumlarını önlemesi üzerine tasarlanmıştır. Plateu soğutma ve hava-su karışımı soğutma gibi özel teknikler uygulanmaktadır. Plateu soğutmanın amacı su püskürtülerek soğutulan bölgenin sıcaklığını 700°C'nin üstünde tutarak bu sıcaklığın altında bir daha ısıtılamamasını sağlamaktır. Bu prosedür önemi, çeliğin 700°C ile 900°C derece arasında sünekliğinin azalmasını kullanarak çatlama önlemesidir. Su-hava karışımı ile soğutmada, su zerresi püskürtme jetleri kullanarak, az soğutma veya yüksek oranda soğutma yüzünden oluşan yerel ısıl değişimlerini en aza indirerek daha düzenli bir soğutma sağlamaktır. Endüstride döküm hızı ile koordineli olarak değişen ve ikincil soğutmada ki geçiş bölgelerindeki soğutmayı optimize etmek için otomatik soğutma sistemleride kullanılmaktadır. Bu kontrol sistemlerinde bütün parçanın aynı soğutma koşullarında bulunduğunu online olarak modelleyebilen sistemler bulunmaktadır.

Fakat DC dökümde, son döküm parçasının kalitesini kontrol edebilecek, su ile soğutma olayını optimize etmeyi amaçlayan çok az çalışma yapılmıştır. Otomasyon sistemlerinin artmasına rağmen, karışık iç etkiler yüzünden soğutma şartlarını kontrol etmek çok zordur. Kalıp, soğutma suyu ve alt taban ingot yüzeyini soğutmaktadır. Bu birleşmiş karşılıklı etkilenme, ikincil soğutma bölgesindeki su soğutma koşullarını etkileyerek (çekirdek/tabaka kaynama) kalıptan çıkan ingotun sıcaklığını belirlemektedir. Son yapılan çalışmalar, alt taban

şekli ve dolma hızı, döküm hızı ve su akış şartlarını değiştirerek, DC dökümdeki, ısıl gerilmeleri azaltan ve alt kıvrılmayı önleyen soğutma yoğunluğunu düşürmeyi amaçlamışlardır. Az soğutma suyu hacmi ile başlangıçtaki yüksek döküm hızını birleştirilmesi, bazı alaşımlarda taban deformasyonunu azaltmaktadır. Ayrıca şişirilebilir ingot silicilerde ingot yüzeyinden soğutucu suyun uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. Buda ikincil soğutmayı düşürmektedir. Çok uzağa götürülür ise, bu uygulamalar yüksek yerel yüzey sıcaklıklarına sebep olarak çatlama ve kırılmalara neden olur. Taban kıvrılması, taban kabuğunun kalınlaşması ile azalmaktadır. Bu olay uygun taban blok tasarımı veya uzun doldurma süreleri kullanılarak aşılabilir. Bunlara ek olarak, Alcoa's CO₂ enjeksiyonu, Wagstaff'ın turbo prosesi ve Alcan's su etkisi tekniğinde kullanılan su ile soğutma teknikleri arasındadır. Alcoa ve Wagstaff'ın tekniğinde tabaka kaynamasını arttırmak için gazlar kullanılmaktadır. Su tabakası içindeki gaz baloncukları ingot yüzeyine yapışarak, ısı aktarım katsayısını düşüren bir yalıtım katmanı oluşturmaktadır. Alcan tekniğinde, başlangıç anında soğutma suyunu açıp kapatan döner vanalar kullanılmaktadır. Buda ortalama ısı akışını düşürerek ingotun yüzey sıcaklığını arttırır böylece tabaka kaynaması tetiklenir.

Nitelikli sonlu elemanlar yöntemlerinin ve daha güçlü bilgisayarların gelişmesi ile sürekli döküm sırasında meydana gelen sıcaklık dağılımları ve ısıl gerilmeler, temel prensipler baz alınarak matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sonucunda soğutma sürecini optimize etmek için yapılan deneyler minimize edilmiştir. Deneyleri sıfıra indirebilmek için döküm sürecindeki bütün karmaşık soğutma prosesinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi gerekmektedir. Endüstriyel ölçümler ile onaylanan bazı güçlü modeller optimizasyon için kullanılmaktadır. Ayrıca bu modellerin, gerilim ve çatlakları oluşabilme kriterlerini de içinde barındırabilenleri hatasız döküm üretmeyi amaçlayan firmalarda kullanılmaya başlanmıştır.

Son yirmi yıl içinde birçok matematiksel model hem birincil soğutma hem de ikincil soğutma süreçleri için endüstride geniş çapta kullanım alanı bulmuştur. CASIM, DYNCOOL ve DYSCOS gibi modeller internet üzerinden kontrolleri yapılabilen, endüstrilere adapte edilmiş sistemlerdir. Illinois üniversitesi ve L'Ecole des Mines de Paris üniversiteleri endüstride de kullanılabilecek sonlu elemanlar yöntemi tabanlı, soğutma rejimlerini hem kalıp içerisinde hem su püskürtme alanında modelleyebilen sistemler geliştirmişlerdir. DC döküm süreci içinde birçok model geliştirilmiştir. Bunlardan birkaçı; EMPACT, SECAT, MARC, ABAQUS ve ALSIM/ALSPEN'dir. Canadada Columbia üniversitesi ve Alcan international ltd. Firması ortaklaşa olarak sıcak yırtılmayı yaratan nedenleri araştıran ve modellemeyi başarabilecek bir sistem üzerinde çalışmaktadırlar.

4. KATILAŞMA

Katılaşmış malzemeler senelerce, katılaşma mekanizmasını anlamak yapılarının ve özelliklerini incelemek için büyük ilgi ile araştırılmıştır. Katılaşma, arı metalin ve alaşımların katılaşması olmak üzere iki şekilde incelenir. Arı metaller sabit bir sıcaklıkta, alaşımlar ise bir sıcaklık aralığında katılaşırlar. Ergime sıcaklığının altında katı fazın serbest enerjisinin sıvı faza nazaran daha fazla negatif olması, bu sıcaklıkta katı fazı daha kararlı yapmaktadır. Bu durum, katılaşma olayını oluşturur. Katılaşma, çekirdeklenme ve çekirdeklerin büyümesi mekanizmaları ile olur.

Dökümlerde katılaşma şeklini ve katılaşma sonucu oluşan yapıyı etkileyen çeşitli faktörler vardır; Bunlar alaşımı bileşimi, ısıl koşullar, sıvı içindeki bağımsız çekirdeklenmeler ve büyüme koşullarıdır.

Alaşım bileşimi, kristalleşme şeklini etkiler ve tek fazlı, ötektik taneli veya her ikisinin bir arada bulunduğu bir yapının oluşup oluşmayacağını belirler. Aynı zamanda, eriyen alaşım elementinin sıvı ve katı fazlar içindeki dağılımını ve difüzyon katsayısını karakterize ederek yapısal aşırı soğumaya olan eğilimi belirler.

Isıl koşul, döküm içindeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı, başlangıçtaki sıcaklık koşulları ile metalin ısıl özellikleri tarafından belirlenir. Sıvı içindeki bağımsız çekirdeklenme ve büyüme koşulları; çekirdeklenme ve büyüme için mümkün rölatif olasılıklar, sıvı içindeki yabancı parçacıkları veya alaşım elementlerinin emprüte şeklinde bulunmasına veya amaçlı olarak ilave edilmiş olmalarına bağlıdır.

4.1. Çekirdeklenme

Sıcaklık düştükçe, sıvı metal içinde belirli bir sayıda atom bir araya gelip küçük atom demetçikleri oluştururlar. Bunlar tekrar dağılıp sıvı içinde ergirler. Bu atom demetçiklerine embriyon adı verilir. Embriyonlar, sıvı içinde tekrar ergimeyecek kadar büyük bir boyuta eriştiklerinde çekirdek adını alırlar. Yaklaşık 300 atom bir çekirdeği oluşturur. Çekirdeklenme homojen ve heterojen olabilir. Sıvının dışarıdan herhangi bir yardım görmeden, kendi çekirdeklerini kendisinin üretmesi yoluyla meydana gelen çekirdeklenme homojen çekirdeklenmedir. Bu tür çekirdeklenme ancak özel şartlar altında gerçekleştirilir. Sıvı içinde mevcut olan çekirdekler yardımıyla oluşan çekirdeklenmeye de heterojen çekirdeklenme adı verilir. Pratikte genellikle bu tür çekirdeklenme görülür.

4.1.1 Homojen çekirdeklenme

Bir katı eriyiği kendi sıvı eriyiği içindeki yabancı malzemelerin yardımı olmaksızın meydana gelmesi olayına homojen çekirdeklenme denir. Çok küçük taneciklerin toplam serbest enerjisine yüzey enerjisi katkısının oldukça büyük olması sebebiyle homojen çekirdeklenme büyük bir itici güç ister. Bı sıvıyı ΔT kadar aşırı soğuttuğumuzda tam kararlı halde bulunan küresel bir taneciğin “ r^* ” yarıçapı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$r^* = \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_m \cdot V_s}{\Delta H \cdot \Delta T} \quad (4.1)$$

- r^* : Kritik çekirdek yarıçapı
 σ : Birim yüzey alanı başına düşen serbest enerji artırımını
 T_m : Çözünen metalin ergime derecesi
 V_s : Molar hacmi
 ΔH : Entalpi
 ΔT : Sıvıdaki aşırı soğuma

Sıcaklık azaldıkça, sıvı metal içimde belirli sayıda atom bir araya gelip küçük atom demetçikleri oluştururlar. Bunlar tekrar dağılıp sıvı içinde ergirler. Bu atom demetçiklerine embriyon adı verilir. Embriyonlar, sıvı içinde tekrar ergimeyecek kadar büyük bir boyuta eriştiklerinde çekirdek adını alırlar.

$r < r^*$ Gelişemeyen çekirdek

$r \geq r^*$ Gelişebilir çekirdek meydana gelir.

Doğada kendiliğinden gelişen tüm olaylarda serbest enerjinin her zaman daha düşük bir değer olması gerektiğinden $r < r^*$ olan çekirdek gelişmeyip dağılacaktır. Çünkü doğada kendiliğinden oluşan olayların akış yönü ortaya çıkacak yeni fazın daha düşük serbest enerjili olacak şekilde gelişir. Buna karşılık boyutları $r > r^*$ olan tüm atom birikimlerinin ise gelişerek taneye doğru büyümeleri serbest enerjilerinde bir azalışı gerektiğinden bu olay gerçekleşebilir. Dolayısıyla bu çekirdek yaşayabilir, gelişebilir, taneleşebilir bir çekirdek durumuna gelir.

$$r^* \square, \zeta.S. \square, Tanebü. \square, \sigma \square, H \square, \alpha \square$$

$$r^* \square, \zeta.S. \square, Tanebü. \square, \sigma \square, H \square, \alpha \square$$

TURNBULL' a göre, bu durum sıvıyı basit olarak her biri "i" sayısında atom ihtiva eden çeşitli büyüklükteki kümelerin ideal eriyiği şeklinde bakılmasıyla görülür. Eğer "n" birim hacimdeki tek atomların (i=1) sayısı, n_i 'de bu tek atomlardan meydana gelmiş "i" atomlarının küme sayısı kabul edilirse kümelerin meydana gelmesi halinde birim hacimdeki sıvıda ΔG_c serbest enerji değişimi;

$$\Delta G_c = n_i' \cdot \Delta G_i - T \cdot \Delta S \quad (4.2)$$

şeklindedir. Burada;

$\Delta G_i = i$ sayıdaki atomun meydana getirdiği bir kümenin oluşturduğu serbest enerjisi

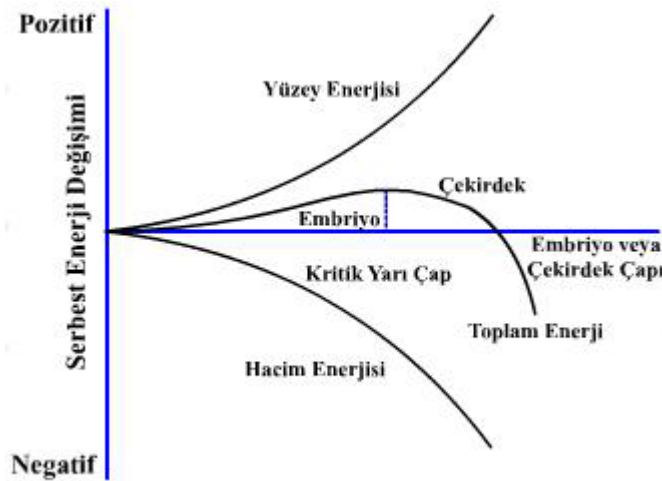
$\Delta S = n_i'$ adet kümenin karışım entropisidir ve ideal bir eriyik için basitçe;

$$\Delta S = -k \left(n_i' \cdot \ln \frac{n_i'}{n_i' + n} + n \cdot \ln \frac{n}{n_i' + n} \right) \quad (4.3)$$

şeklinde ifade olunur. Denge halinde, yarı kararlı durumda, $\frac{dG_c}{dn_i'} = 0$ dır.

Bu noktada $n_i' = n_i$ olsun ve $n \gg n_i'$ kabul edilirse bu durumda yukarıdaki eşitlik

$$n_i' = n_e (= \Delta G_i^* / kT) \quad (4.4)$$



Şekil-4.1 Çekirdeklenmeye karşı serbest enerji engeli (A.Ulvi AVCI, 1993)

Böylece, ergime noktasının üstündeki veya altındaki bir sıcaklıkta, sıvı denge halinde (4.4) eşitliğiyle verilen katı şeklinde küme dağılımına sahip olacaktır. Bu her kümenin ΔG_i serbest enerjisi ;

$$\Delta G_i = \sigma A + V \frac{\Delta G}{V_s} \quad (4.5)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta H \cdot \Delta T}{T_m} \quad (4.6)$$

olup burada;

- A : Kümenin yüzey alanı
V : Kümenin hacim,
 ΔG : Katılaşma termodinamik itici kuvvet
 V_s : Molar hacmi

$r=r^*$ kritik yarıçapında ΔG_i maksimumuna yükselir ve bundan sonra hızla azalır. Küresel bir küme için (4.5) ve (4.6) eşitliklerini (4.4) eşitliğinde yerine konulmasıyla

$$\Delta G_i = \frac{16}{3} \cdot \frac{\pi \sigma^3 T_m^2 V_s^2}{\Delta H^2 \Delta T^2} \quad (4.7)$$

Ve (4.7) eşitliğinin $n_i^l = n_i$ için geçerli olduğu kabulüyle;

$$n_i^* = n_e (\Delta G_i / kT) \quad (4.8)$$

bulunur. Kritik çekirdek oluşmasına karşı olan ΔG_i termodinamik engeli, artan ΔT aşırı soğumasıyla hızla azalır. Dolayısıyla n_i^* bu şekilde kritik çekirdeklerin sayısı, aşırı soğumanın kuvvetli bir fonksiyonudur. Bu kritik çekirdekleri sayılarının artması, belli bir zaman katılaşmasının başlatılması ve büyümenin oluşması ihtimalini artırır.

Homojen çekirdeklenme için hız kanunu iki basit kabul ile çıkartabiliriz. Öncelikle denge düşüncesiyle tahmini yapılan n_i^* kritik çekirdek yoğunluğu çekirdekleşmenin başlamasından sonra bile aynen kalır. İkincisi çekirdeğe tek bir atom ilavesi bu çekirdeği aşırı derecede kritik yapar ve hızla büyümesine sebep olur. Bu durumda birim hacimde I çekirdek oluşma hızı;

$$I = n_i^* \cdot W^* \cdot V_{1s} \quad (4.9)$$

şeklinde olur. Burada;

W^* : Kritik çekirdeği çevreleyen atom sayısı

V_{ls} : Sıvı-katı ara yüzeyinde bir taraftan diğer tarafa atomların atlama frekansısıdır.

Küresel bir çekirdek için W^* yaklaşık olarak şu şekilde verilmiştir.

$$W^* = \frac{4\pi r^{*2}}{a^2} \quad (4.10)$$

sıvı içinde atom veya moleküllerin atlaması,

$$V_L = \frac{6D_L}{\lambda^2} \quad (4.11)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada;

λ : Atlama mesafesi

D_L : Sıvı yayınma katsayısıdır.

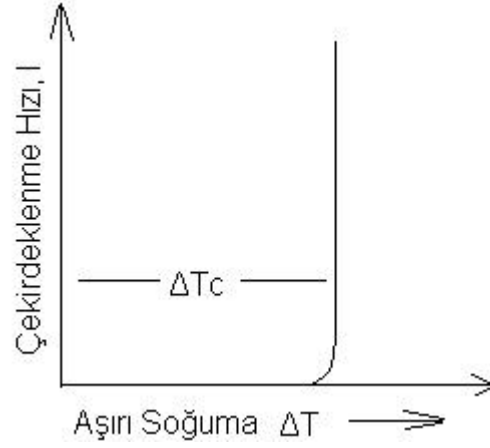
Her atomun sıvı katı ara yüzüne çarpma frekansı genellikle sıvı içindeki atlama frekansının 1/6 'sı olarak alınır, çünkü bir atom ara yüzeye sadece altı mümkün yönden birinde atlayarak erişir. $\lambda=a$ alınarak V_{LS} ile ilgili ifade;

$$V_{LS} = \frac{D_L}{a^2} \quad (4.12)$$

Şeklinde olur. (4.10) ile (4.11) eşitliklerinin yukarıdaki ifadeyle beraber yerine koyarsak, en sonunda sıvı içindeki homojen çekirdeklenme ile ilgili klasik ifadeyi buluruz.

$$I = B_1 \frac{D_L}{D_{LM}} \exp \left[-\frac{16.\pi.\sigma^3.T_m^2.V_s^2}{3.\Delta H^2.\Delta T.k.T} \right] \quad (4.13)$$

Burada ekspolaransiyel öncesi B_1 terimi kritik çekirdek büyüklüğüne ve yüzey enerjisine bağlı olup, D_{LM} ise T_m dengesele ergime noktasında sıvı yayınma katsayısıdır. Sıvı metallerde $D_L/D_{LM}=1$ ve ekspolaransiyel öncesi B_1 terimi bir sabite, yaklaşık 10^{33} olarak alınabilir.



Şekil-4.2 Metal gibi viskoz olmayan sıvılarda çekirdeklenme hızı eğrisinin karakteristik görünümü (A.Ulvi AVCI, 1993)

Klasik çekirdeklenme teorisini doğrulama kullanılan en güzel deneysel yaklaşım küçük parçalara ayrılmış damlacıklar üzerinde yapılan katlaştırma çalışmalarıdır. Burada iki metot kullanılmıştır; küçük damlaların mikroskopik olarak düzlenmesi ve ince film tabakasıyla ayrılmış damla kümeleri üzerinde ısıl analiz (4.12) eşitliğiyle tahmine kalitatif şekilde uygun olarak, bu çalışmalar belli bir damlacığın, sonradan çekirdeklenmenin hızla meydana geleceği belli bir ΔT_c 'den daha küçük aşırı soğumalarda çekirdeklenme olmazsınız çok uzun zaman tutulabilir.

TURNBULL ve arkadaşlarının ve bu konuda yapılmış diğer çalışmaların çoğunun neticesi, metallerde gerçekleştirilen maksimum aşırı soğumanın kalitatif olarak ergime noktasının yaklaşık 0.18'ine denk olduğunu göstermektedir. (Çizelge 4.1) TURNBULL, bu aşırı soğumanın homojen çekirdeklenme için gerekli aşırı soğumayı temsil ettiğini kabul ederek σ sıvı katı yüzey enerjileri büyüklükçe uygun değerdedir ve ergime ısısına karşı doğrusal bir değişim gösterdiklerinden birbirleriyle uyumludurlar. Bu ikinci husus basit teoriden beklenen neticeye uymaktadır. (Küçük bir çekirdeğin yüzey enerjisi ile esas malzemenin yüzey enerjisi arasındaki fark)

Metalsel alaşımlar üzerinde yapılan deneyler, homojen çekirdeklenmenin saf metallerde olduğu gibi hemen hemen aynı aşırı soğuma olduğunu göstermiştir. Homojen çekirdeklenmeye ulaşmak için büyük miktarda aşırı soğutma gereklidir. Bununla beraber, birçok araştırmacı tarafından metal ve alaşımlarda büyük oranda aşırı soğutmaya imkân veren teknik yöntemler geliştirilmiştir. En basit ve en etkili tekniklerden biri ergimiş metali viskoz bir cam içinde kapatmaktadır. Cam metalin pota duvarlarıyla çekirdeklenmesine engel olur ve çekirdeklenmeye sebebiyet veren gayri safiyetleri eritir. Böylece ağırlıkları birkaç kilograma varan çok sayıda metalde, homojen çekirdeklenme için gerekli aşırı soğuma değerine

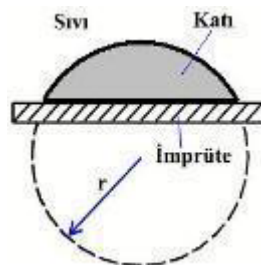
yaklaşmıştır. Fakat bu zamana dek bilindiği kadarıyla homojen çekirdeklenme sıcaklığı öyle bir sıcaklıktırki, ticari öneme sahip metalsel alaşımlarda homojen çekirdeklenme için gerekli aşırı soğutma elde edilmez.

Metal	Maksimum Aşırı Soğuma °C	Yüzey Enerjisi erg/cm ²
Alüminyum	195	121
Manganez	308	206
Demir	295	204
Kobalt	330	234
Nikel	319	255
Bakır	236	177
Altın	230	132
Platin	370	240
Kurşun	80	33
Kalay	118	59

Çizelge- 4.1 Çeşitli metallerin maksimum aşırı soğuma ve yüzey enerjileri değerleri

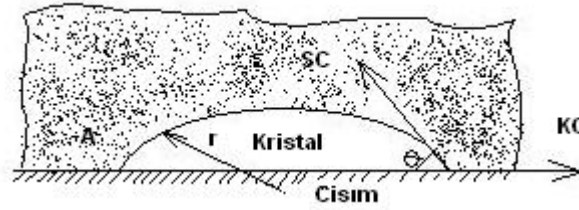
4.1.2 Heterojen çekirdeklenme

Alışılmamış laboratuvar deneyleri dışında, sıvı metal için homojen çekirdeklenme asla olmaz. Sıvı ile temas halinde bulunan kalıp duvarları, yabancı maddeler (impuritelere) veya katı parçacıkları, çekirdeklenme için uygun yüzey sağlayabilir



Şekil-4.3 Heterojen çekirdeklenme (A.Ulvi AVCI, 1993)

İmpürite üzerinde, çekirdeğin yüzey enerjisinde küçük bir artış olabileceği sanılmaktadır. Bu, heterojen çekirdeklenmenin, nispeten daha az bir alt soğuma ile oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Sıvı katı arasındaki çok küçük toplam yüzey alanı artışı ile kritik yarıçaptan daha büyük olan kavis yarıçapına ulaşılmaktadır. Bir katı parçası üretmek için sadece birkaç atom birlikte kümeleşmek zorundadırki, bu istenilen kavisin yarıçapıdır. Kritik boyuta ulaşmak için, istenilen alt soğuma daha azdır ve böylece çekirdeklenme daha kolay oluşur. İmpüriteler üzerindeki çekirdeklenme, heterojen çekirdeklenme olarak bilinir. Bütün mühendislik metalleri ve katılaşma esnasında heterojen şekilde çekirdeklenir.



Şekil-4.4 Bir cisim üzerinde bir kümenin meydana gelmesi (A.Ulvi AVCI, 1993)

Metaller ve diğer sıvıların çoğu kristalleşmeye başlamadan önce nadiren birkaç dereceden fazla aşırı soğurlar. Kristalleşme emprüte parçacıkları üzerinde, yeni çekirdeklenmeye neden olan kaynaklar veya kalıp duvarları üzerinde başlar ve böylece homojen çekirdeklenmeye karşı çok büyük bir termodinamik engelden kaçınılmış olur. Düz bir cisim üzerinde denge halinde bir küme düşünüldüğünde,

$$\sigma_{AS} - \sigma_{AK} = \sigma_{SK} \cos \theta \quad (4.14)$$

olduğu zaman denge vardır. Burada; σ_{AS} ; cisim-sıvı, σ_{AK} , alt cisim-küme, σ_{SK} sıvı-küme arayüzey yüzey enerjileridir. Kümenin dengesel şekli “r” yarıçapında bir küme şapkasıdır. Kritik büyüklükte bir küme $r=r^*$ olduğu zaman meydana gelir. Bunun için gerekli serbest enerji

$$\Delta G_{ci}^* = \Delta G_i^* \cdot f(\theta) \quad (4.15)$$

denklemleri ile bulunabilir. Burada ; ΔG_{ci}^* , r yarıçapında bir cisim üzerinde bir küme meydana gelmesi için gerekli serbest enerjiyi, ΔG_i^* ise “i” sayıdaki atomun meydana getirdiği bir kümenin oluşması için gerekli serbest enerji değişimini gösteriyor. Burada θ sıfıra düşerken $f(\theta)$ da sıfıra gider. Böylece, cisimle kristal arasında ıslanma artarken çekirdeklenme engeli azalır ve nihayet tamamen ortadan kalkar. F(Q) faktörü şu şekilde ifade edilir.

$$f(Q) = \frac{1}{4}(2 + \cos Q) = (1 - \cos \theta)^2 \quad (4.16)$$

Homojen çekirdeklenmeye benzer olarak, birim sıvı hacminde bulunan kritik büyüklükteki kümelerin sayısı n_{Cl}^* ve birim hacimdeki cisimlerin yüzey atomları sayısı n_s' ise;

$$n_{Cl}^* = n_s' \cdot e(\Delta G_{Cl}^* / kT) \quad (4.17)$$

Denklemlerle bulunur. Heterojen çekirdeklenme hızı ise;

$$I_C = n_{Cl}^* \cdot W_{Cl}^* \cdot V_{SK} \quad (4.18)$$

şeklinde bulunabilir. Burada W_{Cl}^* kritik bir kümeyi çevreleyen yüzey atom sayısını, V_{sk} ise atlama frekansını gösterir. İlgili değerlerin bu eşitlikte yerine konması ile heterojen çekirdeklenme için benzer şu ifadeyi buluruz:

$$I_C = B_1' \frac{D_L}{D_{LM}} \exp \left[-\frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3 \cdot T_m \cdot V_s^2}{3 \cdot \Delta H^2 \cdot \Delta T^2 \cdot k \cdot T} \cdot Q \right] \quad (4.19)$$

Burada ekspolaransiyel öncesi B_1' terimi kritik çekirdek boyuna, yüzey enerjisine ve birim sıvı hacminde cisim üzerindeki n_s' yüzey atomu sırasına bağlıdır.

Heterojen çekirdeklenmede yüzey geometrisi önemli bir faktördür. Yüzey kabalığı ve çukur veya oyuklar çekirdeklenme şeklini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, dengesiz ergime noktasının üstündeki sıcaklıklarda bile oyuklarda katının muhafazası mümkündür. Eğer katı bu şekilde içeride kalırsa bu durumda katı kritik çekirdek gibi davranacak ve çekirdeklenme için kritik aşırıya isabet eden bir ΔT aşırı soğumasında büyüyecektir.

Heterojen çekirdeklenme teorisine göre iyi bir tane küçültücü, çekirdeklenen tanecikle büyüyen katı arasında küçük bir temas açısı meydana getirmelidir. Bu durumda (4.19) eşitliğine göre tanecikle eriyik arasında σ_{LP} yüzey enerjisinin yüksek, katı ile tanecik arasında kafes uygunsuzluğunun azalmasıyla ve katı ile tanecik arasında kimyasal ilginin artmasıyla azalmalıdır. Başarılı bir çekirdek meydana getiren element erimiş metal içinde mümkün olduğu kadar kararlı olmalı maksimum yüzey alanına sahip bulunmalı ve yüzey karakteri optimum olmalıdır.

Birçok araştırmacı heterojen çekirdeklenmeyi başlatmak için lazım gelen aşırı soğumanın katılan tanecikle çekirdek yapıcı arasındaki kafes uygunsuzluğunun artmasıyla arttığını bulmuştur. Aşırı soğutulmuş sıvılarda çekirdeklenmeyi canlandırmada diğer bir yol aşırı soğutulmuş sıvılarda çekirdeklenmeyi canlandırmada diğer bir yol aşırı soğutulmuş sıvılara titreşim uygulanmasıdır.

Buraya kadar anlatılmak istendiği gibi pratikte sıvı metal banyosunda kristalleşme heterojendir; yani katı faz, sıvı içindeki yabancı cisimleri çekirdek olarak kullanılır ve bunlar üzerinde büyür. Bu cisimlerin, birkaç atomdan oluşan gruplara nazaran çok daha büyük çaplı oluşu nedeniyle, bunların üzerine çökme için gerekli birim yüzey alanına başına düşen serbest enerji artımı küçük olacaktır. Bunun anlamı da, heterojen çekirdek oluşumunun bağlayabilmesi için gerekli aşırı soğuma homojen çekirdek oluşumu için olan değerden daha düşük olacaktır, yani yabancı çekirdeklerin bulunduğu bir yerde homojen çekirdek oluşmasından daha önce heterojen çekirdek oluşumu başlayacaktır.

4.2 Büyüme

Çekirdeklenen kristallerin büyümesi her yönde aynı değildir. Serbest kalan gizli ısısının en az etkilendiği kristal en hızlı büyür. Küp şeklinde kristalin büyümesi göz önüne alındığında kenar ve köşelerdeki büyümenin daha hızlı olduğu görülür. En hızlı büyüme köşelerdedir. Dolayısı ile tercihli olarak birbirin dik üç doğrultuda bir büyüme olur. Her kol ayrıca ikinci ve üçüncü kollar oluşturur. Kolların büyümesi, karşıt kollar ile karşılaşınca kadar devam eder. Katılma aralığında geçen zaman ile kollar kabalaşır.

4.3 Arayüzey Kararlılığı

Başlangıçta düzlemsel cephede olan ara yüzeyin kararlılığı, yapısal aşırı soğuma teorisi ile açıklanabilir. Kararlı olan ara yüzey önündeki sıvı ise, ara yüzeyin düzlemsel kaldığı, katının kararlı olduğu durumlarda ise ara yüzeyin düzlemsel kaldığı, katının kararlı olduğu durumlarda ise ara yüzeyin bozulduğu kabul edilmektedir.

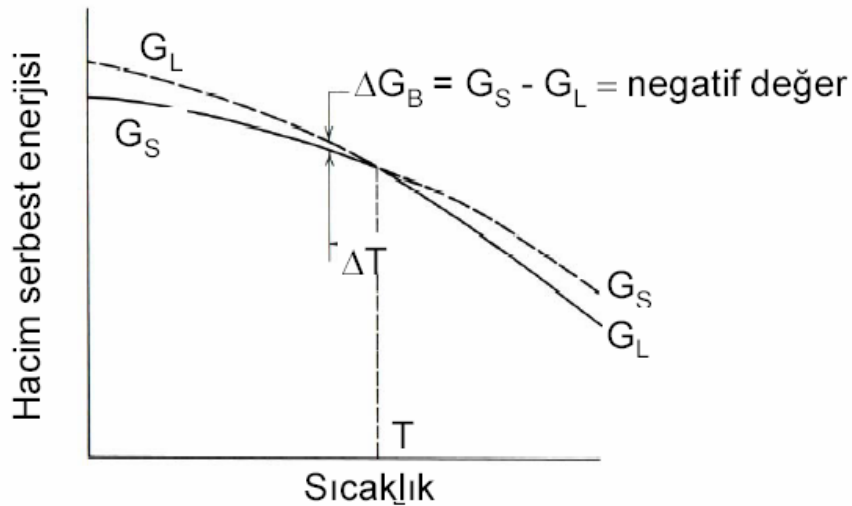
4.4 Hücresel Büyüme

Düzlemsel yüzeyde ara yüzey kararsız olunca önce hafifce dalgalanır ve daha sonra tam bir hücre şekli meydana getirecek biçimde bir çıkıntı yapar. $\frac{G_s}{R}$ oranı azaldıkça kıvrılarak hücresel hale gelir. (G_s : Katı-sıvı ara yüzeyinde sıvı içindeki sıcaklık gradyeni °C/cm, R: Büyüme hızı cm/sn.) Büyüme şartları düzlemsel cepheyi gerektiren durumlarda ayrılınca, tam teşekkül etmiş hücrelerden önce çok sayıda geçiş yapıları oluşur.

4.5 Dendritik Büyüme

Hücre sel katılaşmada hızı arttırıldığı veya sıcaklık gradyanı azaltıldığında büyüme yapısı değişir. Düşük hızda düzenli olarak büyüyen hücre, hız arttırıldığında önce <100> dendritik yönünde büyüyen muntazam hücre yapar. Daha sonra flanaj şeklini alan hücre sonunda yana doğru dallanarak dendrit haline dönüşür. Bu oluşum ara yüzeyi hemen hemen parabolik olan hücre uçlarının kararsız hale geçmeleri ile meydana gelir. Kararsızlık için itici kuvvet dendrit uçlarının hemen gerisinde, sıvı içindeki yapısal aşırı soğumadır.

Belirli kimyasal bileşimdeki bir metal ergime noktasının üstündeki sıcaklıklarda sıvı halde bulunmaktadır. Bu sıvı fazın katı faza dönüşümü entalpi yükselmesi veya serbest enerji azalması ile mümkün olabilir. Katılaşmanın meydana geldiği sıcaklıkta, katı kristalin içindeki atomların düzeni, aynı atomların sıvı fazdaki düzenlerine nazaran daha düşük bir serbest enerjiye sahiptir. Katılaşma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ise sıvı faz daha kararlı olacaktır.



Şekil-4.5 Katı ve sıvının hacim serbest enerjilerinin sıcaklık ile değişimi, G_s ve G_L = katı ve sıvının serbest enerjileri (A.Ulvi AVCI, 1993)

Metal soğuyarak ergime noktasına geldiğinde, ne katı faza ne de sıvı faza doğru itici gücün bulunmayışı, diğer bir deyimle serbest enerji değişiminin sıfır oluşu nedeniyle atomların sıvı ve katı durumdaki serbest enerjileri eşit olacaktır. Bu noktada bir kısım sıvı atom katı hale geçerken, aynı sayıdaki katı atomu da sıvı hale geçer. Yani bu noktada bir dinamik denge mevcuttur. Bu nedenle katılaşma sıcaklığında metalin katılaşması gerçekleşmemektedir. Bu sıcaklığın hemen altında ise, dinamik denge bozulduğundan (dinamik denge sıvıdan katı hale geçen atomlar lehine bozulur.) artık katılaşmaya doğru itici bir güç mevcut olacak ve

katılaşma başlayacaktır. Bu güç sıvı metal denge sıcaklığının ne kadar altında soğursa o kadar artmaktadır.

Görüldüğü gibi sıvı metalin katılaşması için ergime sıcaklığının (T_E) daha altında soğuması gerekmektedir. Buna aşırı soğuma adı verilir ki bu yeni meydana gelen kristallerin enerji ihtiyaçlarını karşılar yani itici bir güçtür.

4.6 Alaşımların Katılaşması

4.6.1 Düzlemsel ara yüzeyde katılaşma

4.6.1.1 Dengeli katılaşma

Normal koşullarda genellikle katılaşma hızı tam dengeli katılaşmayı sağlayacak mertebede yavaş olmamaktadır. Teorik olarak dengeli katılaşmanın sağlanması ($L^2 \leq D_k \cdot t$), şartının mevcut olmasına bağlıdır. (Burada, L ; büyüyen kristalin boyu, D_k ; Çözünen element atomlarının katı içindeki yayınma katsayısı ve “ t ” zamandır). Yukarıda belirtilen kabullere ilaveten, katı ve sıvı faz içindeki yayınmanın da tam olduğu kabul edilmektedir.

Uzunluğu L olan bir refrakter tüp içinde, bir ucundan başlayarak dengeli katılaşan ve ortalama bileşimi C_0 olan bir alaşım düşünüldüğünde ilk katı T_s sıcaklığında meydana gelir ve bileşimi $C_k = kC_0$ dir. Bir başka deyimle katı faz, sıvı faza nazaran çözünen element miktarı bakımından daha düşüktür. Katı faza girmeyen çözünen element, katı-sıvı ara yüzeyinden geriye döner ve sıvı fazda yayılır. Daha sonraki soğuma ve katılaşma esnasında hem sıvı hem katı faz, çözünen element bakımından zenginleşmektedir. T^* sıcaklığında bileşimi C_k^* olan katı faz ile bileşimi C_s^* olan sıvı faz denge halindedir. Bu durumda denge paylaşım oranı aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$K = \frac{C_k^*}{C_s^*} \quad (4.20)$$

Katı ve sıvı içindeki yayınmanın tam olduğu kabul edildiğine göre bütün $C_k = C_k^*$ bileşiminde ve bütün sıvıda $C_s = C_s^*$ bileşiminde olur. T^* sıcaklığında, çözünen element bakımından katı ve sıvı fazlar arasında genel madde dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$C_k \cdot f_k + C_s \cdot f_s = C_0 \quad (4.21)$$

Burada f_k ve f_s , sırasıyla katı ve sıvının ağırlık oranlarıdır. Eşitlik, denge, kaidesi olup $f_k + f_s = 1$ olduğundan, belli bir sıcaklıkta katı oranı kolaylıkla bulunabilir. Dengeli katılaşma süresince çözünen element katı ve sıvı fazlarda değişik oranlarda olup, malzeme ancak katılaşma başlamasından önce ve katılaşma tamamlandıktan sonra homojen olmaktadır.

4.6.1.2 Katı fazda yayınmanın olmadığı durum

Dengeli katılaşmaya nazaran gerçeği daha yakın bir katışma modeli ise, dengeli katılaşmadan yapılan kabullerin geçerli olduğu, yalnız katı içinde yayınmanın hiç olmadığı durumdur. Bu tür katılaşmada bileşimi (C_0) olan sıvı haldeki alaşımdan ilk katılaştıran bileşimi (kC_0)'dır.

Daha sonra süregelen soğuma ve katılaşma esnasında sıvı çözünen zenginleşir. Katı içinde hiç yayınma olmadığından ilk anlarda meydana gelen katı bileşimi değişmez. Sıvı ve dolayısıyla ileri kademelerde bu sıvıdan teşekkül eden katı çözünen element bakımından zenginleşir. T^* sıcaklığından C_k^* bileşimindeki katı C_s^* bileşimindeki sıvıdan katılaşmıştır. Katılaşma esnasında katılaştıran kısımdan sıvıya itilen çözünen elementin miktarı ile sıvıda zenginleşen miktarı eşitlenerek aşağıdaki denge elde edilebilir.

$$(C_s - C_k^*) \cdot df_k = (1 - f_k) dC_s \quad (4.22)$$

Bu bağıntıda denge paylaşım oranı $k = C_k^* / C_s = C_s^*$ kullanıp ve $f_k \rightarrow 0$ ile $C_k^* \rightarrow kC_0$ sınır değerleri arasında integrali alınırsa, sıvı-katı ara yüzeyindeki C_k^* katı bileşimi, katı oranının fonksiyonu olarak bulunur. Bulunan ifade;

$$C_k^* = kC_0(1 - f_k)^{(k-1)} \quad (4.23)$$

dır.

Eğer bulunan ifade sıvı bileşimi ve sıvı oranının fonksiyonu olarak yazılırsa;

$$C_s = C_s^* = C_0 f_s^{(k-1)} \quad (4.24)$$

olur.

(4.23) ve (4.24) bağıntıları genellikle “Denge dışı terazi kaidesi” veya “Scheil eşitliği” olarak bilinirler. Bu bağlantılarda;

- C_s^* : Sıvı – katı ara yüzeyinde sıvı bileşimi
- C_k^* : Sıvı – katı ara yüzeyinde katı bileşimi
- k : Denge paylaşım oranı

- C_0 : Alaşım bileşimi
 f_k : Katı fazın ağırlık oranıdır.

Scheil eşitliği, çözünen element dağılımını gerçeğe yakın bir şekilde tariflenmektedir. Eşitlik katılaşmanın olduğu sıcaklıkta, aşağıda ön kabuller yapılarak kapalı bir hacim elemanına uygulanır.

- a) Katılaşma esnasında ara yüzeyde denge vardır, yani sıvı ve katı içindeki bileşim değişimi ne kadar büyük olursa olsun atomların sıvıdan katıya geçişlerine karşı koyan direnç ihmal edilebilir derecededir.
- b) Hücre oluşmasından önce veya eğrilik tesisinden ileri geçen aşırı soğuma miktarı ihmal edilebilir.
- c) Katılaşmayı temsilen seçilen bölgeden alınan hacim elemanında çözünen miktarı katılaşma boyunca sabittir. Yani hacim elemanına veya hacim elemanından dışarıya doğru bir çözünen iletişimi yoktur. Böyle bir iletişime, sıvının konveksiyonel veya çekilme boşluklarını doldurmak üzere hareket etmesi, katılaşma esnasında katının kopup hacim elemanının dışına kaçması veya çözünen yayınması sebep olur.
- d) Hacim elemanında sıvı içinde tam yayınma vardır.
- e) Hacim elemanında katı içinde yayınma yoktur.
- f) “k” denge paylaşım oranı, ara yüzeyde geçerli olup katılaşma boyunca sabittir.

Katı içinde yayınmanın olmadığı durumlarda katı bileşimi daha düşüktür ve bu durumda da arta kalan sıvı bileşimi daha yüksektir.

4.6.1.3 Sıvı fazda yayınmanın sınırlı olduğu durum

Burada da katılaşma tamamen önceki örneklerde olduğu gibi başlar, ilk katı kC_0 bileşiminde meydana gelir. Katı tarafında atılan çözünen metal atomlarının yalnız yayınma yolu ile taşınması, konveksiyonla bir karışmanın olmaması, katı-sıvı ara yüzeyinde çözünen metal atomlarının yalnız yayınma yolu ile taşınması, konveksiyonla bir karışımın olmaması, katı-sıvı ara yüzeyinde çözünen elementçe zengin bir sınır tabakası meydana getirir. Bu tabadaki çözünen miktarı yavaş yavaş artar. Katı-sıvı ara yüzeyi ilerledikçe, belirli bir mesafeden sonra “kararlı duruma” erişebilir. Kararlı halde meydana gelen katının bileşimi alaşımın bileşimindedir. ($C_k = C_0$) Ara yüzeydeki denge şartı gereği, sıvı bileşimi C_0/k olacak ve

katılaşma, $T^*=T_k$ solüdü sıcaklığında meydana gelecektir. Kararlı halde sınır tabakasında dağılımı aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmektedir.

$$D_s \frac{d^2 C_s}{dm^2} + R \frac{dC_s}{dm} = 0 \quad (4.25)$$

Burada;

m : Ara yüzeyden olan mesafe,
 D_s : Çözünen metalin sıvı içindeki yayınma katsayısı,
 C_s : Sıvı bileşimi,
 R : Ara yüzeyin ilerleme hızıdır.

Sınır şartları, $m=0$ için $C_s = C_0/k$ ve $m=\infty$ için $C_s = C_0$ dır. Hatta ara yüzeyde sadece ısı ve kütle akışını göz önüne aldığımız zaman, sınır tabakanın da çözünen element dağılımını veren bağıntı aşağıdaki şekil'e dönüşmektedir.

$$\left(\frac{dC_s}{dm}\right)_{m=0} = -\frac{R}{D_s} C_s^* (1-k) \quad (4.26)$$

(4.22) bağıntısının (4.23) bağıntısı yardımıyla çözümünün TILLER W.A ve CHAMMERS B. Tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$C_s = C_0 \left(1 + \frac{1-k}{k} e^{-(R/D_s)m}\right) \quad (4.27)$$

Ara yüzeyden sıvıya doğru, çözünen elementçe zengin sınır tabakasının genişliği; sıvı içinde yayınmanın D_s , ara yüzeyin ilerleme hızının (R) ve denge paylaşım oranının k fonksiyonudur. k değeri küçük olan alaşımlarda kararlı duruma daha büyük R/D_s oranlarında erişilir.

Kararlı Durum: Çözünen element yönünden katı-sıvı ara yüzeyine katıdan alınan miktarın, sıvı faz içinde doğru yayınan miktara eşit olduğu durumdur.

4.6.1.4 Konveksiyonun etkisi

Bir katılaşma tekniğinde bile bir miktar konveksiyon mevcuttur. Şimdiye kadar yapılan araştırmalarda, sıvı içinde ne ısısal ne de yoğunluk farkından dolayı bir konveksiyon olmadığı kabul edilmiştir. Hâlbuki konveksiyonun olması halindeki durumda, kalınlığı δ olan bir yayınma sınır tabakası kabul edilmiş olup bu tabakanın dışındaki sıvı bileşimi konveksiyonla uniform halde tutulmuş, tabakanın içinde ise kitle transferi yalnız yayınma ile olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıda belirtilen katılaşma şekline; kararlı duruma erişilince meydana gelmiş (C_k^*) bileşimindeki katı ile C_0 bileşimindeki sıvı arasında dinamik bir denge kurulmuş olacaktır. Sıvı bileşimi, katı bileşiminin etkisinde olmadığından toplam sıvı bileşimi, C_0 olarak alınabilmektedir. Katı-sıvı ara yüzeyinde çözünen element dağılımını veren (4.24) bağıntısı, bu durumda geçerli olur ve yeni sınır şartları (m , katı-sıvı ara yüzeyinden itibaren mesafe olmak şartıyla) $m=\delta$ ' da $C_s=C_0$ ve $m=0$ da $C_s=C_s^*$ olmaktadır. Bu şartlara göre, elde edilen ifade aşağıda verilmektedir.

$$\frac{C_s^* - C_k^*}{C_0 - C_k^*} = e^{\frac{R\delta}{D_s}} \quad (4.28)$$

Yukarıdaki belirtilen dengeye erişildiğinde normal segregasyon denklemleri "Scheil eşitliği" (4.26) ve (4.27) yerine bunların değişmiş şeklini kullanmak gerekecektir.

$$C_s = C_0 f_s^{(k_e-1)} \quad (4.29)$$

$$C_k = C_k^* = k_e C_0 (1 + fk)^{(k_e-1)} \quad (4.30)$$

Burada "ke" efektif paylaşım oranı olup,

$$ke = C_k (= C_k^*) / C_s (= C_0) \quad (4.31)$$

şeklinde tarif edilir.

$$ke = \frac{k}{k + (1-k)e^{(R\delta/D_s)}} \quad (4.32)$$

Bu ifadenin önemi, katılaşma esnasında meydana gelen katı bileşimini, alaşım bileşimi gelen katılaşma şartlarına bağlanmış olmasıdır. δ sınır tabakası kalınlığının katılaşmanın olduğu refrakter tüpün boyuna kıyasla küçük olması şartıyla, uzunluğu belirli olan refrakter tüplerde çözünen dağılımını tarif için bu çözüm kullanılabilir.

4.6.2 Düzlemsel olmayan ara yüzeyle katılaşma

4.6.2.1 Yapısal aşırı soğuma

4.6.2.1.1 Tek fazlı alaşımlarda

Dengesiz katılaşmada, hareket eden katı-sıvı ara yüzeyi ile temasta olan sıvıda, düşük hızda çözünen yayılması nedeni ile bileşim farklılığı vardır. Alaşımın denge paylaşım oranı birden küçükse $C_k/C_s < 1$ ilerleyen ara yüzey önündeki sıvı bileşimine göre çözünen element

miktarınca zengindir. Sıvı içine doğru çözünen konsantrasyonun azalması sonucunda da dengesel sıvılaşma (likidüs) sıcaklığında bir yükselme söz konusu olacaktır. CHAMERS, B. Katılaşma esnasında, sıvıdaki aşırı soğuma olayı nedeniyle, sıvı katı ara yüzeyi önündeki sıvıda gerçek sıcaklığın dengesel likidüs sıcaklığına nazaran daha düşük olabileceğini göstermiştir. Bu bileşim değişimi nedeniyle meydana gelen aşırı soğuma olayına “yapısal aşırı soğuma” denilmiştir. Bu terimin kullanılmasının nedeni, aşırı soğumanın sıcaklık değişiminden ziyade bileşim değişimiyle meydana gelmesindedir.

Yapısal aşırı soğuma teorisine göre ara yüzeyde meydana gelen bir çıkıntının kendisi aşırı soğumuş bir sıvı içinde bularak kaybolmayacak ve dolayısıyla, bu aşırı soğuma, düz ara yüzeyde bir kararsızlık meydana getirecektir. Aynı zamanda bu teori ile hücrelerin ve/veya dendritlerin sıvı içinde doğru büyümesini açıklamak mümkündür.

CHAMERS, B. Ara yüzeyin kararlı olduğu durum için yapısal aşırı soğuma kriterinin sayısal ifadesini, ara yüzeydeki ısı ve çözünen balansı yardımıyla çıkarmıştır. Sıvıda konveksiyonun olmadığı, yüzey gerilimi, ısı transferinin etkisi imal edildiği ve ara yüzeyde dengenin söz konusu olduğu durumlarda eşitlik şu şekildedir.

$$\frac{G_s}{R} \geq -\frac{M_s}{D_s} \cdot C_0 \frac{(1-k)}{k} \quad (4.33)$$

Burada;

G_s : Sıvı içindeki sıcaklık gradyanı (°C/cm)

R : Büyüme hızı (cm/sn)

M_s : Likidüsün eğimi

D_s : Sıvı içinde çözünen elementin yayınma katsayısı (cm²/sn)

C_0 : Alaşım bileşimi

k : Denge patlaşım oranı

HUCK,E. Ve arkadaşları ise ikili alaşımlarda yapısal aşırı soğuma kriteri için genel bir ifade çıkarmışlardır.

$$\frac{G_s}{R} \geq -\frac{M_s C_k^* (1-k)}{k D_s} \quad (4.34)$$

Kararlı halde büyüme ile sıvı içindeki konveksiyonun olmadığı hallerde C_k^*/k (yani C_s^*) esas sıvı banyosu bileşimi olup büyük hacimdeki bir sıvı eriyiğinden küçük miktarda bir katılaşma söz konusu olması halinde C_0 a eşittir.

4.6.2.1.2 Çok fazlı alaşımlarda

Çok fazlı alaşımlarda çözünme, tek fazlı alaşımlarda olduğu gibi yaklaşılmakta ve yapılan araştırmalarda görüldüğü gibi iki fazlı alaşımların düzlemsel ara yüzeyde büyümeleri için gerekli yapısal aşırı soğuma kriterini çıkarabilmek için bazı ön şartların olması gerekliliği vurgulanmaktadır.

- 1) Ara yüzeyde, büyüme yönü ile bu yöne dik doğrultuda karakteristik yayınma mesafesi mukayese edildiğinde pek önemli fark olmamalı
- 2) Ara yüzey önündeki sıvı bileşimi ötektik bileşime yakın veya eşit olmalı,
- 3) Kalan sıvı ile ötektik arasındaki bileşim farkı sınırlı olmalı,

Konveksiyonun olmadığı, kararlı halde büyüme için aşağıdaki eşitlik söz konusudur;

$$\frac{G_s}{R} \geq -\frac{M_s(C_o - C_e)}{D_s} \quad (4.35)$$

Burada C_o; ötektik bileşimdir. Eşitlik MOLLARD, F.R. ve FLEMINGS, M.C.' in yapmış bileşim aralığı %12 ile %25 kurlun olan, (C_o; %26.1 Pb) kalay-kurşun alaşımı üzerine, yaptıkları çalışmaların sonuçlarına dayandırılmıştır. Yeterli derecede dik ısı gradyeni (480 °C/cm) ve düşük katılma hızlarında, (10⁻³ ila 10⁻⁴ cm/s) denedikleri bütün alaşımların düzlemsel ara yüzey vererek katılaştığını, ötektikten oldukça farklı bileşimde bile eğer (G_s/R) değerleri yeterli derece yüksek ise; ötektiğe benzer veya bileşik yapılar görüldüğü, kararlılık için G_s/R'nin sadece düşük değerlerinin yeterli olduğunu, ötektiğe yakın bileşimler dışındaki yukarıdaki teoriye deneyler arasındaki uygunluğu göstermişlerdir.

RINALDI, M.D. ve arkadaşları yapısal aşırı soğuma kriterini bir, iki veya üç fazlı, üç bileşenli alaşımların katılma karakterine kadar genişletmişler ve ikili alaşımlarda olduğu gibi ön kabullerle, üçlü alaşımlarda olduğu gibi ön kabullerle, üçlü alaşımlarda da ara yüzey kararlılığı için benzer genel bir ifade çıkarmışlardır.

RINALDI, M.D. ve arkadaşlarının üzerinde çok durdukları yapısal aşırı soğuma kriterinin teori ile pratik mukayesesini, DUNN, E.M ve arkadaşları da yapmış ve bu çalışmalar sonucundan teori ile uygun sonuçlar elde etmişlerdir.

4.6.2.2 Bozulma (Pertürbasyon) Analizi

Ara yüzeyde meydana gelen bozulmanın olduğu şartları incelemişler ve özellikle ara yüzey kararlılık kriterinin sadece termodinamiği ile değil de kinetiği üzerinde de araştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda sıcaklık ve konsantrasyon değişkenlerini de vererek bozulmanın başladığı durumdan itibaren olan gelişimi açıklığa kavuşturmuşlar ve çözümünü de sinüzoidal

fourier serisi ile yapmışlardır. Yukarıda sözü geçen araştırmacılar; düzlemsel ara yüzeyde oluşan küçük bir bozulmanın büyüüp büyümeyeceğini, katı-sıvı ara yüzey enerjisine, çözünen metal atomlarının hareketine ve ara yüzey kinetiğine bağlı olduğunu aşağıdaki bağıntı ile göstermişlerdir. Bu çözümlerde katı-sıvı ara yüzeyinde bir dengenin olduğu, konveksiyonun olmadığı ve yüzey enerjisinin izotropik olduğu ön kabulü yapılmıştır.

$$\frac{G_s}{R} + \frac{S_s H}{2K_s} - \frac{M_s C_0 (1-k)}{k D_s} \cdot \frac{K_k + K_s}{2K_s} \xi \quad (4.34)$$

Burada;

S_s : Sıvının yoğunluğu (gr/cm³)

H : Ergime ısı (cal/mol)

K_k : Katının ısı iletkenliği (kcal/m.s.°C)

K_s : Sıvının ısı iletkenliği (kcal/m.s.°C)

ξ : Boyutsal kararlılık faktörü

ξ faktörü ise yine boyutsu (A) sayısı ile değişmektedir.

$$A = \frac{-k^2 \cdot \sigma \cdot R \cdot T_m}{(1-k) \cdot S_s \cdot H \cdot D_s \cdot M_s \cdot C_0} \quad (4.35)$$

Burada ise;

σ : Sıvı-katı yüzey enerjisi (ca/cm²)

T_m : Çözünen metalin ergime dercesi (°C)

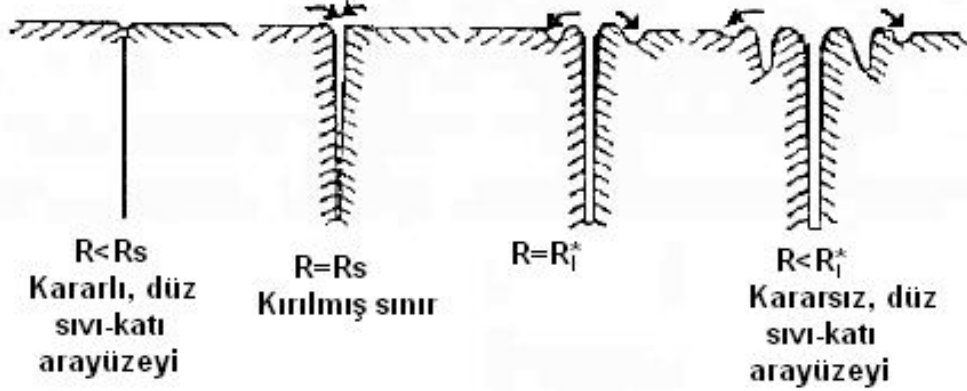
Yapısal aşırı soğuma kriterinin verildiği (4.33) numaralı eşitlik ile yukarıda belirtilen (4.34) numaralı eşitlik mukayese edildiğinde, birbirine çok yakın şekiller ortaya çıkmaktadır. Eğer G_s/R 'nin dalgalanması olan ($S_s H / 2K_s$) ihmal edilir ve ($K_k + K_s / 2K_s$) değeri de 1' e eşit alınırsa, bahsi geçen eşitliklerin birbirine benzediği görülür. Zaten düz ara yüzeyin bozulmaya başlaması için her iki kriterden de istenen şartlar birbirine yakın olmaktadır.

Dikkatli çalışarak düzlemsel ara yüzey kararlılığının şartları sağlanıp ve bu konuda bozulma analizi yapıldığı için her alaşım sisteminin tam ve doğru değişkenlerinin bulunması çok zor olmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar bu konuda bazı çelişiklere düşmektedir.

4.6.3 Hücresel tipte katılaşma

Sıvı-katı ara yüzeyi düz olarak ilerleyen bir katılaşma modelinde, düz ara yüzeyin bozulması halinde ara yüzeyde meydana gelen çıkıntılarının büyümesiyle oluşan katılaşmaya hücresel tipte katılaşma denir. Burada etkin olan sıvı içerisindeki sıcaklık gradyeni (G_s)

büyüme hızı R alaşım bileşimi C_0 'dır. Hücresel tipte katılaşma, düzlemsel ara yüzey vererek katılaşmanın aksine belli bir sıcaklık aralığında olur ve düz ara yüzeyde gren sınırları varsa bunlar yüzeyin bozulmaya başladığı yerleri temsil etmektedir.



Şekil-4.6 Katı-sıvı ara yüzeyindeki çıkıntılarının gren hudutlarından başlayışı, oklar mikro segregasyon hareketini göstermektedir. (A.Ulvi AVCI, 1993)

R : Seçilen büyüme hızı

R_s^* : Sıvı-katı ara yüzeyde oluşan olukların kırılması için gereken kritik hız

R_1^* : Düz sıvı-katı ara yüzeyin kararsızlığı için gerek kritik hız.

Düz sıvı-katı ara yüzeyinde, hücresel, yüzeye geçişte değişken yapılar gözlenir. Örneğin büyüme hızındaki R ve/veya soğuma hızındaki G_s . R artışa göre; düğüm, düzensiz uzamış hücre veya düzeydeki hegzogonal hücreler izlenebilir. Düzenli hegzogonal hücreler yüksek G_s/R değerinde belirli bir doğrultuya yönelmeksizin sıvı-katı ara yüzeyine dik olarak büyür ve bu çözünen elementin yayınmasının yarattığı bir sonuçtur. Ara yüzeye dik şekilde oluşan bu düzenli hücreler büyüme hızı R arttıkça tercihli kristallografik yöne sapar. (Büyüme hızı daha çok arttıkça dendritik katılaşma görülür). Hücresel tipte katılaşmada düzenli hücre çapları büyüme hızı arttıkça da azalmaktadır. Fakat bu azalış sürekli değildir. Büyüme hızı artışlarında hücrelerin parçalanma ve bölünme ihtimalleride artar. Eğer hücreler, büyüme esnasında bölünmediği takdirde, muhtemel iki mekanizma hücre boyutunun değişmesine sebep olur.

- 1) Hatalarda ilave hücrelerin oluşumu ve hücre büyüklüğünün yeniden düzene girmesi
- 2) Küçük hücrelerin büyümesi




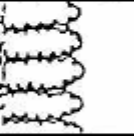


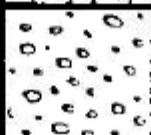
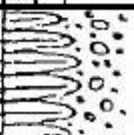
Hücresel katılaşmada, hücre oluşumu, yapısal aşırı soğumayı çok düşük bir değere indirecek biçimde kendisi düzenlenmektedir. Bu ayarlamayı yapan mekanizma hücre uçlarındaki büyüme olayıdır. Minimum yapısal aşırı soğuma değeri muhtemel katı-sıvı ara yüzeyi boyunca eğrilik yarıçapa etkisiyle ergime noktasında meydana gelecek farklılıklara aynı

derecede olmaktadır. Fakat hücrel katılaşmada hücre açılarındaki eğrilik çapının, açların sıcaklığına pek büyük bir etkisi yoktur. Dolayısıyla hücrel büyümede, bu durum ve çok boyutlu sıvı yayılması göz önünde bulundurulması gereken kavramlardır.

4.6.4 Hücre - Dendrit geçişi

CHARMES, B. ve arkadaşları ilk defa dendritik ara yüzey yapısının, daha büyük yapısal aşırı soğuma değerlerinde ve hücrel yapının gelişimi ile meydana geldiğini belirtmişlerdir. MORRIS, L.R. ve arkadaşları bunu doğrulamak için kantitatif deneyler yapmış ve hücre-dendrit geçişinin her bileşimi için belirli bir G_s/R oranında gerçekleştiğini bulmuşlardır. Büyüme hızı ve buna bağlı olarak yapısal aşırı soğumanın artışı ile ara yüzey şeklinin değişimi şekil 4.7’de şematik olarak görülmektedir.

Düşük büyüme hızlarında oluşan muntazam hücreler kristallografik yönelme göstermeksizin katı-sıvı ara yüzeyine dik bir biçimde büyürler. Büyüme hızı artarsa dolayısıyla soğuma hızı azalacaktır. Bundan sonra artık tercihli yönde büyüme ağır basar ve hücrelerin enine kesitleri genellikle kristallografik etkiye bağlı olarak yuvarlak şekli bozular. Flanj halini alır. Büyüme hızı daha da artarsa şekil 4.7’deki haç şeklindeki serbest dendritler görülür. Haç kollarındaki çentikler ise dendrit ikinci kollarıdır. Bununla beraber iki fazlı sistemlerde C_0 , G_s ve R değerleri arasında tam bir uyum olmadığı araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. TILLER, W.A ve RUTTER, J.W. yaptıkları detaylı bir çalışmada, hücre dendrit geçişi için $G_s/R\alpha C_0$ gibi bir kriter geliştirmişlerdir.

	Büyüme Yönüne Dik	Büyüme Yönünde	
		Katı	Sıvı
Düz Arayüz			
Hücreler			
Hüresel Dendritler			
Serbest Dendritler			
Serbest Eşeksenli Densdritler			

Şekil-4.7 Büyüme hızına bağlı olarak ara yüzey morfolojisinin değişimi (A.Ulvi AVCI, 1993)

CHAMERS, B. Hücre-dendrit geçişi için hücre boyutu ile orantılı olan bir mesafedeki yapısal aşırı soğumaya ihtiyaç olduğunu belirtmiş ve bu değeride aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplamıştır;

$$1 - \exp\left(\frac{-Rt}{D_s}\right) = \frac{G_s \cdot k \cdot t}{M_s C_0 (1 - k)} \quad (4.36)$$

Burada; “t” aşırı soğuma gösteren bölgenin uzunluğudur ve hücre boyutu “ $R^{\frac{1}{2}}$ ” ile orantılıdır.

Özet olarak ara yüzeyin düz durumdan hüresel nihayet dendritik şekle geçişin sabit bileşende azalan G_s/R oranı ile sabit G_s/R değerinde ise artan bileşimle meydana geldiğini saptamıştır. Teorik olarak da yapısal aşırı soğuma kriterinden aynı sonuç elde edilir.

4.6.5 Dendritik katılaşma

Alaşımın yapısı, sonlu bir hızda katılaştırılmaları halinde ve yapısal aşırı soğuma önlenmediği müddetçe, genellikle sıcaklık gradyenin artırılması ile önlenir ve dendritiktir. Gerçekte, yapısal aşırı soğumanın normal bir katılaşmada önlenmesi pratik olmadığından hemen hemen bütün alaşımlar bu yapıda oluşur. Bu nedenle de dendritik büyüme

karakteristiklerini anlamak amacıyla, kontrollü şartlar altında çok çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Eğer genel bir tarif yapılacak olunursa, dendritler sabit bileşim eğrileridir denilebilir ve her dendritin yaklaşık ısı akışı yönünde büyüyen parçasına, dendrit birinci kolu, buna dik olarak büyüyen parçasına dendrit ikinci kolu denir. Bu kollara ilaveten daha yüksek düzeyden üçüncü ve dördüncü derece kollarda meydana gelmektedir. Dendritik elemanları dendritin birer parçası olup komşularından ince fakat çözününce zengin bir bölgeye ayrılır. İki komşu dendrit elemanın arasında birbirine yönlenmelerinde ufak farklılıklar olabilir.

FLEMINGS, M.C. ve arkadaşları yaptıkları deneylerde AL-Cu alaşımında önce dendritik birinci kolların daha sonra dendritik ikinci kolların meydana geldiği, daha sonra da nispeten düşük katı oranlarında bu kollar arasındaki bölgelerin birinci dereceden dendrit levhalarını meydana getirmek üzere olduğunu görmüşlerdir. Dendritik birinci kolları esas ısı akışı yönünde olup birinci dereceden levhanın kesiştiği yerden geçmektedir. Bu levhalar yatayla 45° lik bir açı yapmaktadır, çözününce fakir ve uniform bileşiminde değildir. Benzer olarak ikinci ve üçüncü dereceden kollar arasındaki bölgeler dolarak ikinci dereceden dendrit levhalarını meydana getirmektedir. Mangan ve nikel içeren az alaşımlı çelik ile yapılan yek yönlü kontrollü katılaşmada sabit bileşim eğrilerinden yararlanılarak, yine katılaşmanın ilk kademelerinde, dendritlerin çubuk şeklinde olduğu ve katılaşma ilerledikçe yavaş yavaş levhasal hale geçtiği görülmüştür. Eş eksenli dendritler için de aynı şey saptanmış fakat aralarındaki tek fark kontrollü katılaşmada dendritlerin ısı akışı yönünde uzamış olmalarıdır.

FLEMINGS, M.C. kontrollü katılaşmada alaşımların levha şeklinde yapı gösterme derecelerinin alaşım bileşimine bağlı olduğunu ifade etmektedir. FLEMINGS, M.C.' ye göre AL %4.5 Cu alaşımında olduğu gibi yapılarında önemli miktarda ötektik ihtiva etmeyen alaşımlar genellikle levhasal bir yapı gösterirken nispeten büyük oranda ötektik ihtiva eden alaşımlar ise tam meydana gelmiş levhalardan çok az içermektedir.

ROHATGI, P.K. ve ADAMS, C.M. ise Al-Cu alaşımlarında dendrit morfolojisinin büyüme hızıyla değiştiğini gözlemlemişlerdir. Primer faz olan dendritlerin düşük katılaşma hızlarında birbirlerine paralel ve uniform olarak yerleşmiş levhalar, yüksek büyüme hızlarında ise çubuk şeklinde olduğunu izlemişlerdir.

Dendrit büyüme modelinin geliştirilmesi amacıyla, katı-sıvı ara yüzeyinin büyüme hızı ve sıvı içindeki sıcaklık gradyanının bir fonksiyonu olarak dendrit uçlarının bileşimini, sıcaklığını ve şeklini kantitatif olarak açıklayabilen çeşitli çalışmalar yapılmıştır. BOWER, T.F. ve

arkadaşları kontrollü şartlar altında büyüyen dendrit ara yüzey modelini geliştirip, dendrit uçlarındaki aşırı soğumayı da aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir.

$$\Delta T = \frac{G_s D_s}{R} \quad (4.37)$$

G_s: Sıvıdaki sıcaklık gradyeni (°C/cm²)

D_s: Çözünen elementin sıvıdaki yayınma katsayısı (cm²/sn)

R : Büyüme hızı (cm/sn)

Yukarıdaki bağıntı, sadece yüksek sıcaklık gradyanları ve düşük büyüme hızı için geçerlidir. Bunun yanı sıra dendritik uçlarının eğriliğinin değişimi dikkate alınmamaktadır. BOWER, T.F.'in geliştirdiği modelde, dendrit uçları yakından yanlara doğru yayınma ihmal edilmekte, gerçekte sıcaklık gradyeni arttıkça dendrit uçlarından kenara doğru gittikçe artan oranda çözünen element akışı olmaktadır.

Üç boyutlu çözünen element yayınması problemi daha sonraları BURDAN, M.H. ve HUNT, J.D. tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar dendrit ucu sıcaklığını, G_s ve R 'nin fonksiyonu olarak belirtmişler ve belli bir sıcaklık gradyanında G_s büyüme hızı arttıkça R uçlarındaki aşırı soğumanın minimum olacağını söylemişlerdir.

JIN, I ve PURDY, G.R. ise parabolik dendrit uçlarına sıcaklık gradyeninin etkisini ayrıntılarıyla incelemişler ve sıvının bütünündeki sıcaklık gradyeninin sabit olduğu varsayımından hareketle çalışmalarını sürdürmüşlerdir.

Dendrit uçlarının büyüme şeklinin belirlenmesinde göz önünde tutulması gereken başlıca faktörler, büyüme hızı R ara yüzeyden uzaklaştıkça mevcut sıcaklık gradyeni G_s veya G_k, ortalama alaşım bileşimi C_∞ olarak sıralanabilir. Dendrit büyüme teorisinin incelenmesinde çözünen elementin denge paylaşım oranı k ve alaşımın katılma aralığı ΔT₀ iki önemli parametredir.

4.7 Büyüme

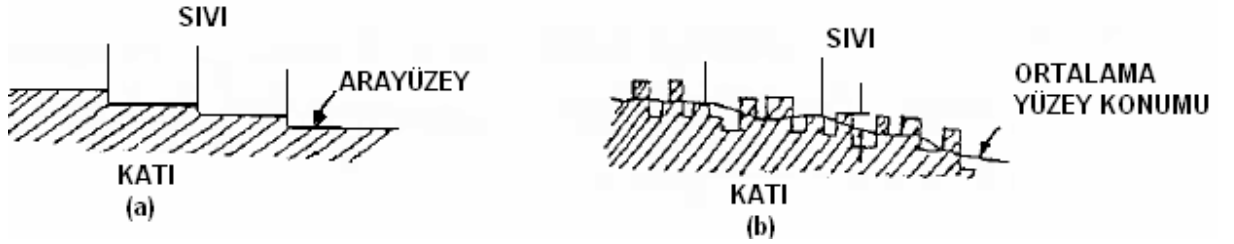
Atomların ilerleyen katı ara yüzeyine bağlanabilme kolaylığı ara yüzey yapısına bağlıdır. İki tür ara yüzey vardır.

- a) Yayınmış ara yüzey,
- b) Atomsal olan düz ara yüzey

Birincisinde sıvıdan katıya geçiş birkaç sayıda atomsal tabakanın meydana getirdiği yayınma ara yüzeyi boyunca olur. Yayınma ara yüzeyi içinde atomların düzeni, tamamen kristal olan

tarafa yaklaştıkça, esas itibariyle bütün atomlar uygun kafes mevkilerinde oluncaya ve ergime ısısı tamamen kaldırılıncaya dek azar azar artar. Aşağıdaki şekilde kesik çizgi şematik olarak katı ve kısmen de sıvı bölgeye ait olan atomlar arasındaki sınırı göstermektedir. Şekil 4.8'de şematik gösterimi verilmiştir.

Atomal olarak düz, sıkı düzenli ara yüzeyde sıvıdan katıya geçiş tek bir atomal tabakada meydana gelir. Yayınma ara yüzeyleri atomal mertebede daha büyük olur. İdeal yayınmalı ara yüzeyde, kafes konumlarının çoğu yerleşmeye elverişlidir. Bu nedenle atomlar ara yüzeye çarpınca ara yüzey hemen hemen uniform olarak hareket eder ve bu durumda büyüme sürekli olur. Diğer taraftan, eğer ara yüzey atomal olarak düzse, şekil 4.8-a'da şematik olarak gösterildiği gibi, ileri doğru büyüme tercihen ara yüzeyi karşıdan karşıya yandan süpüren basamaklarda olur. Bu durumda katılaşma yandan büyüme ile ilerler. İdeal yayınmalı ara yüzey Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Burada sıvı-katı geçişi birkaç tabaka üzerinde olur. Fakat büyüme yayınma basamaklarından daha çok yana doğru yayılmayla meydana gelir.



Şekil-4.8 a) Atomal olarak bir ara yüzeyde b) yayınmış ara yüzeyde basamaklar
Büyüme bu basamakların yana doğru hareketi ile gerçekleşir. (Erol ALGÜL, 1992)

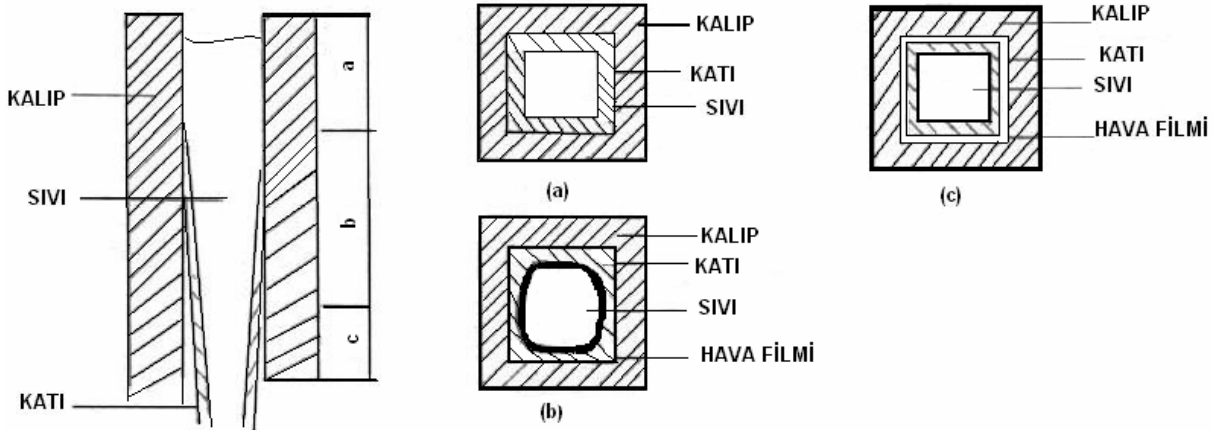
Genellikle sıvı-katı geçişi birkaç sıra atom tabakası üzerinden olur. Yani sıvı-katı geçişi daima yayınmış olur. Bu yayınmış ara yüzeyi ergime noktası altında düzlemler arası mesafe kadar ilerletmek için ara yüzeyin yüksek bir yüzey enerjisi düzeyinden geçmesi gerekebilir. Eğer böyle bir durum gerekli değil ise sürekli büyüme, gerekli ise büyüme basamaklarının yana doğru ilerlemesiyle olur. Büyüme ayrıca çeşitli şartlarda iki boyutlu çekirdeklenmeyle, vida dislokasyonları yardımıyla veya ikiz düzlemlerinin yayılmasıyla gerçekleşebilir.

4.8. Sürekli Dökümden Katılaşma Mekanizması

Kalıp içine giren sıvı çeliğin katılaşması şekil 4,9'da şematik olarak görülmektedir. Sıvı çelik önce kalıp cidarlarının iç yüzeyinde çepeçevre katılaşarak ince katı bir kabuk oluşturmaktadır. (Şekil 4.9-a) Daha sonra katılaşma daha da artarak, katılaşan çelik kalıpta büzülme-çekme olayı yapacağından katı kalıpla cidarı arasında bir hava filmi oluşmaktadır. Şekil 4.9-b de

sonuçta katılaşılan katı kabukla kalıp cidarı arasında temas noktası kalmayıp yarı mamulün kalıbı terk ettiği görülmektedir.

Katılaşma olayının ilk kademesinde, katılaşılan kabuk çok ince, sıcaklık da oldukça yüksek olduğundan iç kısım ferrostatik basınç etkisi nedeniyle kolaylıkla kalıp cidarları her noktada temas etmektedir. Zamana bağlı olarak katılaşmanın ilerlemesi sonucu dıştaki kabuğun kalınlığı artmakta, sıcaklık düşmektedir. Artık katılaşılan kabukta çekme büzülme başlamaktadır.

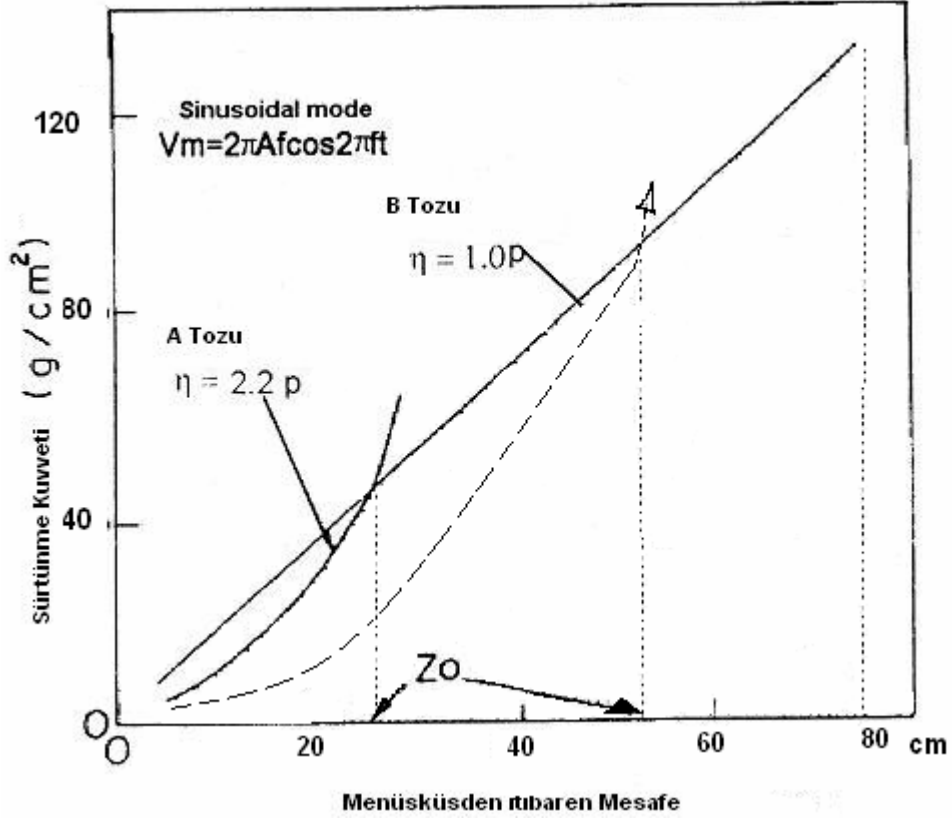


Şekil-4.9 Katılaşılan çeliğin şekli (Thomas, B.G, 2005)

Sürekli dökümde ilk katılaşma, kalıp sıvı metal temas noktasındaki menüsküs kıvrımının kısmi olarak donması ile meydana gelmektedir. Bu katılaşmaya başlayan sıvı metalin dışında oluşan ince başlangıç kabuğunun yapışmasının ve yırtılmasının önlenmesinden kalıp sorumludur. Kabuğun yapışması, yırtılmasının azaltılması için, bu katılaşmaya başlayan sıvı metal ile kalıp cidarları arasındaki sürtünmenin, kalıp dayanımına bağlı olarak kritik bir seviyenin her zaman altında kalması gerekmektedir. Sürtünmenin azaltılması ve kabuk oluşumunun sürekliliği kalıp dalgalanması ve yağlanması ile sağlanmaktadır.

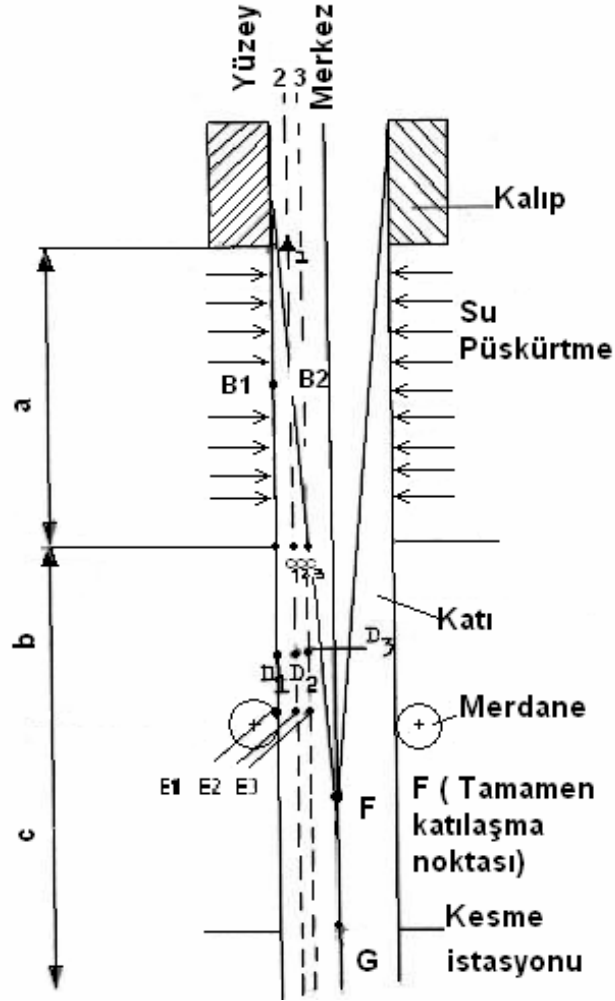
Kalıpta yağlama, yağın kalıp cidarı ile döküm malzemesi arasındaki kalıp boşluğu içine sızmasıyla meydana gelmektedir. Cürufun katman olarak oluşması Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Kalıp içerisindeki sürtünme iki mekanizma ile oluştuğu düşünülmektedir. Katılaşmış kabuğa göre, kalıbın bağıl hareketi cüruf tabakasının viskozitesi yüzünden sürtünme kuvvetlerini arttırmaktadır. Bu mekanizma ile oluşan sürtünme kuvveti, sıvı sürtünmesi olarak anılmaktadır. ve f_1 ;

$$f_1 = \eta(V_m - V_c) / d_1 \quad (4.38)$$

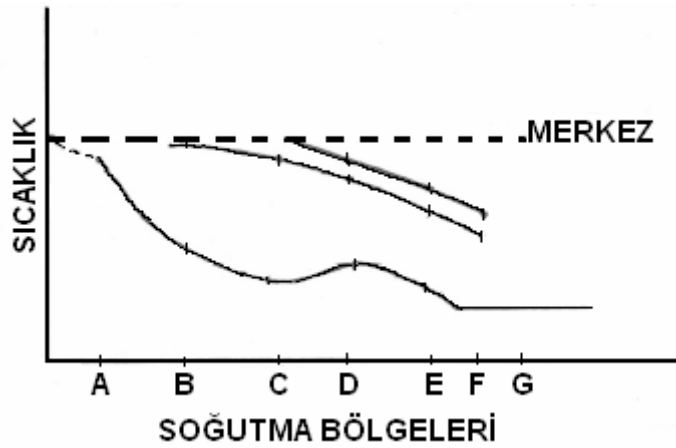


Şekil-4.11 Sıvı ve katı sürtünme bölgeleri (S. Mazumdar, 2001)

Kalıbı terk eden malzemenin soğuma şekli aşağıdaki şekil 4.11’de şematik olarak gösterilmektedir. Yarımamül kalıptan çıktıktan sonra su püskürtülerek (İkincil soğutma bölgesi) ve havayla soğutulmaktadır. Bu bölgedeki aşırı hızlı soğuma nedeniyle ısıl gerilmeler ve çekici rölelerin mekanik basınçları söz konusudur. Transformasyon gerilmeleri yarımamül yaklaşık $800\text{ }^\circ\text{C}$ ’un üzerinde bulunacağından dikkate alınmamaktadır.

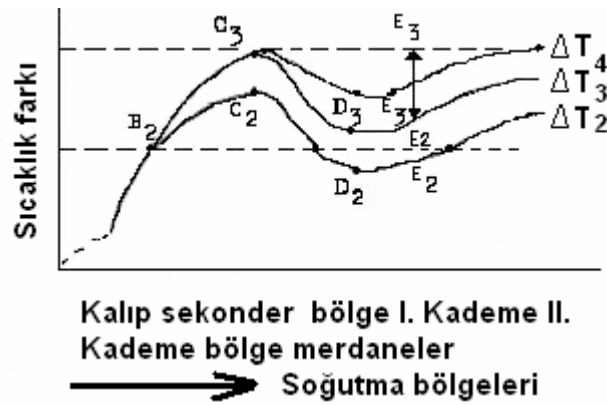


Şekil-4.12 Birincil soğutma bölgesi altındaki ikincil soğutma bölgesi ile hava soğutmalı bölgelerde yarımamülün katılaşma şekli (Thomas, B.G, 2005)



Şekil-4.13 Soğutma bölge kademelerinde, yarımamül sıcaklık değişimleri (Thomas, B.G, 2005)

Yarımamülün yüzeyi A1-E1 noktalarından geçerken A1-C1 eğrisi boyunca şiddetli su püskürtme nedeniyle sıcaklığın düştüğü, C1-D1'e eğrisi boyunca hava soğutması bölgesinde sıcaklığın yükseldiği ve D1-E1 eğrisi boyunca da havada yavaş soğumayla sıcaklığın düştüğü görülmektedir. İki numaralı hat boyunca iç kısımlardaki sıcaklık değişimlerine göre ise B2 noktasında katılaşmanın tamamlandığı, C2-D2 eğrisi boyunca soğumanın yavaş olduğu görülmektedir. Üç numaralı hat boyuncada aynı durum tekrarlanmakta ve eksenel merkez, f noktasında katılaşmakta ve böylelikle katılaşma tamamlanarak yavaş soğumaya geçilmektedir.



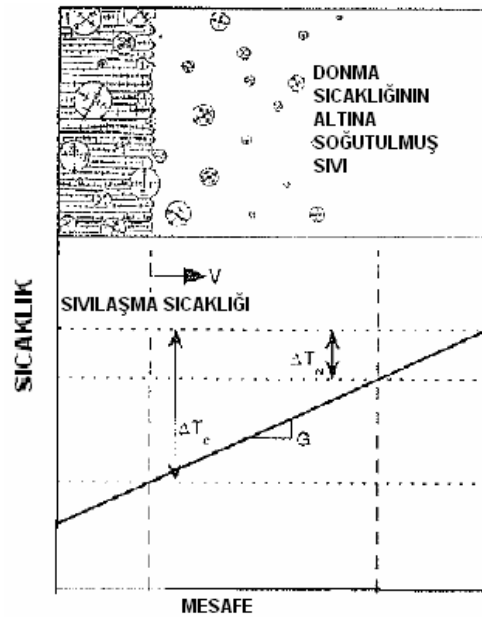
Şekil-4.14 Yarımamülün yüzeyi ile iç kısımları arasındaki sıcaklık farkı (Thomas, B.G, 2005)

Yarımamülün yüzeyi ile iç kısımları arasındaki sıcaklık farkları Şekil 4.14'de görülmektedir. Yarımamül yüzeyi ile iç kısımları arasındaki sıcaklık farkı (2 numaralı hat boyunca) ΔT_2 ile, aynı şekilde üç numaralı hat ve merkez hattı ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı ΔT_3 ve ΔT_4 ile gösterilmektedir. ΔT_2 eğrisi B₂ noktasında katılaşma bölgesini geçmekte, yüzeye paralel yönde, yüzeyde çekme, iç kısımlarda ise basma gerilmeleri doğmaktadır. Kesikli çizgilerin alt kısmında ise gene yüzeye paralel, fakat yüzeyde basma, iç kısımdaysa çekme gerilmeleri doğmaktadır. Çekici rollerin bulunduğu E bölgesinde ise geçen malzemedeki sıcaklık farkları E₂-E₂' olup bu bölgede çekme gerilmeleri doğmaktadır. Yüzeyle iç kısımlar arasındaki en yüksek sıcaklık farklılığı ikincil soğutma bölgesinin hemen altındaki C noktasında görülmektedir. Bu nedenle üç numaralı hat ile yüzey arasındaki sıcaklık farkını gösteren ΔT_3 , C₃ noktasından geçtikten sonra kesikli çizgiyi aşmayıp daha aşağıdan geçmektedir. Yarımamülün iç kısmında oluşan çekme gerilmeleri şiddetli soğutma halinde daha yüksek olmaktadır.

4.9 Sürekli Dökümde Katılaşmada Tane Büyüklüğü Kontrolü

Metal malzemelerin mikro yapısındaki tanelerin büyüklüğü ve şekilleri malzemelerin dayanımları ve performansları hakkında bilgi vermektedir. Örneğin ince taneler genellikle oda sıcaklığında kullanılması daha uygundur. Çünkü bu sıcaklıklarda ekstra bir alaşımlama yapmadan yüksek sertlik ve dayanıma ulaşırlar. Diğer yandan bir yöne doğru katılaşma örneğin sütunlar halinde ana gerilim eksenine paralel yönelmede yüksek sıcaklıklarda türbin bıçaklarında ihtiyaç olan sünme direncini artırır. Tungsten fiberlerin kullanıldığı lambalarda da tane yapılarının büyüklüğü ve tasarımı, ürünün kullanım ömrünü etkilemektedir.

Yukarıda verdiğim örneklerde görüldüğü gibi, katılaşma ve yeniden kristalleşme sırasındaki tane büyüklüklerinin kontrolü önemlidir. Döküm yapılarında genellikle sütunsal ve eşit uzunlukta eksenleri olan yapılar oluşur. Türbin bıçaklarındaki gibi sütunsal yönelme her zaman tercih edilmez, genellikle eşit uzunluklu eksenli yönelmeler istenir. Alüminyumun DC sürekli dökümünde sütunsal yönelme orta eksen çatlaklarına ve makrosegregasyonlara neden olur. Küçük ve eşit eksenli yönelmeler sağlandığı takdirde döküm hızları artırılabilir. Bunun yanında daha birçok avantajı vardır, örneğin ingotlarda yükselmiş yüzey kalitesi gibi. Form dökümde düzgün tane dağılımı yine kalıp dolma kabiliyetini artırır. Tane inceliğinde de belirli bir optimum değer döküm kabiliyetini etkiler. Sütunsal yönelmeden eşit boylu yönelme haline geçiş yapılan çalışmalarda geniş olarak incelenmiştir. Eşit uzunlukta yönelmiş tane büyüklüklerinin oluşması ergimiş bölgedeki ana büyüme yüzeyine doğru etkili çekirdeklenme sayesinde olur.



Şekil-4.15 Soldan sağ tarafa doğru yönlü katılaşma (S. Mazumdar, 2001)

Hunt ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışma, hangi şartlarda eşit büyüklükte tane oluştuğunu sıcaklık gradyanının değişmesine göre şu yöntem ile formülize etmiştir;

$$G < 0.617 N_0^{1/3} \left\{ 1 - \frac{(\Delta T_N)^3}{(\Delta T_C)^3} \right\} \Delta T_C \quad (4.40)$$

Bu ifadede;

N_0 : Birim hacimdeki çekirdek miktarı

ΔT_N : Parçacıkların üzerindeki heterojen çekirdeklenme sıcaklığı

ΔT_C : Ön sütun tarafın büyümesi için gerekli olan soğuma sıcaklığıdır.

$$\Delta T_C = 2 \left\{ \frac{2m(k-1)C_0 V \sigma_{sl}}{D \Delta S_V} \right\}^{1/2} \quad (4.41)$$

M : Alaşımın sıvılaştırma eğilimi

K : Çözünmüş madde katsayısı

C_0 : Alaşımlama elementlerinin içeriği

σ_{sl} : Sıvı katı ara yüzey enerjisi

D : Sıvı içinde çözünmüş malzeme geçirgenliği

S_V : Birim hacim başına ergime entropisi

Sütunsal boyutlu tanelerden eşit uzunluklu tanelere geçiş (SEG), tane büyüklüğünü tayin etmede geniş olarak araştırılmaktadır. Hunt'un araştırmaları yeni dendrit büyüme modellerinde içermek üzere genişletilmiştir. Bu da (4.41)'deki eşitlikteki sabiti etkilemektedir. SEG ayrıca tesadüfî değişkenlerinde kullanıldığı, geçişin kademeli olduğunu gösteren, mikro yapısal modellemeler ile de araştırılmıştır.

Bir tane yapısının sütunsal veya eşit uzunlukta olması önemlidir. Bu yüzden süreçlerden SEG'in iyi anlaşılmasının yardımı ile istenilen yapıya ulaşmak için sistemler üzerinde optimizasyona gidilir. Bu bölümde istenilen rejimde tane yapısı oluşturmanın kontrolüne değinilmiştir. Bununla beraber, (4.40) ve (4.41) bağıntılarında tanımlandığı gibi SEG içerisindeki ana unsurları da dikkate almamız gerekmektedir. Şekil 4.15.'de de görüldüğü üzere yeni tanelerin oluşumu sadece ana ön bölgenin devamlı olarak katılma sıcaklığının altına kadar soğutulması ile olmaktadır. Sıcaklık gradyanının düşmesi ile bu bölge büyümektedir ve eş uzunluklu taneciklerin büyümesine yardımcı olmaktadır.. Katılma hızını arttırmak, ana taraftaki soğumayı hızlandırır ve ayrıca aşırı soğumuş bölgeyi genişleterek, eş uzunluktaki tanelerin oluşmasını kolaylaştırır. Bu faktörler, katılma hızı, sıcaklık değişimi, alaşım parametreleri sıvılaştırma eğilimi, çözelti katsayısı ve alaşımlama

elementleri, bölgenin yoğunluğu, kritik alt soğuma da tane büyüklüklerinin eş olmasında önemli rol oynamaktadır. Çekirdekleşmeden istenen görüldüğü gibi aynı boyutta tanelerin oluşmasıdır.

4.9.1 Çekirdeklenme analizinin zorlukları

Katılaşmada büyümenin kinetiğini inceleyen çok iyi bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışma yarı katı haldeki metalik mikro yapıların tahmini olarak modellerin oluşmasına vesile olmuştur. Sonuçlar rahatça mikroyapı ayırım haritasında görülebilmektedir. Bir ekseninde alaşım elementleri bulunan, diğer ekseninde ise proses değişkenleri bulunan bir haritada, üzerindeki bölgeler deneyler ile karar verilen değişik mikro yapılar göstermektedir ve tahmini modeller ile karşılaştırılmaktadır. Bu yaklaşım birçok yüzey iyileştirme yönteminde kullanılmaktadır. Çekirdeklenme, herhangi bir ana mikro yapıda (dendritik, ötektik gibi) çekirdeklenme sınırı oluşmadan büyümenin meydana geldiği ergimemiş substrat yüzünden çok önemli bir rol oynayamamaktadır.

Ayrıca çekirdeklenmenin ana rolü oynadığı birçok faz ve mikro yapı da bulunmaktadır. Zerre katılaşmada (atomizasyon gibi), sıvı zerreler katılaşmaya belirli bir alt soğumada ilk çekirdeklenme ile başlarlar. Bu alt soğuma mikroyapıyı sınırlar ve zerreden zerreye değişir. Çoğu süreçte, ikinci safhanın ayırımında rekabetçi çekirdeklenme görülebilir. Ne yazık ki, miktarsal olarak büyümenin kinetiğinin modellenmesi çekirdeklenmenin kinetiğinin modellenmesi ile benzer değildir.

Klasik çekirdeklenme teorisini tekrar ele alırsak. Raslantı olarak moleküllerin başlangıçta oluşmuş yarı kritik embiriyolar eklenmesi ile kritik çekirdek ortaya çıkmaktadır. En basit klasik teori makroskobik termodinamik kullanarak çekirdeğin oluşmasını tariflemektedir. Bununla beraber klasik teori tarafından önerilen temel kinetik analizin doğru olduğu gözükmemektedir. Birçok yeni teori, örnek olarak yoğunluk-işlevsellik teorisi veya difüzyon arayüzey teorisi, klasik teorisinin genişletilmiş halleri olarak kabul edilebilir ve bunun yanında şuanki konunun temelini oluşturmaktadır.

Sıvı içerisindeki kristal faz katılaşmasının, aynı kimyasal bileşim içerisindeki bir sıvı içinde katılaşması vakasını inceleyecek olursak. İçerisinde hiç bir heterojenite olmayan termodinamik dalgalanmaları göz ardı edilmiş bir sistem içerisindeki homojen çekirdeklenmeyi ilk olarak inceleriz. Standart analiz homojen çekirdeklenme sıklığı I_{homo} (saniyede belirli bir hacim içerisinde oluşmuş kritik çekirdek sayısı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir;

$$I_{\text{hom}o} = (m^{-3} \cdot s^{-1}) = \frac{A}{\eta} \cdot \exp\left(-\frac{W_{\text{hom}o}^*}{k_B T}\right) \quad (4.42)$$

η : Sıvının ergime noktasındaki viskozitesi

A: Düzeltme sabiti (sıvı metal ve alaşımlar için $\sim 10^{35}$ Pa m-3,

$W_{\text{hom}o}$: Kritik çekirdeğin oluşma işi,

k_B : Boltzman sabiti,

T : Sıcaklık,

Küresel çekirdeğin oluşması için gerekli iş;

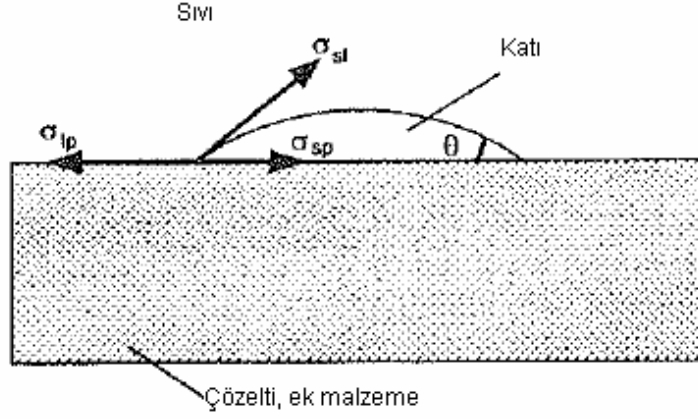
$$W_{\text{hom}o}^* = \frac{16\pi\sigma_{sl}^3}{3\Delta G_V^2} \quad (4.43)$$

σ_{sl} : Katı sıvı interfasiyel enerji

ΔG_V : Birim hacim başına katılaşmada değişen serbest enerji

Katılaşma frekansını tahmin edebilmek için gerekli anahtar parametreler, sıvının viskozitesidir. Sıvının viskozitesi ve katılaşmadaki serbest enerji değişimi bağımsız deneylerde yapılan ölçümlerde mantıklı doğru sonuçlar vermektedir. Katılaşmadaki serbest enerji değişimi, alt soğuma yakınlarında doğrusala yakın olarak artmaktadır. Ana sorun katı sıvı interfasiyaldeki enerjinin direk olarak tespit edilememesinden oluşmaktadır. Katı sıvı ayırımının modellenmesinden tahmin edilebilir. Ayrıca deneyler ile tespit edilebilirler.

Homojen çekirdeklenme, katalitik substrat olmaksızın meydana gelmelidir. İlk homojen çekirdeklenmenin çok olması için yeterli derecede alt soğumanın sağlanması gerekmektedir. Tipik olarak mutlak ergime sıcaklığının %20 kadar altında olmalıdır. Tipik metal işleme proseslerindeki alt soğuma derecelerinden daha yüksek olmalıdır. İşte bu şartlara uyulmadığı için, sanayide heterojen çekirdeklenme görülür. Klasik teoriye göre; heterojen çekirdeklenme Şekil 4.16'da görüldüğü gibi gerçekleşmektedir. Kritik çekirdeğe tekabül eden sıvı katı arayüzey eğrisinin yarıçapı, homojen çekirdeklenmedekiyle tamamiyle aynıdır. Ayrıca çekirdek küresel bir kübe şeklindedir, hacmi ise homojen çekirdeklenme için uygun olan tam küreden daha küçüktür. Bu yüzden oluşma işi daha düşüktür.



Şekil-4.16 Heterojen Çekirdeklenmenin klasik şematik gösterimi (S. Mazumdar, 2001)

Çekirdeklenen substrat yüzeyindeki gerilimler, küresel kubbeyi dengeleyerek istikrarlı halde kalmasını sağlarlar. Yüzey gerilimleri, sırası ile sıvı-katı; σ_{sl} sıvı-parçacık; σ_{lp} katı parçacık σ_{sp} arayüzeyleri enerjilerine eşit olarak alınabilir. Temas açısı θ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\sigma_{lp} = \sigma_{lp} + \sigma_{sl} \cdot \cos \theta \quad (4.44)$$

Kritik heterojen çekirdeğin oluşum işi, şu şekilde hesaplanır;

$$W_{hetero}^* = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} W_{homo}^* \quad (4.45)$$

Temas açısı 180° ulaştığında, Whetero; kiritik heterojen çekirdek oluşum işi homojen çekirdek oluşumu işine eşit olur. Bu durum temas açısının daha küçük değerleri için, oluşma işi daha küçüktür. Eğer temas açısı sıfır dereceye ulaşır ise, çekirdek sınırında sıfıra ulaşır. Yeni oluşmuş katı ve çekirdek parçacığının aynı fazda olduğu özel durumlarda, katı parçacık arayüzey enerjisi sıfır olur ve çekirdeklenme gerçekleşmez ve büyüme sadece kristallenme şeklinde olur. Heterojen çekirdeklenme sıklığı sadece homojen çekirdeklenme için önemli olan faktörlere bağlı değildir, bunun yanında sıvı ile temasta olan çekirdek substratının toplam yüzeyine ve temas açısına da bağlıdır. Başlangıç çekirdeklenme sıklığı şu şekilde hesaplanabilir,

$$I_{hetero} (m^{-2}s^{-1}) = \frac{B}{\eta} \exp\left(\frac{W_{hetero}^*}{k_B T}\right) \quad (4.46)$$

B; Metaller ve alaşımlar için sabit $\approx 10^{25} Pa.m^{-2}$ (Birim çekirdek yüzey alanının temasta olan toplam atom sayısına oranıdır). Çekirdeklenme meydana geldiği zaman, hala sıvı ile temasta olan aktif substrat yüzeyi azalmakta ve heterojen çekirdeklenme sıklığı buna bağlı olarak azalmaktadır. Sonuç olarak sifıra ulaşmaktadır. Pratikte, çekirdeklenme substratı parçacık olarak ergimiş malzeme havuzuna dağılmaktadır. Parçacığın boyutu, üzerinde çekirdeklenme olayının gerçekleşme olasılığını gösterir. Birçok durumda, çekirdeklenme olayını hızlı büyüme takip eder ve böylelikle her parçacık sadece bir çekirdeklenme olayına yardımcı olur. Çekirdek parçacığı sayısı ne kadar çok olursa, çekirdeklenme miktarı o kadar artar. Bölgesel doygunluk, bütün parçacıklar ile çekirdeklenme olayının gerçekleştiğini ifade eder. Bundan sonraki aşamalar sadece büyüme şeklinde gerçekleşir, daha fazla çekirdeklenme meydana gelmez.

Heterojen çekirdeklenmenin kantitatif modellenmesindeki problemler birbirlerinin kopyalanmış halleridir. Birçok pratik çalışmalarda, çekirdek parçaları tanımlanamamıştır ve genellikle ergimiş yüzeyden gelen oksit veya potanın kırılmış bir parçası gibi istem dışı eklenmiş bir ilave olabilir. Eğer ilgili tanecik tanımlanmış ama temas açısı bilinmiyor ise, Çekirdeklenecek taneciğin etkisi (heterojen çekirdeklenme olması için gerekli olan seviyeye ulaşmak için) temas açısına bağlıdır. Tahmini yüzey enerjilerindeki belirsizlik, yukarıda anlatıldığı gibi, temas açısını hesaplamak için eşitlik (4.46)'ın kullanılmasına genellikle engel olur ve direk ölçüm çok zor hale gelir. Az da olsa, heterojen çekirdeklenme sıklığının kantitatif olarak tahmin edilebilmesi için temas açısı yeterli kabul edilebilir bir doğruluk ile bilinmesi gerekmektedir. Taneciğin şiddeti sadece temas açısı ile ilgili değildir, yüzey topografisi de genellikle etkiye tesir etmektedir.

Ek problemler ise şöyle ifade edilebilir; çekirdeklenmeye başlayan taneciklerin âdeti ve sayısını bilmek çok zordur; ayrıca taneciklerin büyüklük ve güçlerinin dağılımıda önemlidir. Çoğu çalışmada genellikle birçok değilik yapıdaki tanecik bir arada bulunur.

Ayrıca daha birçok sorun vardır. Ergiyin içindeki çekirdeklenmeye daha çok ilgi gösteren heterojeniteler, her zaman daha yüksek güce sahip olanlardır. Heterojen çekirdeklenme kinetiğinin kantitatif olarak incelenmesi de katı matrisin içinde dağılan sıvı zerreciklerin katılaşmasını inceleyen zerre deneylerinde ele anılmıştır. CANTOR tarafından teknik ve kullanımı gözden geçirilmiştir. Örnekler hızlı katılaşma ile elde edilebilir. Sıvı zerreciklerin dağılımını sağlamak için solidus ve liquidus arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılırlar. Bu da tipik olarak 20nm lik bir çapta birim hacimde 10^{15} adet zerrecik nüfusuna denk gelir. Güzel bir

dağılım zerre katılaşmasını çekirdeklenmeye karşı çok hassas bir noktaya getirir. Malesef zerre büyüklüğünün dağılımı genellikle dar bir alanda gerçekleşir ve çekirdeklenme kinetiğinin kalorimetrik analizine yardımcı olur. Bazı sistemlerde, alüminyum matris içerisinde kalay zerrelere katılaşmasında, yüksek altsoğuma ($>50K$) heterojen çekirdeklenme olması için gereklidir. Klasik teoriye göre, temas açısı büyüktür, $>40^\circ$. Bu sistemlerde, küresel kubbe modeli, ölçülmüş çekirdeklenme kinetiğine uymaktadır. Diğer yandan, alüminyum matrisin içerisinde katılaşan kurşun gibi vakalar da bulunmaktadır. Bunlarda heterojen çekirdeklenmede altsoğumanın başlangıcı oldukça küçüktür ($<1K$). Bu durumlarda temas açısının ve çekirdeklenme bölgelerinin sayısının klasik yöntemde ve çekirdeklenme kinetiği yöntemindeki sonuçların uyumlu olmasına uğraşılır. Bu da gösterir ki düşük temas açılarında klasik model işe yaramamaktadır. Düşük temas açılı küçük kritik bir çekirdek için küresel kubbe çekirdek şekli için güzel bir tanımlama değildir ve klasik model, kritik heterojen çekirdek oluşma işi ve heterojen çekirdek oluşma sıklığı için güvenilir bir yargı verememektedir. Kuvvetli bir çekirdeklenme rejimi için, çekirdeklenen tanecik yüzeyindeki soğurmadan yola çıkılan alternatif bir model geliştirilmiştir. Bu modelde aşırı bir altsoğuma vardır ve tanecik yüzeyinde yeni katı tabakanın soğurulmasına elverişlidir. Bu soğurulmuş tabaka daha sonraki büyümenin temelini oluşturur. Kritik altsoğumada çekirdeklenme olmadan çekirdeğin büyümesi meydana gelir. Soğurma modeli ile elde edilen kritik altsoğumalar zerre deneyleri ile tutarlılık göstermektedir. Fakat soğurma modeli hala çekirdeklenme sıklığının tahminini doğru yapamamaktadır. Kuvvetli çekirdek tanecikleri ile aşılama pratikte önemli bir rol oynamaktadır fakat heterojen çekirdeklenme sıklığını gösterebilecek bir model daha oluşturulamamıştır.

Çekirdeklenme analizindeki bu problemlerin yanında, mevcut modeller deney sonuçlarını yorumlamak için kullanılmaktadır. Çekirdeklenme sıklığındaki belirsizlikler, kritik çekirdeklenme oluşma işine göz önünde bulundurursak çok zorlu değildir. Çekirdeklenme sıklığı ayrıca altsoğumaya çok önemli derecede bağlıdır. Çekirdeklenmenin başlangıcında kritik bir altsoğuma vardır, aşırısında katılaşma sıklığı tespit edilebilme limitlerini aşmaktadır. Alt soğuma yükseldiği zaman, çekirdeklenme sıklığındaki yükselme, başlangıcın çok hiddetli olarak başladığını ve çekirdeklenme sıklığında çok fazla belirsizlik olmasına rağmen, orantı ile başlangıç altsoğuması tahmin edilebilir. Homojen çekirdeklenme için tipik parametrelerde, katı sıvı ara yüzey enerjisinde %1 değişim kritik çekirdeklenme oluşma işinde %3 ve alt soğuma başlangıcında ise %1,5'lük belirsizliğe neden olur. Genellikle hangi çeşitlerdeki mikroyapıların oluşacağını gösteren katılaşmanın başladığı sıcaklığı altsoğumanın başlangıcı göstermektedir. Bu analizlerin yardımcı olduklarını şu örnek açıkça göstermektedir.

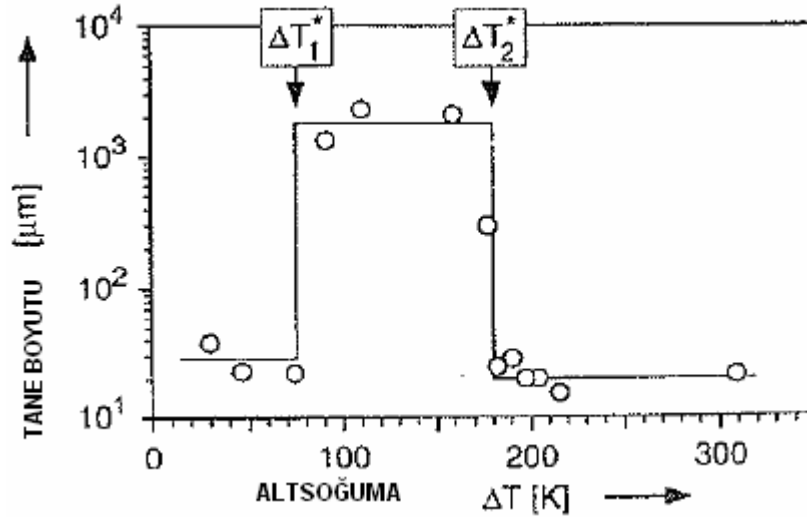
Çekirdeklenme doğası gereği tesadüfî değişkenlerin var olduğu ama çoğu örnekte önemsiz değişkenlere sahip bir süreçtir. Küçük zerrelere, diğer zerrelere çekirdeklenmenin katılmasını tetiklediği zaman, süreç değişkenlik gösterebilir. Kısmi yerlerde, özdeş zerreler aynı şartlar altında başlangıç sıcaklığında önemli farklılıklar olabilir. Bu yüzden bu yapılarda mikroyapı ayırım haritaları kullanılamaz. Fakat mikroyapı baskınlık haritalarında zerre oluşumu rahatça görülebilir. Eksenler bileşimleri ve zerre çapını gösterir. Çap, zerrenin soğuma hızını, çekirdeğin hacmini ve yüzey alanını gösterdiğinden süreç için önemli bir noktadır. Bununla birlikte çapın değişmesi ile altsoğumada değişebilir. Bu durumda harita belirli bir çapta hangi mikroyapının baskın olduğunu gösterebilir. Bu şekilde haritalama basit sistemlerde kullanılabilir.

Örnekte görüldüğü gibi çekirdeklenme analizleri deney sonuçlarının nedenlerini göstermekte ve çekirdeklenme analizini sıklığının hesaplanması hala eksiktir. Bu da eş taneli döküm için tane büyüklüğünün kontrolünde bir sorun teşkil eder.

4.9.2 Spontane tane iyileşmesi

Temiz bir sıvı alaşım katılaştığında, eğer içinde aşılınmış malzeme yok ise beklenen tane yapısı sütunsaldır. Eş yapıli tanelerin çekirdeklenmesi için kuvvetli substratlar yoktur. Mikroyapılarda sütunsal taneler baskın haldedir. Taneler başlangıç bölgesinden veya bölgelerinden büyüyerek, katılma yönünü gösterecek şekilde uzanırlar. Fakat bunun yanında kısmi altsoğuma bölgelerinin tetikleme ile katılan bazı alaşımlarda eş eksenli tanelerin oluştuğu da gözlemlenir. Şekil 4.17’de Bakır nikel alaşımındaki yüksek ve düşük altsoğumalarda tane büyüklüğü gözükmektedir. Bu bölümde şekildeki gibi spontane oluşan tane küçülmesi işlenicek ve daha sonraki bölümde bunun aşılama ile nasıl sağlandığı anlatılacaktır.

Döküm malzemesi kritik ve düşük super ısıda döküldüğü zaman, tanelerin eş eksenli olduğu görülmüştür. Bu duruma “Big-Bang” çekirdeklenmesi denir fakat bu durumun bütün bir çekirdeklenmeyi kapsamadığı görülmüştür. İlk durumda oluşan dendritlerin dağıldığı görülmüştür. Bu dendrit parçaları daha sonra taneler için çekirdek görevi görür. Düşük super ısının değerine göre bu parçalar tekrar erir ve eğer süperısı çok yüksek ise eşyapıların oluşmasında yararsız olur.



Şekil-4.17 Belirli altoğuma noktalarında katılaşmanın tetiklenmesi ile oluşan tane boyutları (Carlos A. Santos, 2004)

Durgun sıvıların çeşitli altoğumalar ile katılaşması hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bazı çalışmalarda, eş yapıdaki tanelerin düşük altoğumanın tetiklediği katılaşma ile sağlandığı görülmüştür. (Şekilde görüldüğü gibi) Ayrıca dendritlerin parçalanması ile de bu küçülme yükselmiştir. Bu parçalanma katılaştan örneklerin yüzeyinde rahatça gözlenebilmektedir. Dendritlerin büyük yüzey alanları vardır. Tanelerin katılaşması ile bu alanın küçülmesi, tekrar ergimeye ve dağılmaya neden olur. Dökülmüş ergiyin içinde çalkanma olmasa bile katılaşma sırasındaki büzülme yüzünden içeride bir akış oluşur. Ayrıca birçok deneyde, elektromanyetik kuvvetlerin karıştırma etkisi ile havada kalan zerrelere olduğu görülmüştür. Bu akışta dağılma için önemli bir rol oynamaktadır. Bu incelmanın sadece alaşımlar için geçerli olduğu ve saf ergiyikler için geçerli olmadığı görülmüştür. Gerekli olan çözünümlü miktarı çok düşük olabilir. Örnek olarak nikelin içinde %0.01 oksijen veya bakırın içinde %0.018 kükürt, düşük altoğumalarda tane inceliği yakalamada yeterlidir. Bu çözünen malzemeler tekrar yerel ergimelere neden olarak, istenen tipte dendritlerin oluşmasına yardımcı olur.

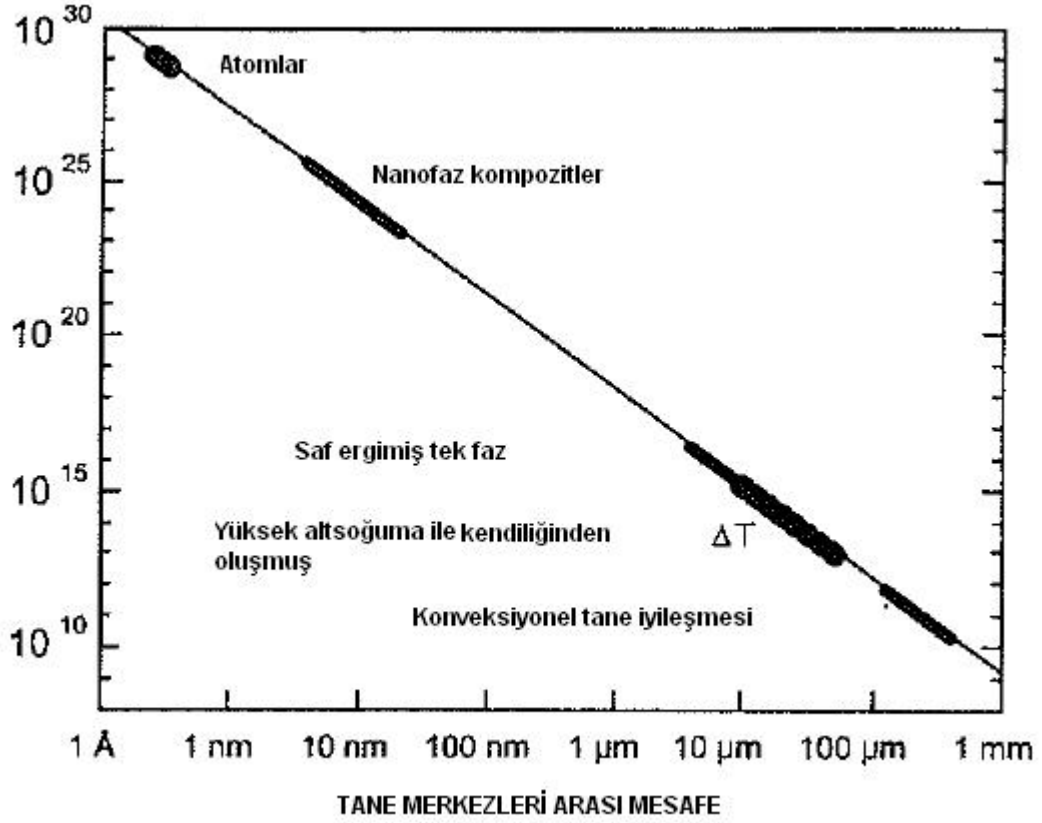
Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, yüksek altoğumalarda da tane incelmeleri görülebilir. Düşük altoğumadaki etkinin tersine, saf ergiyiklerde ve alaşımlarda da görülebilir. Nikelin ergiyiğinin altoğumasında 140-150K'yı geçildiğinde, kalın sütümsal taneler yerine ince taneli eşeksenli yapılar olduğu görülmüştür. Eş eksenli tanelerdeki çapın, sütümsal yapıdakinden %10 daha küçük olduğu görülmüştür. Aynı duruma birçok saf metal ve alaşımların dökümünde de rastlanmıştır. Dağınık haldeki katılaşmış zerrelere sıcaklık dağılımları incelendiğinde, termal yüzey ve katılaşma yüzeyi katılaşmanın başladığı noktadan itibaren kesişmektedir. Bu yönlü katılaşmaya bağlı olarak, ön yüzeyin arkasında eş eksenli taneler oluşur.

Basıncın etkisi ile tetiklenen çekirdeklenme ile iyi eş taneli yapılar oluşturulabilir. Büzülme ile katılaşma içinde boşluklar oluşturabilmek için gerekli şartlar sağlanır. Kabarcığın sönmesi ile büyük bir basınç etkisi oluşur. Altsoğumanında yükselmesi ile bol miktarda çekirdeklenme meydana gelir; bu da çekirdeklenme sıklığını artırır. Altsoğuma sabit tutulsa bile tane iyileşmesi devam eder. Buna ek olarak, alt soğumuş bir bölgede bol miktarda çekirdeklenme meydana gelir ve bunun sonucunda tekrar ergimeye maruz kalan bölgede hızlı sıcaklık kaçıması olmadan küçük çekirdekçikler erir. Bu da tane iyileşmesini sınırlar. Katılaşma sürecinde tane iyileşmesinin bol miktarda çekirdeğin kritik bir sıcaklıkta ergiyik boyunca oluşmadığını gösterir. Konuyu toparlamak gerekir ise yüksek altsoğuma ile sağlanan tane iyileşmesi çekirdeklenme ile ilgili değildir.

Yüksek altsoğumada, katılaşma hızlı olur ve oluşan katıda yüksek gerilme kuvvetleri mevcuttur. Burada tane iyileşmesini tekrar kristalleşme ile sağlayan sürücü kuvvetler vardır. Bir tane yapısının tekrar kristalleşmeye uğramış olsun veya olmasın, mikroyapıda farkedilebilir. Çünkü orjinal taneler arasındaki dendritik mikrosegregasyona bağlı değişken alaşım yeniden kristalleşmeden etkilenmezler. Yüksek altsoğumada yeniden kristallenme tane iyileşmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Mikroyapının önemli ölçüde kontrol edilebilmesi, katılaşan sistem üzerinde yeterli sayıdaki sınırlamaya erişilmesine bağlıdır. Fakat birçok durumda bu sayıya ulaşmak zordur. Araştırmamızda da görüldüğü gibi bütün durumlar değişik formasyonların oluşması yüzünden meydana gelmektedir. Bu da katılaşan malzemenin tane büyüklüğünün kontrolünde düşük altsoğuma ile geleneksel süreçte veya yüksek altsoğuma ile spontane tane iyileşmesi gözükürken baskın bir rol üstlenmektedir.

Şekil 4.18'de birim hacim başına düşen tane sayısına farklı işlem teknikleri ile ulaşıldığındaki tane büyüklüklerini göstermektedir. Yeniden oluşumun, hızlı ısı kaçıması veya kristalizasyonun cam safhasında durmasını sağlayarak yavaş oluşmasına neden olunması ile iyi bir tane büyüklüğüne ulaşılabilir. Ayrıca şekil üzerinden final sınırın ulaşılacak en son sınıra yakınlığını göstermektedir. Nano evre kompozitlerin, konvensiyonel yöntemler ile elde edilen taneler ile karşılaştırıldığında daha yukarı seviyelerde bulunduğu gözükmektedir.



Şekil-4.18 Döküm alaşım mikroyapılarında tane büyüklüklerinin ve birim hacimdeki tane sayılarının şematik gösterimi (Carlos A. Santos, 2004)

Alüminyum alaşımlarının konveksiyonel olarak tane iyileşmesi, eş katılma sağlandığında tane büyüklüklerinin tahmin edilebilir olduğunu göstermektedir. Tane büyüklüğünü meydana getiren mekanizmalar çok değişkendir. Fakat klasik çekirdeklenme olaylarının yayılması ilk tanelerin oluşumundan çok az derecede sorumludur. Çekirdeklenme hızlı daldırma ve tekrar camlaşma ile oluşabilir fakat aşılama ile konveksiyonel tane iyileşmesinde tane oluşması serbest büyüme ile meydana gelmektedir ve yüksek altsoğumada spontane olarak meydana gelmekte ve taneler dendritlerin kırılması ile oluşmaktadır.

5. SOĞUTMANIN DÖKÜM KALİTESİNE ETKİSİ

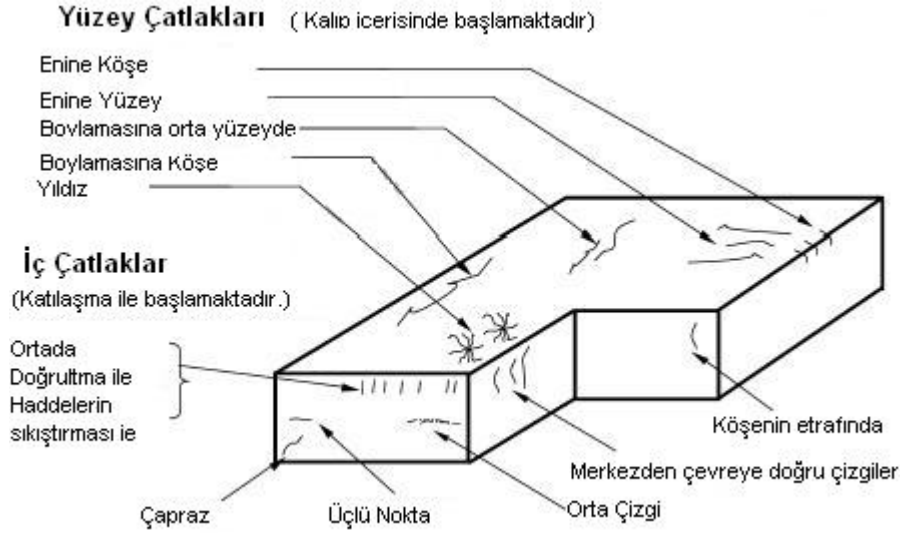
Sürekli döküm yöntemi ile üretilen malzemelerden boyut hassasiyeti beklenmez. Bu ürünlerden beklenen en önemli özellik, malzemenin bütün kesitinde aynı homojen yapıya sahip olmasıdır. Bütün bir malzemenin aynı sertlik değerinde olması döküm malzemesinin kaliteli olduğunun göstergesidir. Bu yüzden bu süreç devamlı kontrol altında tutulmak zorundadır.

Kalıba giren sıvı, metal ancak ince bir kabuk şeklinde katılaşmış bir tabaka ile kalıbı terk eder ve bu arada sıvı çeliğin girişteki ısı tutumunun %15–%20 kadarı kalıp tarafından çekilir. Parçanın daha sonraki işlemlere girerken, bu ince katılaşmış tabaka kalınlığının hızla soğutulması artırılması gerekir. Ancak parça içinde ve yüzeyinde meydana gelen çatlamalara engel olmak için soğutma şeklini iyi seçmek gerekir. Herşeyden önce soğutma homojen olarak yapılmalıdır. Çatlamaya hassas çelik çeşitlerinde soğutma bölgelerindeki sıcaklık değişimlerine bağlı termik gerilmeler mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Püskürtme memelerinin şekline ve parça yüzeyine bağlı olarak çekme ve kılavuz makaralarının soğutulması ayrı bir özellik getirmektedir. Büyük kesitli ve özel profilli memelerin kullanılması püskürtme şemsiyesinin büyümesini ve dolayısıyla su dağılımını kolaylaştırır. Memelerin tıkanmasını önler. Bugünkü modern tesislerde her bir püskürtme nozulünün su debisi ve basıncı elektronik olarak kontrol edilmektedir.

Sürekli döküm sürecini anlamak ve kontrol etmek çok önemlidir. Çünkü son üründe ortaya çıkabilecek birçok hatanın önüne geçilebilir. Bu hatalar, oksit parçacıklar, gözenekler, segregasyonlar ve çatlaklar olabilir. Pahalı fabrika deneylerine ek olarak, bu süreci anlamak için birçok fiziksel su akış modeli ve bilgisayar destekli gelişmiş modeller kullanılmaktadır. Su, döküm çelik parçasına benzer bir halde akmaktadır. Bu modeller, parça görüntü velosimetrelerinin yardımıyla suyun akışı canlandırılır. Bilgisayar dünyasındaki yazılım ve hız gelişmelerinin yardımı ile metalurjik termodinamikten, sıvı akışına, ısı transferlerinden, gerilim ve katılma analizlerine kadar birçok durumunun simülasyonu yapılabilmektedir. Bu sayede nozul ve kalıp şeklinin tasarımı için gerekli olan bilgiler sağlanabilmektedir. Ayrıca internet üzerinden sıvı metal akışı, soğutma suyu akışı, döküm hızı ve diğer parametreler de artık kontrol edilebilmektedir. Sürekli dökümdeki yenilikler, masrafları azaltıcı yönde olmalıdır. Gelecekteki gelişmelerin, daha iyi modeller ve kontrol sistemleri üzerine olacağı görülmektedir.

Sürekli döküm prosesinde en önemli düşünce hatasız bir slab veya ingot dökümü yapmaktır. İki önemli kalite unsuru olarak (1) sıcak yırtılma ve soğuk çatlama ve (2) boyutsal kontrol

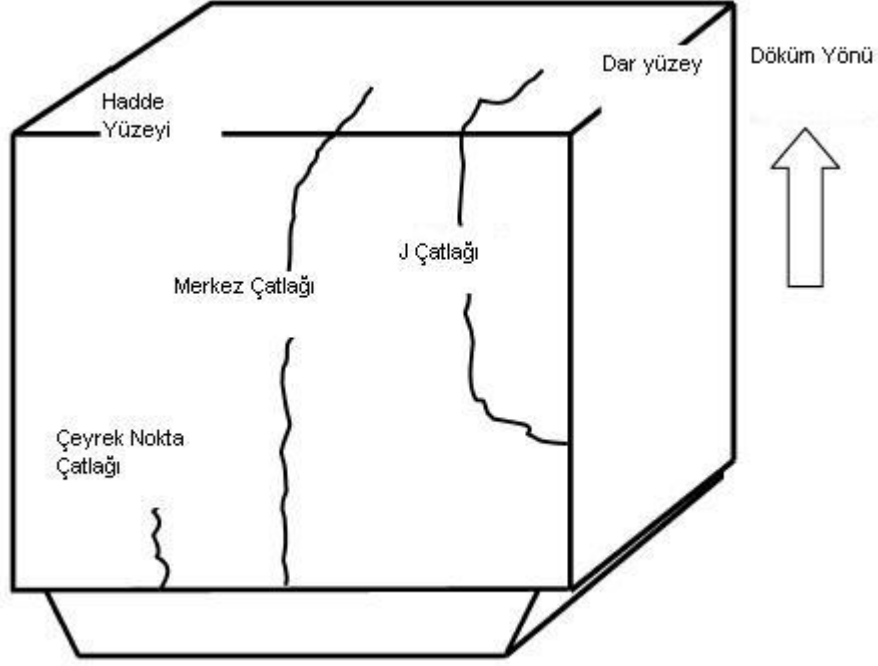
(çelik kabuğun şişmesi ve alüminyum ingotda kıvrılma). Bu sorunlar direk olarak döküm sırasındaki ısıl gerilim ve gerinimleri ile ilgilidir. Çatlak hatalarının çeşitleri şekil 5.1 ve şekil 5.2 'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil-5.1 Çeliğin sürekli dökümünde çatlak hatalarının şematik gösterimi (Thomas, B.G., 2001)

Mekanik olarak, uygun olmayan kalıp yağlaması veya döküm parçasının bükülmesi gibi nedenlerle oluşabilecek gerilme zorlamalar genellikle boylemsal yönde etki ederek enlemesine çatlaklara neden olur. Döküm sürecinde, katılama kabukta hızlı soğuma yüzünden yüksek sıcaklık farklılıkları oluşur; bu, kabuğun genişlemesine ve kışalmasına göre ısıl gerilmelere neden olur. Ani soğutma tekrar ısınma ile karşılaştığında gerilim bölgeleri oluşturabilir. Isıl gerilmeler çoğunlukla enlemsel olarak etki ederek boyutsal çatlamalardan sorumludurlar.

Eğer gerilme kuvvetlerinin şiddeti metalin kırılma dayanımını aşarsa çatlaklar oluşur. Çelik için, düşük süneklik dereceli noktalar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlisi katılama sıcaklığının $\sim 50^{\circ}\text{C}$ civarlarında bulunan ve sıcak yırtılma çatlamlarından sorumlu olanıdır. Alüminyum da aynı şekilde katılama sıcaklığı ve kararlılık sıcaklığı (malzemenin %90'ının katıldığı sıcaklık) arasında sünekliğini ve dayanımını hızlıca kaybeder. Diğer mekanizmalar, tane sınırların kükürt, oksit ve azot çökmesi, düşük sıcaklıklarda $\sim 700^{\circ}\text{C}$ ve $\sim 900^{\circ}\text{C}$ arasında çeliğin çalıştırılması, tane içi çatlamalara neden olur



Şekil-5.2 Alüminyumun DC dökümünde ikincil soğutmaya bağlı olarak yaşanan soğuk çatlama hatalarının şematik gösterimi (Thomas, B.G., 2001)

Çelik slablarda ve çubuklardan en çok görülen çatlak, sıvı metal ön yüzü yakınlarında düşük süneklik yüzünden oluşan sıcak yırtıklardır. İç çatlaklar genellikle köşelerde ve çapraz olarak konumlanmış köşelerin orta noktalarında oluşmaktadır. Yüzey çatlakları hem orta yüzeyde hem de köşelerde oluşabilmektedir. Bazı çatlaklar 900°C'nin altında kabuğun güçlenmesi sırasında tane sınırlarına AIN (alüminyumnitrit) çökmesi ile oluşan gevrekleşme yüzünden meydana gelirler.

Alüminyum ingot ve çubuklarda ise, bir bölümü katılaştıran tanelerin etrafını sıvı metal tam olarak sarmamakta ve boşlukları dolduramamakta; bu yüzden oluşan gerilim kuvvetleri sıcak çatlaklar veya ön katılama çatlakları oluşabilmektedir. Bu yüzden bu çatlaklar daima taneler arasında oluşmaktadır. Karşılaştırma yaparsak, alüminyum ingotlarda katılama sıcaklığının altında yüksek ısı gerilmelere bağlı olarak taneler boyunca soğuk çatlama ihtimali oluşabilmektedir.

BRIANCOMBE ve arkadaşları, çeliğin sürekli dökümünde oluşan bu çatlak sorunlarının nedenlerini toparlayan bir çalışma yapmışlardır. Uygun olmayan ikincil bölge soğutması bunlara neden olabilir. Ölçsüz su püskürtmesiyle soğutma, yeterli olmayan uzunlukta su püskürtülmesi yüzeyin tekrar ısınmasına yol açarak gerilmelere neden olur. Bu da çubuk dökümlerde orta bölgede oluşan iç çatlaklara sebep vermektedir. Çubuk köşelerinde asimetrik soğutmaya birlikte çarpılmalar ve çapraz çatlaklar oluşur. Uygun olmayan şekilde suyu

püskürterek soğutma, işlemi hızlandırır da, slab dökümde kalıp içinde küçük çatlamalara sebebiyet verir. Ayrıca kalıbın altında yetersiz su püskürtülmesiyle soğutma sağlanamaz ise kalıp slabın kamburlaşmasına neden olur. Bu da şekil 5.1’de görüldüğü üzere üç nokta çatlağı, yüzey çatlağı, orta bölge çatlakları, merkezde segregasyon oluşması gibi birçok hataya sebep verebilir. Yüzey sıcaklığının 700°C – 900°C derece arasında oluşan düşük süneklik bölgesinde, slab dökümde su püskürtülmesi etkisi ile aksiyel etkiyen gerilimler kalıp içerisinde enlemesine ve köşelerde oluşan çatlakları yayabilir. İkincil soğutmada özellikle bu kritik sıcaklık sahasında yüzey sıcaklık dalgalanmaları, bu çatlakların artmasına neden olmaktadır.

DC dökümün geçici başlangıç fazında ingot içerisinde meydana gelen ısıl gerilim ve gerinimler özellikle yüksek dirençli alüminyum alaşımlarda sıcak çatlakların ve soğuk çatlakların oluşumunu başlatmaktadır. Sıcak çatlak genellikle ingot yüzeyinin altındaki dikdörtgen ingotun çeyrek noktalarının arasında oluşmaktadır. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, ingot tabanında soğuk çatlaklar ingot genişliğinin orta bölgesinde konumlanmışlardır. Yüksek döküm hızları sıcak yırtılma çatlaklarına ve düşük döküm hızları soğuk çatlama riskini arttırmaktadır. Ayrıca sıcak çatlak başlangıç anındaki şartlara ve kalıp ile ingot arasında (kalıp temizliği) oluşan sürtünme kuvvetlerine de bağlıdır. Çatlaklara ek olarak, ikincil soğutmaya bağlı olan ısıl gerilmeleri ingot tabanında makrodeformasyonlara ve son kıvrımlara (butt curl) neden olur. Droste ve Schneider isimli araştırmacıların raporlarına göre, son kıvrılma bölgesine dayalı sorunlar şunlardır; erimiş metalin dışarı akması, soğuk tıkanma, katının dayanıksızlığı ve düşük düzelme hızlarıdır. Eğer son kıvrımın büyüklüğü aşırı derecede ise ingot tabanı testere ile kesilmelidir.

6. SONUÇ

Literatür taraması ve teorik olarak yaptığım bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Çeliklerin ve alüminyum alaşımlarının sürekli dökümünün, ergime noktası, ısısal iletim, ısıl katsayısı ve katılma büzülme oranı gibi farklı termofiziksel özellikleri yüzünden farklı makine konstrüksiyonu ve çalışma parametrelerine sahip olduğu görülmüştür.
2. Temel ısı transferi prosesleri, super ısının, gizli ısının ve hissedilen ısının kaçışının benzer olduğunu göstermiştir. İlk çalışma ve sürekli çalışma durumunda kalıp ve su soğutma, karmaşık olan bu soğuma ve katılma durumunda önemli bir rol oynamaktadır.
3. Su kanalları ile soğutma için kullanılan deneye dayalı denklemler çok iyi şekilde oluşturulmuştur. Bu denklemler, çeliklerin sürekli dökümündeki kalıp ile soğutma bölgesinin (birincil soğutma) optimizasyonu için kullanılabilir
4. Çeliklerin sürekli dökümünde, kaynayan suyun ısı transfer katsayısının döküm malzemesinin yüzey sıcaklığından bağımsız olduğu ve ısı kaçışının olağan bir şekilde su akış hızına bağlıdır.
5. Kalıp içerisinde soğutma bölgesinde, menisküs'ten aşağılara inildikçe, döküm parçası büzülerek kalıptan ayrılmakta, bu sayede arada oluşan hava boşluğu yüzünden ısı transfer hızı düşmektedir.
6. İkincil soğutma bölgesinde ise etkin bir soğutma ısı transfer katsayısına bağlıdır. Isı transfer katsayısı yüksek olmalı fakat çelik kalitesinde de sağlamak adına kontrol edilebilir olmalıdır. Burada sağlamanın yollarıda su püskürtme nozüllerinin şeklini dizaynını, soğutma suyu hızını ve miktarını değiştirmektir.
7. Suyun püskürtülmesi ve akması, ingot yüzey sıcaklığının ani değişmesi ile birleşince ısı transfer olayı karmaşıklaşmakta ve sonuç olarak kontrol edilmesi güçleşmektedir.
8. Alüminyum alaşımının sürekli dökümü üzerinde yapılan araştırmalarda, ısı transferinin ingot yüzey sıcaklığına, su akış hızına, suyun çarpma noktasındaki sıcaklığa bağlı olduğu görülmüştür.

9. İkincil soğutma bölgesinde, döküm malzemesi yüzeyinin ani sıcaklık dalgalanması yüzünden meydana gelebilecek çatlamlarına engel olmak için kontrollü olarak soğutulması gerekmektedir.
10. Fabrikaların gelişmesi ve proseslerin otomasyonun artmasına rağmen, su soğutma ile ortaya çıkan dip kıvrılması ve ısıl yırtılma gibi kalite problemleri hala DC döküm endüstrisine sorun çıkarmaktadır.