



İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi
Doktora / Yüksek Lisans
Tezlerine Sanayi Desteği Projesi



BAKIR TEL ÜRETİMİNDE TOZLANMA



"38. Grup Bakır, Bakır Alaşımları ve Diğer Demir Dışı Metaller Sanayii"
adına desteklenmiştir



İSTANBUL
SANAYİ ODASI

Mesrutiyet Caddesi No:62 Tepebaşı 34430 - İstanbul Tel: (0212) 252 29 00 Faks: (0212) 249 50 07 e-posta: kobi@iso.org.tr

İSO Yayın No: 2010/6 ISBN: 978-9944-60-643-1



İSTANBUL
SANAYİ ODASI

İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi
Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi

Bakır Tel Üretiminde Tozlanma



Kısaltılmış Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI

İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Hazırlayan

Ferhat OMAÇ

İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

İSO Yayın No: 2010/6

ISBN: 978-9944-60-643-1

Bakır Tel Üretiminde Tozlanma,

İstanbul Sanayi Odası, İstanbul

Tasarım ve Uygulama: Mürettebat Reklamcılık

Tüm Hakları Saklıdır. Bu yayındaki bilgiler ancak kaynak gösterilmek suretiyle kullanılabilir.

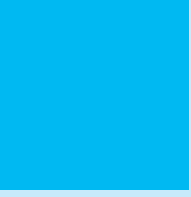
Yapılan çalışma İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi kapsamında desteklenerek sanayi ile üniversite işbirliğinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Bakır tel üretiminde iyi bir nihai ürün kalitesi elde edilmesi oluşan tozların azaltılması ile sağlanabilir. Bu çalışma kapsamında toz oluşumunu etkileyen çeşitli parametreleri belirleyebilmek amacıyla Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze tesislerinde gerekli denemeler yapılmıştır.

Projenin sözleşme ve başlangıç sürecindeki yardım ve katkılarından dolayı İstanbul Sanayi Odası'na, sağladıkları maddi ve manevi destekten dolayı İSO 38. Grup Bakır, Bakır Alaşımları ve Diğer Demir Dışı Metaller Sanayii Meslek Komitesi'ne, çalışmanın titizlikle yönetilmesi ve sonuçlandırılmasında hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya ve benden yardımını esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana, her zaman her konuda yardımcı olan ve hayat boyu en büyük desteği sağlayan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ferhat OMAÇ
Malzeme Yüksek Mühendisi



SUNUŞ

Bu çalışma; İstanbul Sanayi Odası ile İstanbul Teknik Üniversitesi arasında, sanayi-üniversite işbirliğinin geliştirilmesi ve akademik çalışmaların ekonomik kalkınmaya katkısının artırılması amacıyla başlatılan "ISO-İTÜ Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği" projesi kapsamında yayınlanmıştır.

Üniversitede doktora ve yüksek lisans tezlerini yürüten araştırmacıların desteklendiği proje ile üniversite ve sanayinin gündemini buluşturarak, ticari ürüne dönüştürülen bilimsel araştırma ve patent sayısının artmasına, küresel rekabet gücümüzün gelişmesine katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

Proje kapsamında, üniversite'de hali hazırda yürütülen doktora/yüksek lisans tez/tezleri arasından uygun bulunanlar ile Meslek Komitelerimizin sektörel ihtiyaçları doğrultusunda belirlediği konulardaki akademik çalışmalara destek verilmektedir.

İstanbul Sanayi Odası 38. Grup Bakır, Bakır Alaşımları ve Diğer Demir Dışı Metaller Sanayii Meslek Komitesi adına desteklenen bu çalışmanın sanayinin ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde hayata geçirilmesine yönelik katkılarından dolayı Tez Değerlendirme Komitesi üyelerimiz olan;

Hayrettin Çaycı (Sarkuysan Elektrolitik Bakır),
Mustafa Özkazanç (Özer Metal),
Süren Sezer (İtimat Metal Alaşımları),
Şükrü Karaç (Sarkuysan Elektrolitik Bakır),
Selçuk Harput'a (Sarkuysan Elektrolitik Bakır) teşekkür ediyoruz.

Başta araştırmacı olmak üzere, araştırmacıya danışmanlık yapan öğretim üyesi ve Değerlendirme Komitesi'nin katkılarıyla oluşturulan ve sanayi-üniversite işbirliğinin işlevsel ve somut bir çıktısı olan bu çalışmanın sektöre fayda sağlamasını ümit ediyoruz.

Saygılarımızla,
İstanbul Sanayi Odası

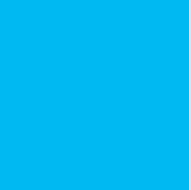


İÇİNDEKİLER LİSTESİ	VII
SEMBOL LİSTESİ	XI
TABLolar LİSTESİ	XII
ŞEKİLLER LİSTESİ	XIII
ÖZET	XV
SUMMARY	XVI
1. BAKIR FILMAŞİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	1
1.1. SCR Döküm Prosesi	1
1.1.1. SCR sisteminde bara kalitesini etkileyen faktörler	2
1.1.1.1. Katot kalitesi	2
1.1.1.2. Ergimiş metal sıcaklığı	3
1.1.1.3. Oksijen içeriği	3
1.1.1.4. Hidrojen, oksijen ve sıcaklık kontrolü	4
1.2. Contirod Sürekli Döküm Prosesi	5
1.2.1. Contirod döküm prosesinin avantajları	5
1.3. Oksijensiz Bakır Filmaşin Üretim Yöntemi (Upcast)	6
2. TEL ÇEKME	7
2.1. Bakır Tellerin Çekimi	7
2.1.1. Kaydırmalı tip tel çekme makinesi	8
2.1.2. Çift motorlu çekim makinesi	9
2.2. Yağlama	9
2.2.1. Islanabilirlik	11
3. TOZLANMA PROBLEMİ	13
3.1. Tel Çekme İşlemi Esnasında Oluşan Tozların Oluşum Mekanizmaları	14
3.1.1. Abrasif aşınma	15
3.1.2. Üç elemanlı abrasif aşınma	18
3.1.3. Yüzey deformasyonu aşınması	18
3.1.4. Adezif aşınma	18
3.1.5. Delaminasyon aşınması	19
3.1.6. Filmaşin yüzey kalitesi (Oksitler)	21
3.1.7. Tel çekme ve filmaşin kaynaklı kıymıklar	21
3.1.8. Kimyasal bileşenler	22
3.2. Tel Çekme İşlemi Esnasında Oluşan Tozların Oluşumunu Hızlandıran Faktörler	23
3.2.1. Kullanılan yağlayıcı	23
3.2.2. Filtreleme	23
3.2.3. Tel çekme sıcaklığı	23
3.2.3.1. Tel çekme sıcaklığının yağlayıcı üzerindeki etkisi	24
3.2.4. Kalıntı gerilmeler	24
3.2.5. Tel titreşimleri	25
3.2.6. Tel-tel teması	27
3.3. Filmaşine Uygulanan Burma Testi Esnasında Oluşan Tozlar	27
3.3.1. Filmaşindeki tozlanma problemini etkileyen faktörler	27

3.3.1.1. Fırın şarjı:	27
3.3.1.2. Döküm şartları:	27
3.3.1.3. Haddeleme	27
3.3.1.4. Emülsiyon	28
3.3.1.5. Dekapaj	29
3.3.2. Filmaşinin yüzey kalitesi	29
3.3.2.1. Yüzey kalitesi testi	29
3.3.2.2. Yüzey oksit tabakası kalınlığı ölçümünün önemi	31
3.3.2.3. Filmaşin yüzeyindeki oksit tabakası kalınlığının ölçümü	31
3.3.2.4. Yüzey oksit kalınlığı ile filmaşindeki tozlanma arasındaki ilişki	34
3.4. Tozların Azaltılması	36
3.4.1. Titreşimin azaltılması	37
3.4.2. Artan geri çekme kuvveti	37
3.4.3. Tellerin tozlardan temizlenmesi	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	41
5.1. SEM Çalışmaları	41
5.2. XRD Analizi Çalışmaları	47
5.3. Kimyasal analiz çalışmaları	48
5.4. Partikül boyutu analizi çalışmaları	50
5.5. Yüzey Oksit Tabaka Kalınlığı ve Tozlanma Miktarı Ölçümleri	51
5.5.1. Farklı tozlanma testi yöntemleri	53
5.6. Tel Çekimi Çalışmaları	54
6. GENEL SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	61

KISALTMALAR

SCR	: Southwire Sürekli Filmaşın Üretim Prosesi
ETP	: Oksijenli Bakır
MHO	: Metallurgie Hoboken Overpelt
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
St	: Hadde İstasyonu
NMP	: N-Metil Pirolidin
ASTM B-49	: Standard Specification for Copper Rod Drawing Stock for Electrical Purposes
EDS	: Enerji Saçılımlı X-ışını Spektroskopisi
XRD	: X-ışınları Difraktometresi
OF	: Oksijensiz Bakır



SEMBOL LİSTESİ

- ε : Kesit daralması miktarı
 λ : Uzama miktarı
 g : Kayma
 V_z : Çekim kasnağının çevresel hızı
 V_D : Çekim kasnağındaki telin çevresel hızı
 V : Çevresel Hız
 L_1 : Tel çekme kalıbından (hadde) sonraki tel uzaması
 L_0 : Tel çekme kalıbından (hadde) önceki tel uzaması
 F_0 : Tel çekme kalıbından (hadde) önceki tel kesiti
 F_1 : Tel çekme kalıbından (hadde) sonraki tel kesiti
ME : Makine uzaması
 T : Oksit kalınlığı
 I : Akım (A)
 T : Reaksiyon süresi (s)
 M : Oksitlerin moleküler ağırlıkları (g)
 S : Filmaşının reaksiyona giren yüzey alanı (cm²)
 D : Oksitlerin yoğunluğu (Cu₂O için 6.0 gr/cm³ ve CuO için 6.4 gr/cm³)
 F : Faraday sabiti (96500 C/mol)
 N : Hidrojen eşdeğerliği

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 : Yaş çekimde bakır tel için kullanılan yağlayıcılar	10
Tablo 3.1 : Twist testi için tavsiye edilen parametreler	30
Tablo 3.2 : Yüzey oksit kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki	34
Tablo 3.3 : Tozlanma miktarı ile bara kesiti arasındaki ilişki	35
Tablo 3.4 : Bilinen Tozları azaltma metotları	37
Tablo 4.1 : Kimyasal çözdürme yöntemiyle analiz yapılan tozların kimyasal özellikleri	39
Tablo 5.1 : HCl çözeltisi ile oksit tabakası azaltılmış numune ile normal numunenin tozlanma miktarının karşılaştırılması	53
Tablo 5.2 : HCl çözeltisi ile oksit tabakası azaltılmış numune ile normal numunenin tozlanma miktarının karşılaştırılması	53
Tablo 5.3 : Giriş malzemesine göre tozlanma miktarları	54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	: SCR üretim prosesindeki döküm makinesini şematik bir görünümü	1
Şekil 1.2	: Birbirine oldukça yakın oksit partikülleri içeren bir döküm barasının mikro yapı görüntüsü	4
Şekil 1.3	: Hazelett konveyör döküm makinesinin şematik görünümü	5
Şekil 1.4	: Yukarı döküm oksijensiz bakır filmaşın üretim yönteminin şematik görünümü	6
Şekil 2.1	: Çift motorlu bir çekim makinesinin şematik görünümü	9
Şekil 3.1	: Kalıp pürüzlülüğü nedeniyle tel yüzeyinde oluşan çizikler	15
Şekil 3.2	: Abrasif aşınma nedeniyle oluşan tozlar	16
Şekil 3.3	: Bir polikristalin elmas kalıbın yüzeyi	16
Şekil 3.4	: Tel yüzeyinden kopmaya başlayan bir toz partikülünün SEM resmi	17
Şekil 3.5	: Yanlış kalıp diziliminin bir fonksiyonu olarak tozların varlığını gösteren grafikler	17
Şekil 3.6	: Tel yüzeyinde deformasyon aşınması izleri .	18
Şekil 3.7	: Bakır tel yüzeyinde oluşmuş adezif aşınma görüntüsü .	19
Şekil 3.8	: Delaminasyon aşınması nedeniyle ortaya çıkan yüzeyin altındaki çizgisel çatlaklar	19
Şekil 3.9	: Tel yüzeyine yapışmış delaminasyon sonucu oluşan toz görüntüsü	20
Şekil 3.10	: Delaminasyon aşınması nedeniyle ortaya çıkan pul şeklindeki tozların SEM görüntüsü	21
Şekil 3.11	: Tel çekme esnasında tel üzerinde oluşan kıymıklar .	22
Şekil 3.12	: Tel çekme yağlayıcı ile bakır tel arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşan sabunumsu bakır çamur	23
Şekil 3.13	: Asimetrik tel çekiminin kalıbın bir bölümünde daha uzun kayma mesafesi diğer bölümünde ise daha yüksek kalıp basıncına yol açmasının şematik gösterimi	25
Şekil 3.14	: Kalıpla birlikte titreyen telin şematik görünümü	26
Şekil 3.15	: Kalıptan çıkan telin titreşimiyle tel yüzeyinde oluşan çapraz çizik izleri	26
Şekil 3.16	: Haddeleme işlemi esnasında hadde yüzeylerinin emülsiyon ile temizlenmesinin şematik görünümü	28
Şekil 3.17	: Hadde-Emülsiyon sisteminin şematik gösterimi	27
Şekil 3.18	: Kalıp yüzeyine yapışmış olan tozlar	29
Şekil 3.19	: Yüzey oksidi kalınlığını ölçmek için kullanılan tipik bir yük ölçümsel azalma sisteminin şematik görünümü	32
Şekil 3.20	: Anottan katoda ve katottan anoda düşen voltaj arasındaki bağıntıyı gösteren grafik [27]	33
Şekil 3.21	: Cu_2O ve CuO miktarlarını belirlemek için kullanılan grafik	34
Şekil 3.22	: Asitle dekapaj yapılmış, alkolle temizlenmiş ve tıraşlanmış bakır filmaşın numunelerinin toz potansiyeli testi sonuçları	35
Şekil 5.1	: Emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi	41
Şekil 5.2	: Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon aşınması nedeniyle oluşan ve emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi	41

Şekil 5.3 : Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon aşınması nedeniyle oluşan ve tel çekme makinesinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi	42
Şekil 5.4 : Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon nedeniyle oluşmuş, tel çekme makinesinin içinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi	42
Şekil 5.5 : Emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile EDS analizi sonuçları	43
Şekil 5.6 : Tel çekme makinesinin içinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu ile yapılan EDS analizi sonuçları	43
Şekil 5.7 : Burma testi uygulanmış filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü	44
Şekil 5.8 : Burma testi uygulanmış filmaşın yüzeyinin ve yüzeydeki oksit bölgesinin SEM görüntüsü	44
Şekil 5.9 : Burma testi sonrası filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü	45
Şekil 5.10 : Burma testi sonrası filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü	45
Şekil 5.11 : Bir filmaşının haddeleme yönüne paralel kesitte SEM görüntüsü	46
Şekil 5.12 : Filmaşın numunesinin yüzeyinden içeriye yapılan Çizgisel EDS taraması	46
Şekil 5.13 : Yüzeyden merkeze doğru oksijen miktarının değişimini gösteren Çizgisel EDS taraması	47
Şekil 5.14 : Numunelerin X-ışınları Difraksiyonu (XRD) sonuçları	47
Şekil 5.15 : Burma testi esnasında filmaşın yüzeyinden dökülen tozlara uygulanan X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi sonuçları	48
Şekil 5.16 : 10/10 burma testi sonrası 1 numaralı filmaşın kangalından alınan numunelerin yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analiz sonucu	49
Şekil 5.17 : 10/10 burma testi sonrası 2 numaralı filmaşın kangalından alınan numunelerin yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analiz sonucu	49
Şekil 5.18 : Emülsiyon filtresinden alınan tozların partikül boyutu analizi sonuçları	50
Şekil 5.19 : Filmaşına uygulanan burma testi esnasında dökülen tozların boyutu analizi sonucu	50
Şekil 5.20 : Filmaşın yüzeyindeki toplam oksit kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki	51
Şekil 5.21 : ASTM B-49 standardına göre hesaplanmış Cu_2O tabakası kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki	52
Şekil 5.22 : Yüzey oksit tabakası kalınlığı ölçümü sırasında meydana gelen reaksiyonların sırasının ters olması durumunda Cu_2O tabakası ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki	52
Şekil 5.23 : Çok telli çekim makinelerinde kullanılan emülsiyon filtre sisteminin görüntüsü	54
Şekil 5.24 : Kaydırmalı ve kaydırmaz çekim makinelerinin tel çekimi esnasında oluşan tozlanma üzerindeki etkisini gösteren grafik	55
Şekil 5.25 : Kullanılan malzemelerin makine tiplerine göre tozlanma miktarları	56

BAKIRIN TEL ÇEKME İŞLEMİ ESNASINDA MEYDANA GELEN TOZLANMA SORUNUNUN İNCELENMESİ

Tozlar, tel ve kablo endüstrisinde çok iyi bilinen bir sorundur ve kalıp aşınması, tel kopmaları, zayıf yağlama ve yüzey hasarlarına yol açabilirler. Genelde, istenmeyen maddelerin varlığı üretim verimliliğinin azalmasına, düşük kaliteye yol açar ve maliyetleri arttırır. Bobin teli üretimi için en önemli gerekliliklerden biri de yüzey kalitesinin yüksek olması olduğundan, tozların varlığı yüzey hasarlarına ve kalitesiz emaye kaplamalarına neden olabilir. Ayrıca, bakır-bakır oksit toz partikülleri, daha sonraki aşamalarda olan burma testi ve tel çekimi esnasında bakır filmaşından kıymık kopmalarına neden olabilir. Aşırı toz oluşumunun hızlı aşınmaya ve tel çekme kalıplarının hızlı hasara uğramasına neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada abrasif aşınma, yüzey deformasyonu aşınması, adezif aşınma ve delaminasyon aşınması gibi çeşitli toz oluşum mekanizmalarının detaylı bir tanımı yapılmış ve bu mekanizmaları etkileyebilecek/hızlandırabilecek çeşitli faktörler (kullanılan yağlayıcı, filtreleme, tel çekme sıcaklığı vs.) açıklanmıştır. Burma testi esnasında bakır filmaşınlerden dökülen tozların XRD analiz yöntemi ile Cu_2O bileşiminde olduğu, kimyasal analiz yöntemi ile % 90 gibi bir bölümünün CuO ve Cu_2O karşımı olduğu belirlenmiştir. Böylece filmaşının burma testi esnasındaki tozlanmanın nedeninin filmaşının yüzeyindeki oksit tabakası olduğu anlaşılmıştır ve bu bulgu literatür ile uyum içindedir.

Filmaşınlerin yüzeyindeki oksit tabakasının %20 HCl çözeltisi ile temizlenmesi sonucunda tozlanma miktarının azaldığı ancak tozlanmanın devam ettiği tespit edilmiştir. Bu tespit tozlanma olayının sadece yüzeydeki oksit tabakası ile ilişkisi olmadığını tozlanmaya ayrıca yüzey altı oksitlerinin de katkısı olduğunu göstermektedir.

Tel çekme makinesinin emülsiyon filtresinden alınan tozlara yapılan XRD analizi sonucu tozların genellikle metalik bakır oldukları tespit edilmiştir. Tel çekme makinesinin emülsiyon filtresi ve makine içinden alınan tozlar SEM'de detaylı olarak incelenmiş ve bu tozların delaminasyon aşınması sonucu oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bakır tozları, tozlanma, bakır oksit, oksit tabakası, tel çekme, toz oluşumu.

SUMMARY

INVESTIGATION OF DUSTING PROBLEMS DURING COPPER WIRE DRAWING

Fines are a very well known nuisance in the wire and cable industry and can create such problems as die wear, wire breaks, poor lubrication, and surface damage. Overall, the presence of this undesirable substance leads to poor productivity, lowered quality, and increased manufacturing costs. Since high surface quality is one of the most important requirements for magnet wire, the presence of fines can lead to surface damage and poor enamel films. Likewise, fine particulates of copper-copper oxide flakes can spall from copper rod during subsequent torsional twisting or wire drawing. It should be noted that excessive formation of fines can lead to rapid wear and failure of drawing dies.

In this study a detailed description of the various dust formation (or fine generation) mechanisms such as abrasive wear, surface deformation wear, adhesive wear and delamination wear are made and various factors that may accelerate these mechanisms (lubricant, filtration, wire drawing temperature etc.) are discussed. That fines formed on the surface of copper rod during twist tests were determined as Cu_2O by XRD analysis method. Thereby, it's defined that a reason of the dusting during copper rod's twist test is oxide layer on the surface of copper rod and this result is in agreement with the literature. From the wet chemical analysis of the fines, collected from twist tests it was determined that / 90 of these fines are the mixture of CuO and Cu_2O .

After the cleaning of oxide layer on the surface of copper rod, it's determined that the dusting was reduced but it's still proceeding. This determination shows that the dusting is not only related to surface oxide layer but also is associated with subsurface oxide layer.

XRD analysis of the fines collected from inside of the wire drawing machine and it's emulsion filter shows that they are copper. The fines collected from inside of the wire drawing machine and it's emulsion filter were exhaustively examined by SEM and it's distinguished that this fines were formed by delamination wear.

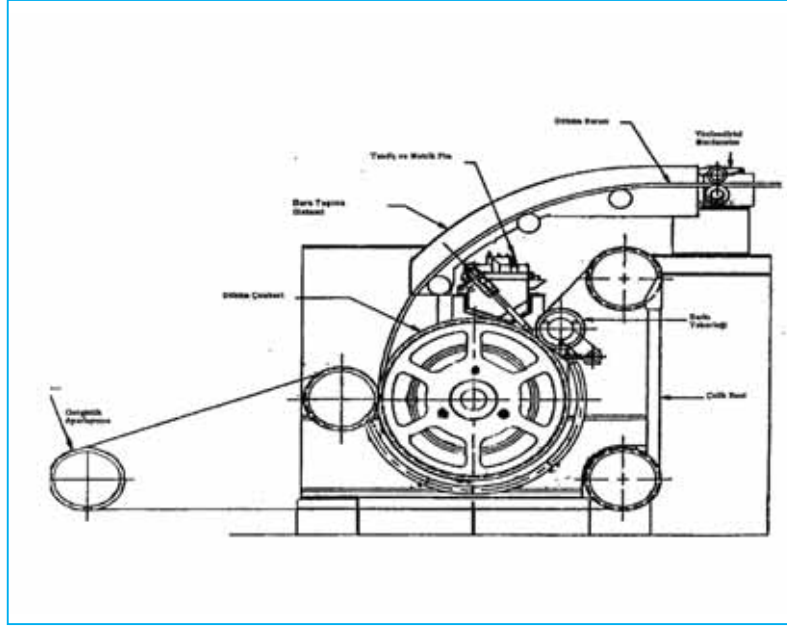
KEYWORDS: Copper fines, dusting, copper oxide, oxide layer, wire drawing, fines generation.

1. BAKIR FİLMAŞIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

1.1. SCR Döküm Prosesi

SCR prosesi; sürekli ergitme, döküm, haddeleme, dekapaj ve soğutma operasyonlarının bir birleşimidir. Bakır katot dikey bir şaft fırınında sürekli olarak ergitildikten sonra ergimiş metalin bileşimini ve sıcaklığını ayarlamaya yarayan silindirik bir bekletme fırınına aktarılmaktadır. Bekletme fırınındaki ergimiş bakır sürekli olarak soğutulur ve tıraşlanarak döküm makinesinin üzerine yerleştirilmiş olan tandişe aktarılmaktadır. Tandiş; ergimiş bakırın döküm makinesi içine akışını kontrol etmek için metali boşaltan otomatik bir sistemle donatılmıştır.

SCR üretim prosesindeki tipik bir döküm makinesi Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Döküm makinesi; döküm tekerleği ve bu tekerleği çevreleyen çelik banttandır. Kalıp dört bir yüzeyinden su spreyi yardımıyla soğutulmakta ve böylece ergimiş bakır 30 saniyeden kısa bir sürede katılaştırılmaktadır.



Şekil 1.1. SCR üretim prosesindeki döküm makinesinin şematik bir görünümü [1].

Bara 20-28 cm/sn gibi yüksek hızlarda döküm makinesinin dışına çıkmaktadır ve bükülmeksizin kılavuz merdaneler vasıtasıyla bara hazırlama ünitesine aktarılmaktadır. Bu ünite baranın köşelerini tıraşlar ve yüzeyine yapışan oksitleri kaldırır.

Bara daha sonra nihai filmaşın ölçülerine getirilmek üzere, içerisinde dikey ve yatay olarak yerleştirilmiş bir dizi hadde bulunan hadde ünitesine girer. Bara yaklaşık olarak 550-600 oC sıcaklıkta hadde istasyonundan çıkar ve bir sonraki işlem olan asit veya alkol bazlı dekapaj ünitesine girer. Çıkan filmaşın parlak bakır renginde ve yüzeyi oksitsizdir. Son olarak filmaşın yüzeyinde oksit oluşumunu engellemek için filmaşın yüzeyi wax ile kaplanmakta ve daha sonrada 3,5 tonluk kangallar halinde paletler üzerinde sarılarak paketlenmektedir.

Katot içerisindeki empüriteler hem ETP bakırın dökülebilirliği ve haddelenmesini hem de nihai ürün olan filmaşının tavlabilirliğini direkt olarak etkilemektedir. S, Sb, As, Te, Se, Pb, Bi, ve H gibi empüriteler tane sınırlarının zayıflamasına neden olur ki bu da döküm ve haddeleme esnasında sıcak yırtılmayla sonuçlanabilir. Haddelenmiş filmaşındaki oluşan bir kusur sonucunda çatlak oksitlenecektir.

Filmaşının tavlabilirliği empüritelerin varlığından etkilenmektedir. En zararlı empürite elementleri Se, Te, As ve Bi' dir. Bunların oksitlenmesi zordur ve bakır içerisinde katı çözelti halinde bulunma eğilimindedirler.

Genelde sürekli döküm prosesi 100-500 ppm oksijen içeren ergimiş bakır kullanımında kendine has avantajlara sahiptir. Oksijen birçok empüriteyle reaksiyona girer ve onların çözeltinin dışında çökmesine yol açar. SCR sistemindeki haddelerden geçerken kontrollü olarak soğutulan bara, oksidasyona dirençli elementlerin çökmesine bir dereceye kadar olanak sağlar. Bu sebeple, sürekli döküm sisteminde bulunabilen en yüksek miktardaki empüriteler SCR sisteminde ihmal edilebilir. Şu unutulmamalıdır ki bu empüritelerin bazıları kolayca çekirdeklenemezler ve bunun yerine katı çözeltide kalma eğilimindedirler, böylece filmaşının elektrik direnci artar ve tavlabilirliği düşer. Bu nedenle zararlı empürite miktarının en az olduğu katot üretimi ve katot çamurunun giderilmesi için tankların bulunduğu bölümde çok titiz bir işlem kontrolü sağlanmalıdır [1].

1.1.1. SCR sisteminde bara kalitesini etkileyen faktörler

Southwire sürekli döküm yöntemi ile bakır filmaşın üretiminde gerek döküm gerekse de filmaşın kalitesine etki eden parametrelerin tespit edilmesi ve kontrol altına alınması, istenilen kalitede filmaşın üretiminin gerçekleştirilmesi için oldukça gereklidir.

Bakır tel üreticileri için oldukça önemli bir parametre olan çekilebilirlik ve tavlabilirlik; bakır filmaşın kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bunun yanı sıra çubuğun yüzey özellikleri de tel üreticilerinin önem verdiği kalite parametrelerinden biridir. Katot kalitesi, ergimiş metal sıcaklığı ve oksijen içeriği bara kalitesine etki eden en önemli parametrelerdir.

1.1.1.1. Katot kalitesi

Sıcak yırtılma ve tavlabilirliğe etki eden empüriteler bakır üreticileri tarafından belirlenmiş olup, etkileri oldukça iyi bilinmektedir. Farklı kaynaklardan temin edilen katotların sürekli döküm prosesinde kullanılmasını içeren bir çok uygulamada diğer tüm proses şartları sabit tutulmaya çalışılmış ve sadece katot kalitesinin etkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda bazı katotların şarj malzemesi olarak kullanımı neticesinde; barada oldukça ciddi çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Hatta bazı durumlarda aynı kaynaktan üretilen katotların performansında oldukça belirgin farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Aynı kaynaktan üretilen katotların performanslarındaki farklılığın net olarak belirlenebilmesi için katotların yüzey morfolojileri, metalografik yapıları incelenmiş; katotlara termogravimetrik ölçüm ve hidrojen analizi yapılmıştır. Bu iki analiz neticesinde katotların içerdiği hidrojen miktarının katot kalitesini birebir etkilediği tespit edilmiştir.

Hidrojen etkisini, döküm barasında yüksek miktarda porozite meydana getirmesi, tane sınırlarını zayıflatması ve sıcak haddeleme esnasında baranın çatlamasına neden olması şeklinde açıklamak mümkündür.

Katotta hidrojen varlığı, elektrolitik olarak üretimleri esnasında kullanılan organik katkı maddeleri dolayısıyla ortaya çıkmaktadır. Elektroliz işlemi esnasında organik katkı maddeleri katot bünyesine girmektedir. Katotların ergitilmesi esnasında bu organik kalıntılar bakır matrisini terk ederek çözelti içerisinde dekompoze olmaktadır. Organik katkı maddesi ile katot bünyesine karışan hidrojen dışındaki diğer empüriteler (Ni, Sb, As vb.) dekompoze olmamakta ancak eriyik içerisinde yer alan diğer elementlerle yada bakır ile bileşik oluşturmaktadır. Uygun yolluk ve fırın ateşleme parametrelerinin kontrolü ile ergimiş metalin hidrojen içeriği şaft fırınından döküm makinesine kadar azaltılabilmektedir. Ancak bütün bunlara rağmen hidrojenin varlığını tamamıyla ortadan kaldırmak mümkün olamamaktadır.

1.1.1.2. Ergimiş metal sıcaklığı

Ergimiş metal sıcaklığı, döküm barasının kalitesine etki eden ikinci önemli parametredir. Bunun nedeni ergimiş metal içerisindeki hidrojen çözünürlüğüne doğrudan etki etmesidir. Maksimum ve minimum değerlere sahip olması durumunda, tel kopmaları veya filmaşın yüzey kalitesinin bozulması gibi problemlere neden olmasından dolayı ergimiş metal sıcaklığı tel üreticileri için önemli bir parametredir. Günümüzde kullanılan ve modernize edilmiş ergitme fırınları sayesinde sıcaklığın 3 oC hassasiyetinde kontrolü mümkündür.

Tane yapısının bara kalitesine olan etkisini metal sıcaklığının tane yapısına olan etkisi ile açıklamak mümkündür. Tane yapısını etkileyen en önemli faktör olan aşırı ısınma ne kadar artarsa dökümün kolonsal tane yapısına sahip oranı o kadar artmaktadır. Ergimiş metal sıcaklığını düşürerek aşırı ısınma azaltıldığında, eş eksenli tanelerin yapıya hakim olmasını sağlamak mümkündür. Eş eksenli tane yapısının mı yoksa kolonsal taneli yapının mı bara kalitesi için daha iyi bir durum teşkil ettiği konusunda, tane yapısının bara kalitesi ile doğrudan örtüşmediği söylenebilir. Daha doğru bir ifade ile oksijenin varlığı durumunda sıcak haddeleme sırasında bara yapısı tamamen parçalanmakta ve fayda/zarar açısından ayırt edilemez hale gelmektedir.

Ergitme sıcaklığının, bara kalitesinde ve tane yapısında meydana getirdiği farklılıktan çok hidrojen miktarı ile ergime sıcaklığının ilişkisi önem taşımaktadır. Eğer sıvı metal içerisindeki hidrojen miktarı yüksek ise kolonsal döküm yapısı tercih edilmektedir. Döküm sıcaklığının yüksek olması durumunda oluşturulabilecek bu döküm yapısında hidrojenin atılımı mümkün olmaktadır. Döküm sıcaklığının daha düşük olması durumunda ise hidrojen katılaşma esnasında çözelti içerisinde tutunacaktır. En iyi yöntem sıcaklığın yavaş bir şekilde azalmasını sağlamaktır. Bir başka değişle katılaşma esnasında hidrojen fazlasının sistemden atılımına izin verecek ölçüde sıcaklık düşüşü sağlanmalıdır. Eğer döküm sıcaklığının düşük olması durumunda soğutma hızlı yapılırsa hidrojen atılımı için gereken zaman sağlanamayacağından metal bünyesindeki gaz hapsolacak, buna bağlı olarak bara kalitesinin düşmesine neden olan bir takım problemler ile karşı karşıya kalınacaktır.

1.1.1.3. Oksijen içeriği

Elektrolitik oksijenli bakırın oksijen içeriği 175-450 ppm aralığında değişim göstermektedir. Genellikle yüksek yüzey kalitesi ve buna bağlı olarak yüksek çekilebilirlik değerinin elde edilmesi oksijen içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Katılaşma esnasında çözülmüş oksijen bakırın bünyesindeki empüriteler ile reaksiyona girmekte ve katı çözelti halinde tane sınırlarına çökelmelerine neden olmaktadır. Bu sayede gerek tav gerekse de iletkenlik özellikleri iyileşmektedir.

Hidrojen gazların içerisinde en zararlı olan etkiye sahiptir. Hidrojen, tane sınırlarını zayıflatarak çatlak oluşumuna neden olduğu gibi oldukça büyük porozitelerin varlığına sebebiyet vermektedir. Sıcaklığın artması ile birlikte yapı içerisinde çözünen hidrojen miktarı artış göstermektedir. Hidrojenin bu zararlı etkisi ergimiş metal sıcaklığı ve oksijen miktarı ile kontrol altında tutulmaktadır. 175 ppm'in altında oksijen içeriğine sahip bir yapıda hidrojen porozitesi oldukça yüksektir. Oksijen içeriğinin arttırılması ve şaft fırınından döküm tekerleğine ilerleyen bakırın türbülanslı hareketi hidrojenin ergimiş metal yapısından uzaklaşmasını sağlamaktadır. Yapı içerisinde hidrojen fazlalığının varlığı durumunda, katılaşma işlemi esnasında çözülmüş oksijen ile bu hidrojen reaksiyona girerek H₂O formunu oluşturur ve dentritler boyunca tane sınırlarına çökmektedirler. Bu boşluklar tane sınırlarının zayıflamasına ve sıcak haddeleme esnasında çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

Aslında yüzey kalitesi için bakır oksit partiküllerinin miktarından çok yapı içerisindeki dağılımlar önem taşımaktadır. İyi bir dağılımın mevcut olmadığı bir döküm barasında, oksitler bir noktada çekirdeklenmiş ve tane büyüklüğü oldukça yüksektir. Böyle bir malzemenin çekimi esnasında bu oksit partikülleri mikro çatlakların oluşmasına neden olan inklüzyonlar gibi davranmaktadır. Bu tür büyük oksit partikülleri içeren baranın yüzey kalitesi bozulur ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için oksijen miktarının artırılması gerekmektedir. Bunun nedeni artan oksijen miktarı ile oksit partiküllerinin büyüklüğünün azalmasıdır. Ancak bütün bu bahsedilenlerin yanı sıra oksijen içeriğinin 400 ppm den yüksek bir değere sahip olması halinde, yani yüksek oksijen içeriklerinde, bu bakır oksit partikülleri mikro çatlakların çekirdeklendiği bölgeler gibi davranmaktadır. Bütün bunların neticesinde oksijen içeriğinin belirli değerler aralığında tutulması gerekmektedir.

Yüksek oksijen içeriklerinde katılma esnasında baranın merkezinde birbirine oldukça yakın mesafelerde oluşan oksit partikülleri, ilerleyen tel çekme işlemleri için kritik bölgelerdir. Şekil 1.2'de birbirine oldukça yakın oksit partiküllerinden oluşan bir bara yapısı gösterilmektedir.

Bu yapı incelendiğinde oksitlerin adeta bir zincir formu oluşturduğunu söylemek mümkündür. Tel çekme işlemi esnasında bu tür oksit partikülleri mikro çatlakların çekirdeklendiği bölgelerdir.



Şekil 1.2. Birbirine oldukça yakın oksit partikülleri içeren bir döküm barasının mikro yapı görüntüsü[2]

Bu oksit partikülleri oldukça serttir ve deforme olmamaktadırlar. Ancak gerek sıcak haddeleme gerekse de tel çekme işlemleri esnasında bu partiküller kırılabilirlerdir. Bu nedenle katılma koşulları ve oksijen içeriği bu oksitlerin dağılımlarına önemli derecede etki etmektedir [2].

1.1.1.4. Hidrojen, oksijen ve sıcaklık kontrolü

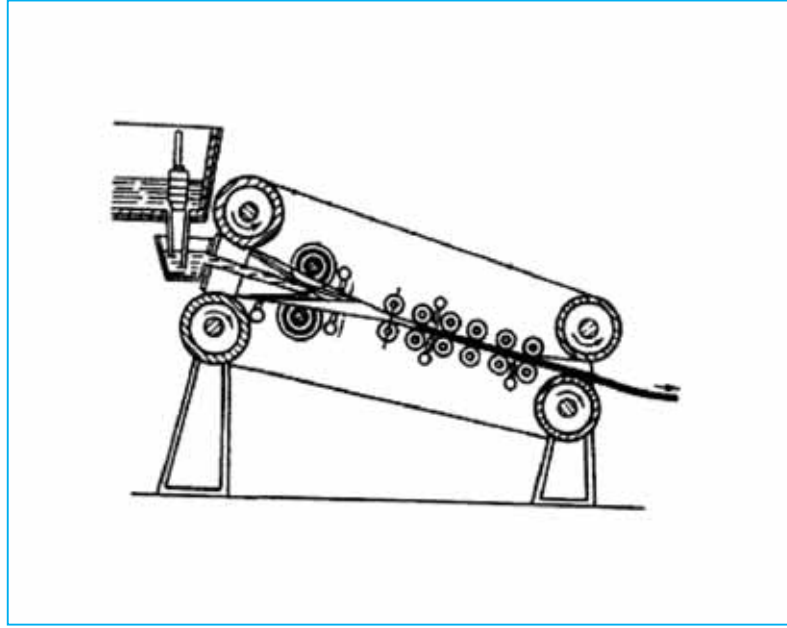
Belirli sıcaklıktaki katotta hapsolmuş organik bileşenler ergitme fırınında H_2 , CO ve N_2 ye ayrışır. Bu gazlardan hidrojen, ergimiş bakır içerisinde kolayca çözündüğü için en zararlısıdır. Hidrojenin çözünebilirliği ergimiş bakırın artan sıcaklığı ile birlikte artar, fakat artan çözünmüş oksijen miktarı ile birlikte azalır.

SCR sistemi uygun oksijen-sıcaklık dengesini sağlayarak ergimiş bakır içerisinde hidrojenin çözünmesini engeller. Ergitme fırınından tandişe doğru giden ergimiş bakırın sıcaklığı gittikçe artarak ergime sıcaklığının yaklaşık olarak 25 oC üzerine kadar çıkar. Eş zamanlı olarak, ergimiş bakırın oksijen içeriği tandişe varana kadar yaklaşık 300 ppm seviyelerine gelir.

Ergimiş bakırın sıcaklığının kontrolü bekletme fırını, aktarma yollukları ve tandişteki brülörlerle sağlanmaktadır. Yakıt/hava oranı ve yanmış gazlar içerisindeki fazla CO kullanılarak çözülmüş oksijen miktarı ayarlanmaktadır. Ergimiş bakırın katılaşması esnasında, fazla hidrojen çözülmüş oksijenle birleşerek dentritik tane sınırları boyunca H₂O oluşturur. Daha önceki deneyimler gösterir ki en iyi kalite filmaşın üretilen katotlar 2 ppm H içermektedir [1].

1.2. Contirod Sürekli Döküm Prosesi

Bakır katotlar bir şaft fırınında ergitilmekte ve ergimiş metal bir bekletme fırınına aktarılmaktadır. Ergimiş metal döküm makinesine aktarılmadan önce oksijen içeriği ölçülmektedir. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi hazelett döküm makinesi birbiri üzerine yerleştirilmiş iki çelik kemerden oluşmaktadır.



Şekil 1.3. Hazelett konveyör döküm makinesinin ilk versiyonlarından birinin şematik görünümü[3]

Ergimiş metal iki konveyör kemeri arasında döküldükten sonra soğutulmuş katılaşması sağlanmaktadır. En fazla 2100-9000 mm² yüzeye sahip dikdörtgen döküm barası 10-15 pasoda SMS-Meer haddesinde haddelenmektedir. Filmaşın 6-37 m/sn hızla haddeden çıkmaktadır. Son olarak, filmaşın dekapaj işlemine tabi tutulmakta ve soğutulmaktadır.

1.2.1. Contirod döküm prosesinin avantajları

Diğer yöntemlere nazaran daha düşük sıcaklıktaki döküm makinesinde ergimiş metal türbilanslı olmayan ve sakin bir akışa sahiptir. Bu da ince tane yapısına ve iyi bir oksijen dağılımına neden olmakta, simetrik ,düz çizgi halinde ve çatlaksız katılaşma, yüksek kapasite sağlayan büyük kesitte çalışabilme, küçük bir döküm açısı (kalıntı gerilim giderilmesi ve çatlakların önlenmesinde) ve dekapaj sayesinde oksijeni azaltılmış bir yüzey sağlar [3].

1.3. Oksijensiz Bakır Filmaşın Üretim Yöntemi (Upcast)

Literatürde yukarı döküm teknolojisi (Upcast) olarak bilinen bu proses oksijensiz bakır üretiminin gerçekleştirildiği bir teknoloji olup gerek döküm yöntemi gerekse de ürün özellikleri açısından Southwire ve Contirod sürekli döküm ünitelerinden farklılıklar göstermektedir. Oksijensiz bakır üretiminde kullanılan bu proses, 1960'lı yılların sonuna doğru kullanıcıların hizmetine sunulmuştur. Oksijensiz bakır üretiminin temel prensibi kimyasal reaksiyonla oksijenin sistemden uzaklaştırılmasıdır. İndirgeme karbon ile gerçekleştirilmektedir. Yüksek saflığa sahip katotların ergitilmesi indüksiyon fırınında gerçekleştirilmekte ve ergimiş metal buradan atmosfer kontrollü bekletme fırınına aktarılmaktadır.

Bekletme fırınının üzeri koruyucu atmosfer sağlayan ince taneli grafit örtüsü ile kaplanmıştır. Yüksek saflıkta katod kullanılmasının nedeni, bakır içerisinde çözünmüş oksijenin mevcut olmaması dolayısıyla empüritelere oksitlenerek zararlı etkilerinin ortadan kaldırılmasının mümkün olmayışıdır. Bu noktada Southwire ve Contirod üretim prosesleri daha geniş aralıkta empürite seviyesine sahip katodlarla çalışma olanağı sağlayabilmektedir. Yukarı döküm olarak bilinen oksijensiz bakır filmaşın üretim yönteminin kokil kalıplı döküm sistemi Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Yukarı döküm oksijensiz bakır filmaşın üretim yönteminin kokil kalıplı döküm sisteminin görünümü [5]

Yukarı döküm teknolojisi ile oksijensiz bakır üretiminin gerçekleştirildiği bu proseste, döküm makinası bekletme fırınının üzerinde yer almaktadır. Su soğutmalı kokil ergimiş metalin içerisine daldırılmakta ve metalostatik basınç yardımıyla ergimiş metal haddenin içerisine doğru yönlendirilmektedir[4]. Su ile soğutma sayesinde metal hızlı bir şekilde katılaştırılarak 20 mm çapında filmaşın haline getirilir ve 2-3 tonluk kangal halinde sarılır. Bu yöntemle oksijen içeriği yaklaşık 1-2 ppm civarında olan oksijensiz filmaşın üretimi gerçekleştirilmektedir. Hava ile herhangi bir temas olmadan eritilen ve dökülen bu bakır, oksijensiz bakır olarak isimlendirilir.

8-25mm çap aralığında istenen çapta filmaşın haline getirilir ve kangallar halinde sarılır. Soğuk haddeleme ile sert olarak elde edilen bu filmaşınlar gerekirse elektrik fırınlarında vakum ve/veya koruyucu gaz atmosferi altında tavlansın yumuşatılır[6].

2. TEL ÇEKME

Metalik bir malzemenin matris veya hadde olarak adlandırılan ve üzerinde bir veya daha fazla delik bulunan bir takımdan çekilerek uzatılmasına tel çekme denir. Çekme kuvveti haddenin çıkış tarafından uygulanır. Tel çekme işleminde plastik şekil değişimi kalıbın malzemeye uyguladığı basma kuvvetleri ile hesaplanır. Metalin kesiti genellikle daireseldir ve daha başka kesitler de (kare, altıgen, v.s.) çekilebilmektedir. Birçok tel çekme işleminde, tel ardı ardına birkaç haddeden geçer. Ardı ardına yapılan çekme işlemleriyle malzemenin kesiti sürekli olarak düşürülür. Elde edilen çıkış değerine göre de işlem filmaşın veya tel çekme olarak adlandırılmaktadır. Sürekli tel çekmede; bir haddeden geçen tel sonraki daha küçük çaplı haddeye girmeden önce kasnağa birkaç tur sarılır. Her haddeden geçişinde telin çapı küçülürken uzunluğu ve hızı artar. Dolayısıyla kasnakların ve sarma makaralarının hızları telin haddeden çıkış hızlarına uygun olmalıdır. Bir kasnağın hızı, tele, hadde çıkışında çekme gerilmesi, sonraki daha küçük kesitli haddeye girişinde ise geri çekme uygulayacak şekilde ayarlanmalıdır. Geri çekme kuvveti hadde ömrünü arttırır. Kesit daralmaları tüm kademeler için gerekli gücün eşit olacağı şekilde ayarlanmalıdır. Çekme işlemi genellikle oda sıcaklığında yapılır fakat işlemden uygulanan büyük deformasyon oranları, işlem sırasında malzemenin sıcaklığının artmasına sebep olur.

Her çekme kademesinde malzemenin kesiti % 10-45 arasında bir küçülme oranına sahiptir. Küçük kesitler için bu oran genellikle alt sınıra daha yakın değerlerde alınır. Bir kademedeki kesit daralması % 45 ten büyük olduğu takdirde yağlama sorunları doğabilir ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla paso başına % 10'dan düşük kesit daralmaları uygulanabilir [7,8].

Tel çekme işlemi sırasında telin haddeden kolay geçmesi ve haddeyi aşındırmaması için yağlayıcılar kullanılır [9]. Çekme işlemi, yağlama bakımından kuru ve yağ olmak üzere ikiye ayrılır. Kullanılan yağlayıcının kuru ve sıvı olmasına göre tel çekme işlemi "kuru çekme" veya "yağ çekme" olarak adlandırılır. Kuru çekmede yağlayıcı olarak gres yağı veya sabun tozu kullanılır. Yağ çekmede ise hadde sıvı bir yağlayıcı içine daldırılmış durumdadır [7]. Bu konu ileriki bölümlerde açıklanacaktır.

2.1. Bakır Tellerin Çekimi

Diğer sektörlerde alüminyum tellerin yerini alan cam fiber kablolarla rağmen, demir dışı metallerin tel çekiminde bakır teller özellikle elektrik mühendisliğindeki üstün önemlerinden dolayı hala önemli bir rol oynamaktadır. Bakır teller üretilirken aynı kesit daralması ile çalışmak mümkün değildir. ϵ : kaba tel $\epsilon \approx \% 25$ süper ince tel $\epsilon \approx \% 9$. Bu da kaba tel için $\lambda \approx \% 33$ ince tel için $\lambda \approx \% 10$ telin uzamasına tekabül etmektedir.

Tel üretimi esnasında malzemenin sürtünme, aşınma ve yağlama üzerinde çok büyük etkisi vardır. Eski ve geleneksel bir metot olan haddelenmiş tel üretimi bara dökümüne dayanmaktadır. Southwire metodunda ise ergimiş bakır döküm tekerleğinin oluklarında katılaştır. Üretilen bakır filmaşınlar sonradan direkt olarak sıcak haddelenmektedirler.

Sıcak haddeleme tel yüzeyinde bakır oksit pul şeklinde dökülmesine neden olmaktadır. Bu oksit tabakaları ileriki tel çekme işlemlerinden önce dekapaj ile giderilmelidir. Dekapaj işlemi için karışık asit kullanılmaktadır. Tipik olarak poroziteli ve mat bir yüzeye sahip tel elde edilmektedir [10].

Çekme hızı malzemeye ve kesit yüzeyine bağlıdır. Büyük kesitler 10 m/dakika gibi küçük hızlarda çekilirken süper ince tellerde bu hız 3000m/dakika gibi yüksek değerlerde olabilir [7]. Çıplak tel ve emaye kaplama arasındaki zayıf yapışmaya, yetersiz yapışmaya ve çekim haddelerinin aşırı aşınmasına neden olabileceği için yüzeydeki oksit filmleri oldukça zararlı olabilir [11].

2.1.1. Kaydırmalı tip tel çekme makinesi

Kayma: Kayma terimi tel ve kasnağın farklı hızlara sahip olmasından ötürü telin kasnak üzerinde kayması şeklinde gerçekleşir. Kayma genellikle % olarak ifade edilir ve kasnak üzerindeki telin gerçek hızı ile kasnağın gerçek hızı arasındaki fark olarak tanımlanır [12]. Bu değer şu şekilde hesaplanır.

$$g = \frac{V_Z - V_D}{V_D} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Ayrıca, kuru çekim kasnaklarının yağlayıcı kullanılmadığından sıfır kayma değerine sahip oldukları varsayılmaktadır. Bakır tel çekimi için kayma değeri genellikle % 1,5 - % 3 arasındadır ve kasnaklar arasında sabittir. Aynı şekilde kayma ilave edilir ve makine boyunca geriye doğru aritmetik olarak eklendiği anlamına gelir. Örneğin, %3 kayma değerine sahip bir çekim makinesinde kuru kasnağın kayma değeri 0 ise bir önceki kasnağın kayma değeri % 3, ondan bir önceki kasnağın kayma değeri % 6 ve ondan bir önceki kasnağın kayma değeri ise % 9 olur [12].

Makine uzaması: bir adımdan bir sonrakine % olarak çevresel hızdaki artıştır. Normalde vites ile ayarlanmaktadır. (mesela ilk adımda $V = 100$ ise ve bir sonraki adımda $V=125$ ise makine uzaması $ME = \% 25$ tir).

Tel uzaması: hadde başına % olarak telde meydana gelen uzamadır. Normalde makine uzamasından yaklaşık olarak % 1-2 daha büyük seçilir.

$$\lambda = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Tel kesiti azalması (redüksiyon): hadde başına % olarak azalma

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Yukarıdaki formüllerdeki kısaltmalar:

F_0 = Tel çekme kalıbından (hadde) önceki tel kesiti

F_1 = Tel çekme kalıbından (hadde) sonraki tel kesiti

L_0 = Tel çekme kalıbından (hadde) önceki tel uzaması

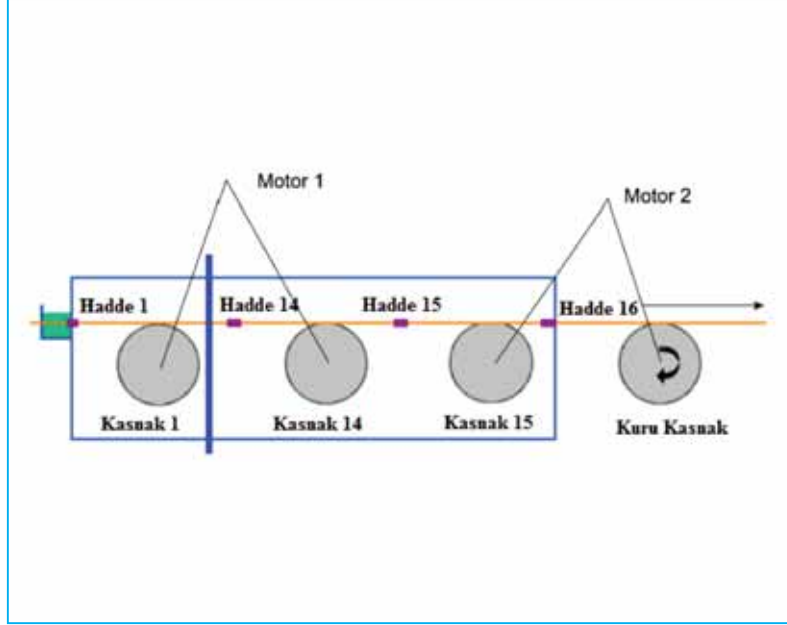
L_1 = Tel çekme kalıbından (hadde) sonraki tel uzaması

V_Z = Çekim kasnağının çevresel hızı

V_D = Çekim kasnağındaki telin çevresel hızı [13].

2.1.2. Çift motorlu çekim makinesi

Çift motorlu çekim makinesi tek veya çok telli çekim makinesi olabilir ve geleneksel tek motorlu çekim makineleri ile çift motorlu çekim makinesi arasındaki fark, tipik olarak Şekil 2.1'de gösterilen 16 haddeli çekim makinesinde olduğu gibi iki farklı motor tarafından kasnaklara verilen iki farklı kasnak hızının sağlanmasıdır.



Şekil 2.1. Çift motorlu bir çekim makinesinin şematik görünümü[12].]

1-14 kasnaklar için % kayma standart çekim makinelerinde olduğu gibi ayarlanır. 15.ve 16. kasnaklar arasındaki mekanik ilişkide aynı şekilde ayarlanır. Tüm haddeler ve kasnaklar kullanıldığında kayma faktörü bakır için %2 ila %3 arasında ayarlanmaktadır [12].

2.2. Yağlama

Tel çekme işlemlerinde yağlayıcı, temel olarak işlemin "kuru" veya "yaş" olmasına göre seçilir. Kuru tel çekme işleminde; tel yüzeyi, mukavemet ve sürtünme karakteristiklerine bağlı olarak yağlayıcı seçilir. Kuru tel çekmede haddenin önünde içine katı ve kuru bir yağlayıcı doldurulmuş bir kap bulunur. Dolayısıyla çekilen tel veya filmaşin haddeye girmeden önce bu kaptan geçer ve yağlanmış olur.

Yüksek mukavemetli çeliklerin, paslanmaz çeliklerin ve ısıya dayanıklı alaşımların kuru çekilmesinde filmaşin ve teller çinko fosfat veya oksalat kaplanır. Bu tür kaplama; yüksek hızlarda ve büyük şekil değişimlerinde özellikle faydalıdır. Yüksek karbonlu çelikler çinko fosfat, paslanmaz çelikler ise oksalat kaplanır. Yaş çekme parlak çelik tel ve filmaşinlerin elde edilmesini sağlar.

Yaş çekmede tel ve haddeler tamamen emülsiyon içerisine daldırılmış durumdadır. Bu emülsiyonlar klor veya değişik katkı ilavelerden oluşur [9].

Yağlayıcı genel olarak iş parçası ile hadde arasındaki kayma direncini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Yağlayıcılar bu direnci aşağıdaki şekilde azaltırlar.

- 1) Sürtünme katsayısı değerini azaltarak çekme kuvvetini düşürür.
- 2) Haddedeki aşınmayı azaltır

- 3) Tel ve haddenin yüzey sıcaklıklarını azaltır
 4) Çekilebilirliği artırır ve tel yırtılmalarını engeller [14].

Yağlayıcı film temas ettiği malzemeye uygun kalınlığa sahip olmalı, o yüzeye iyice yapışmalı, telin pürüzlülüğünü doldurmalı ve çekilen tel ile kalıbın sıkışmasını engellemelidir. Kayma tel ile kalıp arasında meydana gelmelidir. Yağlayıcı film sürtünmeyi azaltmalı, elastik olmalı, gerekli sıcaklık ve maksimum hızda kararlı olmalıdır. Ayrıca, yağlayıcı film ısıyı düşürmek için mümkün olduğunca ince olmalı eğer yağlayıcı film kalın olursa soğutmaya olumsuz etki yapar.

Çekme işleminden sonraki bakır tozu ve emülsiyon kalıntıları (artık karbon, lekeler, kristalleşme) doğrudan doğruya haddenin içine yerleşir ve çekime engel olan topaklanmayı oluşturarak hadde üzerine yapışır.

Yüksek hızda üretime uygun olmayan emülsiyonlar tel çekme haddelerinde sıkışan artıklara neden olmaktadır. Kötü bir yağlayıcı film hadde içerisinde sürtünmenin ve dolayısıyla sıcaklığın en yüksek olduğu noktada, sürekli olarak çatlak oluşturur ve yağlayıcı katkıların kaybına neden olur.

Sıcaklığın değişimi sebebiyle oluşan tüm parçacıklar kalıbın üzerine yerleşmekte ve temizlenmesi zor olan bakır tozuyla birlikte sıkışmaktadır. Bu oluşumdan kaçınmak imkânsız olduğu için, iyi bir temizlik yapıldığında bile birkaç saat sonra makine tekrar kirlenmektedir. Kalıba sıkışmış olan artıklar özellikle tel ince ve elastisite az olduğunda telin çıkışını engeller [15].

Emülsiyonlar yağ çekimde tüm yağlayıcıların en önemlileridir. Bunlardan başka, yüzey aktif çözelti önemli olmakla birlikte, mineral yağın olmayışı da önemlidir. Kısa çekimler için diğer sentetik çözeltiler de kullanılmaktadır. Yağlayıcılar Tablo 1'de görüldüğü gibi en önemli içeriklere bağlı olarak üç grupta sıralanabilir.

Yağlayıcı Tipi	İçerik
Emülsiyonlar	Hidrokarbonlar, mineral yağ, doğal yağlar, sentetik esterler, İyonik olmayan yüzey aktif maddeler, Anyonik yüzey aktif maddeler, Stabilizerler, inhibitörler, Köpük önleyici katkılar Diğer katkılar
Yüzey aktif madde çözeltileri	Alkali sabunlar Sülfatlı yağların alkali Tuzları İyonik olmayan yüzey aktif maddeler, Diğer katkılar
Diğer sentetik çözeltiler	Polimerler Organik tuzlar Organik olmayan tuzlar Diğer katkılar

Tablo 2.1. Yağ çekimde bakır tel için kullanılan yağlayıcılar [10]

Pratikte bu yağlayıcıların sudaki çözünürlük ve dispersiyon dereceleri farklıdır. Emülsiyonlar sırasıyla yaklaşık olarak 5 µm damla boyutundaki kaba bir biçimde dağılmış emülsiyonlardan ince parçacıklar halinde dağılmış olan 1 µm'den daha küçük damla boyutundaki emülsiyonlara kadar değişiklik gösterebilir [10].

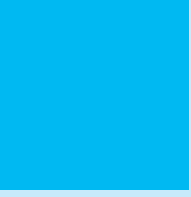
2.2.1. Islanabilirlik

Islanabilirlik telin tamamını nemlendirmek için emülsiyonun metal yüzeyinde mikrometrik damla oluşturma kabiliyetidir. Onlar iyi bir yağlayıcı özelliğe sahip olmalıdır. Islanabilirliğin iyi olması teldeki ısı transferine katkıda bulunarak homojen ve sabit bir sıcaklık sağlar.

Farklı parametrelere bağlı olan (yoğun ya da az) gerilmeler ve titreşimler tel çekme işlemi sırasında teli etkiler. Bu yüzden ıslanabilirlik düşük ise emülsiyon mekanik olarak telden uzaklaşma eğiliminde olur.

İyi bir soğutucu şu özelliklere sahip olmalıdır:

- a) Hızlıca telin ısını düşürmelidir (550-570 oC). Yüksek ıslanabilirlik derecesine,
- b) Tavlanmış tel iyi bir yeniden kristalleşme safhasına ve çok iyi bir dövülgenliğe ve parlak bir görünüme,
- c) Çalışma koşullarının düşük nemli ve oksitsiz olduğundan emin olunmalı. Soğutucunun iyi antioksidant ve pasifleşme özelliklerine sahip olması önemlidir[15].



3. TOZLANMA PROBLEMİ

3. TOZLANMA PROBLEMİ

Tozlar, tel ve kablo endüstrisinde çok iyi bilinen bir sorundur. Kalıp aşınması, tel kopmaları, zayıf yağlama ve yüzey hasarlarına yol açabilirler. Genelde, istenmeyen maddelerin varlığı üretim verimliliğinin azalmasına, düşük kaliteye yol açar ve maliyetleri arttırır[16].

Bakır tel üretiminde iki tip toz oluşumu mevcuttur bunlardan biri tel çekme esnasında oluşan tozlar bir diğeri ise filmaşın yüzeyinde oluşan tozlardır. Bakır tel üretiminin farklı aşamalarında oluşan bu tozlara ileriki bölümlerde değinilecektir.

Çekilmiş tellerin yüzeyindeki ince tabaka halindeki küçük parçacıkların başlıca kaynağı, döküm makinesi ile hadde arasında döküm barası üzerinde oluşan oksit tabakasıdır. Bu sorunun derecesi genellikle filmaşınlere uygulanan burma (twist) testi ile belirlenir. Burma (twist) testinin nasıl uygulandığı ileriki bölümlerde açıklanacaktır [17].

Toz oluşumu üzerinde fazla araştırma yapılmamış olması akla tozların bilinmeyen etkilerini getirmektedir. Bu bölümde toz oluşumunun neden olduğu beş önemli sorundan bahsedilecektir.

a. Tel kopmaları

Üretim esnasında tel kopması meydana geldiğinde, telin tekrar çok kalıplı çekim makinesine takılması esnasında geçen süre maliyeti arttırmaktadır. Çok telli bir sistem ile çalışılıyorsa, tel kopması tüm sistemin durmasına yol açarak maliyetleri arttırır.

Operasyon sırasında meydana gelen tel kopmalarının başlıca 3 ana sebebi vardır.

- 1) Kalıptan çıkan telin gerilimindeki düşüş,
- 2) Kalıptaki sürtünmenin artması veya
- 3) Çekim kasnağı ile düzensiz temas.

Kalıptan çıkan telin gerilimindeki düşüş birçok sebepten dolayı meydana gelebilir. Kazayağı olarak bilinen bir yüzey kusuru, her pasoda kalıptan geçerken büyüyen ve muhtemelen tel kopmasıyla sonuçlanan kusurlardan biridir. Kazayağı kusuru kalıp teması esnasında abrazyon hasarı ile oluşmaktadır.

Sürtünmedeki artış tel kopmalarına neden olabilir. Tozlar kalıp girişinde birikerek sürtünmeyi aşırı bir biçimde arttırır ve bu da kalıp ile telin sıkışmasına yol açar ve yağlayıcının deformasyon bölgesine girmesini engeller.

Tel çekme işlemindeki kasnak, telin etrafında dolandığı bir çeşit makaradır. Çoğu kez, tel ve kasnak arasındaki sürtünme teli kalıptan çeken bir kuvvet görevindedir. Tozlar ve bunların oluşturduğu sabunumsu çamurlar düzensiz olarak kasnak üzerine sıvanabilirler ve böylece telin kalıp içerisinden yanlış bir doğrultuda çekilmesine neden olarak tel kopmalarına neden olabilirler.

b. Yağlamanın yapılamaması

Tozlar yağlayıcının kimyasal doğasını değiştirebilir. Buna en iyi örnek, bakır tozlarıdır. Sıvı hidrolizi veya diğer koşullar yağlayıcı içerisinde serbest yağ asidi oluşumuna sebep olmaktadır. Bu asitler hızlı bir şekilde bakır veya bakır oksitle (CuO) reaksiyona girerek sabunumsu bakır çamurunu oluştururlar. Tozların oluşumu, bakırın asitlerle reaksiyona giren yüzey alanını hızlı bir şekilde arttırır. Bundan dolayı sistemde çok fazla toz var olduğunda, yağlayıcı içerisinde zararlı olacak miktarda sabunumsu bakır çamuru da oluşacaktır.

Bakır çamuru ileri derecede (su geçirmez) hidrofobiktir. Bu yüzden suyla çözünmezler. Ayrıca, bu çamur metallerle karşı çok yüksek bir (ilgiye) afiniteye sahiptir.

Çamur, tel çekme ekipmanları ve ve bakır tozları gibi metal yüzeylere yapışır. Bu çamur kalıp girişini tıkayarak, çekim kasnaklarına yapışarak ve telin geçtiği bölgeleri tıkayarak zorluklara neden olabilir. Çamur, sağlıklı bir yağlamaya engel olarak tel kopmalarına yol açabilir.

Bazı çamurlar emülsiyon içerisinde çözündükleri için yağlayıcıdaki yeşilimsi renk, bakır çamuru varlığının bir göstergesidir. İleriki safhalarda, yağlayıcı banyosunun üzerinde yeşil parçalar yüzerler. Bakır çamuru belirgin olduğunda, uygulanan tek çözüm yolu yağlayıcı grubunun imha edilmesi ve yağlayıcı tankı ile aparatların temizlenmesidir. Bu yüzden, bakır çamuru oluşumunun engellenmesi önemlidir. Bakır oluşumunun önlemesine yönelik ölçümler arasında pH değerinin ölçümü gelir ve bu değer 8.5-9.0 aralığında olması gerekir. Ayrıca, toz oluşumu azaltılabilirse, bu en iyi çözüm olacaktır. Özellikle çevresel yönetmeliklerden dolayı yağlayıcı imhası çok maliyetlidir.

c. Kalıp aşınması

Tozlar kalıbın ağızına yerleşerek veya üç elemanlı abrazif aşınma yoluyla kalıp aşınmasını arttırabilir. Bu durum özellikle ileriki safhalarda tozlar oksitlendiklerinde geçerlidir. Kalıp aşınmasının en aza indirilmesi çok önemlidir. Aşınmış bir kalıp yüzey kalitesini ve tel çapını etkileyerek kopmalara neden olabilir. Bu yüzden, aşınmış kalıpların periyodik değişimleri önemli bir bakım süresi gerektirebilir.

d. Emaye hataları

Toz oluşumu, yüzey kalitesini düşürerek veya tel yüzeyine yapışarak sonraki tel çekme aşamalarını da etkileyebilir. Bu tip bir probleme başlıca örnek tellerin emaye kaplanması işlemi esnasında meydana gelir. Tozlar tel üzerinde kalırsa, ince emaye kaplamalar uygulandığında kaplamada baloncuklar, kabarcıklar veya servis esnasında çatlaklar oluşabilir [18].

e. Kötü yüzey kalitesi

Tozlar kalıp aşınmalarını arttırarak telin yüzey kalitesinin düşmesine neden olurlar[19]. Kötü yüzey kalitesi birçok nedenden ötürü istenmeyen bir durumdur[18].

Döküm makinesi ve hadde arasında yüksek sıcaklığa maruz kalması sonucu (yaklaşık olarak 45 saniye boyunca) döküm barası, ince bir oksit tabakası (10-23 µm) oluşturmaktadır. Bu tabakanın çoğunluğu (% 90'dan fazlası) haddeleme işleminin ilk pasolarında aniden kaldırılmakta ve çözünebilir bir yağlayıcıyla kaplanmaktadır. Bazı çözünebilir yağ sistemlerinde alkolün varlığından dolayı daha düşük bir oksitlenme hızı oluşur [17]. Bakır matrisi içerisindeki bakır oksit partikülleri soğuk çekim işlemi esnasında matrise göre daha gevrek olduklarından dolayı plastik olarak deforme olmayacaklar ve böylece bakır telden parçacıklar kopmasına neden olacaklardır [20].

Emayeli tel üretimi için en önemli gerekliliklerden biri de yüksek yüzey kalitesi olduğu için, tozların varlığı yüzey hasarlarına ve kalitesiz emaye kaplamalarına neden olabilir. Ayrıca, bakır-bakır oksit toz partikülleri, daha sonraki aşamalarda burma testi ve tel çekimi esnasında bakır filmaşından kıymık kopmalarına neden olabilir. Daha öncede bahsedildiği gibi tozların tel çekme kalıplarını tıkaşması ve sonunda tel kopmalarını arttırması sürpriz değildir [16].

3.1. Tel Çekme İşlemi Esnasında Oluşan Tozların Oluşum Mekanizmaları

Toz oluşumu, tel yüzeyinden bir metal partikülünün kopması işlemidir. Bu bölümde, çeşitli toz oluşum mekanizmaları tartışılacak, ayrıca diğer bölümde ise bununla ilişkili olan "Toz Oluşumunun Hızlanması" konusundan bahsedilecektir. Bu iki bölümde anlatılacak olan olaylar birbirinden farklıdır [16]. Kalıbın aşınması veya çekilen malzemenin yüzeyinin aşınmasıyla birlikte malzemenin şiddetli bir biçimde aşınması kesinlikle istenmeyen ve uygun yağlayıcı ile önlenmesi gereken bir durumdur [21]

Bu bölümdeki konu toz oluşumunu arttıracabilecek dış faktörlere bağlı olmayan mekanizmalardır. Örneğin, yağlayıcı kalıbı ıslatamazsa toz oluşumu büyük bir miktarda artacak ve kaçınılmaz tel kopmalarına neden olacaktır. Kötü yağlama toz oluşumunu hızlandırmasına rağmen, gerçek anlamda bir toz oluşum mekanizması değildir.

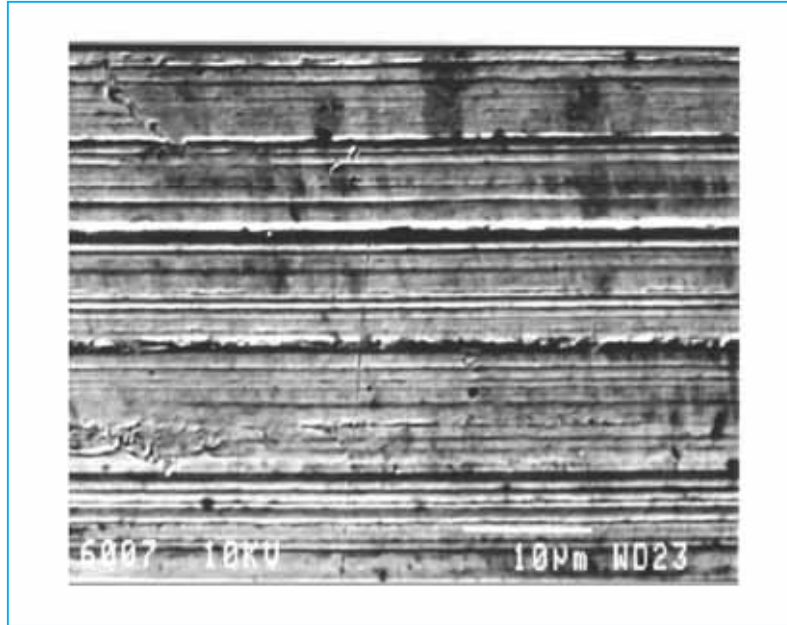
Bu bölümde sekiz önemli toz oluşum mekanizmasına değinilecektir. İlk beş mekanizma aşınmayla ilgili ve metal şekillendirme işlemlerinden çok iyi bilinmektedir. Bunlar;

- Abrasif aşınma
- Üç elemanlı abrasif aşınma
- Yüzey deformasyonu aşınması
- Adezif aşınma
- Delaminasyon aşınması

Diğer üç toz oluşum mekanizmaları ise filmaşindeki yüzey oksitleri, tel çekme ve filmaşın kaynaklı kıymıklar ve kimyasal bileşenlerdir.

3.1.1. Abrasif aşınma

Zımpara kâğıdının malzemeyi aşındırması abrasif aşınmaya tipik bir örnektir. Zımpara kâğıdındaki ince sert partiküller kendinden daha yumuşak olan malzemeden tozlar kaldırır. Her sert parçacık, yumuşak malzemenin yüzeyinden parçacıklar koparan ince bir kesme aleti gibi davranır. Daha az bir abrasif aşınma durumunda, sert partiküller her pasoda yumuşak malzeme yüzeyinde derin çizgiler oluşturur ve sonraki pasolarda çizgiler malzeme kopana kadar daha da fazla aşınmaktadır. Tel çekme işleminde, kalıp yüzeyindeki pürüzlülükler zımpara kâğıdı gibi davranır. Şekil 3.1'de abrasif aşınmaya bir örnek olan tel yüzeyindeki çizikler görülmektedir.



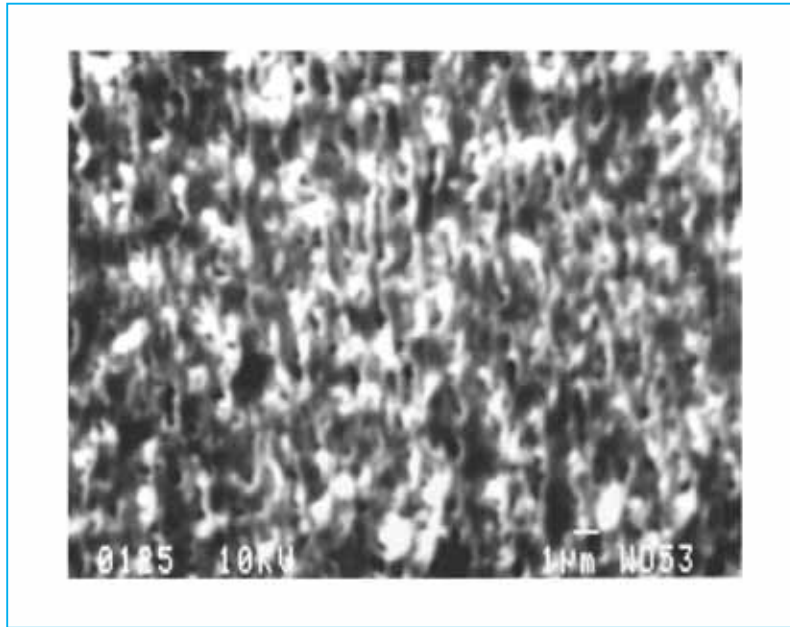
Şekil 3.1. Kalıp pürüzlülüğü nedeniyle tel yüzeyinde oluşan çizikler [16].

Şekil 3.2'de de abrasif aşınma mekanizmasıyla oluşmuş uzamış tozlar görülmektedir. Tüm tel çekme kalıpları telden daha sert yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve abrasif aşınma en şiddetli şekilde polikristalin elmas kalıplarda görülür. Bu da hem tel hem de diğer kalıp malzemelerinden daha keskin yüzey pürüzlülüğüne sahip olması demektir.



Şekil 3.2. Abrasif aşınma nedeniyle oluşan tozlar [16].

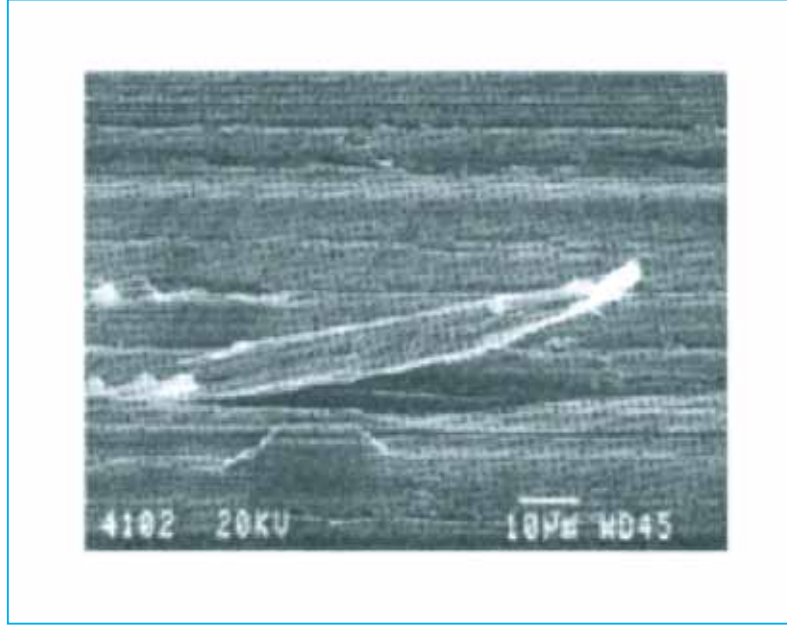
Polikristalin kalıpların tane boyutu abrasif aşınmanın şiddetinin tespitinde büyük rol oynar. Literatürde bahsedildiği gibi, polikristalin elmasın tane boyutu daha ince olur ve böylece aşınma da artar. Şekil 3.3'te bir polikristalin elmas kalıbın yüzeyi görülmektedir.



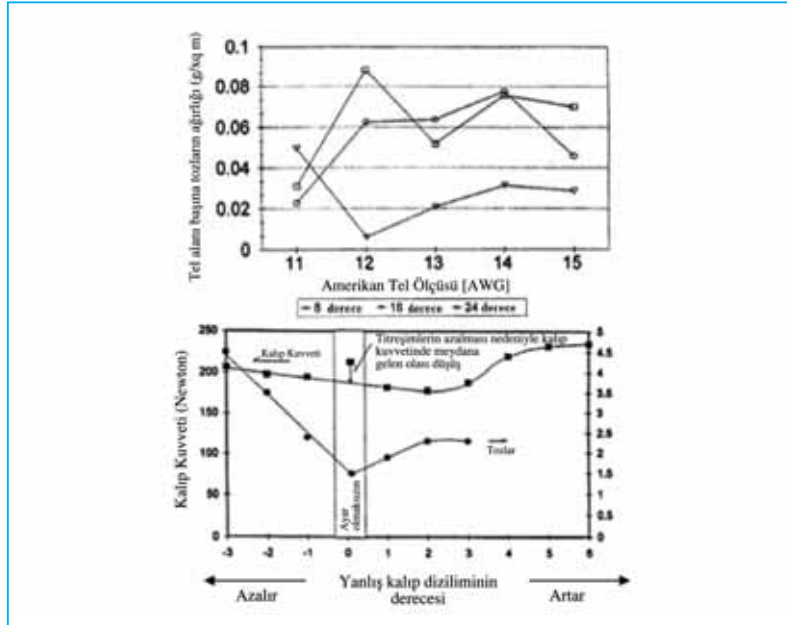
Şekil 3.3. Bir polikristalin elmas kalıbın yüzeyi [16].

Çoğu çekim teknolojilerinde, toz olarak adlandırılan ufak parçacıklar tel yüzeyinden kopmaktadır, bu tozlar yağlayıcıyı kirletir, yağlayıcının kalıba girişini engellerler. Tozlar sonradan tel yüzeyine batmış olabilirler. Bakır tel yüzeyinden kopan bir tozun SEM resmi Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu toz kalıp pürüzlülüğü nedeniyle meydana gelen abrasif aşınmanın bir sonucu olarak

oluşturmuştur. Şekil 3.5'teki verilerden de anlaşıldığı gibi düşük açılı kalıp kullanımı, bakırdaki toz oluşumunu arttırmaktadır ve en düşük toz oluşumunu da 16°'lik kalıp açısı sağlamıştır. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi, toz oluşumu birde kötü kalıp dizilimiyle artmaktadır [22].



Şekil 3.4. Tel yüzeyinden kopmaya başlayan bir toz partikülünün SEM resmi [22].



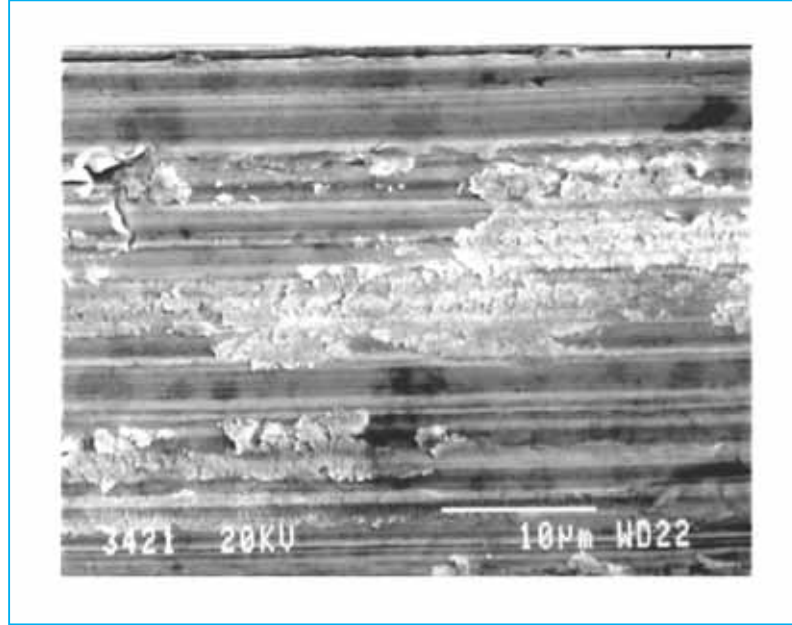
Şekil 3.5. Yanlış kalıp diziliminin bir fonksiyonu olarak tozların varlığını gösteren grafikler[22].

3.1.2. Üç elemanlı abrasif aşınma

Üç elemanlı abrasif aşınma tel ile kalıp arasında sert bir partikülün teli aşındırması prensibine dayanır. Oysa abrasif aşınma zımpara kâğıdına benzetilerek açıklanmaktadır. Üç elemanlı abrasif aşınma bir abrasif tozun yüzeye sürtünmesiyle tasvir edilir. Sonuç olarak, abrasif partiküller aşınmaya yol açar. Üç elemanlı abrasif aşınma abrasif partiküller farklı konumlara batacağı ve daha fazla keskin noktalarla temas edeceği için abrasif aşınmaya göre daha şiddetli aşınmaya yol açabilir. Tel çekmedeki abrasif partiküllerin pek çoğu telin kendi tozlarıdır. Bazen bu tozları oluşturan malzeme hemen oksitlenmekte veya tel ve kalıp arasındaki sürtünmeden doğan yüksek sıcaklık sebebiyle tel yüzeyinden kopan tozlar oksitlenir. Oksitler metallere daha sert oldukları için, oksitlenmiş tozlar tele göre oldukça abrasiftir.

3.1.3. Yüzey deformasyonu aşınması

Çoğu tel çekme işleminde, daha iyi nihai özellikler elde etmek veya tel kopmalarını azaltmak amacıyla tel bir tavlama işlemine tabi tutulur. Sık sık tel yüzeyi telin iç kısımlarına göre daha fazla deformasyona maruz kalır ve deformasyon sertleşmesine uğrar. Tel yüzeyi birde sürtünmeden dolayı ısınmaya maruz kalarak tavllanır ve yumuşama meydana gelebilir. Deformasyon sertleşmesine uğrayan yüzey aşırı miktarda sertleştiğinde, ayrıca sert ve kırılabilir yüzey çatlamaya ve dağılmaya başlar. Bu olay yüzey deformasyonu aşınması olarak adlandırılır ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir [16]. Çoğu aşınma prosesinde kazındığından dolayı malzemenin en fazla deforme olan kısmı yüzeydir [18].



Şekil 3.6. Tel yüzeyinde deformasyon aşınması izleri [16].

3.1.4. Adezif aşınma

Adezif proseslerde, temas halindeki iki yüzey arasındaki yapışmanın bir sonucu olarak aşınma meydana gelir [21]. Bir başka deyişle; iki katı cisim direkt olarak temas haline getirildiğinde, mikroskobik seviyede onların yüzey pürüzlülükleri birbirine yapışır. Birbiri üzerinde kayan iki katı cisim arasında yüzey pürüzlülükleri yapışması devam eder ve sonra bu yapışkan bağlar kopar. Çoğu kez, iki malzeme arasındaki ara yüzeydeki bağlar tamamen kopmaz ve onun yerine bazen daha yumuşak malzemenin bir parçası kesilmek suretiyle aşınma partikülleri oluşmaktadır. Aşırı adezif aşınma birçok özelliklerinden dolayı ayırt edilmektedir. Şekil 3.7'de adezif aşınmanın bir örneği gösterilmektedir.

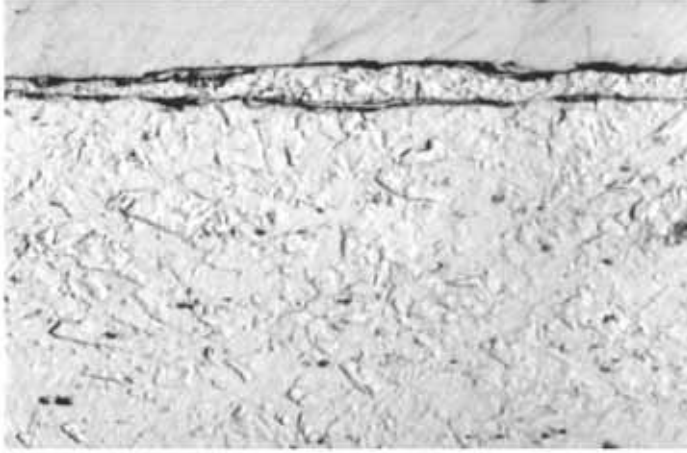


Şekil 3.7. Bakır tel yüzeyinde oluşmuş adezif aşınma görüntüsü [16].

Kalıpların kontrolü adezif aşınmayı ayırt etmek için en iyi metot olabilir. Yüksek basınç ve zayıf yağlama gibi olağanüstü durumlarda sürtünmeden kaynaklanan bozulmalar meydana gelir ve yumuşak malzemenin büyük bir kısmı kalıp yüzeyine yapışıp kalır. Tel-kalıp ara yüzeyinde adezif aşınma meydana gelirken, aynı zamanda tel-çekim kasmağı veya tel-tel temas noktalarında da meydana gelir.

3.1.5. Delaminasyon aşınması

Delaminasyon aşınmasında Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, yüzey altı çatlakları çekirdeklenir ve yüzeye paralel ilerler.



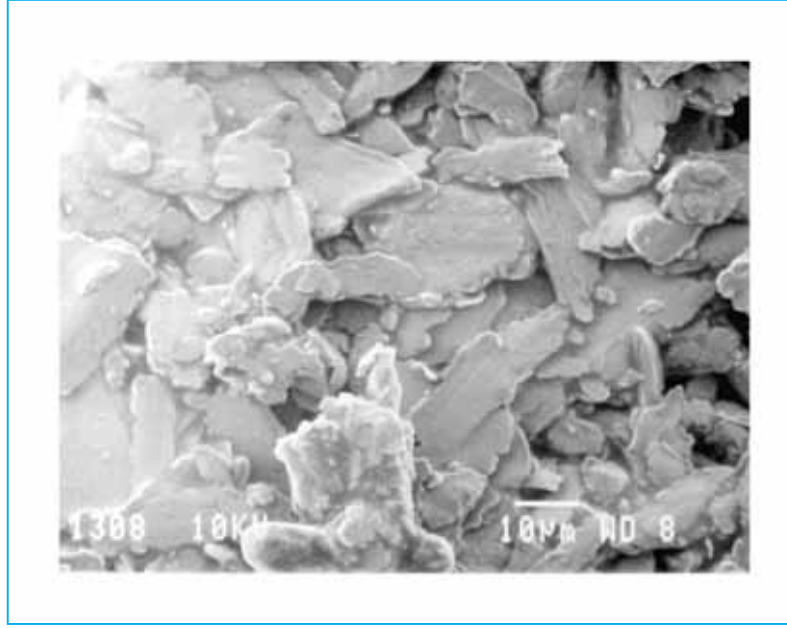
Şekil 3.8. Delaminasyon aşınması nedeniyle ortaya çıkan yüzeyin altındaki çizgisel çatlaklar[16].

Çatlaklar yaklaşık olarak yüzeyden 10 mikron derinlikte meydana gelir. Bu bölgede çekme gerilmesi en yüksek değerdedir ve dış yüzeye diktir. Tipik bir deforme edilmiş tabaka Şekil 3.8'de görülebilir. Sonuçta, hızlanmış deformasyon ile birlikte çatlak büyümesi en üst tabakanın telden ayrılmasına yol açar. Şekil 3.9'da delaminasyon sonucu ortaya çıkan tozlar görülmektedir.



Şekil 3.9. Tel yüzeyine yapışmış delaminasyon sonucu oluşan toz görüntüsü [16].

Nihai tozlar genellikle kalın ve pul şeklinde parçacıklardır. Şekil 3.10'da tipik delaminasyon tozları görülmektedir. Toz oluşturan tüm diğer toz oluşum mekanizmalarının aksine delaminasyon aşınması tamamen ortadan kaldırılabılır (özellikle de çekirdeklenme bölgelerinde bakır oksit inklüzyonları olması durumunda). Delaminasyon aşınması sonucunda oluşan tozlar, diğer mekanizmalarla oluşan tozlara kıyasla daha büyük partiküller halindedir. Bu iri partiküller daha kolay filtre edilebilir boyutlarda olduğundan tel çekme problemleri üzerinde ikincil bir etkiye sahip olacaktır. Çekilmiş sert tellerin küçük bir çapta bükülmesi delaminasyona uğramış partiküllerin oluşumunu arttıracaktır. Buna ilaveten, bu tozların deformasyon sertleşmesi meydana gelmiş malzemede oluşması daha olasıdır.



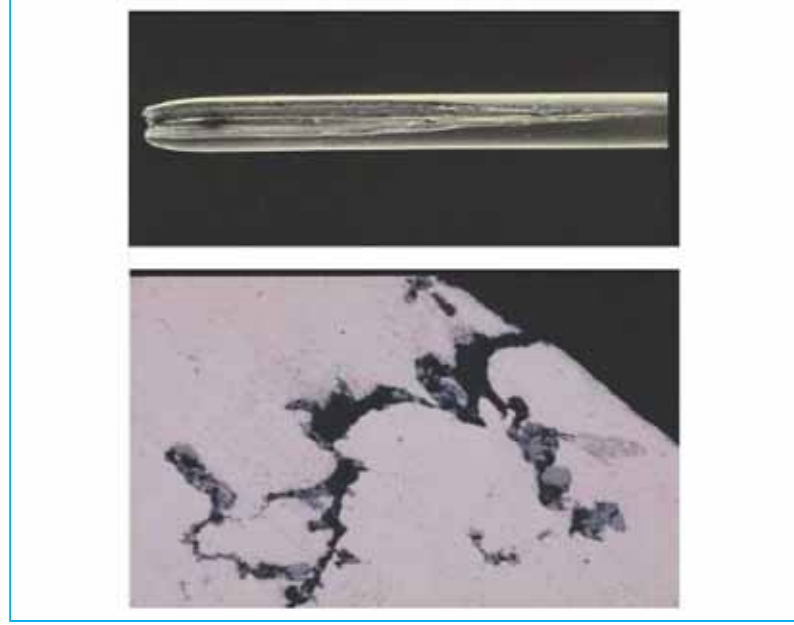
Şekil 3.10. Delaminasyon aşınması nedeniyle ortaya çıkan pul şeklindeki tozların SEM görüntüsü[16].

3.1.6. Filmaşın yüzey kalitesi (Oksitler)

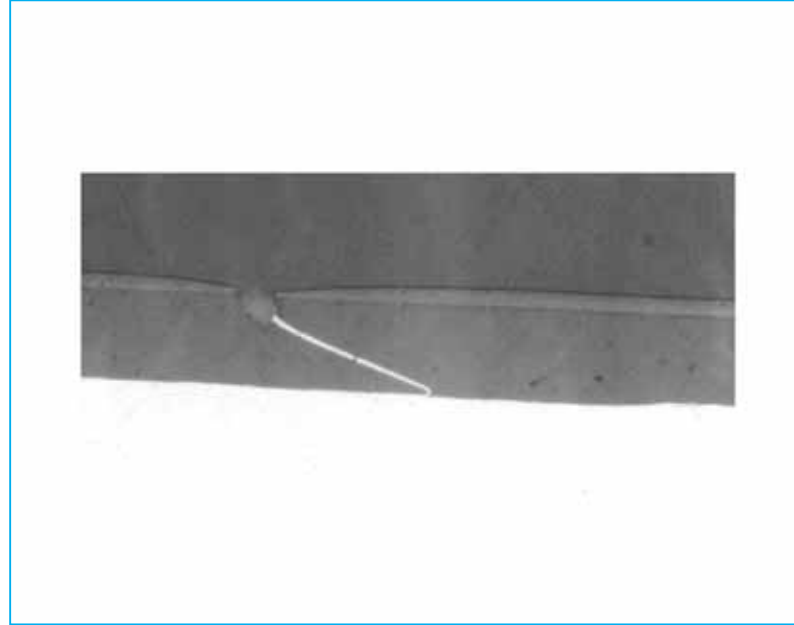
Tel çekimine giren filmaşınların kalitesi (yüzey oksit filmlerinin kalınlığı gibi), oluşan tozlar üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Sıcak haddeleme işleminden elde edilen filmaşının üzerinde bir de kalıntı tozlar olabilir. Tüm bu partiküller tel kalıbının girişini tıkar veya üç elemanlı abrasif aşınma partikülü gibi davranır. Tozlar hem yüzey altı oksitlerden hem de bu oksitlerle tel yüzeyi arasındaki alkol ile redüklenmiş olan bakır tabakasından kaynaklanabilir. Döküm barasında sıcak yırtılma meydana geldiğinde veya tabaka kaldırılmadan önce çukur-tümsekler oluşursa yüzey altı oksitleri oluşabilir. Çıkıntı ve çukurlara neden olan hadde rölelerinin yanlış dizilimi söz konusu olduğunda benzer problemler meydana gelebilir. Şu dikkate alınmalıdır ki bu filmaşın yüzeyi ve yüzey altı oksitleri ilaveten toz oluşumunu hızlandırarak tel çekme prosesini olumsuz bir şekilde etkileyebilir. Bütün bu hasarlar, yeni bir yöntem olan "Fines Potential Test" olarak bilinen "Filmaşın ve Tel Yüzeyinden Tozların Ultrasonik Biriktirilmesi" yöntemiyle kantitatif olarak tahmin edilebilir.

3.1.7. Tel çekme ve filmaşın kaynaklı kıymıklar

Kıymıklar genellikle çok uzundur fakat çekilmiş tel yüzeyinden soyulan ince metalin parçalarıdır. Bunların nedeni; kalıntı oksitler, mekanik hasarlar, çekme kalıbı ile tel arasındaki yanlış dizilim veya zayıf yağlama olabilir. Bazen tel çekme veya filmaşın yüzeyinden kaynaklanan hataların ayırt edilmesi zor olabilir. Filmaşın kaynaklı kıymıklar genelde gömülü oksitlerle birlikte aynı kaynaktan çıktığı için, telin yatay kesitinin metalografik olarak incelenmesi bu hataların kaynağının tam olarak tespit edilmesinin kesin bir yoludur. Diğer taraftan, tel çekme kaynaklı kıymıklar tel çekme problemlerinden dolayı olduğu için gömülmüş olan oksitler genellikle kaynaktan görünmezler. Şekil 3.11A ve 3.11B'de sırasıyla filmaşın ve tel çekme kaynaklı kıymıklar gösterilmektedir [16].



Şekil 3.11.A. Yüzeğe gömülü oksitler nedeniyle kıymık etrafında oluşan çatlaklar [16].



Şekil 3.11.B. Tel çekme esnasında emaye kaplı tel üzerinde oluşan kıymıklar. 240 büyütmede oksitler görünmemektedir [16].

Şekil 3.11. Tel çekme esnasında tel üzerinde oluşan kıymıklar [16].

3.1.8. Kimyasal bileşenler

Bir katı yüzeyle birlikte çalışan sıvının aşınmaya sebep olması durumunda meydana gelen aşınma genellikle erozyon veya erozif aşınma olarak adlandırılır [21]. Bakır tel ve tel çekme emülsiyonu arasındaki etkileşimler tel çekme makinesinde organik bakır çamuru oluşumuna neden olabilir. Bu bileşenler metalik veya oksit pul şeklindeki parçacıklardan çok daha yumuşaktır ve Şekil 3.12'de görüldüğü gibi neredeyse küreseldir.



Şekil 3.12. Tel çekme yağlayıcı ile bakır tel arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşan sabunumsu bakır çamur [16].

Bakır ve sülfirik asit dekapaj çözeltisi etkileşimi yüzünden asitli dekapaj işlemine maruz kalmış olan filmaşın kullanıldığında ilave bileşenler oluşur [16].

3.2. Tel Çekme İşlemi Esnasında Oluşan Tozların Oluşumunu Hızlandıran Faktörler

Bu bölümde kısaca önceki bölümlerde açıklanan toz oluşum mekanizmalarının tümünü hızlandıran ve kötüleştiren birçok faktör açıklanacaktır. Altı ana unsur ve onların özellikleri şöyledir.

3.2.1. Kullanılan yağlayıcı

Kalıplara uygun yağlayıcı kullanılmadığı takdirde, toz oluşumu artabilir. Hem teli hem de tel çekme kalıbını koruduğu için yüksek hızlı hidrodinamik yağlama tercih edilmektedir ve elbette ki pratikte % 100 yağlama sağlanamaz. Başlıca yağlama problemleri tıkanmış nozüller veya tıkanmış kalıp girişinden oluşur. Birde aşırı çekme sıcaklığı veya aşırı toz nedeniyle yağlayıcı bozulabilir. İnce tozların hacmi yağlayıcıya daha geniş yüzey alanı sağlayabilir, bu amaçla koruyucu bir biçimde tel yüzeyine yapışan yağ moleküllerinin oluşumunu sağlayacak yağlar geliştirilmiştir.

3.2.2. Filtreleme

Pratikte tel çekme emülsiyonundan tozların olabildiğince verimli bir şekilde filtre edilmesi gereklidir. Yukarıda belirtildiği gibi, yağlayıcı içerisinde kalan tozlar nozülleri ve kalıp girişlerini tıkayarak üç elemanlı abrasif aşınmaya neden olabilir.

3.2.3. Tel çekme sıcaklığı

Yüksek çekim sıcaklıkları aşağıdaki sebeplerden ötürü toz oluşumunu artırma eğilimindedir.

- Tel yüzeyinin sertliği azalmaktadır.
- Yağlayıcının etkinliği azalmaktadır.
- Tozlar içerisindeki abrasif oksitlerin oranının artması üç elemanlı abrasif aşınmanın artmasına yol açar.

d) Muhtemelen hidrodinamik yağlayıcı film kalınlığı azalarak yağlayıcının viskozitesi değişmektedir.

Redüksiyon ve kalıp açısı arttığında çekme kuvveti de artmaktadır [23]. Kalıp açısının toz oluşumu üzerinde büyük bir etkisi olduğuna göre, en az toz oluşumu için optimum bir kalıp açısı vardır. Kalıp açısının yüksek olması durumunda, yüzey temas alanı ve kayma mesafesi az olmasına rağmen tel-kalıp ara yüzeyinde yüksek bir basınç vardır. Diğer taraftan, düşük kalıp açılarında kalıp basıncını düşürerek ve temas alanı ile kayma mesafesini arttırarak durum tam tersidir [16]. Sürtünme katsayısı da çekme kuvveti üzerinde bir etkiye sahiptir. Maksimum eşdeğer gerilme, kalıp açısı değeriyle birlikte önemli miktarda artar. Gerilimin artışının etkisi kesitte özellikle de tel-kalıp ara yüzeyinde telin hasarına yol açarak deformasyonu daha düzensiz hale getirir [23].

3.2.3.1. Tel çekme sıcaklığının yağlayıcı üzerindeki etkisi

3.2.3.1.1. Yağlama mekanizması

Yağlayıcı, kalıp/tel ara yüzeyindeki aşınmayı azaltmak, böylece yüzeydeki yırtılmaları ve olası tel çatlaklarını engellemek için kullanılmaktadır. Yağlayıcı birde kalıp aşınmalarının azalmasına katkı sağlar. Tüm bu olayların birleşimi üretim hattının devreden çıkma süresini azaltır ve ekonomik yararlar sağlar. Yağlama mekanizması telin yüzeyinde gelişen olaylar üzerinde direkt bir etkiye sahiptir. Yüzey koşulları, emayeli teller (örneğin elektrik motoru ve miknatıslı bobin üretiminde kullanılan teller) üzerinde kritik bir öneme sahiptir. Aslında, emayeli teldeki başlıca unsur izolasyon malzemesi olarak tel yüzeyine uygulanan emaye kaplamanın tel yüzeyi ile tam olarak birleşmesidir.

Pratik ve analitik açıdan bakılırsa, çekim işlemi boyunca kalıp ile tel arasındaki etkileşimin üç düzeni vardır. Kalın film yağlama rejimi olarak bilinen durum, kalıp duvarları ve tel arasında oluşan kalın bir yağlayıcı tabakası oluşumudur. Bu yağlama usulü telin gres yağı veya sabunumsu bir yağ gibi katı bir yağlayıcı ile kaplanmasıdır.

Genellikle, tel çekimi deyince akla toz oluşumu ve onların yağlayıcı sistemi içerisinde dolaşımı gelmektedir. Tozlar sıcaklığı aşırı derecede arttırarak tel yüzeyindeki lokal zayıf bölgelere yol açarak ve olası kopmalara yol açarak, sürtünmenin etkilerini arttırır.

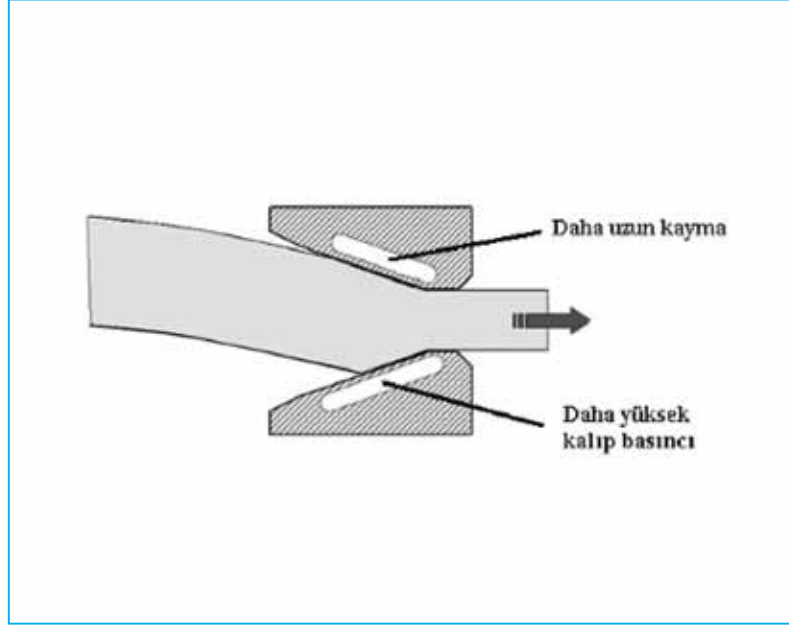
3.2.3.1.2. Sıcaklığın yağlama mekanizması üzerindeki etkisi

Sıcaklığın yağlayıcı ve yağlama mekanizması üzerinde başlıca iki etkisi vardır. İlk etki artan sıcaklıkla viskozitenin azalmasıdır. Normal olarak hidrodinamik yağlamanın etkin olduğu durumda yüksek sıcaklık, kalın filminden sınır koşuluna dönüşüme katkıda bulunabilir. Bakır tel çekiminde, bu durumun pek bir önemi yoktur, fakat tel ve kalıp arasındaki yapışma/kayma olayını etkileyen viskozitenin etkili bir yağlamayı sağlayamadığı dereceye kadar düşüşü önemlidir. Daha da önemlisi sıcaklığın yağlayıcının kararlılığı üzerindeki etkisidir. Oluşan tozlar ve tel malzemesi arasındaki olası reaksiyonlar, sürtünme nedeniyle oluşan yüksek sıcaklıklar ve oksidasyon yoluyla yağlayıcının kimyasal bozunmasını hızlandırabilir[19].

3.2.4. Kalıntı gerilmeler

Birçok faktörden dolayı tipik tel çekme prosesi boyunca telde kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Kalıntı gerilim tel çevresinde homojen olarak oluşursa bunun etkisi ihmal edilebilir. Homojen kalıntı gerilimin bir kaynağı da, tel çekme boyunca yüzeyin ısınması ve bir sonraki kalıba girmeden önce soğumasıdır. Diğer taraftan, çoğu kez tel içerisinde oluşan ve toz oluşumunu hızlandıran kalıntı gerilmeler homojen değildir. Bu gerilmeler telin çekme ekseninden kaymasına ve asimetrik çekime neden olabilirler. Böyle bir telin gerçek görüntüsü Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Asimetrik çekim telin çevresindeki herhangi bir noktada kalıp tasarımı

yapılırken tahmin edilenden çok büyük basınçlara neden olur. Şekil 3.13'te telin üst kısmı daha uzun kalıpla temas mesafesine sahiptir ve böylece bu kayma mesafesinin artışıyla toz oluşumu artar. Diğer taraftan, telin alt kısmı toz oluşumunun artmasına yol açacak olan büyük basınçlara neden olabilir.



Şekil 3.13. Asimetrik tel çekiminin kalıbın bir bölümünde daha uzun kayma mesafesi diğer bölümünde ise daha yüksek kalıp basıncına yol açmasının şematik gösterimi [16].

Tel ile kalıp arasındaki yanlış dizilim (eksen kaçıklığı) toz oluşumunun artmasına yol açabilir. Maalesef, çoğu zaman iki nedenden ötürü kalıbı mükemmel bir şekilde hizalamak mümkün değildir. İlki, koni tipindeki makinelerin kalıbı tel çekim kasmağı ile doğru düzgün temasa olanak tanımak için telin yönünü biraz değiştirir. Sonuç olarak, telin girişi veya kalıp çıkışı kalıp eksenine aynı açıda olmalıdır. İkinci neden ise, kalıntı gerilimler telin kalıp ekseninden kaymasına yol açabilir.

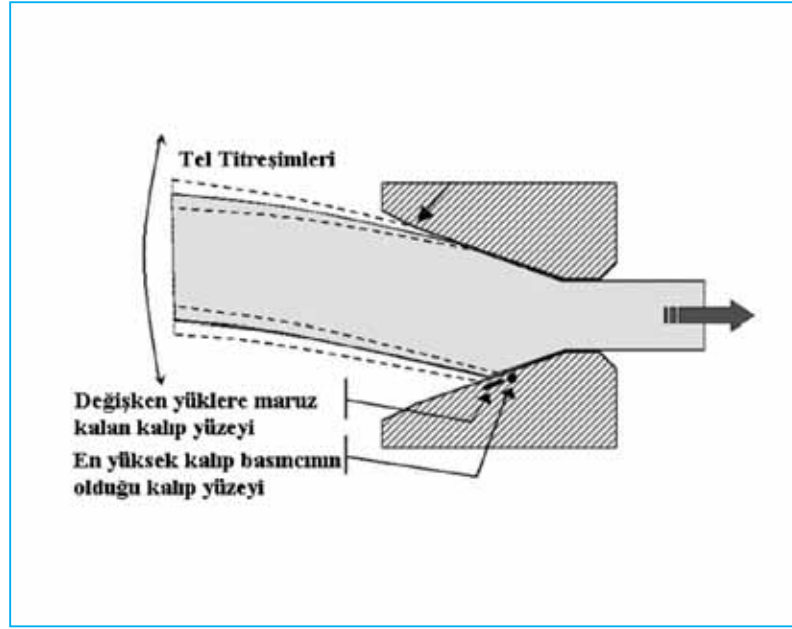
3.2.5. Tel titreşimleri

Teller tipik olarak çekim kasmağı ile kalıp arasında desteklenmezler ve teller makine titreşimleri, çarpan yağlayıcı ve kayma titreşimleri nedeniyle aşırı bir şekilde titreşirler. Diğer kalınlıktaki tellerin çekimi ile kıyaslandığında ince tel çekimi esnasında teller kasmaklara ve kalıba hiç çarpmadıkları için titreşimler zararsız kabul edilir. Tel titreşimleri kalıp yüzeyi yakınlarında teldeki salınımlara yol açarak ve aşağıdaki üç probleme neden olabilirler.

a) Hidrodinamik yağlayıcının bozulması: Daha öncede bahsedildiği gibi, sıvı yağlayıcı ile yapılan yüksek hızlı tel çekimlerinde mümkün olduğunca en kalın hidrodinamik yağlayıcı kullanılması uygundur. Fakat bu yağlayıcı film kırılmalıdır ve yalnızca sabit sıvı akışında çok kararlıdır. Telin titreşimleri hidrodinamik prosesi rahatsız eder ve yağlayıcı filmin tam işlevini yerine getirmesini engeller.

b) Kalıp bölgelerinin yorulmaya maruz kalması: Şekil 3.14'te gösterildiği gibi tel titreşimleri kalıp bölgelerini çevrimsel yükler altına sokarak kalıp aşınmasını hızlandırır. Titreşimler redüksiyon bölgesindeki aşınmış bölgelerin yerini değiştirir ve daha geniş bir aşınma yüzüğü oluşturur. Temel yorulma teorisinde, çevrimsel yükler altındaki malzemeler taşıyabileceklerinden çok daha az uygulanan yükler altında hasara uğrarlar.

c) Çok daha yüksek basınç oluşumu: Telin kalıp ile birlikte titreşmesi Şekil 3.14'te görüldüğü gibi maksimum kalıp basıncını artırır ve böylece kalıp aşınması artar. Bazen, Şekil 3.15'te görüldüğü gibi tel yüzeylerinde titreşimden kaynaklanan çapraz çizik izleri görülür. Kalıp çıkışındaki tel titreşimleri kalıp aşınması veya yağlayıcı film üzerinde önemli bir etkiye sahip olmayabilir. Fakat, kalıp çıkışında tel yüzeyinde oluşan izler bir sonraki kalıpta toz oluşumunu arttıracaktır.



Şekil 3.14. Kalıpla birlikte titreşen telin şematik görünümü [16]



Şekil 3.15. Kalıptan çıkan telin titreşimiyle tel yüzeyinde oluşan çapraz çizik izleri [16]

3.2.6. Tel-tel teması

Özellikle koni tip tel çekim makinelerinde tel-tel teması yaygındır. Tellerin birbirine çarparak farklı yönlerde hareket etmesi toz miktarını artırır. Çapraz dolanma teması çok şiddetli olursa burulmayla ilgili kopmalar, dolaşmalar (bükülmeler) veya burulma olasılığı artar. Yetersiz germe kuvveti veya yanlış dizilim yüzünden çapraz dolanma eğilimi artmaktadır [16].

3.3. Filmaşine Uygulanan Burma Testi Esnasında Oluşan Tozlar

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi tozlanma problemi sadece tel çekme esnasında ortaya çıkmamaktadır. Tel çekme esnasında oluşan tozlanma probleminden başka birde filmaşine uygulanan burma testi esnasında filmaşin yüzeyinde oluşan tozlar vardır. Bu tozlar tel üretiminin ileriki safhaları olan çekim işlemi esnasında meydana gelen tozlanma probleminin de artmasına neden olmaktadır.

3.3.1. Filmaşindeki tozlanma problemini etkileyen faktörler

3.3.1.1. Fırın şarjı:

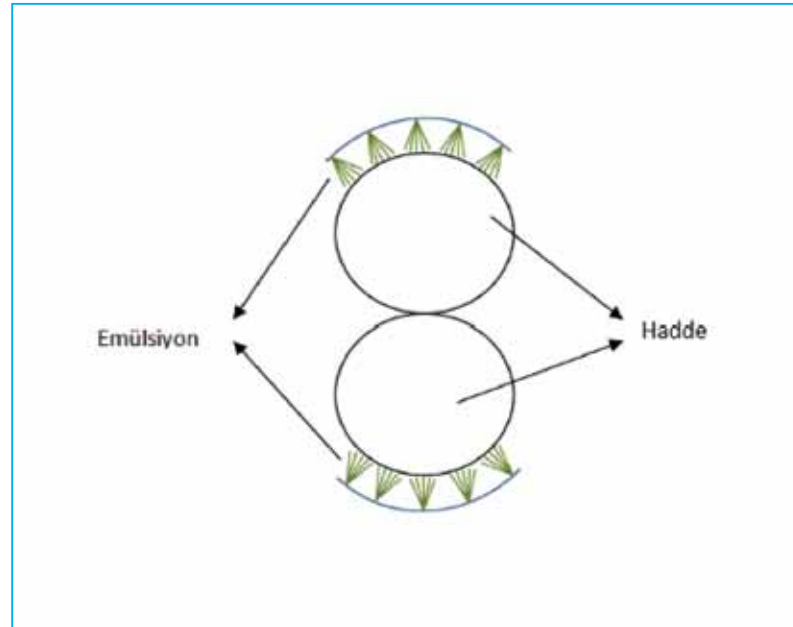
- Katot yüzeyi temiz olmalı
- Elektroliz işleminden gelen asit çözeltisi ve elektrolit kalıntıları bulunmamalı
- Empürite değerleri özellikle de S ve H limitler dahilinde olmalı
- Cüruf oluşturma eğilimi az olmalı
- Oksijen miktarı arttıkça bakırın sertliği ve gevrekliği artar

3.3.1.2. Döküm şartları:

Döküm hızı arttıkça baranın haddeye girene kadar atmosfere maruz kalacağı süre azalır. Döküm hızı döküm makinesi çıkışında baranın sıcaklığı düşükse ($<1025^{\circ}$) yükseltilir veya bara yapısının düzgün olması durumunda yükseltilir. Döküm barasının kesiti arttıkça tozlanma miktarı düşmektedir. Bu durum ileriki bölümlerde açıklanacaktır.

3.3.1.3. Haddeleme

Hadde istasyonlarında karşılıklı iki hadde rölesi arasında belirli oranda boşluk bırakılır. Buna "GAP boşluğu" denir. GAP boşluğu artarsa ezim (haddeleme) oranı azalır. GAP boşluğu az olursa hadde yüzeylerinde tufal birikmesi meydana gelir. Hadde işlemi esnasında hadde yüzeylerine emülsiyon püskürten sistemin şematik görünümü Şekil 3.16'da gösterilmektedir.

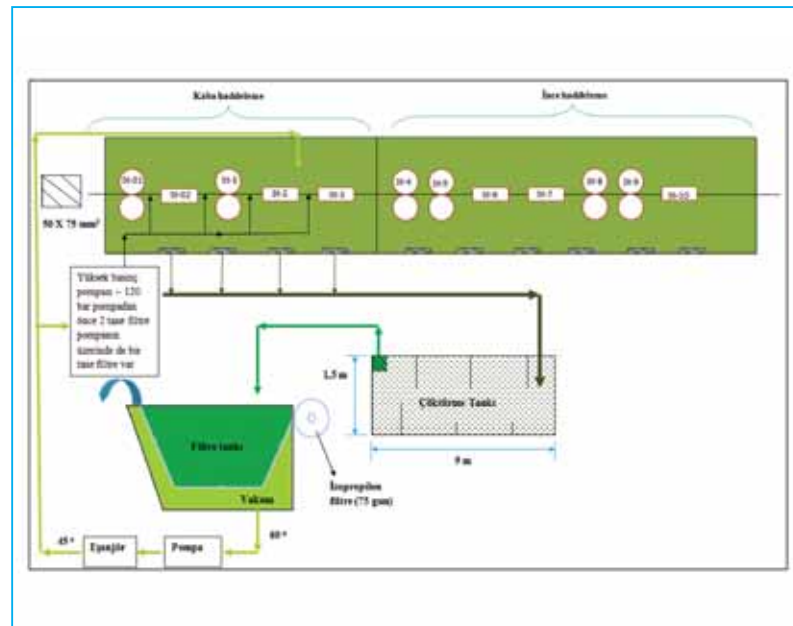


Şekil 3.16. Haddeme işlemi esnasında hadde yüzeylerinin emülsiyon ile temizlenmesinin şematik görünümü

3.3.1.4. Emülsiyon

Her bir hadde rölesinin etrafında hadde yüzeylerini soğutan, temizleyen, bara ile arasındaki sürtünmeyi azaltan emülsiyon nozülleri (12 x 2 = 24 adet emülsiyon manifoldu) bulunur. Hadde emülsiyon sisteminin şematik bir gösterimi Şekil 3.17'de görülmektedir.

St-01/02, St-02/1, St-1/2 ve St-2/3 arasında ezim (haddeme) yönüne dik eksende açığa çıkan (parçalanmış) bakır oksit yüksek basınçlı emülsiyon püskürtülerek (~ 120 bar) temizlenir.

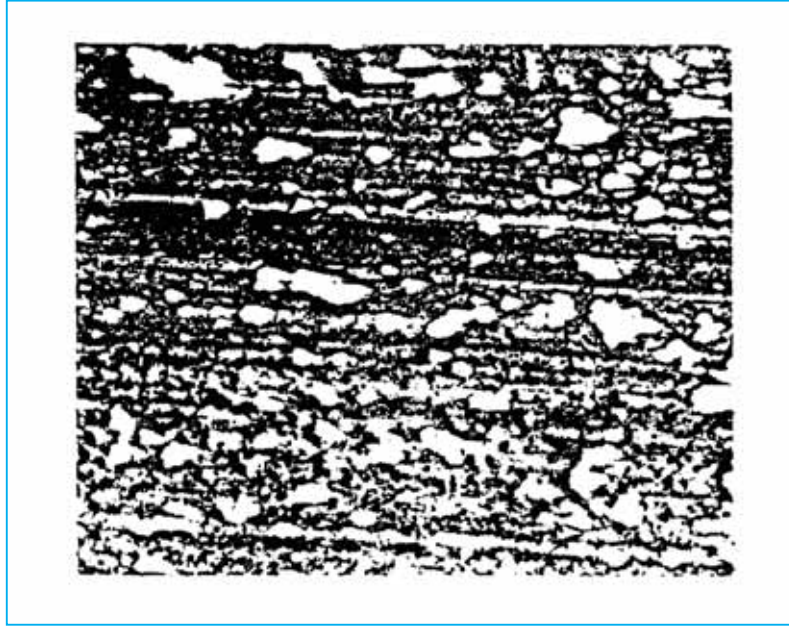


Şekil 3.17. Hadde-Emülsiyon sisteminin şematik gösterimi

3.3.1.5. Dekapaj

8 mm çapındaki filmaşinin hem soğutulup hem de yüzeyinin temizlenmesi işlemidir[24]. Asidik olmayan dekapaj sistemleri, filmaşinin yüzeyine gömülmüş olan parçacıkları ayırarak yalnızca tabakanın yüzeyini azaltabilir. Asidik dekapaj sistemleri de aynı şekilde tüm tabakayı kaldırmak için gerekli zamana sahip değildir, üçüncü bir dekapaj seçeneği olarak diğer dekapaj yöntemlerinin başardıklarından daha büyük bir tabakanın kaldırılması mümkündür ancak, çevresel konularda masraflıdır. Bu yüzden en iyi çözüm haddeleme esnasında tabakanın tamamen kaldırılmasıdır [17].

Dekapaj işlemi önemli bir bakır ve bakır oksit tozu kaynağıdır. Sıcak haddelenmiş filmaşin üzerindeki oksit tabakası çoğunlukla kuprittir (Cu_2O). Sülfürik asitte dekapaj, bakırın filmaşinin üzerinde biriken bir toz haline gelmesini sağlar. Bu, tozlanmanın tek kaynağı değildir ayrıca kayan çekim kasnağı da bunun sebeplerinden biridir. Emülsiyon bir sınır tabakası halinde yağlayıcı film oluşturarak sürtünmeyi azaltır. Bu özellikle çekme kalıbındaki mikro boşluk bölgelerindeki yerel metal-metal temasını engellemek için yeterli değildir ve bu bakırın ufacık parçacıklar haline gelmesine neden olur. Şekil 3.18'de kalıp üzerine yapışmış tozlar görülmektedir.



Şekil 3.18. Kalıp yüzeyine yapışmış olan tozlar [24]

Bazı çalışmalar göstermiştir ki dekapaj çözeltisindeki ultrasonik titreşim filmaşin üzerine yapışan bakır tozunu önlemektedir. Dekapajdan hemen sonra yıkama tankında bu titreşimlerin benzer enerji seviyelerinin bir süreliğine uygulanması, tozların yüzeye yapışmasının önlenmesinde eşit düzeyde etkilidir ve muhtemelen daha ekonomiktir [24].

3.3.2. Filmaşinin yüzey kalitesi

3.3.2.1. Yüzey kalitesi testi

Burma testi 8 mm çapındaki filmaşini 10 kez ileri sonra durarak tekrar 10 kez geriye döndürülmesi işlemidir. Geleneksel sıcak haddeleme sistemlerindeki haddelerin ayarlanmasında, hadde operatörlerinin işini kolaylaştırmak amacıyla burma testi yıllardır uygulanmaktadır. Burma testi ile ilgili parametre detayları Tablo 3.1'de verilmektedir.

Parametre	Tavsiye edilen değer
Numune uzunluğu	10 inç (254 mm)
Boy / ap oranı	32 (en az)
Eksenel yuk	Gerek yok
Gerilme hızı	0,6 (en fazla) (20 devir/dakika)
Yüzey gerilimi	10 ileri x 10 geri

Tablo 3.1. Burma testi için tavsiye edilen parametreler [25]

Burma testi uygulanmış olan filmaşın yüzeyindeki çok miktarda toz veya partiküllerin varlığı, temizleme işleminden sonra filmaşında aşırı bakır oksit olduğunu göstermektedir [25].

3.3.2.1.1. Tozlanma testi ölüm metotları

Bakır filmaşın üzerindeki tozlanmayı tespit etmek için standart bir prosedür yoktur. Bakır filmaşın üzerindeki tozlanma burma testi sonrası daha belirgin olur. Yüzeydeki tozlanmanın miktarını tespit etmek için aşağıdaki 4 metot uygulanmaktadır.

- Bant metodu
- Filmaşın yüzeyinin kuru fırçalanması
- Asit testi metodu
- Tozların ultrasonik biriktirilmesi

a) Bant metodu

Bant metodu bazı filmaşın üreticileri tarafından tozlanmanın miktarını tespit etmek için uygulanmaktadır. Bu metotta ilk önce filmaşın burma testine tabi tutulur ve ardından uzunluğu ve ağırlığı bilinen lsko bandı ile sıkı bir şekilde filmaşın üzerine sarılır. Filmaşın yüzeyinden düşen bakır ve bakır oksit partikülleri banda yapışır. Bant dikkatli bir biçimde sklr ve tekrar tartılır. Bandın ağırlığındaki fark mg cinsinden tozlanma miktarını verir.

b) Filmaşın yüzeyinin kuru fırçalanması

Burma testinden sonra filmaşın yüzeyinin fırçalanması çoğu oksidin ve bakır tozlarının yüzeyden uzaklaştırmasını sağlayabilir. Tüm tozun yüzeyden kaldırılması işlemi kuru bir fırça ile yaklaşık olarak 2 ya da 3 dakika sürebilir. Filmaşının twist testinden önceki ve sonraki ağırlıkları arasındaki fark bize tozlanma miktarını verir.

c) Asit testi metodu

Hidroklorik asidin Cu_2O ve CuO 'yu zndrdğ fakat bakırı zndrmediği bilinmektedir. Yapılan testler sonucu filmaşının 5 dakika boyunca %50 HCl zeltisine maruz bırakılması oksitlerin büyük bir kısmını zmek için yeterlidir. Yüzeyin hafif bir şekilde fırçalanması bakır tozu partiküllerinin yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar.

Burma testi öncesi ve burma testi sonrası uygulanan asit muamelesinden sonraki ağırlıktaki değişim bize filmaşının tozlanma miktarını verir.

Hem filmaşın yüzeyinin fırçalanması metodu hem de asit testi metodu, numunenin test öncesi ve sonrası ağırlık miktarının hatasız olarak llmesine bağlıdır. Burma testi esnasında filmaşının burma kuvveti etkisi ile bağlı olduğu çeneler numune yüzeyinden apak şeklinde talaş kaldırabilir ve dolayısıyla ağırlık ölümlerinin doğru yapılamamasına neden olur. Bu durumu engellemek amacıyla filmaşının her iki ucuna da bant yapıştırılarak, talaş kaldırılması önlenebilir [25].

d) Tozların ultrasonik biriktirilmesi

Yüzey oksiti ile toz potansiyeli arasında bir ilişki olduğu kanıtlandığından dolayı, her kangaldan en azından bir numune alınarak oksit film kalınlıkları tespit edilmelidir.

Test için yaklaşık olarak 3 ila 6 arasında numune alınmalı ve olabildiğince doğru bir biçimde test yapılmalıdır. Ultrasonik temizleyici bir aparat kullanılarak 3 numune birden 10 dakika boyunca ultrasonik olarak temizlenmektedir. Bir cam kap n-metil piroolidin (NMP) ile doldurulmaktadır. Bu cam kap, sabunumsu bir su çözeltisi ile dolu olan ve içerisine ultrasonik titreşimlerin iletildiği 2 inç iç çapına sahip olan bir çelik boruya yerleştirilir. Cam kap borunun en tepesindeki bir contaya oturtulur. Daha iyi bir hassasiyet için, diğer hazırlanan üç numune de cam kabın içine asılabilir ve 10 dakika boyunca ultrasonik olarak temizlenebilir. NMP çözeltisi her dokuz numune temizlendikten sonra değiştirilmelidir.

8 mm'lik filmaşın test edilecek ise 10 inç uzunluğundaki her bir numune 10x10 burma testine tabi tutulur. Bu işlem filmaşın yüzeyindeki tozların yüzeyden ayrılarak serbest kalmasını sağlar. Filmaşın yüzeyinin her hangi bir yere temas etmemesi ve tozların transferiyle sonuçların sapmaması için bir ayaklığa ihtiyaç vardır.

İkinci adımda anlatıldığı gibi bir prosedür uygulanarak fakat yeni bir NMP çözeltisi ile filmaşın yüzeyinden tozlar toplanır. Bir grup (üç veya altı tane) burulmuş numunenin 10 dakika boyunca ultrasonik olarak temizlik işleminden sonra numuneler temizlenir ve kuruması için bir standı asılır. Bir mikron gözenek boyutuna sahip filtre içeren darası alınmış bir cam tutucu cam kabın üzerine vidalanır. Bir vakum pompası kullanılarak NMP çözeltisi filtreden geçirilir ve tozlar filtre üzerinde kalır. Tozların bulunduğu filtre yaklaşık olarak 65 °C'de kurutulur ve sabit bir ağırlık değeri elde edilene kadar ağırlığı ölçülür. Böylece filtrenin ağırlığındaki artış bize tozların ağırlığını verecektir.

3.3.2.2. Yüzey oksit tabakası kalınlığı ölçümünün önemi

Yüksek yüzey oksidi çoğunlukla zararlıdır. Bu zararlar aşağıda sıralandığı gibidir.

- Düşük çekilebilirlik (yağlayıcının yüzeye yapışmamasına ve daha az etkili yağlamaya yol açar.)
- Yağlayıcının bozulması. Yağlayıcıdaki asitler bakırla bağ yapamazsa, yağlayıcı içerisinde sabunumsu bir çamur oluşturan Cu_2O ile daha zayıf bir bağ yapar.
- Düşük yağlayıcılık ve daha fazla yüzey pürüzlülüğü sebebiyle kalıp aşınmasını hızlandırır.
- Tel ve döküm tekerleği arasındaki düzensiz temas titreşimlere yol açar.
- Nihai ürün olan telin lehmlenebilirliğini düşürür.
- Telin rengini etkiler. (parlak olmaz)
- Kaplamayı engeller
- Emaye veya bazı polimer kaplamaların bakıra yapışmasını engeller.

Yüzey oksitlerinin yararlı etkileri;

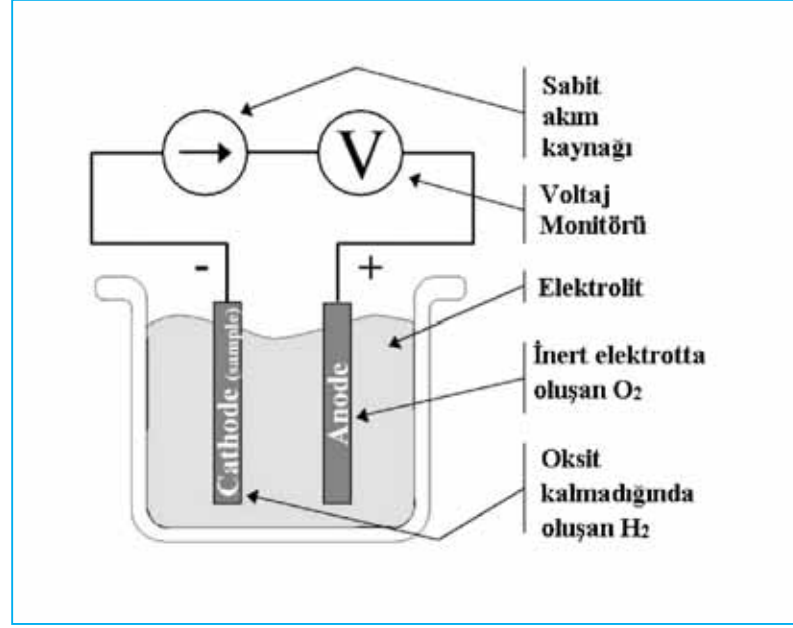
- Polietilen gibi bazı polimerlerle daha güçlü bağ yaparlar.
- Tavlama esnasında yapışkan tel oluşumunu engeller.

Yüksek yüzey oksidinin sebepleri;

- Filmaşın üretiminde oksitlerin etkisiz temizlenmesi
- Tel çekmede sıcaklığın yükselmesi
- Tavlama esnasında havayla veya suyla temas [26].

3.3.2.3. Filmaşın yüzeyindeki oksit tabakası kalınlığının ölçümü

Yük ölçümsel test yöntemi, test edilecek olan numunenin (-) katot ve bir inert metalin anot olduğu elektrolitik bir hücre gerektirir. Tipik bir test düzeneği Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Yüzeysel oksit kalınlığını ölçmek için kullanılan tipik bir yük ölçümsel azalma sisteminin şematik görünümü [27].

Anottan katoda doğru bir akım uygulanmaktadır ve voltaj ve zaman eğrilerini çizmek için bir grafik kaydedici kullanılmaktadır. Bu grafikte hem katot hem de bir referans anoduna veya anottan katoda düşen voltaj kayıt edilebilir. Bu bağıntıları gösteren eğriler Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

Genelde bakır filmaşın yüzeyindeki oksit tabakası, Cu_2O ve CuO oksitlerini içerir. Bu bileşenler farklı bir redüksiyon voltajı gerektirir ve en düşük voltaj gerektiren madde başlangıçta tüketilmektedir. Bu yüzden, çizilen grafik üzerinde farklı eğimler vardır. Tüm yüzey oksitleri tüketildiğinde, voltaj-zaman eğrisi üzerinde son bir eğim oluşur ve bu katot üzerinde gözle görülebilen hidrojen kabarcıklarının oluşumuyla eş zamanlı gerçekleşir. Her bileşeni redüklemek için gereken zamanı kullanarak ve Faraday Kanunu'na uygulayarak, her maddenin miktarını veya onun film tabakasının kalınlığı tespit edebiliriz. Oksit tabakası kalınlıklarının hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$T = \frac{I \cdot t \cdot M}{S \cdot d \cdot F \cdot n} \quad (3.1)$$

Burada;

T = oksit kalınlığı, cm;

I = akım, A;

t = reaksiyon süresi, s;

M = oksitlerin moleküler ağırlıkları, g;

S = filmaşın reaksiyona giren yüzey alanı, cm^2 ;

d = oksitlerin yoğunluğu (Cu_2O için 6.0 g/cm^3 ve CuO için 6.4 g/cm^3);

F = Faraday sabiti, 96 500 C; ve

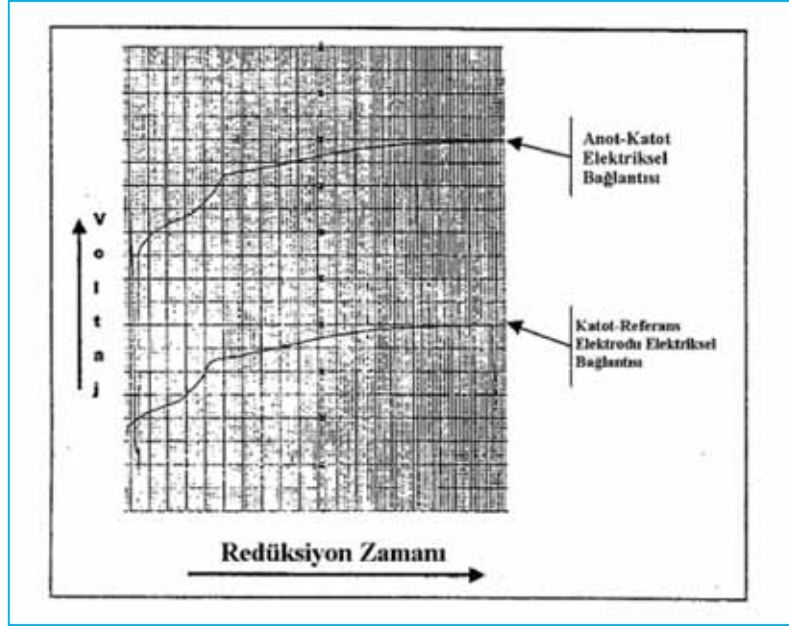
n = hidrojen eşdeğerliğidir.

Oksit kalınlıklarını hesaplamak için kullanılan formül sadeleştirildiğinde aşağıdaki formüller elde edilir.

$Cu_2O: 74,76.t/d$	(3.2)
--------------------	-------

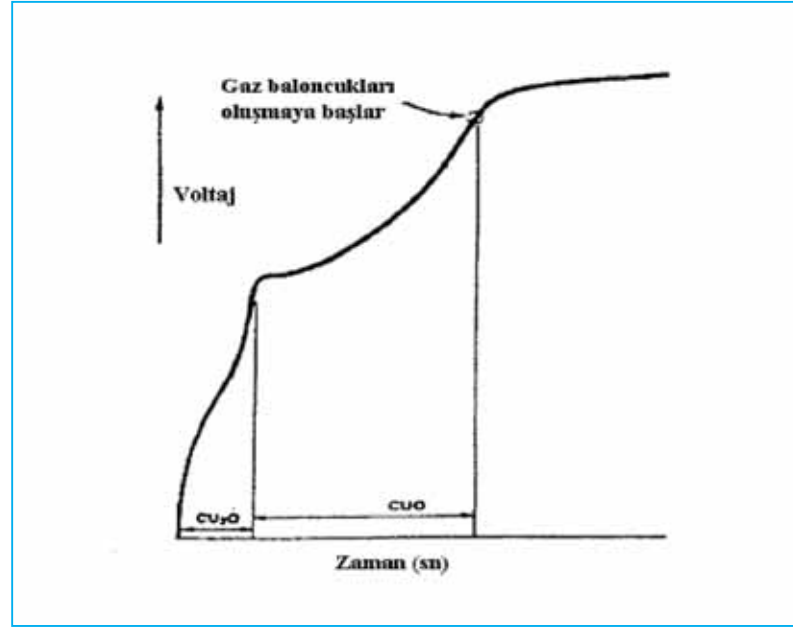
ve

$CuO: 38,76.t/d$	(3.3)
------------------	-------



Şekil 3.20. Anottan katoda ve katottan anoda düşen voltaj arasındaki bağıntıyı gösteren grafik[27]

Voltaj-zaman eğrilerinden Cu_2O ve CuO 'nun redüklenmesi için gereken zamanı belirlemek için kullanılan iki farklı metot Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Cu_2O ve CuO miktarlarını belirlemek için kullanılan grafik [27]

Orijinal olarak potasyum klorit kullanılmış olmasına rağmen, genellikle standart elektrolit çözeltisi olarak sodyum karbonat kullanılmıştır. Yapılan testler her iki çözeltinin de uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Elektrolitteki çözülmüş oksijen: Elektrolitteki çözülmüş oksijen katotta azaldığında, tüm test verimi azalmaktadır ve böylece yüksek yüzey oksidi değerlerinin olduğundan daha farklı ölçülmesine sebep olur. Sonuç olarak, düzenli olarak çözülmüş oksijen bulunmadığından emin olmak gerekir bunun içinde elektrolitin belirli periyotlarla değiştirilmesi gerekmektedir [27].

Yüzey oksit kalınlığı ölçümü esnasında oluşan reaksiyonların sırası konusunda literatürde bazı çelişkiler bulunmaktadır. Çoğu literatürde bahsedilene göre ilk redüklenen Cu_2O tabakasıdır. 2006 yılında yayımlanmış olan bir çalışmada literatürde bahsedilenin aksine ilk redüklenenin CuO tabakası olduğu iddia edilmektedir [28]. 2008 yılında yayımlanmış başka bir makalede de literatürdeki bahsedilenin aksine ilk redüklenenin CuO tabakası olduğu iddia edilmiştir [29].

3.3.2.4. Yüzey oksit kalınlığı ile filmaşindeki tozlanma arasındaki ilişki

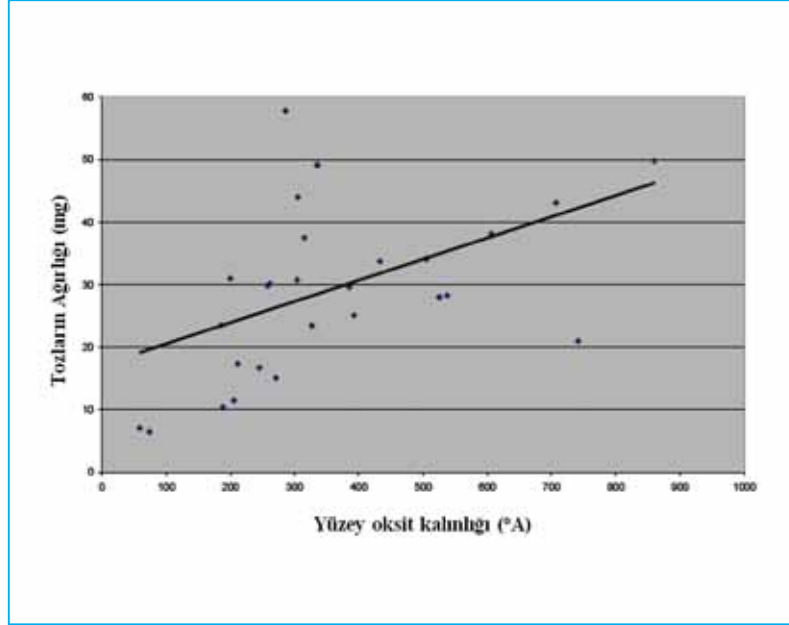
Yüzey oksit kalınlığı ile tozlanma miktarının ilişkisini direkt olarak belirlemek çok zordur. Fakat şunu varsaymak mümkündür ki oksit kalınlığındaki artışla birlikte tozlanma da artmaktadır.

Yüzey oksit kalınlığı elektrolitik azalma yöntemiyle belirlenebilmektedir. 10 inç uzunluğunda ve 5/16 inç çapındaki bir filmaşindeki oksit ağırlığı: $0,00396 \times A$, burada A angstrom cinsinden yüzey oksit kalınlığıdır ve bu tabakanın ortalama yoğunluğu $6,25 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Tozlanma ile oksit kalınlığı arasındaki ilişki aşağıdaki Tablo 3.2 'de verilmektedir [30].

Filmaşın	Oksit kalınlığı (A°)	Teorik tozlanma miktarı (mg)	Gerçek tozlanma miktarı (mg)
1	280	1,1	2,8
2	130	0,5	2,2

Tablo 3.2. Yüzey oksit kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki [30].

Baker ve Pops tarafından tozlanma konusundaki yeni bir test metodu olan toz potansiyeli test yöntemi kullanılarak yapılmış başka bir çalışmada tozlanma miktarı ile oksit kalınlığı arasındaki ilişki araştırılmış ve bulunan sonuçlar Şekil 3.22'de gösterilmektedir [16].



Şekil 3.22. Asitle dekapaj yapılmış, alkolle temizlenmiş ve tıraşlanmış bakır filmaşın numunelerinin toz potansiyeli testi sonuçları [16].

3.3.2.4.1. Bara kesiti ile tozlanma arasındaki ilişki

Farklı üreticilerden temin edilmiş olan filmaşınlar üzerindeki tozlanma ölçümlerinden anlaşılmıştır ki genelde daha küçük bara boyutu olan filmaşınlerde tozlanma miktarı daha yüksektir. Bara kesiti ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki Tablo 3.3'te verilmektedir.

Filmaşın	Bara kesiti (mm ²)	Tozlanma miktarı (mg)	Test yapılan numune sayısı
1	6580,632	1,0	13
2	4774.184	1,3	1
3	6580,632	0,6	1
4	6580,632	0,5	1
5	5806.44	2,6	1
6	5161.28	11,0	2
7	3225.8	7,4	1
8	3870.96	2,8	1
9	3870.96	19,6	4
10	1999.996	7,7	2
11	1741.932	10,9	2
12	1935.48	28,4	4
13	1612.9	37,9	4
14	2064.512	9,0	4
15	2193.544	19,1	3
16	1935.48	26,4	6

Tablo 3.3. Tozlanma miktarı ile bara kesiti arasındaki ilişki [30]

Bu, daha küçük kesite sahip olan baraların (yüzey alanı/hacim) oranının, büyük kesite sahip olanların (yüzey alanı/hacim) oranından çok daha fazla olması ile direkt olarak ilişkilidir. Yüksek basınç su spreylere baranın soğumasına neden olup haddelermeyi zorlaştırdığı için, küçük baraların yüzeyindeki tabakayı kaldırmak için yüksek basınç su spreylelerinin kullanımı zordur. Stratejik noktalarda yerleştirilmiş su spreylelerinin makul kontrolü ve alkollü dekapaj ile hem küçük hem de büyük kesite sahip olan döküm baralarının tozlanma miktarı azaltılabilir[30].

3.4. Tozların Azaltılması

Tozların azaltılmasında en önemli yöntemlerden biride delaminasyon aşınmasının engellenmesidir. Delaminasyon aşınmasının tamamen ortadan kaldırılması mümkün gibi görünmektedir. Bu yüzden, delaminasyon aşınmasının neden meydana geldiğinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Endüstriden alınmış numunelerin alt yüzey kalitesi incelenmeli ve özellikle çekim hızı ve kalıp açıları karşılaştırılmalıdır.

Delaminasyon aşınmasını engellemenin muhtemel yolu daha küçük kalıp açısı kullanılmasıdır. Daha büyük kalıp açıları kalıp giriş ve çıkışındaki gerilimi artırır ve bu da delaminasyon aşınmasının nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. Delaminasyon aşınmasının önlenmesi için ikinci en önemli yol ise germe kuvveti uygulanmasıdır. Germe kuvveti kalıp basıncını ve kalıp girişindeki gerilimi azaltır. Ayrıca, kalıp girişinde sıkışmaktansa deformasyon bölgesine daha fazla tozun hareket etmesine olanak sağlayan görünen temas alanı germe kuvveti sayesinde azaltacaktır. Kalıp girişinde sıkışan tozlar bu bölgede teldeki alt yüzey kayma gerilimini artırır. Eğer küçük kalıp açısı ve germe kuvveti delaminasyon aşınmasını engellemiyorsa çekme hızı azaltılmalıdır. Yüksek çekim hızı yüzeyin daha fazla yumuşamasına yol açar.

Hızlı aşınmayı azaltmak için, en uygun kalıp açısı ve dikkatli bir germe kuvveti uygulanması gerekir. Aşırı toz oluşumu kalıp aşınmasının veya delaminasyon aşınmasının bir sonucu olarak ortaya çıkabilir.

Tozlar, tel kalıptan çıktıktan hemen sonra telden uzaklaştırılmalıdır. Eğer uzaklaştırılmazsa, daha fazla toz oluştururlar ve bu da tel kopmaları, yağlayıcının işlevini yerine getirememesi ve kalıp aşınması gibi pahalı sonuçlara neden olabilir. Ayrıca, telin tozlarından temizlenmesinin yağlayıcı sisteminden tozların filtre edilmesinden çok daha ucuz olabileceği görünmektedir. Tozların telden uzaklaştırılmasının avantaj ve dezavantajları deneysel olarak ölçülmelidir.

Çok kullanışlı ve aynı zamanda en kolay olan iki teknik, tel yüzeyinin analizi ve tozların tellerden toplanmasıdır. Tel yüzeyine bakıldığında çoğu ilginç özellik görülebilir [18].

Toz oluşumunun hızlanmasının nedenleri isimli bölümde, toz oluşumunu hızlandıran yedi faktör sıralanmıştır. Bu nedenleri azaltma metotları zaten bilinmektedir. Bu metotlar Tablo 3.4'te kısaca gösterilmektedir. Ayrıca, titreşim azaltılması, geri çekme kuvvetinin artırılması ve tellerden tozların temizlenmesi olarak adlandırılan yeni yöntemler daha derinlemesine açıklanacaktır. Birde, problemlerin hızlı bir biçimde tanımlanmasını sağladığı için toz oluşum derecesinin kontrolü hususuna ağırlık verilmelidir.

<u>Sorun</u>	<u>Tozları azaltma metotları</u>
Filmaşın kalitesi	Toz potansiyelini azaltın Filmaşındaki yüzey oksidini azaltın Doğru hadde analizi
Filtrasyon	İyi kaliteli filtrasyonu sağlayın
Kalıp kalitesi	Aşınmış kalıpları zamanında değiştirin En uygun kalıp açısını kullanın Yeterli çan ve koni kullanın
Yağlayıcı kalitesi	Her bir kalıp için yağlayıcı akışımın iyi olduğundan emin olun Yağlayıcı kalitesini kontrol edin
Tel çekme sıcaklığı	Tellerin ve çekme tekerleklerinin yeteri kadar soğumasını sağlayın
Kalıp dizilimi	İdeal dizilim çoğu kez mümkün değildir. Bunun yerine, tel çekimindeki asimetriyi asgariye indirerek dizin.

Tablo 3.4. Bilinen Tozları azaltma metotları [16]

3.4.1. Titreşimin azaltılması

Tel titreşimlerinin toz oluşumunu önemli bir şekilde etkilediği üç olay açıklanmıştır. Baker ve Pops kalıp girişi yakınlarında telin haddelenmesinin, tel-kalıp arasındaki aşınma katsayısını yaklaşık olarak %10 azalttığını keşfetmişlerdir. Tel titreşimleri hidrodinamik yağlayıcı filmin teli tamamen sarmasını engellemesi ve titreşimlerin azalmasıyla bu filmlerin hemen gelişmesi açık bir belirtidir. Bu yüzden, avara haddesi gibi basit bir titreşim azaltma metodunun kullanılması tozları ve kalıp aşınmalarını kesinlikle azaltacaktır. Daha önce yapılmış bir başka çalışmada tel çekme işlemindeki titreşimleri azaltmaya yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada avara haddesinin kullanımını önerilmiş ve titreşimlerin etkili bir biçimde azaltılması için kalıp girişine yakın bir yere konulmasının zorunlu olmadığı kanıtlanmıştır.

3.4.2. Artan geri çekme kuvveti

Kalıp basınçlarının azalmasına neden olduğundan artan geri çekme kuvvetinin tozları önemli bir biçimde azaltabildiği görülmüştür. Artan geri çekme kuvveti çoğu kalıpta pratik olmayabilir fakat toz oluşumunu etkilediği kalıplarda pratiktir. Bir tel çekme makinesindeki ilk kalıpta oluşan tozlar makine içerisinde dolaşır ve kalıp akışını etkiler. Ayrıca, ilk kalıpta tel sık sık tavlansaktadır ve çok daha yumuşak tel malzemesi daha fazla toz oluşturur. Aynı zamanda geri çekme kuvveti engellenmektedir ve bundan dolayı bu kuvvet ilk kalıpta düşüktür. Onun yerine, ilk kalıptan geçerken yüksek geri çekme kuvvetini sağlamak için bazı çekme cihazları kullanılmalıdır.

3.4.3. Tellerin tozlardan temizlenmesi

Bir kalıpta oluşan tozların çoğu tel yüzeyine yapışarak diğer kalıba taşınmaktadır ve bu tozlar üç elemanlı abrasif aşınma mekanizmasıyla toz oluşumunu hızlandırır. Bundan dolayı bir sonraki kalıba girmeden önce tel yüzeyinden olabildiğince çok tozların temizlenmesi yararlıdır. Diğer taraftan, özellikle tel bir çekim makinesinden diğerine gittiği sırada bazı temizleme metotları uygulanabilir [16].



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Elektrolitik bakır üretim proseslerinden Southwire ve Contirod sürekli döküm yöntemleri ile tel çekimi esnasında oluşan tozlanma problemi önceki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada Southwire ve Contirod yöntemiyle üretilmiş 8 mm'lik bakır filmaşınların tozlanma miktarına etki eden parametrelerin belirlenmesi ve tel çekme esnasında oluşan tozlanma probleminin nedenlerinin tespiti amaçlanmıştır.

Öncelikle ASTM B-49 standardına göre yapılan burma testi için kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de verilen iki farklı filmaşından 400'er adet 8 mm çaplı 10 inç (254mm) uzunluğunda filmaşın numunesi hazırlanmış ve bu numunelere burma testi yapılarak her bir kimyasal analiz için yaklaşık olarak 1,5 gr kadar toz biriktirilmiştir. Daha sonra biriktirilen tozlara kimyasal çözündürme yöntemi ile analiz yapılmıştır.

Filmaşın Kangal numarası	Filmaşının O ₂ İçeriği (ppm)	Filmaşının Yüzeyindeki Cu ₂ O tabakası kalınlığı (Å ^o)	Filmaşının Yüzeyindeki CuO tabakası kalınlığı (Å ^o)	Filmaşının Yüzeyindeki Toplam Oksit tabakası kalınlığı (Å ^o)	Tozlanma miktarı (mg)
1	226	37	286	323	14,66
2	258	84	262	346	24

Tablo 4.1. Kimyasal çözündürme yöntemiyle analiz yapılan tozların kimyasal özellikleri

Aynı şekilde ASTM-B49 standardına göre yapılan burma testi yapılarak analiz için toz numunesi biriktirilmiş ve GBC marka cihaz kullanılarak X-Işınları Difraksiyonu tekniği kullanılarak analiz yapılmıştır.

Tel çekme esnasında oluşan ve buna ilaveten burma testi ile biriktirilmiş tozların partikül boyut dağılımını belirlemek amacıyla MASTERSIZER 2000 marka partikül boyut analiz cihazı kullanılarak ölçümler yapılmıştır.

Southwire ve Contirod sürekli döküm yöntemleriyle üretilmiş filmaşınlar üzerindeki toplam oksit tabakası kalınlığının, filmaşının burma testi sonrası yüzeyinde oluşan tozlanma miktarının üzerindeki etkisini görmek amacıyla aynı kangal filmaşınlerden alınan numunelere ASTM B-49 standardına göre yüzey oksit ölçümü ve tozlanma testi yapılmıştır.

JEOL marka Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tel çekme makinesinden ve emülsiyon filtresinden alınan tozların SEM resimleri çekilmiştir. Aynı SEM cihazı kullanılarak tozların bileşimini belirlemek amacıyla EDS analizi yapılmıştır.

Filmaşının yüzeyinden içeriye doğru oksijen miktarındaki değişimi tespit etmek amacıyla filmaşın kesitinden çıkartılan numune metalografik olarak hazırlanmış ve JEOL marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak Çizgisel EDS taraması yapılmıştır.

ASTM B-49 standardına göre yüzey oksit tabakası kalınlığı ölçümleri Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayii ve Tic. A.Ş.'nin yüzey oksit tabakası ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Tel çekiminde giriş malzemesi cinsinin tozlanma miktarına olan etkisini belirlemek amacıyla yapılan denemeler Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayii ve Tic. A.Ş.'nin çok telli çekim makinelerinden biri kullanılarak yapılmıştır. Tel çekimi esnasında emülsiyon filtrelerinde biriken tozlar (filtreler ile birlikte) etüvde birer hafta süreyle kurutularak ağırlıkları ölçülmüştür.

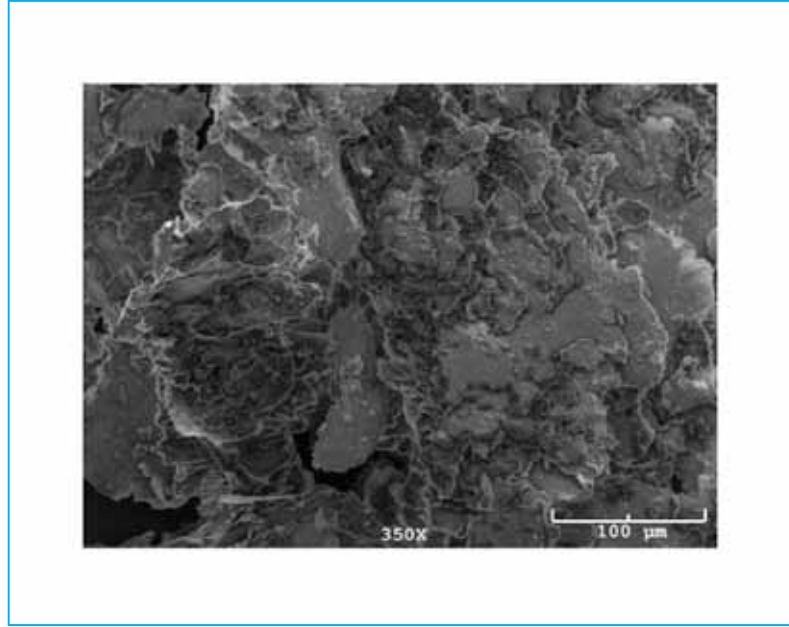
Çekilen malzemenin kaydırmalı veya kaydırmaz çekim malzemesinden geliyor olmasının tozlanma miktarı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan denemeler Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayii ve Tic. A.Ş.'nin çok telli çekim makinelerinden biri kullanılarak yapılmıştır. Tel çekimi esnasında emülsiyon filtrelerinde biriken tozlar (filtreler ile birlikte) etüvde birer hafta süreyle kurutularak ağırlıkları ölçülmüştür.

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

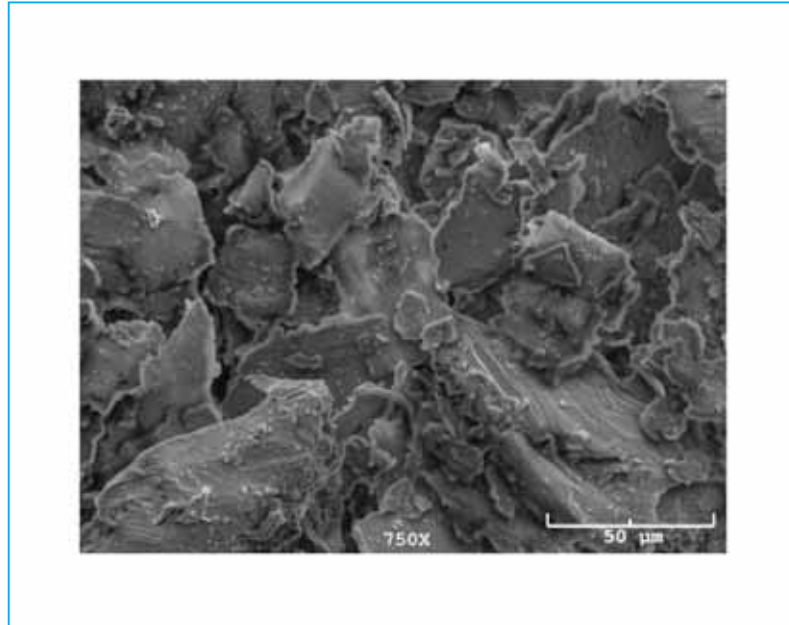
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

5.1. SEM Çalışmaları

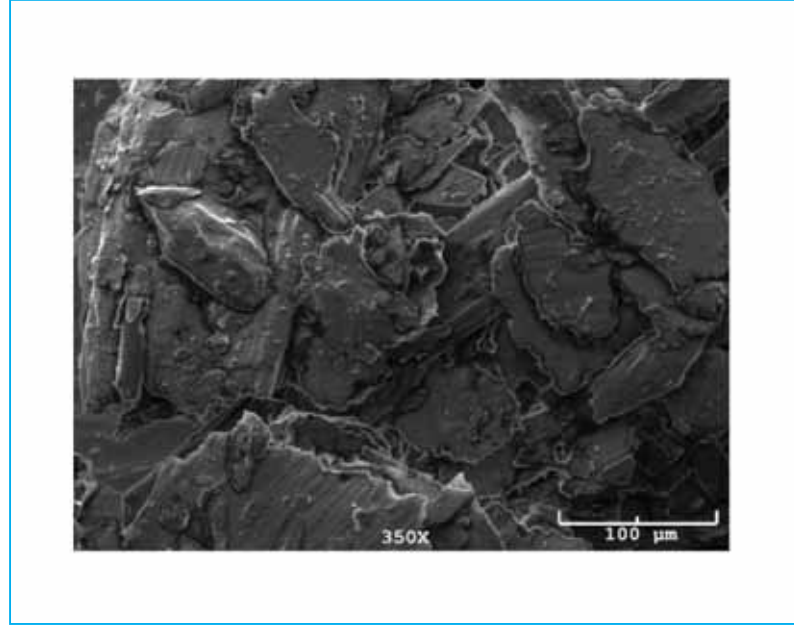
Tel çekme makinesinin emülsiyon filtresinden alınan ve filmaşinlere burma testi yapılarak biriktirilen tozların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) çalışması sonrası elde edilen farklı büyütmelerdeki SEM resimleri Şekil 5.1'den Şekil 5.4'e kadar verilmiştir. Tozlar düzensiz şekillerde ve boyutlardadır. Tel çekme işlemi esnasında oluşan bu tozların şekli ve görünümü Bölüm 3'te belirtilen delaminasyon aşınması sonucu oluşan tozlara benzemektedir. Bu nedenle bu tozların delaminasyon sonucu oluşan tozlar olduğu kanaatine varılmıştır.



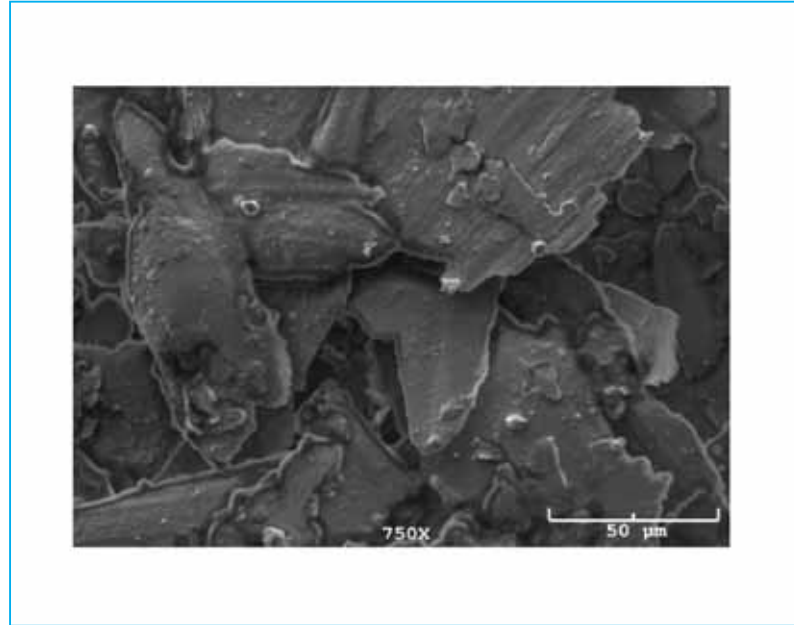
Şekil 5.1. Emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi



Şekil 5.2. Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon aşınması nedeniyle oluşan ve emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi

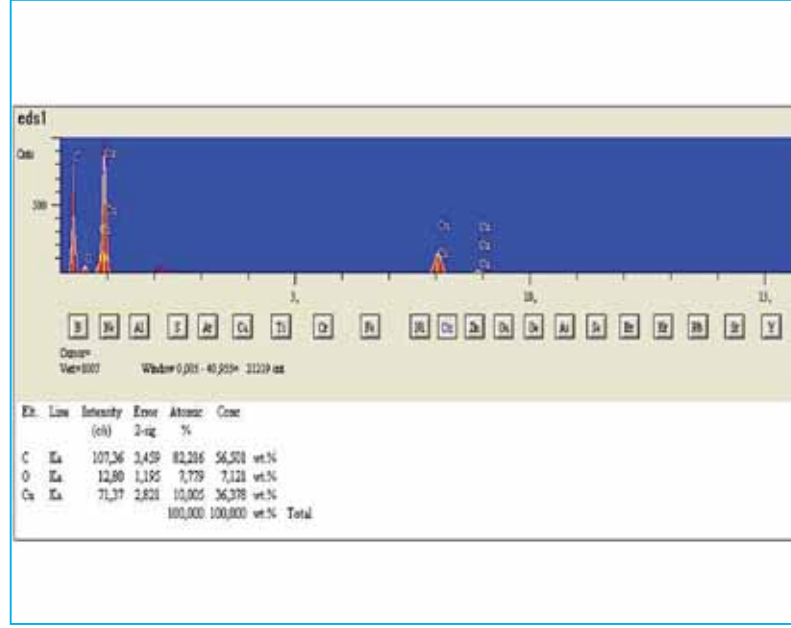


Şekil 5.3. Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon aşınması nedeniyle oluşan ve tel çekme makinesinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi

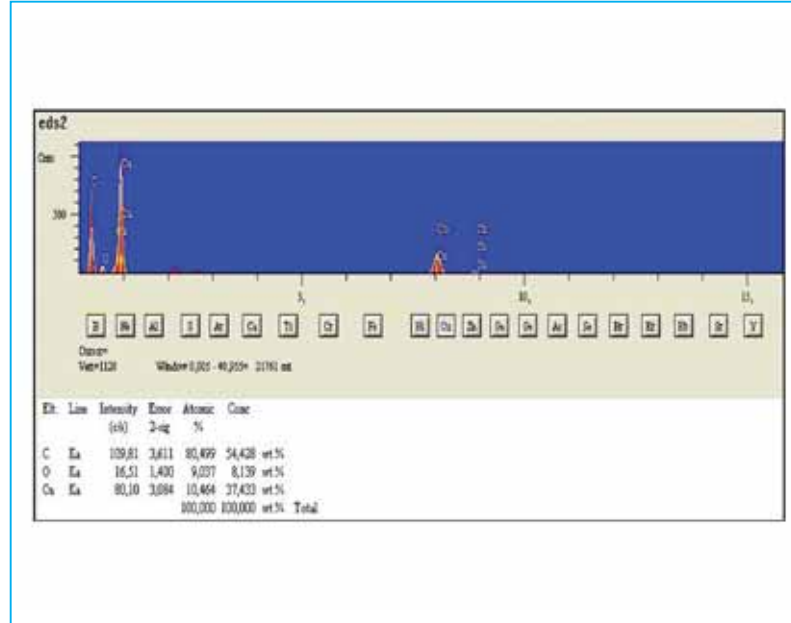


Şekil 5.4. Tel çekme işlemi esnasında delaminasyon nedeniyle oluşmuş, tel çekme makinesinin içinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resmi

Numunelerin SEM ile yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmektedir. Buradan tozların bakır ve bir miktar oksit içerdiği ve belirlenebilir miktarda yabancı element içermediği görülmüştür. EDS paternindeki karbon piki, SEM analizi için tozların karbon kaplanması nedeniyle ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.5. Emülsiyon filtresinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile EDS analizi sonuçları

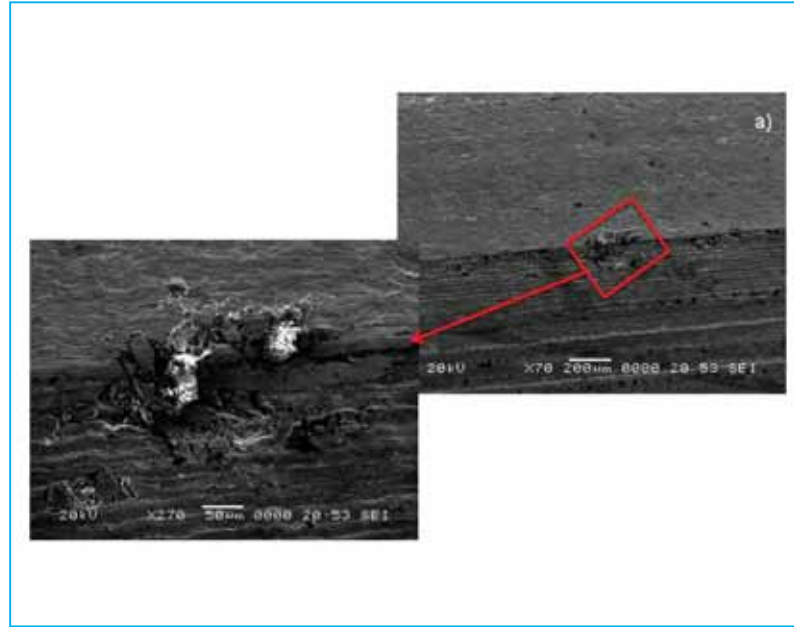


Şekil 5.6. Tel ekme makinesinin içinden alınan tozların taramalı elektron mikroskobu ile yapılan EDS analizi sonuçları

Filmaşın numunelerine burma ile tozlanma testi yapıldıktan sonra yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

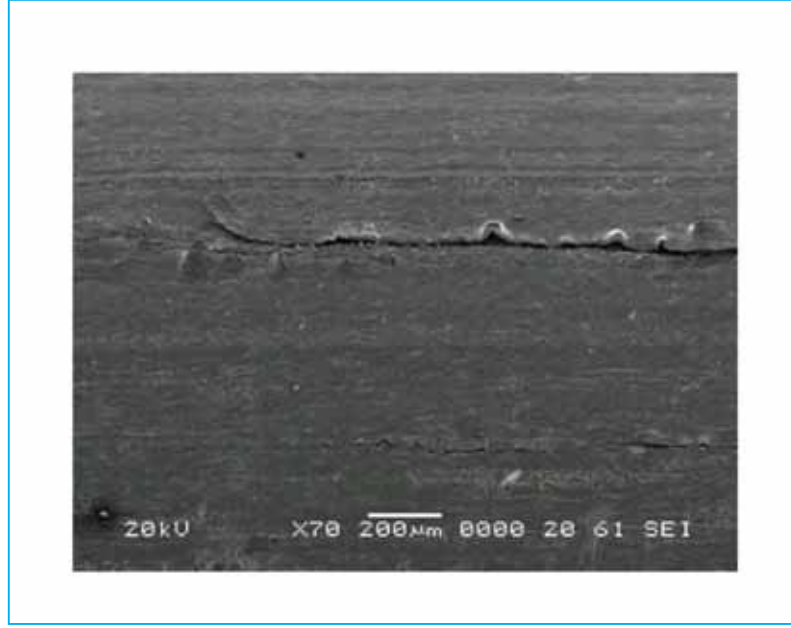


Şekil 5.7. Burma testi uygulanmış filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü

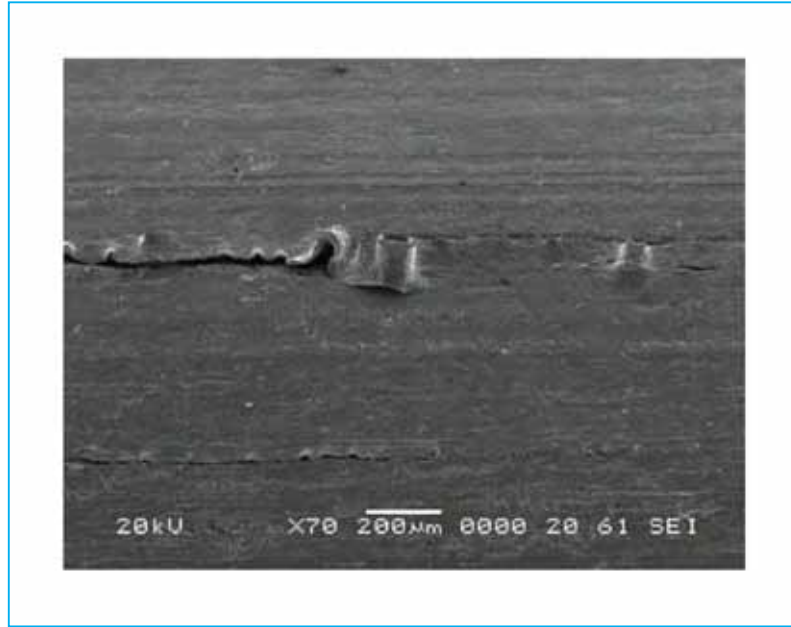


Şekil 5.8. Burma testi uygulanmış filmaşın yüzeyinin ve yüzeydeki oksit bölgesinin SEM görüntüsü

İncelenen başka bir filmaşın numunesinin tozlanma testi sonrası numune yüzeyinin SEM görüntüsü Şekil 5.9 ve 5.10'da gösterilmektedir.

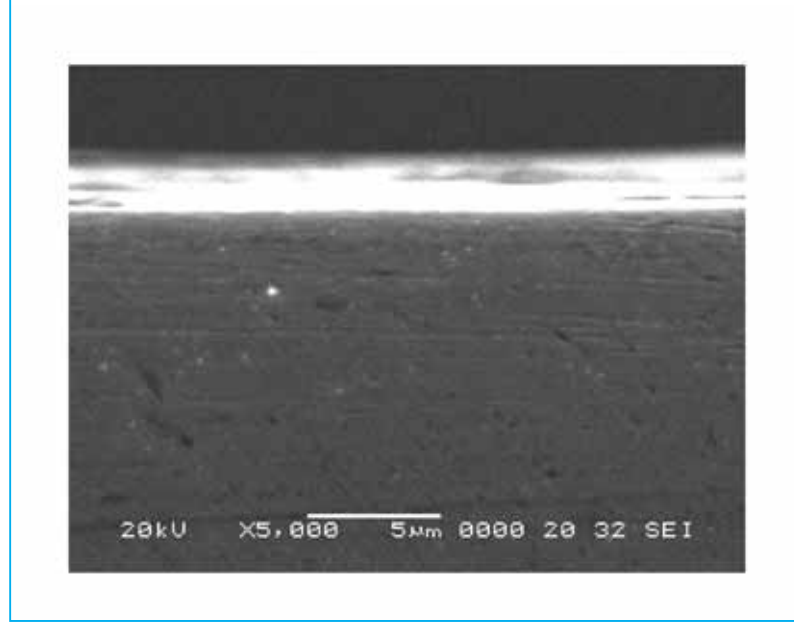


Şekil 5.9. Burma testi uygulanmış filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 5.10. Burma testi sonrası filmaşın yüzeyinin SEM görüntüsü

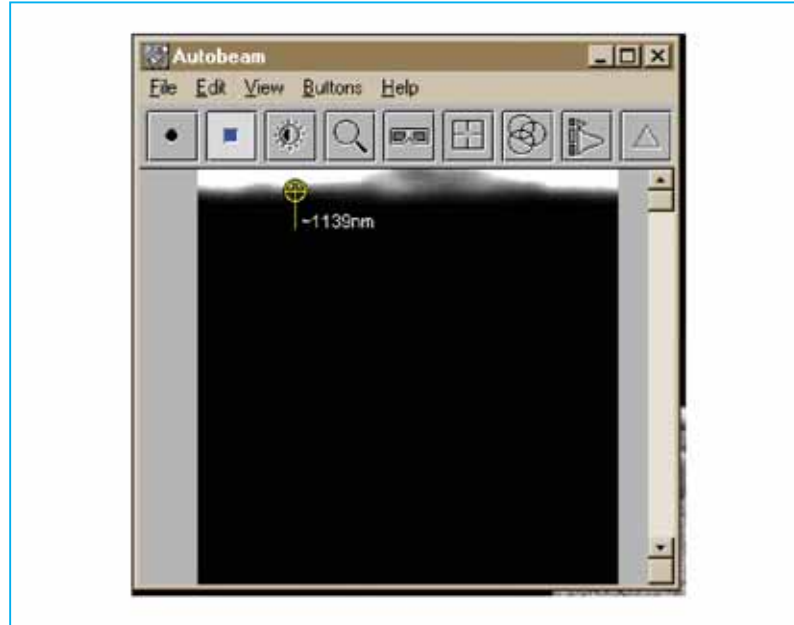
Haddeleme yönüne paralel kesitte parlatılmış bir filmaşın numunesinin SEM görüntüsü Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Bir filmaşının haddeleme yönüne paralel kesitte SEM görüntüsü

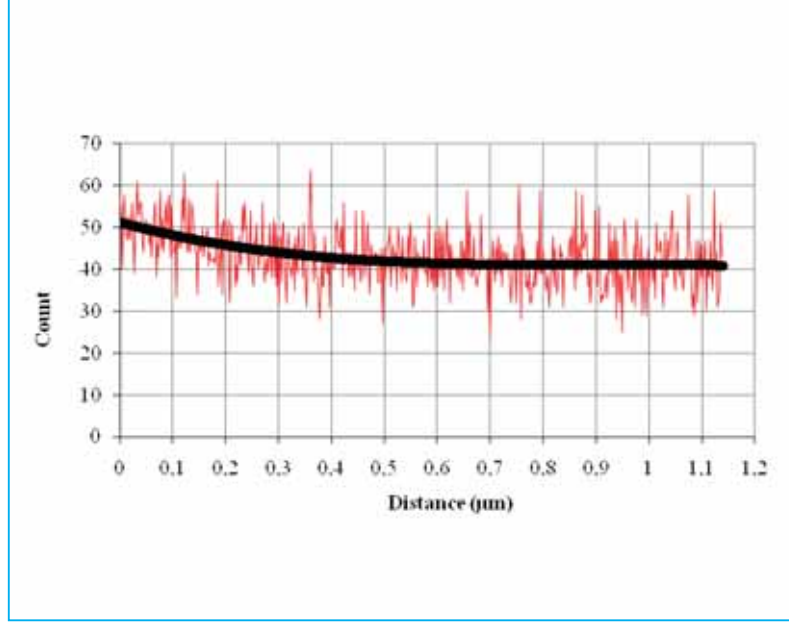
Filmaşının haddeleme yönüne paralel kesitte yapılan SEM çalışmasında oksit tabakasının çok ince olması sebebiyle çekilen resimlerde oksit tabakası görünmemektedir.

Şekil 5.11 'de SEM resmi gösterilen numuneye çizgisel EDS analizi yapılarak yüzeyden merkeze doğru oksijenin değişimi saptanmaya çalışılmıştır. Yapılan Çizgisel EDS taraması Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Filmaşın numunesinin yüzeyinden içeriye yapılan Çizgisel EDS taraması

Yapılan izgisel EDS taraması sonucu elde edilen grafik Şekil 5.13'te gösterilmektedir.

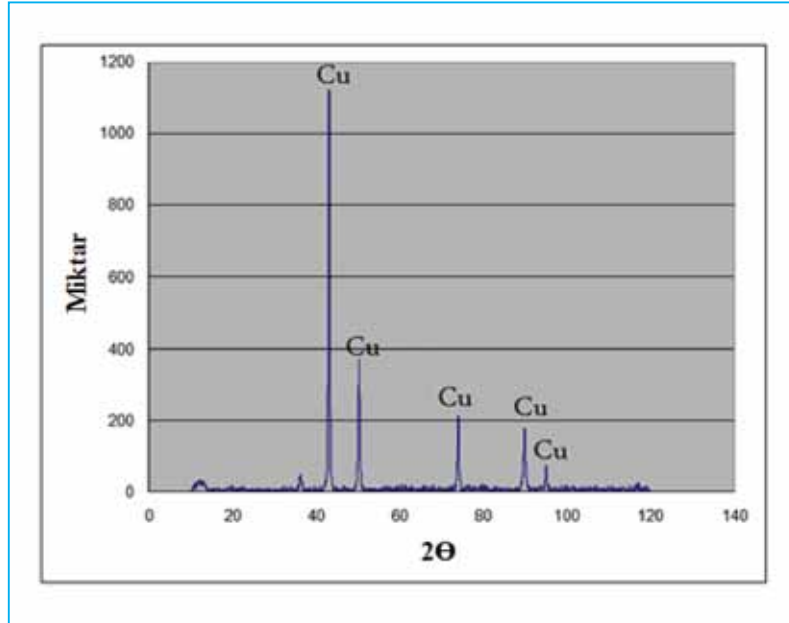


Şekil 5.13. Yüzeyden merkeze doğru oksijen miktarının değişimini gösteren izgisel EDS taraması

Filmaşın kesitinde yüzeyden merkeze doğru SEM 'de EDS ile oksijen miktarı ölçüldüğünde, 8 mm çapındaki filmaŐında yüzeyden 0,6 µm (600 Å) içeriye kadar oksijen miktarının azaldığı, daha sonra belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

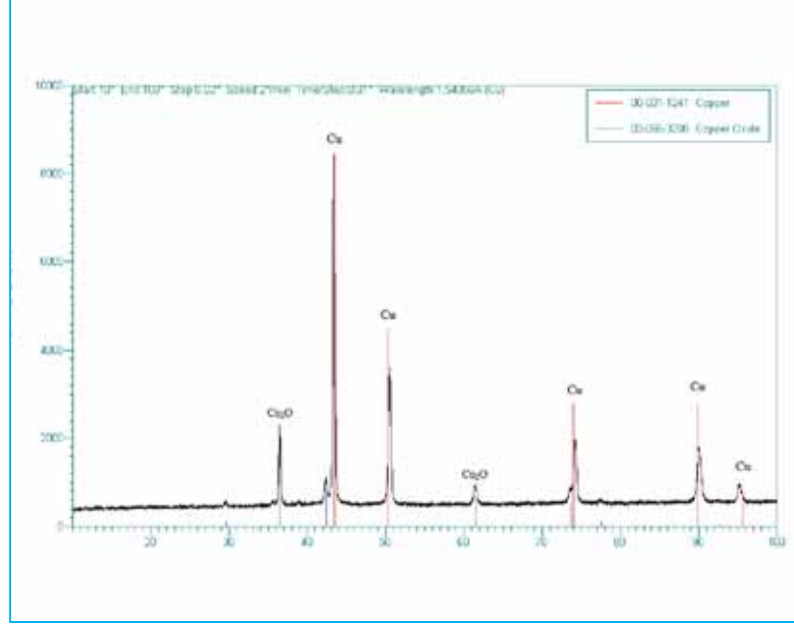
5.2. XRD Analizi alıŐmaları

Emülsiyon filtresinden alınan tozların X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Buradan da tozların bakır olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. Numunelerin X-ışınları Difraksiyonu (XRD) sonuçları

Burma testi esnasında bakır filmaşın yüzeyinden dökülen toz partiküllerinin X-ışınları difraksiyonu analizi yapılmıştır. Yapılan x-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi Şekil 5.15'te gösterilmektedir.

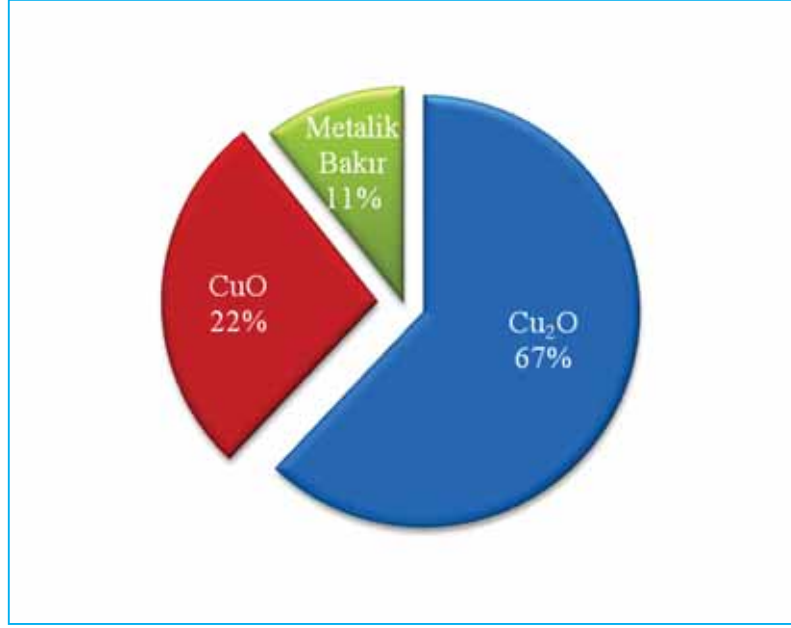


Şekil 5.15. Burma testi esnasında filmaşın yüzeyinden dökülen tozlara uygulanan X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi sonuçları

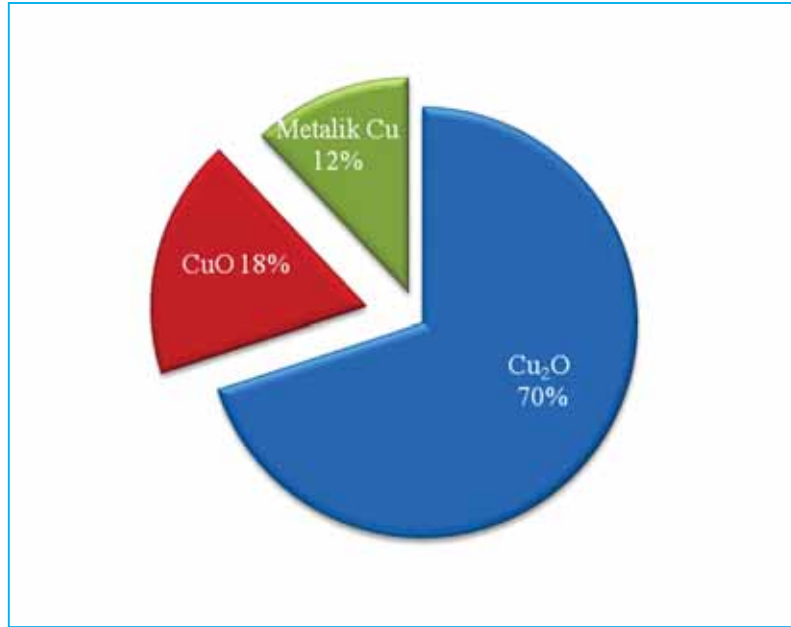
Şekil 5.15'deki XRD analizi grafiğinden de anlaşıldığı gibi burma testi esnasında dökülen tozların bakır ve Cu_2O olduğu görülmüştür. Böylece tozlanmanın sebebinin filmaşın yüzeyindeki oksit tabakası olduğu belirlenmiştir ve bu sonuç literatürlerle uyum içindedir.

5.3. Kimyasal analiz çalışmaları

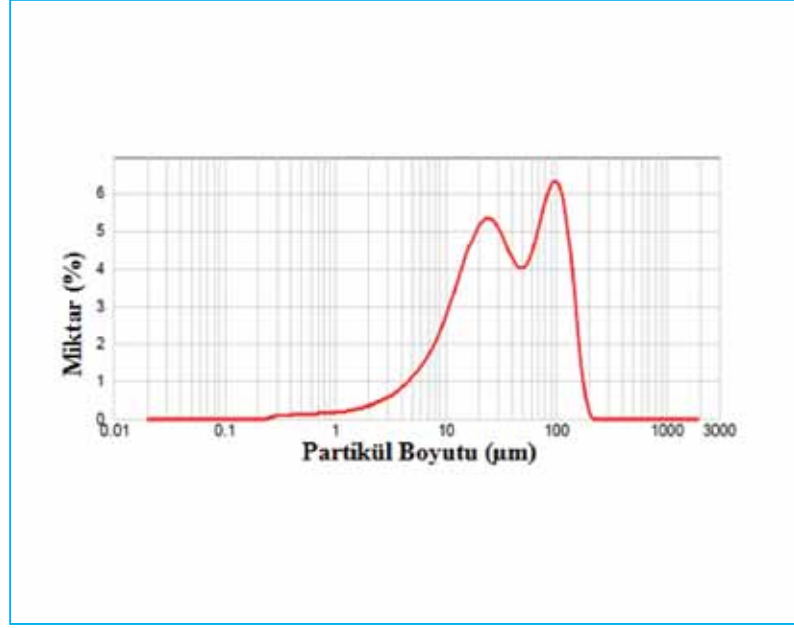
Burma testi sonrası filmaşın yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Şekil 5.16 ve 5.17'de gösterilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları göstermektedir ki 8 mm'lik bakır filmaşınların burma testi esnasında yüzeylerinde ortaya çıkan tozların yaklaşık olarak ~%90 lık bir bölümü bakır oksittir. Bu sonuçlardan da anlaşılabacağı gibi bakır filmaşınların yüzeyinde ortaya çıkan tozlanma sorununun temel nedenlerinden biri sürekli döküm esnasında bara yüzeyinde oluşan oksit tabakasıdır.



Şekil 5.16. Burma testi sonrası 1 numaralı filmaşın kangalından alınan numunelerin yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analiz sonucu



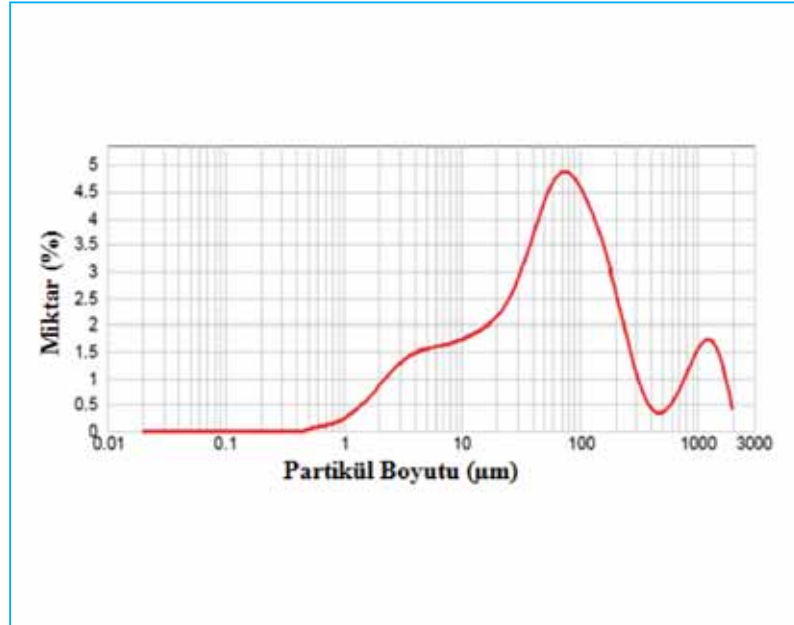
Şekil 5.17. Burma testi sonrası 2 numaralı filmaşın kangalından alınan numunelerin yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analiz sonucu



Şekil 5.18. Emülsiyon filtresinden alınan tozların partikül boyutu analizi sonuçları

5.4. Partikül boyutu analizi çalışmaları

Emülsiyon filtresinden alınan numunelerin partikül boyutu analizi çalışması sonrası elde edilen sonuçlar Şekil 5.18'de gösterilmektedir. Tozlar esas olarak ~ 20 µm ve 100 µm olmak üzere iki farklı boyutta oldukları tespit edilmiştir.



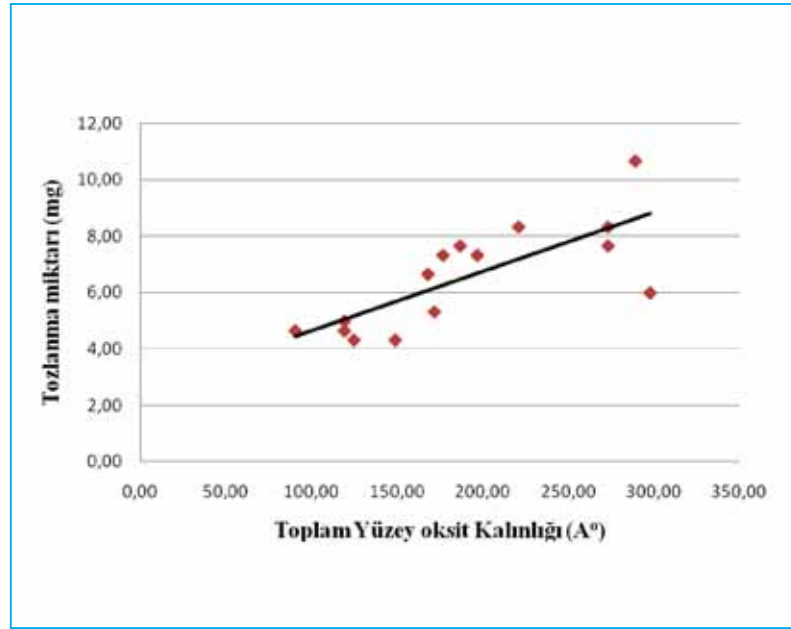
Şekil 5.19. Filmaşine uygulanan burma testi esnasında dökülen tozların boyutu analizi sonucu

Tozların boyut dağılımı geniş bir aralıkta olmasına rağmen en büyük miktarının 70 µm civarında olduğu görülmektedir.

5.5. Yüzey Oksit Tabaka Kalınlığı ve Tozlanma Miktarı lmleri

Tozlanma miktarı ile yüzey oksit tabakası arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla farklı tozlanma değerlerine sahip numunelere yüzey oksit tabakası ölçümü yapılmıştır. Yapılan lmler sonucu elde edilen yüzey oksit tabakası kalınlıkları ile tozlanma değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik şekil 5.20'de gösterilmektedir.

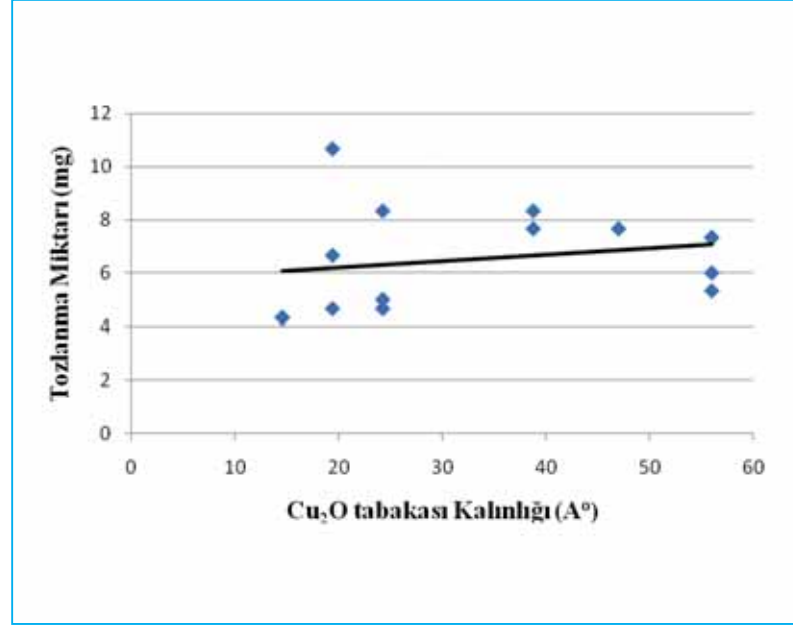
şekil 5.20'deki grafikten de anlaşılacağı gibi filmaşinin yüzeyinde oluşan oksit tabakası azaldıkça tozlanma miktarı da azalmaktadır.



şekil 5.20. Filmaşin yüzeyindeki toplam oksit kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki

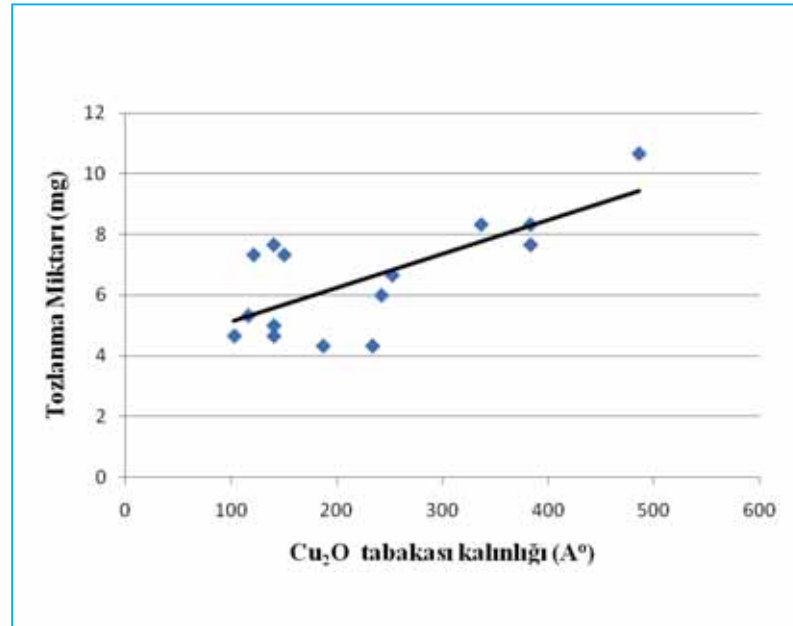
Bölüm 3'te bahsedildiği gibi yüzey oksit tabakası kalınlığının ölçümü esnasında iki redüklenme reaksiyonu gerçekleşmektedir. İlk meydana gelen reaksiyon daha az sürede tamamlanmakta ve ikinci meydana gelen redüklenme reaksiyonu ise çok daha uzun bir sürede tamamlanmaktadır.

ASTM B-49 standardına göre ilk olarak Cu₂O redklenmekte ve ikinci olarak ta CuO redüklenmektedir[31]. Cu₂O tabakasının kalınlığı ASTM B-49 standardına göre hesaplandığında elde edilen grafik şekil 5.21'de gösterilmektedir.



Şekil 5.21. ASTM B-49 standardına göre hesaplanmış Cu₂O tabakası kalınlığı ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki

Son yıllarda yapılmış bazı çalışmalar bu durumun tam aksini iddia etmektedir [11-12]. Deneysel çalışmalar boyunca yapılan analizler (XRD ve kimyasal çözündürme analizleri), oluşan tozların büyük bir çoğunluğunun Cu₂O olduğunu göstermektedir. Bu durumda Cu₂O tabakası kalınlığının CuO tabakası kalınlığından daha fazla olması dolayısıyla, Cu₂O miktarının artmasıyla tozlanma miktarının da artması beklenmektedir. Buna göre, ilk olarak redüklenenin CuO ve ikinci redüklenenin de Cu₂O olduğu kabul edilir ve ona göre yüzey oksit kalınlıkları hesaplanır ise Şekil 5.22'teki grafik elde edilmektedir.



Şekil 5.22. Yüzey oksit tabakası kalınlığı ölçümü sırasında meydana gelen reaksiyonların sırasının ters olması durumunda Cu₂O tabakası ile tozlanma miktarı arasındaki ilişki

Şekil 5.22'deki elde edilen grafik, ASTM B-49 standardında kabul edilenin aksine ilk olarak redüklenen tabakanın CuO (ilk reaksiyon daha kısa sürdüğü için CuO tabakası kalınlığı daha az çıkmaktadır) ve ikinci olarak redüklenen tabakanın daha kalın olan Cu₂O tabakası (redüklenme süresi ilkinde göre çok daha uzun) olduğunu ispatlar niteliktedir.

5.5.1. Farklı tozlanma testi yöntemleri

Aynı kangaldan alınan filmaşinin numunelerine ilk önce direkt olarak tozlanma testi yapılmış ve daha sonra % 20 lik HCl çözeltisinde farklı sürelerde (2 ve 5 dk) bekletilen numunelere tozlanma testi yapılmıştır. Bu testler sonucu elde edilen veriler Tablo 5.1 ve 5.2'de gösterilmektedir.

Numune	Tozlanma miktarı (mg)
İşlemsiz	13
	12
	12
%20'lik HCl çözeltisinde 2 dk bekletilmiş	9
	9
	9
%20'lik HCl çözeltisinde 5 dk bekletilmiş	8
	8
	9

Tablo 5.1. HCl çözeltisi ile oksit tabakası azaltılmış numune ile normal numunenin tozlanma miktarının karşılaştırılması

Filmaşinin O ₂ içeriği (ppm)	HCl muamelesi öncesi		HCl muamelesi sonrası
	Toplam Yüzey Oksit Kalınlığı (A°)	Tozlanma Miktarı (mg)	Tozlanma Miktarı (mg)
211	298	6	3,33
224	172	5,33	4,33
248	187	7,66	4
240	178	7,33	6,33
245	177	7,33	4,33
-	250	6	3,66

Tablo 5.2. HCl çözeltisi ile oksit tabakası azaltılmış numune ile normal numunenin tozlanma miktarının karşılaştırılması

Tablo 5.1 ve 5.2'deki verilerden de anlaşılacağı gibi HCl çözeltisinde bekletilen numunelerin tozlanma miktarlarında azalma gözlenmektedir. Aynı zamanda, ASTM B-49 standardında önerilen çözdürme yöntemi ile yapılan yüzeydeki oksit tabakası kalınlığı değerleri belirlenemeyecek kadar düşüktür. Bunun nedeni yüzey oksitlerinin HCl ile çözünmesidir. Bu sonuca göre; yüzeydeki oksit tabakası kalınlığının azalmasıyla tozlanma miktarı da azalmaktadır. Yüzeydeki oksit tabakası kaldırılmış olmasına rağmen tozlanma miktarının sıfıra inmemesinin sebebi ise tozlanmaya sadece yüzeydeki değil yüzey altı oksitlerinin de neden olmasıdır.

5.6. Tel Çekimi Çalışmaları

Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayii ve Tic. A.Ş.'nin çok telli çekim makinelerinden biri kullanılarak giriş malzemesinin toz miktarı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla giriş malzemesi olarak oksijensiz bakır (OF) ve oksijenli bakır (ETP) bakır kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 125'er ton malzeme çekilmiş ve emülsiyon sisteminin filtreleri toplanmış (Şekil 5.23) ve bu filtreler yaklaşık olarak 5 gün boyunca kurutulmuş ve içerdikleri emülsiyon olabildiğince giderilmeye çalışılmıştır. Bu işlemlerden sonra elde edilen filtrelerin ağırlıkları ölçülerek giriş malzemesinin tozlanma miktarı üzerindeki etkisinin belirlenmesine çalışılmıştır. Aynı işlemler 40'ar ton malzeme kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu denemeler sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'te verilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda OF bakır çekimlerinde filtre ağırlıkları ETP bakır çekimlerindeki filtre ağırlıklarından az da olsa fazla bulunmuştur.



Şekil 5.23. Çok telli çekim makinelerinde kullanılan emülsiyon filtre sisteminin görüntüsü

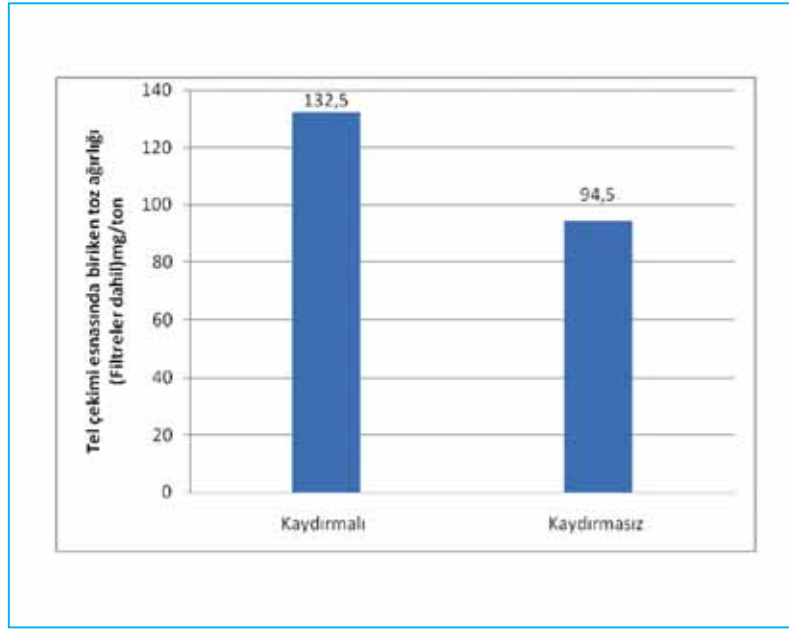
Fabrikada daha önce yapılmış olan gözlemlere dayanarak kalın çekimde giriş malzemesi olarak ETP bakır ağırlıklı çalışan makinelerin emülsiyon sistemlerinde daha fazla tozlanma olduğu bilinmektedir. Fakat daha ince çaplarda (~0,25-0,30 mm) yapılmış olan tel çekme denemelerinin sonucunun verildiği Tablo 5.3' teki verilerden de anlaşılacağı gibi beklenenin aksine giriş malzemesi olarak ETP bakır değil OF bakır daha fazla tozlanmaya neden olmuştur.

Çekilen Malzeme Miktarı ton	Çekilen Malzeme Cinsine Göre Toplanan Filtre Miktarları (kg)	
	ETP (Kaydırmalı)	OF (Kaydırmalı)
~40	5	5,6
~35	ETP (Kaydırmaz)	OF (Kaydırmaz)
	3,54	3,08

Tablo 5.3. Giriş malzemesine göre tozlanma miktarları

Ayrıca aradaki farkın az olmasından iki cins bakırında giriş malzemesi olarak kullanıldığında aŐađı yukarı aynı miktarda tozlanmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, filmaşının yzeyindeki oksit tabakasının kalın tel çekimi esnasında meydana gelen tozlanma üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu ve çekilen tel çapı inceldikçe tel ekim Şartlarının daha baskın bir Şekilde tozlanmayı kontrol ettiği szylenebilir.

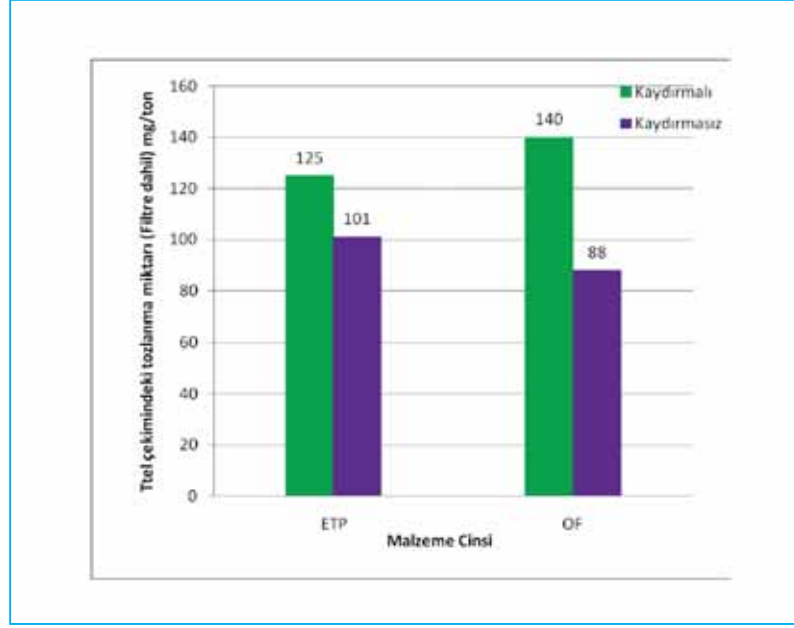
Tel ekme endzstrisinde kullanılan geleneksel çekim makinelerine gze daha yeni bir teknoloji olan kaydırmasız çekim makinelerinde çekilmiş olan tellerin bir sonraki tel çekim aŐamasında giriş malzemesi olarak kullanımının tel çekimi esnasında oluşan tozlanma zzerindeki etkisini gzelemek amacıyla yapılmış olan denemelerin sonuçları Şekil 5.24'te verilmektedir.



Şekil 5.24. Kaydırmalı ve kaydırmasız çekim makinelerinin tel çekimi esnasında oluşan tozlanma zzerindeki etkisini gzeleyen grafik.

Yukarıdaki Őekilden de anlaşılacağı zzer kaydırmazız çekim makinesinden gelen malzemenin daha az tozlanma değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç bize tel çekimi esnasında telin çekim kasağı üzerinde kayması suretiyle tel yzeyinde oluşan çiziklerin tozlanma üzerinde znemli bir etkiye sahip olduğunu gzelemektedir.

Giriş malzemesinin kullanılan makine tipine gze tozlanma zzerindeki etkilerini gzeleyen grafik Şekil 5.25'te gzelelmiiŐtir.



Şekil 5.25. Kullanılan malzemelerin makine tiplerine göre tozlanma miktarları.

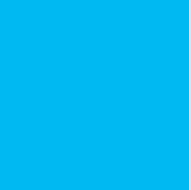
Şekil 5.25'teki verilerden görüldüğü kadarıyla OF malzemenin kaydırmaz makede çekilmesi durumunda ETP'ye nazaran tozlanma miktarında çok ciddi bir azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç bize OF malzemenin kaydırmaz makede çekilmesi durumunda tozlanmada ciddi azalma olacağını göstermektedir.

6. GENEL SONUÇLAR

6. GENEL SONUÇLAR

Tozlanma ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki genel sonuçlara varılmıştır.

- 1) Burma testi esnasında filmaşinden dökülen tozların yoğun olarak Cu_2O bileşiminde olduğu XRD çalışmaları ile belirlenmiştir.
- 2) Burma testi esnasında filmaşin yüzeyinden dökülen tozlara yapılan kimyasal analiz sonucunda tozların yaklaşık olarak % 90 gibi büyük bir bölümünün bakır oksit (CuO ve Cu_2O) karışımı olduğu saptanmıştır.
- 3) Filmaşinlerin yüzeyindeki oksit tabakası kalınlığı arttıkça filmaşindeki tozlanma miktarının da arttığı saptanmıştır.
- 4) Filmaşinlerin yüzeyindeki oksit tabakasının % 20 HCl çözeltisi ile temizlenmesi sonucunda tozlanma miktarının azaldığı ancak tozlanmanın devam ettiği tespit edilmiştir. Bu tespit tozlanma olayının, sadece yüzeydeki oksit tabakası ile ilişkisi olmadığını, tozlanmaya ayrıca yüzey altı oksitlerinin de katkısının olduğunu göstermektedir.
- 5) 10/10 burma testi sonucunda filmaşinde oluşan yüzey kusurları SEM'de detaylı olarak incelenmiş, fakat bu bölgelerde oksijen varlığı saptanamamıştır.
- 6) Filmaşin kesitinde yüzeyden merkeze doğru SEM 'de EDS ile oksijen miktarı ölçüldüğünde 8 mm çapındaki filmaşinde yüzeyden 0,6 μm içeriye kadar oksijen miktarının azaldığı, daha sonrada belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.
- 7) Tel çekme makinesinin emülsiyon filtresinden alınan tozlara yapılan XRD analizi sonucu tozların genellikle metalik bakır oldukları tespit edilmiştir.
- 8) Tel çekme makinesinin emülsiyon filtresi ve makine içinden alınan tozlar SEM'de detaylı olarak incelenmiş ve bu tozların delaminasyon aşınması sonucu oluştuğu tespit edilmiştir.
- 9) İnce çaplarda tel çekilmesi durumunda giriş malzemesinin OF veya ETP olarak seçilmesinin tel çekimi esnasında meydana gelen toz oluşumu üzerinde çok fazla bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, filmaşinin yüzeyindeki oksit tabakasının kalın tel çekimi esnasında meydana gelen tozlanma üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu ve çekilen tel çapı incelidikçe tel çekim şartlarının daha baskın bir şekilde tozlanmayı kontrol ettiği söylenebilir.
- 10) Tel çekim denemelerinden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki kaydırmaz çekim makinesinden gelen malzemenin daha az tozlanma değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç bize tel çekimi esnasında telin çekim kasnağı üzerinde kayması suretiyle tel yüzeyinde oluşan çiziklerin tozlanma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- 11) OF malzemenin kaydırmaz makinede çekilmesi durumunda ETP' ye nazaran tozlanma miktarında çok ciddi bir azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç bize OF malzemenin kaydırmaz makinede çekilmesi durumunda tozlanmada ciddi azalma olacağını göstermektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Adams, R. ve Sinha, U., 1990. "Improving the Quality of Continuous Copper rod", The Journal of the Minerals Metals&Materials Society, Mayıs, sayfa 31-34.
- [2] Ayhan, Y. C., 2002, "Southwire Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş Bakır Çubuklardan Çekilen Tellerin Mekanik Özellikleri ve İletkenliğine Oksijen ve Empürite İçeriğinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Cuypers, P. F., 1987, "Continuous Casting in the Copper Industry", Araştırma Raporu, Eindhoven University of Technology, Department of Industrial Engineering and Management Science, sayfa 18-19.
- [4] http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi129/d129_4043.pdf (16 Kasım 2009)
- [5] http://www.upcast.com/documents/W&CTartikkeli_WEB.pdf (16 Kasım 2009)
- [6] <http://ekutup.dpt.gov.tr/imalatsa/oik553.pdf> (16 Kasım 2009)
- [7] Çapan, L., "Metallere Plastik Şekil Verme" Üçüncü baskı, Çağaloğlu-İstanbul 1999, sayfa 291-293
- [8] Kayalı, S. ve Ensari, C., "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları", İstanbul, 1991, sayfa 320-322
- [9] Şenyürek, Ü., 2002 "İnce Tel Çekme Prosesinde Oluşan Hasarlar ve İnküzyon Hasarının Deneysel Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [10] Mang, T. ve Dresel, W., "Lubricants and Lubrication" İkinci baskı, Weinheim-Almanya, 2007, sayfa 583-585
- [11] http://www.litz-wire.com/pdf%20files/Metallurgy_Copper_Wire.pdf (25 Kasım 2009)
- [12] <http://stewart-hay.com/documents/pshslippdf.pdf> (18 Ekim 2009)
- [13] Hogg, J., "Copper Wire Production", International Wire & Machinery Association, İngiltere, 1990, sayfa 3.1-3.11
- [14] <http://metalforming-inc.com/Publications/Papers/ref188/ref188.shtml#background> (16 Kasım 2009)
- [15] <http://www.wiretimes.com/magazine/article.php?id=513>
- [16] Baker, G. ve Pops, H., 2008, "Formulation, Analysis and Measurement of Fines" ,Wire Expo 2008 Conference Proceedings, Wire Journal International, Eylül.
- [17] Adams, R., 1990, "Rod Surface Quality-Sources of Seams, Remelt Lines, Dusting Promlems", SCR User Meeting.
- [18] Baker, G. J., 1994 "Workpiece Wear Mechanisms in The Drawing of Copper Wire", Doktora Tezi, Rensselaer Polytechnic Institute, Newyork.
- [19] Nosedo, C., 2001, "The Role of The Temperature Effects in Copper Wire Drawing" Doktora Tezi, Rensselaer Polytechnic Institute, Newyork.
- [20] <http://www.conticast.com/documents/CuOF%20or%20CuETP%20-%20GENERAL%20COMPARISONS.pdf> (24 Mayıs 2009)
- [21] Dieter, G., Kuhn, H. ve Semiatin, L., "Handbook of Workability and Process Design" ASM International, Amerika, 2003, sayfa 288

- [22] Lenard, J. G., "Metal Forming Science and Practice" Elsevier, Kanada, 2002, sayfa 309-310
- [23] Vega, G., Haddi, A. ve Imad, A., 2008 "Investigation of Process Parameters Effect on The Copper-Wire Drawing", Materials and Design, sayı: 30, sayfa 3308-3312, Fransa.
- [24] Harper, S., Goreham, A. R. ve Marks, A. A., 1970, "Some Modern Developments In Copper Wire Drawing", Copper And Its Alloys, Eylül, sayfa 21-25, Amsterdam.
- [25] Chia, H. ve Adams, R., 1986, "Torsional Stres Tests For Copper Rod Idicator Of Quality And Performance", SCR User Meeting.
- [26] Baker, G. ve Pops, H., 2008, "New developments in rod surface measurement and analysis", Wire Expo 2008 Conference Proceedings, Wire Journal International, Haziran, sayfa 29-42
- [27] Baker, G. ve Pops, H., 1999, "Analysis And Automation Of Copper Surface Oxide Measurement", Wire Journal International, Şubat, sayfa 90-97
- [28] Nakayama, S., Kaji, T., Shibata, M., Notoya, T. ve Osakai, T., 2006, " Which Is Easier to Reduce, Cu_2O or CuO ? ", Journal of The Electrochemical Society, Kasım, sayfa C1-C6
- [29] Su, Y. ve Shemanski, M., 2008, " Qualitative and Quantitative Identification of Cooper Oxides", Surface and Interface Analysis, Nisan, 1183-1189
- [30] Sinha, U., "Development of A Quantitative Evaluation of Dusting on Copper Rod", SCR User Meeting.
- [31] ASTM B-49-08 "Standard Specification for Copper Rod Drawing Stock for Electrical Purposes"

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ferhat OMAÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: Sakarya-19.09.1982

İlköğretim: Atatürk İlkokulu

Ortaöğretim: Ozanlar Lisesi

Lise: Sakarya Endüstri Meslek Lisesi

Önlisans: Kocaeli Meslek Yüksek Okulu /Makine

Lisans: Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği



