

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ESR YÖNTEMİNDE ERGİMİŞ CURUFLARIN ELEKTRİK
İLETKENLİĞİNİN PROSES ve ÜRÜN ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

Met. ve Malz. Müh. Mehmet TEKİN

**FBE Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARİDEDE

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. CURUFALTI (ESR) ERGİTME YÖNTEMİ.....	3
2.1 Curufaltı Ergitme Prosesinin Metalurjisi.....	4
2.2 ESR Yönteminin Kullanım Alanları.....	7
2.3 Curufaltı Ergitme Yönteminin Çeşitleri.....	8
2.3.1 Vakum Altında Curufaltı Ergitme Yöntemi.....	9
2.3.2 İnert Gaz Atmosferi Altında Curufaltı Ergitme Yöntemi.....	10
2.3.3 Basınç Altında Elektro Curuf Ergitme.....	11
2.4 Paslanmaz Çelikler.....	13
2.4.1 Paslanmaz Çelik Üretimi.....	14
2.4.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	17
2.4.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	17
2.4.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	17
2.4.5 Dupleks Paslanmaz Çelikler.....	18
2.4.6 Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	18
2.5 Takım Çelikleri.....	19
2.5.1 Takım Çeliklerinin Üretimi.....	19
2.5.2 Soğuk İş Takım Çelikleri.....	21
2.5.3 Sıcak İş Takım Çelikleri.....	23
2.5.4 Plastik Kalıp Çelikleri.....	25
2.5.5 Yüksek Hız Çelikleri.....	26
3. CURUFALTI ERGİTME PROSESİNDE KULLANILAN CURUFLARIN ÖZELLİKLERİ.....	29
3.1 Elektriksel İletkenlik ve Sıcaklık Arasındaki İlişki.....	35
3.2 CaF ₂ 'nin Curuf İçindeki Etkisi.....	36
3.2.1 CaF ₂ -Al ₂ O ₃ İkili Sistemi.....	36
3.2.2 CaF ₂ -FeO İkili Sistemi.....	36
3.2.3 Yoğunluk.....	36
3.2.4 Yüzey Gerilimi.....	36

3.3	Özgöl Elektriksel Direnci.....	38
3.4	Curufun Viskozitesi.....	38
3.5	Depolama ve Raf Ömrü.....	38
4.	ELEKTRİK İLETKENLİĞİ.....	39
4.1	Çözeltilerin İletkenliği.....	40
4.2	Sıcaklığın İletkenlik ve Direnç Üzerine Etkisi.....	41
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	47
6.1	Curufların İletkenliklerinin Ölçülmesi.....	47
6.2	Curuflara ESR İşleminin Uygulanması.....	54
7.	GENEL SONUÇLAR	65
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGE LİSTESİ

a	Sıcaklık katsayısı
B	Baziklik faktörü
E	Aktivasyon enerjisi
I	Amper
k	Curufun elektriksel iletkenliği
R	Gaz sabiti
R_1	T_1 sıcaklığında malzemenin yaklaşık direnci
R_2	Malzemenin T_2 sıcaklığında ölçülen direnci
T_1	Direncin istendiği sıcaklık
T_2	Direncin ölçüldüğü sıcaklık
V	Volt
v	İyonların sayısı
Λ	Molar iletkenlik
λ	İyonların özgül iletkenliği
Σ	Toplam

KISALTMA LİSTESİ

AOD	Argon-Oksijen dekarbürizasyon
ESR	Curufaltı ergitme
HIC	Hidrojen sebebi kırıma
IESR	İnert Gaz Atmosferinde Ergitme
PESR	Basınç Altında Elektro Cüruf Ergitme
VAC	Vakum altında curufaltı ergitme
VAR	Vakun altında yeniden ergitme
VIM	Vakum altında indüksiyon ile ergitme
VD	Vakum altında gaz giderme
VOD	Vakum altında oksijen dekarbürizasyon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 20 Ton kapasiteli ESR fırını.....	3
Şekil 2.2 Elektro curuf prosesinin şematik görünümü.....	4
Şekil 2.3 ESR yöntemi uygulanarak üretilmiş ingot.....	5
Şekil 2.4 ESR yöntemi uygulanarak üretilmiş ingot	6
Şekil 2.5 VAC-ESR fırının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6 IESR fırının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.7. PESR fırının şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.8 ESR yöntemi kullanılarak üretilmiş ingot.....	12
Şekil 2.9 Paslanmaz çelik üretim şeması.....	15
Şekil 2.10 Paslanmaz çeliklerin mikro yapısı.....	19
Şekil 2.11 Soğuk iş takım çelikleri kullanılarak üretilmiş parçalar.....	22
Şekil 2.12 Sıcak iş takım çelikleri kullanılarak üretilmiş motor bloğu.....	24
Şekil 2.13 Yüksek hız çelikleri ile üretilmiş kesme ve delme aparatları.....	26
Şekil 3.1 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı.....	31
Şekil 3.2 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı.....	31
Şekil 3.3 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı.....	32
Şekil 3.4 Curuf altı ergitme (ESR) prosesinde meydana gelen saflaştırma işlemi.....	35
Şekil 3.5 Oksitlerin CaF ₂ bazlı karışımlara etkisi.....	37
Şekil 3.6 Floridlerin CaO-SiO ₂ bazlı sistemler üzerine etkileri.....	38
Şekil 4.1 Sıcaklıkta iletim ile valans bantlarındaki elektron doluluk durumları ve bantların enerji eksenine doğru konumları.....	39
Şekil 4.2 Tuzun suda çözünmesinin aşamaları.....	41
Şekil 5.1 Curufların faz diyagramındaki yerleri.....	43
Şekil 5.2 Karıştırıcıdan çıkarılmış curuf numunesi.....	44
Şekil 5.3 Ölçüm için yerleştirilmiş platin teller.....	45
Şekil 5.4 Numunelerin ergitme işleminin yapıldığı fırın.....	46
Şekil 5.5 Ölçüm için kullanılan LCR metre.....	46
Şekil 6.1 1. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi.....	48
Şekil 6.2 2. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi.....	49
Şekil 6.3 ESR 2015 ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi.....	50
Şekil 6.4 Numune 3'e ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi.....	51
Şekil 6.5 FeO miktarının curuf iletkenliğine etkisi.....	52
Şekil 6.6 MnO miktarının curuf numunesinin iletkenliği üzerine etkisi.....	54
Şekil 6.7.a Su soğutmalı grafit pota.....	55
Şekil 6.7.b Su soğutmalı grafit pota.....	55
Şekil 6.8 Ergitme işleminde kullanılan curuf örneği.....	56
Şekil 6.9 Ergitme için hazırlanmış curuf numunesi.....	57
Şekil 6.10 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numune.....	58
Şekil 6.11 Numune 4 kullanılarak yapılan ergitme sonrası meydana gelen curuf.....	59
Şekil 6.12 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numune.....	59
Şekil 6.13.a Ergitme sonrası meydana gelen numune.....	63
Şekil 6.13.b Ergitme işlemi sonrası oluşan curuf.....	63

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 ESR prosesinin uygulama alanları ve etkileri.....	8
Çizelge 2.2 Krom elementinin korozyona etkisi.....	13
Çizelge 2.3 Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan paslanmaz çelikler.....	15
Çizelge 2.4 Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan takım çelikleri.....	20
Çizelge 2.5. Soğuk iş takım çeliklerinin özellikleri.....	22
Çizelge 2.6 Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları.....	23
Çizelge 2.7 Sıcak iş takım çeliklerinin özellikleri.....	24
Çizelge 2.8 Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları.....	25
Çizelge 2.9 Plastik kalıp çeliklerinin özellikleri.....	25
Çizelge 2.10. Plastik kalıp çeliklerinin kullanım alanları.....	26
Çizelge 2.11. Yüksek hız çelikleri özellikleri.....	27
Çizelge 2.12. Yüksek hız çelikleri kullanım alanları.....	28
Çizelge 3.1 ESR curuflarının kimyasal içerikleri.....	30
Çizelge 4.1 Metalik malzemelerin sıcaklık katsayısı.....	42
Çizelge 5.1 Curuf numularının kompozisyonları.....	44
Çizelge 6.1 Numune 1'e ait sıcaklık-iletkenlik değerleri.....	47
Çizelge 6.2 2. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri.....	48
Çizelge 6.3 ESR 2015 ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri.....	49
Çizelge 6.4 Numune 3'e ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri.....	50
Çizelge 6.5 FeO miktarının numune 6 üzerine etkisi.....	51
Çizelge 6.6 MnO miktarının iletkenlik üzerine etkisi.....	53
Çizelge 6.7 Ergitme işleminde kullanılan elektrodların kimyasal bileşimleri.....	56
Çizelge 6.8 Numune 2 kullanılarak yapılan ergitme sonunda meydana gelen ingotun kimyasal analizi.....	57
Çizelge 6.9 Ergitme işlemi sonrası oluşan numunenin kimyasal analizi.....	58
Çizelge 6.10 Ergitme işleminde kullanılan elektrodun kimyasal analizi.....	60
Çizelge 6.11 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi.....	60
Çizelge 6.12 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi.....	61
Çizelge 6.13 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi.....	61
Çizelge 6.14 Numune 4 kullanılarak yapılan ergitme işlemi sonrası meydana gelen ingotun kimyasal analizi.....	62
Çizelge 6.15 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi.....	62
Çizelge 6.16 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi.....	64

ÖNSÖZ

Çalışmalarımda bana yol gösteren Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE'ye; maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

Günümüzde inşaat, taşımacılık gibi insanlar için önemli ve en küçük hatanın kabul edilemeyeceği, uzay sanayi gibi stratejik alanlarda mekanik özellikleri çok iyi olmak zorunda olan malzemeler kullanılmalıdır. Yüksek saflıkta çelik olarak adlandırılan bu malzemelerin üretimleri çok zor ve dikkat gerektiren hususlardır. Bu sebeple bu malzemelerin rafinasyonu için bazı uygulamalar geliştirilmiştir.

Elektro Curuf Ergitme (ESR) prosesi de bir çeşit rafinasyon metodu olup, metal endüstrisinde süper alaşımlar ve özel çelik döküm ingotları üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile elde edilen malzemelerin kalitesi, saflık derecesi ve mikro yapı özellikleri gelişmiştir.

Yapılan çalışmada ESR prosesi tanımlanmış, proses de kullanılan curuf özellikleri belirtilmiş, curufların elektriksel iletkenlikleri ölçülmüş, ayrıca ESR curufların kullanım şartları ve yöntemleri incelenmiştir, çeşitli ESR proseslerine yer verilip, bu prosesler arasındaki farklılıklara değinilmiştir.

Projenin deneysel kısmında iletkenliği ölçülmüş curuflarla; curufaltı ergitme işlemi yapılarak, meydana gelen ingotların kimyasal analizleri doğrultusunda curufların etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek saflıkta çelik, Elektro Curuf Ergitme (ESR), ESR’de kullanılan curuf özellikleri, Curufların elektrik iletkenliği

ABSTRACT

Nowadays the use of clean steel technology is crucial on construction, air transporting industry and aerospace industry which is have influence on human safety and strategical importance. Production of the clean steel is difficult and need some special rafination treatment. Therefore, special rafination methods were developed.

Electro Slag Remelting (ESR) is a type of rafination method, which is metal industry to produce super alloy and special steel cast ingots. Quality, purity and micro structure of materials are advanced which is produced by using this method.

In this study ESR process is defined and properties of the slag which is used in the process are determinated. Also application conditions and methods are described.. Differences between varied ESR processes are dealed with.

In practical part of the study; electrical conductivity of the slags were measured, then electro slag remelting process applied for investigating effect of slag properties on melting ingot.

Key Words: Clean steel, Electroslag remelting (ESR), ESR slag properties, Electrical conductivity of slags

1. GİRİŞ

Çeliğin saflığı, çeliğin kalitesi için çok önemli bir faktördür. Ayrıca çeliğin iç kalitesinin bir göstergesidir. Son 30 yılda, çeliklerin rafinasyonunda büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmelerin başlıca nedeni, bazı uygulamaların daha iyi mekanik ve çelik özelliklerine gerek duymasıdır. Çelik bünyesindeki sülfür miktarı, çeliğin saflığını dolayısı ile performansını etkilemektedir, bu yüzden rafinasyon işleminde dikkat edilen ilk konudur. 1970'ler de çelik bünyesindeki sülfür miktarı %0.01 civarında iken, bugün bazı uygulamalarda kullanılan çelikler de ise yaklaşık %0.001 sülfür miktarı istenmektedir. Bünyesinde bulunan zararlı elementlerin içeriği ve metalik olmayan inklüzyonların miktarı, şekli ve boyutları çeliğin kalitesini etkilemektedir. 1960'lar da kaynak ürünlerinde meydana gelen yırtılmalar, çelik üreticileri için en büyük problemlerden birisiydi. Bu problem sayesinde; üreticiler, çelik bünyesindeki inklüzyonların çelik performansına etkilerini görmüşlerdir. Bu sebeple düşük sülfür ve düşük inklüzyon miktarının sertlik artışına, yorulma dayanımının artmasına ve üretim hatalarının azalmasına neden olduğu görülmüştür. Böylece artan çelik performansı sayesinde geniş kullanım alanları bulmuştur (Wilson, 1999).

Çelik bünyesindeki karbon (C), fosfor (P), kükürt (S), hidrojen ve toplam oksijen miktarı proses boyunca kontrol edilmeli ve azaltılmalıdır. Çünkü bu elementlerin tek tek veya toplu olarak, gerilme dayanımı, sertlik, kaynak özelliği, korozyon direnci, yorulma dayanımı, şekillendirilme gibi çelik özellikleri üzerine büyük etkileri vardır. Çelik özelliklerinin artırılması için proses sırasında fosfor (P), kükürt (S), azot (N), hidrojen (H), toplam oksijen ve bazı çelikler için karbon (C) miktarının azaltılması gerekmektedir (Kaike, 1998).

50 yıldan bu yana, demir ve çelik ürünleri; alüminyum, plastik, cam gibi yeni mühendislik malzemeleri ile büyük bir yarış içine girmiştir. Bu yüzden çelik kalitesi, metalurji teknolojisinin gelişmesinde ve demir ve çelik üreticileri için çok önemli bir görev haline gelmiştir. Örnek olarak, istenilen özelliklerin karşılanabilmesi için; petrol rafinelerinde kullanılan çeliklerde sertlik, doğal gaz taşıyan tankerlerde ise HIC dayanımının karşılanabilmesi için son 40 yılda çelik bünyesindeki kükürt miktarı devamlı olarak azaltılmıştır. Araba gövdelerinde kullanılmakta olan çelik saclar da istenilen karbon, azot ve toplam oksijen miktarı 20 ppm'in altındadır. İnce kaplama olarak kullanılan saclar da sadece toplam oksijen miktarının 20 ppm altında olmasının yanında metalik olmayan inklüzyonların büyüklüğü 20 µm altında olması, makine parçası olarak kullanılan dişlilerde ise yorulma direncinin yüksek olması için toplam oksijen miktarının 10 ppm altında olması

gerekmektedir. 1980'lerin sonunda çelik bünyesindeki karbon, fosfor, kükürt, azot, hidrojen ve toplam oksijen miktarı 50 ppm in altına indirilmiştir (Fitzgerald, 1991).

Çeliğin yapısından kaynaklanan kırılmaların çok büyük çoğunluğu düşük saflıktaki çeliklerde görülür. Yüksek saflıkta çelik ile düşük saflıkta (pis) çelik ayrımı son 20 yıl içinde ortaya çıkmış ve çelik içyapısının emprüte ve kalıntılardan arındırılmışlığının bir ölçüsü olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek saflıktaki çelikler yapılarında emprüte ve kalıntıların en az oranda bulunduğu çeliklerdir. Uçak, roket, uydu gibi araçlarda kullanılan çeliklerin, beklenmeyen facialara yol açmamak için, temiz çelik olarak özenle seçilmeleri ve üretilmeleri zorunludur. Temiz çeliklerin üretimleri, temelde, oksit ve sülfürlerden oluşan kalıntıları en az düzeye indirecek yöntemleri içerir. Curufaltı ergitme (ESR) prosesi bu amaçla kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Curufaltı ergitme yöntemi çeşitli metal ve alaşımların üretildiği ikincil ergitme prosesidir. Yeniden ergitme işlemi; homojen, istenilen bileşimde, fiziksel ölçüde ve tane yapısında ingotlar üretmek için kullanılmaktadır.

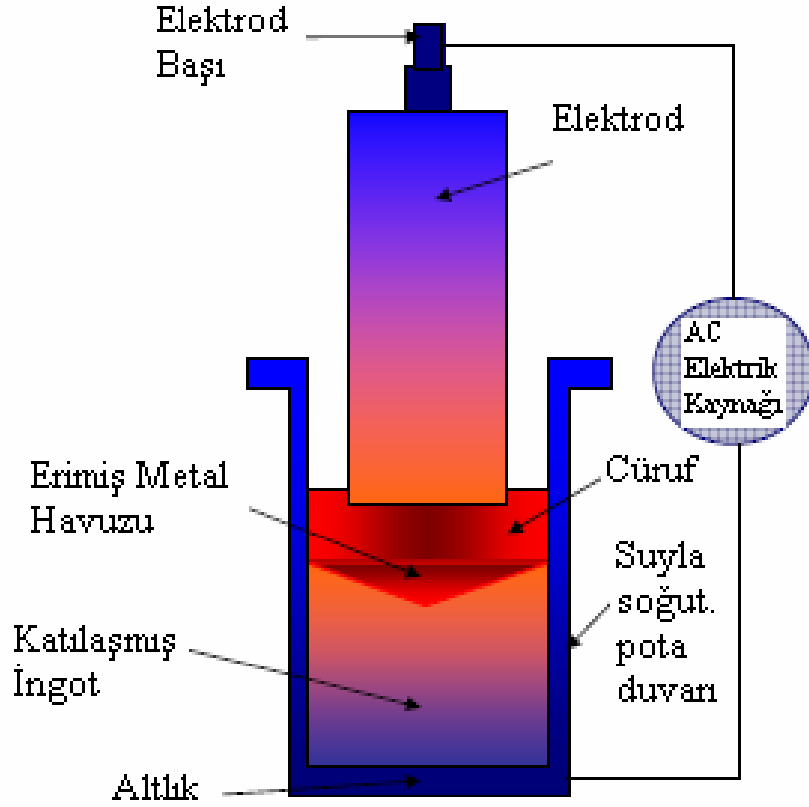
Demir ingotlarda sülfür miktarı VIM, VOD, VD gibi geleneksel yöntemlerle ağırlıkça %0.02 oranına kadar azaltılırken curufaltı ergitme yöntemi (ESR) ile ağırlıkça %0.004 oranına kadar azaltılabilmektedir. Bu yüzden bu metod çelik rafinasyonunda en çok bilinen yöntemdir. Yüksek sıcaklıkta çalışan metalurjik sistemlerde; ergimiş curufun elektriksel iletkenliği, elektrik ergitme fırınlarının çalışmasında ve modellenmesinde çok önemli bir rol oynar. Elektriksel iletkenlik bir yerde yer değiştirme prosesidir bu yüzden sıcaklıkta, işlem süresince etki etmektedir. Elektrik iletkenliği ve curuf bileşenleri arasındaki ilişki çok karışıktır. Bileşendeki küçük bir değişiklik iletkenliği ani bir şekilde düşürebilmekte veya yükseltebilmektedir.

2. CURUFALTI ERGİTME (ESR) YÖNTEMİ

Her geçen gün artan yüksek performanslı mühendislik malzemelerine olan talebi karşılamak düşük maliyetli yüksek kaliteli çelikleri üretmek için çalışmalar yapılmaktadır. Çeliğin üretim ve dökümü esnasında oluşan ve istenmeyen sıvı veya katı olarak metalik olmayan bileşikler çeliğe karışabilmektedir. İnküzyon olarak adlandırılan metalik olmayan bileşikler çelik ürünün içerisinde farklı birleşim, şekil, boyut ve miktarlarda bulunabilirler. Herhangi bir şekilde çelik içerisine karışan inklüzyonlar şekil, bileşim, yoğunluk ve boyutlarına bağlı olarak çeliğin yüzey özellikleri, derin çekme, yorulma, darbe dayanımı ve kopma dayanımı gibi mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilerler. Bu olumsuz etkileri gidermek için kullanılan yöntemlerinin başında elektro curuf ergitme yöntemi bulunmaktadır. ESR 1930'lu yıllarda yüksek saflıkta külçeler üretmek amacı ile bulunmuş bir yöntemdir. Bu metodu öncelikle 1954 yılında U.S.S.R' de Paton Elektrik Kaynak kurumu tarafından geliştirilmiş ve daha sonra endüstriyellemiştir (Lim ve Reeu, 2002).



Şekil 2.1 20 Ton kapasiteli ESR fırını[1]



Şekil 2.2 Elektro curuf prosesinin şematik görünümü (Tweten, 2004)

Curufaltı ergitme yöntemi; çeşitli metal ve alaşımlarda kullanılan bir ikincil ergitme yöntemidir (Buckentin vd., 1997).

Yeniden ergitme işlemi; homojen, istenilen bileşimde, fiziksel ölçüde ve tane yapısında ingotlar üretmek için kullanılmaktadır. ESR teknolojisi yalnızca küçük hacimli takım çelikleri ve süper alaşımlar için değil ayrıca yaklaşık 165 tona kadar işlenmiş ingotlarda da işlem gerçekleştirilebilmektedir.

2.1 Curufaltı Ergitme Prosesinin Metalurjisi

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi fırın tükenen elektrod ve su soğutmalı kalıptan oluşmaktadır. Proses potanın altından başlamaktadır. Pota'nın alt tabakası ve elektrod arasında ark meydana gelir ve bu ark sonucu pota içinde bulunan curuf ergimeye başlar. Curuf ergimeye başladığı zaman, elektriksel olarak iletken hale gelir ve curufa daldırılmış olan elektrodun ucu ergimeye başlar.

Elektrod ucu ergiyince ucundan düşen metal damlacıkları curufa doğru düşer ve curufa temas ederek termokimyasal ve elektrokimyasal işlemler ile rafine olur (Tetzlaff, 2004).

Damlalar su soğutmalı potanın dibinde toplanır ve katılarak, tortu şeklindeki emprütelerden, metalik inklüzyonlardan arınmış ve kaliteli yüzey yapısına sahip ingot haline dönüşür. Ergimiş curuf ise sıvı metalin üzerinde yüzmektedir. Daha fazla elektrod ergidikçe, ingot yukarı doğru uzayarak curuf havuzunu yükseltecektir. Elektrod, itici adı verilen bir çubuğa kaynaklanmıştır. Bu çubuk ise elektrik düzeneğine bağlıdır ve elektrodun ağırlığını ölçmektedir. Elektrod ucunun ergiyebilmesi için, uygun daldırma derinliğini muhafaza etmelidir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de curufaltı ergitme işlemi sonrası meydana gelen ingotlar gösterilmektedir.



Şekil 2.3 ESR yöntemi uygulanarak üretilmiş ingot [2]

Elektrodun daldırma derinliğinin proses sırasındaki ısı kaybı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Elektrodun curuf içerisine çok daldırılması düşük direnç ve sıcaklık girişine, düşük elektrod derinliği ise yüksek curuf direncine ve sıcaklık çıkışına neden olur. Eğer sıcaklık girişi çok azalır, curuf soğumaya başlar, bu da curufun metalden ayrıldığı zaman ingot yüzeyinin pürüzlü ve çatlak içermesine neden olur. Bu yüzden curufun soğumasının engellenmesi ve ingotun yüzey yapısının ve karakteristiğinin düzgün olması için elektrodun

curuf yüzeyine mümkün olduğunca yakın olması ve curufa enerji akışının yüksek olması gerekmektedir.



Şekil 2.4 ESR yöntemi uygulanarak üretilmiş ingot [2]

Curufaltı ergitme yönteminin bir diğer özelliği ise segregasyon oluşumunun önüne geçmesidir. Su soğutmalı bakır kalıp sayesinde ingot alttan katılaşmaya başlar, böylece malzemenin segregasyona uğramadan katılaşarak ingot haline dönüşmesini sağlar. ESR yönteminde potalar genellikle bakırdan yapılmaktadır ancak alüminyum ve çelik gibi malzemelerde kullanılmaktadır. Çoğu kalıp daire şeklindedir fakat proseste kare şeklinde kalıplarda kullanılmaktadır (Tweten, 2004).

Bazı kalıpların boyları işlem sonucu meydana gelen ingottan uzundur, bu kalıplar hareket etmezler ve sabittirler. Bazı kalıplar ise küçüktür ve bunlar işlem sırasında yukarı doğru hareket ederek ingotun aşağıdan yukarı doğru lineer bir şekilde katılaşmasını sağlar.

Curufaltı ergitme işleminde kullanılan curuflar; ergidikleri zaman elektrik iletkenliğine sahip seramikler ve CaF_2 , Al_2O_3 , CaO gibi temel bileşenlerin karışımından meydana gelir (Melgaard vd., 1998).

ESR yönteminde kullanılan elektrodlar, yeniden ergitilmesi istenen alaşımdan döküm veya dövme işlemleri kullanılarak silindir şeklinde hazırlanmaktadır. Yeniden ergitme işlemi elektrod ucunun ergimiş curuf havuzuna daldırılması ile başlar.

Elektrik akımı curuf içerisinden geçerek, curufun sıcaklığını yükseltir. Sıcaklık yaklaşık olarak yeniden ergitilen metalin ergime derecesinden yaklaşık 200°C yüksektir.

ESR yönteminde kullanılan curufun proses sırasında;

- İstenilen viskozite miktarı
- İstenilen elektrik iletkenliği
- Yüksek sülfür çözünürlüğü
- Metalik olmayan inklüzyonların absorblanması gibi avantajlar sağlar.

Elektrod ucundaki damlacıklar curuf ile temas ederek, desülfürizasyon işlemi; sülfid ve oksitler gibi metalik olmayan inklüzyonların giderilmesi ile rafine olur. Damlacıklar ergimiş metal havuzuna düşer. Burada kontrollü katılaşma meydana gelir. Su soğutmalı bakır kalıp yüksek katılaşma hızı sağlar ve katılaşma aşağıdan yukarı doğru gerçekleşir.

İngotun dış yüzeyi ince bir curuf film tabakası ile kaplı olduğundan dolayı iyi yüzey kalitesine sahiptir. Düşük sülfür içeriği, çelikte mikroyapıların temizliğine yardımcı olur. Çelik içindeki çoğu inklüzyon sülfidlerden meydana gelir. Çelikten sülfür uzaklaştırıldığında, çelik bünyesindeki inklüzyon sayısı ve toplam inklüzyon hacminde bir azalma meydana gelir (Swift, 1977).

ESR yönteminin klasik ergitme yöntemlerine göre;

- a) Derin desülfürizasyon
- b) Metalik olmayan inklüzyonların giderilmesi
- c) Metalik olmayan inklüzyonların homojen dağılımı
- d) İyi tane yapısı
- e) Düşük makrosegregasyon
- f) İyi yüzey kalitesi
- g) Kontrol edilebilir proses gibi avantajları bulunmaktadır.

2.2 ESR Yönteminin Kullanım Alanları

Curuf altı ergitme yönteminde ingot yüzeyinin kalitesi ergitme işlemi süresince dökme kalıp duvarı ile külçe arasındaki katılaştırılan ince curuf yüzeyi ile geliştirilmektedir. Bu yüzden ESR ağır dövme gibi, nükleer ve uzay mühendisliği gibi endüstri alanlarında kullanılan yüksek performanslı süper maden alaşımları için tercih edilen üretim yöntemidir.

Çizelge 2.1’de ESR prosesinin kullanım alanları ve prosesinin sağladığı etkiler gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 ESR prosesinin uygulama alanları ve etkileri

ÜRÜN	TİPİK ÖZELLİK	GELENEKSEL PROSESLER SONRASI YAŞANAN PROBLEMLER	ESR PROSESİNİN ETKİLERİ
SOĞUK RULOLAR	80CrMo7	Metal olmayan kalıntılar ve yüzey kalıntıları	Yüksek sertlik, uzun kullanım süresi, tam kontrollü üretim
BİLYELİ YATAK	100Cr6 100CrMo85	Garantilenmemiş temiz yüzey,	İyileştirilmiş karbür ayrımı, katılaşma sırasındaki çatlakları engelleme
PERVANELER	26NiCrMoV145	Metal olmayan kalıntılar	Yüksek dayanıklılık
TÜRBİN VE JENARATÖR MİLLERİ	30NiCrMoV511 X20CrMoV121	Merkezde tane büyümesi, sınırında tane çökmesi	Kontrollü tane büyümesi, kalıntılarda azalma
TÜRBİN BIÇAKLARI	34CrNiMo6	Metal dışı kalıntılar, yüksek sıcaklıkta deformasyon,	Kalıtıda kayda değer azalma, çok önemli mekanik özellikler yüksek süneklik
YÜKSEK SICAKLIK ÇELİKLERİ	X40CrMoV51	Yüksek sıcaklıkta deformasyon ve istenmeyen reaksiyonlar	Uzun kullanım süresi, sıcaklık altında yüksek mukavemet
YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİ	S6-5-2	Zayıf düzenlilik, düzensiz şekil değiştirme	Yüksek karbon içeriği, düzenli karbürler
PASLANMAZ ÇELİKLER	X2CrNi189	Düşük yüzey kalitesi, düşük derecede temizlik	Yüksek korozyon direnci, gelişmiş nitrür temizliği
ISIYA DAYANIKLI ÇELİKLER	X17CrMoVNB121	Yetersiz temizlik oranı, yüksek ferrit içeriği, yapı düzensizliği	İyileştirilmiş dayanıklılık, mikroyapıda yüksek stabilite

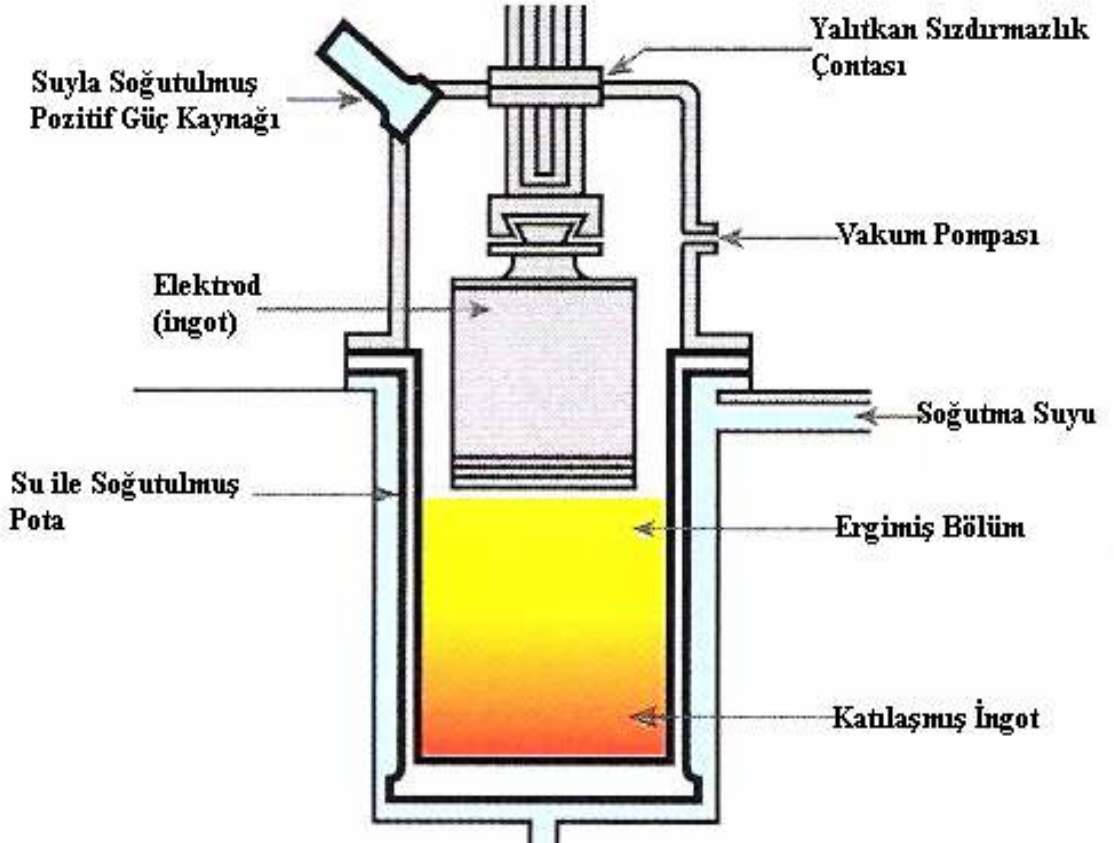
2.3 Curufaltı Ergitme Yönteminin Çeşitleri

Geleneksel ESR yönteminin yanında, ESR yönteminin 3 çeşidi bulunmaktadır. Bunlar yüksek basınç altında yeniden ergitme (PESR), inert gaz atmosferinde yeniden ergitme (IESR), vakum altında yeniden ergitme (VAC-ESR)'dir.

2.3.1 Vakum Altında Curufaltı Ergitme Yöntemi

Geleneksel curufaltı ergitme yöntemindeki ana sınırlama çeliğin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etki eden hidrojenin giderilmesidir. Geleneksel curufaltı ergitme yönteminde elde edilen düşük hidrojen içeriği, proste kullanılmakta olan elektrodun bünyesinde bulunan hidrojenin kontrol altında tutulması ile meydana gelmektedir. Atmosfer altında prosesin gerçekleştirilmesi, sıvı metal ile temas halinde olan curufa oksijen girmesi sebebi ile oksidasyona neden olur. Bu nedenle prosesin vakum altında uygulanması, hem gaz giderme işlemini hem de ergimiş metalin oksidasyondan korunmasını sağlamaktadır. Şekil 2.5’de

VAC-ESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.5 VAC-ESR fırının şematik gösterimi[3]

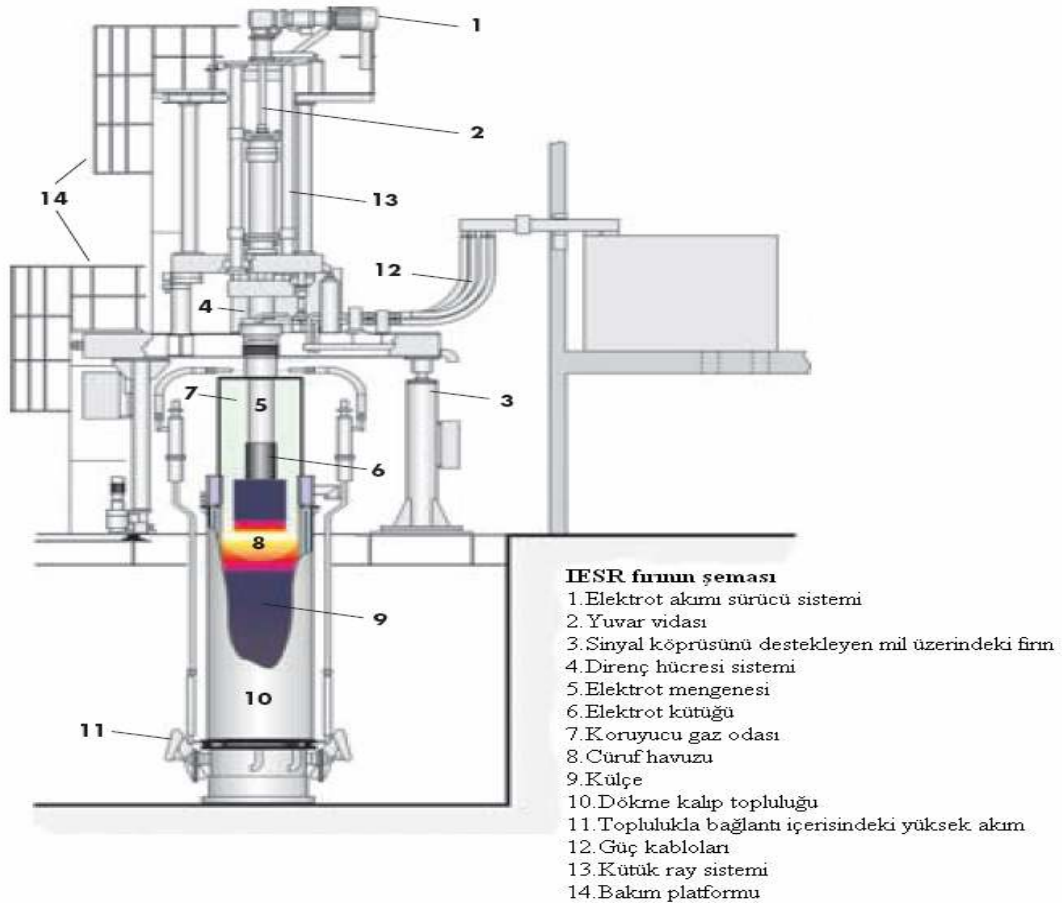
2.3.2 İnerit Gaz Atmosferi Altında Curufaltı Ergitme Yöntemi

Bu ESR metodunun hidrojenin ilerlemesinde karşılaşılan problemlerden ayrılmasını ve atmosferik değişimlerin etkilerinden sakınılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem vakum altında yapılan curufaltı ergitme işleminden daha kolay ve ucuzdur.

Bu yöntem diğer yöntemlere göre;

- a) Elektrodun ve curufun oksidasyona uğramasını engeller.
- b) Ti, Zr, Al, Si gibi elementlerin oksidasyona uğramasını ve bünyeden uzaklaşmasını engeller. Özellikle Al ve Ti içeren alaşımların ve süper alaşımların yeniden ergitilmesinde önemlidir.
- c) Proses sırasında bünyeye nitrojen ve hidrojen girişini engeller.
- d) İngotun daha temiz olması gibi avantajları sağlamaktadır.

Ancak dezavantajı ise, vakum altında yapılan curufaltı ergitme prosesindeki bünyeden hidrojeni uzaklaştırma işleminin, bu proste yapılamamasıdır. Şekil 2.6'da IESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.

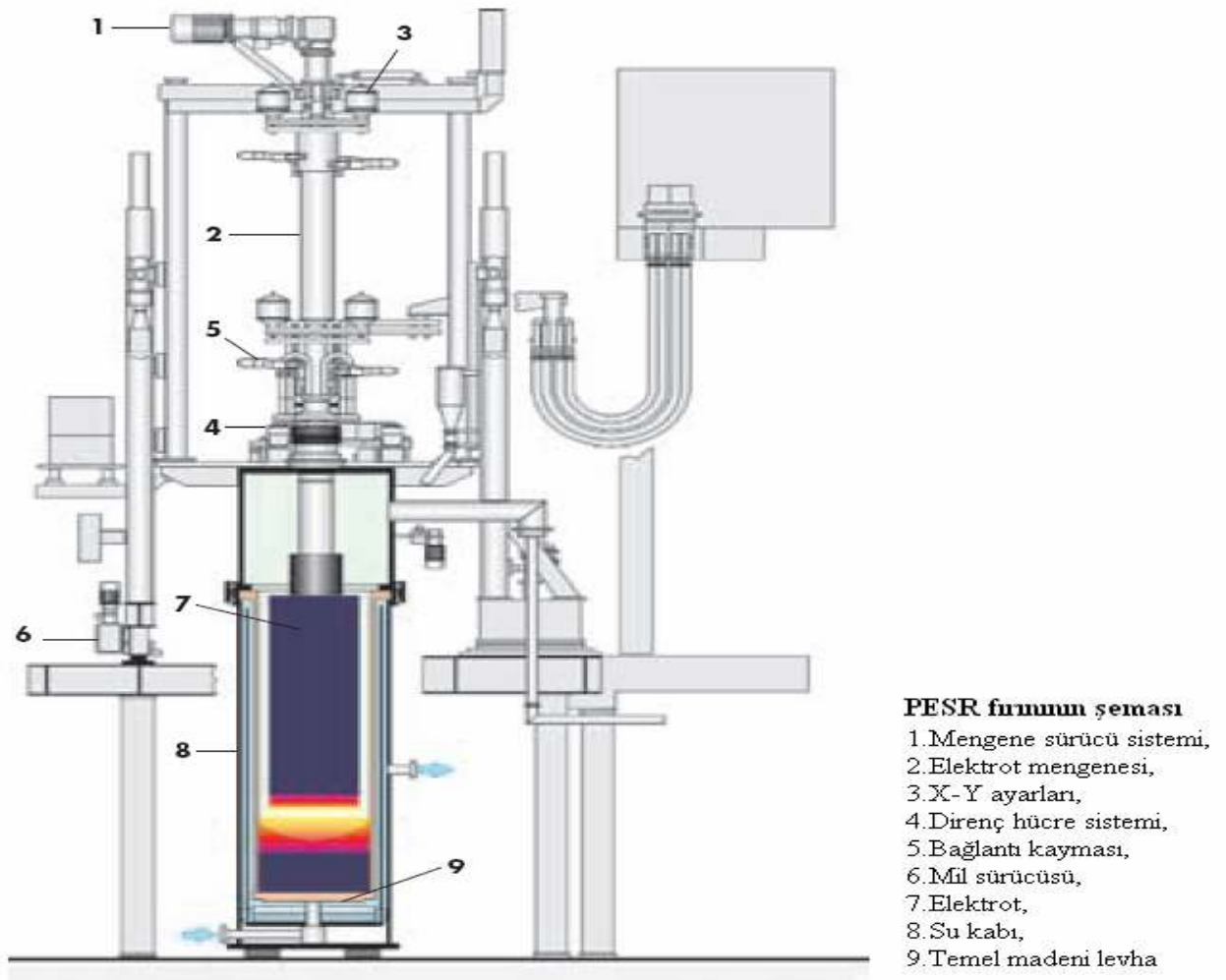


Şekil 2.6 IESR fırının şematik gösterimi [1]

2.3.3 Basınç Altında Elektro Curuf Ergitme

Son 30 sene içerisinde nitrojen, çeliğin özelliklerini geliştirmek amacıyla ucuz alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Östenitik çeliklerde nitrojen çözünmüş formdadır ve çeliğin sertliğini arttırmaktadır. Ferritik çeliklerde ise amaç; nitritlerin dispersiyon işlemi sonrası, aynen demir-karbon alaşımlarının su verme ve temperleme işlemi sonrası elde edilen mikroyapıya benzer bir mikroyapı elde edilmesidir. Proses işlemi boyunca çelik devamlı olarak nitrojen ile alaşımlanmaktadır (Stein ve Hucklenbroich, 2004).

Normal basınçta katılaşma sırasında metal bünyesinden nitrojen kaybı meydana gelmektedir. Bu yüzden artan basınç, işlem sırasında çözünmüş haldeki nitrojenin çelik bünyesinden atmosfere geçişini engellemek için kullanılmaktadır. Şekil 2.7’de PESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.7. PESR fırının şematik gösterimi [1]

ESR yöntemi;

- Süper alaşımlar(Yüksek dayanım, sürünme dirençi, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dayanımına sahip nikel bazlı alaşımlar)
- Takım Çelikleri
- Paslanmaz Çelikler
- Kalıp Çelikleri
- Büyük çapta dövme ingotlar. (Büyük çapta ingotların üretimi oldukça zordur. Yüksek saflık ve düşük makrosegregasyona sahip çelik üretimi için teknolojik uygulamalar gereklidir. ESR yöntemi bu talepleri karşılaması sebebiyle kullanılmaktadır. 200 metrik tona kadar ingot üretilmektedir.
- Miller
- Türbin, şaft, jeneratör şaftları gibi büyük yapı parçalarında
- Uzay uygulamaları için kullanılan titanyum alaşımları gibi malzemelerin üretilmesinde kullanılır.

Aşağıdaki şekilde ESR yöntemi kullanılarak üretilmiş büyük çaplı ingot gösterilmektedir.



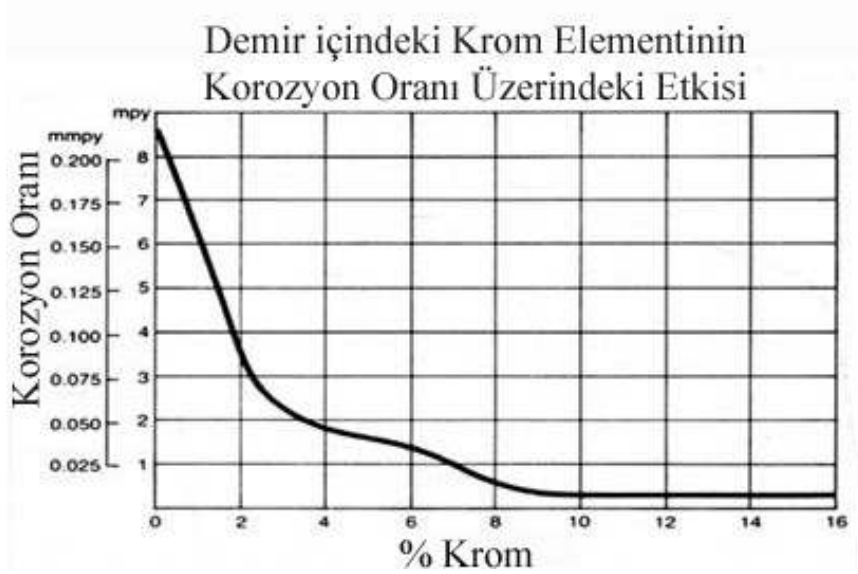
Şekil 2.8 ESR yöntemi kullanılarak üretilmiş ingot (165 ton, Boy:5000mm, Çap:2300mm)[1]

2.4 Paslanmaz Çelikler

Metalurjide paslanmaz çelik, minimum %10,5 krom elementi içeren bir demir karbon alaşımı olarak tarif edilir. Krom elementi, aşağıdaki çizelgede görüldüğü üzere çeliği paslanmaya karşı koruyan temel bileşendir. Paslanmaz çelik ismi, bu çeliklerin diğer çelikler gibi lekelenmemesi, korozyona uğramaması ve paslanmamasından almaktadır.

Bu malzeme aynı zamanda, alaşım tipi ve kaliteleriyle detaylandırılmamış şekliyle, özellikle havacılık endüstrisinde korozyon dayanımlı çelik olarak da adlandırılır. Çizelge 2.2’de malzemedeki krom miktarının korozyon oranına etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 2.2 Krom elementinin korozyona etkisi

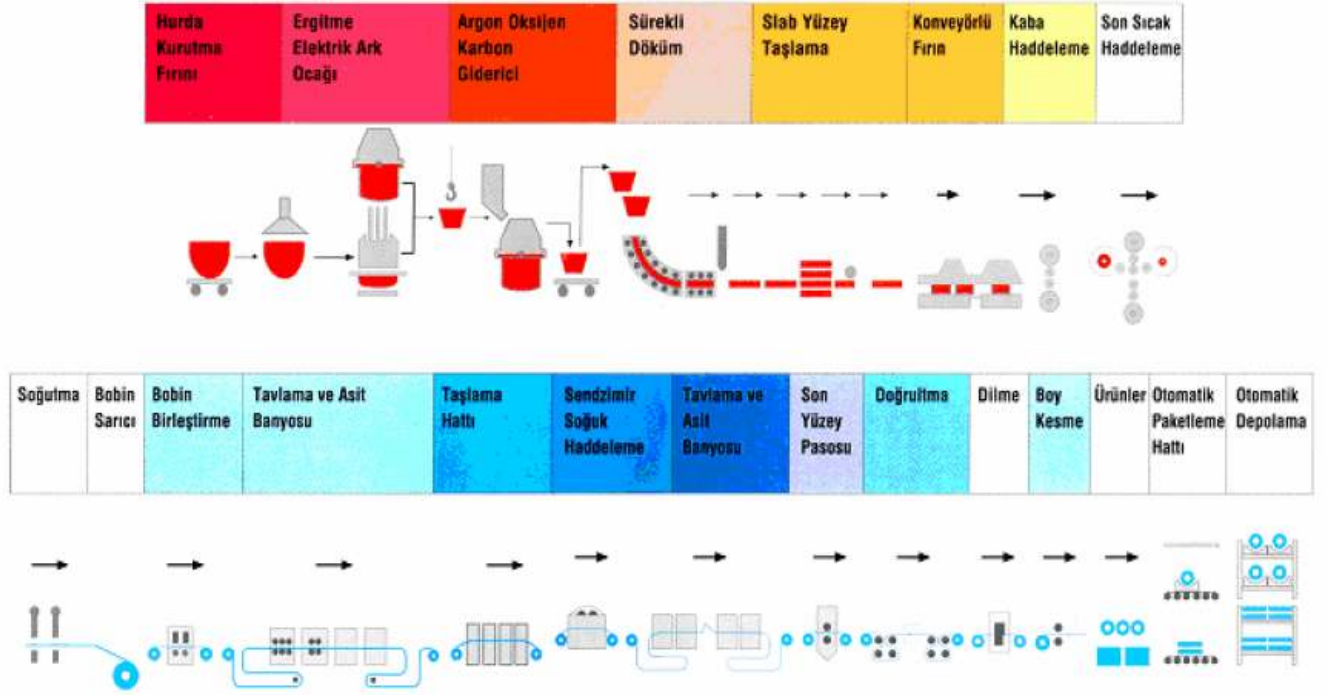


Paslanmaz çelik birçok doğal ve insan yapımı ortamda, korozyona ve oksitlenmeye karşı yüksek bir dirence sahiptir. Fakat her bir özel uygulama için doğru kalite ve tipteki paslanmaz çeliğin seçilmesi çok büyük önem taşır. Normal oda sıcaklığında ve hava şartlarında yüksek oksitlenme direnci, minimum %13 (ağırlık olarak), çok sert ve zor çevre şartlarında %30 ‘a kadar krom ilavesiyle başarılıdır. Paslanmaz çelikteki krom elementi oksijene maruz kaldığı zaman (normal atmosferde bulunan oksijen kastedilmektedir) hemen krom-oksit (Cr_2O_3) pasivasyon tabakası oluşturur. Bu katman gözle görülemeyecek kadar incedir ve ürünü oluşturan metale (paslanmaz çeliğin) su veya herhangi bir gaz, oksijen nüfuzunu tamamen engelleyerek, örttüğü metali korur. Ayrıca, bu katmanın herhangi bir nedenle yırtılması, açılması veya çizilmesi durumunda oluşacak açıklık, çok hızlı bir şekilde katmanın kendisini yenilemesiyle tekrardan oluşur. Bu olaya pasivasyon adı verilir ve titanyum gibi bazı diğer metallerde de görülür. Diğer düşük oranlarda kullanılan molibden ve vanadyum elementleri gibi nikel elementi de pasivasyon özelliğine katkı sağlar.

Paslanmaz çeliğin korozyona ve lekelenmeye karşı olan direnci, onu ticari olarak geniş bir uygulama alanında, düşük bakım maliyeti, diğerleriyle karşılaştırıldığında daha ucuz olması ve göz alıcı bir görünüme sahip olması nedeniyle ideal ve vazgeçilmez bir malzeme kılar.

2.4.1 Paslanmaz Çelik Üretimi

1970’li yıllarda geliştirilen ve dünyada paslanmaz çelik üretiminin %80’inin gerçekleştirildiği yöntem sayesinde, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve kalitenin yükseltilmesi mümkün olmuştur. Ergitme işleminin yapılacağı elektrik ark ocağına uygun paslanmaz çelik hurdası, karbon çelik hurdası, ferrokrom alaşımları ve gerektiğinde nikel ve molibden gibi alaşım elementleri yüklenir. Ergitme ocağına konmadan önce belirli bir süre kurutma fırınında tutulur. Daha sonra malzemeler alaşımlanmanın yapıldığı elektrik ark ocağında ergitilir. Bu üretimde en önemli adım “Argon oksijen karbür gidericisi”nde yapılan işlemdir (AOD). Burada paslanmaz çelik, adım adım istenen kimyasal bileşime ulaştırılır. Önce oksijen ve argon gazları, metal ergiye üflenir. Bu aşamada alaşımın bileşimindeki karbon yakılarak gerekiyorsa %0,02’ye kadar düşürülebilir. Krom oksitlenmeye hassas olduğundan, bu sırada bileşimdeki kromun bir kısmı da curufa geçer. Bu nedenle alaşıma kromun katılması büyük oranda karbür gidermenin tamamlanmasından sonra yapılır. Üçüncü aşamada ise alaşımdaki kükürt oranı düşürülür. Bileşim ve sıcaklık istenilen seviyeye ulaştığında, ergiyik döküm potasına aktarılır ve son ayarlamalar yapılır. Bu aşamada da alaşıma bazı elementler ilave edilir ve ergiğin homojenleştirilmesi argon gazı üflenerek yapılır (Aran ve Temel, 2004). Paslanmaz çeliklerin hurda halinden son ürüne kadar olan üretim aşamaları Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Paslanmaz çelik üretim şeması (Aran ve Temel, 2004)

Paslanmaz çelik üretiminde; alternatif ergitme ve rafinasyon işlemleri olarak vakum altında yeniden ergitme (VAR) ve curufaltı ergitme (ESR) yöntemleri kullanılmaktadır. Elektrik ark ocağında ergitilen ingotlar bu proseslerde elektrod olarak kullanılırlar. Bu iki yöntem kullanılarak üretilen çeliklerde daha az segregasyon ve daha iyi tane boyutu görülür. Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan paslanmaz çelikler iki kere ergitilmektedir. Malzeme ilk önce elektrik ark fırınında ergitilir. Daha sonra curufaltı ergitme işlemi ile elektrod haline getirilen malzeme tekrar ergitilmesi suretiyle daha temiz ve yüksek sıcaklıklarda çok iyi çalışma kabiliyetine sahip malzeme elde edilir. Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan paslanmaz çeliklerden birkaçı Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan paslanmaz çelikler

AISI	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	KULLANIM ALANI
304	0,035	18-20	2	-	8-13	0,04	0,03	0,75	Otomotiv, Kimya sanayi
316L	0,035	16-20	2	2-3	10-15	0,04	0,03	0,75	Kağıt endüstrisi, Nükleer Sanayi

410	0,15	11,5-13,5	1	-	0,5	0,04	0,03	0,75	Petrol ve doğal gaz boru hattı
420	0,15	12-14	1	-	-	0,04	0,03	1	Kalıp endüstrisi
310S	0,08	24-26	2	0,75	19-22	0,045	0,03	0,75	Yüksek sıcaklığa dayanıklı ekipmanlar

Paslanmaz çelikte;

- Korozyona dayanıklılık
- Estetik çekicilik
- Isıya dayanıklılık
- Tamamen geri dönüşüm
- Biyolojik olarak nötr
- Yüksek ağırlık/dayanıklılık oranı gibi temel özellikler bulunmaktadır.[4]

Paslanmaz çelik %100 geri dönüştürülebilir. Kullanılan paslanmaz çeliğin %60 'ı ömrünü tamamlamış ürünlerden alınan paslanmaz çelikler ve üretim proseslerinin hurdaları gibi geri dönüştürülen malzemelerin tekrardan değerlendirilmesiyle üretilmektedir. Paslanmaz çelikler esas itibariyle demir, krom ve çoğu zaman da nikel içeren alaşımlar olup başlıca özelliklerini kroma borçludurlar. Çeliğin içerisindeki kromun koruyucu kabiliyeti, krom ile oksijen arasındaki affiniteden ileri gelmektedir. Korozyona karşı dayanıklılığın gerçekleşebilmesi için, yüzeyin oksijenle temas etmesi şarttır. Yüzeyi koruyan ve tabaka teşekkül eden madde kromoksittir. İçerdikleri diğer katkı elementlerine göre değişen ve tamamen östenitik ile tamamen ferritik özellikler aralığında sıralanan beş farklı çeşit paslanmaz çelik türü vardır.

Bunlar;

- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler
- Çift Fazlı (Dupleks) paslanmaz çeliklerdir.
- Çökeltme Sertleşmeli paslanmazlar.

2.4.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bunlar düşük karbonlu ve bileşimlerinde %12-%18 krom içeren paslanmaz çeliklerdir. Ferritik paslanmaz çeliklerin başlıca;

- Orta derecede olan korozyon dirençleri, krom miktarının artması ile iyileşmesi
- Gerilmeli korozyon dirençlerinin iyi olması
- Isıl işlemle sertleştirilememeleri
- Manyetik özelliğe sahip olmaları
- Kaynak edilebilme kabiliyetlerinin düşük olması
- Östenitik çelikler kadar kolay şekillendirilememe gibi özellikleri bulunmaktadır.

2.4.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Karbon miktarı % 0,1'den fazla olan bu çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitik mikro yapıya sahiptirler. Östenitleme sıcaklığı, çeliğin türüne göre 950-1050°C arasındadır. Bu sıcaklıkta tutulan çeliğe su verilerek martenzitik bir mikroyapı elde edilir. Bunun sonucunda elde edilen yüksek sertlik, mekanik dayanım, yapıdaki karbon ile birlikte artar.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri;

- Orta derecede korozyon dayanımına sahiptirler.
- Isıl işlem uygulanabilir, böylece yüksek dayanım ve sertlikler elde edilebilir.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Manyetikler.

2.4.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik çeliklerin temel bileşimi %18 krom ve %8 nikeldir. Bu çeliklerin, biçimlendirilebilme, mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri oldukça iyidir. Manyetik olmayan bu çelikler dönüşüm göstermediği için sertleştirme ısıl işlemleri uygulanamaz. Mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile artırılabilir.

Östenitik paslanmaz çelikler;

- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
- Sünük olduklarından dolayı kolay şekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.

- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Manyetik değildirler.
- Dayanımları sadece soğuk şekillendirmeye ile artırılabilir.

2.4.5 Dupleks Paslanmaz Çelikler

Yüksek oranda krom (%18-28) ve (%4,5-8) oranında nikel içeren çeliklerdir. Nikel miktarı mikroyapılarının tamamen östenitik olması için yetersizdir. Yapının ferrit ve östenit fazlarından oluşması nedeniyle bu çelikler dupleks olarak adlandırılır. Bunlar, optimum özelliklerini, yapılarında ki fazların birbirlerine eşit miktarda bulundukların da sergilerler.

Dupleks paslanmaz çelikler;

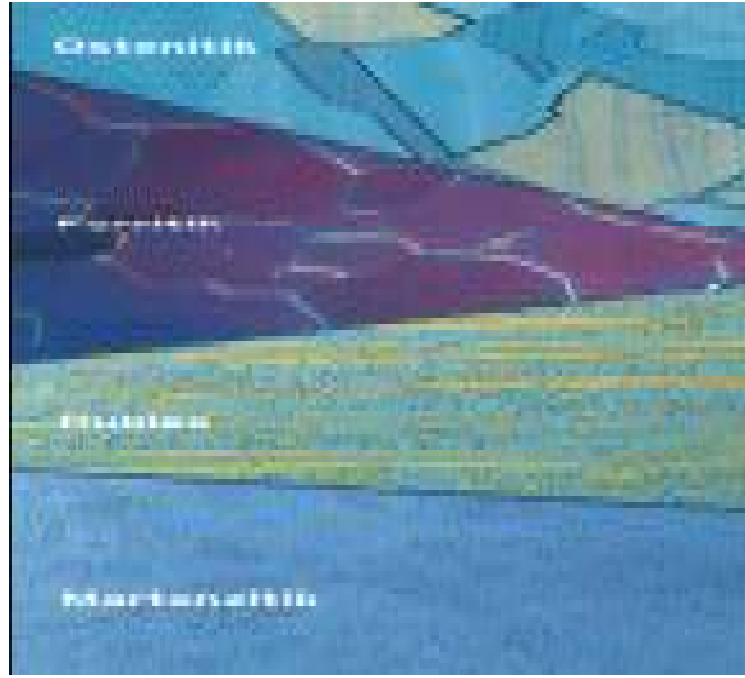
- Gerilmeli korozyona karşı yüksek dirence sahiptirler.
- Klorürlü ortamlarda daha yüksek korozyon dayanımı gösterirler.
- Östenitik ve ferritik çeliklerden yüksek mekanik dayanım sergilerler.
- İyi kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyetine sahiptirler.

2.4.6 Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Bu çeliklerin mikro yapıları östenitik, yarı – östenitik veya martenzitik olabilir. Çökelme oluşumu için alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri ile alaşımlama yapılırlar. Böylece mukavemetleri 1700 MPa' a kadar çıkan çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler elde edilebilir (Aran ve Temel, 2004).

Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler,

- Orta ile iyi derecede korozyon dayanımı vardır.
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir.
- Manyetikler.



Şekil 2.10 Paslanmaz çeliklerin mikro yapısı (Aran ve Temel, 2004)

Şekil 2.10’da görüldüğü gibi östenitik paslanmaz çeliklerin mikro yapısının östenit tanelerinden meydana gelirken ferritik paslanmaz çeliklerin yapısı ince ferrit tanelerinden oluşmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin yapıları ise ferrit tane yapısı içerisindeki karbür dağılımları şeklinde görülmektedir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin yapısı ise östenit matriks içerisinde uzanmış ferrit levhalarından meydana gelmektedir.

2.5 Takım Çelikleri

Genel olarak tüm metal, plastik, lastik, seramik ile kağıt ve ahşap malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmak üzere tasarlanan çeliklere takım çelikleri adı verilir. Takım çeliği yüksek oranda alaşım elementleri içerir. Yüksek alaşım elemanı, çeliğin ergitilmesinden dökümüne ve işlenmesine kadar her aşamasında diğer çeliklerin üretiminden farklı sistemlerin kullanılmasını zorunlu kılar. Çok yüksek nitelikli olan takım çeliklerinin üretiminde kullanılan yöntemler son derece kaliteli ve yüksek teknoloji ürünü süreçlerden oluşmaktadır. Döküm dipten döküm yöntemi ile yapılır. Elde edilen ingotlar, curufaltı ergitme işlemi(ESR) ile içyapı homojenliği kazandırılarak ve sonra dövülerek ısıtılma alınır.

2.5.1 Takım Çeliklerinin Üretimi

Takım çelikleri, prensip olarak asal çelik olarak ve daha çok da bazik ark fırınlarında üretilirler. İyi bir kalite için en önemli yaklaşım, az miktarda Cr, Ni ve Cu içeren temiz hurda

kullanılmasıdır. Ergitmenin, vakum altında (VAR) ve curufaltında ergitme (ESR) tarzında yapıldığı, yüksek kaliteli takım çeliği üretimi de yaygınlaşmaktadır. Curufaltı ergitme yöntemi (ESR); yüksek kalitede takım çeliği üretiminde kullanılan bir prosesdir. Bu yöntemin en çok kullanıldığı alan, türbin şaftlarının kritik parçalarını oluşturan alaşımlı çeliklerdir. Curufaltı ergitme yöntemi yüksek homojenlikte takım çeliği üretimine imkan sağlar. Takım çelikleri öncelikle geleneksel yöntemler kullanılarak ergitilir ve döküm işlemi yapılır. Bu işlem yapıldıktan sonra rafinasyonu istenen ingot elektrod olarak curufaltı ergitme fırınında kullanılır. İşlemden geçen ergimiş curuf, elektrod ile yeniden sıvılaştıran metali birbirinden ayırır. Elektrik akımı curuf ve fırına beslenen elektrodu ısıtır. Elektrik akımı ile elektrod da ısıtılma sonucu meydana gelen damlacıklar, curuftan geçerek rafine olurlar ve su soğutmalı kalıpta soğuyarak yeniden ingot haline gelirler. Curuf çeliğin rafinasyonunu sağladığı gibi yeni oluşan ingotu da atmosferik gazlardan korur. Curufaltı ergitme (ESR) yönteminde, yüksek çelik kalitesine, reaksiyon kabiliyeti yüksek curufun rafinasyonu ile ulaşılır. Bu tarzda üretilen yüksek saflıktaki çeliklerin yapısı; boşluksuz, kabarcıksız, gözeneksiz ve çekirdeksiz yapıdadır ve pek az çökelme eğilimi nedeniyle, daha iyi kimyasal homojenlik gösterir. Bu şekilde elde edilen iyi çekirdek özellikleri, özellikle büyük boyutlu takımlar için yarar sağlar. Yüksek saflıkta üretilmiş çeliklerden takım imalatı işleminde; parlatılabilirlik (yüksek polimer malzemelerin üretimi ve soğuk haddeleme takımları), iyileştirilmiş aşınma dayanımı (yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımı) ve yüksek sıcaklıkta çalışabilme kabiliyeti büyük önem taşır.

Yüksek kaliteli çeliklerden imal edilen takımların ömrü, takım cinsi ve kullanım koşullarına bağlı olarak geleneksel yöntemle üretilen çeliklere nazaran % 20 ilâ %100 daha fazla olmaktadır. Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan takım çeliklerinden bazıları ve kullanım alanları Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Curufaltı ergitme yöntemi uygulanan takım çelikleri

	C	Cr	Ni	Si	Mo	V	Mn	W	P	S	KULLANIM ALANLARI
H13	0,4	5,3	-	1	1,4	1	-	-	-	-	Plastik enjeksiyon kalıpları
1.2713	0,5-0,6	0,5-0,8	1,4-1,8	-	0,15-0,3		0,5-0,8	-	-	-	Dövme ve kesme takımları

1,2510	0,8-1	0,4-0,7		0,1-0,5			1-1,4	0,4-0,6			Delme ve kesme takımları
1,2316	0,34-0,42	13-14,5	-	0,6-1,3	-	0,15-0,4	0,2-0,7	-	0,03	0,03	Plastik kalıp kaplaması (korozyon direnci)
1,2343	0,33-0,43	4,75-5,5	-	0,8-1,2	1,1-1,6	0,3-0,6	-	-	-	-	Dövme ve sıkıştırma kalıplarında

Takım çelikleri 4 ana gruba ayrılırlar. Bunlar;

- Soğuk iş takım çelikleri
- Sıcak iş takım çelikleri
- Plastik iş takım çelikleri
- Yüksek hız takım çelikleri

Takım çelikleri zorlu şartlarda çalışmaktadır. Bu şartlarda çalışabilmek için;

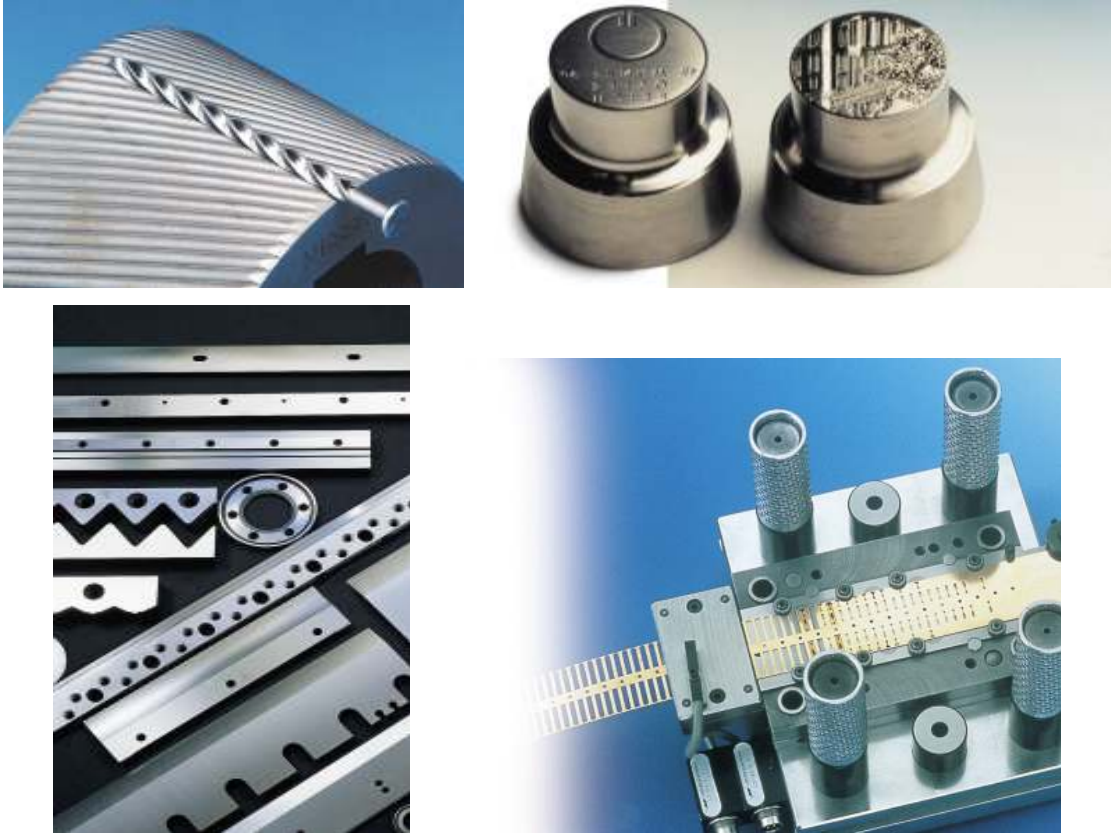
- Yüksek mukavemet
- Yüksek sertlik
- Yüksek aşınma direnci
- Yüksek sertleştirilebilirlik
- Yüksek süneklik
- Yüksek tokluk
- Yüksek parlatılabilirlik gibi özelliklere sahiptirler.

2.5.2 Soğuk İş Takım Çelikleri

Genel olarak 200°C'nin altındaki tüm metal, seramik, refrakter ve ahşap malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmak üzere tasarlanan çeliklere denir. Delme, presleme, zımbalama ve form verme amaçlı kullanılırlar.

Soğuk iş takım çeliklerinin özellikleri;

- Yüksek aşınma direnci
- Tokluk
- Süneklik



Şekil 2.11 Soğuk iş takım çelikleri kullanılarak üretilmiş parçalar[5]

Çizelge 2.5 ve 2.6'da çeşitli kompozisyondaki soğuk iş takım çeliklerinin özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 2.5 Soğuk iş takım çeliklerinin özellikleri

MALZEME	C	Cr	Mo	V	Diğerleri	AÇIKLAMA
1.2379	1.55	12	0.7	1	Si 0.4	Yüksek aşınma dayanımı
1.2363	1	5	1.2	0.2	Si 0.3	Isıl işlem esnasında ölçü değişikliği çok az olur, yüksek tokluk özelliği vardır.
1.2767	0.45	1.3	0.2	-	Ni 4	Parlatılabilirliği, sertleşebilirliği ve tokluğu yüksektir. İşlenebilirliği çok iyi olan desenleme için uygun malzemedir.
1.2436	2.12	11.2	-	-	W 0.65	Çok yüksek aşınma direncine sahiptir.
1.2601	1.65	12	0.6	0.3	W 0.5	Makaralar ve hadde topları için idealdir.
1.2067	1.00	1.5	-	-	-	Rulman çeliği olarak bilinir.
1.2360	0.5	7	1.5	1.4	Si 0.9	Tokluğu yüksek kesme kalıpları için idealdir
1.2378	2.2	12.5	1	2	-	Aşındırma direnci çok yüksektir.

1.2510	1	0.55	-	0.2	W 0.6	Darbe direnci iyidir.
--------	---	------	---	-----	-------	-----------------------

Çizelge 2.6 Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları

MALZEME	UYGULAMA YERLERİ
1.2379	Ekstrüzyon, şişirme takımlarında, zımbalarda, baskı plakalarında, madeni eşya imalatında, yüksek aşınma direnci gereken plastik kalıplarda ve bıçaklarda, 6 mm 'e kadar olan saçların hassas kesiminde kullanılır.
1.2363	Tokluğu ile aşınma dayanımı yüksektir. Ekstrüzyon, kesme, ezme gibi soğuk şekillendirme takımlarının hepsinde kullanılır.
1.2767	Desenleme kalıplarında, çatal,kaşık ve bükme kalıplarında kullanılır.
1.2436	Ateş tuğlası ve seramik üretiminde, yüksek performansı ile 1.2080 in yerine her türlü kesme ve şekillendirme daha iyi sonuç verir.
1.2601	Makaralar ve hadde topları için idealdir.

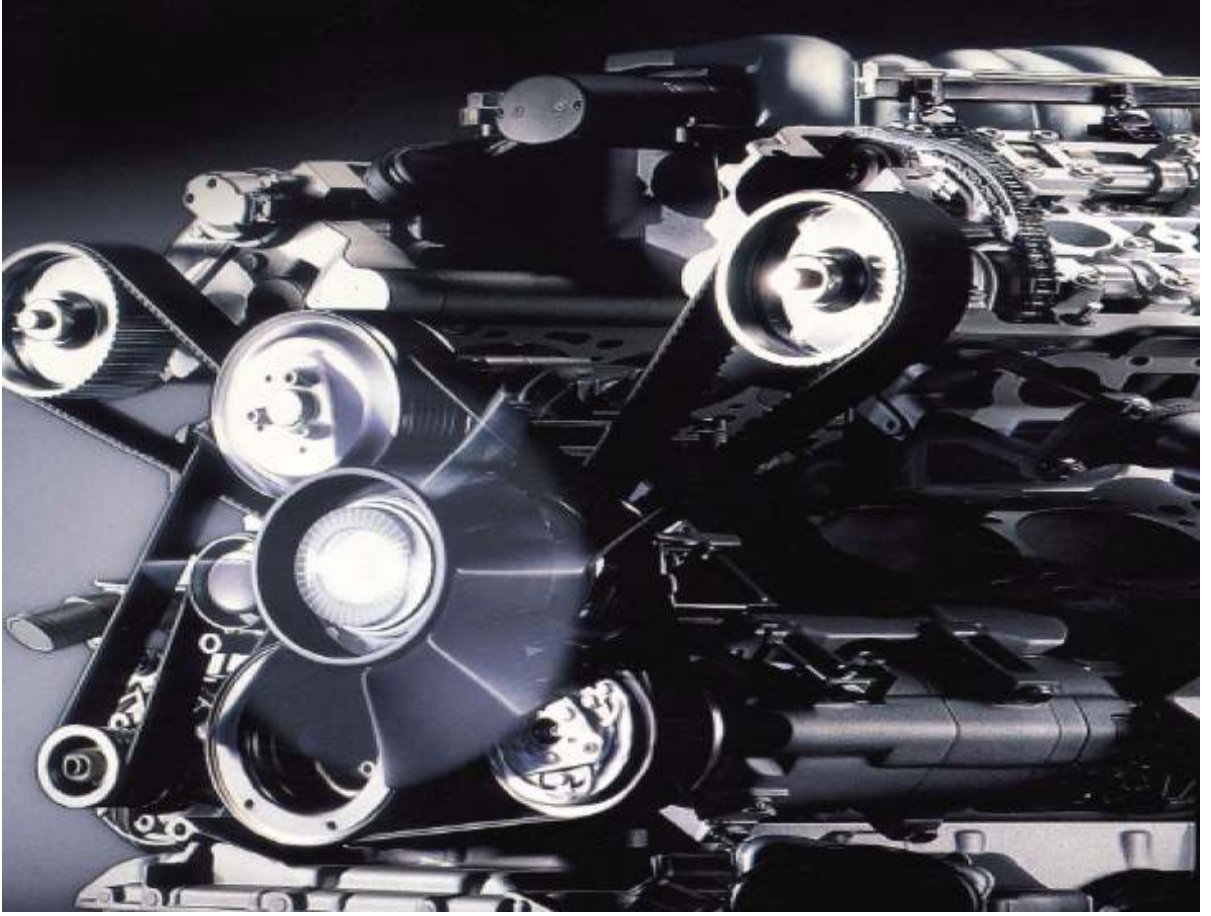
2.5.3 Sıcak İş Takım Çelikleri

Bir malzemeye 200°C'nin üzerine yapılan her türlü biçim verme işlemi sıcak şekillendirme olarak anılmaktadır. Bu işlem için kullanılan takımların çok büyük bir kısmı ise çeliktir. Sıcak şekillendirme ve pres döküm amaçlıdır.

Sıcak iş takım çelikleri;

- Yüksek sıcaklıkta akma mukavemeti
- Yüksek sıcaklıkta sertlik
- Yüksek meneviş direnci
- Yüksek süneklik
- Yüksek tokluk
- Yüksek sertleştirilebilirlik gibi özelliklere sahiptirler.

Aşağıdaki şekilde sıcak iş takım çelikleri kullanılarak üretilmiş motor bloğu gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Sıcak iş takım çelikleri kullanılarak üretilmiş motor bloğu[5]

Çizelge 2.7 ve 2.8’de çeşitli kompozisyondaki sıcak iş takım çeliklerinin özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 2.7 Sıcak iş takım çeliklerinin özellikleri

MALZEME	C	Cr	Mo	V	Diğerleri	AÇIKLAMA
1.2344	0.4	5.1	1.3	0.95	Si 1.1	En çok kullanımı olan sıcak iş takım çeliğidir.
1.2367	0.38	5	2.85	0.55	-	Sertleşebilirliği ve yüksek sıcaklık dayanımı iyidir.
1.2365	0.33	2.9	2.75	0.55	-	Yüksek sıcaklık dayanımı ve tokluğu yüksektir.
1.2714	0.55	1.1	0.47	0.1	Ni 1.6, Mn0.85	Dövme kalıpları için idealdir. 40-44 HRC de sevk edilir.
1.2885	0.31	2.95	2.8	0.55	Co 2.85	Isıl iletkenliği çok yüksektir.

1.2709	0.03	0.25	4.8	-	Co 9 Ni 18 Ti 1.1	Özel managing çeliği
1.2581	0.3	3	-	0.4	W 9	Yüksek sıcaklık mukavemeti çok iyidir.

Çizelge 2.8 Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları

MALZEME	UYGULAMA YERLERİ
1.2379	Ekstrüzyon, şişirme takımlarında, zımbalarda, baskı plakalarında, madeni eşya imalatında, yüksek aşınma direnci gereken plastik kalıplarda ve bıçaklarda, 6 mm 'e kadar olan saçların hassas kesiminde kullanılır.
1.2363	Tokluğu ile beraber aşınma dayanımı da yüksektir. Ekstrüzyon, kesme, ezme gibi soğuk şekillendirme takımlarının hepsinde kullanılır.
1.2767	Desenleme kalıplarında, çatal, kaşık ve bükme kalıplarında kullanılır.
1.2436	Ateş tuğlası ve seramik üretiminde, yüksek performansı ile 1.2080'in yerine her türlü kesme ve şekillendirme daha iyi sonuç verir.
1.2601	Makaralar ve hadde topları için idealdir.

2.5.4 Plastik Kalıp Çelikleri

Tokluk gerektiren plastik kalıplama ve yüksek polisajlı kalıplar içindir. Parlatılabilirlik özelliği ve işlenebilirlik özelliği iyi, baskı mukavemeti ve korozyon dayanımı yüksek olan çeliklerdir. Çizelge 2.9 ve 2.10'da çeşitli kompozisyondaki plastik kalıp çeliklerinin özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 2.9 Plastik Kalıp Çeliklerinin Özellikleri

MALZEME	C	Cr	Mo	Ni	Diğerleri	AÇIKLAMA
1.2738	0.4	2	0.25	1	Mn 1.5	Büyük plastik kalıpları için idealdir. Parlatılabilirliği yüksektir.
1.2083	0.4	12.5	-	-	-	Parlatılabilirliği ve korozyon dayanımı yüksektir.
1.2316	0.36	16	1.2	-	-	PVC kalıpları için idealdir

1.2312	0.4	1.9	0.12	-	Mn 1.5 S 0.05	İşlenebilirliği yüksek olan plastik kalıp çeliği.
1.2311	0.4	1.9	0.2	-	Mn 1.5	Küçük boyutlu plastik kalıpları için idealdir.
1.1730	0.45	-	-	-	Mn 0.7 Si 0.3	Kalıp hamil çeliği
1.2764	0,19	1.3	0,2	4.1	-	Parlatabilirliği çok yüksektir.

Çizelge 2.10 Plastik kalıp çeliklerinin kullanım alanları

MALZEME	UYGULAMA YERLERİ
1.2738	Plastik kalıpları ve basınçlı döküm kalıp hamilleri, ekstrüzyon pres kalıpları
1.2083	Korozyon etkisi olan kimyasal içerikli kalıplarda
1.2316	Paslanmaz özelliği ile korozyona karşı dirençlidir.
1.2312	Paslanmaz özelliği ile korozyona karşı dirençlidir. PVC vb. kalıplarda iyidir.
1.2311	Kalıp hamilleri, taşıyıcı matris olarak

2.5.5 Yüksek Hız Çelikleri

İçerdikleri yüksek alaşım elementleri sayesinde yüksek aşınma direncine ve tokluğa sahiptirler. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilenler ince karbür yapısına sahip temiz bir yapıda olurlar. Delme/kesme için, yüksek sıcaklıklarda sertliklerini muhafaza özelliğine sahiptir. Şekil 2.13’de Yüksek hız çelikleri ile üretilmiş kesme ve delme aparatları yer almaktadır.





Şekil 2.13 Yüksek hız çelikleri ile üretilmiş kesme ve delme aparatları[5]

Çizelge 2.11 ve 2.12’de çeşitli kompozisyondaki bazı yüksek hız çeliklerinin özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 2.11 Yüksek hız çeliklerinin özellikleri

MALZEME	C	Cr	Mo	V	Diğerleri	AÇIKLAMA
1.3343	0.9	4.1	5	1.8	W 6.2	Standart yüksek hız çeliği
1.3243	0.9	4	5	1.8	W 6.5 Co 5	%5 Kobaltlı yüksek hız çeliği
1.3207	1.25	4	3.4	3.2	W 10 Co10.5	%10 Kobaltlı, yüksek sıcaklık mukavemeti çok iyidir.
1.3247	1.1	4.2	9.5	1.2	W 1.5 Co 8	%8 Kobaltlı. Tokluğu yüksek malzeme

Çizelge 2.12 Yüksek hız çeliklerinin kullanım alanları

MALZEME	UYGULAMA YERLERİ
1.3343	Talaşsız şekillendirmelerde kullanıldığı gibi, kesici testereler, frezeler, klavuzlar, raybalar için de kullanılırlar.
1.3243	1.3343 den farklı olarak yüksek sıcaklığa ve oluşan sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklıdır. Azdırma frezeler, modül frezeler ve çok yüksek dirençli malzemeleri işlemede kullanılan matkap uçları
1.3207	Yüksek performansın beklendiği freze bıçakları, delme zımbaları ve tornalarda kullanılır.
1.3247	Al ve alaşımlarını, prinçleri, otomat çeliklerini işlemede kullanılan tornalarda, testereler ve delme zımbaları için idealdir.

3. CURUFALTI ERGİTME PROSESİNDE KULLANILAN CURUFLARIN ÖZELLİKLERİ

Curufaltı ertitme yöntemi su soğutmalı bakır kalıp içerisinde bulunan curuf havuzuna elektrod formundaki ingotun daldırılması suretiyle ertitilmesi işlemidir. İngotun ertitilmesi için gereken ısı, curuf banyosuna gönderilen elektrik akımı vasıtasıyla meydana gelmektedir. Bu sebeple prosese gereken ısının oluşmasında, kullanılan curufun elektrik iletkenliği çok önemlidir. (Fleming, 1976) Proseste curuf olarak kullanılan kalsiyum florürün(CaF_2) elektrik iletkenliği çok yüksektir. Böylece curuf havuzuna gönderilen elektrik akımından ısı oluşmasını sağlar (Wei, Xiang, 1993).

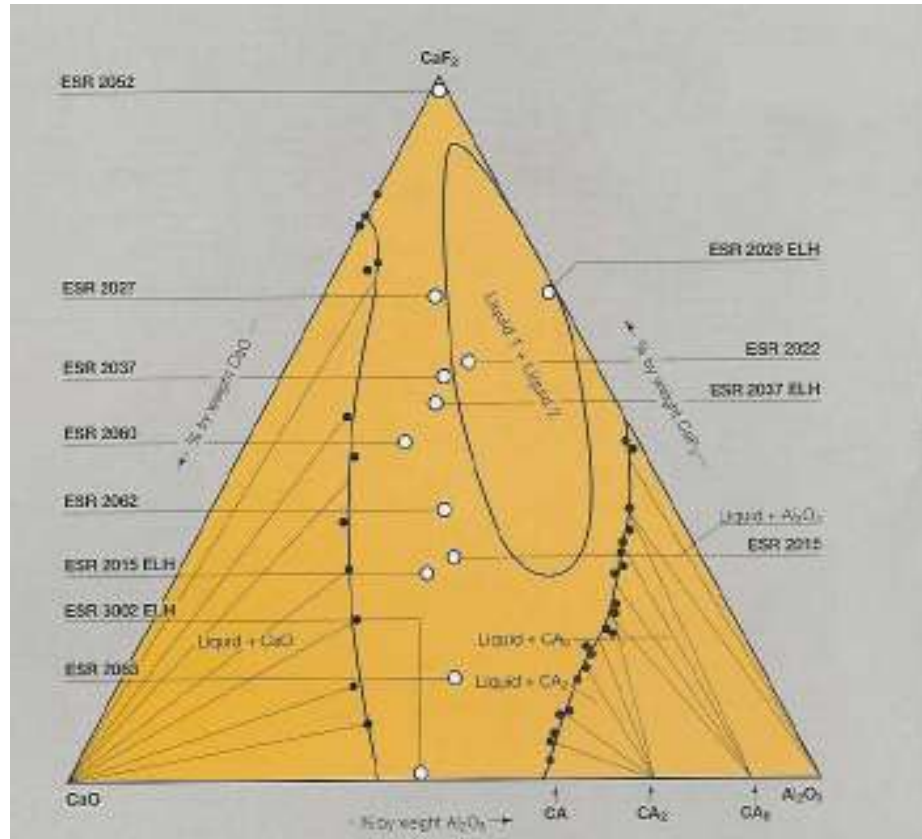
Curuflar; demir yapımı, çelik yapımı ve sürekli döküm gibi metalurjik işlemlerde çok önemli rol oynamaktadır. Kimyasal, termal ve fiziksel özellikler curufların performanslarına büyük etki etmektedirler. Curuf kompozisyonu olarak kullanılan CaF_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 bünyedeki inklüzyonlara ve alaşım elementlerinin büyüklüklerine ve miktarlarına etki ederler. Kaliteli ve temiz ürün yapımında bünyede bulunan sülfür, metalik veya metalik olmayan emprütelerin çok düşük olması gerekir. Bu emprüteler malzemenin mekanik davranışını kötü yönde etkiler. Sonuç olarak bunların bünyeden uzaklaştırılması gerekmektedir. Demir ingotlarda sülfür miktarı VIM, VOD, VD gibi geleneksel yöntemlerle ağırlıkça %0.02 oranına kadar azaltılırken curufaltı ertitme yöntemi(ESR) ile ağırlıkça %0.004 oranına kadar azaltılabilmektedir. Bu yüzden bu metod çelik rafınasyonunda en çok bilinen yöntemdir (Choudhury, 1990).

Curufaltı ertitme prosesinde; meydana gelen reaksiyonlar ile ergimiş curuf içindeki inklüzyonların yüzdürülmesi, sülfid gibi alaşım içinde bulunan emprütelerin yer değıştirmesi sonucunda emprüte miktarı azalırken bu düşüş alaşımın özelliklerinin artmasını sağlar. Çizelge 3.1’de sanayide kullanılan örnek curuf tipleri ve bu curufların kimyasal içerikleri verilmektedir. Curufları oluşturan ana birleşikler CaO , Al_2O_3 , CaF_2 olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ana birleşiklere ek olarak ergime, iletkenlik, viskozite gibi önemli özellikleri etkileyecek birleşikler, curuf kompozisyonuna eklenmektedir.

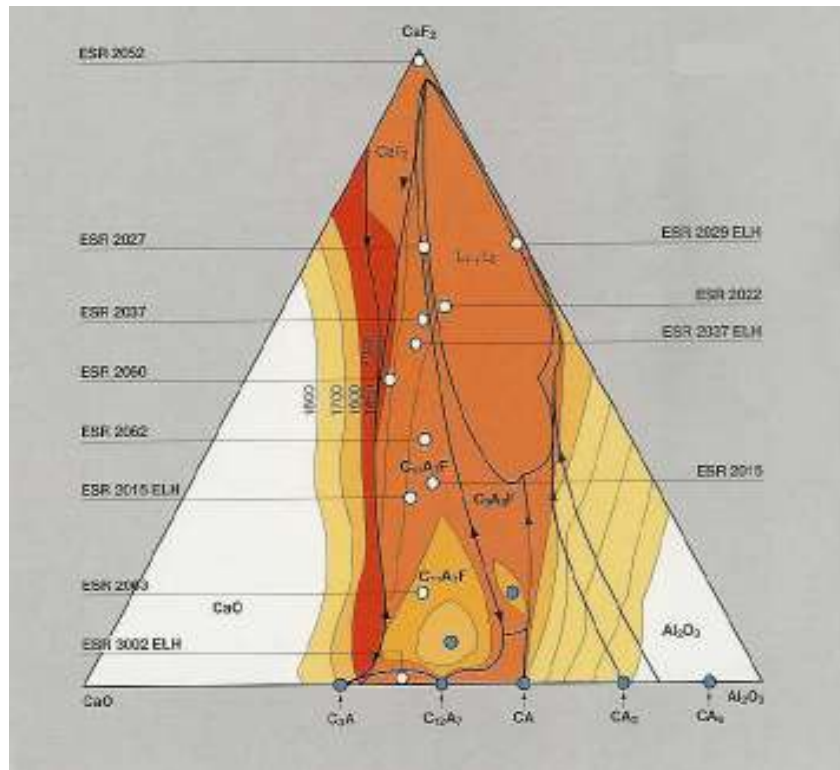
Çizelge 3.1 ESR curuflarının kimyasal içerikleri

ESR Cüruf Tipleri	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% FeO	% TiO ₂	% CaO+ MgO	% CaO	% MgO	% CaF ₂	% H ₂ O (650 °C)	% C	% P	% S	Pb ppm	Bi ppm
ESR 2015	1.5 ± 0.5	33.5 ± 2.5	≤ 0.2	≤ 0.2		29.5 ± 2.5	3.0 ± 1.0	31.5 ± 2.5	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2022	1.5 ± 0.5	23.0 ± 2.0	≤ 0.2			15.0 ± 2.0	2.0 ± 1.0	58.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2027	≤ 0.5	15.0 ± 1.5	≤ 0.15	≤ 0.2	17.0 ± 2.0		≤ 1.5	67.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.025	≤ 0.005	≤ 0.025	≤ 2	≤ 2
ESR 2037	≤ 0.6	20.5 ± 1.5	≤ 0.15	≤ 0.2	20.0 ± 2.0		≤ 2.0	58.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.025	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2052	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 0.2			≤ 2.0		Min 97.0	≤ 0.005*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2059	≤ 0.6	22.0 ± 2.0	≤ 0.15	3.0 ± 0.6		20.0 ± 2.0	5.0 ± 0.8	48.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2060	≤ 0.6	20.0 ± 2.0	≤ 0.2			27.0 ± 2.0	3.0 ± 1.0	48.0 ± 3.0	≤ 0.07*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 2	≤ 2
ESR 2062	≤ 0.6	30.0 ± 2.0	≤ 0.15			28.0 ± 2.5	2.5 ± 0.5	38.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2063	1.5 ± 0.5	41.5 ± 2.5	≤ 0.2	≤ 0.2	41.5 ± 2.5		4.0 ± 0.6	14.5 ± 1.5	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2065	≤ 0.8	30.0 ± 2.0	≤ 0.3	≤ 0.8	30.0 ± 2.0		≤ 1.0	38.5 ± 3.5	≤ 0.15*	≤ 0.03	≤ 0.01	≤ 0.03	≤ 10	≤ 10
ESR 2072	22.0 ± 2.0	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.2		21.0 ± 2.0	12.0 ± 1.5	44.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.03		

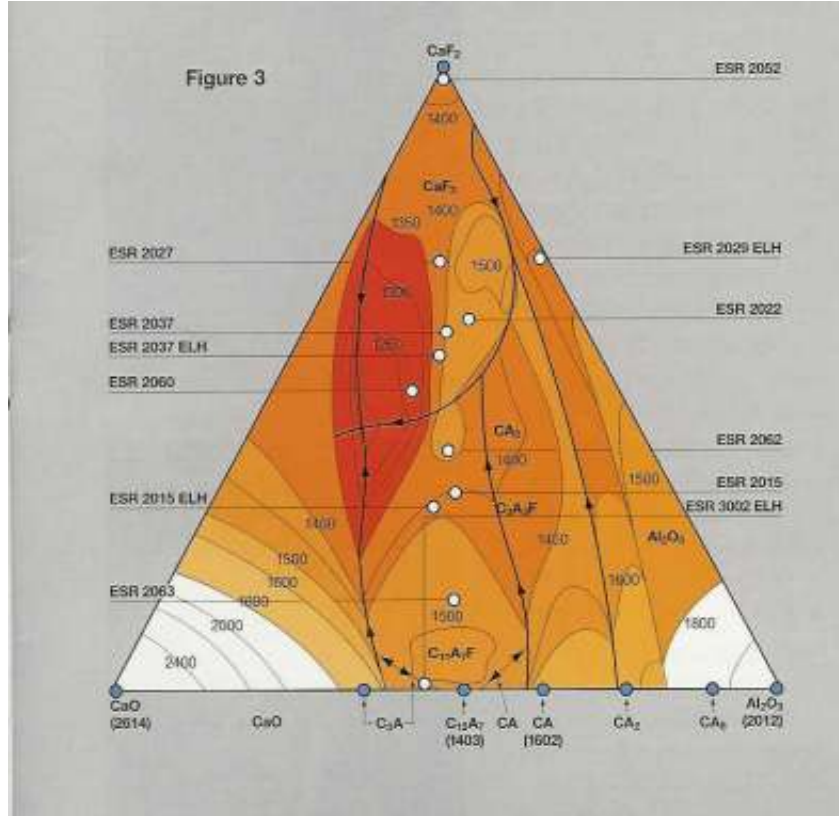
Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3’de CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz sistemleri gösterilmektedir. Bütün şekillerde örnek curufların faz diyagramında yerleri belirtilmiştir. Şekil 3.1’ de 1600 °C deki izotermal kesiti göstermektedir. ESR 2022 curufu hariç diğer tüm örnek cüruflar tek fazlı sıvı bölgededir ve karalıdır. ESR 2022 curufu monafaz bölgesine çok yakındır.(sıvı-sıvı birleşme aralığındadır.) Şekil 3.2 ve 3.3’deki faz diyagramlarına bakarak izotermal erime noktalarıyla, ESR yönteminde kullanılan curuflarının ergime davranışlarını anlamak mümkündür.



Şekil 3.1 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı (Ries, Schwerdtfeger, 1980)

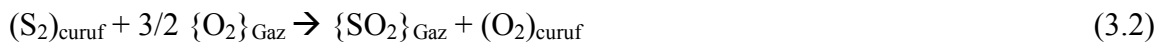


Şekil 3.2 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı (Chatterjee, Zhmoydin, 1972)



Şekil 3.3 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı (Nafziger, 1973)

Desülfürizasyon işleminin gerçekleşmesi için curuf ve ergiyik arasında kimyasal bir reaksiyonun meydana gelmesi gerekmektedir.



1'nolu eşitlikte belirtildiği gibi ergiyik içindeki oksijen miktarının azalması ve curuf miktarının artması, desülfürizasyon işleminin verimliliğini artırır.

2'nolu eşitlikte curuf içindeki sülfür çevrede bulunan oksijenle reaksiyona girerek sülfürdioksit meydana getirecektir. Bu yüzden bu proses de oksijen önemli rol oynamaktadır (Hoyle, 1982).

Bir diğer önemli faktör bazikliklerdir.

B: $\text{CaO} + 2/3 \text{MgO}$



'B' baziklik faktörüdür. Ergime hızının azaltılması ve curuf ile metal arasındaki reaksiyon süresinin artırılması desülfürizasyon işleminin daha verimli olmasını sağlar.

Baziklik ayrıca sıcaklığa ve akışkanlığa bağlıdır (Chernov ve Roshchin, 2001).

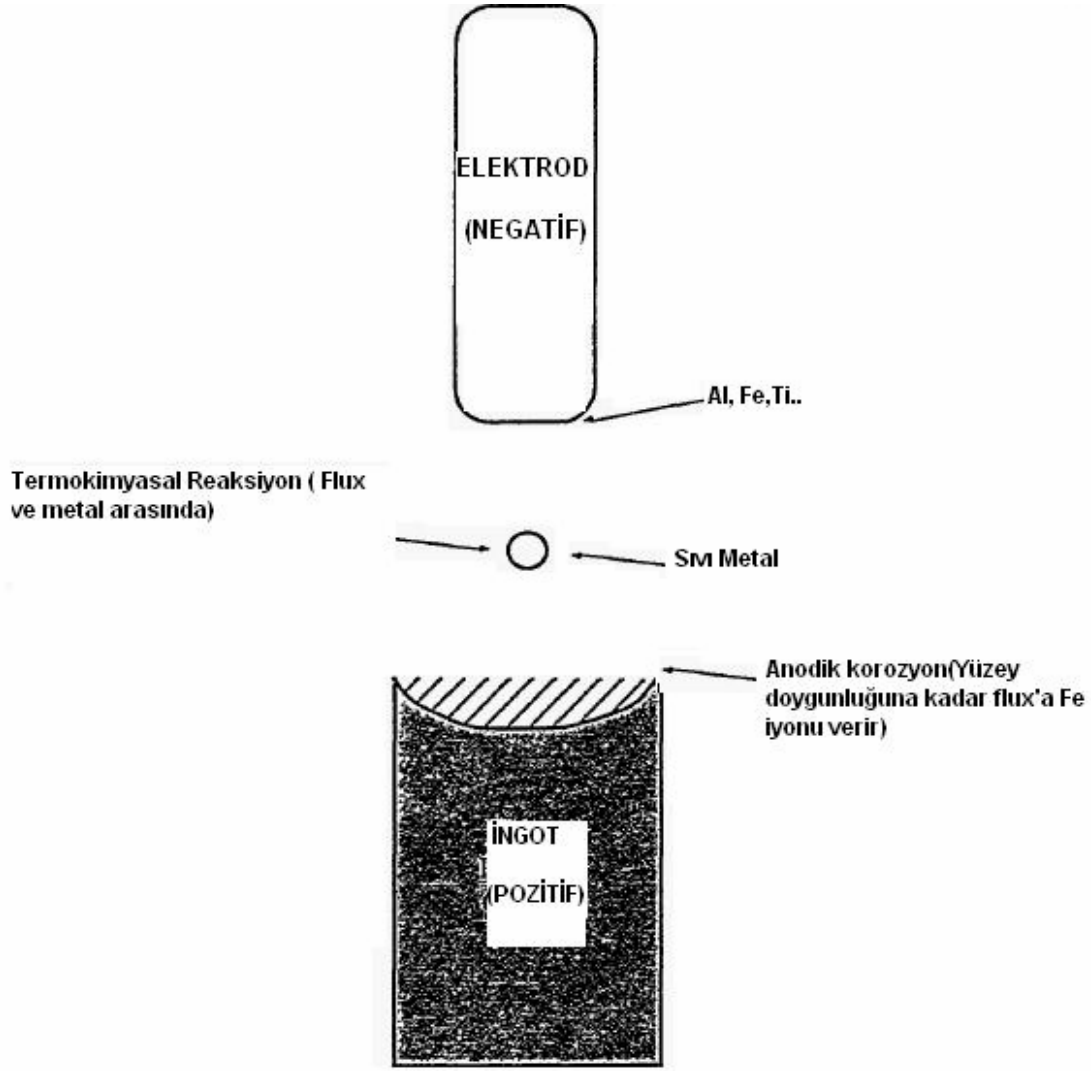
CaO'in çok iyi sülfür absorplama özelliği vardır ancak yüksek ergime noktası sebebi ile yeniden ergitme prosesinde %30'dan fazla kullanılmamaktadır. Günümüzde curufaltı ergitme(ESR) prosesinde kullanılan geleneksel curuflar yüksek ergime noktalarına sahiptir. Bu curufların kullanılması düşük reaksiyon hızına ve düşük kalsiyum oksit kullanımına sebep olur. CaO bazlı curuflara CaF_2 ilavesi curufun ergime noktasını düşürerek reaksiyon kinetiğini artırır. Al_2O_3 ve SiO_2 ilavesi curufun elektrik direncini artırırken, MgO ilavesi ise curufun bazikliğini artırır. Yüksek sıcaklıkta çalışan metalurjik sistemlerde; ergimiş curufun elektriksel iletkenliği, elektrik ergitme fırınlarının çalışmasında ve modellenmesinde çok önemli bir rol oynar. Curufun elektriksel iletkenliği, elektriksel alanda hareket eden iyonlar tarafından sağlanmaktadır. SiO_2 , P_2O_5 gibi asidik oksitler, 3 boyutlu ağ yapısına sahip oldukları için ergimiş hale geldiklerinde bile iyonların hareketlenmesi çok zordur bu yüzden bu oksitlerin iletkenliği çok düşüktür. Bazik oksitler ise oksijen iyonlarını bırakmak suretiyle asidik oksitlerin ağ yapılarını kırarlar böylece belli bir miktar aralığında; CaO, MgO, MnO gibi oksitlerin ilavesi ile iletkenlik artmaktadır. Al_2O_3 ise düşük baziklikte bazik oksit gibi davranırken, yüksek baziklikte ise asidik oksit özelliği göstermektedir. Yüksek baziklikte Al^{3+} , AlO_4^{5-} tetrahedron dönüşümü yapar ve Si yerini alır. 1 mol SiO_2 'nin 1 mol Al_2O_3 ile yer değiştirmesi serbest iyon sayısını azaltacağından dolayı iletkenlikte düşüş meydana gelir. Elektriksel iletkenlik bir yerde yer değiştirme prosesidir bu yüzden sıcaklıkta, işlem süresince etki etmektedir. Elektrik iletkenliği ve curuf bileşenleri arasındaki ilişki çok karışıktır. Bileşendeki küçük bir değişiklik iletkenliği ani bir şekilde düşürebilmekte veya yükseltebilmektedir.

Curufaltı ergitme prosesinde kullanılacak curuflar, prosesde metal rafinasyonunu sağlaması için belirli kompozisyonlara sahip olmalıdır. Curuf üzerinde yapılan araştırmalarda, curufun fiziksel ve kimyasal özellikleri curufaltı ergitme prosesinin başarılı olabilmesi için birincil öncelik taşımaktadır. Curufaltı ergitme prosesinde kullanılacak curufun aşağıdaki özellikleri taşıması istenmektedir.

- Curufun sıvı sıcaklık derecesi, ergitilmek istenen metalden düşük olmalıdır.
- Metalin ergime sıcaklığında, curufun yoğunluğu metalin yoğunluğundan düşük olmalıdır.
- Prosesin ekonomik olabilmesi için curufun elektrik iletkenliği düşük olmalıdır.
- Curufun ergimesi esnasında oluşan sıcaklık curufu kolayca ergitecek kadar olmalıdır.
- Curufun termal iletkenliği, metal ingotun üzerini izole edecek kadar düşük olmalıdır.
- Curuf, proses sıcaklığında düşük buhar basıncına sahip olmalıdır.

- Curuf, yüksek yüzey gerilimine sahip olmalıdır.
- Curuf, metalin yüzeyini kaplayacak kadar katılaşabilme özelliğine sahip olmalıdır.
- Curuf, yüksek sıcaklıklarda istikrarlı ve yüksek sıcaklıklarda ergiyen metal ile uyumlu olmalıdır.
- Curufun viskozitesi proses sırasında gaz çıkışını sağlayacak kadar düşük, proses sırasında meydana gelen metal damlacıklarının akmasını sağlayacak kadar yüksek olmalıdır.

Reaksiyonlar meydana gelerek, bünyede istenmeyen elemanların uzaklaştırılmasını ve metal rafinasyonunu sağlar. Aşağıdaki şekilde proses sırasında meydana gelebilecek reaksiyon bölgeleri gösterilmiştir. Karbitler, nitritler curufaltı ergitme yönteminde curuf içeriği olarak kullanılmamaktadır. Bunun sebebi, ergime sıcaklıklarının çok yüksek olmasıdır. Ayrıca curufların ayrışma sıcaklıkları 1273 K'den yüksektir (Nafziger, 1976). Alkaliler de pratikte curuf olarak kullanılmaya uygun değildir. Buhar basınçları çok yüksektir. Proses şartlarının öngördüğü sıcaklık ve basınçta sürekli değişkenlik gösterirler. Bu yüzden kullanılan malzemeler toprak alkali ve floridler ile sınırlanmıştır. Şekil 3.4'de ESR işleminde reaksiyon bölgelerinin şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.4 Curufaltı ergitme (ESR) prosesinde meydana gelen saflaştırma işlemi(Nafziger, 1976)

3.1 Elektriksel İletkenlik ve Sıcaklık Arasındaki İlişki

İyon iletkenliği ile termal aktivasyon prosesinin birbirleri ile bağlantılı olduğu göz önüne alınırsa, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık Arrhenius kuramı ile açıklanabilir.

$$k = A \exp(-E / RT) \quad (3.4)$$

k: Curufun elektriksel iletkenliği

A: Sabit

E: Aktivasyon enerjisi

R: Gaz sabiti

T: Sıcaklık

Bütün bazik ve asidik oksitler iletkenliği etkileyebilir. Yüksek SiO₂ ve Al₂O₃, curufun düşük iletkenliğe ve sıcağa daha duyarlı olmasına neden olur.

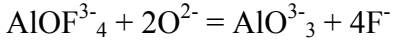
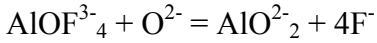
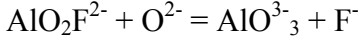
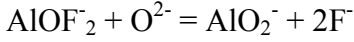
3.2 CaF₂'nin Curuf İçindeki Etkisi

Curufun elektriksel iletkenliği, curufun içindeki iyon miktarına ve iyon hareketliliğine bağlıdır. İyon hareketliliği, iyonun büyüklüğü ve viskozite ile ters orantılıdır.

Florid içeren curufun elektriksel iletkenliği florid içermeyen curufa oranla 10 ila 100 kat daha fazladır.

3.2.1 CaF₂-Al₂O₃ İkili Sistemi

CaF₂+Al₂O₃ ikili ve CaF₂+Al₂O₃+CaO üçlü sistemleri; (Al_x-O_y-F_z)ⁿ⁻ ve (Al_u-O_v)^{m-} gibi kompleks iyonlar sebebi ile ergimiş saf CaF₂ den farklı durumdadırlar. Kompleks iyonların dizilimi, florür iyonlarının hareketliliğini azaltarak toplam iyon hareketliliğinin azalmasına neden olur. Ca⁺² iyonunun hareketliliğinin azalması CaF₂+Al₂O₃ sistemindeki Al₂O₃ miktarının artması, elektrik iletkenliğinde büyük bir düşüőe neden olur.(Mitchell ve Cameron, 1971)



Az miktarda CaO ilavesi CaF₂+Al₂O₃ sisteminde ayrılmaya ve florür iyonlarının serbest kalmasını sağlamaktadır. Bu ilave CaF₂+Al₂O₃ sisteminin elektrik iletkenliğini arttırır.

3.2.2 CaF₂-FeO İkili Sistemi

CaF₂ elektriksel iletkenliği, FeO ilavesi ile artmaktadır.

3.2.3 Yoğunluk

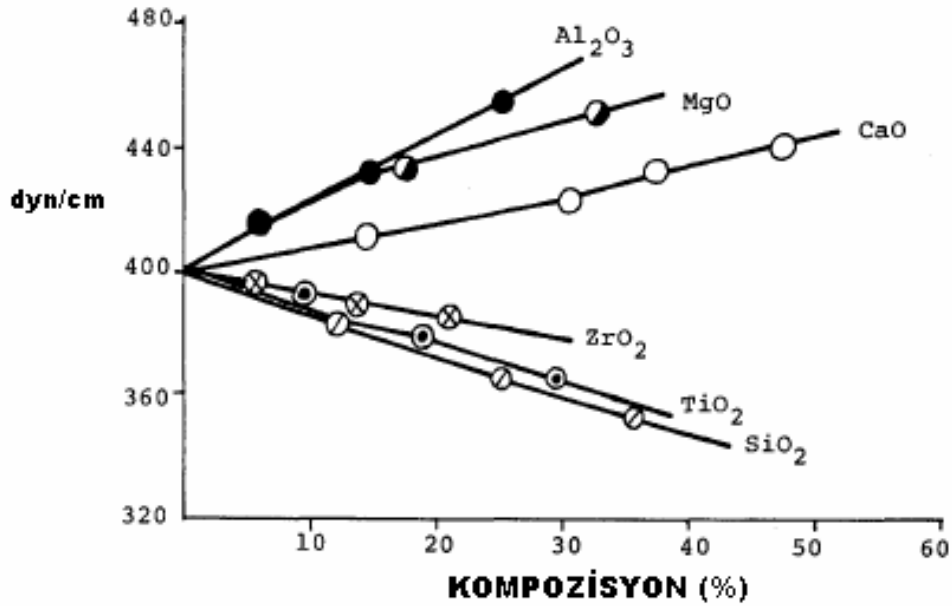
Metal ve curuf arasındaki yoğunluk farkı yüksek ise, işlem sonrası ergimiş metalden curufu ayırmak çok kolay olmaktadır. Curufa CaF₂ ilavesi curufun yoğunluğunu arttırmaktadır ancak sıcaklık arttıkça yoğunlukta düşüş görölmektedir. CaF₂ bünyesine Al₂O₃ ve CaO ilavesi bünyenin yoğunluğunu arttırmaktadır.

3.2.4 Yüzey Gerilimi

Rafinasyon işlemlerinde aşağıdaki şartların yerine getirilmesi çok önemlidir.

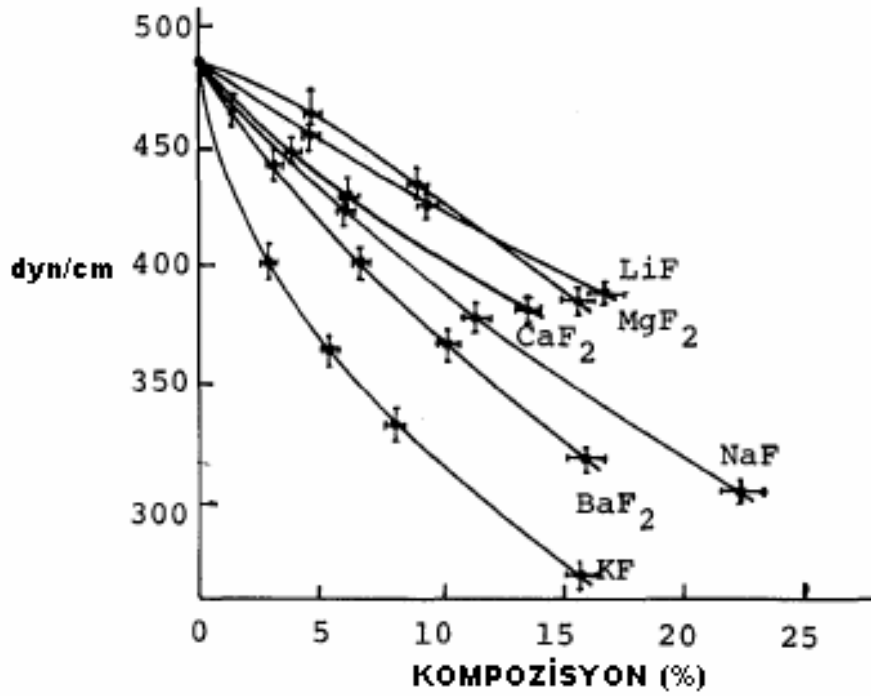
- a) Curufun ergimiş metal havuzundan uzaklaştırılması
- b) Katılaşmış metalden curuf tabakasının kolayca ayrılması

Curuf içindeki SiO_2 'nin yüzey gerilimine etkisi ihmal edilebilir seviyede olmasına karşın, CaO 'in yüzey gerilimine kuvvetli bir etkisi vardır. Al_2O_3 ise zayıf yüzey etkisine sahiptir. Al_2O_3 , MgO , CaO curufta katkı malzemesi olarak kullanılması CaF_2 'ün yüzey gerilimini arttırmaktadır. ZrO_2 , TiO_2 ise yüzey gerilimini düşürmektedir. Şekil 3.5'de katkı malzemesi olarak kullanılan çeşitli oksitlerin yüzey gerilimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Oksitlerin CaF_2 bazlı karışımlara etkisi (Ejima ve Shimoji, 1970)

'Ejima ve Shimoji' ergimiş $\text{CaO}+\text{SiO}_2$ sistemlerinin yüzey gerilimlerini ölçmüşlerdir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yaklaşık % 0-20 mol aralığında florid içeren alkali ve toprak alkali metallerde yüzey geriliminin, florid konsantrasyonunun artması ile düştüğü görülmüştür.



Şekil 3.6 Floridlerin CaO-SiO₂ bazlı sistemler üzerine etkileri (Ejima ve Shimoji, 1970)

3.3 Özgül Elektriksel Direnci

Spesifik elektrik dayanımı veya spesifik elektrik iletkenliği, curufun ergime verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Curufun özgül direnci ne kadar fazla olursa ergime olayı da o kadar ekonomik olur. Sıcaklık artışı curufun özgül elektriksel direncini doğru orantılı olarak etkilemektedir. Özgül elektrik direnci az olan curuflarda mecburen yüksek akımla çalışılır, bu da iletken bağlantılardaki kaybı arttırır.

3.4 Curufun Viskozitesi

İnklüzyonların metalden curuf içerisine alınabilmesi homojen bir yapının proses genelinde sağlanabilmesi için curufun viskozitesinin düşük olması gerekir. Akışkanlığı yüksek olan ergiyik haldeki curuf metal içindeki inklüzyonların curuf içerisine alınmasını kolaylaştıracaktır.

3.5 Depolama ve Raf Ömrü

ESR curufları bir ergime prosesi ürünüdür ve yoğun tane yapısına sahiptir. Çoğu curuflar havadaki neme duyarlı (CaO içeriği) olmasından dolayı, eğer nemli ortamda sevk edilirse curuflar hidrat hale gelir. Nem emiliminden korumanın en iyi yolu zarar gelmeden ve uygun şekilde sevk etmektir.

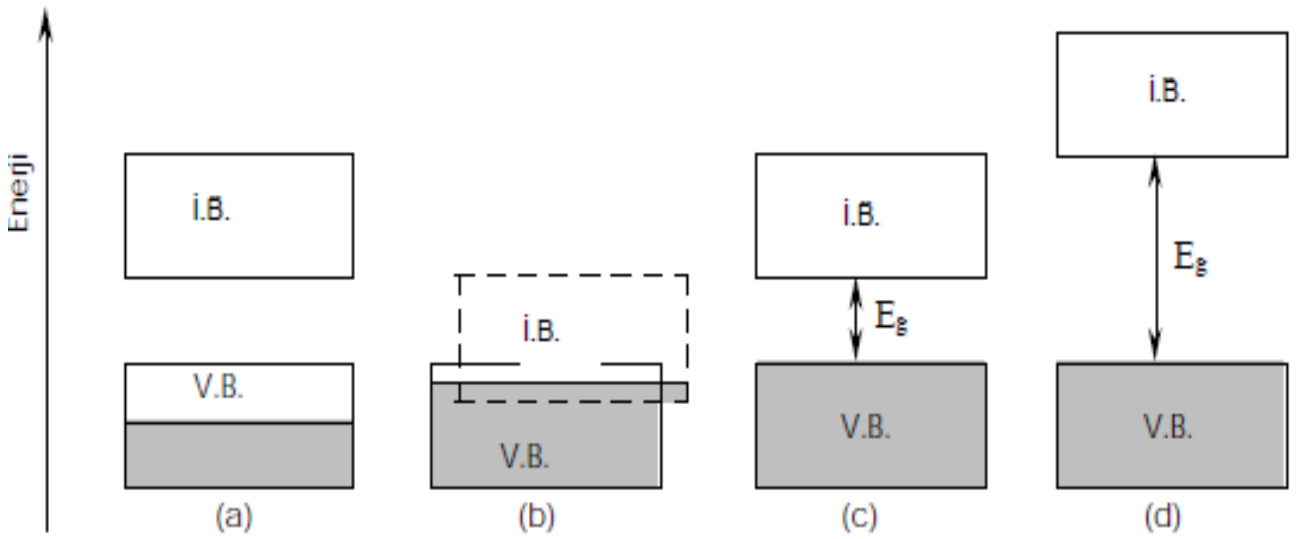
4. ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

Elektrik iletkenliği, malzemelerden geçen elektrik akımının ölçümüdür. Bir madde elektrik akımına karşı ne kadar az direnç gösterirse o kadar iyi iletkenidir. Maddelerdeki elektrik akımı iletkenliği elektronların hareketi ve iyonların hareketi ile ilgilidir. Elementlerden metaller elektrik akımını iletir, ametaller iletmez. İyonik bağlı katı kristaller elektrik akımını iletmezler. Bunlar sıvı hâlde ve sulu çözelti hâlinde elektrik akımını iletirler. Elektrik iletimi; elektronların bir maddenin içinden geçmesi demektir. Aşağıdaki eşitlik Ohm yasasıdır.

$$V = I.R \quad (4.1)$$

R dirençli bir cismin uçları arasına V voltajı uygulanmış ise, o dirençten geçen akım I kadar olur. Bu eşitlikte yer alan R maddenin bir özelliği olarak kullanılmaz, zira R maddenin geometrisine de bağlıdır. Bu bakımdan bir maddenin geometrisine bağlı olmayan ve onun bir özelliği olan öz direnci (ρ) kullanılmaktadır.

Katılarda yüklü parçacıkların (elektronların) hareket edebilmeleri için onların gidebilecekleri bir enerji düzeyinin boş olması gerekir, bir başka deyişle; elektronlar boş bir enerji düzeyi varsa hareket edebilirler, aksi halde hareket edemezler. Buna göre, eğer bir bant dolu ise voltaj uygulansa bile elektronlar hareket edemezler.



Şekil 4.1 Sıcaklıkta iletim ile valans bantlarındaki elektron doluluk durumları ve bantların enerji eksenine doğru konumları [6]

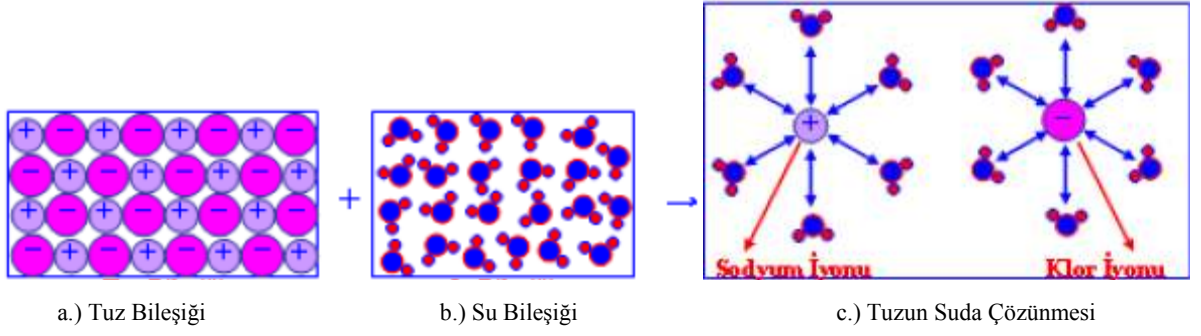
Şekil 4.1.a'da görüldüğü gibi bant dolu değildir ve elektronun gidebileceği bir enerji düzeyi bantta mevcuttur. Bu durumda elektronun hareket etmesine bir engel yoktur ve en küçük potansiyel farklarda bile, sıcaklık ne olursa olsun elektrik akımı ölçülebilir. Bu tür banda sahip olan katılar metallerdir, bilindiği gibi elektriği çok iyi iletirler.

Şekil 4.1.b; bu tür katılarda valans bandın tamamen dolu ve iletim bandının da tamamen boş olması gerekir. Ancak, elektronlar kendilerine ayrılan enerji düzeyinden daha aşağıda boş enerji düzeyleri varsa oraya doğru hareket ederler. Böyle bir yapıda da iletim bandının alt kısmı ile valans bandının üst kısmı örtüştüğünden, dolu olması beklenen valans bandın üst kısmındaki elektronlar, boş olan iletim bandının alt kısımlarına geçerler. Bu durumda da elektronların hareket edebilmeleri mümkün olur. Böylece elektrik akımını iletirler ancak geçiş yapan elektron miktarının az olması sonucu, metaller kadar iyi iletmezler. Bu malzemeler yarı metal olarak adlandırılırlar.

Şekil 4.1.c,d; iki şekil arasındaki tek fark, iletim bandı ile valans bandı arasındaki E_g ile gösterilen yasak enerji aralığının birinde küçük, diğerinde büyük olmasıdır. E_g için kesin bir sınır olmamasına rağmen, E_g 'nin 3 eV'tan küçük değerlerine sahip katılara yarı iletken, bu değerden büyüklerine sahip olan katılara da yalıtkan adı verilmektedir. Her iki katı için de, valans bantlarının tamamen dolu ve iletim bantlarının da tamamen boş olması sonucu elektriği iletemezler. Elektrik iletkenliği birçok endüstride çok önemli bir rol oynamaktadır.

4.1 Çözeltilerin İletkenliği

Elektrik akımı, sadece elektronlar tarafından değil aynı zamanda iyonlar tarafından da taşınabilir. İyonlar tek atom halinde veya atom grubu olarak elektrik akımı ile yüklenebilirler. Buna örnek su içinde çözünmüş tuz verilebilir. Tuz bünyesinde pozitif yüklü sodyum iyonları ve negatif yüklü klorür iyonları içerir. Katı halde iyonlar hareketsizdirler fakat su içinde çözündükleri zaman hareketli hale gelirler ve suya uygulanacak elektrik akımına tepki verirler. Elektrik akımından gelen elektronlar; pozitif yüklü olan sodyum iyonlarını bir yöne doğru hareketlendirirken, negatif yüklü olan klorür iyonlarını ise sodyum iyonlarına zıt yönde hareketlendirirler. Saf su sadece su molekülleri içermektedir. Su molekülleri içindeki elektronlar; hidrojen ve oksijen atomları tarafından tutulmaktadır, bu yüzden hareket edemezler. Bu nedenle saf su, uygulanan elektrik akımına tepki vermez ve yalıtkan olarak davranır.



Şekil 4.2 Tuzun suda çözünmesinin aşamaları; a) Tuzun katı haldeki düzeni, b.) Suyun sıvı haldeki düzeni, c.) Suda çözünmüş sodyum ve klor iyonları[7]

Molar iletkenliğin birimi Siemens'dir. Molar iletkenlik, iyonların tek tek etkisiyle oluşmaktadır. Buna iyonların serbest geçiş kanunu denilmektedir. Aşağıdaki denklemde iyonların özgül iletkenliği ve iyon sayısının, molar iletkenliğe etkisi verilmiştir.

$$\Lambda = \sum v_i \lambda_i \quad (4.2)$$

Λ : Molar İletkenlik

λ : İyonların özgül iletkenliği

v : İyonların sayısı

Tuzlar, güçlü asitler ve bazlar gibi yüksek elektrolit içeren çözeltilerin iletkenlikleri konsantrasyonla çok az değişirken, zayıf asitler gibi az elektrolit içeren çözeltilerde iletkenlik konsantrasyonla büyük değişiklikler göstermektedir (Castellan, 1983).

4.2 Sıcaklığın İletkenlik ve Direnç Üzerine Etkisi

Malzemelerin elektrik iletkenliği ve dirençleri sıcaklığa bağlıdır. Çoğu malzemenin iletkenliği sıcaklığın yükselmesi ile düşmektedir. Bunun yanında çoğu malzemenin direnci sıcaklığın yükselmesi ile artmaktadır. Bunun artışın nedeni, sıcaklık artışı ile kafes yapıları içinde bulunan kusurların(dislokasyonlar, boşluklar, emprüte atomlar) sayısının artmasıdır, bu artış atom içerisinde bulunan elektronların hareketini güçleştirir. Buna ek olarak sıfır derecenin üstünde bile latis atomları elektron hareketine etki etmese bile, elektronlar her zaman atom içerisindeki ideal yerlerini bulamazlar. Termal enerji, malzeme içerisindeki atomun titremesine neden olur. Bu titreme nedeniyle herhangi bir zamanda atomlar bulundukları yerden ayrılarak elektron hareketine engel olur. Metallerde; sıcaklığın artması malzemenin iletkenliğini düşürürken, yalı iletken malzemelerde sıcaklığın artışı ile iletkenlik artar.

Çözeltilerde sıcaklık artışı, çözelti içinde bulunan iyonların hareketini artırarak çözeltinin elektrik iletkenliğini attırır. Malzemenin direnci, malzemenin sıcaklık katsayısı biliniyorsa aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak bulunabilmektedir.

$$R_1 = R_2 * [1 + a * (T_1 - T_2)] \quad (4.3)$$

R₁: T₁ sıcaklığında malzemenin yaklaşık direnci

R₂: Malzemenin T₂ sıcaklığında ölçülen direnci

a: Sıcaklık katsayısı

T₂: Direncin ölçüldüğü sıcaklık

T₁: Direncin istendiği sıcaklık

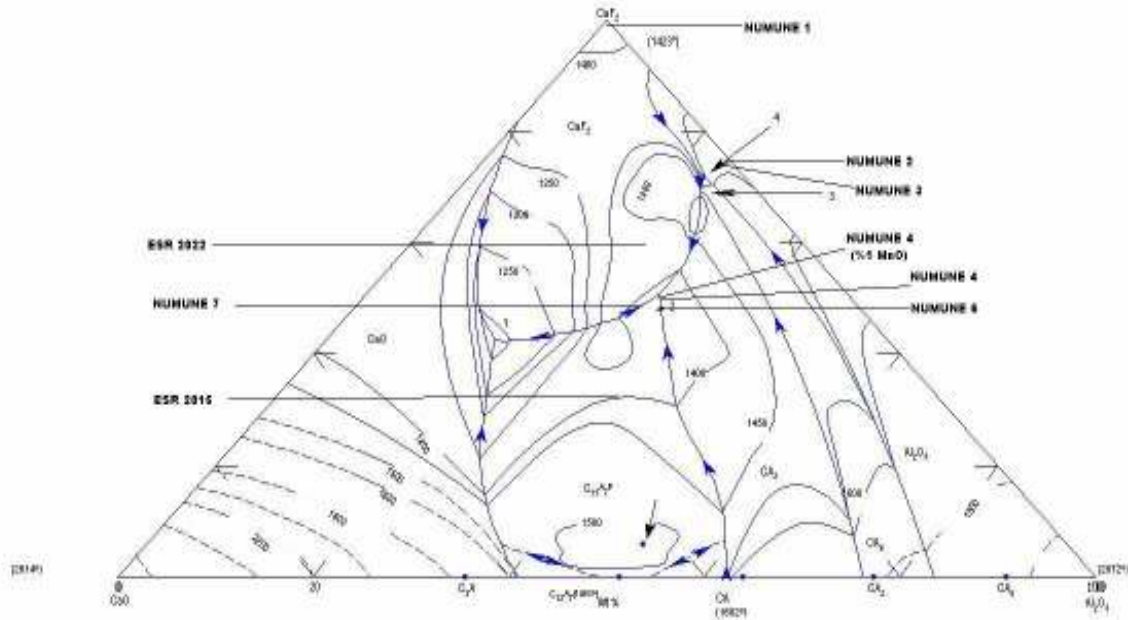
Bazı metalik malzemelerin sıcaklık katsayısı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Metalik malzemelerin sıcaklık katsayısı

Malzeme	Sıcaklık Katsayısı (/ °C)
Nikel	0.0059
Demir	0.0060
Molibden	0.0046
Tungsten	0.0044
Alüminyum	0.0043
Bakır	0.0040
Gümüş	0.0038
Platin	0.0038
Altın	0.0037
Çinko	0.0038

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Elektro Curuf Ergitme (ESR) yöntemi, arıtma ve katılaştırmanın beraberce kontrol altında yapılabildiği bir prosestir. Yöntemde; metalurjik curufun düşük elektrik iletkenliğinden ve iyi arıtma özelliğinden faydalanılmaktadır. Bu tez çalışmasında; klasik ESR yönteminden farklı olarak elektrik ark fırınından çıkan ve kalıplarda elektrod olarak şekillendirilen çelik ingotlar yerine kaliteli çelik hurdalarının kaynak edilmesiyle oluşturulan elektrodlar kullanılmıştır. Bu uygulama sırasında hem prosesin değişken parametrelerini hem de curufun karakteristiğini değiştirerek optimum şartlar belirlenmiştir. Bu işlemler için çeşitli literatür araştırmaları yapılmış ve Wei Chiho ve Xiang Shunhua'nın 1993'de yazdığı "Electrical Conductivity of Molten Slags of $\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$ Systems for ESR" isimli makalesinden ve sanayide kullanılan bazı curuf kompozisyonları seçilerek deney için hazırlanmıştır. Şekil 5.1'de CaO , Al_2O_3 , CaF_2 üçlü faz sistemleri gösterilmektedir. Sanayide kullanılan bazı curuflar ve deneysel çalışmalarda kullanılan curuf örneklerinin faz diyagramdaki yerleri Şekil 5.1 üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 5.1 Curufların faz diyagramındaki yerleri

Çizelge 5.1’de seçilen curuf numyelerinin kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 5.1 Curuf numyelerinin kompozisyonları

NUMUNE NO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	SiO ₂	MnO	MgO
1	99,9	-	-	0,1	-	-	-
2	74,9	25	-	0,1	-	-	-
3	75,4	24,5	-	0,1	-	-	-
4	49,9	30	20	0,1	-	-	-
5	49,9	30	19	0,1	-	1	-
6	49,3	29,4	19,6	0,2	1,5	-	-
7	48,9	29	19,1	1,5	1,5	-	-
ESR 2015	31,5	33,5	29,5	0,2	1,5		3

Curuf numyelerinin ergitilmesi ve numyelerin dirençlerinin ölçülmesi için numyenin hazırlanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle istenilen curuf numyesini oluşturan malzemelerin istenilen oranı hazırlamak için hassas terazide ağırlıkları tartılmıştır. Karışımın homojen bir şekilde dağılması için karıştırıcıya koyulmuş ve yaklaşık olarak 1 saat karıştırıcıda karıştırma işlemi uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde bileşimi hazırlanan ve karıştırıcıda homojen karışımın sağlanması amacı ile karıştırılmış curuf numyesi yer almaktadır.



Şekil 5.2 Karıştırıcıdan çıkarılmış curuf numyesi

Karıştırma işlemi sonrası numune potaya koyulmuş ve iletkenlik ölçümünün yapılabilmesi için platin teller Şekil 5.3’de olduğu gibi potada bulunan numune içine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3 Ölçüm için yerleştirilmiş platin teller

Tellerin birbirine değmesi ve yanlış veriler alınmaması amacı ile tellerden bir tanesinin çevresine ısıya dayanıklı seramik boru yerleştirilmiş, tellerin potaya değmemesini sağlamak amacı ile potanın belli bölümüne cam yünü yerleştirilmiştir. Teller numune içine yerleştirildikten sonra fırın çalıştırılarak curuf numunesinin ergimesi ve direnç değerlerinin alınabilmesi için istenilen sıcaklığa ayarlanmıştır. Fırın istenilen sıcaklığa çıkartıldıktan sonra bu sıcaklıkta yaklaşık olarak 1 saat daha bekletilmiştir. Aşağıdaki şekilde curufların fırın içerisinde ergitilmesi işlemi için kullanılan Protherm marka ergitme fırını yer almaktadır.



Şekil 5.4 Numunelerin ergitme işleminin yapıldığı fırın

Numunenin fırında ısıtılma işleminden sonra fırın kapatılarak direnç ölçmek için kullanılan LCR metre ile numunenin istenilen sıcaklıklarda dirençleri ölçülerek numunenin iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.5 Ölçüm için kullanılan LCR metre

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

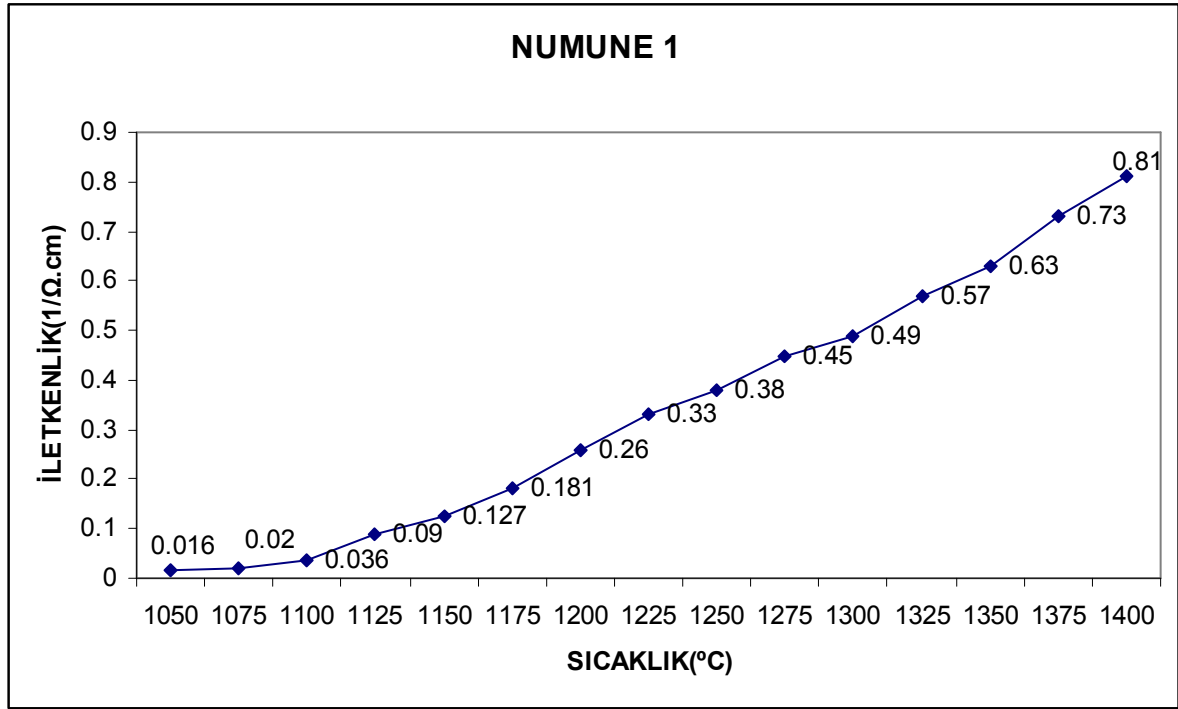
6.1 Curufların İletkenliklerinin Ölçülmesi

Numunelerin belirli sıcaklıklarda dirençleri bulunmuş ve iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Numunelere ait sıcaklık ve o sıcaklığa ait iletkenlik değerleri çizelge ve şekiller ile gösterilmiştir. Çizelge 6.1’de numunenin sıcaklık ve iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 Numune 1’e ait sıcaklık-iletkenlik değerleri

SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1050	0,016
1075	0,02
1100	0,036
1125	0,09
1150	0,127
1175	0,181
1200	0,26
1225	0,33
1250	0,38
1275	0,45
1300	0,49
1325	0,57
1350	0,63
1375	0,73
1400	0,81

Şekil 6.1’de 1. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Numune 1’e ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi

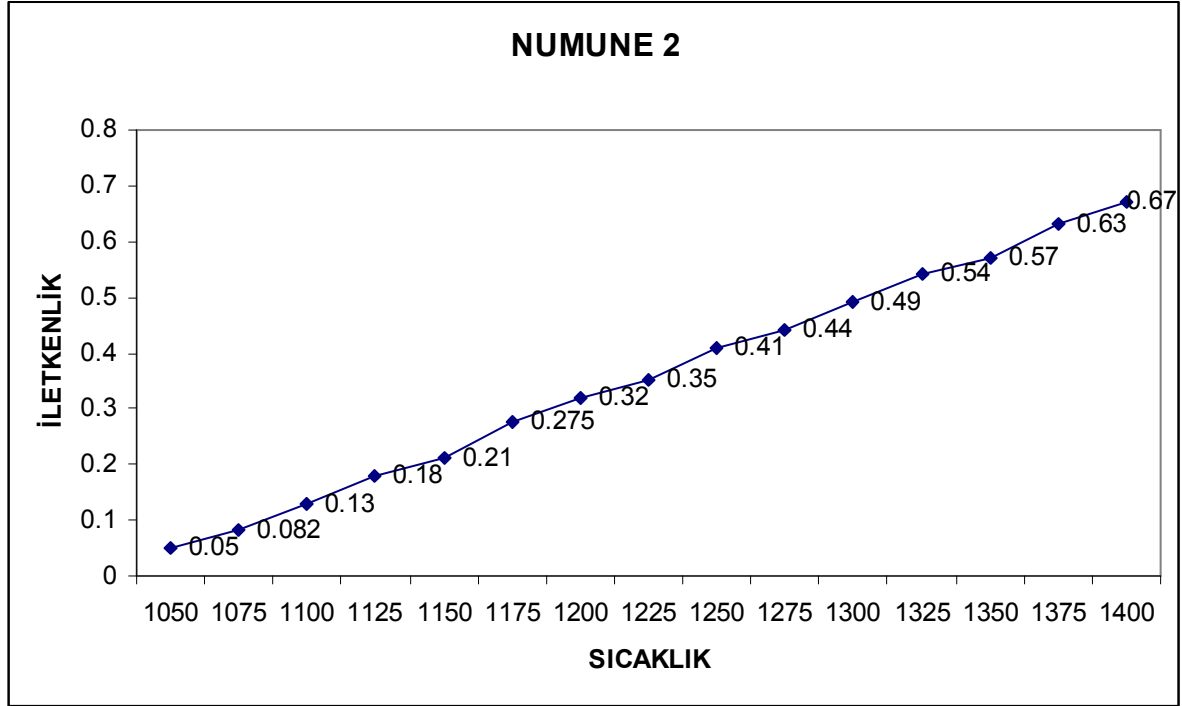
Çizelge 6.2’de 2. numuneye ait sıcaklık ve o sıcaklıkta bulunan iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.2 Numune 2’e ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri

SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1050	0,05
1075	0,082
1100	0,13
1125	0,18
1150	0,21
1175	0,275
1200	0,32
1225	0,35
1250	0,41
1275	0,44
1300	0,49
1325	0,54
1350	0,57
1375	0,63

1400	0,67
------	------

Şekil 6.2’de 2. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Numune 2’e ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi

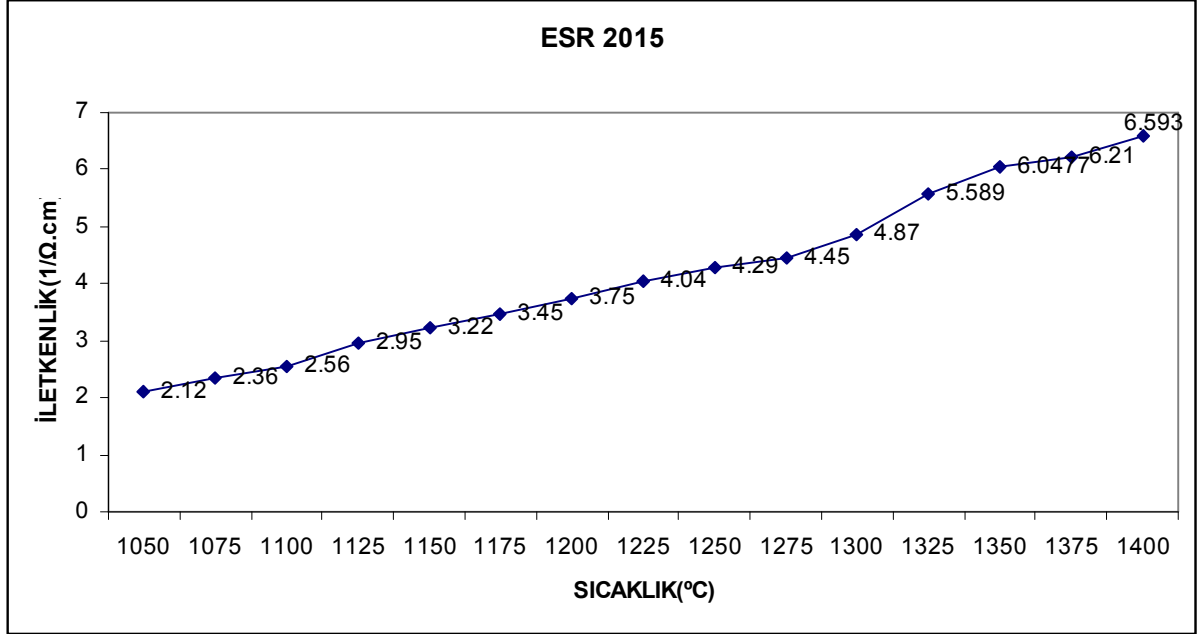
Aşağıdaki çizelgede sanayide kullanılan ESR 2015 curufuna ait sıcaklık ve o sıcaklığa ait iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 ESR 2015 curufuna ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri

SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1050	2.12
1075	2.36
1100	2.56
1125	2.95
1150	3.22
1175	3.45
1200	3.75
1225	4.04
1250	4.29
1275	4.45
1300	4.87
1325	5.589

1350	6.0477
1375	6.21
1400	6.593

Şekil 6.3’de ESR 2015 curufuna ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.3 ESR 2015 curufuna ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi

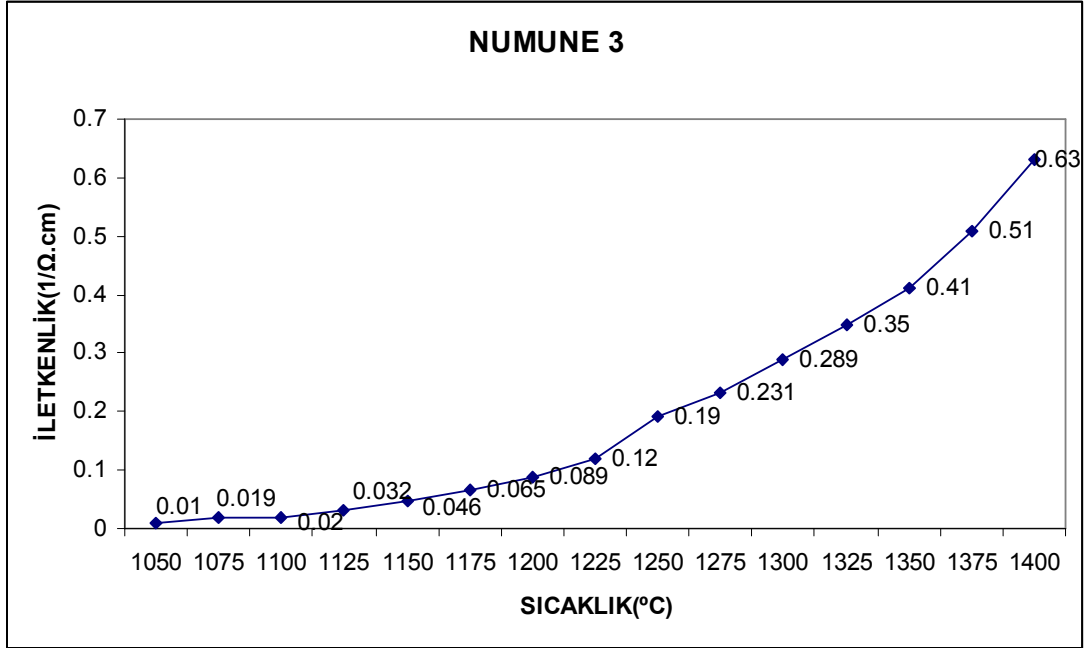
Çizelge 6.4’de 3. numuneye ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.4 Numune 3’e ait sıcaklık ve iletkenlik değerleri

SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1050	0,01
1075	0,019
1100	0,02
1125	0,032
1150	0,046
1175	0,065
1200	0,089
1225	0,12
1250	0,19
1275	0,231
1300	0,289
1325	0,35

1350	0,41
1375	0,51
1400	0,63

Şekil 6.4’de 3. numuneye curufuna ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Numune 3’e ait sıcaklık ve iletkenlik değişimi

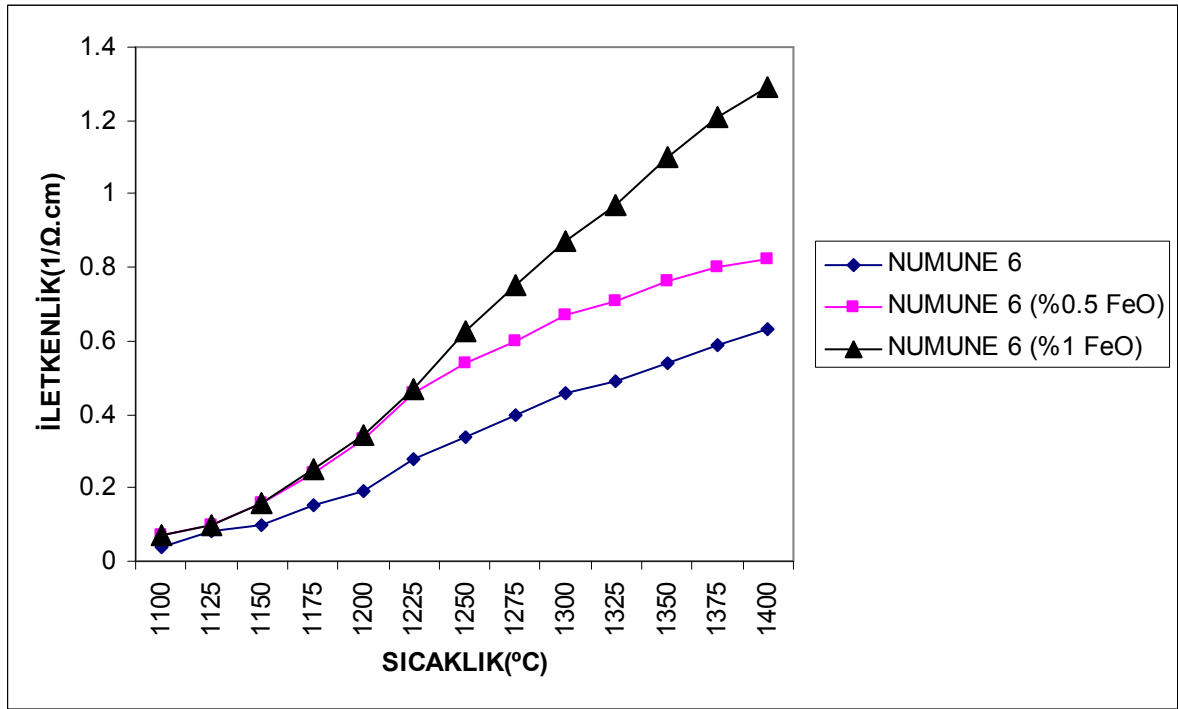
Curuf bünyesini oluşturan malzemelerin oranları elektrik iletkenliği üzerinde birtakım etkiler yaratmaktadır. Saf haldeki FeO’nin özgül elektrik iletkenliği çok yüksektir. Aşağıdaki çizelgede curuf bünyesinde bulunan FeO miktarının etkileri gösterilmiştir. Bunun için 6. numune kullanılmıştır.

Çizelge 6.5 FeO miktarının numune 6 üzerine etkisi

	NUMUNE 6	NUMUNE 6 (%0.5 FeO)	NUMUNE 6 (%1 FeO)
SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1100	0,04	0,072	0,07
1125	0,08	0,098	0,1
1150	0,1	0,16	0,16
1175	0,15	0,24	0,25
1200	0,19	0,33	0,342
1225	0,28	0,46	0,469

1250	0,34	0,54	0,626
1275	0,4	0,6	0,75
1300	0,46	0,67	0,87
1325	0,49	0,71	0,97
1350	0,54	0,76	1,1
1375	0,59	0,8	1,21
1400	0,63	0,82	1,29

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi curuf kompozisyonundaki %0.5 'lik FeO miktarındaki artış 1150 °C'ye kadar normal numuye yakın değerler göstermesine rağmen, 1150 °C 'den sonra elektrik iletkenliğinde, curufun normal kompozisyonuna göre artış göstermiştir. %1'lik FeO miktarı ise görüldüğü üzere 1100 °C'den itibaren iletkenliği, %0.5'lik curuf kompozisyonuna göre daha büyük bir etki yapmıştır.



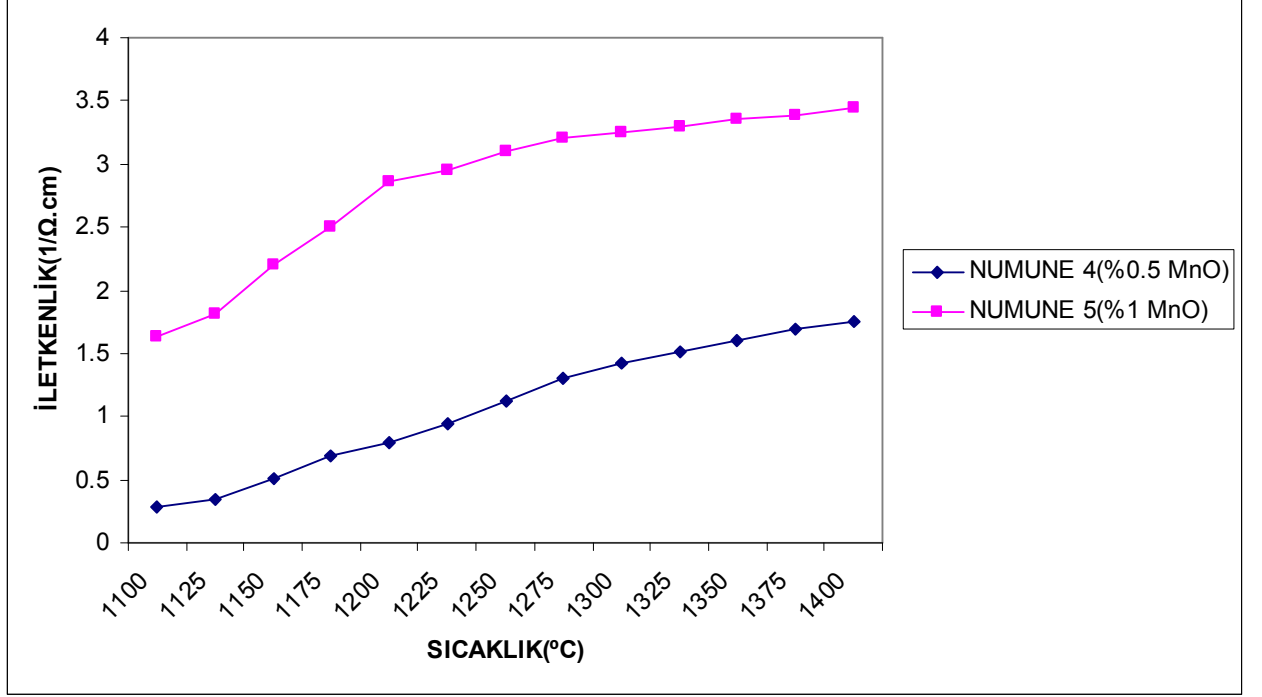
Şekil 6.5 FeO miktarının curuf iletkenliğine etkisi

Curuf bünyesinde bulunan MnO, curufun ergime sıcaklığını yükselten bir etkide bulunmaktadır. Ancak curuf bünyesindeki MnO, curufun iletkenliğine etki etmemektedir. Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi MnO miktarı arttıkça, curufun iletkenliğinin de artış gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 6.6 MnO miktarının iletkenlik üzerine etkisi

	NUMUNE 4 (%0.5 MnO)	NUMUNE 5 (%1 MnO)
SICAKLIK(°C)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)	İLETKENLİK(1/Ω.cm)
1100	0,28	1,64
1125	0,34	1,82
1150	0,516	2,202
1175	0,69	2,5
1200	0,8	2,86
1225	0,95	2,95
1250	1,12	3,101
1275	1,3	3,21
1300	1,42	3,25
1325	1,51	3,3
1350	1,6	3,36
1375	1,69	3,39
1400	1,75	3,44

Şekil 6.6'da curuf komposiyonundaki MnO miktarındaki değişimin curuf iletkenliği üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 6.6 MnO miktarının curuf numunesinin iletkenliği üzerine etkisi

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi MnO miktarı arttıkça curufun iletkenliğinde arttığı görülmüştür. Ancak belirli bir sıcaklıktan sonra iletkenlik artışı azalmıştır. CaF_2 temelli curuflarda, MnO miktarı curufun elektrik iletkenliği üzerine, curuf numunesi içindeki FeO ile benzer bir etki yapmaktadır.

6.2 Curuflara ESR İşleminin Uygulanması

Curuf numunelerinin bileşiminin hazırlanması ve iletkenlik ölçümünün yapılmasından sonra curuflara ergitme işlemi yapılmıştır. Ergitme işleminde 60 cm boyunda 316L paslanmaz çelik elektrod ve 304L paslanmaz çelikten meydana gelen kaynaklanmış elektrod kullanılmıştır. Ergitme işlemi bakır su soğutmalı grafit pota içerisinde yapılmıştır. Şekil 6.7.a ve 6.7.b'de ergitme işleminde kullanılan bakır soğutmalı grafit pota yer almaktadır.



Şekil 6.7.a Su soğutmalı grafit pota



Şekil 6.7.b Su soğutmalı grafit pota

Ergitme işlemi esnasında 600 amper akım kullanılmıştır. Aşağıdaki çizelgede ergitme işleminde kullanılan elektrodların kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 6.7 Ergitme işleminde kullanılan elektrodların kimyasal bileşimleri

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
304 L	70.9	0,025	0,325	1,75	0,022	0,098	17,4	0,452	8
316 L	70,2	0,020	0,34	0,469	0,029	0,008	16,03	2,14	10,12

	Al	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
304 L	0,003	0,0019	0,153	0,471	-	-	0,009	0,005	0,073	0,118
316 L	0,001	0,003	0,088	0,19	-	-	0,008	0,004	0,092	0,079



Şekil 6.8 Ergitme işleminde kullanılan curuf örneği

Yukarıdaki şekilde ergitme işleminde kullanılan curuf örneği gösterilmiştir. Curuflar ilk önce fırın içerisinde ergitilir ve sonra soğumaya bırakılır. Katılaştıktan sonra Şekil 6.8'deki hale gelir. Daha sonra ergitme işleminin verimli bir şekilde yapılabilmesi için Şekil 6.9'da görüldüğü gibi kırılarak küçük parçalar haline getirilir.



Şekil 6.9 Ergitme için hazırlanmış curuf numunesi

Numune 2'nin ergitilmesi işleminde 304L kaynaklı elektrod kullanılmıştır. Ergitme süresince elektrod ile curuf arasında ark problemi görülmüştür. Elektrod ile curuf arasında zor ark meydana gelmiş bu nedenle ergitme işlemi uzun sürmüştür. Çizelge 5.9'da 2. numune kullanılarak yapılan ergitme işlemi sonrası meydana gelen ingotun kimyasal analizi yer almaktadır.

Çizelge 6.8 Numune 2 kullanılarak yapılan ergitme sonunda meydana gelen ingotun kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
NUMUNE 2	71,3	0,241	0,176	1,47	0,029	0,118	17,19	0,49	7,49

	Al	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 2	0,005	0,0021	0,157	0,450	-	-	0,01	0,004	0,075	0,116

Analiz sonucunda görüldüğü gibi ergitme sonrası numune bünyesinde ergitme işleminin grafit potada yapılması sebebi ile karbon oranında bir artış görülmüştür. Elektrodun bünyesinde bulunan silisyumun yaklaşık yarısı SiO_2 oluşturarak, manganın bir kısmı ise MnO oluşturarak curufa geçmiştir. Nikel miktarında ise bir düşüş meydana gelmiştir. Elektrod bünyesinde bulunan molibden ve krom oranında bir artış olmuştur.

Vanadyum, wolfram miktarında küçük bir artış görülmüş çelik bünyesinde istenmeyen bakır miktarında ise bir düşüş meydana gelmiştir. Numune 4 ise; 2. numuneye göre daha iyi ark özelliğine sahiptir. Numune 4 kolay bir şekilde elektrod ile ark yapmıştır. Aşağıdaki çizelgede ergitme işlemi sonrası oluşan ingotun kimyasal analizi ve Şekil 6.10'da ergitme işlemi sonrası oluşan numune gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 Ergitme işlemi sonrası oluşan numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 4	71,6	0,149	0,138	1,44	0,030	0,092	17,67	0,477	7,91	0,017

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 4	0,002	0,159	0,443	-	-	0,011	0,005	0,074	0,119



Şekil 6.10 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numune

Kimyasal analiz sonucunda malzemedeki silisyumun büyük bir bölümü ve manganın bir miktarı oksit oluşturarak curufa geçmiştir. Curuf numunesinde bulunan Al_2O_3 'ün bir kısmı ingot bünyesindeki alüminyum miktarını çok az artırırken, Krom miktarında artış, nikel miktarında azalma meydana gelmiştir. Molibden ve kobalt miktarında bir artış görülürken, bünyedeki bakır miktarında azalma meydana gelmiştir. Titanyum, vanadyum ve wolfram

miktarında az bir artış görülmüştür. Şekil 6.11’de ise ergitme sonrası meydana gelen curuf gösterilmektedir.



Şekil 6.11 Numune 4 kullanılarak yapılan ergitme sonrası meydana gelen curuf

Numune 6, diğer ergitme yapılan numuneler arasında en kötü ergitme verimine sahip numune olmuştur. Ergitme esnasında, elektrod ile curuf arasında zor ark meydana gelmiştir. Ergitme işlemi uzun sürmüştür. Ergitme sonrası meydana gelen numunenin görüntüsü Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numune

Şekil 6.12’de görüldüğü gibi zor meydana gelen ark sebebi ile malzeme verimsiz bir şekilde ergimiştir. Yüzeyi oldukça pürüzlü ve çok sayıda boşluk içermektedir. Çizelge 6.10’da ergitme için kullanılan elektrodun kimyasal analizi verilmiştir.

Çizelge 6.10 Ergitme işleminde kullanılan elektrodun kimyasal analizi

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
68,8	0,26	0,427	1,77	0,035	0,012	18,71	0,383	8,73	0,003

B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
0,0024	0,130	0,552	-	-	0,017	0,005	0,084	0,122

6’nolu curuf numunesi kullanılarak yapılan ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi Çizelge 6.11’de yer almaktadır.

Çizelge 6.11 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 6	71,1	0,122	0,241	1,35	0,032	0,012	18,25	0,365	7,5	0,003

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 6	0,0019	0,121	0,503	-	-	0,017	0,003	0,074	0,104

Ergitme işlemi sonrası silisyumun yarısı ve manganın az bir miktarı oksit oluşturarak curufa geçmiştir. Bünyede bulunan fosfor miktarında azalma görülürken, kükürt miktarında değişiklik olmamıştır. Krom ve molibden miktarında çok küçük bir azalma meydana gelirken, nikel miktarında % 1’lik bir düşüş meydana gelmiştir. Alüminyum ve kalay miktarı değişmemiş; titanyum ve wolfram miktarında çok az bir azalma meydana gelmiştir.

Curufların ergitilmesi işleminde diğer elektrod olarak 316L paslanmaz çelikte kullanılmıştır. Numune 2, kaynaklı elektrod ile yapılan ergitmeye nazaran, elektrod ile curuf numunesi arasında daha iyi bir ark meydana gelerek iyi bir ergitme işlemi yapılmıştır. Çizelge 6.12’de 2. curuf numunesi ile yapılan ergitme sonucu meydana gelen numunenin kimyasal analiz sonucu verilmiştir.

Çizelge 6.12 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 2	68,7	0,058	0,192	0,578	0,032	0,011	16,51	2,18	11,04	0,004

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 2	0,0022	0,088	0,183	-	-	0,009	0,004	0,101	0,082

Ergitme işlemi sonrasında numunedeki silisyumun bir miktarı oksit oluşturarak curufa geçmiş, mangan ise artmıştır. Krom, molibden ve nikel miktarı artmıştır. Kobalt miktarı sabit kalırken, kalay miktarında küçük bir artış meydana gelmiştir, numune bünyesindeki bakır miktarı azalmıştır. 3. Numune kullanılarak yapılan ergitme işleminde curuf numunesi ile elektrod arasında kolay ve devamlı bir ark meydana gelerek, iyi bir ergitme sağlanmıştır. Çizelge 6.13’de 3. curuf numunesi ile yapılan ergitme sonucu meydana gelen numunenin kimyasal analiz sonucu verilmiştir.

Çizelge 6.13 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 3	70,3	0,185	0,312	0,581	0,032	0,01	16,58	2,05	9,08	0,076

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 3	0,0023	0,085	0,172	-	-	0,008	0,003	0,1	0,071

Yapılan ergitme işleminden sonra meydana gelen numune bünyesindeki silisyum miktarında çok düşük bir miktar azalma, mangan miktarında ise çok düşük bir miktar artma meydana gelmiştir. Krom miktarında küçük bir artış, molibden miktarında küçük bir düşüş görülmüştür. Nikel miktarında ise yaklaşık %1’lik bir düşüş meydana gelmiştir. Kobalt ve bakır miktarında bir düşüş görülürken, kükürt miktarında bir değişiklik olmamıştır. 4. curuf numunesi kullanılarak yapılan ergitme işleminde elektrod ile curuf numunesi arasında iyi bir ark oluşması sonucu çok iyi bir ergitme meydana gelmiştir. Çizelge 6.14’de 4. curuf numunesi ile yapılan ergitme sonucu meydana gelen numunenin kimyasal analiz sonucu verilmiştir.

Çizelge 6.14 Numune 4 kullanılarak yapılan ergitme işlemi sonrası meydana gelen ingotun kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 4	69,1	0,228	0,349	0,63	0,028	0,007	16,52	2,22	10,31	0,101

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 4	0,0023	0,086	0,179	-	-	0,008	0,004	0,098	0,074

4. curuf numunesi kullanılarak yapılan yapılan ergitme işlemi sonrası, numune bünyesindeki silisyum, mangan, krom ve nikel miktarı artmıştır. Molibden ve alüminyum miktarı artarken, kobalt ve kalay miktarında ise yaklaşık %0.002’lik bir azalma görülmüştür. Titanyum miktarı değişmemiş, vanadyum ve wolfram miktarı artmıştır. ESR 2015 curuf numunesi sanayide curufaltı ergitme proseslerinde kullanılmaktadır. Elektrod ile curuf numunesi arasında kolay ark meydana gelmiş böylece elektrod rahat bir şekilde ergitilmiştir. Ergitme işlemi sonucu meydana gelen numunenin kimyasal analizi Çizelge 6.15’de verilmiştir.

Çizelge 6.15 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
ESR 2015	69,1	0,181	0,324	0,612	0,030	0,011	15,95	2,03	11,02	0,065

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
ESR 2015	0,0023	0,086	0,182	-	-	0,008	0,005	0,096	0,081

Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numune bünyesindeki silisyum az miktarda oksitlenerek curufa karışmış, mangan miktarında ise bir artma görülmüştür. Alüminyum miktarı artarken, kobalt ve bakır miktarı azalmıştır. Molibden miktarı azalırken, kalay miktarında bir değişiklik olmamıştır. Titanyum, vanadyum ve wolfram miktarı artmıştır.

7. curuf numunesi de ESR 2015, 3 ve 4. numunelerde olduğu gibi, elektrod ile curuf numunesi arasında çok iyi ark meydana gelmiştir. Ergitme sonucu meydana gelen numune ve curuf görüntüsü Şekil 6.13. a ve Şekil 6.13. b’de verilmiştir.



Şekil 6.13.a Ergitme sonrası meydana gelen numune



Şekil 6.13.b Ergitme işlemi sonrası oluşan curuf

Ergitme işlemi sonucu meydana gelen numunenin kimyasal analizi Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16 Ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
NUMUNE 7	69	0,151	0,261	0,618	0,033	0,013	16,21	2,08	10,84	0,1

	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
NUMUNE 7	0,0022	0,086	0,189	-	-	0,009	0,005	0,099	0,082

Kimyasal analiz sonucunda ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunede silisyum bir miktar silisyum oksit oluşturarak curuf bünyesine geçmiş, mangan miktarında ise bir artış meydana gelmiştir. Molibden miktarı düşerken, krom miktarında ise küçük bir artış meydana gelmiştir. Alüminyum miktarındaki artış en fazla bu curuf numunesinde görülmüştür. Kobalt ve bakır miktarı azalırken, kalay miktarı çok az bir miktar artmıştır.

7. GENEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada; curufların değişik sıcaklıklarda elektrik dirençleri bulunarak, elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır. Curufların elektriksel iletkenlik özelliklerinden yararlanılarak, çeşitli curuf örnekleri hazırlanmış ve hazırlanan çeşitli curuf örnekleri ile curufaltı ergitme(ESR) prosesi gerçekleştirilmiştir. Curuflar; aynı boyutta ancak farklı bileşime sahip elektrodlar ile ergitilmişlerdir. Ergitme prosesinde kaynaklanmış elektrod ile kaynaksız elektrodlar kullanılarak curufların değişik elektrod koşullarındaki ark oluşturma, ergime hızı ve rafinasyon özellikleri takip edilmiştir. Kaynaklı elektrod kullanılarak yapılan ergitme işlemleri sonucunda kaynak sebebi ile elektrod üzerinden geçen akım veriminin düşük olması sebebi ile curuflar ile elektrod arasında ark oluşumu istenildiği gibi olmamış ve ergime hızı düşük olmuştur. Kaynaksız elektrod kullanılarak yapılan ergitme işleminde, elektrodan geçen akım verimini yüksek olması sebebi ile curuflar kolay bir şekilde ergimiştir. 2. curuf numunesi kullanılarak yapılan ergitme işlemi sonrası meydana gelen numunenin kimyasal analizi 6 ve 7. curuf numunelerine göre daha iyi olmasına rağmen ergitme sırasında yaşanan problemler sebebi ile beğenilmemiştir. 3. curuf numunesinin kimyasal analizleri başarılı bulunmuş ancak iletkenliğinin düşük olması sebebi ile beğenilmemiştir. Hem kaynaklı elektrodaki hem de kaynaksız elektrodaki ergime hızı, ergime sonrası meydana gelen numunelerin kimyasal analizleri ve ESR 2015 curufundan daha iyi ergime hızına sahip olması, analizlerde ESR 2015 curufunun analizleri kadar iyi ingot analizlerine sahip olması nedeni ile 4. curuf numunesi başarılı bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- Aran, A. ve Temel, A. M., (2004), "Paslanmaz Çeliklerin Üretimi, Kullanımı ve Standartlar" Sarıtaş Teknik Yayın, 1(2): 9-29.
- Buckentin, J. M. R., Atteridge, D. G., Damkroger, K. B. ve Shelmidine, J. G., (1997), "Criteria determining the selection of slags for the melt decontamination of radioactively contaminated stainless steel by electroslag remelting", Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico.
- Castellan, G.W., (1983), Physical Chemistry 3rd Edition, Benjamin Cummings Publishing Company, Menlo Park, California.
- Chatterjee, K. A. ve Zhmoydin, I. G., (1972), "The Phase Equilibrium Diagram of the System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ", Journal of Materials Science (7): 93-97.
- Chernov, P.V., ve Roshchin, E. V., (2001), Method of Slag Desulfurization, Patent No:RU2164954.
- Choudhury, A., (1990), "Vacuum metalurgy", ASM International Pub., Metals Park, OH: 75.
- Ejima, A., Shimoji, M., (1970), "Effect of Alkali and Alkaline-Earth Fluorides on Surface Tension of Molten Calcium Silicates", Transactions of the Faraday Society, 166: 99.
- Fitzgerald, F., (1991), "The developing trend of ironmaking and steelmaking technology", The 6th International iron & steel conference proceedings, 10.
- Fleming, M.C., (1976), "Electroslag Remelting and Plasma Arc Melting. Report of the Committee on Electroslag Remelting. and Plasma Arc Melting", Oregon Graduate Center, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Hoyle, G., (1983), Electroslag Processes-Principles and Practice, Electroslag Refining Technology, Applied Science Pub., London & New York.
- Kaike, C., (1998), "Control of steel cleanliness", The 10th National steelmaking conference proceedings, Zhengzhou, 70-76.
- Melgaard, D. K., Williamson, R. L., ve Beaman, J. J., (1998), "Controlling Remelting Processes for Superalloys and Aerospace Ti Alloys", JOM, (50): 13-17.
- Mitchell, A. ve Cameron, J., (1971), "The Electrical Conductivity of Some Liquids in the System $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ", Metallurgical Transactions, (2): 3361-3366
- Nafziger, H. R., (1973), "The System $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ Under One-Third Atmosphere of Helium", High Temperature Science, 5 (6): 414-422.
- Nafziger, H. R., (1976), "Electroslag Melting Process", United States Bureau of Mines, Bulletin - Bureau of Mines (669).
- Ries, R. ve Schwerdtfeger, K., (1980), "Contribution to the phase diagram $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ", Arch. Eisenhuettenwes, Germany, (51): 123-129.
- Stein, G. ve Hucklenbroich, I., (2004), "Manufacturing and Applications of High Nitrogen Steels", Materials and Manufacturing Processes, (19): 7-17.
- Swift, A. R., (1977), "Advantages of Electroslag Remelted Steels", Offshore Technology Conference, 2-5 May, Houston, Texas.
- Lim, G. T. ve Reeu, W. C., (2002), "Development of Human-Machine Interface for Automatic Control of Electro Slag Remelting Process " Research Institute of Science and Technology Pohang, (1): 501 – 507.

Tweten, D. J., (2004), “Thermal and Electrical Model of the Electrode of the Electroslag Remelting Process”, Master Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

Wilson, D. A., (1999), Clean Steel Technology-Fundamental to Development of High Performance Steels, ASTM Special Technical Publication, 1361.

Wei, C., Xiang, S., (1993), “Electrical Conductivity of Molten Slags of $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ Systems”, ISIJ International, 2 (33): 239-244.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://web.ald-vt.de/cms/en/vacuum-technology/systems/esr/>

[2] <http://www.consarc.com/brochures/esr.pdf>

[3] <http://www.republicspecialmetals.com/remelt.html>

[4] <http://www.pas-der.com/paslanmazcelikozellikleri.html>

[5] http://www.bohler-uddeholm.co.za/english/files/AL001E-BEG_Image.pdf

[6] <http://www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/IOLTP/2279/unite06.pdf>

[7] http://maycalistaylari.comu.edu.tr/calistay2010_1/sunumlar/projeraporlari//grup_kerem_us_kimya.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 26.02.1984

Doğum yeri Karabük

Lise 1995-2002 75. Yıl Karabük Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2007 Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2007- Devam ediyor Yıldız Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Bölümü