

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tarafından İncelenmiştir.

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

Prof. Dr. Sendar Kocakbarçın

Doç. Dr. Hüseyin Sönmez

SIVI METALLERDE İNKLÜZYON GİDERİLMESİ

Metalurji Müh. Aydın TURHAN

128779

FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

128779

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
1. GİRİŞ	1
2. İNKLÜZYON OLUŞMASI VE GİDERİLMESİ.....	3
2.1. İnküzyon Oluşması	3
2.2. Ara Yüzeye Transfer	6
2.3. Arayüzeyde Kararlılık veya Dağılım	8
2.4. Ara Yüzeyden Giderilme	9
3. SAFLAŞTIRMA İŞLEMLERİNDE BÜYÜMENİN VE AYIRMANIN MODELLENMESİ.....	10
3.1. İnküzyonların Endüstriyel Etkisi	10
3.2. Matematiksel Formülizasyon	11
3.3. Sıvı Akış Modeli	11
3.4. İnküzyon Giderme Modeli	12
4. ELEKTROMANYETİK OLARAK OLUŞTURULAN ÇEVİRİM AKIMLARINDA İNKÜZYON GİDERİLMESİNİN KİNETİĞİ.....	15
4.1. İnküzyonların Gideriliminin Üretim Açısından İncelenmesi	15
5. KONVEKSİYONUN AGLOMERASYON VE METAL OLMAYAN İNKÜZYONLARIN ERGİYİK ALUMİNYUMDA GİDERİLMESİNDE ETKİSİ.....	17
5.1. Endüstriyel Uygulaması.....	17
6. KARIŞTIRMA DONATIMLARI	19
6.1. Elektromanyetik Karıştırma.....	19
6.1.1. Elektromanyetik Karıştırmanın Fiziksel Prensipleri	21
6.2. Magnetogyr Karıştırma	23
6.3. Spiral karıştırıcılar	23

7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
7.1	Elektromanyetik Levitasyon ile İnküzyonların Ara Yüzeylere Ötellenmesi.....	25
7.1.1	Deneyler Sırasında Kullanılan Cihazlar	25
7.1.2.	Deneyde Kullanılan Malzemeler	26
7.1.3.	Deneyin Yapılışı	26
7.1.4.	Deney sonuçları	26
7.2.	Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Deneysel Çalışmalar	27
7.2.1.	Saflaştırma Proseslerinde Büyüme ve Seperasyon Deneyi	27
7.2.1.1.	Deneyde Kullanılan Malzemeler	27
7.2.1.2.	Deneyin Yapılışı	27
7.2.1.3.	Ölçümlerin Tahminlerle Karşılaştırılması	28
7.2.1.4.	Deneysel Çalışmanın Sonuçları	32
7.2.2.	İnküzyon Giderilmesinin Kinetiği Deneyi.....	32
7.2.2.1.	Deneyde Kullanılan Malzemeler	33
7.2.2.2.	Deney Sonuçları ve Tartışmaları	33
7.2.2.3.	Serbest Yüzeyde İnküzyon Giderilmesi İn-Situ Gözlemlenmesi	35
7.2.2.4.	İnküzyon Giderilmesinin Kinetiği	36
7.2.2.5.	Damlacıktaki İnküzyon Gideriliminin Analizleri.....	37
7.2.2.6.	Analiz Sonuçları	40
7.2.3.	Konveksiyonun Aglomerasyonda ve Metal Olmayan İnküzyonların Giderilmesindeki Etkisiyle İlgili Deney	41
7.2.3.1.	Malzemeler	42
7.2.3.2.	Deneysel Prosedür	42
7.2.3.3.	Levita Edilmiş Eriyik Alüminyum Damlacıklarında Akış Karakteristikleri	43
7.3.	Deneysel Sonuçlar	45
7.3.1.	Levita Edilmiş, Damlacıklarda İnküzyon Kümeleşmesinin ve Giderilmesinin Analizleri	50
7.3.2.	Konveksiyon Etkisi Deneyi ile İlgili Tartışmalar	53
8.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
	KAYNAKLAR.....	56
	ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGE LİSTESİ

V_t	Küre hızı
Δ_p	Tanecik yoğunluğu ile sıvı yoğunluğu arasındaki fark
μ	Sıvı dinamik vizkozitesi
C_t	$Co \exp (-kt)$
Co	İlk durumdaki inklüzyon bileşiği
C	t zamanında inklüzyon konsantrasyonu
$[O]_e$	Dengedeki oksijen konsantrasyonu
$[O]_i$	İlk durumdaki oksijen konsantrasyonu
K_{eff}	A yüzey alanına bağlı kütle transfer katsayısı
A	Yüzey alanı
V	Çeliğin hacmi
U	Zaman ortalama hız vektörüdür.
ρ	Sıvının yoğunluğu
μ_1	Laminar hız viskozitesi
μ_t	Çalkantı (turbulent) hız viskozitesi
g	Yerçekimi ivmesi
$(J \times B)$	Elektromanyetik kütle güçleri
k	Çalkantı (turbulent) kinetik enerjisi
ε	Çalkantı (turbulent) enerjisi dağılımı
c_μ	Sabit
G	Çalkantının (turbülans) meydana gelme oranı
$C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ve C_μ	Sabitler
t	Time
x	Partikül koordinatları
u_p	Hız
n_k	Yarıçap r_k olan k sınıfı boyutundaki partiküllerin sayısal konsantrasyonu.
$B_{i,k}$	i ve k boyut sınıflarının çarpışma konsantrasyonu
S_k	k partiküllerinin giderilme oranları
R_k	k partiküllerinin, inklüzyon giderme yüzeyleri ile çarpışmanın frekansı
f	Katsayı
n_k	k boyutundaki taneciklerin konsantrasyon sayısı (k= primer partiküllerin sayısı)
t	Zaman
$\beta_{i,k}$	Partikül birikim parametresi
S_k	k partiküllerinin giderilme oranı
F	Tanecik gideriliminin verimidir.
A	Akış durulma bölgesinin yüzey alanı
V_p	Elektromanyetik güçler etkisindeki taneciklerin göç hızı
r	Damlacığın yarı çapı
θ	Akış durulma bölgesinin simetri eksenini ile yaptığı açı
L	Akış durulma bölgesinin ark uzunluğu
F_{em}	Elektromanyetik güç
dp	Parçacığın çapı
F	Kuvvet
J	İndüktif akım
B	Manyetik alan
h	İndüktör
f	Frekans

KISALTMA LİSTESİ

DC	Doğru Akım
EMC	Elektromanyetik Akım
SEM	Scanning Elektron Microscobe



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	Akış nüfuz alanındaki, hacim kontrol bölgesi	14
Şekil 6.1	Elektromanyetik karıştırma ile dentritlerin parçalanması	20
Şekil 6.2	Sürekli dökümde indüktörlerin tanzimi.	20
Şekil 6.3	Düşey hareketli elektromanyetik alan oluşumu.	21
Şekil 6.4	Elektromanyetik karıştırmanın prensibi.....	22
Şekil 6.5	Magnetogyr karıştırıcı kalıp	23
Şekil 7.1	Deney aparatının krokisi	26
Şekil 7.2	Numune mikrografları.(Numune iç yapısındaki değişim)	27
Şekil 7.3	Alüminyum damlacıkta hesaplanmış hız alanı.	29
Şekil 7.4	Değişik karıştırma zamanlarında, parçacık içinde tanecik dağılımı	30
Şekil 7.5	Değişik karıştırma zamanlarında damalcıkta hesaplanmış partikül dağılımı	31
Şekil 7.6	Tahmin edilen ve ölçülen inklüzyon giderme oranlarının karşılaştırılması	31
Şekil 7.7	Nümerik tahminler ile zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüş küme oranlarının karşılaştırılması	32
Şekil 7.8	Bobin konfigürasyonu	33
Şekil 7.9	Damlacıkta hesaplanan elektromanyetik güç alanı	34
Şekil 7.10	Damlacıkta hesaplanan hız alanı	34
Şekil 7.11	Oksitlerin serbest yüzeydeki fotoğrafları	35
Şekil 7.12	Numune yüzeyinin SEM fotoğrafı	35
Şekil 7.13	Karıştırma sırasında levita edilen damlacıkta partikül dağılımı değişimi.....	36
Şekil 7.14	Inklüzyonların damlacıkta boyut dağılımı	37
Şekil 7.15	Inklüzyonların karıştırma sırasındaki giderilme oranı	37
Şekil 7.16	Karıştırma sırasında inklüzyonların giderilme oranları	40
Şekil 7.17	Hazırlanmış numunelerin mikro yapısı	42
Şekil 7.18	Levitasyona uğramış alüminyum küresel damlacıkta hesaplanmış hız alanı.....	44
Şekil 7.19	Levitasyona uğramış alüminyum küresel damlacıkta çalkantının laminar viskoziteye oranının uzaysal değişimleri	44
Şekil 7.20	Damlacığın üst kısmında, verimli akım bölgelerindeki taneciklerin sırasını gösteren mikrograf (50x)	45
Şekil 7.21	Akış doğrultuları boyunca taneciklerin değişken boyutların gösteren mikrograf (100x)	46
Şekil 7.22	Akış ayrılma bölgesine (Şekil 7.19) uyuşan bölgenin karıştırmanın değişik zamanlarındaki mikrografları	47
Şekil 7.23	Tanecik dağılımındaki gelişim	48
Şekil 7.24	Karıştırma sırasında SiC taneciklerinin giderilme oranları	49
Şekil 7.25	Zamana göre küme sayıları.	50
Şekil 7.26	Değişik sıkışma katsayıları için damlacıkta partikül sayısındaki zamana bağlı gelişme	52
Şekil 7.27	Değişik sıkışma sayıları için zamana bağlı birikim göstermiş taneciklerin sayısındaki gelişmeler (damlacıkta)	52

ÖNSÖZ

Bu tezin deneysel alışmaları University of Alabama (ABD)'da gerçekleştirilmiştir. Tezin oluşturulmasında bana yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof.Dr. Zeki izmecioėlu (Yıldız Teknik Üniversitesi) Bey'e ve gerek teorik çalışmalarda gerekse deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Nagy El Kaddah (University of Alabama) Bey'e, teşekkürlerimi borç bilirim.



ÖZET

Sıvı Al metalinde inklüzyon oluşum sebepleri, inklüzyon giderilme mekanizmaları ve elektromanyetik levitasyon ile inklüzyon gideriliminin verimi incelenmiştir. Aynı zamanda bu konularda sıvı Fe metali ile yapılan daha önceki deneysel çalışmalar da incelenmiştir.

İnklüzyon giderme aşamalarındaki büyüme, dağılım, elektromanyetik olarak oluşturulan çevrim akımlarının inklüzyon giderilme mekanizmasına etkisi , bu akımlar yardımıyla inklüzyon giderilmesinin kinetiği, konveksiyon ve aglomerasyonun, metal olmayan inklüzyonların sıvı alüminyumdan giderilmesine etkisi deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.

Akış sistemleri için Smoluchowski popülasyon balans eşitliğinin modifiye edilmiş şekilleri, Green teoremi. Birikim gösteren ve giderilen taneciklerin sistemi için lineer olmayan diferansiyel sistemleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar tahminler ve hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda için Al ve Fe numuneler kullanılmıştır. Deneyler sırasında elektromanyetik levitasyon cihazı, bu cihaz dahilinde elektromanyetik alan oluşturabilmek için bobin , Lepel Radyo Frekans indüksiyon jeneratörü kullanılmıştır. Elektromanyetik levitasyon sırasında bobin akımı 320 A, frekans 250 kHz.dir.

Anahtar Kelimeler :Elektromanyetik levitasyon, elektromanyetik karıştırma, elektromanyetik dağılım, inklüzyon, MnOSiO₂.

ABSTRACT

Reasons for the formation of inclusions in liquid Al , inclusion removal mechanisms and efficiency of electromagnetic levitation in inclusion removal was examined. Moreover, the experimental works has been done for the same subjects about Fe metal was examined too.

Growth and seperation of inclusions in inclusion removal processes, kinetics of inclusion removal in electromagnetically driven recirculating flows and effects of that flows, influence of convection on agglomeration and removal of non-metallic inclusions in molten aluminum were determined by experimental works. For the flow systems, modiflicated Smoluchowski balance equations and Green theorem were used. For the systems of the particles that shows agglomeration and removal, non-lineer equation systems were used. Experimental results were compared with the computations and predictions. After this comparison, it was found that computations and experimental results show a complete accommodation. For the experimental work Al and Fe specimens were used. As the experimental apparatus the electromagnetic levitation cell, coil, Lepel Radio Frequency Induction generator was used. In the experimental work, coil current and frequency were 320 A and 250 kHz respectively.

Keywords : Electromagnetic levitation ,electromagnetic stirring, electromagnetic separation, inclusion, MnOSiO_2 .

1. GİRİŞ

Temiz çelik deyimi, genellikle içerisinde düşük seviyede çözülmüş olarak bulunan fosfor, azot, oksijen, hidrojen, kontrollü artık olarak bulunan bakır, kurşun, çinko, nikel, krom, bizmut, kalay, antimon, magnezyum gibi elementler ve çelik yapımı, pota metalurjisi, döküm, haddeleme gibi işlemlerde meydana gelen oksitler bulunan çelikler için kullanılır. Bu son tanımlama çelik üreticisine oldukça problem olur. Çünkü çeliğin temizliği tam değildir. Bu olay servis sırasında veya parçanın ömrü ile ilgili problemler çıkarır. Buna ek olarak temiz kavramı dünyanın her tarafından ürün alabilen ve ürünün performans seviyesini satıcıya göre mukayese edebilecek çelik müşterisi için görecelidir. Çeliğin ürün olduğu bu sistemde, en iyi çelik üreticisi kalite seviyesini müşterinin istediği seviye olarak kabul eden üreticidir. Çelik üreticisi sürekli olarak daha temiz çeliği üretmek için çaba sarf etmektedirler. Bunun yanında tüketicinin arzu ettiği temizlik standartı sürekli olarak değişmektedir. Böylece teknolojik gelişmelerde sürekli olarak devam etmektedir.

Temiz çelik teriminin değişken değerinden dolayı düşük miktarda çözülmüş yabancı element bulunduran yani yüksek saflıktaki çelikten, düşük miktarda hurda ergitimidenden oluşan empürite bulunduran düşük kalıntılı çelikten ve oksitlere bağlı olan düşük kalıntılı çelikten ve oksitlere bağlı olan düşük miktarda kusura sahip olan temiz çelikten bahsetmek daha doğru olur. Bu tip yani “yüksek saflıkta düşük kalıntılı az kusurlu” çeliklere örnek olarak otomobillerde kullanılan ultra derin çekilmiş çelik levhalar verilebilir. Bu çelikler kullanıldıkları yer sebebiyle çok düşük seviye de karbon (<30 ppm), azot (< 30 ppm) içermeli ve 100 mikron büyük çaplı oksit bulundurmamalıdır veya derin çekme ve demir kutu yapmada kullanılan düşük kalıntılı çelikler standart düşük karbonlu çelikler bu tip çeliklerde yüksek saflık aranmaz ama kalıntı olarak bulunan oksitlerin çapı 20 mikrometreden büyük olmamalıdır. Bununla birlikte dövme ve katlama işlemlerinde kullanılan temiz çelikler vardır. Bütün bunlarda inklüzyon boyut dağılımları sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir.

Derin çekmede kullanılan çelikler, inklüzyon boyut değişiminden kolay etkilenirler bu sebeple tel kopması, çatlak problemleriyle kolaylıkla karşılaşılabilen ince ürünlerde, izin verilebilir inklüzyon miktarını belirlemek için tek anahtar deneysel ölçümlerdir. Örnek olarak derin çekme işlemi ile yapılan demir kutularda kenar kırılmaları ile karşılaşmak oldukça mümkündür. Dağılımın 10 ppm’den düşük ürünlerde mükemmel performans beklenir. Diğer bir uygulamada ürünün taşıma ömrü ile ilgilidir. Toplam inklüzyon içeriği (toplam oksijen içeriği ile ölçülen) geleneksel olarak taşıma ömrü ile ilişkilidir. Ve oksijen miktarı 10 ppm altına indirilmesi taşıma ömrünü önemli ölçüde arttıracaktır. Toplam oksijen içeriğine ek

olarak dövmeden sonra, şerit halindeki inklüzyonların uzunluğu taşıma ömrü ile büyük oranda ilişkilidir. Düşük oksijen seviyelerinde, inklüzyon miktarını azaltmak için gösterilen çabalar taşıma için uzun bir servis ömrünü getirecektir.

Temiz çelikler, az miktarda ve ortalama çapları 5 mikrondan düşük olan inklüzyonları içeren çeliklerdir. Çelik üreticisi için ana problem birikim göstermiş olan katı inklüzyonların (>5 mikron) dağılımları tamamlanamamalarıdır. Örtü curufunun emilsiyonlanmasına bağlı olan ara sıra karşılaştırılan sıvı inklüzyonlar ve refrakterlerden meydana gelen katı malzemelerde çelik üreticisinin ana problemi içindedir. Temiz çelik üretimi için kullanılan ekipman değişik çelik üretim tesisleri arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Günümüzde kullanılan temiz çelik üretim ve döküm teknikleri aşağıdaki prensiplere dayanır.

- a) Çelik üretimi ve ergitme aşamasında sıvı çelik için de çözünen oksijenin katıya veya gaza dönüştürülüp atılması gereklidir.
- b) Sıvı çeliği yeniden oksitlemek için kullanılan oksijenin prosesin her aşamasında giderilmesi gereklidir.
- c) Çeliğin rafinasyonu ve dökümünde kullanılan fiziksel sıvı curuf tutucuların giderilmesi gereklidir.
- d) Sıvı çelik ile temasta bulunan refrakterlerin kimyasal olarak kararlı, korozyona erozyona dayanıklı olması gereklidir.

Pratik çelik üretim prensipleri, sıvı çelik içinde çözünen elementler, curuf ve sıvı çeliğe temas eder refrakter sistemleri arasında kimyasal bir denge kurmanın önemine dayanır. Aynı zamanda örtü curufunun yakalanmasına sebep olabilecek sıvı çelik – curuf ara yüzeyini engellemek için sıvı akışını kontrol etmekte bu prensipler içerisinde yer alır.

Temiz çelik üretimi, temiz çelik üretimi için gerekli olan temel aşamaların anlaşılmasına bağlıdır.

- Inklüzyonların oluşması
- Inklüzyonların ara yüzeye taşınması
- Inklüzyonların ara yüzeye dağılımı
- Inklüzyonların ara yüzeyden giderilmesi

Temiz çelik üretiminde başarı veya başarısızlık yukarıdaki 4 aşamanın tam anlaşılıp yerine getirilmesine bağlıdır (Byrnie vd., 1988).

2. İNKLÜZYON OLUŞMASI VE GİDERİLMESİ

2.1. İnküzyon Oluşması

Oksijenin sıvı çelik içinde çözünürlüğü katı çelik içindeki çözünürlüğünden daha yüksektir. Bu yüzden çelik yapımı sırasında inküzyon oluşması kaçınılmazdır. Buna ek olarak 1600°C'de gaz fazdaki oksijenin kısmi basıncının 6×10^{-9} dan büyük olduğu bir ortamda sıvı demir kendiliğinden sıvı demir okside dönüşür. Oksijen için sıvı demirde demiroksit ile kontak halinde iken doygunluk limiti 1600°C de %0,23 wt dir. Bu değer sıcaklıkla demir – oksijen – demir oksit dengesine bağlı olarak değişir. Sıvı demirin çözülebilir bileşiği oksijenin kısmi basıncı 6×10^{-9} atm den düşük ise redüklenebilir. Demir oksit oluşumunu engellemek için sıvı çeliği korumak gerekir.

Bunun için genellikle sıvı curuf kullanılır. Oksijenin curufta difüzyonu oldukça düşüktür. Bu şekilde sıvı curuf, çevredeki atmosferle sıvı çelik arasında fiziksel bariyer görevi görür.

Oksijenin katı demirde çözünürlüğü oldukça düşüktür. 1000°C de demir – demiroksit dengesinde oksijenin kısmi basıncı 1×10^{-15} atm'dir. Bu yüzden saf sıvı demir FeO ile dengede iken katılaştırılıp soğutulduğunda demir oksit küresel demir oksit inküzyonları olarak interdentritik bir şekilde çökecektir.

Temiz çelik yapmak için anahtar oksit inküzyonunu giderme mekanizmasını bilmektir. Örnek olarak sıvı çelik kütlesinden inküzyonları serbest yüzeye taşımak mümkünse çelik temizlenir. Çünkü serbest yüzey inküzyonların sıvı çelikten ayrıldığı yerdir. Giderilebilen inküzyonlar çelik yapılırken meydana gelen inküzyonlardır. Saf demir 1534°C de katılaşır. Bu sıcaklıkta oksijenin maksimum çözünürlüğü yaklaşık olarak 0.17 wt/o'dur. Bu sebeple 1600-1534 derece arasında çözünebilir 0,06 w/o miktarındaki oksijen demir okside geçebilir. Bu, şartlar altında giderilebilecek maksimum oksijen miktarı budur. Proses olanakları ne olursa olsun maksimum miktar budur. Katı durumda 1700 ppm.den az miktarda oksijen üretmek mümkün değildir. Bu olay eğer sıvı demirin oksijence doygun hale gelmesine izin verilmişse mümkündür (Schwerdtfeger, 1975).

Örnek olarak sıvı demir kullanılacaksa sıvı demir, sıvı demir içerisinde çözünen oksijen sıvı demir oksit dengesi aşağıdaki gibidir.



[O] sıvı demirde çözünmüş oksijen, (FeO) saf sıvı demir oksidi temsil eder.

$K_1 = 1/a^\circ$ Bu denge için sıcaklığın fonksiyonu olarak denge sabitidir.

Verilen sıcaklıkta dengedeki oksijen bileşiği, FeO'nun aktivitesinin modifikasyonu ile redüklenabilir bu olay başka bir kimyasal çözülme ile gerçekleştirilir. Örneğin sıvı demir oksidi yüzdürmek için sıvı demirin yüzeyine sıvı kalsiyum alüminat eklenir. Demir oksit kalsiyum alüminatta çözündüğünde, yeni oluşacak curuf içinde bulunacak olan demir oksit redüklenerek ve çelikte dengedeki doymuş durumdaki oksijende redüklenecektir. Böylece curufta demir demiroksit dengesi elde edilecektir. Bu sebeple aktivitenin deoksidasyon ürünleri ile modifikasyonu, çözünmüş oksijeni redükleyebilmek için ilk metoddur.

Çözünmüş oksijenin redüksiyonu için ikinci metod ise denge reaksiyonunu değiştirerek kimyasal dengelyi modifiye etmektir. Çelik üretiminde karbon her zaman mevcuttur ve aşağıdaki eşitlik çözünmüş oksijenin aktivitesini belirler.



BOF'da, verilen sıcaklıkta oksijen aktivitesi için alt limiti belirler. CO basıncı 1 atmosfere ulaştığında, düşük karbon yüksek oksijen aktivitelerine ve yüksek oksijen çözünürlüğüne sebep olur. Karbon deoksida çeliklerindeki oksijen daha ileride vakum veya inert gaz sistemleri ile modifiye edilebilir. Bu olay dengedeki karbon monoksit basıncını düşürecekler. Böylece verilen karbon miktarında daha düşük seviye oksijen içeren çeliklerin üretimi gerçekleşecektir.

Reaksiyon (2.2)'nin denge sabiti sıcaklık düştükçe artar ve deoksidan olarak sadece karbon içeren çeliklerin katılaştırılması sırasında yüksek miktarlarda CO oluşur.

Daha temiz bir ingot yüzeyi elde etmek için ingot dökümde kenarlama işlemi kullanılır. Ancak bu işlemin hafifçe uygulanması bile poroziteye sebep olur. Fakat kenarlama işlemi deoksidan malzemeler katılarak kontrol edilebilir. Silikon, manganez ve alüminyum gibi elementler rutin olarak katılarak oksijen aktiviteleri, kalıpta CO oluşumunu engelleyecek seviyelere çekilir.

Çelik temizliğinin pratikteki limiti kimyasal denge ile belirlenir. Bu değere ulaşabilmek için deoksidasyon reaksiyonu sırasında oluşan inklüzyonların katılaştırma öncesi dağılımının sağlanması gerekir. Genelde silikon ve manganez ile deoksida edilen çeliklerde denge sıvı mangan silikatın oluşumuyla sağlanır. Alüminyuma doymuş çelikler de denge katı alüminanın oluşumuyla, kalsiyum işlemi görmüş alüminyuma doymuş çeliklerde denge sıvı kalsiyum alüminatın oluşumuyla sağlanır. Daha ileriki oksijen redüksiyonunda verilen sıcaklıkta mangan silikat veya alümina curufta çözündürülebilir. Örneğin alüminanın curufta çözündürülmesi oksijeni 2 ppm'in altına indirir. Kalsiyum alüminat curufunda silikanın

çözünmesi silikanın aktivasyonunu azaltır çözülmüş oksijen miktarını alüminyuma doymuş çeliklerdeki dereceye getirir.

Çözülmüş oksijenin düşük seviyelerde tutulabilmesi için kimyasal dengeyi kullanmak oldukça yaygındır. Ancak bu çabanın etkili olabilmesi için çelikle temas içinde bulunan tüm fazların aynı denge şartlarında olması gereklidir. Eğer alüminyuma doymuş çelik dengede ise (2.1) reaksiyonuca dengede olmalıdır. Bu yüzden curuftaki FeO'nun aktivitesi oldukça düşük olmalı veya alüminyum curufla reaksiyon sonucu oksitlenmelidir. MnO ve SiO₂ dengesinde cüruftaki aktiviteler alüminyumun eklenmesiyle belirlenir. Ve curuf denge seviyelerinin üzerindeki seviyelere yükselmeler curufta reaksiyona ve alüminanın oluşmasına sebep olur. Bu yüzden çelik doyduktan sonra curuf sistemleri FeO ve MnO'da oldukça düşük olacak şekilde dizayn edilmelidir. Günümüzdeki fırın curufları FeO ve MnO açısından yüksek olduğundan curufsuz döküm teknikler ve curuf oluşturma kalsiyum karbür, alüminyum kullanım teknikleri geliştirilmiştir.

Çelik ve refrakterler arasındaki dengede dikkate alınmalıdır. Örnek olarak yüksek alümina refrakterleri %100 alümina değildir. Bu tip refrakterle birçok bağlayıcı katılmaktadır. Bu bağlayıcılar alüminadan daha az kararlı oksitler içerebilirler. Bu şartlar altında pota veya fırın refrakterleri sıvı çelik ile reaksiyona girecektir. Bu durum ancak iyi bir dizayn ile engellenebilir.

Yeni gelişmeler sonucunda sıvı çelik, hem curuf hem de refrakter ile dengede olacaktır.

İlginçtir ki curuf, metalurjik proseslerde metalle birlikte oluşan herhangi bir metal olmayan madde olarak tanımlanır. Ancak bu genel tanımlama zamanla değişmiştir. Artık sadece sıvı çeliğin üstünü kapayan sıvı oksitlerden söz edilmektedir. Örnek olarak pota curufları, tandış curufları, kalıp curufları gibi birincil ve ikincil deoksidasyon veya tekrar oksidasyon curuf inklüzyonları değil değildir. Bunlar metal olmayan inklüzyonlar veya inklüzyonlar olarak isimlendirilirler.

Diğer bir temizlik problemi dağılımı tamamlanmamış emülsüyon curuflardır. Bu problem curuf metal ara yüzeyindeki yüksek enerji dağılımından kaynaklanır. Potanın boşaltılması ve curuf metal arayüzeyinde oluşan yüzey çalkantıları bu tip inklüzyonlara sebep olur. Bu inklüzyonların 20-200 mikron arasında değişir. Fakat bu inklüzyonlara çok fazla rastlanmaz .

Diğer bir inklüzyon kaynağı ise reafreakterlerin erozyonu , korozyonu ve proses sırasında nozulun kaynak kısmını taşımasıdır.

Temizliğin temel seviyesi inklüzyon oluşum oranı ile giderilme oranı arasındaki dengedir. Çelikte inklüzyon, giderilme oranı oluşma oranından fazla olmalıdır.

Bu sebeple çelik – curuf, çelik – refrakter reaksiyonlarının azaltılması en kısa proses süresinde inklüzyon geçişini en aza indirecektir. Sıvı çeliğin hava ile reoksidasyonu yüksek oranlarda inklüzyon oluşumuna sebep olur ve bu sebepten dolayı inklüzyon oluşum oranı inklüzyon giderilme oranından daha fazla olur. Bu yüzden herhangi doğal bir kaynağın inklüzyon giderilimi açısından limiti oksijen, oksidasyonunun başladığı noktadır.

2.2. Ara Yüzeye Transfer

Yukarıda inklüzyonların oluşumu anlatılmıştır. Termodinamik en kararlı inklüzyonun kimyası hakkında tahmin yapmaya izin verir ancak inklüzyonların boyutları hakkında tahmin yapmaya izin vermez. Inklüzyon giderilimi amaç olduğunda inklüzyon boyut dağılımı, inklüzyonların yüzeye taşınma oranını belirlemede anahtardır. Yüzey inklüzyonların sıvı çelikten ayrıldığı bölgedir.

Deoksidasyon ve tekrar oksitleme inklüzyonları ile önce sıvı çelikte çekirdeklenirler. Bu çekirdekler sıvıdaki difüzyon tarafından belirlenen büyüme oranına kadar büyürler. Ölçülen en küçük inklüzyon boyutu 15 nanometre civarındadır. Bu inklüzyon pratik çelik üretim şartlarında ilk 1-5 mikrona oldukça hızlı büyürler. Sıvı çalkantısı taneciklerin topaklanmasına yardım ederler. Katı inklüzyonlar kolayca birikim gösterirler. Bu sebeple 5 mikrondan küçük çaplı inklüzyonlara ve 5-200 mikron dan küçük inklüzyonlara rastlanmaz.

Çelik temizliğinde amaç toplam inklüzyon sayısını azaltmak ve dökümden önce birikim göstermiş inklüzyonları gidermektir (Byrine ve Cramb, 1989).

Inklüzyonlar konusunda ilk çalışmalar yüzdürme esasına göredir. Bunun için stoke kanunları uygulanır.

$$V_t = \frac{2}{9} \frac{\Delta \rho g r^2}{\mu} \quad [3] \quad (2.3)$$

V_t = küre hızı

$\Delta \rho$ = tanecik yoğunluğu ile sıvı yoğunluğu arasındaki fark

μ = sıvı dinamik vizkozitesi

Stoke'a göre durgun banyoda, katı kürenin yüzdürme kuvvetlerinin etkisi altında hızının yoğunluk farklılığına bağlıdır. Stoke kanunu sadece viskoz akış rejimindeki katı küresel tanecikler içindir. Böyle bir durumda Reynolds sayısı 0,1'den küçüktür. Sıvı çelikteki küresel

alümina partikülleri için stoke kanuna göre bağlanma için minimum tanecik çapı 33.2 mikrondur. Reynolds sayısının 0.1'den büyük olduğu akışlarda problem yerçekimi kuvveti ile (yüzdürme-sürtünme) kuvvetlerinin kombinasyonu arasındaki denge olarak görülür.

Endüstriyel işlemlerde inklüzyon giderme oranı sadece stoke kanunu ve onun modifikasyonları ile açıklanamaz. Pratikte fırınlarda veya potalarda sıvı akışının etkisi arayüzeye akış sağlamaktır. Böylece problem standart sınır tabakası problemi olarak görülebilir. Burada sıvı akışı momentum sınır tabakasına sebep olur. Bu bölgenin kalınlığı akış bölgesine ve akışın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Inklüzyonlar sınır tabakasına sıvı hareketiyle taşınır. Sınır bölgesi yüzdürme kuvvetlerine bağlı bir arayüzeydedir. Yüzdürme kuvvetleri ara yüzeyin içinden geçer. Karıştırılan sistemlerdeki inklüzyon giderilimini hesaplamak için sınır bölgesinin şeklini ve durumunu belirlemek gereklidir. Daha sonrada sınır bölgesinden geçen ve sınır bölgesine temas süresi içinde dağılım gösteren inklüzyonların oranı hesaplanmalıdır. Isı ve kütle transferi şartları için Navier Stokes eşitlikleri çözülmelidir. Bu doğal konveksiyon faktörünü hesaba katarak, sıvı metalin bulunduğu kalıbın duvarlarına ve curuf metal yüzeyine karşı sınır tabakasının kalınlığını belirlemek için gereklidir. Curuf metal sınır tabakasının sıvı-sıvı arayüzeyi olduğu dikkate alınmalıdır. Sınır tabakasındaki her parçacığın akış koşulları ve dağılımın sıklığı taneciğin boyutunun fonksiyonu olarak belirlenmelidir. Tandişte geniş inklüzyonların hızlı yükseklileri sebebiyle dağılımları tamamiyle gerçekleşir. Inklüzyonların giderilimi ile birlikte inklüzyon boyutları da düşer.

(Joo vd., 1989) çalışması sonucunda, tandiştan geçip giderilemeyen inklüzyonlar çapları 40 mikrondan düşük inklüzyonlardır (akış hızı 0,5 mm/s) ve bu inklüzyonların giderilme verimi %50'den azdır. Tundişteki yöntemin kullanıldığı potadaki inklüzyon gideriliminin bilgisayar modellenmesi henüz yapılmamıştır. Ancak, sıvı fazdaki kütle transferi olayı çok iyi anlaşılmıştır. Aşağıdaki eşitlik , pratik sonuçları göstermek için yeterli bir eşitliktir (Türkdoğan, 1983a).

$$C_t = C_o \exp (-kt) \quad (2.4)$$

C_o = İlk durumdaki inklüzyon bileşiği

C = t zamanında inklüzyon konsantrasyonu

Türkdoğan(1983a), inklüzyon giderilmesini konsantrasyona bağlı olarak modeller. Schwerdtfeger (1983), alüminyuma doymuş çelikler üzerinde çalışma yaptığı fabrika analiz sonuçlarına göre toplam oksijen analizi için aşağıdaki bir eşitlik kurmuştur.

$$[O] = < [O]_i - [O]_e > \exp [-A_{keff} / V] + [O]_e \quad (2.5)$$

$[O]_e$ = Dengedeki oksijen konsantrasyonu

$[O]_i$ = İlk durumdaki oksijen konsantrasyonu

K_{eff} = A yüzey alanına bağlı etkili kütle transfer katsayısı

A = yüzey alanı

V = çeliğin hacmi

Schwerdtfeger (1983)'e göre k_{eff} karıştırma yoğunluğunun fonksiyonudur.

Herhangi bir tip potanın karıştırılması sıvı akış hızlarını artırır, sınır tabakası kalınlığını düşürür, inklüzyon giderme verimini artırır (İnklüzyon oluşumunu sağlayacak başka bir olay gerçekleşmezse). Kütle transfer katsayıları, karıştırma ile giren enerjinin fonksiyonudur. Ve inklüzyon giderme oranları bu enerji ile bağlantılıdır. Ancak bu yaklaşım küçük ve birbirine yakın boyuttaki taneciklerin (alümina) gibi taneciklerin giderilmesinde kullanılabilir. Fakat bu durum pota metalurjisi için uygundur.

Karıştırma ayrıca tanecik boyutuna da oldukça etki eder. Çalkantı tanecikler arasındaki teması böylece aglomerasyonu artırır. Çalkantının şiddeti inklüzyon topaklanmayı optimize etmelidir (Türkdoğan, 1983b).

2.3. Arayüzeyde Kararlılık veya Dağılım

Temiz metal üretiminde sıradaki adımı inklüzyonların sıvı çelikten bir arayüze dağılımlarıdır. Termodinamikten anlaşılacağı gibi inklüzyonlar sıvıçelikten – sıvıçelik çurufuna, sıvı çelikten- gaza veya sıvı çelikten refrakter yüzeyine geçtiklerinde daha az enerjiye sahip olurlar. Bu yüzden eğer inklüzyon herhangi bir yüzeye geçicekse, bu yüzeyde inklüzyonlar kararlı olacaklardır (Itoh, 1996).

Eğer inklüzyon bir yüzeye geçicekse, inklüzyon ile ara yüzey arasındaki sıvı kurumalıdır. Daha sonra iki arayüzey arasında kendiliğinden bir gözenek oluşur ve büyür bu şekilde parçacığın ara yüzeye geçişi tamamlanır. Gözeneğin oluşum enerjisi sıvı çelik ile arayüzeyler arasındaki ara yüzey enerjisine ve parçacık ile arayüzey arasındaki mesafeye bağlıdır. Gözeneğin oluşabilmesi için enerji şarttır. Gözeneğin boyutunu toplam ara yüzey alanı parçacığın veya damlacığın adsorbsiyonu ile büyütür.

Son olarak inklüzyonlar arayüzeye tanışır. Ancak burada iki sıvıyı ayıran arayüzey enerjisini yenecek seviyede enerjiye sahip değildirler. Bu yüzden bir hareketsizlik zamanı geçer. Bu bölgede damlacıklar veya tanecikler kararlılırlar. Bu olay, akış sistemlerinde, sınır tabakasının hız gradyentine bağlı olarak arayüzey boyunca ilerleyip yüzeye ulaşan parçacıklara sebep olur. Sonuç olarak bu durum tekrar saçılmaya sebep olur. Bu yüzden

haraketsizlik zamanını geçerleştiren parçacıkların arayüzeyde dağılım verimleri birleşim olayından daha düşük olur. Bu şartlar altında parçacıkların sıvı çelikten tamamiyle giderilmeleri oldukça güç olur. Bu yüzden, sıvı çelikteki inklüzyonların boyutunu büyütmek oldukça önemlidir. Böylece parçacığın iç kuvvetleri ile yüzdürme kuvvetleri arayüzey kuvvetlerini yenerler. Bu şekilde inklüzyonların arayüzeyde dağılımları sağlanır. Ara yüzeydeki sıvı akışı da oldukça önemlidir (Kozakevitch ve Olette, 1972).

İnklüzyonların refrakter ara yüzeyine dağılımları kararlılığa sebep olabilir. Ancak refrakter ara yüzeyinde kararlı olan parçacıklar sıvı çalkantısının etkisiyle geri dönerler. Filtrasyonda veya yüzeyi biriktirici gibi davranarak topaklanmaya yardım ederler.

2.4. Ara Yüzeyden Giderilme

İnklüzyonların sıvı çelikten tamamen saçılması arayüzeyden giderilmeyide içerir. İnküzyonların giderilmesini sağlayan ana tekniklerden biri sıvı curufa çözündürmedir. Karışık sıvı akışlarında bu aşama sıvı inklüzyonlar için problem değildir. Örtü curuflarına karışabilir sıvı inklüzyonlar pota tandişinde kalıpta bulunur. Katı inklüzyonların örtü curufunda karışabilmesi için sınırlı çözünürlükleri vardır. Katı inklüzyonların örtü curufunda karışabilmesi için sınırlı çözünürlükleri vardır. Katı inklüzyonlar bulunduğu temiz çelik üretimi curuf kimyasına, curufun karıştırılmasına, curuf sıcaklığına ve curuf sıcaklık gradyentine bağlıdır.

Birçok inklüzyon giderme modeli, inklüzyonların arayüzeye taşınması aşamasını oran belirleme aşaması olarak farz eder. Arayüzeye dağılım ve arayüzeyden giderilmesi ise önemsiz sayarlar. Ancak arayüzeye dağılım termodinamik olarak ideal taşıma olsada, curuf fazındaki difüzyon curuf kimyasına bağlıdır. Curufun içinde çözünmeye benzer yöntemde inklüzyon saçılması, parçacığının çözünürlüğünün ve curuf içinde difüzyonun önemli olduğu karma durum tarafından kontrol edilir (Olette ve Riboud, 1972).

Bu işlem kinetik olarak incelenecek olursa ideal olarak malzemenin akışının cüruf metal ara yüzeyinden uzak olması katı inklüzyonların curuf metal ara yüzeyine girmesinden çok daha iyidir. Böylece arayüzey konsantrasyonu curufun doyma sınırından daha aşağıda olur. Curufta doyma konsantrasyonlarına ulaşıldığında inklüzyonlar arayüzeyde birikirler, topaklaşmaya uğrarlar. Daha sonra difüzyon ve curuftaki karışma oranının izin verdiği ölçüde çözünürler. Curuftaki sıcaklık gradyentleride çözünürlük açısından oldukça önemlidir. Çözünürlük, sıcaklık ile düştüğünde, curufun toplam çözebileceği inklüzyon kapasitesi ve artan sıvı curuf kimyası ve sıcaklık ile belirlenir (Miyanaga vd. , 1996).

3. SAFLAŞTIRMA İŞLEMLERİNDE BÜYÜMENİN VE AYIRMANIN MODELLENMESİ

Alüminyum ergitme işlemlerindeki inklüzyon giderilmesinin kuramsal modellenmesi, akışın, taşımadaki türbülansın ve dağılmış fazların ayrılmasının etkilerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyar. Farklı partikül akışına veya değişmez örnek akışına dayanan geleneksel modeller yukarıdaki sözü edilen etkileri dikkate almazlar. Bu çalışma bir populasyon balans modelini açıklamaktadır. Bu model dinamik davranışı ve karıştırılan ergimiş metaldeki inklüzyonların ayrımını gösterir. Aynı zamanda bu populasyon balance eşitliğinin çözümlerine dayanır. Eşitlik eriyikteki inklüzyonların konveksiyonel olarak taşınmasına izin verir. Bağlanmış sıvı akışının ve tanecik balans eşitliklerinin usullerinde açıklanmaktadır. Bu model, model tahminlerinin 10 min SiC ve Al₂O₃ partiküllerinin levita edilmiş alüminyum damlacıklarındaki giderilme oranlarının ölçümleriyle karşılaştırılmasıyla test edilmiştir.

Parçacık boyut dağılımlarının gelişmesi ve inklüzyon giderme oranı dikkate alınarak ölçümlerde ve tahammüllerde mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Bu uygulanan tekniği onaylamaktadır.

3.1. İnküzyonların Endüstriyel Etkisi

Bilindiği gibi metal olmayan inklüzyonlar alüminyum ürünlerin güvenilirliğini ve performansını ciddi biçimde etkilemektedir. Bu inklüzyonların bulunması sadece katılığı ve mukavemeti azaltmakla kalmayıp, Porozite oluşumuna ve ingot dökümlerde çatlakların oluşmasını sağlamaktadır. Yüksek saflık ihtiyacı oldukça, DC veya EMC dökümden önce eriyikteki her fazda inklüzyon giderilmesi gerekli olmaktadır. Kaldırma (hadding) fırını curufun ve çöken büyük inklüzyonların giderilmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanında gaz giderme sistemleri küçük parçacıklar ve sıvı inklüzyonlar için kullanılmaktadır. Seramik köpüğü ve derin yatak filtrasyonu dökümden önce eriyiğin son tashihi için kullanılır.

Bütün sistemlerde ortak özellik olarak, sıvı akışı tüm sistemin inklüzyon giderme veriminin belirlenmesinde anahtar görev görür. Akış inklüzyon giderme işlemlerini iki şekilde etkiler. Birincisinde konveksiyon eriyik içinde akar böylece inklüzyonların giderilmek üzere adsorbsiyon ve absorbsiyon yüzeylerine ulaşmaları için gerekli zaman azalır. İkincisinde ise akış kararsız durumdaki inklüzyon tanecikleri arasındaki çarpışmaların oluşmasını sağlar böylece büyük parçacık oluşması sağlanır. Büyük parçacıkların eriyiğin büyük bir kısmında atılması daha kolaydır. Sayıda ve boyutta değişmeler, çarpışmalara dayanarak eriyikteki parçacıkların dağılımı da, inklüzyon giderme mekanizması ne olursa olsun, inklüzyon

giderme oranını etkiler. Tüm bu faktörler adsorbsiyon yüzeyindeki inklüzyon giderme oranını etkilemekle kalmaz aynı zamanda ergitme işlemi operasyonu sonunda karşılaşılabilecek inklüzyon taneciklerinin sayısını ve boyut sınıflandırmasını da etkiler.

Ergitme işlemi sistemlerinde, ergiyikteki inklüzyonların eliminasyonunu problemini modellemek için iki durum belirlenmelidir. Birincisi sistemdeki hız alanı ve çalkantı karakteristikliğinin belirlenmesidir. İkinci durum ise konveksiyon büyüme ve giderilme etkisindeki parçacık popülasyonunun dinamik davranışdır. Bu olay Smolochowskinin pıhtılaşma teorisi kullanılarak modellenenebilir. Inklüzyonların konsantrasyonu sistemin hız alanına etki edebilecek kadar düşük olduğunda problemin iki durumu aynı anda çözümlenmelidir.

Alüminyum ergitme işlemi sistemlerinde sıvı akışının modellenmesinde yayınlanan çalışmanın geniş çalışmanın belirlenmesi için, inklüzyon aglomerasyonunda akışın etkisi ve bu sistemlerde giderilme dikkate alınmıştır. Bunun için temel sebep çoğunlukla giderilme ve çarpışan proseslerinin matematiksel açıklaması için değil fakat Smoluchowski Populasyon balans eşitliklerindeki hesaplama zorluklarını çözmektir. Çeşitli çözüm metodları, nispeten daha kısa zamanlarda doğru sonuçlar alabilmek için geliştirilmiştir. Ancak bu metodlar akışta homojen tanecik sistemleri olduğunda uygulanabilir.

Şimdi çalışmanın amacı, inklüzyon davranışının modellenmesi ve dinamik davranıştaki inklüzyon giderimi için sağlam bir çözüm metodu geliştirmektir. Ergitme işlemi sistemlerinde inklüzyon gideriminin modellenmesinde bu formülasyon potansiyel gerekliliğinde, teorik tahminlerle deneysel ölçümler arasında kritik karşılaştırmalar yapılması önemlidir.

3.2. Matematiksel Formülasyon

Gerçekte, problem ergiyikte hız alanını, türbülans karakteristiklerini tanımlamak ve karıştırmadaki giderilme ve birleşmeye bağlı olarak inklüzyon boyutlarında ve yoğunluklarındaki değişikliklerin sonuçlandırılmasıdır.

3.3. Sıvı Akış Modeli

Sıvı akış probleminin genel ifadesi çalkantılı taşıma momentum eşitliklerinin terimleriyle kendiliğinden yazılır. Çalkantı doğası en iyi kuş türbülans modeli ile modellenir. Bu model doğrudan çalkantı enerjisi dağılım alanını verir. Bu olay ergiyikteki taneciklerin çarpışma oranını hesaplamak için gereklidir. Sıvı akış eşitlikleri aşağıdaki şekildedir.

devamlılığın eşitliği:

$$\nabla \cdot \rho \cdot U = 0 \quad (3.1)$$

Devinimin eşitliği:

$$U \cdot \nabla (\rho \cdot u) = - \nabla \rho - \nabla (\mu_1 + \mu_t) \nabla u + \rho g + J \times B \quad (3.2)$$

U = Zaman ortalama hız vektörüdür.

ρ = Sıvının yoğunluğu

μ_1 = Laminar hız viskozitesi

μ_t = çalkantı (turbülent) hız viskozitesi

g = yerçekimi ivmesi

$(J \times B)$ = elektromanyetik kütle güçleri

k - ϵ çalkantı modeli:

Bu modelde

Çalkantı (turbulent) viskozitesi μ_t aşağıdaki gibi verilir;

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (3.3)$$

k = çalkantı (turbülent) kinetik enerjisi

ϵ = çalkantı (turbülent) enerjisi dağılımı

c_μ = sabit

k ve ϵ için differansiyel denklem aşağıdaki gibi verilir;

$$\rho(U \cdot \nabla)k = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu_l \right) \nabla k + G - \rho \epsilon \quad (3.4)$$

$$\rho(U \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu_l \right) \nabla \epsilon + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - 2c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

G = çalkantının (turbülans) meydana gelme hızı C_1 , C_2 , σ_k , σ_ϵ ve C_μ = sabitler.

3.4. Inklüzyon Giderme Modeli

Smoluchowski pıhtılaşma (koagülasyon) teorisi, sıvı içinde hareket eden parçacıklara uyarlanmıştır. Bu teori non-lineer parsiyel diferansiyel denklemler ailesi için açıklanmıştır.

$$\frac{\partial n_k(x, t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \mu_{p,j}(x, t) \cdot n_k(x, t)}{\partial x_j} =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \beta_{i,k-i} \cdot n_i n_{k-i} - \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{k,i} \cdot n_i n_k - S_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (3.6)$$

t = time

x = partikül koordinatları

u_p = hız

n_k = yarıçap r_k olan k sınıfı boyutundaki taneciklerin sayısal konsantrasyonu.

$B_{i,k}$ = i ve k boyut sınıflarının çarpışma konsantrasyonu

S_k = k partiküllerinin giderilme oranları

(3.6) eşitliğinin sol tarafı k parçacıklarının hızını ve birikimini gösterir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk iki terim k sınıfının çarpışmalara bağlı olarak oluşumlarını ve yok oluşlarını gösterir (sırasıyla). 3.terim ise adsorbsiyon yerlerindeki k partiküllerinin giderim oranını gösterir.

Parçacıkların sıvıda pasif bir şekilde hareket ettiği farz olunduğunda yani $u_p = U$. Bu ergitme ısı işlem sistemlerinde olduğu gibi Reynolds sayısı akışlarındaki mikron boyutundaki parçacıklar için makul bir varsayım olur. Eşitlik(3.6) aşağıdaki yazılabilir.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + U \cdot \nabla n_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \beta_{i,k-i} \eta_i \eta_{k-i} - \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{k,i} \eta_i \eta_k - S_k \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7), akış sistemler için Smoluchowski Populasyon balans eşitliğinin modifiye edilmiş şeklidir.

Fakat, çok miktarda parsiyel differansiyel eşitlik içerdiğinden dolayı, şimdiki formda geniş partikül boyut aralıkları içeren sistemlerde yeterince doğru ve verimli çözülemez. Kaynak teriminin lineer olmaması, genişlemiş katsayılar aracılığı ile $\beta_{i,k}$, nümerik kararsızlıklara ve hatalara neden olabilir.

Bu zorluklardan dolayı, bu eşitliği çözmek için eşitlik normal diferansiyel eşitlikler haline getirir. Bunun için ayrıntılı sistem homojen eleman sayılarına bölünür. Eşitlik (3.7), normal vektör n ve hız u ile yüzeye (s) bağlı olarak, keyfi bir hacim (V) elemanı üzerinden integre edildiğinde Şekil 3.1'de gösterildiği gibi ve Green Teorimi uygulandığında aşağıdaki eşitlik elde edilir (Elkaddah vd., 1999)

$$\frac{dn_k}{dt} + \frac{1}{V} \xi_{\gamma} u n_k \cdot d\bar{S} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \beta_{i,k-i} \eta_i \eta_{k-i} - \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{k,i} \eta_i \eta_k - S_k \quad (3.8)$$

Bu modele, inklüzyon giderme oranı S_k aşağıdaki gibi ifade edilir.

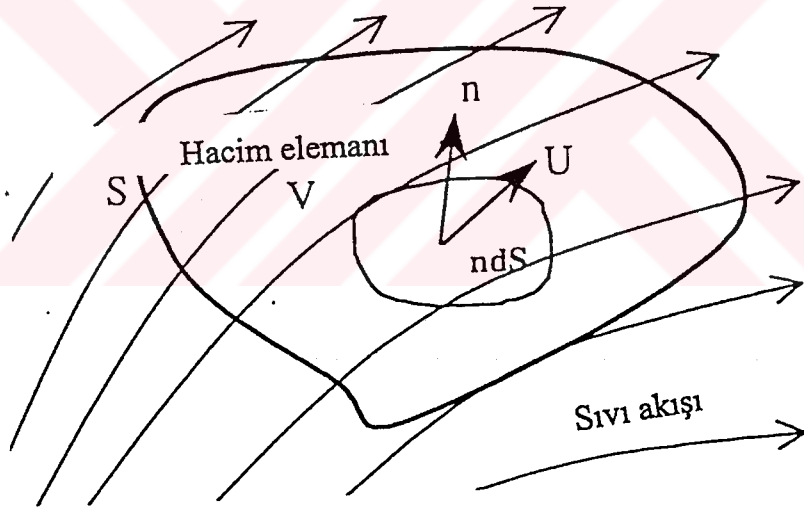
$$S_k = f \cdot R_k \cdot \eta_k$$

$R_k = k$ partiküllerinin, inklüzyon giderme yüzeyleri ile çarpışmanın frekansı

$f =$ katsayı

Bilinmelidir ki S_k , duvar elementleri dışında tüm elementlerde 0'dır.

Eşitlik (3.8)'in çözümü için nümerik algoritm oldukça basittir. Temel olarak, konvektif akışın, giriliş olan şebeke ve hız alanlarından belirlenmesini içerir. Bunu partikül konsantrasyon sayısı hesaplanması takip eder. Daha sonraki aşamada ileri zaman farklı planı uygulanır. Kararlı bir çözüm elde etmek için zaman aşaması akışın zaman skalasından az olmalıdır. Bilinmelidir ki algoritma önemli derecede hesaplama verimine izin vermektedir. Ayrıca geleneksel sınırlı eleman kullanımından ve farklı metodlardan elde edilen çözümlerden çok daha doğru çözümler elde edilmektedir.



Şekil 3.1 Akış nüfuz alanındaki, hacim kontrol bölgesi [Elkaddah, 1999]

4. ELEKTROMANYETİK OLARAK OLUŞTURULAN ÇEVİRİM AKIMLARINDA İNKLÜZYON GİDERİLMESİNİN KİNETİĞİ

Deneysel ölçümler Levita edilen demir parçacıklarında aşılarmış olan 2mμ.lik MnOSiO₂ partiküllerinin kaldırma hızını belirlemek için yapılmıştır. Damlacıktaki elektromanyetik ve akış olaylarının matematiksel modeli, akışın iki tane yeniden çevrim döngüsü ile karakterize edildiğini gösterir. Damlacığın alt yarısında iki döngü arasında akış durulma bölgesi, en yüksek elektromanyetik güç yoğunluğuna sahip olur. Ergiyikten serbest yüzeye inklüzyon gidermenin akış durulma bölgesinde olduğu görüldü. Aynı zamanda böyle küçük partiküllerin birleşiminde karıştırmanın küçük bir etkiye sahip olduğu görüldü. Çalışmada geliştirilen populasyon denge modeli, deneysel verileri ve elektromanyetik olarak levita edilen eriyik metal damlacıktaki sıvı inklüzyonların giderilmesinin mekanizmasının açıklanabilmesi için kullanılmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak, akış durgunluk bölgelerinde elektromanyetik güçler yardımıyla partikül ayrılmasının inklüzyonların giderilmesinde önemli rolü olduğu gösterilmiştir.

4.1. Inklüzyonların Gideriliminin Üretim Açısından İncelenmesi

Kaliteli çelik üretimi için metal olmayan inklüzyonlar olmadan büyüme gereklidir. Bunun gerçekleşmesi için sürekli dökümden önce pota metalurjisi işlemleri gereklidir. Çoğu pota metalurjisi işlemlerinde, ergiyiği karıştırmak için elektromanyetik güçler kullanılır. Bu olay birleşime yani birikime neden olur ve böylece inklüzyonların serbest yüzeye akışı sağlanır. Bu şekilde inklüzyonlar eriyikten ayrılırlar. Karıştırma inklüzyon partiküllerini akış girdabı ile yakaladığından, verimli inklüzyon giderimi için uygulanan karıştırıcı gücün genişlemesinde kritik bir denge vardır. Pratik deneyimler, çalkalanma kombinasyonun ve akışın laminanizasyonun verimli inklüzyon giderimi için gerekli olduğunu göstermiştir.

Resirkülasyon akımlarında, inklüzyon birikimi ve giderilmesi için karıştırıcının kesin etkileri anlaşılandan uzaktır. Ergimiş metalde birikimin miktarını önceden tahmine etmek genellikle zordur. Çünkü bu olay akışına göre sadece çarpışmaların frekansına bağlı değil aynı zamanda çarpışmalara göre birikim verimini belirleyen yüzey güçlerine bağlıdır. Ayrıca ergiyikten değişik mekanizmalarla örneğin adsorpsiyon, adhesyon, yüzdürme vs.sınırlarda inklüzyon gidermenin kinetiği ilgili veri bulunmamaktadır. Çünkü bu olay sadece sınırlara yakın akışa değil aynı zamanda sınırlara sıkışan parçacıklara bağlıdır.

Bu çalışmanın amacı elektromanyetik olarak karıştırılan ergiyik demirdeki sıvı inklüzyonların davranışlarına fiziksel bir anlayış getirmektir. MnOSiO₂ inklüzyonlarının giderilme ve

birikme oranı Marechal tarafından geliştirilen teknik ile ölçülmüştür bunun için levita edilmiş demir eriyik demir damlacıkları kullanılmıştır.

Bu, eriyik metalden inklüzyon gideriliminin kinetiği çalışması için yapılmıştır. Levita edilmiş damlacıktaki akış karakteristikleri nümerik olarak belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar populasyon denge tekniği kullanılarak yorumlanmıştır. Bu, karıştırılan eriyiklerde inklüzyonların davranışlarının anlaşılmasını sağlar.



5. KONVEKSİYONUN AGLOMERASYON VE METAL OLMAYAN İNKLÜZYONLARIN ERGİYİK ALÜMİNYUMDA GİDERİLMESİNDE ETKİSİ

Bu çalışma, katı inklüzyon arçacıklarının elektromanyetik olarak karıştırılan erimiş alüminyum içindeki davranışlarına fiziksel bir bakış açısı getirmek için yapılmıştır. Aglomerasyonun ve 10 µm SiC ve Al₂O₃ parçacıklarının karıştırma sırasındaki kinetiği ile vitasyon ergitme tekniği kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları inklüzyon parçacıkların giderilmesinin akış ayrılma bölgesinde veya bölgelerinde meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Levita edilen damacıklar da Al₂O₃ ve SiC'ün ölçülmüş olan Aglomerasyon oranları, laminar ve çalkantılı akışlardaki tanecik çarpışmalarından tahmin edilene göre daha az bulunmuştur. Görülmüştür ki inklüzyonların doğası aglomerasyon ve giderilme işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Çekirdeklenme ve büyüme teorilerinde sıkışma katsayısı, taneciklerin aglomerasyonunun ve giderilmesinin kinetiğini açıklamakta kullanılmıştır. Aglomerasyon ve inklüzyon giderilmesi sıvı metalde olmaktadır. SiC ve Al₂O₃'ü ergiyik alüminyumda çok düşük sıkışma kat sayıları olduğu görülmüştür. Katsayılar 0, 03 civarındadır.

5.1. Endüstriyel Uygulaması

Son yıllarda, kaliteli döküm alüminyumun çizgisel ısıtma işlemi çok önemli hale gelmiştir. Bu olay levha ürün uygulamalarında gerekli olan temiz dökümler için gereklidir. Şu andaki teknoloji ile arzu edilen ergiyik temizliğini tek bir sistemle elde etmek mümkün değildir. Ancak eriyiğin bir dizi işlemlerden geçirilmesiyle bu sağlanmaktadır.

Verimli inklüzyon giderilimi için karmaşık gaz giderme ve filtrasyon sistemi geliştirilmesinde oldukça dikkat gösterilmiştir. Bu şekilde holding (kaldırma) fırınından gelen ergiyikteki inklüzyon miktarıyla performans görülmüştür. Holding (kaldırma) fırınının büyük boyuttaki inklüzyonları gidermede verimli olduğu kabul edilir. Çünkü banyo nispeten durgundur. Küçük boyuttaki inklüzyonların daha ileriki redüksiyon aşamalarında extra holding (kaldırma) zamanı gereklidir. Bu da fırının verimliliğini düşürür.

Son zamanlarda kaldırma fırınlarında elektromanyetik karıştırma kullanımı dikkate alınmaya başlanmıştır. Elektromanyetik karıştırma ergiyiğin homojenizasyon ve daha uniform sıcaklık elde etmek için gereklidir. Holding (kaldırma)fırınlarında karıştırmanın etkilerinde iki ayrı bakış açısı vardır.

Birincisinde karıştırmanın inklüzyonların yerleşmelerini zarar vereceği düşünülmektedir böylece inklüzyonlar eriyikte tutulur. İkincisi karıştırmanın, eriyiğin temizliğin yüksek tutacağıdır. Konveksiyonun, küçük inklüzyonların büyük inklüzyonlara yapışmayı sağladığı tartışılmıştır. Konveksiyon taneciklerin fırın duvarına hızlı taşınmasını sağlar.

Inklüzyonların giderilmesinde karıştırma etkisindeki anlaşmazlık, birikmiş inklüzyon tabakasının refrakter duvara yapışma fırındaki sıvı alüminyumda olmaktadır. Bunlar yüzey olayı ile bağlantılı olan çarpışmaya bağlı partiküllerin birikimi ve katı ve serbest yüzeylere inklüzyonların yapışması ile ilgili şimdiki anlayışımızdaki geniş boşluğun altını çizer. Taneciklerin aglomerasyonu ve giderilmeleri sadece sistemin hidrodinamiğine bağlı olmayıp aynı zamanda taneciklerin etkileşimlerine bağlı olduğu için temel önemli noktanın kapsamı geniştir. Inklüzyonların doğasına (kompozisyon, durum (sıvı-katı), şekil, boyut etc. bağlı olan yüzey güçleri aglomerasyon ve inklüzyon gideriliminin kinetiğine etki eder. Bu tip bilgi ölçümlerde elde edilebilir. Güncel olarak ergiyik alüminyumda inklüzyonların aglomerasyonu ve giderilmesinde yüzey güçlerinin rolünü ile ilgili kinetik bir data yoktur. Rapor edilmiş ölçümler genellikle çelikteki inklüzyon aglomerasyonu ve giderilimi ile ilgilidir.

Bu çalışmaların (ölçümlerin) sonuçlarında ergiyik çelikteki inklüzyon aglomerasyonu ve giderilmesinde inklüzyon etkileşimlerinin, küçük bir etkisi olduğunun görülmesi ile birlikte bu sonuçlar deneysel doğrulama olmadan alüminyumda direkt olarak kullanılamaz.

Bu çalışmanın amacı ergiyik alüminyumda katı inklüzyonların giderilmesi ve aglomerasyonunda konveksiyonun rolü ile ilgili temel bir anlayış getirmektir.

Elektromanyetik olarak karıştırılan ergiyik alüminyumda 10 μm SiC ve Al_2O_3 inklüzyon taneciklerinin davranışı levitasyon ergitme tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Bu teknik eriyik serbest yüzeylerinde çalışmaya izin vermektedir. Bu şekilde katı duvarların engellemesi olmamaktadır. Aynı zamanda bu teknikle inklüzyon taneciklerinin tüm numunede izleri takip edilebilmektedir. Böylece tanecik aglomerasyonu ve gideriliminin oranları hakkında güvenilir bir bilgiye erişilir.

6. KARIŞTIRMA DONATIMLARI

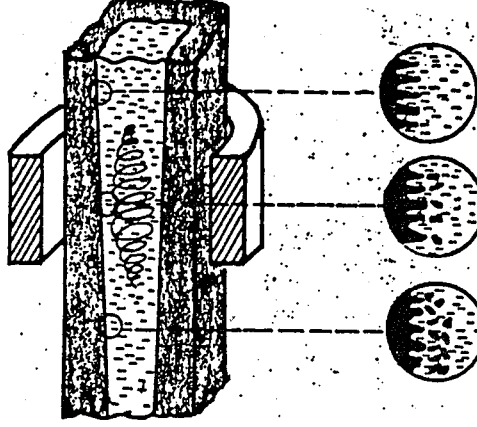
Katılaşmakta olan sıvı bir metal alaşımının karıştırılması ile daha iyi bir iç yapı elde edilebildiği eskiden beri bilinmektedir. Bilhassa bazı metal alaşımlarında karıştırmanın olumlu yönleri son senelerde çok daha iyi anlaşılmış ve çeşitli karıştırma yöntemleri geliştirilmiştir .

Çelik malzemeler bilindiği gibi dentritik yapıda katılaşan malzemelerin başında gelir. Dayanım özelliklerini çok olumsuz yönde etkileyen böyle bir katılaşma önlem alınmadığı takdirde çeliğin sürekli dökümünde çok daha kolay meydana gelir . Dökümde aşırı ısıtma sıcaklığını düşük tutmak ve sıvı metali katılaşma esnasında karıştırmak bu önlemlerin başında gelir.

Sıvı metali ; gaz akımı vibrasyon , kısa ses dalgaları veya elektro manyetik alan etkisi altında karıştırmak mümkün olup ; bu prensiplere dayanan bir çok yöntem geliştirilmiştir . Bunlardan sürekli dökümde kullanmaya en uygun olanı elektromanyetik karıştırma yöntemidir.

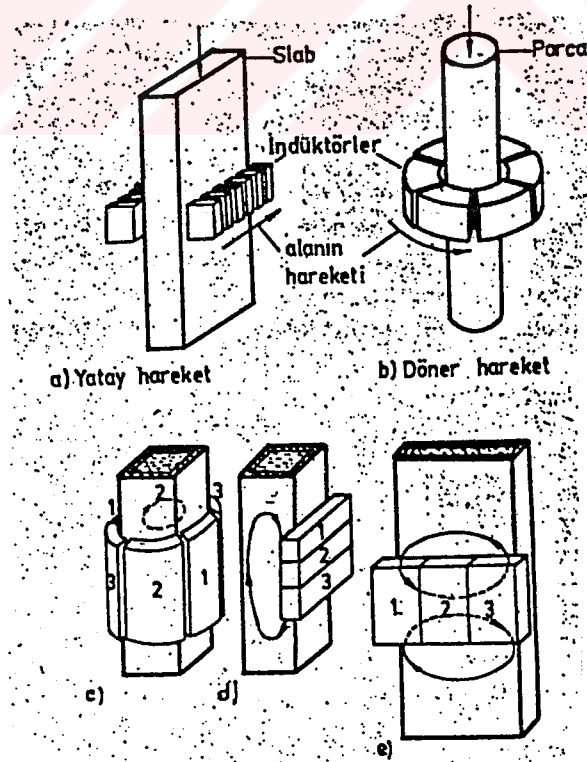
6.1. Elektromanyetik Karıştırma

Elektromanyetik karıştırma kalıpta veya ikinci soğutma bölgesinde yapılır. Kalıpta yapılan karıştırma ile metalik olmayan karışımları ayırmak, parça yüzey kalitesini iyileştirmek amacı güdülmektedir. İkinci soğutma bölgesinde karıştırmanın amacı ise aşırı ısıtma sıcaklığının olumsuz etkisini , dentritik yapı oluşumunu ve orta bölgedeki toplanmaları azaltmaktır. Sürekli dökümde elektromanyetik karıştırma en çok çelik ve alaşımlarının sürekli dökümünde kullanılır. Örneğin çeliğin sürekli dökümünde kalıptan sonraki bölgede katılaşmada uzun dendirid kolları meydana gelir. Elektromanyetik alan etkisiyle sıvı metal harekete geçirilerek dendirid kollarının parçalanması sağlanır. Bu parçalar katılaşmada çekirdek etkisi yaparak globilutik bir katılaşma meydana getirir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Elektromanyetik karıştırma ile dentritlerin parçalanması [Avcı, 1993]

Karıştırıcının döküm sisteminde uygulanacağı bölge-kalıp veya ikinci soğutma bölgesi saptandıktan sonra sıra karıştırmanın hangi doğrultuda ve genişlikte yapılması gerektiği sorusuna gelir . Bu nokta belirlendikten sonra buna dayanarak uygun manyetik alanın ve bunu sağlayacak indüktörlerin (indüksiyon bobinlerinin) tertibine sıra gelir . Genel olarak uygulanan manyetik alanlar döner ve doğrusal yürür alanlar olmakla beraber son yıllarda spiral hareketli alanlarda kullanılmaya başlamıştır. Şekil 6.2’de başlıca indüktör tertipleri verilmiştir.



Şekil 6.2 Sürekli dökümde indüktörlerin tanzimi.[Avcı, 1993]

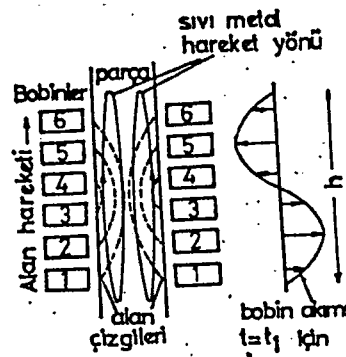
Ancak spiral alanlar da esasta döner ve yürür alanların beraberce kullanılmasıyla bunların bileşkesinden oluşan bir alandır . Alan içindeki sıvı metal belirli bir kayma ile manyetik indüksiyon vektörünü takip eder . Kütük dökümlerine döner , yürür veya spiral alanlarla karıştırma yapıldığı halde slab dökümlerinde sadece yürür alanlar kullanılmaktadır . Bunun sebebi slab kesitlerinde döner sıvı hareketine karşı köşeler ve dar kenarların aşırı direnç göstermesidir .

Karıştırma gücü , bobin akımının optimum frekansı , henüz yaklaşık olarak , cıva veya düşük sıcaklıkta ergiyen metalleri kullanarak model deneylerle saptanabilmektedir.

6.1.1. Elektromanyetik Karıştırmanın Fiziksel Prensibi

Elektromanyetik karıştırıcılar birer manyetik alan üreticileridir . Manyetik alan kaynağı tarafından yayılan alan çizgilerinin sıvı metale kadar yayılması gerekir. Sıvı metal içindeki bu değişken manyetik alan , sıvı bölgesi içinde aynı frekanslı kendine dik bir indüktif akım meydana getirir Manyetik alan ve indüktif akımın müşterek etkisi ise $F=(J \times B)$ kuvvetini oluşturur. Sıvı metal işte bu kuvvetin etkisi altında hareket ederek az veya çok karışır .

Manyetik alan hareketi birçok elektromanyetiğin (indüktif bobinin = indüktörün) istenen hareketi sağlayacak şekilde dizilmeleri ile meydana getirilir örneğin Şekil 6.3 'deki 1, 2, 3, 4, 5, 6 tarzındaki dizilişte bobinlerin her biri sıra ile maksimum alan oluşturacak şekilde beslenirse alan (h.f) hızı ile yukarıya doğru hareket eder. (h= indüktör , f= frekans).

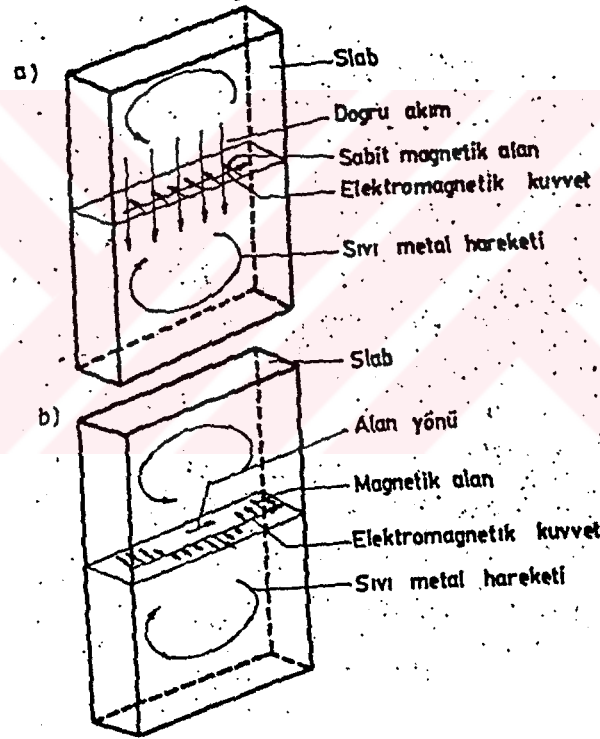


Şekil 6.3 Düşey hareketli elektromanyetik alan oluşumu [Avcı, 1993]

Sıvı metal içinde meydana getirilen manyetik alan sürekli veya değişken olabilir. Değişken manyetik alan bir indüksiyon bobini (indüktör) meydana getirilir . Bu bobin alternatif bir akıma bağlanırsa bobin etrafında akım frekansında bir manyetik alan oluşur. Buna elektromanyetik alan denir. Böyle bir manyetik alan kaynağı (indüktör) sıvı metali de etkisi

altına alacak kadar ona yaklaştırılırsa, sıvı metal içinde bu değişken alan sebebiyle aynı zamanda ve aynı frekanslı fakat manyetik alana dik bir elektrik akımı (indüktif akım) doğar. Bu akım ve manyetik alanın müşterek etkisi ise her ikisine dik oluşan karıştırma kuvvetleridir (Şekil 6.4b.). Bu prensibe göre yapılan karıştırmaya ' indüktif karıştırma ' karıştırma denir.

Sıvı metal içinde bu karıştırma kuvvetlerini kondüktif olarak da oluşturmak mümkündür . Bunun için sıvı metal içinde yine bir manyetik alan ve buna dik bir elektrik akımına ihtiyaç vardır . Eğer manyetik alan sürekli manyetiklerce , elektrik akımı da bir akım kaynağı ile sağlanırsa hasil olan kuvvetlerle sıvıyı karıştırmaya " kondüktif " karıştırma denir (Şekil 6.4a)



a) Kondüktif alan

b) İndüktif alan

Şekil 6.4 Elektromanyetik karıştırmanın prensibi [Avcı, 1993]

Kondüktif karıştırma

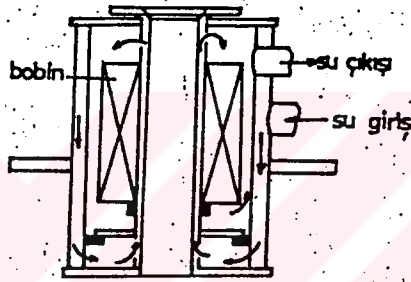
İndüktif karıştırma

Karıştırma işleminde , karıştırmanın yapıldığı bölgeye ve parça şekline göre farklılıklar bulunur. Bu nedenle karıştırmayı kalıp içinde ve ikinci soğutma bölgesinde olmak üzere ayrı

ayrı incelemek daha yerinde olacaktır . Ayrıca kütük veya slab döküldüğüne göre de karıştırmada bazı farklılıklar mevcuttur.

6.2. Magnetogyr Karıştırma

Bu karıştırma sisteminde sıvı metal kalıp içindeyken karıştırılmaktadır . Kalıp etrafına elektromanyetik bir bobin (indüktör) yerleştirilmiştir . Bu bobin bir asenkron stator sargısına benzer. Bobin tarafından meydana getirilen döner yatay elektro manyetik alan kokil cidarlarından sıvı metale geçer . Alan kokil eksenini etrafında çok fazlı bobin akımı ile aynı fazda döner. Bunun hasıl ettiği indüktif alan sonucu oluşan kuvvet kalıp içindeki sıvı metale bir dönme hareketi verir. Şekil 6.5’de Magnetogyr karıştırıcılı kalıp görülmektedir.



Şekil 6.5 Magnetogyr karıştırıcılı kalıp [Avcı, 1993]

6.3. Spiral karıştırıcılar

Yeni geliştirilmiş olan bu yöntemde döner ve yürür hareketli karıştırıcıların avantajları bir araya getirilmiştir . Bu şekilde parça eksenine dik düzlemde hızlı bir döner hareketli karıştırma ile eksen boyunca yürür malzeme hareketi sağlanır.

Döner ve yürür hareketlerin sonucu parça içinde bir spiral hareket sayesinde ise kuvvetli dönü hareketi ile uzun dendritler parçalanır , geniş alanlı ve derinlemesine spiral hareket ile de katılma bölgesinin alt ve üst kısmında kuvvetli bir malzeme karışımı ve ısı değişimi olur bunun sonucu ise parçanın tümünde homojen bir yapı elde edilir. Karıştırıcının bir demir çekirdek üzerinde ayrı ayrı sarılmış iki bobini bulunur. Döner ve yürür alan bobinlerini teşkil eden bu iki bobin birbirinden bağımsız ayrı iki akım kaynağından beslenirler.

Bu şekilde spiral bir alan oluşturulabileceği gibi yalnızca bir döner veya yürür alanda elde edilebilir. Su soğutmalı döner alan bobini üç fazlı, yürür alan bobini iki fazlıdır. Bobinleri ihtiva eden indüktör kısmı kapalı bir kutu ile çevre etkilerinden korunur. Kutunun içi ısıtım ısıya karşı su soğutmalı antimanyetik ve paslanmaz çelik sac ile kaplanmıştır.

Bu tip karıştırıcılar bilhassa karbonu %0,5'in üzerinde olan çeliklerin sürekli dökümünde kullanılmaktadır (Avcı, 1993).



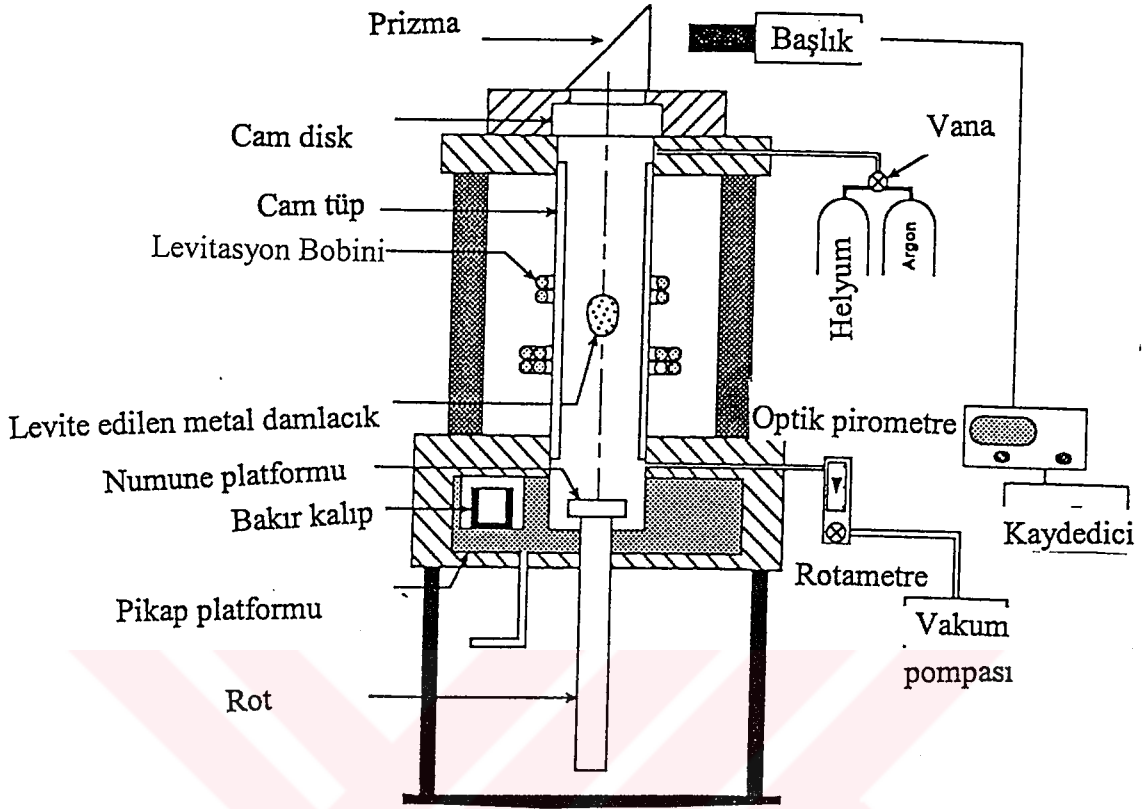
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Elektromanyetik Levitasyon ile İnküzyonların Ara Yüzeylere Ötellenmesi.

7.1.1 Deneyler Sırasında Kullanılan Cihazlar

Şekil 7.1’de deney cihazının krokisini göstermektedir, kuvars levitasyon tüpü ve bunun etrafında 6 defa çevrilmiş lavitasyon bobininden oluşur. Bobinin çapı 5`mm olup 10 kw.lık Lepel rady frekans indüksiyon jeneratörüne bağlıdır. Levitasyon güç bölgesi 220 A ve 250 kHz frekans kullanılarak, bobin ile elde edilmiştir Metalin içinde levita edildiği levitasyon hücresi iki tane paslanmaz çelik plakadan oluşur. Bunların arasında yüksek saflıkta saydam kuvars tüp vardır. Bu cam tüp plakalara Oringler yardımıyla oturtulur. Hücrenin, üst plakasında gözlem penceresi vardır. Bu pencere Capintec kızılötesi optik pirometre yardımıyla numunenin sıcaklığını ölçmek için kullanılır. Gazlar hücreye üst flanşdan girip alt flanşdan hücreyi terk ederler. Gaz dizisi iki değişik gazın kullanılmasına izin verir. Gazlardan biri ergitme sırasında diğeri ise damlacıklara su verme esnasında kullanılır. Yüksek saflıkta (%99.99) Helyum ergitme aşamasında hücreye 5 l/dak akış verimi ile verilir. Numuneye su verilmesi aşamasında hücreye ticari saflıkta helyum verilir. Akış verimi (>60 l/dak)’dır. Gazların değiştirilmesinde solenoit valf kullanılır.

Eriyik serbest düzeyinde cüruf oluşumu ve davranışı yakalayabilir uyumda lensleri olan CCD kamera ile gözlenir.



Şekil 7.1 Deney aparatının krokisi [Maréchal, 1993]

7.1.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyde 1 gramlık 10 μ metalik olmayan tanecikler aşılanmış , levita edilmiş çalışmada iki tür inklüzyon kullanılmıştır bunlar SiC ve Al_2O_3 tanecikleridir. Numuneler hacimsel olarak %1 oranda inklüzyon içermektedir.

7.1.3. Deneyin Yapılışı

Deney sırasında numune elektromanyetik levitasyon hücresinde 11 dakika boyunca levitasyona uğratılmıştır. Deney sıcaklığı 700 derecedir. Deney 16:11'de başlamış olup numunenin 16:12'de renginin kırmızı olduğu görülmüş ve ergidiği anlaşılmıştır. Deney 16:32'de son bulmuştur.

7.1.4. Deney sonuçları

Deney sonrasında numune kristal uçlu kesici ile kesilmiş ve metal ışık mikroskopunda mikrografları çekilmiştir. Şekil 7.2.a hiç deney işlemi görmemiş malzemenin iç yapısı, Şekil

7.2.b deney işlemi görmüş malzemenin yapısıdır. İkisinin arasındaki fark deney sırasında inklüzyonların ara yüzeye ötelendiğini göstermektedir.



a) Deney yapılmamış malzeme ($\times 200$)

b) Deney sonunda malzeme iç yapısı ($\times 200$)

Şekil 7.2 Numune mikroagrafları.(Numune iç yapısındaki değişim)

7.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Deneysel Çalışmalar

7.2.1. Saflaştırma Proseslerinde Büyüme ve Seperasyon Deneyi

7.2.1.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

1 gramlık 10 μm non-metalik tanecikler aşılınmış, lavita edilmiş alüminyum numuneler ile yapılmıştır. Çalışmada iki tür inklüzyon kullanılmıştır. Bunlar SiC ve Al_2O_3 tanecikleridir. Numuneler hacimsel olarak %1 oranda inklüzyon içermektedir. Numuneler Pechiney CRV de hazırlanmıştır.

7.2.1.2. Deneyin Yapılışı

Damlacık içinde parçacık değişim dağılımı, lavita edilmesi sırasında erimiş şeklini koruması ve inklüzyon taneciklerinin yerlerinin belirlenmesi için, numuneye su verilerek ölçülmüştür. Inklüzyonların konsantrasyonu ve boyut dağılımları, damlacıkta yerini korumuş olan taneciklerin boyutlarının ve miktarlarının ölçümüyle hesaplanır. Bu veriler inklüzyonların birleşme ve giderilme oranlarının hesaplanmasında kullanılır.

7.2.1.3. Ölçümlerin Tahminlerle Karşılaştırılması

Bu bölümde hem tahminlerin hemde deneysel ölçümlerin seçimleri görülecektir. Şimdi deneysel ölçümler karıştırılan ergimiş metalde tanecik boyut dağılımları değişimi hakkında en geniş verileri içermektedir. Bu olay tahminlerin doğruluğunu test etmek için iyi bir fırsattır. Bu durum tüm inklüzyon giderme oranını ele almakla kalmaz aynı zamanda ergiyikte inklüzyonların uzaysal dağılımları ile de ilgilidir.

Şekil 7.3'de damlacıktaki hesaplanmış hız alanını göstermektedir. Görüldüğü gibi akış 2 resirkulasyon yapan halka ile gösterilmiştir. Üstte büyük halka altta ise küçük halka görülmektedir. Bu iki halka arasındaki akış dağılım alanı 130°lik simetri ekseni ile yerleşmiştir. Bilinmelidir ergiyikten inklüzyon giderimi bu bölgede gerçekleşmektedir. Damlacık içindeki hız oldukça yoğun olmasına rağmen çalkantı yoğunluğu inklüzyon çarpışmaları oluşturmak için çok düşüktür.

Şekil 7.4'de değişik karıştırma zamanlarında damlacık içindeki deneysel olarak ölçülmüş tanecik dağılımlarını göstermektedir. Bu şekillerde noktalar orjinal 10µm lik parçacıkları ifade etmektedir. Siyah çembersel şekiller ise birleşmiş parçacıkları temsil eder. Bu şekilde gösterilen boyutları 20 µm den büyük topakları ifade eder. Inklüzyon taneciklerinin akış dağılımı alanında yakalanmaları oldukça açıktır.

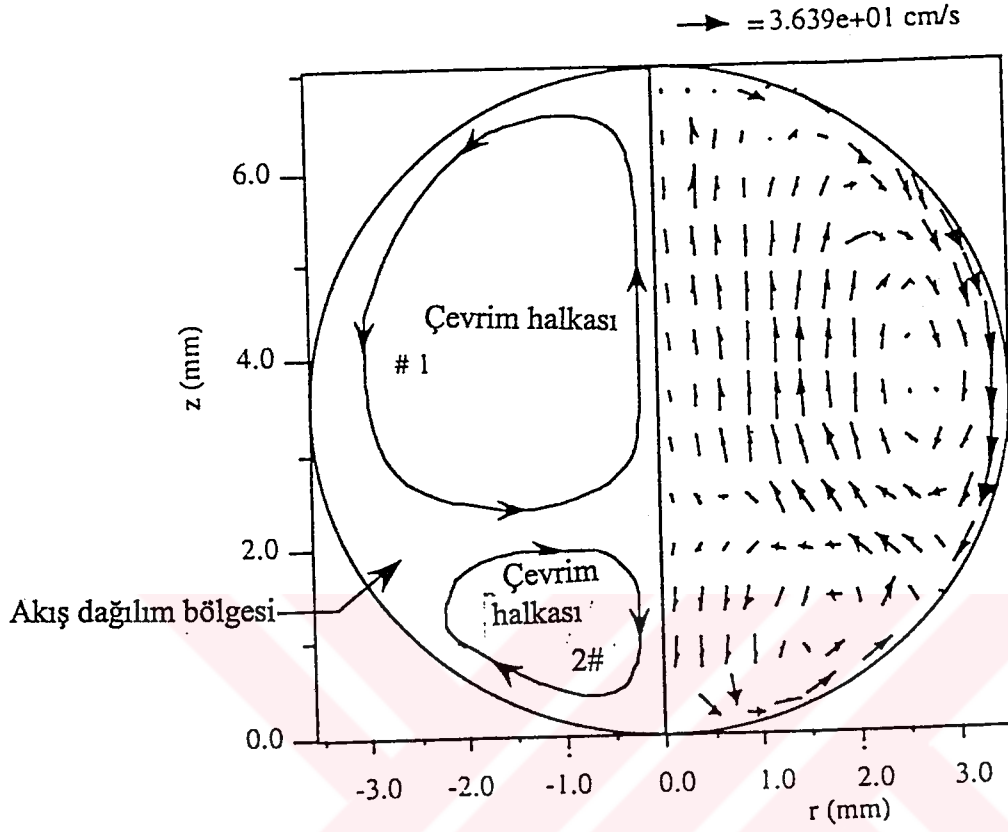
Benzer olarak hesaplanmış tanecik dağılım haritaları Şekil 7.5'de görülmektedir. Görüldüğü gibi hesap sonuçları ergiyikteki tüm inklüzyon giderimini ve damlacıktaki tanecik dağılımları ele alan deneysel gözlemleri tekrarlamaktadır. Çok ilginçtir ki bu model taneciklerin akış dağılım bölgesinde birikimini önceden doğru olarak söyleyebilmektedir.

Tahminlerde ve ölçümlerde elde edilen kantitatif uzlaşım, inklüzyonun dinamik davranışına önem vermektedir. Böylece tanecik konveksiyonunu, birikimi ve giderimi ele alan fiziksel prosesler modelde çok iyi ifade edildiği görülmüştür.

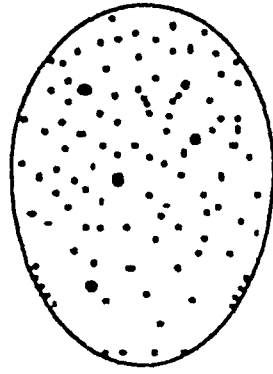
Şekil 7.6'de deneysel olarak ölçülmüş inklüzyon giderilme oranları ile teorik tahminlerin karşılaştırılmasını göstermektedir. Görüldüğü gibi tahminlerde ve ölçümlerde makul derecede uyum vardır. Bu modelin, inklüzyon giderilme parçasının geçerliliğini doğrudan desteklemektedir.

Şekil 7.7'de nümerik tahminler ile deneysel olarak ölçülmüş zamanın fonksiyonu olarak küme oranlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Yine birikim gösteren parçacıkların giderilmesi ve oluşum oranı ve kümelerin tam değerlerine göre bir uzlaşım görülmektedir. Bu olay açıkça,

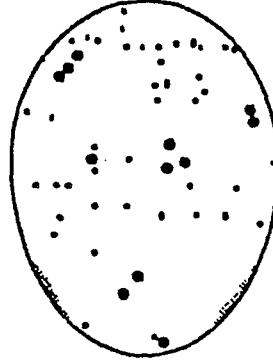
dinamik akış sistemlerinde büyümenin ve giderilme proseslerinin modelleme ile doğru tahmin edildiğini göstermektedir.



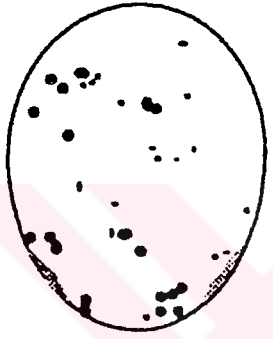
Şekil 7.3 Alüminyum damlacıkta hesaplanmış hız alanı.[Elkaddah, 1999]



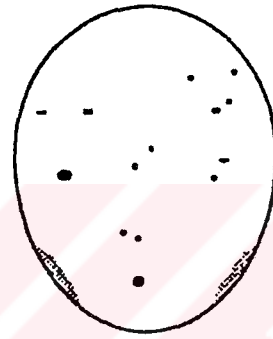
(a) : 5 s



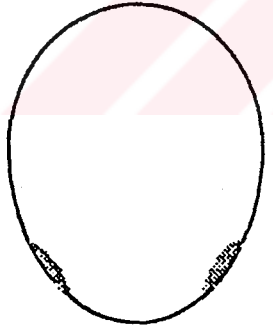
(b) : 20 s



(c) : 1 Dak



(d) : 5 Dak



(e) : 20 Dak



Parçacıkların yüksek konsantrasyonu

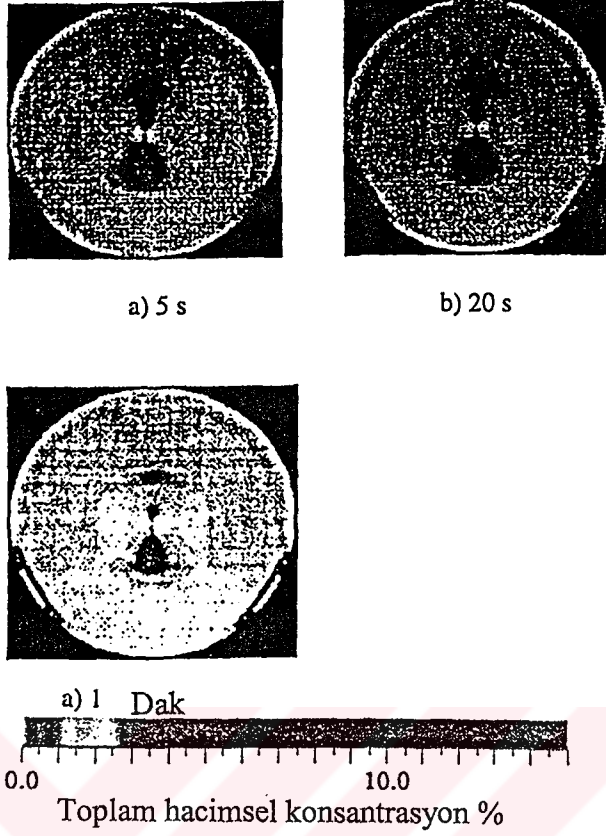


Tek parçacık

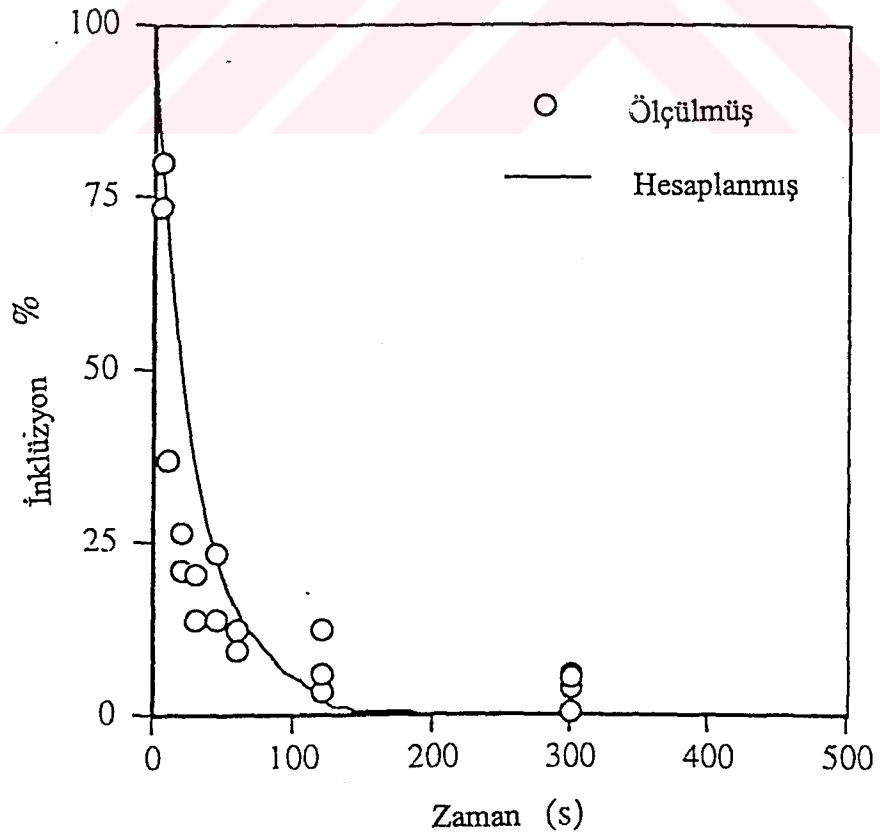


Birikim göstermiş parçacıklar

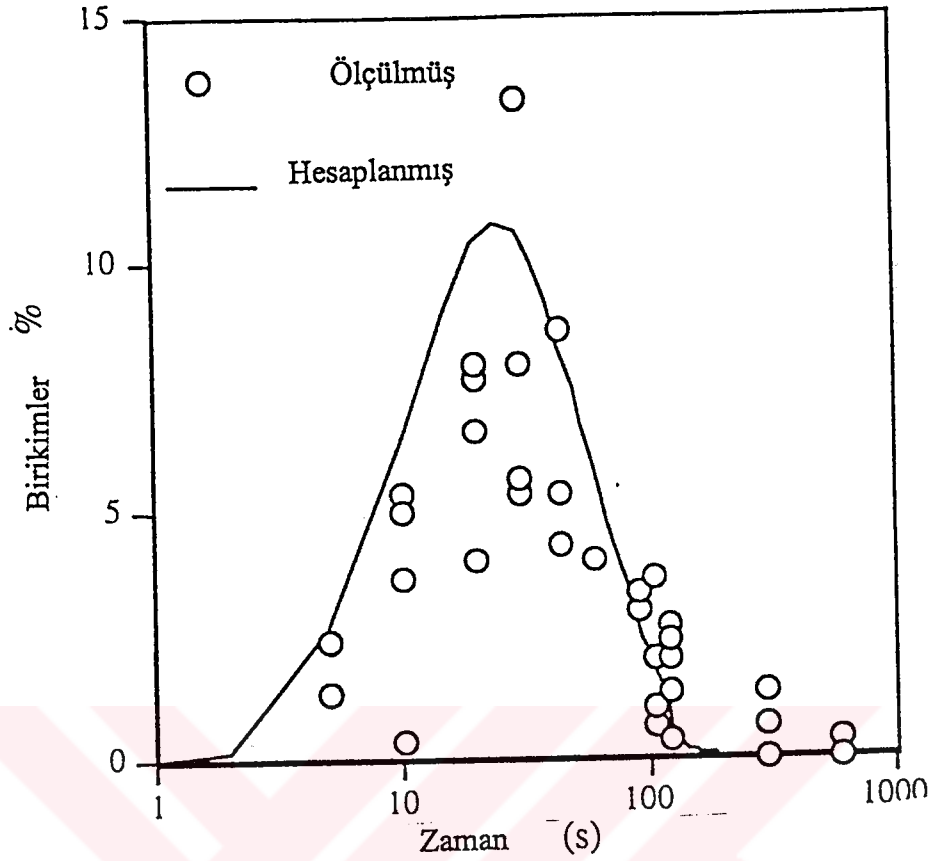
Şekil 7.4 Değişik karıştırma zamanlarında, parçacık içinde tanecik dağılımı [Elkaddah, 1999]



Şekil 7.5 Değişik karıştırma zamanlarında damalcıkta hesaplanmış partikül dağılımı [Elkaddah, 1999]



Şekil 7.6 Tahmin edilen ve ölçülen inklüzyon giderme oranlarının karşılaştırılması [Elkaddah, 1999]



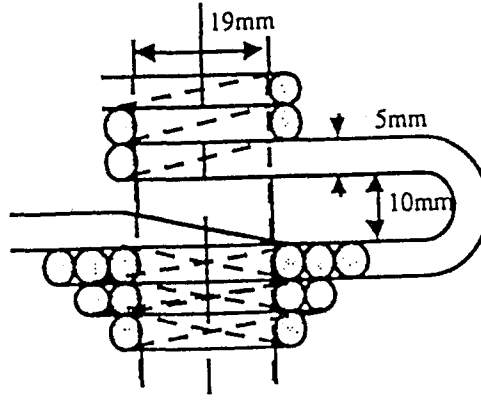
Şekil 7.7 Nümerik tahminler ile zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüş küme oranlarının karşılaştırılması [Elkaddah, 1999]

7.2.1.4. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

Akış sistemlerinin dinamik davranışları ve inklüzyon giderilmesi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model karıştırma sırasında inklüzyon giderme oranı gibi partikül boyut ve dağılımı hakkında da detaylı bilgi vermektedir. Kantitatif nümerik yaklaşım için Navier Stokes eşitlikleri kullanılmıştır. Ve modifiye edilmiş populasyon balans eşitlikleri deneysel ölçümlerle karşılaştırıldı ve mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Bu modelin, alüminyum ergitme ısı işlemlerindeki inklüzyon giderme operasyonları analizler için teorik bir temel çalışma olduğu görülmüştür.

7.2.2. Inklüzyon Giderilmesinin Kinetiği Deneyi

Şekil 7.8.'de 1 gramlık demir damlacığı levita etmek için kullanılan bobinin taslağını gösterir. Bu bobin dizaynı kararlı damlacık levitasyonu sağlar. Bobinin gücü 10 kw'lık lepel radyo frekans indüksiyon jeneratörü ile sağlanır. Çalışmada kömür akımı 320 A, frekans 250 kHz.dir.



Şekil 7.8 Bobin konfigürasyonu [Sawai, 1994]

7.2.2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

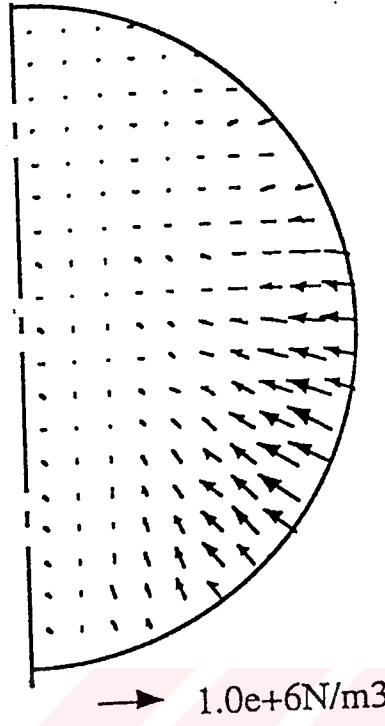
Yüksek saflıkta demir, manganez ve silikon (MnO-SiO_2) magnezyum silikat inklüzyon partikülleri aşılarmış demir numunelerin hazırlanmasında kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması, 200 gr elektrolitik demirin magnezyum oksit (MgO) crucible içinde indüksiyonla ergitilmesi ile olmuştur. Bu olay kontrollü atmosferde ve sabit oksijen potansiyelinde gerçekleşmiştir. Demir ergitildikten sonra eriyiğe %1,0 optik ve elektron prob mikroskop ile incelenmiştir. Bu inceleme, ingotun kesilip levitasyon deneyleri için 1 gr.lık numuneler oluşturulmadan önce yapılmıştır.

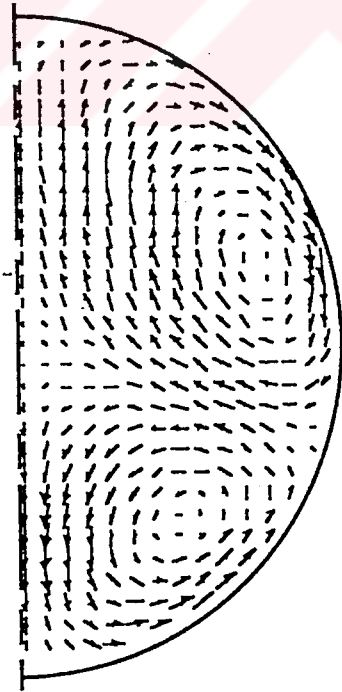
7.2.2.2. Deney Sonuçları ve Tartışmaları

Levita Edilmiş Ergiyik Damlacıkta Elektromanyetik ve Akış Alanları Sıvı akışının, aglomerasyonda ve inklüzyonların giderilmesindeki rolünü anlayabilmek için levita edilmiş damlacıktaki akışın doğasını belirlemek gereklidir. Elektromanyetik ve hız alanları sistemin matematiksel modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu modelde damlacık küresel olarak ele alınır. Bobin konfigürasyonu ve bu deneylerde kullanılan operasyon şartları için hesaplamalar yapılmıştır. Örneğin; numune ağırlığı, bobin akımı ve bobin frekansı gibi. Şekil 7.9'da damlacıktaki hesaplanmış elektromanyetik güç alanını gösterir.

Görüldüğü gibi elektromanyetik güçler ilk önce damlacığın alt yarısında harekete geçmektedir. Şekil 7.10 damlacıktaki hız alanını göstermektedir. Görüldüğü gibi akış, iki tane resirkülasyon halkası ile karakterize edilmektedir. Üstte geniş olanı altta ise küçük olanı bulunmaktadır. Akış ayrılma alanı iki halka arasında simetri eksenine 110° açı yapmıştır. Damlacığın yüzeyinde akış ayırma bölgesinde hız önemsiz derecede azdır. Damlacıktaki maksimum hız 15 cm/s'dir. Akış durgunluk bölgesinde elektromanyetik güçlerin oldukça yüksek olması ($1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^3$) oldukça ilginçtir.



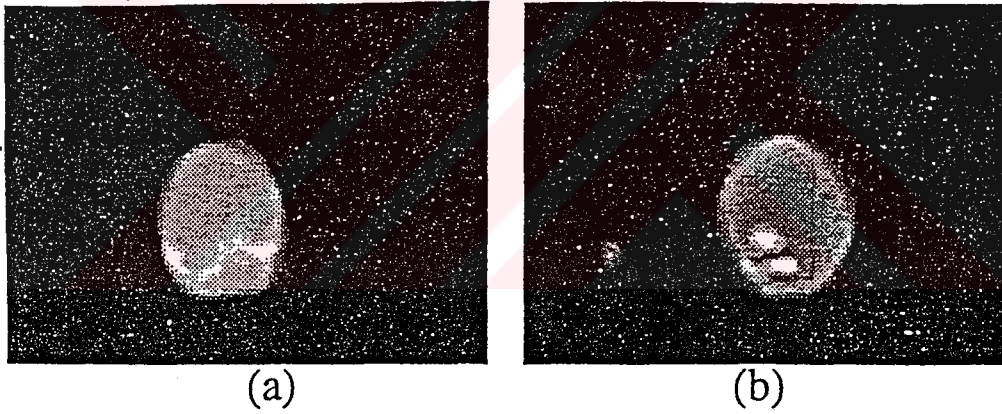
Şekil 7.9 Damlacıktaki hesaplanan elektromanyetik güç alanı [Sawai, 1994]



Şekil 7.10 Damlacıkta hesaplanan hız alanı [Sawai, 1994]

7.2.2.3. Serbest Yüzeyde İnküzyon Giderilmesi İn-Situ Gözlemlenmesi

Şekil 7.11(a) ve (b) levitasyon deneyleri sırasında çekilen kamera görüntülerini gösterir. Şekil 7.11(a) oksitlerin devamlı halkalarını gösterir. Şekil 7.11(b) damlacığın alt yarısında oksit tabakalarının oluşumunu gösterir. Gözlemlenen oksit kırılmaları damlacığın titreşimine yüzey kararsızlığına bağlıdır. Bu görüntülere göre serbest yüzeye parçacık geçişi akış durgunluk bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu bölge iki resirkülasyon halkası arasındadır. Akış durgunluk bölgesi Şekil 7.10'da görülmektedir. Bu açıklama su verilmiş numunenin yüzeyinin SEM'le incelenmesi sonucu konfirme edilmiştir. Şekil 7.12'ye göre geniş ve küçük mangan silikat tabakaları damlacığın alt yarısında görülmektedir. Damlacığın üst yarısında hiç camsı yapıya rastlanmamıştır. Mangan silikat demirden daha hafiftir. Bu gözlemler mekanizma olarak yüzdürmeyi inküzyon gideriliminde dışarıda bırakmaktadır. Akış ayrılma bölgesi inküzyonların yakalanma bölgesi olarak hareket ettiğinden, bu bölgede yakalanmış inküzyonlar için serbest yüzeye elektromanyetik güçler tarafından itildikleri şeklinde açıklama getirilir.



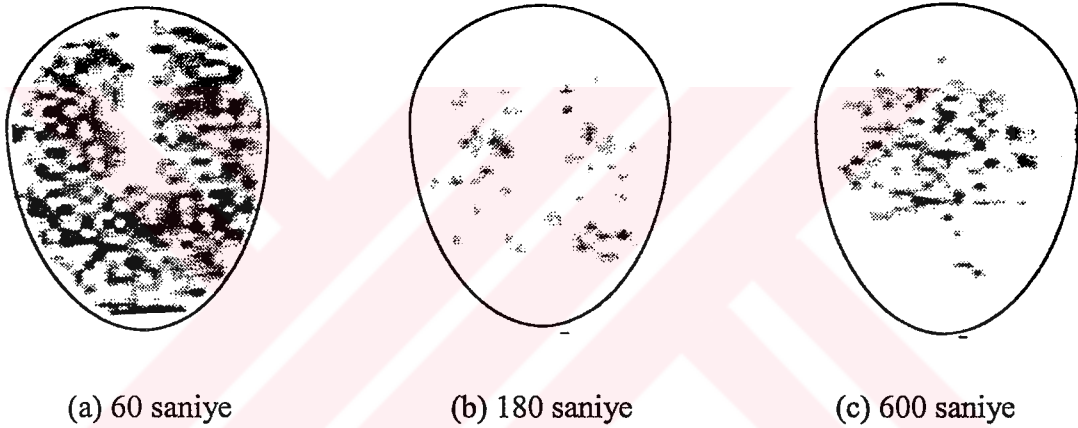
Şekil 7.11 Oksitlerin serbest yüzeydeki fotoğrafları (a) inküzyon (bant), (b) tabakalar [Sawai, 1994]



Şekil 7.12 Numune yüzeyinin SEM fotoğrafı [Sawai, 1994]

7.2.2.4. İnküzyon Giderilmesinin Kinetiği

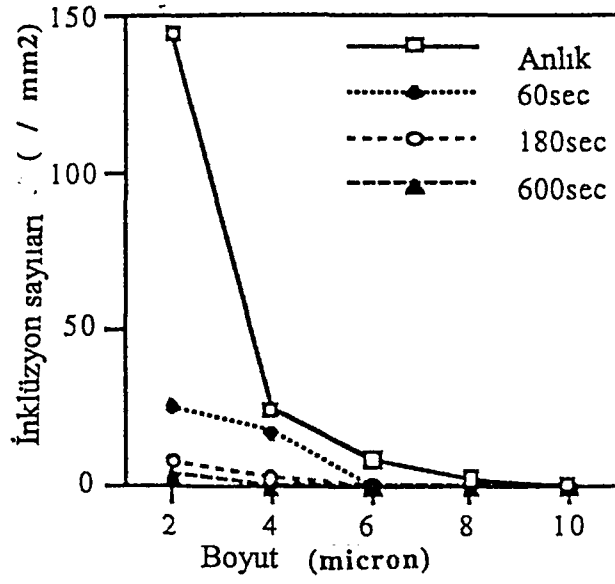
Şekil 7.13(a) dan (c) ye karıştırma sırasında damlacıktaki inküzyon dağılımı değişimini göstermektedir. Şekillerdeki karanlık bölgeler inküzyonları temsil ederler. Bu şekillere göre damlacıktaki güçlü elektromanyetik karıştırmaya rağmen partikül dağılımı homojenlik uzaktır. Bu şekiller aynı zamanda yüzeyden iç kısımlarda partiküllerin tükenişini gösterir. Bu olay ilk 180 saniyede partikül konsantrasyonunun hızlı azalmasını açıklar ve daha sonraki 600 saniye sonrasındaki partikül konsantrasyonundaki küçük değişmeyi açıklar. İnküzyon giderilimini partikül konsantrasyonuna bağlıdır.



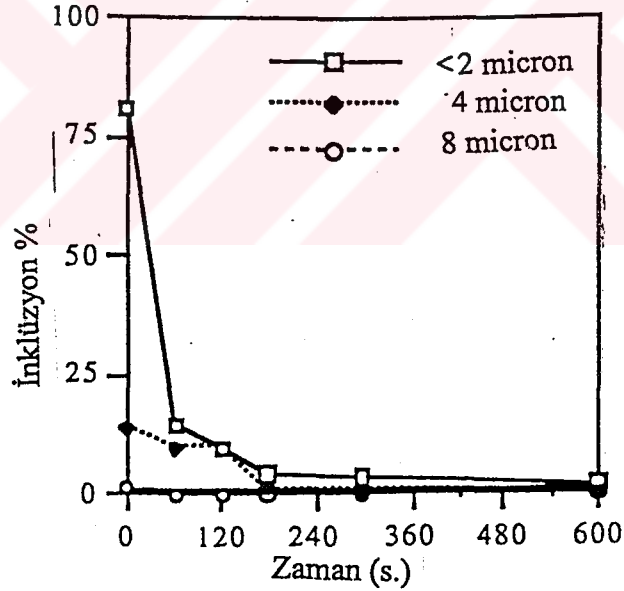
Şekil 7.13 Karıştırma sırasında levita edilen damlacıktaki partikül dağılımı değişimi [Sawai, 1994]

Şekil 7.14 değişik karıştırma zamanlarında ölçülmüş inküzyon boyut dağılımlarını gösterir. Deneyin değişik aşamalarında boyut dağılımları ilk boyut dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Numunedeki ilk boyut dağılımı (2-8 μm) dir.

Numunede ilk olarak büyük boyutlu inküzyon giderildiği görülmüştür. Karıştırmada ilk 60 saniyede boyutları $6\mu\text{m}$ den büyük olan parçacıklar ergiyikten atılır. Zamanla $2\mu\text{m}$ den büyük parçalar görülmeyeceği için, ergiyik içinde güçlü bir karıştırma olmasına rağmen bu gibi küçük parçacıkların birikimlerini düşük olduğu görülmektedir. Bu olay yavaş topaklaşmadan dolayı mikron büyüklüğündeki parçacıkların giderilmesinin zorluğunu belirginleştirmektedir. Şekil 7.15 karıştırma sırasında değişik boyutlardaki inküzyonların giderilme oranlarını gösterir. $2\mu\text{m}$.lik inküzyonların ilk ani düşüşleri inküzyon gideriliminde yer almaları ve aglomerasyon sebebiyledir. $2\mu\text{m}$.lik parçacıkların topaklaşması $4\mu\text{m}$.lik inküzyonların ilk 120 saniyedeki düşük giderilme oranının sebebidir.



Şekil. 7.14 İnküzyonların damlacıktaki boyut dağılımı [Sawai, 1994]



Şekil 7.15 İnküzyonların karıştırılma sırasındaki giderilme oranı [Sawai, 1994]

7.2.2.5. Damlacıktaki İnküzyon Gideriliminin Analizleri

Hazır olan inküzyon giderme mekanizmasını ve aglomerasyonun inküzyon giderme oranına etkisini incelemek için populasyon balans modeli kullanılmıştır. Birikim gösteren ve giderilen taneciklerin sistemi için değişik boyutlardaki parçacıkların sayısal konsantrasyonları non-lineer diferansiyel eşitlik sistemleri ile açıklanabilir.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-1} n_i n_{k-i} - \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{k,i} n_k n_i - S_k \quad (7.1)$$

n_k = k boyutundaki taneciklerin konsantrasyon sayısı

(k= primer partiküllerin sayısı)

t = zaman

$\beta_{i,k}$ = partikül birikim parametresi

S_k = k partiküllerinin giderilme oranı

Levita edilen damlacıktaki akış laminar olduğu için ve sıvı damlacıkların birikim verimi nerdeyse birleşik olduğu için, Manganez Silikat inklüzyonları için tanecik frekans parametresi aşağıdaki gibidir.

$$\beta_{i,k} = \frac{4}{3} \nabla \cdot (R_i + R_k)^3 \quad (7.2)$$

Tanecik dağılımının akış durulma bölgesinde iki re sirkülasyon halkası arasında elektromanyetik güçler tarafından düşünülürse, eriyikten serbest yüzeye inklüzyon giderme oranı aşağıdaki gibi gösterilir.

$$S_k = f V_p A n_k \quad (7.3)$$

f= tanecik giderilişinin verimidir.

A = Akış durulma bölgesinin yüzey alanı

V_p = Elektromanyetik güçler etkisindeki taneciklerin göç hızı

Heşaplanmış akış bölgesine dayanarak durulma bölgesi aşağıdaki gibi verilir.

$$A = 2\pi r \sin \theta L \quad (7.4)$$

r = Damlacığın yarı çapı

θ = Akış durulma bölgesinin simetri ekseni ile yaptığı açı

L = Akış durulma bölgesinin ark uzunluğu

İletken olmayan küresel partiküller için birim hacim gelen elektromanyetik ayırma gücü aşağıdaki gibidir (Elkaddah ve Sawai, 1994).

$$F_p = \frac{\pi}{8} F_{em} d_p^3 \quad (7.5)$$

F_{em} = Elektromanyetik güç

d_p = Parçacığın çapı

Stoke çekimi varsayılarak parçacığın hareketinin eşitliğinden, tanecığın elektromanyetik alandaki göç hızı aşağıdaki gibi gösterilir.

$$V_p = \frac{d_p^2 F_{em}}{24\mu} \quad (7.6)$$

μ = Ergimiş demirin viskozitesi

Bu çalışmada kullanılan deneysel şartlar altında

$$r = 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\theta = 110^\circ$$

$$L = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m}$$

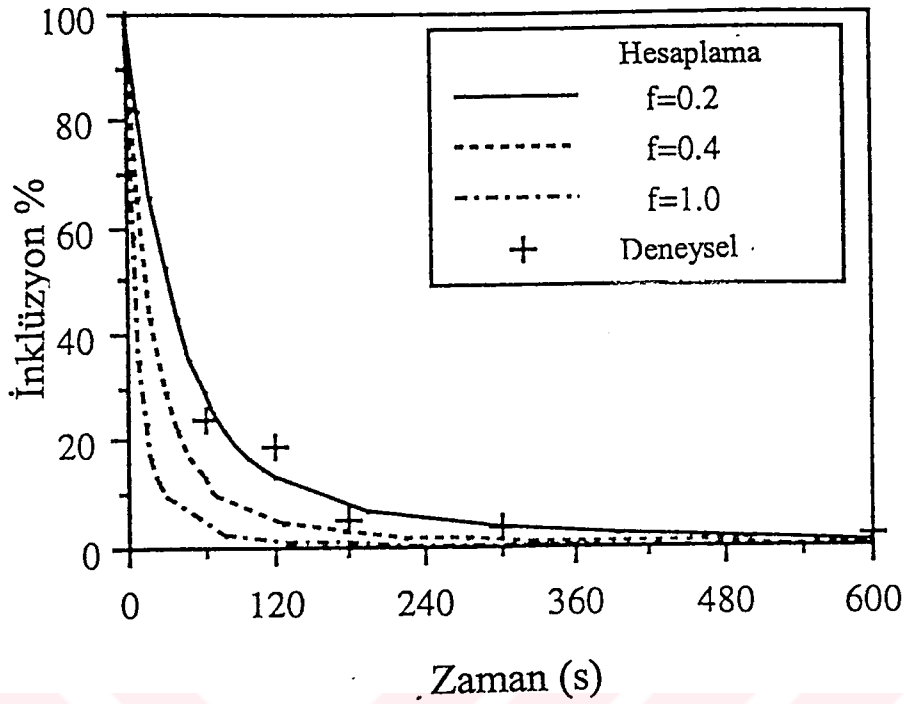
$$F_{em} = 1,0 \times 10^6 \text{ N / m}^3$$

$$\mu = 5 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Ortalama parçacık büyüklüğünün $2 \mu\text{m}$ olduğu varsayılarak ortalama hız $0.05 \times 10^{-3} \text{ m / s}$ 'dir.

Şekil 7.16, deneysel olarak ölçülmüş giderilme oranı ve hesaplanmış değişik değerlerdeki giderilme verimi oranlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Genelde hesaplanan giderilme oranları kantitatif olarak ölçümlerle uyumludur. Bu olay levita edilmiş damlacıklardan inklüzyon giderimi için gerekli elektromanyetik seperasyon mekanizmasını destekler.

Bu karşılaştırmaların sonuçları giderilme veriminin %20 olduğunu gösterir. Bu taneciklerin akış ayrılma bölgesinde yakalanmalarına bağlanabilir. Fakat aynı zamanda elektromanyetik güçlerin etkisi altındaki parçacığın göç hızı oldukça azdır. Model akış etkisi için önemli olmadığından, giderilme veriminin tahmin edilen değeri, sıvı inklüzyonların akış durulma bölgesinde elektromanyetik güçlerin etkisiyle giderilmelerinin gerçek değeri ile aynı olmayacaktır.



Şekil 7.16 Karıştırma sırasında inklüzyonların giderilme oranları [Sawai, 1994]

7.2.2.6. Analiz Sonuçları

Bu çalışmada ölçümler manganez silikat inklüzyonların elektromanyetik olarak karıştırılan demir damlacıklarındaki davranışlarına göre rapor edilmiştir. Levita edilen damlacıkların yüzeylerinin incelenmesi ve tüm numunelerin metalografik analizleri sonucunda karıştırmanın mikro boyuttaki inklüzyonların aglomerasyonunda küçük bir etkisi vardır.

Sonuçlara göre serbest yüzeydeki inklüzyon giderilimi sadece akış durulma bölgesinde gerçekleşmektedir. Aynı zamanda bu karıştırmanın küçük inklüzyon parçacıklarının yakalanmasında ters etkisi belirtmektedir. Deneyssel sonuçlar, akış dağılım bölgesinde elektromanyetik güçler etkisiyle tanecik ayrılmasının, levita edilen damlacıklarda sıvı inklüzyonların giderilmesinin temel mekanizması olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmaların (ölçümlerin) sonuçlarında ergiyik çelikteki inklüzyon aglomerasyonu ve giderilmesinde inklüzyon etkileşimlerinin, küçük bir etkisi olduğunun görülmesi ile birlikte bu sonuçlar deneysel doğrulama olmadan alüminyumda direkt olarak kullanılamaz.

Bu çalışmanın amacı ergiyik alüminyumda katı inklüzyonların giderilmesi ve aglomerasyonunda konveksiyonun rolü ile ilgili temel bir anlayış getirmektir.

Elektromanyetik olarak karıştırılan ergiyik alüminyumda $10\mu\text{m}$ SiC ve Al_2O_3 inklüzyon taneciklerinin davranışı levitasyon ergitme tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Bu teknik ergiyik serbest yüzeylerinde çalışmaya izin vermektedir. Bu şekilde katı duvarların

engellemesi olmamaktadır. Aynı zamanda bu teknikle inklüzyon taneciklerinin tüm numunede izleri takip edilebilmektedir. Böylece tanecik aglomerasyonu ve gideriliminin oranları hakkında güvenilir bir bilgiye erişilir.

7.2.3. Konveksiyonun Aglomerasyonda ve Metal Olmayan Inklüzyonların Giderilmesindeki Etkisiyle İlgili Deney

Karışımın değişik aşamalarında inklüzyonların davranışlarını yakalamak için levitasyon sırasında ergiyiğe su verilmiştir. Bu olay yüksek gaz akım oranlarına uygun özel bir levitasyon hücresi gerektirmiştir. Deney aparatları levitasyon hücresi, gaz çevrimi ve optik pirometreden oluşmaktadır.

Levitasyon sistemi kontrolü atmosferde 2 gramlık eriyik elde etmek üzere dizayn edilmiştir.

Bobin akımı ve frekansı lepel yüksek frekans ampermetresi ve dynascan frekans sayıcısı ile ölçülmüştür.

Levitasyon hücresi iki adet paslanmaz çelik plakadan oluşmaktadır. Bu plakalar levitasyon tüpünü uçlarından tutmak için kullanılır. Tüp yüksek saflıkta transparan silikadan yapılmıştır (19 mm çap ve 250 mm yükseklik). Bobin tüpü alt ve üst plaka arası mesafenin tam ortasında sarar. Bu çalışmada 6 dönüşlü 19 mm iç çaplı silindirik levitasyon bobini kullanılmıştır. Bu özel dizayn damlacığın salınımsız ve titreşimsi levita edilmesini sağlamıştır. Bu tip hatalarla genellikle levitasyon ergitmesinde karşılaşilmektedir.

Levitasyon hücresinde iki adet gözlem penceresi bulunmaktadır. Bu pencerelerin biri üst plakada diğeri alt plakadadır. Üstteki pencere genellikle numunenin sıcaklığını ölçmek için kullanılır. Alt plakaya monte edilmiş pikap platformunun 4 istasyonu vardır. Bu istasyonlardan iki tanesi numuneler içindir diğeri ise kalıba su vermek ve alt gözlem penceresinin prizması içindir. Numunenin levitasyon odasına alınmasını kalıbın kaldırılmasını ve sönümlenmeyi kolaylaştırmak için PYREX çubuk kullanılmıştır. Çubuk direkt olarak levitasyon tüpünün altına bağlanmıştır.

Gaz çevrimi iki ayrı çeşit gazın akımının oluşabilmesini sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Gazın biri ergitme sırasında kullanılmakta, diğeri ise ergiyik levita edilmiş damlacığın sönümlenmesi için kullanılmıştır. Gaz levitasyon odasına üst flanştan girer ve alt flanştan levitasyon odasını terk eder. Gaz kontrolü ve ölçümü kalibre edilmiş rotametre kullanılarak yapılmıştır. Levitasyon odasından tüm havanın giderildiğinden deney öncesi emin olabilmek için gaz çevriminin sonuna vakum pompası yerleştirilmiştir. Yüksek saflıkta Argon gazı

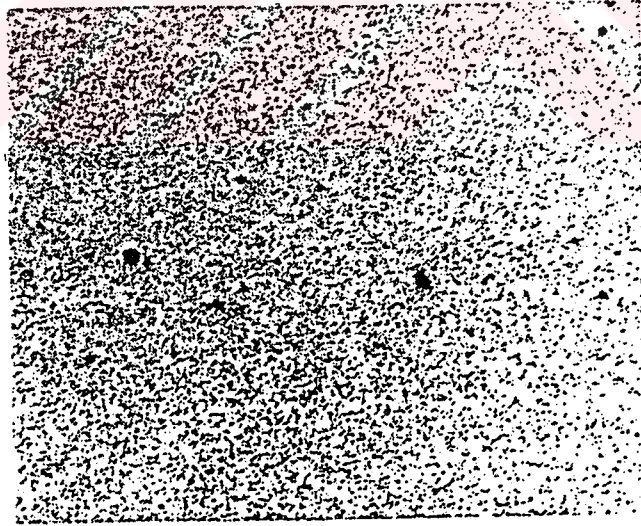
ergitme ve boşaltmada ticari saflıktaki helyum numunenin sönümlenmesi için kullanılır. Sıcaklık ölçümleri için capintec kızıl ötesi optik pirometre kullanılmıştır.

7.2.3.1. Malzemeler

Tüm deneyler yaklaşık %1 10 μ m.lik inklüzyon tanecikleri içeren alüminyum malzeme ile yapılmıştır. Inklüzyon çeşitleri SiC ve Al₂O₃ tür. Malzemeler taneciklerin “mini compocasting” sistemi ile ana malzemeye yerleştirilip karıştırılması ile hazırlanmıştır. Bu işlem için Pechiney CRV kullanılmıştır. SiC tanecikleri A356 içine Al₂O₃ tanecikleri ise A6061 içine yerleştirilmiştir. Daha sonra döküm ingotları 8 mm çapında çubuklar elde etmek için extrüzyondan geçirilmiştir. Daha sonra bu çubuklar levitasyon deneyi için 7 mm çapında küreler haline getirilmiştir.

Şekil 7.17 hazırlanmış numunelerin mikro yapısını göstermektedir. Görüldüğü gibi tanecikler alüminyum matrixte uniform bir şekilde yapılmıştır.

Görüntü analiz yöntemiyle tanecik konsantrasyonlarının ölçümleri taneciklerin numunelere uniform bir şekilde pay edildiğini göstermiştir.



Şekil 7.17 Hazırlanmış numunelerin mikro yapısı [Maréchal, 1993]

7.2.3.2. DeneySEL Prosedür

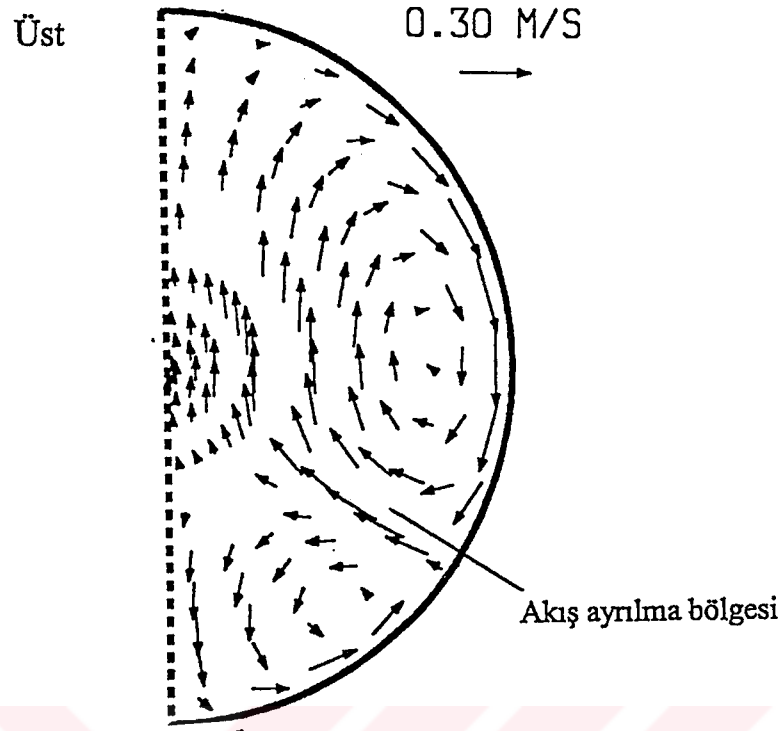
Levitasyon öncesi, tüm numuneler yüzeylerindeki yağın ve alüminyum oksidin giderilmesi için temizlenmiştir. Numuneler önce herhangi organik kirlerin temizlenmesi için metil etil keton da yıkanmış daha sonra ise asetonda yıkanmıştır. Bunun sonrasında numuneler alüminyum oksidin çözünmesi için 2 dk boyunca HF'e daldırılmıştır. Tüm bunlardan sonra

numuneler asetonda durulanıp, daha sonra kurutulup ve hızlı bir şekilde vakum kurutma cihazında depolanmıştır.

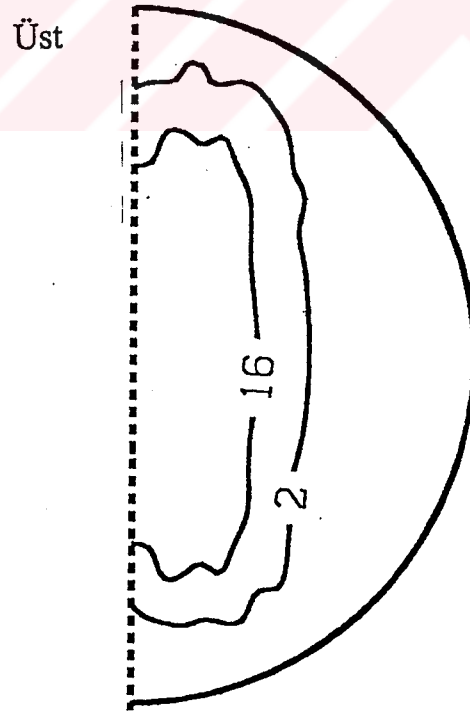
Levitasyon deneyinde numune ilk önce pikap platformuna yerleştirilir, daha sonra sisteme argon verilir, levitasyon gerçekleştirilir, son olarak numune sönmülendirilir. Havanın giderilmesi için, levitasyon odasına 5 dakika boyunca vakum altında yüksek saflıkta argon verilir. Sistem temizlendikten sonra levitasyon odasının basıncı kademeli olarak atmosfer basıncına getirilir. Daha sonra numune 2 l / dakikalık argon gazı akışı altında levita edilir. Bobinin sabit akımı 220 amperdir. Ergitmeden sonra dağılım deneyi için zaman tutulmuştur. Deney sonunda numuneler 60 l / dakika akış hızındaki helyum ile sönmülendirilmişlerdir. Her deneyden sonra numuneler simetri ekseninden kesilerek analiz için hazırlanmışlardır.

7.2.3.3. Levita Edilmiş Eriyik Alüminyum Damlacıklarında Akış Karakteristikleri

Sıvı akışının taneciklerin aglomerasyonuna ve giderilmesine etkisini inceleyebilmek için hız alanı ve çalkantı özelliklerinin (çalkantı kinetik enerjisi, enerji dağılımı ve vizkozite) belirlenmesi gerekir. Çünkü damlacık çok küçüktür sadece ölçümlerle bilgi edinilemez çeşitli hesaplamalar gereklidir. Levita edilen eriyik damlacıklarda elektromanyetik alanların ve hız alanlarının hesaplanabilmesi için matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model deneysel şartlar altında alüminyum damlacıklardaki akış karakterisitiklerini belirlemek için geliştirilmiştir. Deney şartları, bobin konfigürasyonu, akımı, frekansı, damlacık boyutları vs.dır. Şekil 7.18'da damlacıktaki hesaplanmış hız alanı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi akış iki ayrı resirkülasyon halkası ile karakterize edilmektedir. Akış ayrılma bölgesi bu iki halka arasında simetri ekseni ile 130° açı yapacak şekilde yerleşmiştir. Damlacıktaki en yüksek hız 30 cm/s'dir. Şekil 7.19, damlacıktaki çalkantı, laminar vizkoziteye oranının uzaysal değişimleri göstermektedir. Görüldüğü gibi özellikle serbest yüzey yakınında akış nerdeyse laminardır. Bu bölgede çalkantının laminar vizkoziteye oranı 2'den küçüktür. İleriki bölümlerde görüleceği gibi bu bulgular deneysel sonuçların yorumlanmasında oldukça yardımcı olacaktır.



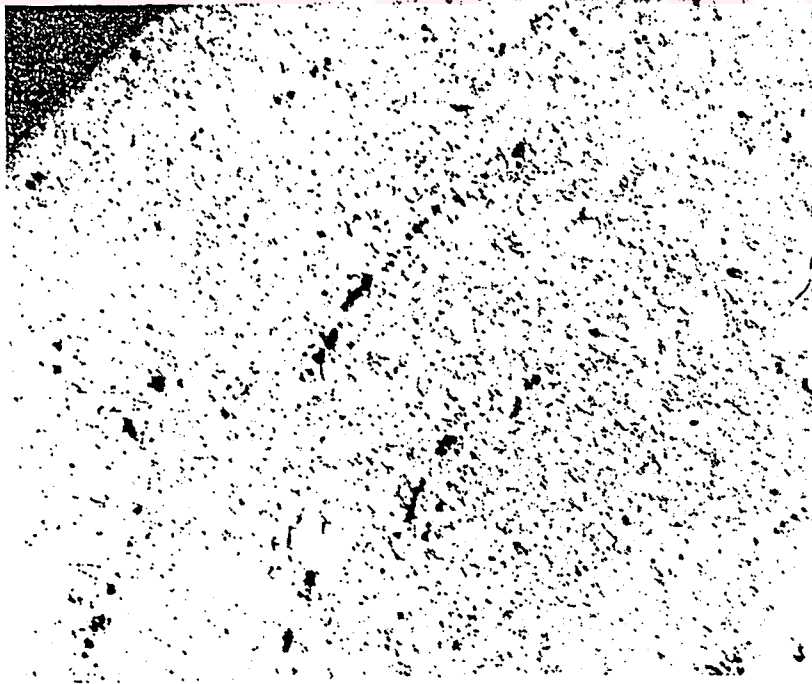
Şekil 7.18 Levitasyona uğramış alüminyum küresel damlacıkta hesaplanmış hız alanı
[Maréchal, 1993]



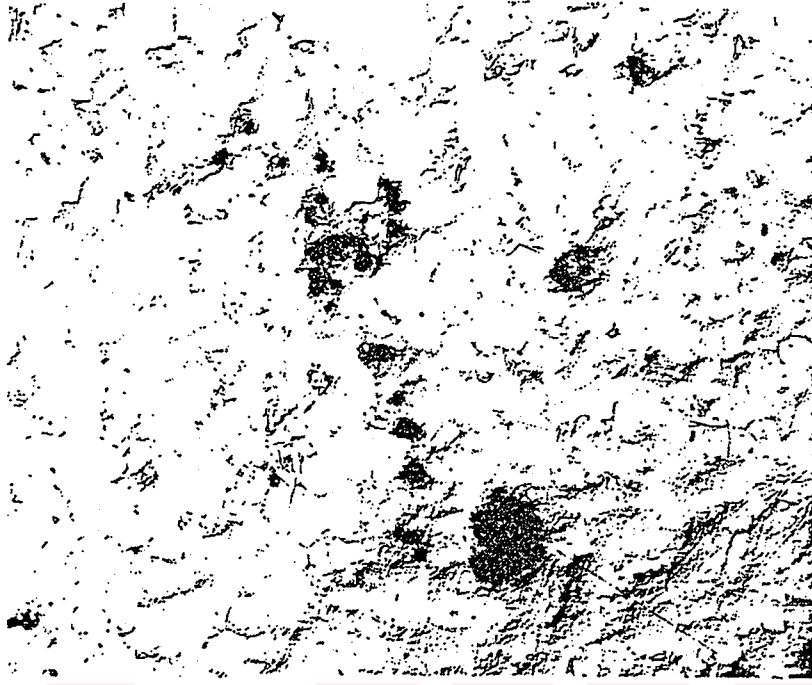
Şekil 7.19 Levitasyona uğramış alüminyum küresel damlacıkta çalkantının laminar viskoziteye oranının uzaysal değişimleri [Maréchal, 1993]

7.3. Deneysel Sonuçlar

Numunenin tüm kesidinin metalografik olarak incelenmesiyle, partikül taşınması, aglomerasyon ve inklüzyon giderimi hakkında detaylı bilgi edinmek mümkündür. Şekil 7.20 eriyikte akışın tanecik taşınmasına etkisi göstermektedir. Tanecik dizileri dış yüzeyin eğrilğine paralel olarak bulunmaktadır. Bu verimli akış düzenlerinin yönüdür. Bu olay tanecik hareketlerinin ana akış anaforları ile sağlandığını belirtir (Şekil 7.18'e bakınız.) Bu tanecik dizilerinin detaylı incelenmesi bu parçacıkların sadece 10 mm.lik parçacıklardan oluşmadığı aynı zamanda bu dizilerde Şekil 7.21'de görüleceği üzere birikim sonucu oluşmuş parçacık kümeleri mevcuttur. Bu durum parçacık aglomerasyonun verimli akış bölgelerinde oluştuğunu açıklar. Bu gözlemler bizim şimdiki parçacık taşınması ve laminar akıştaki aglomerasyon hakkındaki anlayışımız ile birbirini tutmaktadır. Levitasyon ergitme tekniği serbest yüzeyde, katı duvarların engellemesi olmaksızın inklüzyon gideriminin kinetiğini incelemek için ideal bir tekniktir. Tüm serbest yüzey boyunca sadece bir tane tanecik yığılma bölgesi bulunması oldukça ilginçtir. Bu bölge Şekil 7.18'de görüldüğü gibi iki re sirkülasyon boğumu arasındaki akış ayrışma bölgesi ile oldukça uyusmaktadır. Şekil 7.22 (a)'dan (d)'ye sözü edilen bölgede karıştırma sırasındaki tanecik birikimini gösteren mikrografları sırası ile göstermektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki akış ayrışma bölgeleri tanecik tutulması için potensiyel bölgelerdir. Bu durum hem serbest yüzeylerde hem de tüm hacimdeki, kütledeki ölü bölgeler için geçerlidir. Daha önce böyle bir bilgi literatürde rapor edilmemiştir.



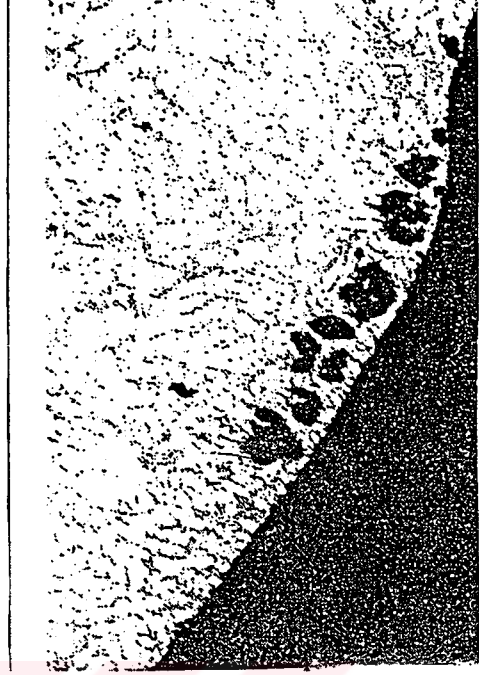
Şekil 7.20 Damlacığın üst kısmında, verimli akım bölgelerindeki taneciklerin sırasını gösteren mikrograf (50x) [Maréchal, 1993]



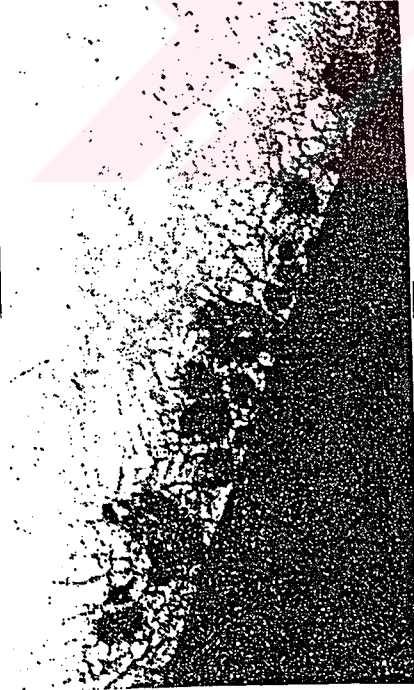
Şekil 7.21 Akış doğrultuları boyunca taneciklerin değişken boyutların gösteren mikrograf (100x) [Maréchal, 1993]



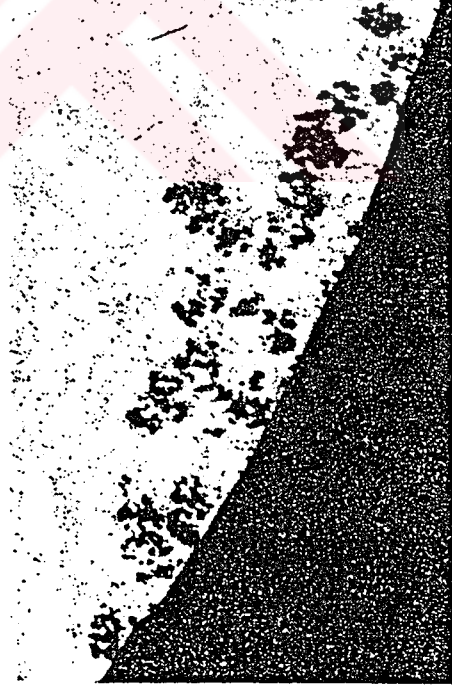
(a) 2 dakika (50x)



(b) 5 dakika (50x)



(c) 10 dakika (50x)

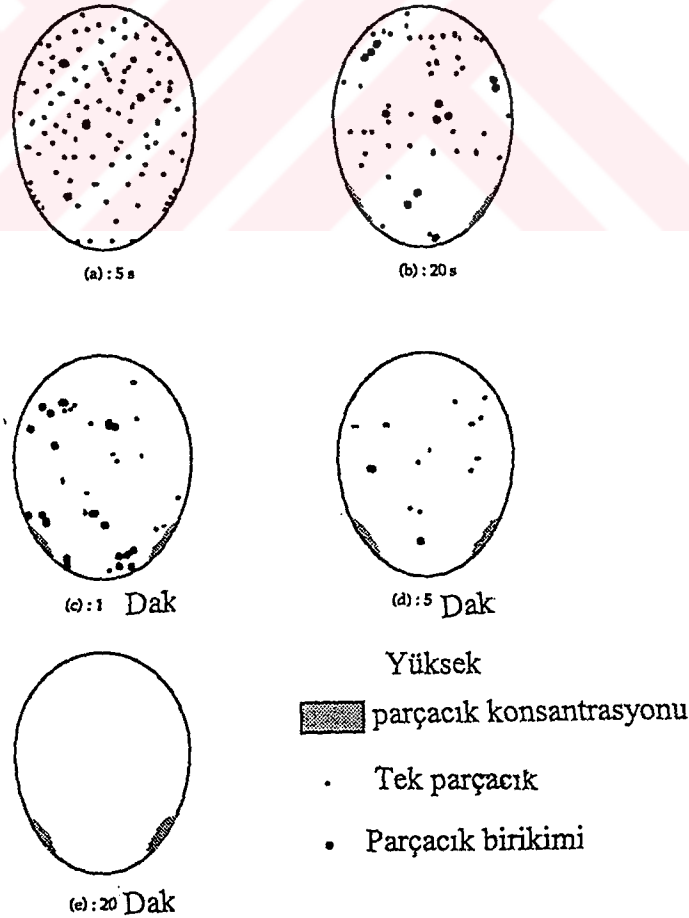


(d) 20 dakika (50x)

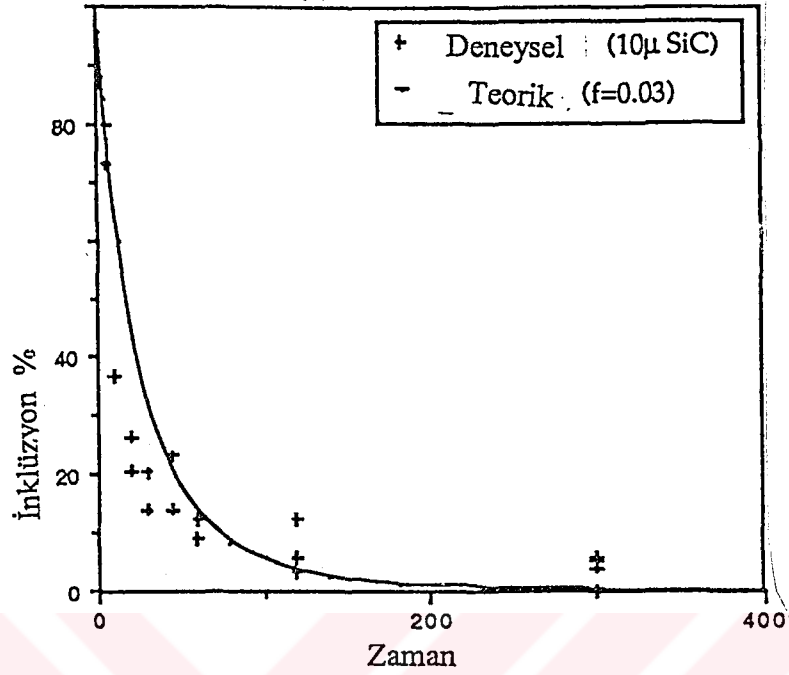
Şekil 7.22 Akış ayrılma bölgesine (Şekil 7.19) uyuşan bölgenin karıştırmanın değişik zamanlarındaki mikrofrafları [Maréchal, 1993]

Şekil 7.23 ((a)'dan (e)'ye) eriyikte karıştırma sırasındaki tanecik dağılımındaki gelişimi göstermektedir. Bu şekiller tüm numunenin mikroskobik görüntüleridir. Şekillerdeki noktalar orjinal 10 μm .lik tanecikleri ifade eder. Siyah büyük noktalar ise birikim yapmış parçacıkları ifade eder. Bu şekillerde gösterilen birikim yapmış tanecikler boyutları 20 μm .den büyük aglomera olmuş tanelerdir. İncelemeler sırasında 100 μm .den büyük taneciklere rastlanmamıştır.

Bu şekillerin incelenmesi sonucu 10 μm .lik parçacıkların kümelenmeyi gerçekleştirmek için ergiyikten ayrılmalı 1 dakikadan az bir sürede olmaktadır. Yüksek aglomerasyon oranına rağmen, inklüzyonların tamamen giderilmesi 20 dakika almaktadır. Hareketsiz damlacık içinde 10 μm .lik parçacıkların yerleşme süresinin 2 dakikadan az olmasına göre bu beklenmedik bir durumdur. Akış, parçacıkları anaförleri içinde yakalamaktadır. Bu durum Şekil 7.24'da açıkça gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 7.24 inklüzyonların (birikimle oluşmuş parçacıklar ve küçük tanecikler) sayılarının işaretlerini zamanının fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 7.24 eriyikteki tüm inklüzyon giderimini göstermemektedir, daha çok akış ayrışma bölgesindeki birleşik aglomerasyon ve inklüzyon giderilme oranlarını gösterir.

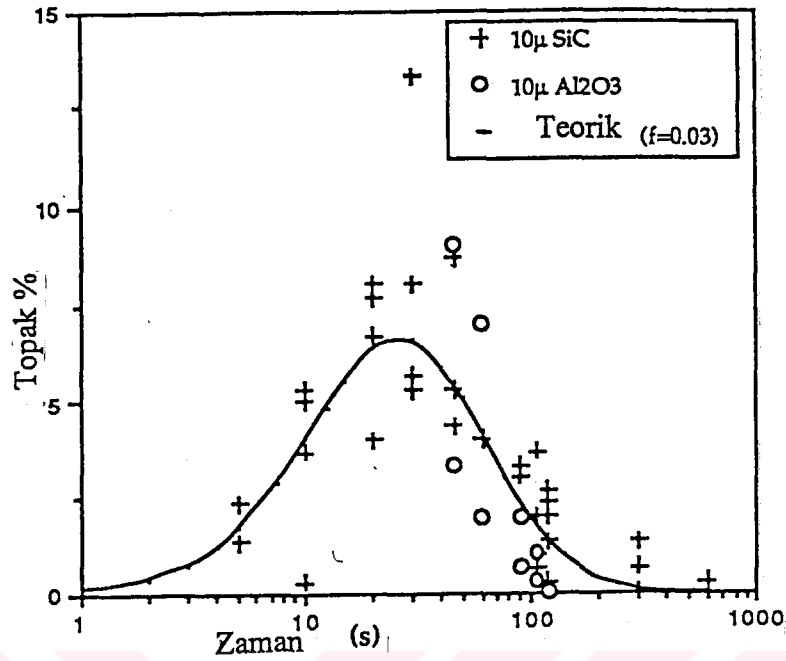


Şekil 7.23 Tanecik dağılımındaki gelişim [Maréchal, 1993]



Şekil 7.24 Karıştırma sırasında SiC taneciklerinin giderilme oranları [Maréchal, 1993]

Şekil 7.25 Birikim sonucu oluşmuş SiC ve Al_2O_3 büyük parçacıklarının sayılarının zamanına göre işaretlerini gösterir. Bu şekildeki bulgular yukarıda rapor edilenleri ispatlar örnek olarak karıştırma başlangıcındaki yüksek aglomerasyon oranı gibi. Yaklaşık olarak 30 saniye sonrasındaki inklüzyonların sayısındaki azalma inklüzyonların giderildiğini gösterir. Bu durum kümeleşmiş parçaların ayrışma bölgesine transferlerinin oranı ile tespit edilir. İlginçtir ki SiC ve Al_2O_3 parçacıklarının karıştırma sırasındaki kümeleşme ve giderilme oranları aynıdır.



Şekil 7.25 Zamana göre küme sayıları [Maréchal, 1993].

7.3.1. Levita Edilmiş, Damlacıklarda İnklüzyon Kümeleşmesinin ve Giderilmesinin Analizleri

Levitasyona uğrayan eriyik alüminyumda SiC ve Al₂O₃ parçacıklarının davranışları ile ilgili gelişmiş bir bakış açısı elde edilmesiyle, re sirkülasyon akışlarında aglomerasyon ve inklüzyonların giderilmesine etki eden parametreleri ölçmek mümkündür. Deneysel sonuçların analizinde karıştırma sırasında tanecik boyut dağılımında ve boyut değişimlerindeki gelişmeleri açıklamak için populasyon balans yaklaşımı seçilmiştir.

Ani birikime ve giderilmeye uğrayan taneciklerin sistemi için, değişik boyutlardaki tanelerin konsantrasyonlarının sayıları bir dizi 1.dereceden lineer olmayan diferansiyel eşitlikler yardımıyla ifade edilir.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-1} n_i n_k - \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{k,i} n_k n_i - S_k \quad (7.7)$$

n_k = k boyutundaki parçacıkların konsantrasyon sayısı

k = birincil tanelerin sayısı

t = zaman

$\beta_{i,k}$ = tanecik birikim parametresi

$S_k = k$ parçacıklarının giderilme oranı

Bu eşitlikleri çözebilmek için tanecik birikimi parametresi β 'nın ve giderilme oranı S 'nin fonksiyonel formlarını belirlemek gereklidir. Bu fiziksel bir problemdir. Tanecik aglomerasyonu yüzey güçlerine bağlı olduğu için, tanecik birikme parametresi parçacıkların çarpışma doğasını da açıklamalıdır. Büyüme ve çekirdeklenme kinetiklerinde olduğu gibi (0 ve 1 arasında değişen) bir katsayı kullanılarak başarılabılır. Bu sebeple tanecik birikim parametresi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\beta_{i,k} = fW_{i,k} \quad (7.7)$$

w = çarpışma hacmi

f = sıkışma(yapışma) katsayısı

Akışın ağırlıklı olarak laminar olduğu Levitasyona uğrayan Alüminyum damlacıklar için çarpışma hacmi ile hız alanı arasındaki ilişki Levich tarafından ifade edilen aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$W_{i,k} = \frac{4}{3} \nabla V (r_i + r_k)^3 \quad (7.8)$$

V = Akış hızı

r_i, r_k = i ve k boyut sınıflarının yarıçapları

Akış ayrılma bölgesinde taneciklerin ergiyikten giderilmesi, genellikle taneciklerin değişkenliği ile yönlendirilir. Bu olay verimli akış bölgesinden ayrılma bölgesine doğru gerçekleşir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Maréchal vd., 1993).

$$S_k = fV A n_k \quad (7.9)$$

$$A = \pi D \sin \theta d \quad (7.10)$$

D = damlacığın çapı

d = birikim tabakasının kalınlığı

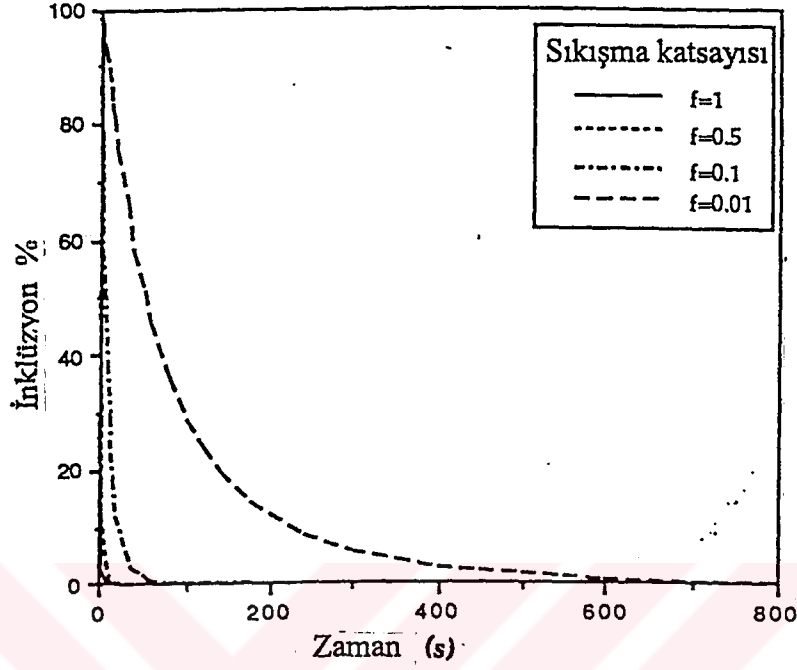
θ = birikim bölgesinin simetri ekseni ile olan açısı

7'den 10'a kadar eşitlikler ile damlacıktaki tanecik konsantrasyonları tüm problemi ifade ederler.

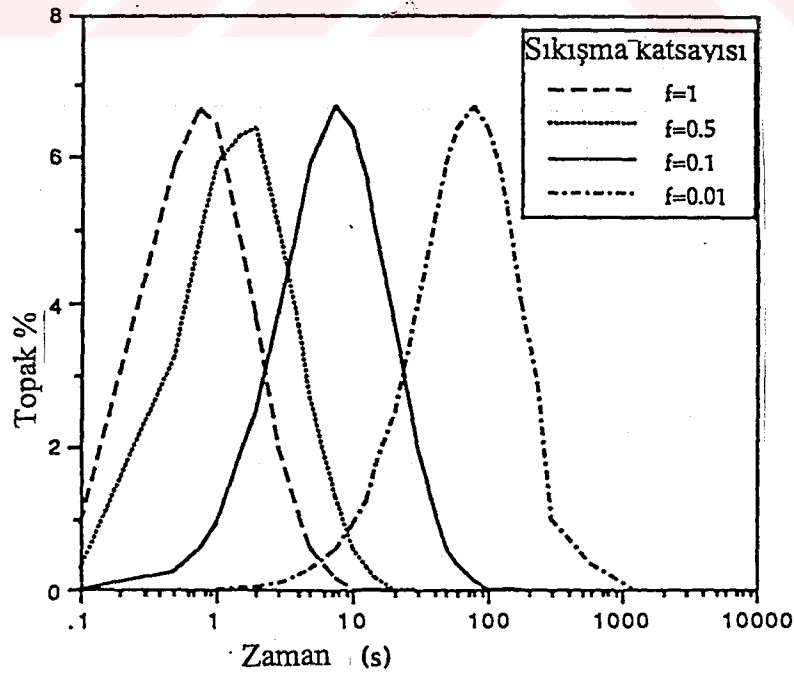
Yukarıdaki analizler, tanecik giderme oranını belirlemek için inklüzyon malzemelerinin katsayısına bağlıdır. Şekil 7.26 ve 7.27, Levitasyona uğrayan damlacık içinde sıkışma katsayısının tanecik aglomerasyonu ve giderilmesi ile ilgili olarak yapılan parametrik

İ.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

çalışmanın sonuçlarını gösterir. Şekillerde görüldüğü gibi inklüzyon giderilme zamanı yüksek oranda sıkışma katsayısının değerine bağlıdır.



Şekil 7.26 Değişik sıkışma katsayıları için damlacıktaki partikül sayısındaki zamana bağlı gelişme [Maréchal, 1993]



Şekil 7.27 Değişik sıkışma sayıları için zamana bağlı birikim göstermiş taneciklerin sayısındaki gelişmeler (damlacıkta) [Maréchal, 1993]

7.3.2. Konveksiyon Etkisi Deneyi ile İlgili Tartışmalar

Bu çalışmada deneysel sonuçlar, Levitasyona uğrayan eriyik Alüminyum damlacıklardaki $10\mu\text{m}$ SiC ve Al_2O_3 inklüzyon taneciklerinin hareketine konveksiyonun etkisini belirtmek için kullanılmıştır. Tüm numenin metalurjik analizi sonucu tanecik aglomerasyonu ve giderilmesinin mekanizması hakkında geniş bir anlayış sağlanmıştır. Ayrıca tanecik aglomerasyonu ve giderilmesinin oranları hakkında kantitatif bir bilgi elde edilmiştir. Populasyon balans eşitliğinin çözümüne dayanan, levitasyona uğrayan damlacıklardaki tanecik dinamiği ile ilgili teorik analizler SiC ve Al_2O_3 taneciklerinin sıkışma katsayılarını belirlemek için yapılmıştır.

Bu çalışmanın temel bilgileri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- 1) Serbest yüzeydeki tanecik giderilmesi akış ayrılma bölgesinde meydana gelir.
- 2) Aglomerasyon oranı genellikle giderilme oranından daha yüksektir.
- 3) Tanecik gideriliminin oranı hem akıştaki tanecik yakalanması hemde akış ayrılma bölgesindeki tanecik gideriliminin oranının kinetiği tarafından elde edilir.
- 4) Inklüzyon taneciklerinin özelliklerinin, inklüzyon giderilmesinin ve tanecik aglomerasyonun kinetiğinde önemli etkileri vardır. Bu durum sıkışma (yapışma) katsayıları ile gösterilir.
- 5) SiC ve Al_2O_3 tanecikleri benzer değerlerdeki sıkışma (yapışma) katsayılarını paylaşırlar bu değer yaklaşık olarak 0,03 tür.

Bu çalışma inklüzyon özelliklerinin olduğu gibi sıvı akışında, resirkülasyon akışlarındaki inklüzyon giderilimine etkisini açıklığı kavuşturmuştur. Sıvı akışının parçacık taşınmasına ve aglomerasyonuna etkisi hemen hemen şimdiki anlayışla aynıdır. Ancak bu çalışma özellikle serbest yüzeye yakın bölgelerdeki inklüzyon giderilimi ile ilgili bilgi vermiştir. Aslında problemin teorik analizinde tanecik giderme bölgelerinin yerleri kritiktir. Bu durum SiC ve Al_2O_3 'ün sıkışma katsayılarını belirlemekte kullanılmıştır.

Sıkışma katsayılarının sonuçları Şekil 7.25 ve 7.26'da gösterilmiştir. Bu durum tanecik kimyasının inklüzyonların davranışlarına etkisini açıkça belirtmektedir. Ergiyik alüminyumda değişik tipteki inklüzyonların giderilmesini analiz edebilmek için, sıkışma katsayılarının değerlerinin tam olarak belirlenmesi gereklidir. Ne yazık ki bunu teorik olarak belirlemek mümkün değildir, deneysel ölçümler gereklidir. Bu çalışmada açıklanan teknik böyle bir bilgiye ulaşmak için kullanılabilir. Bu tip bir bilgiye ulaşabilmek doğru analiz için oldukça

önemlidir. Özellikle inklüzyonlarla sık sık karşılaşılan endüstriyel sistemlerde oldukça önemlidir.



8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Temiz metal üretimi için gerekli tüm aşamalar incelenmiştir. Bu aşamalar daha öncede değinildiği gibi

- İnküzyonların oluşması
- İnküzyonların ara yüzeye taşınması
- İnküzyonların ara yüzeye dağılımı
- İnküzyonların ara yüzeyden giderilmesi

Buna ek olarak sıvı metallerde akış sistemleri, inküzyon giderilmesinin kinetiği, inküzyonların büyümesi ve inküzyon giderilimine konveksiyonun ve aglomerasyonun etki incelenmiştir. Sonuç olarak;

- 1) Akış sistemlerinin dinamik davranışları ve inküzyon giderilmesi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model inküzyon giderme oranı gibi partikül boyut ve dağılımı hakkında da detaylı bilgi vermektedir.
- 2) Levita edilmiş ergiyik damlacıkta elektromanyetik akış alanları ve sıvı akışının, aglomerasyonda ve inküzyon giderilmesindeki rolünü anlayabilmek için Levita edilmiş damlacıktaki akışın doğasını belirlemek gerekir. Elektromanyetik ve hız alanları sistemin matematiksel modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Elektromanyetik güçler ilk önce damlacığın alt yarısında hareket etmektedir. Damlacıktaki maksimum akış hızı 15 cm/s'dir. Akış durgunluk bölgesinde elektromanyetik güçlerin yüksek olması oldukça ilginç bir bulgudur.
- 3) Serbest yüzeydeki tanecik giderilme olayı akış ayrılma bölgesinde gerçekleşir. Tanecik gideriliminin oranı hem akıştaki tanecik yakalanması hem de akış ayrılma bölgesindeki tanecik gideriliminin oranının kinetiği tarafından elde edilir. İnküzyon taneciklerinin özelliklerinin inküzyon giderilmesinin ve tanecik aglomerasyonunun kinetiğinde önemli etkileri vardır. Bu durum sıkışma (yapışma) katsayıları ile gösterilebilir.
- 4) SiC ve Al₂O₃ tanecikleri benzer değerdeki sıkışma (yapışma) katsayılarını paylaşırlar.

KAYNAKLAR

- Avcı , A.U.(1993), Metallerin Sürekli Dökümü, Fatif Gençlik Vakfı, İstanbul.
- Byrine, M., Cramb,A.W. ve Fenicle, T.W.(1988),"The Sources of Exogenous Inclusions in Continuous Cast, Aluminum Killed Steels", Iron and Steelmaker, 15:41-50.
- Byrine, M. ve Cramb,A.W.(1989),"Operating Experiences with Large Tundishes", Transactions of ISS, 10:91-100.
- El-Kaddah, N. , Goddard, D. ve Menet,P-Y.(1999),"Modeling of Growth and Separation of Inclusions in Refining Processes", Light Metals, 1:1063-1066.
- Maréchal, L.,El-Kaddah, N. ve Menet,P-Y.(1993), " Influence of Convection on Agglomeration and Removal of Non-Metallic Inclusions in Molten Aluminum", Light Metals, 1:907-913.
- Itoh,C.(1996),Thermodynamics of The Formation of Magnesium Aluminate Spinel in Liquid Iron, Tohoku University, Japan.
- Joo, S.,Dobson, C.J.ve Guthrie, R.I.L. (1989)" Modelling of Heat Transfer, Fluid Flow and Inclusion Transportation in Tundishes", Steelmaking Conference Proceedings,1:401-408.
- Kozakevitch, P. ve Olette, M.(1972), Production and Application of Clean Steels, The Iron and Steel Institute, London.
- Miyanaga, A.,Mukai,K. ve Wasai,K.(1996),"Observation of Non-Metalic Inclusion in Aluminum-deoxidized Iron Alloy", Joint US-Japan Seminar-Clean Steel for the 21st Century,1996,Tohoku University, Japan.
- Olette, M. ve Riboud, P.V.(1972),"Proc. 7th ", ICVM, 7:879-889.
- Sawai, T.ve EL-Kaddah, N. (1994), "Kinetics of Inclusion Removal in Electromagnetically Driven Recirculating Flows", ISIJ.International Syposium On Electromagnetic Processing Of Materials,1994,Nagoya.
- Schwerdtfeger,K.(1975),"Rates of Movement of Solid Particles, Drops and Bubbles in Static Liquids,"Kinetics of Metallurgical Processes in Steelmaking, Verlag StahlEisen, 1:192-218.
- Schwerdtfeger,K.(1983),"Present State of Oxygen Control in Aluminum Deoxidized Steel", Archiv fur Das Eisenhutzenwessen,(3)54:87-98.
- Turkdogan,E.T.(1983)a,"Ladle Deoxidation, Desulfurization and Inclusions in Steel-Part 1", Archiv fur Das Eisenhutzenwessen, (1)54:1-10.
- Turkdogan,E.T.(1983)b,"Ladle Deoxidation, Desulfurization and Inclusions in Steel-Part 2", Archiv fur Das Eisenhutzenwessen, (2)54:45-42.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.02.1978	
Doğum yeri	Eskişehir	
Lise	1987 – 1996	Eskişehir Anadolu Lisesi
Lisans	1996 – 2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalürji Fak. Metalurji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000 – 2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilimdalı, Üretim Programı

