

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK SACLARIN ÜRETİMİ.....	3
2.1 Sürekli Döküm Yöntemi ile Slab Üretimi	6
2.1.1 Pota, Tandış ve Kalıplar	7
2.1.2 Kılavuz Merdaneleri ve Slab Kesme Ünitesi	9
2.1.3 Slabların Yüzey ile İçyapı Temizliği ve Kalite Kontrolü.....	9
2.2 Sıcak Haddelme	11
2.2.1 Yassı Ürünlerin Haddelenme Prensipleri	12
2.2.2 Merdaneler ve Merdane Düzenleri	14
2.2.3 Slab Tavlama	15
2.2.3.1 Kombine Hadde Bölgesi.....	17
2.2.3.2 Tersinir Şerit Hadde.....	17
2.2.3.3. Şerit Hadde (Finishing Mill).....	17
2.2.4 Sıcak Haddelenmenin İşleyişi	18
2.2.5 Metalürjik Açından Sıcak Haddelme.....	24
2.2.6 Sıcak Haddelmede Kontrol ve Başlıca Kusurlar	30
2.3 Soğuk Haddelme.....	35
2.3.1.Dekapaj	35
2.3.2 Soğuk Haddelme Teknolojisi ve İşleyişi	36
2.3.2.1 Hadde Donanımları.....	38
2.3.2.2 Merdaneler.....	38
2.3.2.3 Soğutma ve Yağlama.....	39
2.3.2.4 İstenen Düzlemselliğin Sağlanması.....	40
2.3.2.5 Kalınlık Farklarının Azaltılması.....	41
2.3.2.6 Yüzey Temizliği	41
2.3.2.7 Soğuk Haddelmede Mikroyapı	42
2.3.3 Yeniden Kristalleşme Tavlaması.....	43
2.3.3.1 Metalürjik İnceleme.....	43
2.3.3.2 Yığın Tavlama	45
2.3.3.3 Sürekli Tavlama.....	47
2.3.3.4 Yığın ve Sürekli Tavlamanın Karşılaştırılması	49
2.3.4 Temper Haddelme.....	52

2.3.4.1 Amacı ve Uygulanması	52
2.3.4.2 Etkileri ve Şekil Değişimi Yaşlanması	53
2.3.6 Soğuk Haddede Kontrol	55
2.3.6.1 Kalıntı Kontrolü	57
2.3.6.2 Genişlik ve Kalınlık Kontrolü	56
2.3.6.3 İki Boyutlu Ölçümler	58
2.3.6.4 Düzlemsellik Ölçümü	58
2.3.6.5 Kaplama Kalınlığı Kontrolü	58
2.3.6.6 Yüzey Kontrolü	59
2.3.6.7 Nihai Özelliklerin Tahribatsız Yöntemlerle Değerlendirilmesi	59
2.3.7 Soğuk Haddede Karşılaşılan Kusurlar	60
2.3.7.1 Şekil Bozuklukları	60
2.3.8 Soğuk Haddelenmiş Levha ve Saclar İçin Son Yüzey İşlemleri	63
2.3.8.1 Tavlama Ve Asitleme İşlemi	63
2.3.8.2 Skinpass Haddeme İşlemi (Temper Hadde)	63
2.3.8.3 Parlak Tavlama İşlemi	63
2.3.8.4 Parlatma	63
 3. ELEKTRİKSEL ÇELİKLERE GİRİŞ	 64
3.1 Motor, Generatör Ve Transformatör Tanımları	64
3.2 Magnetik Alan	66
3.3 Magnetik Akı Yoğunluğu	68
3.4 Magnetik Akı	70
3.5 Ferromagnetik Malzemeler	71
3.6 Ferromanyetizma	73
3.7 Dömen (Bölge) Yapısı	74
3.8 Manyetikleşme-Alan Eğrisinin Uygulanması	76
3.9 Demire silisyum katılması	78
3.10 Silisyumun Çeliğe Etkileri	79
3.11 Elektriksel (Si'li) Çeliklerin Kimyasal Bileşimleri	79
3.12 Neden Lamine Yapılar Tercih Edildi?	80
3.13 Elektriksel Çelikler	80
3.13.1 Yönlendirilmiş çelikler	81
3.13.1.1 Yönlendirilmiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması	82
3.13.2 Yönlendirilmemiş çelikler	83
3.13.2.1 Düşük Silisyumlu Çelikler	84
3.13.2.2 Orta Silisyumlu Çelikler	84
3.13.2.3 Yüksek Silisyumlu Çelikler	85
3.13.2.4 Yönlendirilmemiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması	85
3.14 Elektriksel çelik karakteristikleri	89
3.15 Elektriksel Çeliklerde Güç Kayıpları	89
3.15.1 Histerisiz Kaybı	90
3.15.2 Girdap Akımı Kayıpları Nasıl Oluşur?	91
3.15.3 Tabakalararası Kayıp	94
3.15.4 Rotasyon Kayıp	94
3.16 Manyetik Geçirgenlik	95
3.17 Isıl İletkenlik	95
3.18 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik	97
3.19 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri	97
3.19.1 Tavlama	97

3.19.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı.....	99
3.19.3 Tabaka Kalınlıkları.....	101
3.19.4 Girdap Akımlarına Etki Eden Diğer Faktörler.....	102
3.19.5 Anormal Kayıplar.....	102
3.20 Elektrik Çelikleri Ve Amorf Maddelerde Akı Dağılımı.....	104
3.20.1 Farklı Geometriye Sahip Transformatör Çekirdeklerinde Akı Dağılımı.....	104
3.20.2 Manyetik Devreler Ve Zıt Mıknatıslanma Alanları	108
 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	 111
4.1 Watt Kaybı Testi Sonuçları	144
4.2 Sonuçlar ve Değerlendirmeler.....	147
 KAYNAKLAR.....	 149
 ÖZGEÇMİŞ.....	 150

SİMGE LİSTESİ

Φ	Manyetik akı
B	Manyetik akı yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
P_w	Girdap akımları nedeniyle oluşan güç kaybı
f	Uygulanan mıknatıslanma alanının frekansı
ρ	Özdirenç
B_{max}	Endüksiyonun maksimum değeri

KISALTMA LİSTESİ

MGE	Metal Geliştirme Endüstrisi
MAM	Marmara Araştırma Merkezi
NDE	Tahribatsız Muayene Yöntemleri

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yassı çelik ürün elde eden bir entegre tesisin genel olarak üretim akışı.....	3
Şekil 2.2 Haddelenen yassı ürünlerin kesit boyutları için genel sınıflandırma	6
Şekil 2.3 Sürekli döküm yöntemi	7
Şekil 2.4 Yassı ürünlerin haddelenmesi.	12
Şekil 2.5 Haddeleme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler	13
Şekil 2.6 Basit merdane düzenleri	14
Şekil 2.7 Destekli haddeler.....	15
Şekil 2.8 Büyük kapasiteli sıcak haddeleme tesisinde üretim akışı.	19
Şekil 2.9 Statik yeniden kristalleşmenin kinetiği.	27
Şekil 2.10 Gerinim sertleşmesi ve yeniden kristalleşmeyle meydana gelen ardışık tane incelmesi.	28
Şekil 2.11 Bir rulo çelik sacın farklı bölgelerinde çökelmiş AIN oranları.....	29
Şekil 2.12 Soğutma sırasındaki ısısal davranış.....	30
Şekil 2.13 Yassı çeliklerde haddeleme sırasında karşılaşılan başlıca kusurlar (Soldan sağa; dalgalı kenarlar, ortada enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları, timsah ağzı)	31
Şekil 2.14 Sıcak haddeleme sırasında iş merdanelerinin bükülmesi	32
Şekil 2.15 Yassı üründe enine kalınlık değişimi.	33
Şekil 2.16 Sürekli soğuk tandem haddeleme işlemi	37
Şekil 2.17 Tavlama ısıtma safhalarının metal özelliklerine etkisi.	44
Şekil 2.18 Sürekli tavlama hattı.....	48
Şekil 2.19 Sürekli döküm sırasında bir çelik sacın sıcaklık-süre grafiği.....	49
Şekil 2.20 Sıcak ve soğuk haddelenmiş saclarda karşılaşılan farklı kalınlık kesiti profilleri. .	60
Şekil 2.21 Soğuk haddeleme değişkenlerine bağlı olarak meydana gelen kusurlar.....	61
Şekil 3.1 Elektromekanik sistem	64
Şekil 3.2 Generatör olarak çalışan elektromekanik sistem.....	64
Şekil 3.3 Transformatör olarak çalışan elektro magnetik sistem.....	66
Şekil 3.4 a) Bir elektronun yörüngesel hareketi b) Bir elektronun magnetik momenti	67
Şekil 3.5 Değişik mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan a) Çubuk mıknatıs b) At nalı mıknatıs c) Akım taşıyan bir iletken d) Hava çekirdekli selonoid e) Demir çekirdekli selonoid f) Hava ve demir çekirdekli	67
Şekil 3.6 Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri	68
Şekil 3.7 Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki.....	69
Şekil 3.8 Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri.....	69
Şekil 3.9 Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan	70
Şekil 3.10 Magnetik akı tanımı	71
Şekil 3.11 Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi.....	72
Şekil 3.12 Ferromanyetizma.....	88
Şekil 3.13: Bitişik atomlardaki manyetik momentler domenler arasındaki sınırlar boyunca sürekli olarak yön değiştirir.....	89
Şekil 3.14 Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme üzerine etkisini göstermektedir.....	90
Şekil 3.15 Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histerezis döngüsünün kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatıslar	91
Şekil 3.16 Demirin mıknatıslanma yönlerini göstermektedir.....	87
Şekil 3.17 Silisyum demir için manyetikleşme eğrisi başlangıçta oldukça anizotropiktir, manyetikleşme, (100) yönleri alanla hizaya geldiğinde en kolaydır.	88
Şekil 3.18 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3-3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği)	88

Şekil 3.19 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3-3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği)	89
Şekil 3.20 Basit bir histersiz eğrisiyle histerisiz kaybının gösterilmesi.	90
Şekil 3.21 Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış halde atomların dizilimi	90
Şekil 3.22 Kalınlığı h, uzunluğu l olan ferromanyetik bir malzemeden oluşan levha.	92
Şekil 3.23 İzole edilmemiş levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas alan şekli verilmiştir	94
Şekil 3.24 Farklı tipte manyetik malzemeler için histerisiz eğrileri.....	95
Şekil 3.25 Şekilde bir laminasyon yığını görülmektedir. Tabakalar arası yalıtım oksit kaplamalardan dolayı ısı iletkenlik dik yönde paralel yöndekine göre daha fazla engellenmiştir.	96
Şekil 3.26 Silisyum ve alüminyum'un çeliğin direnci üzerine etkilerinin karşılaştırması	96
Şekil 3.27 Şekilde kayıpların levha kalınlıklarıyla ilişkisi görülmektedir..	102
Şekil 3.28 Transformatör çekirdeklerinde kayıpların klasik ayrılması.	104
Şekil 3.29 Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Çok-katlı model (N = 4).....	105
Şekil 3.30 Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Tek-katlı model (N = 1).....	105
Şekil 3.31 (a) Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerleri (b) kısmen üst üste binen dizilimin şematik gösterimi.....	107
Şekil 3.32 (a) Kapalı bir yol içeren Demir toroiddeki manyetik akı yolu, (b) hava boşluğu olan demir toroid.	109
Şekil 4.1 Kullanım ömrünü tamamlamış hurda Si'li sac laminasyon tipinde istiflenmiş	112
Şekil 4.2 Elektrik motorunun duran kısmı (stator).	112
Şekil 4.3: Elektrik motorunun dönen kısmı (rotor) istiflenmiş tabakalar.....	112
Şekil 4.4: EI tipi trafo sacı, tabaka halinde istiflenmiş.....	113
Şekil 4.5. Assan Alüminyum'dan alınan M700 ve M470 tipi orijinal silisli saclar	113
Şekil 4.6 MGE Metal'de M400 silisli sac haddelenmeden önceki hali.....	113
Şekil 4.7 MGE Metal'deki dilme makineleri	114
Şekil 4.8 MGE Metal'deki haddeleme makinası.....	v4
Şekil 4.9 Haddeleme makinasına bağlı olan mikronmetre	114
Şekil 4.10 ve 4.11 elektriksel çelik Fe -0,1Mn- 0,1Si - 0,2Cr - 0,08Ni - 0,05V - 0,03Al dekarbürizasyon tavlamasından sonra 4 saat ıslak hidrojen banyosunda 845 ⁰ C'de tutulmuş ve fırında soğutulmuş..	116
Şekil 4.12 %1 silisli elektriksel çelik sac (M45) %70 soğuk haddelenmiş ve kalınlığı yaklaşık olarak 0,6 mm'ye düşürülmüş nemli ve dekarbürize edici ortamda 3 dak. 815 ⁰ de tavllanmış..	116
Şekil 4.13 Yönlendirilmemiş C5 silisli çelik, (Fe-2,0,3Si0,44Al). Boylamsal kesit ferrit tanelerini gösterir. %2 Nital. X100.....	117
Şekil 4.14 %2,5 silisli yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik. Sürekli olarak haddelenmiş 6 mm kalınlığa %70 inceltiilmiş. Yapı uzamış ferrit tanelerinden oluşmuştur. %3 Nital. X100.	117
Şekil 4.15 Kalınlık ve soğuk haddeleme bir önceki malzeme ile aynı. 2 dak. 830 ⁰ C Yapı rekristalize olmuş ince ferrit tanelerinden oluşmuştur. %3 Nital. X100.	118
Şekil 4.16 ve 4.17 Silisli demir çubuk (silicon core iron) Fe0,4 Mn-2,5 Si-0,1P. 13,5 mm çapında 4 saat ıslak hidrojen banyosunda 845 ⁰ C'de tutulmuş ve fırında soğutulmuş. Numune çubuğun yüzeyine yakın yerden alınmış ve zayıf tane sınırı sementitini gösterir. Tamamlanamamış bir dekarbürizasyon söz konusu. İkisi de %4 pikral ile dağlanmış. 1.resim X100- 2.resim X1000.	ix
Şekil 4.18 ve 4.19 Bir öncekiyle aynı malzeme ve üretim yöntemi. 13,5 mm çaplı çubuğun merkezinden alınmış numune. Tipik bir ön dekarbürizasyon yapısı perlit kümeleri. İkisi de %4 pikral ile dağlanmış. 1.resim; X400 2.resim X1000.	119

Şekil 4.20 %2,5 Si'li yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik elektriksel sac %70 oranında 6 mm kalınlığa soğuk haddelenmiş 830 ⁰ C 'de 2 dak. Tavllanmış daha ek olarak %10 daha temper haddelenmiş. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100.....	119
Şekil 4.21 Bir öncekiyle aynı malzeme, kalınlık ve soğuk haddeleme fakat 940 ⁰ C'de 2 dakika tavllanmış. Daha yüksek sıcaklıkta tavlama rekristalize olmuş ferrit tanelerinin bir önceki resme göre daha kabalaştığı görülüyor. %3 nital . X100.....	120
Şekil 4.22: Soğuk haddeleme, tavlama ve temper haddeleme, %10 ek haddeleme. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100.	120
Şekil 4.23 Soğuk haddeleme, tavlama ve temper haddeleme, %10 ek haddeleme. Fakat 940 ⁰ C'de 2 dakika tutulmuş rekristalize olmuş ferrit taneleri çok büyük.%3 nital. X100.....	121
Şekil 4.24 Soğuk haddeleme, tavlama, temper hadde işlemi. Fakat tekrar 940 ⁰ C'ye ısıtılmış ve 2 dak. Tutulmuş. Yapı; yeniden kristalleşmiş büyük ferrit taneleri .%3 nital. X100	121
Şekil 4.25 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektriksel sac (M22) %70 oranında 0.6 mm'ye indirilmiş.Yapı: ferrit taneleri haddeleme yönünde uzamış. %10 nital. X100.....	122
Şekil 4.26 815 ⁰ C 'deki nemli hidrojen atmosferinde dekarbürizasyon tavlaması ve kuru hidrojen atmosferinde 870 ⁰ C'de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X100.....	122
Şekil 4.27 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektriksel sac (M22) %70 oranında 0.6 mm'ye indirilmiş. 815 ⁰ C'deki nemli hidrojen atmosferinde dekarbürizasyon tavlaması ve kuru hidrojen atmosferinde 870 ⁰ C'de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X100.....	123
Şekil 4.28 %3,25 Si'li soğuk haddelenmiş elektriksel sac 0,3 mm kalınlığında, 1175 ⁰ C'de tavllanmış (100) [001] etki alanınının gösteren yönlenmiş malzeme. Numune 60 Hz'de demagnetize edilmiş. Bu alan [001] yönündeki sapmanın paralelden 3-4 ⁰ 'den fazla olmadığını gösterir	123
Şekil 4.29 %3Si'li yassı haddelenmiş elektriksel çelik, %70 oranında soğuk haddelenmiş yaklaşık 0,6 mm kalınlığa. Nemli hidrojen atmosferinde 815 ⁰ C'de dekarbürizasyon tavlaması ve 1040 ⁰ C'de tane büyümesi için yapılan tavlama. Ferritin tane büyüklüğü şekil 17 ve 18 den daha büyük. %10 nital X100	124
Şekil 4.30 %3 Si'li yassı haddelenmiş yönlenmiş elektriksel sıcak bant, sıcak haddelenmiş hali. Yüzeyden (sağ) yaklaşık 0,5 mm derinliğe kadar alınmış numune. Sıcak işlem (bitirme işlemleri) sıcaklığı 900 ⁰ C'de yapı ferrit taneleri. Yüzeyde ve merkezdeki tane şekli farkı göz ardı edilmemeli. %10 nital X100.....	124
Şekil 4.31 %3Si'li yassı haddelenmiş yönlenmiş elektriksel çelik, %65 oranında soğuk haddelenmiş ve 925 ⁰ C'de tavllanmış. Yapı; yeniden kristalleşmiş ferrit taneleri. Malzeme son soğuk haddeleme işlemine ve tane kabalaştırma tavlamasına hazır durumda. %10 nital X100.	125
Şekil 4.32 Fakat son sac kalınlığına ulaşmak için %50 oranında ikinci bir soğuk haddeleme yapılmış. Ferrit taneleri uzamış ve tane-kabalaştırma tavlamasına hazır. %10 nital X100....	125
Şekil 4.33 Tane büyütücü işleminden sonra hidrojen atmosferinde 1095 ⁰ C'den 1205 ⁰ C'ye kadar tavllanmış. En üstteki çizgi iki tanenin oranını, daha alttaki çizgi ise bir tam ve iki kısmen tane gösterir. %10 nital X100	126
Şekil 4.34 %3,25 Si'li yassı haddelenmiş, yönlenmiş elektriksel sac. 0,3 mm kalınlığına kadar sürekli haddelenmiş. 1175 ⁰ C'de tavllanmış. Makrograf ikincil yeniden kristalleşmiş ferrit tanelerini kenar-köşe oryantasyonu ile göstermektedir. 5ml HCl,1ml HF,8mlH ₂ O	126
Şekil 4.35 %3Si'li çelik 0,35 mm kalınlığında. Kademeli olarak tavlandırılmıştır. 760 ⁰ C'de 1 saat, daha sonra 1065 ⁰ C'ye kadar her bir kademedede 1 saat tavlandırılmıştır. Ve sıcak bir şekilde kuru hidrojen banyosunda 3 saat tutulmuş. İkinci tane kabalaşması yaklaşık 815 ⁰ C'de başlamış. Tane büyüklüğü tipiktir. %20 HNO ₃ , sonra %20 HCl.....	127
Şekil 4.36 %3Si'li çelik 0,35 mm'ye sıcak haddelenmiş. 1150 ⁰ C'de 24 saat kuru hidrojen atmosferinde tavlandırılmış. Taneler ince fakat haddeleme yönündeki oryantasyonları çok kötü.	

Normal matriste tanelerin oryantasyonu çok iyi. Bunun nedeni inklüzyonlardan bazıları veya ölçeğe uygun haddelenmeden olabilir. %5 HF, %10 HNO ₃ .	127
Şekil 4.37 %3Si'li çelik 0,35 mm kalınlığında 1175 ⁰ C'de kuru hidrojen atmosferinde 7,5 saat tavllanmış. Numune kötü oryantasyona sahip anormal küçük tane boyutunu gösterir. Bu belki soğuk haddelenme yüzdesinin yanlış veya 1010 ⁰ C üzerine çok hızlı ısıtılmasından olabilir. %20 HNO ₃ , sonra % 20 HCl.	127
Şekil 4.38 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte küp ve yüzeylerde dağılayıcı oyukları. Görünen alan 1175 ⁰ C veya daha yüksek sıcaklıkta elde edilmiş tek bir ferrit tanesi. Fe ₂ (SO ₄) ₃ X1000.	128
Şekil 4.39 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte küp ve yüzeylerde dağılayıcı oyukları. SEM ile çekilmiş bir mikro fotoğraf. Görünen alan tek bir ferrit tanesi. Fe ₂ (SO ₄) ₃ X1000	128
Şekil 4.40 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte dağılayıcı oyukları iki oryantasyon gösteriyor. Hegzagonal oyuklar küp-köşe oryantasyonu diğerleri küp-kenar. Fe ₂ (SO ₄) ₃ X1000.	128
Şekil 4.41 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte termal yönlenmiş veya oyuklanmış ferrit tabakaları, 0,3'ten 0,1 kalınlığına soğuk haddelenmiş ve 3 saat kuru hidrojen atmosferinde 1205 ⁰ C'de tavlanaştır. Hidrojende termal dağlama 1205 ⁰ C'de.	129
Şekil 4.42 1. numune kullanım ömrünü tamamlamış %1,52 Si içeren çelik sacın kesitinden alınan görüntü. Nital x200	129
Şekil 4.43 1. numune. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,52 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital x200	130
Şekil 4.44 Numune 2. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,28 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital3 x200	130
Şekil 4.45 Numune 3. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,23 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200	131
Şekil 4.46 Numune 3. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,23 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital3x200	131
Şekil 4.47 Numune 4. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,40 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200	132
Şekil 4.48 Numune 4. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,40 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200	132
Şekil 4.49 Numune 5. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,39 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200	133
Şekil 4.50 Numune 5. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,39 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200	133
Şekil 4.51 Numune 6. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,24 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200	134
Şekil 4.52 Numune 6. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,24 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200	134
Şekil 4.53 Assan alüminyum'dan alınan M470 tipi orijinal silisli çelik. %1,13Si. Görüntü yüzeyden alınmıştır. Nital 3. x200.	135
Şekil 4.54 Assan alüminyum'dan alınan M700 tipi orijinal silisli çelik. %1,27Si. Görüntü yüzeyden alınmıştır. Nital 3. x200.	135
Şekil 4.55 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddelenme metoduyla 0,50 mm'den 0,40 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	136
Şekil 4.56 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddelenme metoduyla 0,50 mm'den 0,40 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.	136
Şekil 4.57 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddelenme metoduyla 0,50 mm'den 0,43 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	137

Şekil 4.58 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddemeleme metoduyla 0,50 mm’den 0,43 mm’ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.	137
Şekil 4.59 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddemeleme metoduyla 0,50 mm’den 0,48 mm’ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	138
Şekil 4.60 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddemeleme metoduyla 0,50 mm’den 0,48 mm’ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.	138
Şekil 4.61 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip orijinal elektriksel çelik. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	139
Şekil 4.62 %2,5 Si’li yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik. elektriksel sac %70 oranında 6 mm kalınlığa soğuk haddelenmiş 830 ⁰ C ‘de 2 dak. Tavlanmış daha ek olarak %10 daha temper haddelenmiş.	139
Şekil 4.63 Sırasıyla ilk şekil %1 silisli elektriksel çelik sac (M45) %70 soğuk haddelenmiş ve kalınlığı yaklaşık olarak 0,6 mm’ye düşürülmüş nemli ve dekarbürize edici ortamda 3 dak. 815 ⁰ ‘de tavllanmış.	xxxı
Şekil 4.64 MGE Metal’den alınan 0,43 mm’ye haddelenmiş M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,43x30mm)	141
Şekil 4.65 MGE Metal’den alınan 0,50 mm orijinal M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,50x1000mm)	xxxiii
Şekil 4.66 MGE Metal’den alınan 0,48 mm M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,48x30mm)	143
Şekil 4.67 0,5 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri	145
Şekil 4.68 1 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri	xxxvi
Şekil 4.69 1,2 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri	146
Şekil 4.70 1,4 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri	146

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Sürekli döküm işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri.....	10
Çizelge 2.2 Sürekli döküm işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri.....	10
Çizelge 2.3 Hız arttırma yöntemiyle bitiş hadde grubunda örnek haddeleme.....	22
Çizelge 2.4 Sıcak haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri	30
Çizelge 2.5 Sıcak haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri	31
Çizelge 2.6 İki farklı atmosferle yapılan yığın tavlama süreçleri ve etkileri	47
Çizelge 2.7 Alüminyumla sakınleştirilmiş iki aynı cinsten malzemenin tavlama yöntemlerine göre mekanik özelliklerinin değişimi	50
Çizelge 2.8 Farklı tavlama şartlarında % 100 yeniden kristalleşen aynı kalitedeki çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimi	50
Çizelge 2.9 Şekil değişimi yaşanması sırasında mekanik özelliklerin değişimi	54
Çizelge 2.10 Soğuk haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri	56
Çizelge 2.11 Soğuk haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri	56
Çizelge 3.1 Bazı yumuşak elektriksel malzemelerin özellikleri.....	77
Çizelge 3.2: Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları	86
Çizelge 3.3 Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları	98
Çizelge 3.4: Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri.	100
Çizelge 3.5 Elektrik çeliklerinde çekirdek kayıplarını azaltma yöntemleri.	103
Çizelge 3.6 Değişik basit geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri.	108
Çizelge 4.1 Kullanım ömrünü tamamlamış Silisli sacların kimyasal analiz sonuçları	115
Çizelge 4.2 Assan Alüminyumdan alınan orijinal silisli sacların kimyasal analiz sonuçları	115
Çizelge 4.3 MGE Metal'den alınan M400 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları	115
Çizelge 4.4 M400 çeliğinin (0,43 mm) çekme testi sonuçları.....	141
Çizelge 4.5 M400 çeliğinin (0,50 mm) çekme testi sonuçları.....	142
Çizelge 4.6 M400 çeliğinin (0,48 mm) çekme testi sonuçları.....	143
Çizelge 4.7 Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi	144
Çizelge 4.8 Watt kaybı test sonuçları	144

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sırasında dostluklarını ve yardımlarını esirgemeyen Y.T.Ü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Bitirme tezimin hazırlanması sırasında kıymetli fikir ve önerileriyle bana yol gösteren tezimin her aşamasında ilgisini ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof.Dr. Ahmet Ekerim'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmalarım sırasında bilgeliği ve dostluğu ile bana büyük destek veren hocam, Sayın Yrd.DoçDr. Öznur Çakır'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin laboratuvar çalışmalarında bana en büyük desteği ve yardımı sağlayan Sayın Gülgün Gökkaya ve tüm MGE Metal çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her döneminde, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zorluk karşısında yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca beni olumlu fikir ve eleştirileriyle destekleyen sevgili arkadaşım ve meslektaşım Sayın İlker Yapar ve Sayın Burcu Şardan'a teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada çelik sacların üretimi, silisli sacların üretimi, tipleri, özellikleri genel hatlarıyla açıklanmış, kullanım alanları, özellikle üretimde açığa çıkan enerji kayıpları, bu kayıpların en aza indirilmesi için yapılması gerekenler, manyetik özellik kalınlık ilişkisi irdelenmiş ve bu çeliklerin soğuk haddelenebilirliği, haddeleme sırasında meydana gelen hatalar, üretim şartlarının malzemeye etkileri konuları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Çalışma üç ana bölümden oluşmuştur. Birinci bölümde çelik sacların genel üretim prosesi ve bu prosesin özellikle metalurjik açıdan sonra üretim şartları açısından, üretim sırasında meydana hatalar ve bu hataların yapıya ve mikro yapıya etkileri açısından incelenmiş sıcak ve soğuk haddeleme prosesleri her yönden ele alınmıştır.

İkinci bölümde elektrik çeliklerinin önemli bir grubu olan silisli çeliklerin üretim yöntemlerinden, tiplerinden, kimyasal bileşimlerinden, manyetik özelliklerinden ve bu özelliklerin nasıl geliştirilebildiğinden ana hatlarıyla bahsedilmiştir. İkinci bölümün devamında ise üretim yöntemlerinin bu çeliklerin manyetik ve mekanik özelliklerine etkilerinden, uygulanan yüzey işlemlerinden ve bu işlemlerin işlevlerinden bahsedilmiştir. Sonra çekirdek malzemelerdeki güç kayıplarından kayıplara etki eden faktörlerden, manyetik özellik kalınlık ilişkisinden, transformatör çekirdeklerinin verimliliğini etkileyen diğer faktörlerden ve bu faktörlerin minimize edilmesi için yapılması gerekenlerden de bahsedilmiştir.

Üçüncü bölüm deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında kullanım ömrünü tamamlamış (hurda) 6 adet silisyumlu çelik sac toplanmış ve Assan Alüminyum firmasından da aynı oranlarda silisyum içeren iki adet orijinal M470 ve M700 tipi Si'lu çelik sac alınmıştır. Bu çelik saclar çeşitli metalografik işlemlere tabi tutulduktan sonra mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamalar aynı zamanda ASTM'deki aynı oranlarda silisyum içeren çeliklerin mikroyapıları da temel alınarak sürdürülmüştür. Deneysel çalışmanın asıl amacı olan ikinci aşamasında ise MGE Metal firmasından iki grup halinde alınan M400 tipi silisyumlu sac yine MGE Metal fabrikasında soğuk haddeleme işlemine tabi tutulmuştur. M400 tipi haddelenen çeliğin ve haddelenmemiş orijinal sacın çekme testleri de MGE Metal fabrikasında yapılmıştır. Daha sonra haddelenen bu parçalar Tübitak MAM araştırma merkezine watt kaybı testi yapılmak üzere tarafıma götürülmüştür. Watt kaybı testini takiben bu üç farklı kalınlıktaki M400 tipi elektriksel çeliğin mikro yapısı da incelenmiştir. Ayrıca bütün numunelerin kimyasal analizleri de yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışma, sonuçların değerlendirilmesi ve referansların tanıtılmasıyla sona ermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik çeliği, watt kaybı, soğuk haddeleme

ABSTRACT

The study was carried to explain production of steel sheets, production of silicon steels, types of silicon steels, their properties and especially energy losses which occur during production, preventions for the reduction of these losses and the relationship between magnetic properties and thickness. This study was particularly explained to understand if cold rolling process could apply to these types of steel, the defects which occur during the cold rolling process and the effect of production condition to the material.

The study composed of three parts. In the first part, general production process of these steels are discussed in general form also explained by the side of metallurgical aspects. After that the defects which occur by cold rolling process and the effects of these defects to the structure and microstructure was also reported. At the end of this part, cold and hot rolling processes are examined entirely.

In the second part, the subjects of production methods of silicon steels which is an important group of electrical steels, types of these steels, chemical composition of these steels, magnetic properties of these steels and how these features can be changed was also defined. At the attendance of these part, the effects of production methods to the magnetic and mechanical properties of these steels, the process and function of surface treatments which are applied are clearly discussed. Also the theoretical part completed by explaining the reasons which effect the losses in transformer cores, the relationship between magnetic properties and thickness, and efficiency factors which affect transformer cores and the preventions which to minimize these factors.

The third part allocated to experimental studies. At the first stage of this part 6 pieces of scrap material which are completed their physical life are picked from junk collector. And the steels which have the same amount of silicon are bought from Assan Alüminyum firm. After metallographic treatments are applied to these steel sheets, microstructures of the steels are compared both with the original ones and with the structures in the ASTM Handbook. At the second and main stage of this experimental study, M400 type silicon steel sheets are taken from the MGE Metal Company and the sheets are exposed to cold rolling process again in the same factory. The tensile strength values of cold rolled and non-rolled M400 type silicon steel are also measured at the same factory. And then the group which are cold rolled are taken to the TUBITAK MAM scientific research center for core loss test. Following the core loss test, microstructures of the specimens of three different thickness are analysed. Also the chemical analyses of all specimens are appraised by defining the effects of microstructures. The study is concluded with the evaluation of the results.

Keywords: Electrical steel, core loss, cold rolling

1. GİRİŞ

Transformatör çekirdeklerinde ve dönen elektrik makinelerinde ucuz ve az kayıplı elektrik çeliklerinin kullanımına yönelik dünya genelinde talep artmaktadır. Geleneksel Si-Fe alaşımları çekirdek maddesi olarak kullanılmaktadır, fakat son yıllarda bazı alternatif maddelerin gelişmesi söz konusu olmuştur. Bölgesel kristalleri (Grain) yönlendirilmiş % 3 Si-Fe transformatör çekirdeklerinde kullanılmaktadır ve yönlendirilmemiş Si-Fe ya da demir, motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılır.

Elektrik uygulamaları için manyetik malzemeler yani ferromanyetik malzemeler, bir elektrik akımı malzemeyi geçtiğinde oluşan manyetik alanın büyütülmesi için kullanılır. Uygulamaları elektromıknatıslar için nüveleri, elektrik motorlarını, transformatörleri, jeneratörleri ve diğer elektriksel ekipmanları içerir. Bu cihazlar, nüve malzemenin histerisiz döngüsünü sürekli olarak devretmesi için alan değişimini faydalı hale getirir.

Elektrikli makinaların dizaynının ilk zamanlarından beri, çekirdekteki kaybolan yararlı enerji, çelikten yapılan çekirdeklerin birçok tabakadan veya katmandan oluşacak şekilde üretilmesiyle belirgin bir şekilde azaltılmıştır.

Tabakalar eddy akımı hatlarını sınırlar ve büyük anlamda eddy akımı kayıpları azaltılır. Katmanlar inceldikçe, kayıp azalır. Bu sebepten, yassı-düz haddelenmiş elektriksel çelikler, katmanları üretmekte kullanılır, istiflendiğinde ve uygun bir şekilde yerleştirildiğinde, elektrikli cihazlarda manyetik çekirdekler olarak kullanılırlar.

Demire silisyum ilavesi, Uygun bir işleme uğrayabilen çok küçük histerisiz döngülü mükemmel bir manyetikleşmeye sahip bir alaşım üretebilir. Silisyumun anizotropik manyetik davranışı, küçük histerisiz döngüleri, silisyumun kristal yapısı, en kolay manyetikleşme yönüyle hizaya geldiğinde elde edilir. Haddelene ve ardından tavlama sonucu, her tanede (100) yönünde oluşan bir levha dokusu hizaya gelir. Silisyum demir (100) yönlerinde daha kolay manyetikleştiği için histerisiz ve enerji kaybı azdır.

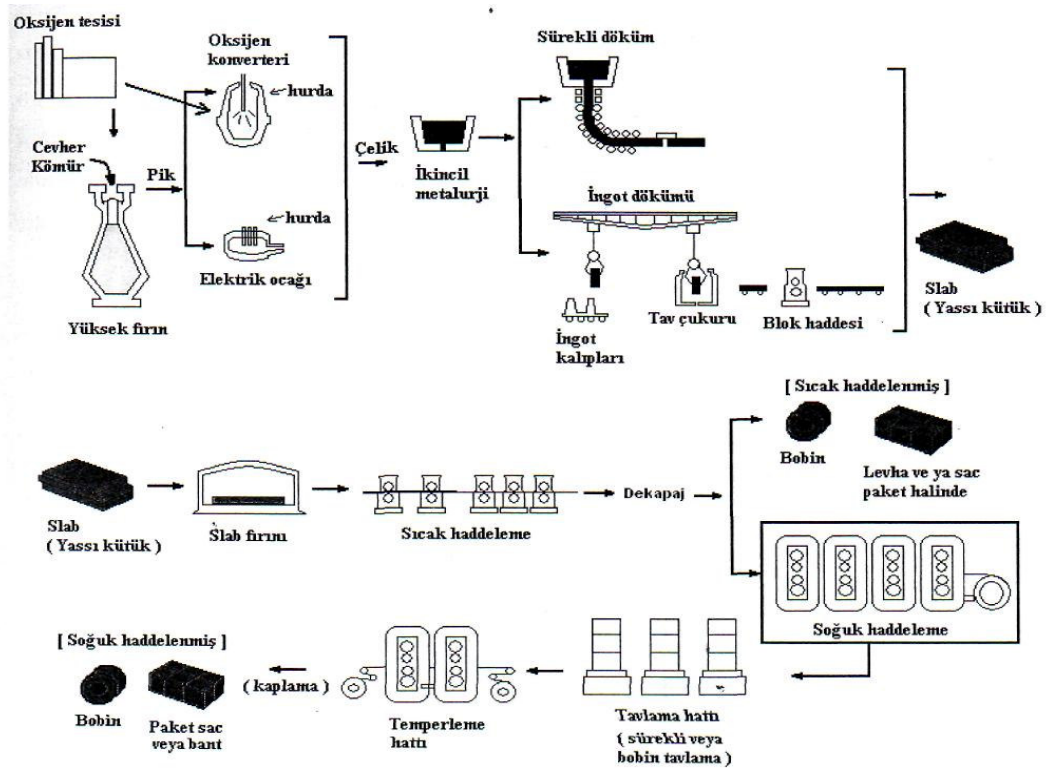
Neticede demire silisyum ilavesi ile elektriksel direnç artar, tane yapısında tercihli yönelmenin gelişimini sağlar, yüksek geçirgenlik ve düşük histerisiz kayıpları sağlar. Fe-Si malzemeler genellikle haddelene ve tavlama yöntemiyle sac şeklinde üretilirler. Manyetik özellikler kalınlıkla doğrudan ilişkilidir. Malzemenin kalınlığı arttıkça kayıplar da artar. Kayıpları önlemenin yolu düzgün ve kaliteli bir tavlama ve üretim prosesi ile mümkün olduğu kadar küçük sac kalınlıklarıdır. Çünkü küçük sac kalınlıkları eddy akımı kayıplarını önler. Ek olarak tabakaların yalıtılması konusu da çok önemlidir çünkü eğer tabakalar yalıtılmazsa bu

kadar küçük sa kalınlıkları bir iŖe yaramaz çünkü katmanlandırılmıŖ salar akım verildiğinde tek parça gibi davranır ve kayıplar aynı toplam kalınlıkta iŖlem görmemiŖ bir parçanın ki ile eŖdeęer olur. Bu yüzden kalınlık, izolasyon, tavlama gibi üretim aŖamasındaki her türlü iŖlem, silisli çeliklerin kalitesinde önemli rol oynar.

Bu alıŖmada, silisli çeliklerde en önemli faktör olan watt kaybı ve histerisiz kaybı bileŖenini en aza indirme yolları aranmıŖ bu nedenle bir elektriksel çeliğin soğuk haddelenmesi sırasında uğradığı kayıplar ve kalınlık azalması nedeniyle manyetik özelliklerdeki olumlu geliŖmeler, soğuk haddeleme prosesinin manyetik özelliklerin yanı sıra mekanik özelliklere olan etkisi yapılan testlerle açıklanmaya alıŖılmıŖtır. Manyetik özellikler watt kaybı testi ile belirlenmeye alıŖılmıŖ ve beklenen sonuçlar elde edilmiŖtir. Ayrıca kullanım ömrünü tamamlamıŖ silisli çelikler ile orijinal çeliklerin mikro yapıları karşılaŖtırılmıŖ. Bu kıyaslamalarda aynı zamanda ASTM'den alınan mikro yapı örnekleri de kullanılmıŖtır.

2. ÇELİK SACLARIN ÜRETİMİ

Çelik saclar, ingot dökümü veya ingot dökümünden daha üstün teknolojiyi bünyesinde barındıran sürekli döküm tesislerinden elde edilen dikdörtgen kesite sahip, slab adı verilen ara mamul çeliğin haddelenmesi ile üretilirler. Üretim, demir cevherinden çelik saca kadar çok aşamalı olup sayıları oldukça fazla olan, birbirlerinden farklı üretim yapan tesislerin organizasyonlarının yardımıyla gerçekleştirilerek, devasa büyüklükte bir fabrikayı gerektirmektedir. Şekil 2.1'de, yassı çelik elde edebilmek için yapılan üretimlerin genel olarak aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Yassı çelik ürün elde eden bir entegre tesisin genel olarak üretim akışı (Değirmenci, 2006)

Yüksek fırın ürünü olan pik, 4 ila 6 saatte bir uygun yükseklikte açılan delikten kuru kum yatağına kaba ingot olarak dökülür veya sıvı metal taşıyan özel arabalar (torpido) ile çelik tazeleme fırınlarına gönderilir. Pik, saf demir değildir, zira redükleme sırasında cevherden, katkılardan ve koktan; doymaya yakın oranda karbon, yüksek oranlarda kükürt, fosfor, mangan ve silisyum gibi elementler içerir (Değirmenci, 2006)

Çelik eldesinin esası, bahsedilmiş olan bu yabancı elementlerin ham demirden arındırılmasıdır ki bu işleme tazeleme denilmektedir. Bu tazeleme, Bessemer-Thomas konverterlerinde, Siemens-Martin ocaklarında, oksijen konverterlerinde ve elektrik ark-endüksiyon ocaklarında yapılmaktadır. Ancak günümüzde çelik eldesi, daha kaliteli ürün verdiklerinden ve verimli çalıştıklarından dolayı genellikle, Şekil 2.1'de de gösterildiği gibi iki tip çelik tazeleme ocağında (oksijen konverteri ve elektrik ocağı) gerçekleştirilmektedir (Değirmenci, 2006).

Konverterde veya ocakta üretilen çelik, potalara alınır ve bu potalarda ikincil metalürji işlemlerinden geçer. İkincil çelik yapımı da denilebilen bu yöntem, gaz giderme, dekarbürizasyon, deoksidasyon, alaşımlama, kükürt giderme, sıcaklık ayarlama ve çeliği homojen hale getirme işlevlerini barındırır. Bu işlemlerde, çeliğe istenen kimyasal alaşım elementleri katılır ve böylece çeliğin kimyasal içeriği ayarlanarak, satın alınacak nihai yassı çelik mamulün kalite standardı özelliklerinden birinin ortaya çıkarılmasında ilk adım atılmış olunur (Değirmenci, 2006).

Slabların elde edilmesinde kullanılan iki yöntemden biri olan sürekli dökümün temel prensibi, ergimiş metali dipsiz, alt kısmından soğutulan bakır bir kalıba dökerek, kalıp cidarlarında kuvvetli bir kabuk oluşturmak ve bu kabuk içersinde katılaşma tamamlanana kadar sıvı metali muhafaza etmektir. İşlem adından da anlaşılacağı gibi sürekli yani kesintisiz devam eder. İkinci ve yıllardır süregelen yöntem olan ingot dökümünde ise slab, blok halinde parça parça dökülen ara ürünlerden haddelenerek elde edilir. Uygulamada ingot içinde katılaşma sonucu ortaya çıkan segregasyon ve baş kısmında görülen kendini çekme lunkeri, kalitesiz çeliğin oluşmasına sebebiyet verir. Kaliteli çeliklerin eldesi için ise ayrıca sakınleştirme işlemlerine gereksinim duyulması, işlemde ek maliyet teşkil eder. Aynı zamanda yüksek kapasiteli, büyük yatırım gerektiren blok haddeleri kullanılmaktadır ki bu sürekli döküme göre dezavantajdır. Zaman tasarrufu ve işçilik de sürekli dökümün diğer bir avantajıdır. Bunlara ek olarak, ingot dökümünde her işlem kademesinde yeni kayıplar ve ıskartalar oluşumu, üreticileri, daha verimli olan sürekli dökümle slab üretimine yönlendirmiştir. Dolayısıyla bugün slab üretimi yapan büyük firmaların neredeyse tamamı, sürekli döküm yöntemini tercih etmektedirler (Değirmenci, 2006).

Sürekli döküm esnasında kesilerek alınan veya ingot dökümünden sonra blok haddelerinden elde edilen slablar, sıcak olarak haddelenmeden önce bir takım hazırlık işlemlerinden geçirilirler. Haddelenenin her safhasında yüzey şartlarının önemi büyüktür. Bu nedenle haddelenecek malzeme yüzey kusurlarından tamamen arındırılmış olmalıdır. Genellikle ingotlar blok haddesinden önce ısıtılmak amacıyla tav çukurlarına yerleştirilmek üzere zaten

sıcak durumda sevk edilirler. Bu nedenle çoğu zaman ingotlara herhangi bir yüzey temizleme işlemi uygulanmaz. Yüzey kusurları, blok hadde tezgahlarında üretilen ve yan mamul niteliğinde olan slablara uygulanan yüzey temizleme işlemleri ile giderilir. İngotlar, nadir olarak, bazı özel çelikler için, sıcak durumda veya soğuduktan sonra yüzey temizleme işlemine tabi tutulabilmektedir. Ayrıca ingotların katılaşması sırasında sıvı seviyesinin düşmesiyle oluşan kafa lunkerinin kesildiği de belirtilmelidir (Değirmenci, 2006).

Sıcak haddelemeden önce malzemenin ısıtılması da önemli bir üretim aşamasıdır ve çeliğe en iyi plastik özelliklerin kazandırılması ve hadde mamulünün istenen kaliteye sahip olması amaçlarını taşır. Isıtma işleminin başlıca iki parametresi vardır, bunlar; sıcaklık ve süredir. Malzemeye bağlı olmak üzere gerek sıcaklık aralığının seçilmesi, gerek bu sıcaklıkta tutma süresi doğrudan doğruya mamule yansıyan sonuçlar doğurur. En yüksek ısıtma sıcaklığı solidüsün 100 – 150°C altında olmalıdır. Tutma süresinin gereğinden uzun olması ise yakıt harcamasını arttırdığı gibi örneğin çelik malzemede demir kaybına ve dekarbürizasyona yol açar (Değirmenci, 2006).

Haddeleme işleminin başlıca parametrelerinden biri sıcaklıktır. Haddelemenin başlangıcında sıcaklık malzemeye bağlı olmak üzere olabildiğince yüksek seçilmelidir. Bu sıcaklık solidüsün 100 – 200°C altındadır. Haddeleme sonundaki sıcaklık ise, ötektoid altı çelikler için A₃ sıcaklığının 50 – 100°C, ötektoid üstü çelikler için de A₁ sıcaklığının biraz üstünde olmalıdır. Genel olarak, haddeleme sonundaki sıcaklığın mamulden istenen özelliklere göre seçildiği söylenebilir (Değirmenci, 2006).

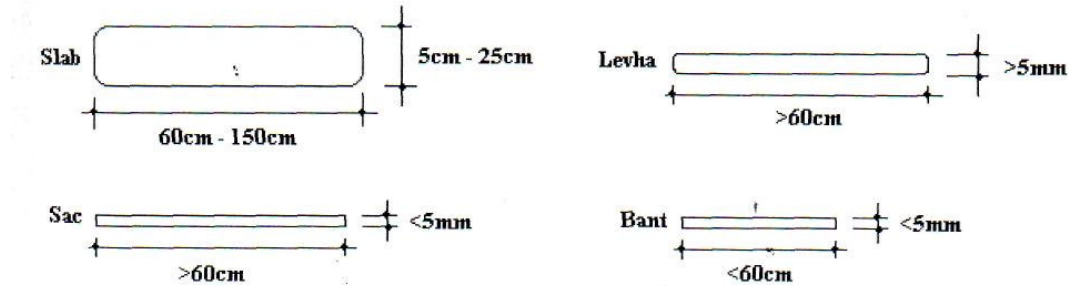
Haddelenen malzeme, kalite kontrol amacıyla bir seri tamamlama işleminden geçirilir. Bu işlemlere örnek olarak doğrultma, yüzey temizleme, Ultrasonik ve yüzey çatlak test cihazlarından geçirme gösterilebilir. Yüzeylerdeki oksit tabakalarının temizlenmesi, sıklıkla asitleme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemede iç kusuru bulunan kısımlar kesilerek ayrılır. Yüzey çatlakları ise kabuk soyma veya taşlama ile giderilir (Değirmenci, 2006).

Bu işlemlerden sonra, mamuller sıcak haddelenmiş olarak piyasaya sunulacaksa bobin hazırlama hattına gönderilir. Sıcak bobin hazırlama hattı, sıcak haddelenmiş ruloların baş ve sonlarındaki tolerans harici kısımların kesildiği ve yüzey düzgünlüğü için temperleme işleminin yapıldığı yerdir. Daha sonra saclar, makaslarda istenilen boylarda kesilirler, ya da dilme hatlarında bölünerek bant rulo şeklinde tüketicilere sunulurlar (Değirmenci, 2006).

Diğer taraftan soğuk haddelenmiş sacların eldesi için işlem devam etmektedir. Dekapaj hatlarında yüzeylerindeki oksit tabakası temizlenip yağlanan sıcak haddelenmiş rulolar, tandem hatlarında soğuk olarak istenilen kalınlıklara haddelenir ve yeniden sarılırlar. Soğuk haddeleme sonucu oluşan oldukça gevrek yapının giderilmesi amacıyla soğuk haddelenmiş rulolar, tavlama hattındaki fırınlarda belirlenen tavlama sıcaklığına kadar ısıtılıp bekletilirler.

Bu yöntem rulo tavlama yöntemidir. Ayrıca aynı işlemlerin, soğuk haddehanede sürekli asitleme, tandem hattında soğuk haddeleme ve hemen ardından sürekli tavlama hattında kesintisiz olarak tavlama şeklinde ardı ardına yapılabildiği düzenekler de mevcuttur. Çelik saclara son yüzey özelliklerini kazandırmak amacıyla, tavlano soğurulan rulolar temperleme hattında temperlenirler. Son olarak, soğuk haddelenmiş çelik saclar; kalay, krom, çinko veya çinko-demir alaşımı gibi kaplama malzemeleri ile kaplanmak amacıyla kaplama hatlarına sevk edilirler ve makaslarda istenilen ebatlarda kesilir ya da dilme hatlarında dilimlenip paketlenirler.

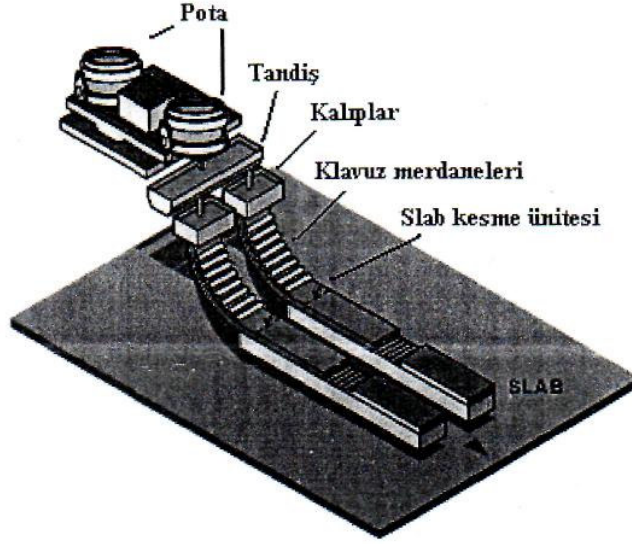
Bir entegre tesiste imal edilip piyasaya sunulan yassı çelik ürünler, kesit geometrilerine göre, slab, levha, sac ve bant olmak üzere dört genel gruba ayrılırlar. Haddelenen slabların yada slabtan haddelenerek elde edilen daha küçük kesitli diğer grup yassı ara ürünlerin tanımlanmasında kesit boyutları ile ilgili değerlerin kesin sınırları olmamasıyla birlikte Şekil 2.2'deki gibi bir genellemenin yapılması mümkündür (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.2 Haddelenen yassı ürünlerin kesit boyutları için genel sınıflandırma

2.1 Sürekli Döküm Yöntemi ile Slab Üretimi

Sürekli döküm yöntemi, ingot içinde katılaşma sonucu ortaya çıkan segregasyon ve baş kısmında oluşan kendini çekme lunkerini ortadan kaldırmak suretiyle, gerek hadde verimim ve gerekse de çeliğin kalitesini arttırmak amacıyla geliştirilmiş yöntemdir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Sürekli döküm yöntemi

Özellikle 1970'li yılların öncesine kadar, yassı çelikler, 500 mm civarındaki kalınlıklarda ingot olarak dökülürlerdi. Soğutma işleminden ve kalıplardan alınma işlemlerinden sonra ingotlar, 1250°C sıcaklıklara kadar ısıtılırlar ve tekrar soğuyana kadar 200-250 mm kalınlıklarda olan slablara haddelenirlerdi. Ancak 1970'lerden sonra sürekli dökümün gelişimiyle beraber, ingot haddeleme işlemi önemini yitirdi ve slablar doğrudan, 200-250 mm kalınlıklara kadar sürekli işlem olarak dökülmeye başlandı (Değirmenci, 2006).

Sürekli dökümün temelinde, sıvı haldeki çeliğin, alt kısmı su ile soğutulan bakır bir kalıba dökülmesi işlemi yatar. Katılaşma hızına paralel olarak alt kısım aşağı doğru hareket eder. Kalıbın altından dışına çıkan ingot sürekli olarak soğutulur ve tam katılaştıktan sonra istenen boylarda kesilir. Bu şekilde üretilen slabda katılaşma lunker, gözenek oluşmaz, segregasyon yok denecek kadar azdır (Değirmenci, 2006).

2.1.1 Pota, Tandış ve Kalıplar

İçleri refrakter malzeme ile döşenmiş potalar, çeliğin, çelik üretim ocaklarından alınarak, sürekli döküm bölümünde tandışlara boşaltılması amacıyla kullanılırlar. Bölmeli, ibrik şekilli veya silindirik olmak üzere başlıca üç yapıda bulunurlar. Üstten ve alttan döküm yapan çeşitleri vardır. Alttan dökmenin avantajları, cürufun sıçrama yoluyla metale karışmasını önlemesi, dolayısıyla mamul kalitesini iyi yönde etkilemesi ve döküm hızının kontrolünü

kolaylaştırmasıdır. Potalar, ray üzerinde, vinçle veya kaldıraçla taşınabilirler (Değirmenci, 2006).

Şekil 2.3'de görülen pota taretı üzerinde iki pota kullanımı oldukça yaygındır. Pota taretı karşılıklı olarak iki pota taşıyabilmekte, kendi çevresinde dönebilmekte ve sahip olduğu hidrolik sistem sayesinde potaları indirip kaldırabilmektedir. Birinci pota, altındaki nozul sayesinde tandişı sıvı çelikle beslerken, sıvıyla dolu ikinci pota döküme hazırlanmaktadır. Bu sayede tandişin sıvı çelikle sürekli dolumu sağlanmaktadır (Değirmenci, 2006).

Tandişin görevleri, sıcak metalin, slab kalıbına kesintisiz olarak girebilmesini mümkün kılmak, kalıba giren çelik miktarını ayarlamak Ve cüruf ile metalik olmayan kalıntıların ve malzemelerin slab kalıbına geçmesini engellemektir. Bu görevlerini yerine getirirken, çeliğin ısısının tandiştten geçerkenki kaybının en aza; indirgenmesi ön koşuldur. Bu nedenle, dökümden önce tandiş, 1050-1250°C sıcaklıkları arasında üç saat gibi bir süre gazla yada mazotla ısıtılır.

Tandişlerin iç duvarları sağlamlık bakımından büyük önem teşkil etmektedirler. Bu yüzden, tuğla yerine, refrakter çamurlarının basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen, 80-100 mm'lik duvarlar kullanılır.

Döküm sırasında tandiştten kaynaklanan aksaklıklar şöyle sıralanabilir. Tutucunun hatalı üretilmiş olması, yerinden sapması ve tutucu borusunun sıcakta dayanımının yetersiz olması sonucu, döküm başlangıcında tutucu, nozul ağzını tamamen tıkamayabilir. Tıkacın aşınmasının ve refrakter özelliğinin kötü oluşu nedeniyle, döküm bitiminde de tutucu, nozul kanalını kapamayabilir. Nozul yerleştirmedeki hatalar da istenmeyen hallerde metal sızmasına neden olabilir.

Slab kalıpları, slablara ilk şeklini vererek ve yüzeylerinde kabuk oluşumuna yardımcı olarak sürekli döküm yönteminde mühim bir yer teşkil ederler. Örneğın bu kısımda oluşabilecek bir hata, döküm sisteminin ilerleyen kısımlarında artarak devam eder.

Kalıptan geçerek aşağı doğru akan çelik dökümün dağılmaması için, dış kısmının çabuk soğuyarak bir kabuk oluşturması gerekir. Bu nedenle, kalıbın çalışma bölgesinin, yani çelikle temas eden bölgenin ısıl geçirgenliğı mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Dolayısıyla, kalıp cidarları daha çok bakırdan imal edilir. Fakat nikel-krom alaşımları da kalıp malzemesi olarak denenmiştir. Kalıp duvarlarının arka tarafı, yeterli mukavemeti sağlamak amacıyla, çelik ceketlerle desteklenir. Kalıp yüksekliğı 1200 mm civarında, bakır duvarlar ise 50 –70 mm et kalınlıklarındadır. Dökümün başlangıcında oluşan kabuğun bakır duvarlara

yapışmaması ve döküm sürekliliğinin muhafaza edilmesi için bir titreşim mekanizması uygulanır ve kalıp cidarları oksidasyonu azaltmak için yağlanır.

Ayrıca elektromanyetik kalıp karıştırma düzenekleri de sürekli döküm kalıplarının donanımlarından biridir. Homojen bir iç yapı elde etmede bu karıştırma düzeneklerinin önemi büyüktür (Değirmenci, 2006).

2.1.2 Kılavuz Merdaneleri ve Slab Kesme Ünitesi

Kılavuz merdaneleri, döküm esnasında ürünü sabit bir hızla aşağıya doğru çekmek ve yatay doğrulamak üzere tasarlanmışlardır. Dikey tip sürekli döküm makinelerinde bu kısmın yalnız çekme görevi vardır.

Çekme merdaneleri büyük yüke maruz kaldıklarından dolayı, dayanıklı bir konstrüksiyona sahip olmalıdırlar. Ancak merdaneler arası uzaklığın azalması ve segmanlar arası bırakılan küçük mesafeler, merdane basma düşen gerilmeleri azaltmaktadır ve işlemin daha iyi şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Makinenin ağır ana gövdesi tüm kuvvetleri doğrudan temele aktarır.

Dökülen çelik kalitesine bağlı olarak, slabın soğutulma işlemleri, optimum bir sıcaklık grafiğine uymalıdır. Bu amaçla, ayarlanabilir ve hassas bir su püskürtme kontrolüne gereksinim vardır. Döküm hızı, katılma zamanı, kalite ve boyut gibi döküm parametreleri proses bilgisayarı tarafından işlenir ve bağımsız kontrol çevrimlerine iletilen kumanda sinyallerine dönüştürülür .

Slab haline gelen çelik, belli bir uzunluğa ulaştığı zaman kesilerek yarı ürün olarak slab bekletme depolarına yada slab ısıtma fırınlarına gönderilir. Belli boyutlarda yapılan bu kesme işlemini, hidrolik veya gazla kesme esaslı çalışan mekanizmalar gerçekleştirir (Değirmenci, 2006).

2.1.3 Slabların Yüzey İle İçyapı Temizliği Ve Kalite Kontrolü

Çelik sacların şekillendirilebilirliğini etkileyen malzeme parametrelerinden mekanik özelliklerinin aynı rulo içindeki değişimlerinin nedenleri hususunda, malzeme iç temizliği seviyesinin önemi büyüktür. Nihai ürün iç temizliğinden kasıt, kalıntıların mevcudiyeti, boşluklar, çatlaklar ve segregasyonlardır.

Bu tip kusurların oluşum nedenleri araştırılacak olursa, yassı ürünün imalatının ilk aşamalarına, yani sürekli döküm prosesinde döküm sırasındaki işlemlerin incelenmesine odaklanılır. Çünkü slabda başlayan bir kusur, denetlenip yok edilemezse, takip eden

haddeleme operasyonlarında artarak devam eder. Bu nedenle, sürekli döküm esnasında yapılan kontroller çelik sacların kalitelerini belirlerler. Çizelge 2.1 ve 2.2'de sürekli döküm sırasında yapılan kontroller ve ölçüm teknikleri verilmektedir.

Çizelge 2.1 Sürekli döküm işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri

İşlem Kontrol Değişkenleri	Ölçme Tekniği
Pota ve tandiştaki çelik sıcaklıkları	Termokupul çubuklar
Kalıp soğutma suyu akışı ve sıcaklığı	Termokupul proplar
İkincil akış kontrolü	Akış ölçer
Çekme hızı	Mekanik duyarga
Kalıp düzeyi	Optik ölçüm, gama ışıını ve Eddy-akımı ölçümü

Çizelge 2.2 Sürekli döküm işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri(Değirmenci, 2006).

Ürün Kalite Değişkenleri	Ölçme Tekniği
Segregasyonlar	Numune alımı (sülfür baskısı, X-ışını mikro flüoresan)
Kalıntı içeriği	Numune alımı (MIDAS tekniği ile ölçüm)
Yüzey durumu	Eddy-akımı kontrolü, Manyetik parçacık denetimi
Yüzey sıcaklığı	Pirometre

Slablarda mevcut bulunan kusurlar, yüzey ve içyapı kusurları olarak ikiye ayrılır. Yüzey bozukluklarından gözle görülür olanların, elle idare edilen gazlı kesicilerle slabtan koparılması, uygulanan alışılagelmiş yöntemdir. Gaz alevi ile ergitme işlemi, öncelikle şüpheli görünen yüzeylerde yapılır. Söz konusu işlem sonucunda yüzeyin hemen altına kadar etki etmiş hatalar ortaya çıkarılmaktadır. Sonuçta 10 ila 40 mm derinliğe kadar değişen kontrolde bozukluk bulunmazsa o bölge sağlam kabul edilir. Operasyonların sürekliliği nedeniyle denetimler sıcak olarak sürdürülmektedir ve burada tespit edilen hatalar geri beslemeli olarak sürekli döküm prosesine bildirilir. Kontrollerin otomatik olanlarının en uygunu "Eddy-akımı" testidir. Duyargaların uygun yerleştirilmesi ile 1 mm derinliğinde, slab boyuna ve enine göre 50 ila 100 mm uzunluğunda çatlaklar belirlenir. Ancak bu gibi yöntemlerde teknik uygulama zorluklarının varlığı, yöntemlerin endüstriyel kullanımlar için yeterince hazır olmaması sonucunu doğurur (Değirmenci, 2006).

Sürekli döküm yönteminde kalıntı (inklüzyon) miktarları, potadan tandiçe ve tandiştan kalıba döküm sırasında değişmektedir. Metal kirliliğinin önlenmesi ve kalıntıların yüzdürülerek sistemden uzaklaştırılması gereklidir.

Metal kirliliğini azaltmak ya da yok etmek için yapılması gerekenler aşağıdaki gibidir.

- Metal atomlarıyla tepkimeye girmeyen ısıl dayanımlı pota, tandiç, kalıp malzemeleri kullanımı,
- Cüruf algılayıcıları ile cürufun potadan tandiçe taşınımını sınırlandırmak,
- İnert cüruf örtüleri kullanarak tandişteki ve kalıptaki metal yüzeyinin dış etkenlere kapatılması,
- Tandiş donanımları içinde kalıntı yüzdürülmesine yardım edecek cihazlar kullanımı,
- Derin ve çok bölmeli tandiş tasarımları kullanarak cürufun kalıba geçmesinin önlenmesi.

Slabda oluşan kalıntıların belirlenmesinde en uygun yöntem, Mannesmann tarafından geliştirilen ve akustik tarama esaslı olan "Midas" tekniğidir. 20 MHz'lik çevirici için kusur tespit sınırları 60 mikron, 50 MHz'lik çevirici için ise 30 mikrondur. Tüm testler, nihai slablardan alınan rutin örnekler üzerinde yapılır.

2.2 Sıcak Haddelme

Sıcak haddelme, metal ve alaşımlarının sünekliklerinin yüksek olduğu yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan deformasyon işlemidir. Çeliklerin haddelenmesi sıcak haddelme ile başlar ve gerekli olduğu taktirde bu işlemi soğuk haddelme takip eder. Sıcak haddelmede slablara verilen deformasyon miktarı bir hayli yüksektir. Örneğin, 20-25 cm kalınlığındaki bir slab sıcak haddelenerek, 2,5 mm kalınlığında sac haline gelebilmektedir.

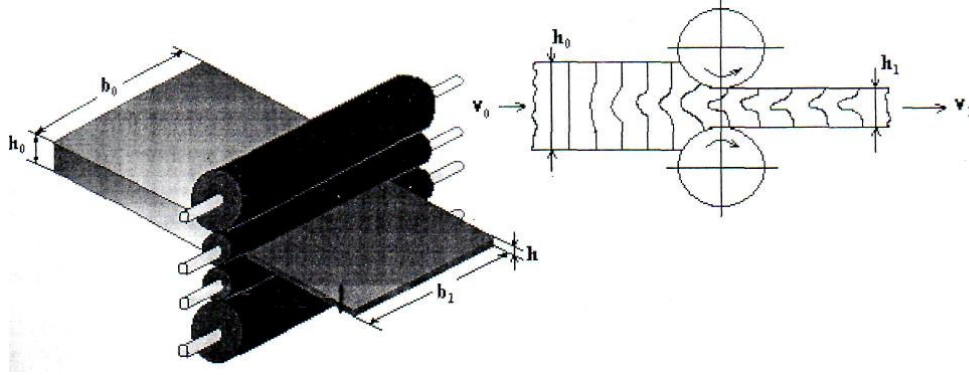
Sıcak haddehane bölümü fırın bölgesi, ön hadde bölgesi ve şerit hadde olarak üç ana ünitelerden oluşur. Bu üç ünite fırın bölgesi; slab fırını, slab itici ve slab alıcı birimlerinden, ön hadde bölgesi; dik tufal kırıcı, yatay tufal kırıcı, bağımlı kenarcı ve tersinir kaba hadde birimlerinden ve son olarak da şerit hadde; kırpıntı makası, sıkma merdaneli tufal atıcı, altılı şerit hadde ve duşlu masalar birimlerinden oluşmaktadır (Değirmenci, 2006).

2.2.1 Yassı Ürünlerin Haddelenme Prensipleri

Yassı ürün haddelenme işlemi, iş parçasının eksenleri etrafında ve birbirlerine zıt yönde dönen merdanelerin (silindirlerin) arasından geçirilerek, uygulanan basma kuvvetlerinin etkisiyle kalınlığının düşürüldüğü plastik şekil verme işlemidir (Şekil 2.4)

Haddelenme işlemi ile slabın kalınlığı h_0 'dan h_1 'e azalırken, uzunluğu ve genişliği artar. Fakat boy, genişliğe oranla çok fazla artmaktadır. Kalınlık doğrultusundaki gerinim, aşağıdaki 2.1 eşitliğinden bulunur:

$$\varepsilon_1 = \frac{h_1}{h_0} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 Yassı ürünlerin haddelenmesi (Değirmenci, 2006).

Plastik şekillendirmede hacim sabitliği kuralı nedeniyle kalınlıktaki inceltme, uzunluk (ε_2) ve genişlikteki (ε_3) artış ile karşılanır.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0, \quad \varepsilon_3 = 0 \quad (2.2)$$

Genişlik artışı sadece bölgesel olarak ve kenarlara yakın yerlerde, köşe yakınlarında gözlenir. Merdanelerle malzeme arasındaki sürtünme kuvvetleri, giriş bölgesinde malzemeyi merdaneler arasına sürüklemeye, çıkış bölgesinde ise merdaneler arasında tutmaya çalışır. Haddelenme işleminin başlayabilmesi için merdanelerle malzeme arasındaki sürtünme kuvvetleri, malzemeyi merdaneler arasına çekebilmelidir. Bir merdanenin saca uyguladığı normal kuvvet N ile gösterilirse (Şekil 2.5), sürtünme kuvveti;

$$T = \mu \cdot N \quad (2.3)$$

olduğundan, haddeleme işleminin başlaması koşulu, 2.4 eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$N \cdot \sin \theta_m \leq \mu \cdot N \cdot \cos \theta_m \quad (2.4)$$

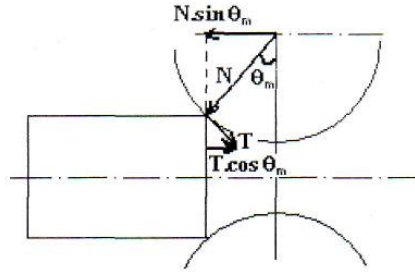
Bu denklemden,

$$\tan \theta_m \leq \mu \quad (2.5)$$

veya küçük θ_m açıları için (örneğin ince sacların soğuk haddelenmesinde $\theta_m = 9^\circ$ $\tan \theta_m \approx \theta_m$) alınarak, aşağıdaki 2.6 eşitliği elde edilir.

$$\theta_m \leq \mu \quad (2.6)$$

Bu basit formül haddeleme şartıdır. İş parçası merdane boşluğuna doğru itilmeden, serbestçe beslenir ve bu şart sağlandığı takdirde, silindirler iş parçasını yakalar ve kısıtırlar. Aksi halde, iş parçası geri itilir, haddeleme mümkün olmaz .



Şekil 2.5 Haddeleme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler

Malzeme ve yağlayıcıya bağlı olarak değişen sürtünme katsayıları (μ), sıcak haddelemede 0,2 ~ 0,7 gibi büyük değerler arasında iken, soğuk haddelemede 0,02 ~ 0,3 arasında değişmektedir.

Yassı ürünlerin haddelenmesinde kalınlık azalmasının çıkılabilecek en fazla değeri aşağıdaki 2.7 eşitliğiyle gösterilebilir .

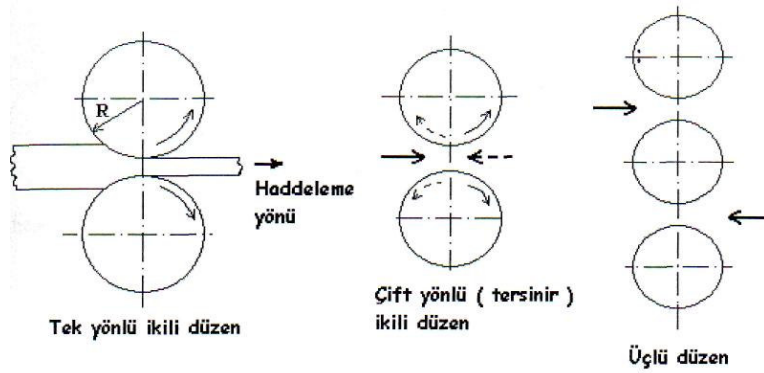
$$\Delta h_{\text{maks}} = \mu^2 \cdot R \quad (2.7)$$

2.2.2 Merdaneler ve Merdane Düzenleri

Yassı ürünlerin haddelenmesinde kullanılan merdaneler, düz ve silindiriklerdir. Başlıca üç kısımdan oluşurlar; haddelenen malzeme ile doğrudan temas eden gövde, yataklarda çalışan kısımlar (muylular) ve mile bağlanan kavrama kısmı.

Merdane malzemesi olarak genellikle dökme demir ve dökme çelik kullanılmaktadır. Çelik merdaneler, alaşımlı ve alaşımsız malzemeden döküm yoluyla üretiltikleri gibi dövme yoluyla da şekillendirilebilmektedir. Yerine göre merdanelere ıslah işlemleri de uygulanmaktadır (Değirmenci, 2006).

Merdanelerin hadde ayakları üzerindeki düzenleniş şekilleri, konumları ve sayıları itibarıyla farklılıklar göstermektedir. Yassı ürünlerin haddelenmesinde en basit merdane düzeni tek yönlü ikili düzendir (Şekil 2.6). Bu hadde düzeninde, haddelenen slabın her pasodan sonra yeniden ön tarafa geçirilmesi nedeniyle, zaman, iş ve ısı kayıplarına yol açtığı belirlenmiş ve iki tarafa da çalışabilen, çift yönlü (tersinir) ikili hadde düzeni geliştirilmiştir. Ekonomik olmamaları nedeniyle genellikle büyük ebatlı yassı ürünlerin haddelenmesinde kullanılmaktadırlar. Tek yönlü olanlar ise, modern haddehanelerde, arka arkaya hadde tertiplerinde çelik sacların haddelenmesinde kullanılmaktadır. Üçlü hadde tezgahında, üç merdane üst üste aynı eksende dizilidir ve malzeme iki yönde de haddelenebilir (Şekil 2.6) (Değirmenci, 2006).



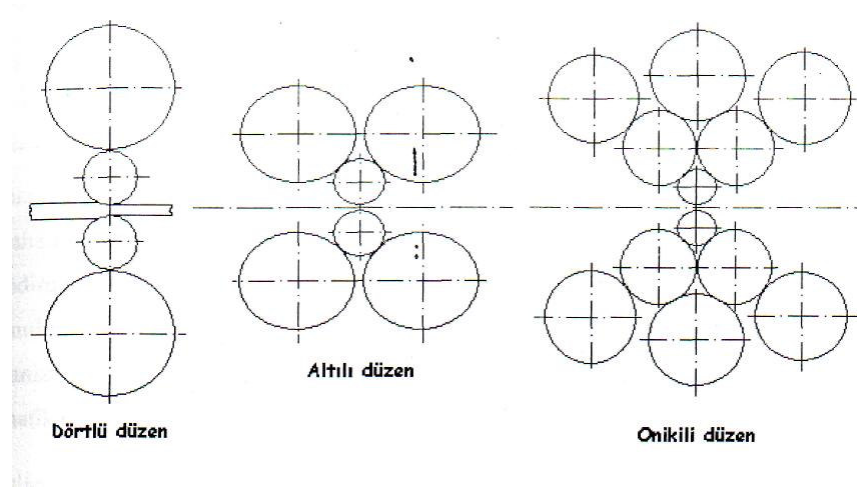
Şekil 2.6 Basit merdane düzenleri

İnce sacların ve sertlikleri yüksek olan malzemelerin haddelenmesi için iş merdaneleri çaplarının ufaldığı, ancak eğilmelere karşı destek merdanelerinin bulunduğu dördü, altı, on ikili ve yirmili hadde düzenleri geliştirilmiştir (Şekil 2.7). Yüksek dayanımlı ince sacların dar toleranslarla soğuk haddelenmesine uygun olan yirmili hadde düzeninde, tungsten karbür iş merdanelerinin çapı 6 mm'ye kadar düşürülebilmektedir (Değirmenci, 2006).

Merdane çapları küçültülürken, optimum bir çap değeri ayarlanmalıdır. Aksi takdirde, gereğinden küçük çaplı bir silindir kullanımı, haddelenen malzemenin yalnızca yüzey tabakalarının şekillenmesine, orta içteki kısmının şekillenmemesine neden olmaktadır.

Uygun çaplı silindirlerin kullanımı ile iş parçasının tüm kesiti yoğrulur ve homojen biçimlendirme elde edilir. Yassı ürünlerin haddelenmesinde homojen olmayan plastik şekil değişimi malzemede kalıntı gerilmelerin doğmasına neden olur (Değirmenci, 2006).

Bir pasoda elde edilen kalınlık azalmasını arttırmak amacıyla planet hadde düzeni adıyla apayrı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde dış taraftaki küçük merdaneler, içteki büyük destek merdanelerinin etrafında planet gibi dönerler. Alışlagelmiş bir sıcak haddeleme tezgahında, bir pasoda en fazla %30~40 gibi kalınlık azalması olurken, bu tertiple beraber %90'lara ulaşılabilmiştir.



Şekil 2.7. Destekli haddeler

2.2.3 Slab Tavlama

Sıcak haddelemeden önce slablar yaklaşık 1250°C sıcaklığına kadar slab tavlama fırınlarında ısıtılırlar. Bu işlem, merdanelere gelen kuvvetleri azaltarak şekillendirme işlemini kolaylaştırmanın yanı sıra dendrit döküm yapışım ortadan kaldırmak, alaşımlama elementlerinin birçoğunu çözmek ve haddelemeden önce yapıda üniform sıcaklık sağlamak amacıyla yapılır.

Yeniden ısıtılacak ürünler, 5 ila 30 ton ağırlığında, 4 ila 14 metre uzunluğunda, 1 ila 2 metre genişliğinde ve 180 ila 250 mm kalınlığında, dikdörtgen slablardır. Fırına giren ürünler, giriş sıcaklıklarına göre, soğuk ($\sim 15^{\circ}\text{C}$), ılık ($\sim 400^{\circ}\text{C}$) veya sıcak ($>700^{\circ}\text{C}$) olabilir (Değirmenci, 2006).

En yaygın kullanılan fırın çeşidi, arabalı fırınlardır. Bunlar slabı, fırın girişinden çıkış tarafına kadar ileten ve aşağıya yukarıya indirip kaldırabilen hareketli mekanizmaya sahip fırınlardır. Bu fırınlarda slablar, birbirlerine değmediklerinden yapışmaları söz konusu değildir. Sistem ters yönde de rahatlıkla çalışabildiği için fırının her iki ucundan da boşaltma yapılabilir. Boyutları genellikle 10-12 m genişliğinde ve 30-65 m uzunluğunda değişmektedir. Fırın genişliği, yükleme sırasında oluşabilecek kaza olasılıkları düşünülerek, ısıtılacak slabın maksimum genişliğine ek olarak iki yandan 30 cm bırakılacak şekilde tasarlanmaktadır.

Fırın uzunluğu ise ısıtma süresince yeterli miktarda ısı alışverişi sağlanacak şekilde düzenlenir. Isı alışverişine; üretim hızı, slab boyutları, çelik cinsi, yükleme ve çıkış sıcaklıkları, işlek olan fırın bölümü, brülör kapasitesi ve izin verilebilir en yüksek ısıl dayanım gibi değişkenler etki etmektedir.

Slab fırınlarının enerjileri, yüksek fırın, kok fırını ve çelikhanelen gelen gazların karışımından oluşmaktadır. Bu nedenle, gazların içeriği karmaşıktır. Gerekli hallerde içlerine doğalgaz da katılmaktadır. Dolayısıyla, bu gazlar operasyon esnasında hemzamanlı olarak analiz edilmeli, içlerindeki istenmeyen maddeler belirlenmeli ve zorunlu hallerde müdahalede bulunulmalıdır. Kullanılan gazlar, kullanımdan sonra içlerinde hala enerji barındırdıklarından dolayı, ısı tutucularından geçirilir ve tekrar sisteme ilave edilerek yeniden kullanılırlar. Fırınların farklı bölgelerindeki farklı sıcaklık değerleri, otomatik ısıtma kontrolü mekanizması sayesinde gerçek zamanlı ölçülür ve hava ile gaz akışı hızlarının ayarlanmasıyla otomatik olarak en aza indirgenmeye çalışılır.

Metaller ısı aldıkça, dolayısıyla sıcaklıkları yükseldikçe oksijenle bileşik oluşturma meyilleri artmaktadır. Başka bir deyişle, daha kolay ve hızlı bir şekilde oksitlenmektedirler. Oksitlenen slablar da diğer oksitlenen metaller gibi kütle kaybına uğradıklarından, yüzeylerinde oluşan oksit tabakasının en aza indirilmesi, sistem veriminin artırılması bakımından ana hedeftir. Bu amaca ulaşmak için ise, fırın atmosferinin bileşenlerinin kontrolü ve gazlar içersinde oksitlenmeye yol açan elementlerin miktarlarının azaltılması gereklidir. Aynı zamanda oksit tabakasının seviyesinin düşürülmesi için, slabın yüksek Sıcaklıkta kaldığı süre mümkün olduğunca daraltılmalıdır. Bunların yanında sistemin verimi; fırın içindeki ürünlerin farklı

ısıtma profilinde olmalarının engellenmesiyle ve çıkış sıcaklıklarının mümkün olduğunca düşürülmesiyle arttırılabilir(Değirmenci, 2006).

2.2.3.1 Kombine Hadde Bölgesi

Kaba haddeleme olarak bilinen bu haddeleme ünitesinde, malzeme, tersinir olarak 7 – 9 arası paso verilerek 18 – 36 mm kalınlığına kadar kaba haddeleme işlemine tabi tutulur. Fırından gelen slab, slab alıcı kabininden kumanda ile kombine hadde bölgesindeki dik tufal kırıcıya sevk edilir. Buradan sırasıyla yatay tufal kırıcı, bağımlı kenarcı ve tersinir kaba haddeleme işlemlerinden geçer (Taşkiran, 2003).

2.2.3.2 Tersinir Şerit Hadde

Kombine haddeden 18 – 36 mm kalınlığında gelen malzemelerin baş ve son kısımları kırpıntı makasında kesilir. Şerit hadde de 3 – 5 – 7 pasoda; tersinir olarak düzgün yüzey ve aklılık dağılımı elde edilecek şekilde bilgisayar kontrollü olarak haddelenir. Şerit hadde bölgesinde; şerit fırınları, otomatik hidrolik kalınlık kontrolü (HAGC), merdane bükme sistemi (WRB), merdane kaydırma sistemi (WRS) ve diğer yardımcı sistemler mevcuttur. Nihai kalınlığa haddelenen malzeme, laminar akışlı soğutma masasında soğutulduktan sonra hidrolik kontrollü bobin sarma ünitesinde otomatik olarak sarılır (Taşkiran, 2003).

2.2.3.3. Şerit Hadde (Finishing Mill)

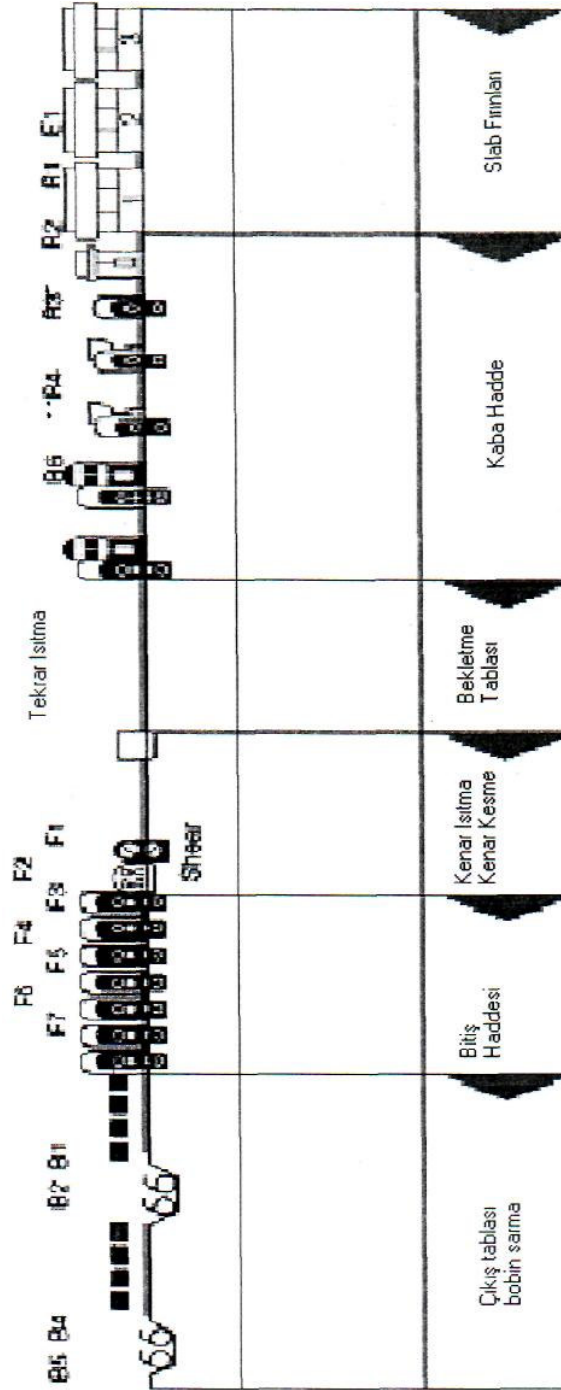
Hattın bu bölümü ana olarak; kırpıntı makası, sıkma merdaneli tufal atıcı, altı ayaklı şerit hadde ve duşlu masalardan meydana gelir. Tersinir kaba haddede şerit hadde giriş kalınlığına kadar haddelenen malzeme (24 – 36 mm kalınlığında) tersinir kaba hadde çıkış masaları üzerinden şerit hadde bölgesine sevk edilir. Şerit hadde bölgesinde kırpıntı makası bulunmaktadır. Kırpıntı makası ile malzemenin başı ve sonundaki düzgün olmayan kısımlar kesildikten sonra sıkma merdaneli tufal atıcıdan malzemenin yüzeyinde tersinir kaba haddede işlenmesi sırasında meydana gelen tufal basınçlı su püskürtülerek atılır ve malzeme şerit haddeye beslenir (Taşkiran, 2003).

Malzeme altı ayaklı şerit haddeden geçerek son kalınlığa kadar inceltir. Şerit haddenin çıkışında ise duşlu masalar mevcuttur. Burada malzemenin yüzeyine su dökülerek soğutulur ve malzemenin fiziksel özellikleri belirlenir. Son kalınlığa kadar haddelenmiş malzeme daha sonra duşlu masalar üzerinde bobin sarma bölgesine sevk edilir, bobin sarıcılar da sarılarak bobin olarak stoklanır (Taşkiran, 2003).

2.2.4 Sıcak Haddelenin İşleyişi

Şekil 2.8'de yassı ürünlerin, slab ısıtma fırınlarından çıkmalarıyla sıcak bobin sarma işlemine kadar süregelen üretim akışı görülmektedir.

Bu şekilden de görüleceği gibi sıcak haddeleme hattı, kaba hadde ve bitiş haddesi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sıcak haddeleme tesisinin verimli çalışabilmesi ve çıkan ürünlerin belli kaliteleri sağlaması için ürün kalınlığı mümkün olan en kısa sürede azaltılmalıdır ve haddeleme ani olmalıdır. Düzlemsellik toleranslarını yakalayabilme ve haddeleme kuvveti ile motor tork değerlerini sağlayabilmenin bir pasodaki azami kalınlık azalmasını sınırlaması, çeşitli hadde tezgahlarıyla çoklu paso kullanımını gerektirmektedir. Hadde tezgahları arasındaki mesafeler, ısı kayıplarını azaltmak için en kısa düzeyde (yaklaşık 6 m) tutulmalıdır (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.8 Büyük kapasiteli sıcak haddeleme tesisinde üretim akışı (Taşkiran, 2003).

Kaba haddelemenin görevi, bitirme grubuyla uyumlu boyutlarda olacak şekilde slab kalınlıklarını azaltmak ve istenilen genişlik değerlerini vermektir. Kaba haddeler üç düzenleniş şekline sahiptir;

- Tandem hadde düzeni, bir hat üzerinde 4 yada 5 haddeden oluşur ve haddeler arası mesafeler, ürünün uzaması nedeniyle gittikçe artmaktadır. Bu nedenle devamlı değildirler. Yatay haddeler ürün genişliğini ayarlamak amacıyla yan haddelerle desteklenir.
- Tersinir hadde düzeni, tek bir yatay haddeden oluşur ve motorların dönüş yönlerinin tersine çevrilmesiyle her iki yönde de haddeleme yapabilir. Kenarlarda kenar merdaneleri vardır.
- Karışık hadde düzeni, en az biri tersinir hadde tezgahı olmak üzere, iki ila dört arasında haddesi olan tandem hatlarından oluşur.

Isıtılmış slablar fırın çıkışında hareketli tabla üzerine alınırlar. Bu tabla üzerinde slablar, kaba haddeleme grubunun oksit kırıcılarına teslim edilirler. Yatay hadde düzenlerinden ibaret olan oksit kırıcılarda, ısınmadan kaynaklanan oksit kırılır ve slab kalınlıkları aynı zamanda % 10 ~ 25 gibi bir oranla azaltılırlar. Önceleri, büyük kalınlık azalmaları sırasında oksitlerin slab içine doğru haddelenebileceği düşünülmekteydi ve sakıncalı görünürdü, fakat son eğilimler, kalınlık azalmalarını, yatay hadde oksit kırma tezgahlarında arttırmaya yöneliktir. Yatay haddeler, oksit kırmayı kolaylaştırmak için yivli yapılırlar. Dikey haddeler de nadir olarak oksit kırmak için kullanılmaktadırlar. Levha haddelerinde olduğu gibi, burada da oksit, yüksek basınçla bırakılan su ile uzaklaştırılır. Hidrolik jetli oksit gidericinin otomatik kontrolünün doğru yapılması önemlidir. Ayrıca, iş parçası yüzeyine göre oksit gidericilerin memelerinin doğru yerleşimine ve haddelenen metalin sıcaklığına göre su akışı düzenlenmesinin yeterli olması da önem verilmesi gereken diğer hususlardır.

Silindirler dar slablarla beslendikten sonra, oksit kırıcılardan gönderilen iş parçaları dörtlü geniş-taraf haddeleme düzenine girer ve hareketli tablaya monte edilmiş, havayla yada elektrikle çalışan kaldırma ve döndürme tertibatlarıyla 90° döndürülürler. Çoğu haddehanelerde, geniş-taraf hadde düzenine giren iş parçası, tek bir geçişte % 40-50 arasında kalınlık redüksiyonu ile haddelenir. Ancak tersinir çalışan geniş-taraf hadde düzenlerinde, sacın istenilen genişlik değeri bazen, birkaç pasoda elde edilir. Geniş-taraf hadde düzeninden ayrılan iş parçalarının, kenar bozukluklarını ortadan kaldırmak için, önceleri, güçlü yatay presler ve sıkıştırıcılar kullanılırdı (Değirmenci, 2006).

Günümüzde, bu presler tamamıyla kullanım dışıdır ve kenar bozuklukları düşey haddeler ile giderilir. Yeni merdaneler prensip olarak, geniş slablarla beslenirler ve bu yüzden ne geniş-taraf hadde düzenlerini ne de sıkıştırıcıları içerirler. Kaba haddeleme grubundan çıkan yassı ürün levha olarak adlandırılır. Haddelemeden ayrılan levhaların boyut farklılıklarının sıklığını en az seviyede tutmak için çaba sarf edilir.

Haddehanelerin çoğunluğunda, kaba hadde tertiplerinde haddeleme hızı sabittir. AC hadde motorları ayarlanabilir cinsten değildir ve verilen hızda haddeleme zamanı her düzende aşağı yukarı aynıdır (Değirmenci, 2006).

Bitiş haddelerinin istikrarlı operasyona sahip olmasını sağlamak için, levhanın sıcaklığının 5-10⁰C gibi bir dalgalanmadan daha fazla olmayacak şekilde 1160-1180⁰C arasında olması gerekmektedir. Levha sıcaklığı, kaba ve bitirme hadde gruplarının arasına kurulan 150 m uzunluğa kadar ulaşabilen ara hareketli tablanın üzerindeki foto-elektrik pirometre vasıtasıyla ölçülür. Eğer levha sıcaklığı önceden belirlenen seviyenin üzerinde ise levha tabla üzerinde tutulur. Sıcaklığı düşürmek ve aynı zamanda oksitleri tekrar gidermek için, hava veya su soğutmalı özel donanımlar kullanılır (Değirmenci, 2006).

Çelik levhanın diğer kısımlarına göre daha düşük sıcaklığa sahip baş kısmı, bitiş hadde grubunun giriş bölümüne monte edilmiş makaslarla kırılır. Kırılan çelik levha, % 2 ~ 10 (0,5-2 mm) aralığında değişen kalınlık azalmasıyla çalışan, aynı zamanda oksit kırıcı görevini üstlenen son yatay hadde tezgahına girer (Değirmenci, 2006).

Birçok modern fabrikanın haddehanelerinde bitiş grubu altı adet dörtlü hadde düzeninden kuruludur. Daha ince sac üreten yeni tip haddehanelerde bu grup yedi tezgah içerebilir (Şekil 2.8'de F1 ile F7 arası). Merdaneleri soğutma işlemini geliştirmek ve servis ömrünü uzatmak amacıyla, iş merdanelerinin çapları 600-650 mm'den 700-800 mm gibi değerlere arttırılır. Çapları 1600 mm'ye varan destek merdanelerinin ise boyları 1700-2000 mm aralığındadır. Tezgah yapılan da buna bağlı olarak sağlamlaştırılır. İnce saclar üretmek için slab kalınlıkları 120-150 mm'ye düşürülür ve kaba hadde grubu ürünleri olan levhaların da kalınlıkları 16-18 mm'ye indirilir (Değirmenci, 2006).

Sürekli bitiş hadde grubunda sacın, tüm tezgahlarda eşzamanlı olarak şekillenmesi sebebiyle, proses içi haddelerinin ayarları en çok dikkat edilmesi gereken hususlardır. Sac uzunluğu boyunca sıcaklık gradyanlarının neden olduğu ölçü farklılıklarını azaltmak için çaba sarfedilir.

F1 tezgahındaki levhanın hızı ve genişliği, levhanın son ucunun F1 tezgahına girmeden önceki zamanın ve aynı zamanda soğuduğu süreç olan bekleme zamanının belirlenmesindeki etmenlerdir. Bu nedenle, ürünün baş ve son kısımlarının bu tezgaha girerken sıcaklıklarında farklılık olacaktır. Örneğin bir dakikada, 1100⁰C sıcaklıktaki 32 mm kalınlığında bir levhada yaklaşık 95⁰C ısı kaybı oluşmaktadır. Soğuk metal daha dayanımlı ve deformasyonla beraber daha büyük adyabatik ısıya maruz kaldığından dolayı, bu büyük sıcaklık farkı azaltılmaya çalışılır (Değirmenci, 2006).

- Haddelenen sacın, mümkün olan en az yanal ölçü farklılıkları ile beraber doğru ebatlarda elde edilmesi,
- Son tezgahlardaki merdanelerin çalışan yüzeylerinin sürekliliğini arttırmak,
- Haddeleme sonunda olması gerektiği düşünülen metal sıcaklığını korumak için (bu amaç, istenilen metal yapısının ve tane boyutunun korunması için zaruridir.)

Yüzde olarak kalınlık azalması, on tezgah sürekli haddeleme işleminin altı tezgahlı bitiş grubunun son tezgahında 10-15, dokuzuncu tezgahta 20-25, sekiz, yedi ve altıncı tezgahlarda 30-40'tır ve beşinci tezgahta 50'ye kadar çıkabilmektedir. Son tezgahdan ayrılan sacın kalınlığı temassız çalışan mikrometreler ile kontrol edilir. Çalışma prensipleri, metalin içinden geçen X ışınlarının yoğunluğunun değişimini ölçmeye yöneliktir. Bu kalınlık değerleri, eşzamanlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir ve ekrandan görülebilmektedir. Ayrıca yeni tip haddelerde foto-elektrik yöntemle temassız sac genişliği kontrolü de otomatikleştirilmiştir. Hadde boşluğu kontrolü, sisteme bağlı bulunan özel bir cihaz yardımıyla yapılır. Tezgahlardan geçen metal miktarları, çıktı verisi olarak işlenir. Hadde boşluğu göstergeleri, tüm tezgah parçalarının elastik deformasyonları dikkate alınarak monte edilir. Değişimlerine bağlı olarak hadde ayarlan, yatay ve dikey düzlemlerdeki pozisyonlarının doğrulanmasından ibarettir.

Yanal ölçü farklılıklarını ortadan kaldırmak için, bitiş hadde tezgahları, ufak kalınlık azalmalarıyla temper haddeleme şartları altında çalışırlar. Merdanelerin eğikliği, iş ve destek merdanelerinin ısı genleşme, aşınma ve elastik deformasyonlarının dikkate alınmasıyla saptanır. Bitiş grubunun iş merdanelerinin, 0,1-0,3 mm gibi parabolik dışbükey bozukluğu vardır. Bazı durumlarda, ufak bozukluklara sahip iş merdaneleri, destek haddesi olarak kullanılabilir. Destek haddeleri silindirik yapıdadır (Değirmenci, 2006).

Bitiş grubunun son tezgahında haddeleme hızı 12-15 m/s'yi bulur ve yeni haddelerde bu 20 m/s'ye ulaşmaktadır. Bitiş tezgahının ana sürücüsü, geniş hız aralıklarında ayarlanabilir olmalıdır. Bazı ekstra hızlara da ayrıca, geniş bombelerin hızlı düzenlerini sağlamak için gereksinim duyulabilir. Genellikle çalışma hızının, $1,08.v_{\min}$ ile $0,92.v_{\max}$ aralığında değiştirilebilmesi önerilir (Değirmenci, 2006).

Tüm haddeleme hızı, sacın baş kısmının rulo sancıya geçirilebileceği mümkün olan en yüksek hızda sınırlandırılır. Haddeleme hızının artırılması kademeli olarak, sürekli hadde grubunun uygun hadde soğutma şartlarını koruma ve uzunlamasına ile genişlemesine ölçü değişimlerinin artmasını engelleme amaçlarından taviz vermeden yapılmalıdır (Değirmenci, 2006).

Haddeleme hızı ve hadde soğutma koşulları, haddeleme sonundaki ve sac sarılırkenki metal sıcaklığını belirler. Düşük karbonlu çeliğe ince taneli mikroyapı sağlamak, çeliği eş-eksenli tekbiçim taneli yapmak ve iyi yayılmış sementite sahip olmasını sağlamak, onun iyi şekillendirilebilirliğini korumak anlamına gelmektedir ve bu da haddeleme sonundaki sıcaklığın 860–890°C arasında tutulduğunda, son tezgahta yüzde kalınlık azalmasının 10'dan az olmaması ve sarma sıcaklığının 680⁰C'nin altında olmaması sağlandığı zaman elde edilir.

İstenilen sarma sıcaklığın elde etmek için bir su püskürtme tertibatı, son tezgahın sonra çıkış tablasında monte edilmiş vaziyettedir. Su, üst ve alt kısımlardaki memelerden püskürtülür. Ayrıca soğutma işlemi, kontrollü soğutma, adım adım soğutma ya da özel hadde tablalarında hava ile soğutma olarak da yapılabilir. Önceden saptanan sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra rulo saclar, sancılarından alınır ve depolanmak ya da soğuk haddeleme bölümüne gönderilmek üzere taşınır.

2.2.5 Metalürjik Açıdan Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme işleminin metalürjisi, elde edilen ürünlerin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Bitiş haddesinde deformasyon programının kontrolü, bekletme tablasında soğutma ve bütünüyle sarma sıcaklığı, termomekanik işlemlerin unsurlarıdır. İstenilen mekanik özelliklerin mümkün olan en az sapma ile elde edilmesi doğrultusunda, tane boyutunun ve ikincil faz parçacıklarının hacim oranının kontrolü buradaki genel metalürji amaçlarıdır.

Faz dönüşümleri bakımından sıcak haddelemenin metalürji konuları, ısı işlemleri konusunun kapsadığı gibi; metal bileşimi, alaşım elementlerinin durumu (çökelmiş yada bileşik halde), östenit tane boyutu ve termal çevrimlerden ibarettir. Bu etmenlerin tümü, nihai ürünün metalürjik yapısını belirlemektedir.

Bir plastik şekil değiştirme işlemi, yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda meydana gelirse soğuk, aksi durumda sıcak şekil değiştirme söz konusudur. Sıcak şekil değiştirme sıcaklıklarının üst sınırı, şekil değişiminde asgari güç artışı ile çeliğin en iyi plastik özelliklere sahip olacağı şekilde seçilmelidir. Bu doğrultuda türdeş katı çözeltilerin oluşum sıcaklığı bir miktar aşılabılır. Ancak işleme sıcaklığının alt sınırı, hiçbir zaman ötektoid noktadan daha düşük olmamalıdır. Çünkü metaller haddelenebilme kabiliyetlerine en iyi, yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları arasındaki seviyelerde sahiptirler (Değirmenci, 2006).

Sıcak haddelemenin başlangıcı ve sonu, yumuşak karbonlu çeliklerin çoğunda 1260-950°C, takım çeliklerinde 1150-850°C, orta karbonlu çeliklerde 1200-900°C aralığındaki sıcaklıklarında yapılır. Haddeleme işlemi için yüksek hızlı modern makine düzenekleri geliştirildikçe, haddeleme başlangıcı ve sonu sıcaklıkları birbirlerine yaklaşmaktadır.

Sıcak şekil verme, yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üstünde yapıldığı için, şekil değiştirme sırasında bozulan yapı hemen yeniden kristalleşir. Sıcaklığın etkisiyle malzemenin akma sınırının düşmesi, sıcak şekil verme işleminin soğuk şekil vermeye kıyasla daha düşük bir kuvvetle yapılabilmesini sağlar. Sıcak şekil verme sırasında döküm yapısındaki büyük ve çubuksu taneler küçük ve eşksenli tanelere dönüştüğü gibi ayrıca slabdaki, dökümden kaynaklanan gaz boşlukları da kapanır ve kaynar. Ancak metal ile gaz tepkimeye girmiş ve gözeneğin iç duvarlarında tepkime ürünleri oluşmuşsa, kaynama olmaz ve hatta haddeleme sırasında malzeme ayrılmaları görülür.

Sıcak haddeleme işleminin başında slab yüksek sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra, çözünebilen ürünler ve çökelme kinetiği, alüminyum-nitrit, titanyum, niyobyum-karbür ve karbo-nitritler gibi nispeten çözülmesi güç bileşiklerin tam olarak çözünmesini sağlar. Slabda büyüyen tanelerin boyutları fırından ayrılma sırasında yaklaşık 200 µm civarındadır. Ancak sıcak haddeleme sırasında kayda değer bir tane küçülmesi meydana gelir ve işlem sonucu değişime uğrayan östenit ilk yapıdakine oranla daha incedir.

Haddeleme esnasında, 1200 ile 900°C arasında, zayıf çözünürlüğe sahip elementler parçacıklara ayrılmış haldedir, takip eden doyma haline doğru, östenit içinde çözünebilme potansiyelleri açığa çıkar. Ancak kinetik sebeplerden ötürü sıcaklık, çözünmeye sebep olma açısından yeterli değildir ve bu olgu deformasyon tarafından epeyce hızlandırılır. Bu, gerinim nedenli çökelme mekanizmasıdır. 1000°C civarında çözünemez hale gelen niyobyum karbürlerin mevcudiyeti durumunda, sıcak haddeleme ile deforme olmuş östenitteki çökelme kinetikleri, hiç vuku bulmayan ya da dikkate alınmayacak kadar önemsiz çökelme durumundaki gibidir. 900°C'de yüksek niyobyum ve karbon içerikli bir çelik sac sınıfında, gerinim nedenli çökelme yaklaşık 10 saniye sonra başlar. Faz dönüşümü sırasında, östenit tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu bu nedenle termomekanik çevrime bağlıdır. Isıl işleme zıt olarak, yüksek sıcaklıkta çökelmiş elementler, östenit içindeki çözelti içinde kalırlar.

Ostenitin deformasyona uğraması, Ar_3 sıcaklığını yükseltir, fakat ferritteki çekirdeklerime oranlarını arttırarak, nihai tane boyutunun baştanbaşa incelmesine neden olur. Üstelik CCT diyagramındaki faz alanlarını iyileştirerek, bir "anlamda sertleşebilirliği düşürür (Değirmenci, 2006).

Tane boyutundaki en önemli küçülme bitiş hadde grubunda meydana gelir ve sıcak metal Plastik şekil değiştirdiğinde, başlangıçta poligonal olan östenit taneleri metal gibi biçim değiştirerek düzleşir ve uzarlar. Böylece ortaya çıkan mikroyapıya keksel yapı denir.

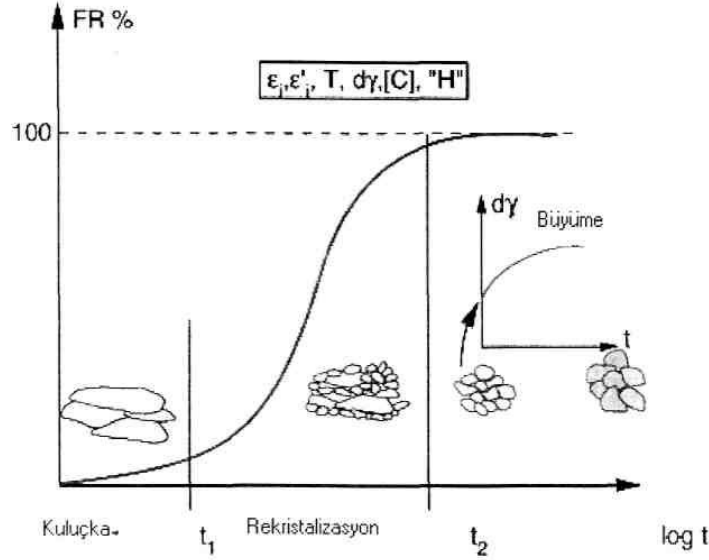
Metalin akış gerilimi, mikroyapıdaki değişimi yansıtır. Ani gerinim sertleşmesi, kristal hatalarının (dislokasyonların) varlığından dolayı deformasyon başlangıcında meydana gelir. Bu olgu, kusurların yeniden düzenlenmesi ve kısmen yok edilmesine yol açmasıyla ilgili olan yeniden toparlanma mekanizmasının yüksek sıcaklıklarda etkin olması dışında, soğuk işlem sırasında vuku bulan olaya oldukça benzerdir. Tane sınırları yüksek sıcaklıklarda büyük etkiye sahiptir ve sınır düzlemi boyunca oluşan kayma ile (tane sınırı kayması) toplam gerinime katkıda bulunurlar.

Sıcak şekil vermede işlem sıcaklığı, işlemin tamamlanma süresine bağlıdır. İşlem süresi ve buna bağlı olarak yeniden kristalleşme için gerekli zaman kısaldıkça yemden kristalleşme ve dolayısıyla işlem sıcaklığı da yükselir. Bu durumda dinamik yeniden kristalleşme söz konusudur. Dinamik yeniden kristalleşme, çok yüksek gerinimlerde er ya da geç başlar, ancak sıcak haddelemede bu koşullara, yüksek gerinim oranları da dahil yeterli olmayan gerinimlerden dolayı ulaşamaz .

İki paso arasında metalde depolanan gerinim enerjisi, yeniden toparlanmanın devam etmesine olanak tanır ve eğer yeterli ise statik yeniden kristalleşmenin başlamasına yol açabilir (Şekil 2.9). Gerinim birikmesinin en yüksek olduğu tane sınırlarında yeni taneler oluşmaya başlar ve eski tanelerin içine doğru büyürler. Tepkime kinetiği şöyle açıklanabilir; yeni tanelerin, sıcak işlenmiş ve yeniden toparlanmış bölgelerinin her ikisinin de bir arada var olduğu süreç esnasında kısmi yeniden kristalleşme ve daha sonra, yeniden kristalleşme, ortalama tane boyutuna bağlı olarak bittiğinde alışılmış tane büyümesi oluşmaktadır. Bu olgular, bir önceki hadde geçişi sırasındaki deformasyon koşullarına (gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık) ve biçim değiştirmiş ortalama tane boyutuna oldukça bağlıdır (Değirmenci, 2006).

Katı çözeltideki tüm elementler, yeniden kristalleşme kinetiklerini geciktirici yönde davranırlar, ancak 100 ppm düzeyinde bile olsa çok güçlü etkileri olan özellikle niyobyum ve titanyum gibi mikroalaşım elementleri diğerlerine göre daha engelleyicidirler. Örneğin, düşük karbonlu çeliğin 950°C'de 1 saniyede yeniden kristalleştiği koşullarda, yapıda niyobyum varlığı 200 ppm'e çıkarsa gerekli zaman 60 saniye olacaktır. Niyobyum gibi elementlerin ilavesi, tane incilmesi ve çökelme sertleşmesine neden olur ve dolayısıyla Çeliğin malzeme dayanımının artmasında rol oynar. Diğer alaşım elementlerinden titanyum ve vanadyumun ise

tane incelmesinde daha az etkisi olurken, bu elementler çökelme sertleşmesini arttırarak çeliğe dayanım kazandırır (Değirmenci, 2006).



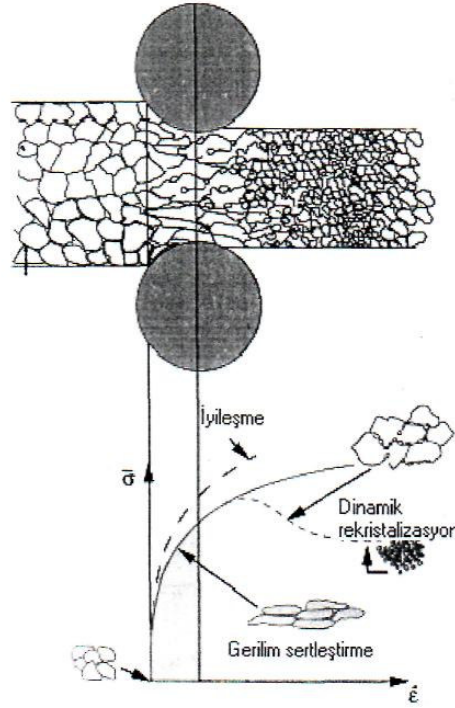
Şekil 2.9 Statik yeniden kristalleşmenin kinetiği (Taşkıran, 2003).

Çok yüksek sıcaklıkta haddeleme yapıldığında malzeme çok çabuk yeniden kristalleşmeye uğramakta ve bu arada şekillendirmeye ilgili tüm değişimler ortadan kalkmaktadır. Buna karşın ortalama sıcaklık bölgesinde haddeleme yapıldığı takdirde, malzeme daha yavaş yeniden kristalleşmekte ve malzemenin nihai kristal boyutlarına ulaşması daha uzun zaman almaktadır. Bu durumda, hadde merdanelerini terk eden malzemede yeniden kristalleşme safhaları devam etmektedir.

Haddeleme sırasında levhalara verilen kısa geçiş zamanlarında, metal bir sonraki merdane boşluğuna girerken çoğunlukla, sadece kısmi yeniden kristalleşmeye uğrar. Mekanik yönden metal, kısmen gerinim sertleşmesine uğramış, yeniden toparlanmış tanelerden ve kısmen de yeniden kristalleşmiş daha ince tanelerden ibaret olan heterojen malzemedir (ilk durum ikinci duruma göre daha yüksek akış gerilimine sahiptir). Genel gerinim akışı, karışımlar kanununa uymaktadır. Bu etki ihmal edilemez ve eğer yeniden kristalleşen hacim oram küçükse, ortalama akış gerilimini yaklaşık % 30 oranında arttırabilir. Sıcak haddeleme esnasındaki akış geriliminin aslında yüksek gerinim oranları içermesinden dolayı, büyük sıklıkla oda sıcaklığındaki akma gerilmesinden daha büyük olabileceği dikkat çeken ilginç bir durumdur.

Gerinim sertleşmesi, statik yemden kristalleşme ve östenit tane büyümesi durumlarının birbirlerini izlemesi, bitiş haddesine doğru her defasında tekrarlanır ve bu, mikro alaşım elementlerine sahip olmayan çelikler için büyük çapta tane incelmeye yol açar (levhada 30-50 μm arası, bitiş haddesinden çıkışta yaklaşık 15 μm) (Şekil 2.10). Bitiş haddelerinde mikroalaşımli saclarda, yeniden kristalleşme tamamlanmamış durumdadır.

Haddelemenin Ar_3 sıcaklığının altında sona ermesi durumunda, ferrit ve östenit bir arada bulunur. Eğer metal yüksek sıcaklıklarda rulo halinde yeterli süre kalırsa, ferrit içinde biriken gerinim, metalin yeniden kristalleşmesine sebep olur. Dolayısıyla bu da yapıda, tekbiçim olmayan yada kaba ferrit tanesi oluşmasına yol açar (Değirmenci, 2006).



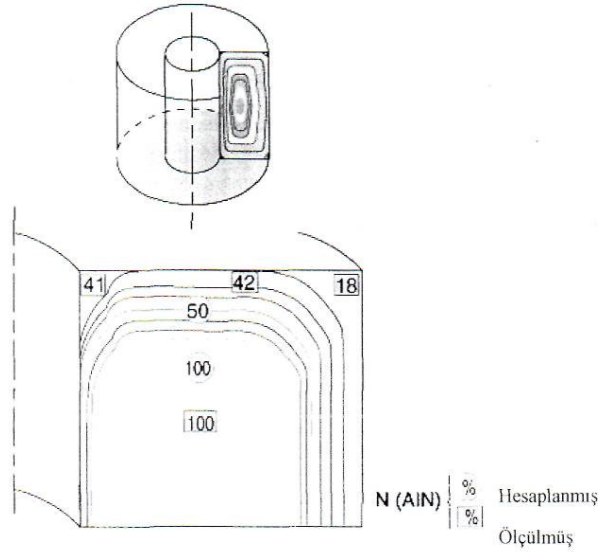
Şekil 2.10 Gerinim sertleşmesi ve yeniden kristalleşmeyle meydana gelen ardışık tane incelmeye (Taşkiran, 2003).

Plastik şekil değişimi belirli sıcaklık alanlarında ve zaman sınırları içinde yapıldığı takdirde çeliklere çok yüksek mukavemet özellikleri kazandırılabilir. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (TTT) diyagramlarından faydalanılarak yapılan bu tür şekil verme işlemleri termomekanik olarak adlandırılır.

Soğuma ise sıcak haddeleme esnasında üç kısımda incelenebilir. Bunlar; haddeleme sırasında devamlı hızlandırılmış, püskürtme anında düzenli ve rulo sarma esnasında ise kesik kesiktir.

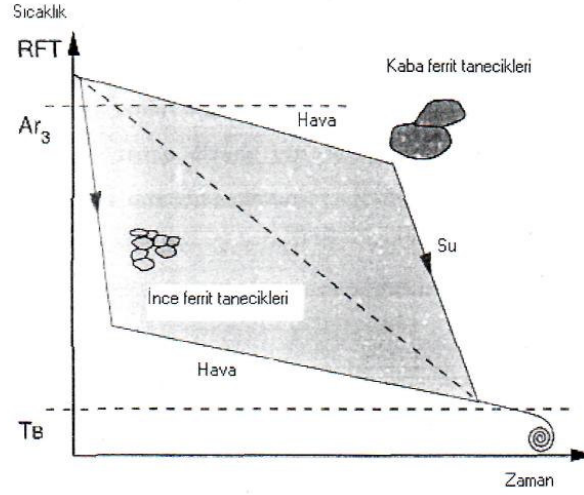
Faz geçişleri bakımından, soğutma tablasındaki koşullar CCT diyagramına benzerken, rulodaki soğuma koşulları TTT diyagramlarına daha yakındır. Çünkü rulo merkezi 1-2, saat arasında bir süre sabit sıcaklıkta kalır ve oldukça yavaş soğur. Aslında, rulo halinde tekbiçim soğutma elde edilemez, çünkü dış kısımlarda ve özellikle kenarlarda soğuma, iç kısımlara göre daha hızlıdır (Değirmenci, 2006).

Su ile soğutma esnasında, ferritteki düşük çözünürlüğe sahip elementlerin ara faz çökmesi, ani çekirdekleşme kinetiğı ile meydana gelir. Buna karşın, yavaş çekirdeklerime kinetikli fazlar, uygun sıcaklık sağlandığı taktirde bobin içinde çökeceklerdir. Örneğın, alüminyum-nitrit, 720°C gibi yüksek sarma sıcaklıklarında çökelerken, 600°C'nin altında çökme olmaz. Sıcaklığa olan bu yüksek duyarlılık nedeniyle, rulonun tekbiçim olmayan soğuma şartı, farklı alanlarda değışen miktarlarda AIN oluşmasına yol açar (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Bir rulo çelik sacın farklı bölgelerinde çökelmiş A1N oranları (Taşkıran, 2003).

Sıcak haddelemenin son bölümü olan rulo sarma işlemi, ikincil faz parçacıklarının miktarını ve dağılımını böylece çökme sertleşmesi miktarını belirler. Yüksek sarma sıcaklığı kaba ikincil faz parçacıklarına neden olurken, düşük sarma sıcaklığı, ikincil faz parçacıklarının daha düzgün dağılımlı olmasını sağlar. Sarma sıcaklığı, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikleri etkiler. Yüksek bir sarma sıcaklığı, hem uzamada hem de çekme dayanımında düşüğe neden olur (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.12 Soğutma sırasındaki ısısal davranış (Taşkıran, 2003).

Ruloda tutma zamanı, diğer bileşikler açısından bakıldığında, tanecik irileşmesi veya morfoloji değişimine (örneğin demir karbür oluşumuna) neden olur. Karbon gibi hızlı difüzyona uğrayan elementler kendi denge durumlarına ulaşabilirler.

2.2.6 Sıcak Haddelemede Kontrol ve Başlıca Kusurlar

Sıcak haddeleme işlemi esnasında yapılan kontrollerin ve ürün kalite parametrelerinin ölçüm teknikleri sırasıyla, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 Sıcak haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri

İşlem kontrol değişkenleri	Ölçme tekniği
Yeniden ısıtma fırını atmosfer analizi	Çözümleme pili
Slab sıcaklığı	Pirometre
Gerilme kuvvetleri	Elektriksel ölçüm, uzama-ölçer
Tezgah ayarları	Mekanik duyargalar
Genişlik, şekil	Optik ölçüm
Kalınlık ve kalınlık profili	X-ışım ölçümü
Düzlemsellik	Üç-açılı ölçüm yöntemi
Sıcaklık dağılımı	Pirometre

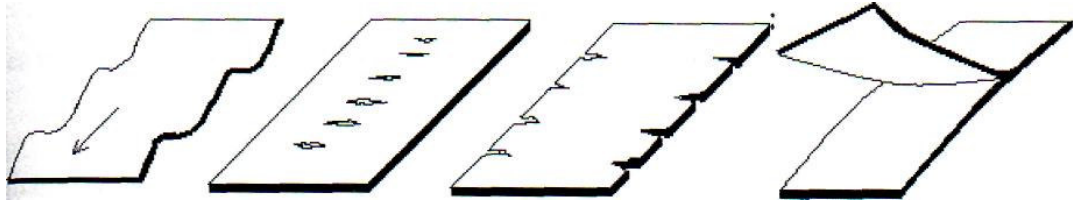
Çizelge 2.5 Sıcak haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri

Ürün kalite değişkenleri	Ölçme tekniği
Boyutlar (genişlik, kalınlık)	Optik ve X-ışını ölçümü
Düzlemsellik	Üç-açılı ölçüm yöntemi
Mekanik ve yapısal nitelikler	Bobin Sarma sıcaklığının ölçümü
Yüzey durumu	Görsel denetim

Sıcak haddeleme işleminin kusursuz yapılabilmesi için, öncelikle hammaddelerin hatasız üretilmiş olması gerekmektedir. Haddeleme işlemi sırasında ise sıcaklık ve hız kontrolü, oksit oluşumu, merdanelerin geometrileri ile yüzey durumları ve yağlama gibi etmenlerin gözetim altında tutulması gereklidir.

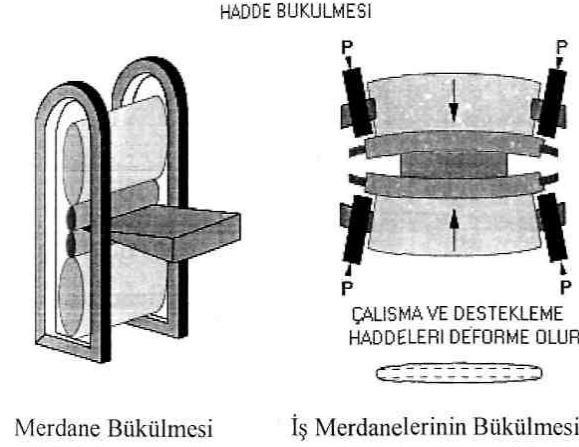
Yassı ürün hammaddesi olan slabların yüzey kusurları arasında çatlaklar ve çubuklar sayılabilir. Sürekli döküm tesisinin kontrol bölümünde giderilen bu kusurlar gözden kaçarsa haddeleme sırasında kusurlu bölgeler büyüyerek uzun yarıklara, hatta malzeme ayrılmalarına neden olur. Slabların pota, tandiş ve kalıp dökümlerinden kaynaklanan iç kusurlarından gözenek ve gaz boşluklarının ise haddeleme sırasında kaynarak kapanmaması, ürünün kusurlu olmasına yol açar.

Tufal batması, çatlak, katmer ve merdane izleri gibi yüzey kusurları haddeleme işleminden kaynaklanan kusurlardır. Saclardaki katlanmalar, çıkış tablasının ve son tezgahtan ayrılan sacın aralarındaki hız farkından kaynaklanmaktadır. Merdane izleri ise, devamlı aynı genişlikteki malzeme ile çalışma sonucu o genişliğe göre aşınan merdanelerin daha geniş malzeme için kullanılmalarından sonra malzeme üzerinde bıraktıkları izlerdir. Merdane üzerine kaynayan oksit gibi yabancı maddeler de malzeme üzerinde iz yapabilir. Dalgalı kenarlar, ortada enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları ve timsah ağzı gibi malzeme kusurları da haddeleme işlemi esnasında ortaya çıkar ve büyük çapta ıskartalara neden olur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Yassı çeliklerde haddeleme sırasında karşılaşılan başlıca kusurlar (Soldan sağa; dalgalı kenarlar, ortada enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları, timsah ağzı) (Taşkıran, 2003).

Dalgalı kenar kusuru, özellikle destek haddelerinin kullanılmadığı ikili düzen merdanelerde oluşan düşey doğrultuda eğim ve bombe geometrisi sonucu meydana gelir (Şekil 2.13). Sacın ortasında kalınlığı, kenarlara nazaran daha büyüktür. Bu nedenle kenarlar fazla uzarlar ancak serbestçe yayılamazlar ve böylece kenarda dalgalanmalar oluşur. Bu sakıncayı ortadan kaldırmak amacıyla özel bombeli merdaneler kullanılır.



Şekil 2.14 Sıcak haddeme sırasında iş merdanelerinin bükülmesi (Taşkiran, 2003).

Malzeme sünekliğinin düşük olması ve merdanelerde meydana gelen eğilme ortada ve kenarlarda enlemesine çatlakların oluşmasına neden olur. Öncelikle merdane eğilmesi sacın kenar kısmında basma, orta kısmında çekme gerilmeleri doğurur. Orta kısımdaki çekme serilmesi sonucu oluşan fazla uzamayı kaldıramayan sac malzeme çatlar.

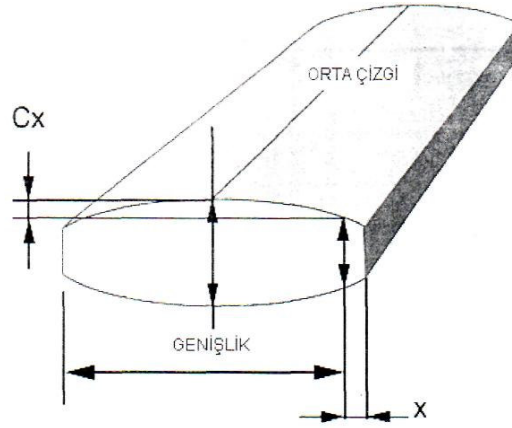
Bilindiği gibi haddeme sırasında malzemede kalınlık azalırken, uzunluk ve genişlik artar. Kenar kısımlarda merdanelerle malzeme arasındaki sürtünmenin orta kısma göre azlığı, kenarların daha çok genişlemesine neden olur. Orta kısım boyca daha çok uzar ve dolayısıyla sacın başı ve sonu yuvarlaklaşır. Homojen olmayan bu şekil değişimi kenarda çekme, ortada basma şeklinde kalıntı gerilmelere yol açar. Eğer malzeme, sac kenarlarındaki gerilmelere yeterli dayanımı gösteremezse kenar çatlaklarına engel olamaz. Orta kısımdaki fazla uzama ayrıca sacın ortadan ikiye ayrılmasına neden olabilir (Değirmenci, 2006).

Timsah ağzı kusuru, çeliklerde çok nadir görülen karmaşık bir metalürjik kusurdur. Slabda bulunan gaz boşluğu, tekbiçim olmayan yeniden kristalleşme veya homojen olmayan şekil değişimi başlıca oluşma nedenleridir.

Yassı ürünlerin sıcak haddelenmesi sonunda elde edilmesi istenen kalınlık, genişlik ve düzlemsellik gibi geometrik özelliklerin belli toleranslar dışında olmaları da haddeme

kusurlarındandır. Bu geometrik kusurlardan en önemlisi olan kalınlık kusuru, sacın boyu ve/veya eni doğrultusunda değişmesi şeklinde açığa çıkar. Kalınlık değişiminin belirli sınırlar dışına taşması, kalıpta kesilmesi, derin çekilmesi v.s. gibi şekillendirme işlemlerinde önemli sorunlar doğurur.

Kenarlarda ve ortada enlemesine çatlaklar konusunda da bahsedildiği gibi özellikle destek haddelerinin kullanılmadığı ikili hadde düzenlerinde merdanelerin hadde yönüne dik olarak bükülmesi ve bombeli bir geometride çalışmaları sonucu sacın kalınlığı ortada kenarlara kıyasla daha fazla olmaktadır. Bu sorunun çözümü için, geniş çaplı destek haddeleri kullanmak, otomatik kontrollü hidrolikler yardımıyla karşı bükme kuvveti oluşturan özel hadde sistemleri kullanmak veya özel şekillendirilmiş silindirik olmayan merdaneler kullanmak gibi önlemler alınabilir. Enine kalınlık değişiminin ölçümünde C_x ile gösterilen parametreden yararlanılır [C_x : sac kenarından x mm uzakta olan bir noktaya merkez çizgi arasındaki kalınlık farkı] (Şekil 2.15). Çelik kalitesine ve sac genişliğine göre farklılaşır ancak enine kalınlık değişimi, $C_{40} \leq 60 \mu\text{m}$ şartı ile sınırlandırılabilir (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.15 Yassı üründe enine kalınlık değişimi (Taşkiran, 2003).

Saclarda boyuna doğrultuda kalınlık değişimine yol açan nedenler, haddeleme işlemine, malzeme heterojenliğine ve merdanelere bağlı olarak çeşitlenmektedir. Haddeleme sırasında hızın değişimi, uygulanan gerilmenin değişimi (geri ve ileri çekme) ve merdane sıcaklığının değişimi, sac kalınlığını boy doğrultusunda değiştirir. Malzeme heterojenliğine bağlı neden, giriş kalınlığı ile malzeme sertliğinin değişmesidir. Sacın boyu doğrultusunda kalınlık değişimi sebeplerinin bir diğer kısmı olan merdanelere bağlı nedenler ise oval işlenmiş haddeler, kaçık işlenmiş gövde ve muylular ve yataklama hatalarını içerir. Haddeleme

sırasında boy yönünde kalınlık değişimi X ışını duyargaları yardımıyla devamlı denetim altındadır. 2,5 mm kalınlığının altındaki saclarda, gövdenin % 98'i, uç kısımların % 92'si $\pm 50\mu\text{m}$ toleransı dahilinde ölçülmektedir.

Kalınlık kusurlarının yanı sıra, yassı ürünlerin genişlik değerlerinin de belli toleranslar dışında olması genişlik kusurlarını doğurur. Nitekim sabit bir genişlik aralığı elde etmek oldukça zordur. Özellikle genişlik değişimi alt sınır değeri aşmamalıdır. Kaba haddede genişlik, özel kenar donanımları ile ayarlanır. Otomatik genişlik kontrol düzenekleri de genellikle bir önceki tezgahdaki genişlik değerine bağımlı olarak kaba haddeleme biriminin son tezgahında işlemektedir. İstenilen genişlik değerine kaba haddeleme sırasında ulaşılır ve bitiş hadde biriminden sancılara kadar bu değer korunmasına çalışılır. Bu da haddeler arasında oluşabilecek hız farklılıklarını ortadan kaldırmak için düzenlenen, haddelenen ürünün gerginliğini devamlı kontrol eden ve hızı ayarlayan motorlu birimler sayesinde başarılıdır. Genişlik fazlalıkları bu tip birimler sayesinde 8,5-10 mm arasında değişmektedir.

Çelik levhaların ve sacların düzlemsellik değerleri de kusur teşkil etmemesi bakımından devamlı denetlenen geometrik özelliktir. Düzlemsellik denetimi, ürünün referans düzlemine yatırılması ile bünyesindeki bel verme ya da hadde yönüne dik ve bölgesel dalgalanmaların ölçülmesinden ibarettir. Bu tip kusurlar, yassı ürün yüzeyinin değişik bölgelerindeki farklı lif uzunluklarından kaynaklanmaktadır. Özellikle soğutma tablasında ürünün soğutulması sırasında sıvının yüzeyde bazı bölgelerde kalması ve farklı soğuma koşulları oluşturması buna sebeptir. Ayrıca hadde merdanelerinin karşılıklı paralel ve örtüşen profillerde olması bu kusurları engeller. Haddelenmiş ürünün % 80'lik kısmında düzlemsellik değeri % 1'den düşüktür (Değirmenci, 2006).

Kıvrılan sacların ezilip iç içe geçmesiyle rulonun, rulo eksenine doğrultusunda uzaması, bobinlerde teleskobik şekil bozukluğudur. Bu hataya, bobin sancıların uygun olmayan şartları, sancıya sac beslemenin hatalı yapılması ve sacın kenar gerinimi neden olabilir.

Bunun dışında bazı hatalar da haddelerin yanlış montajı, malzemenin haddelere yanlış beslenmesi, yağlayıcılar ve sac yüzeylerinin kirlenmesinden kaynaklanabilir. Üretim modelinin uygun organizasyonu ile beraber ve daha önemlisi hadde ve hadde donanımlarının bakımı ile beraber tutarlı ve tam kontrollü haddeleme programı, çelik saclardaki çeşitli kusurları azaltan veya yok eden kati etmenlerdir.

2.3 Soğuk Haddeleme

Soğuk haddeleme, metal veya metal alaşımlarına yeniden kristalleşme sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda uygulanan plastik şekillendirme işlemidir. Soğuk haddeleme ile çelik saclara asgari boyutsal tolerans aralıkları, kaliteli yüzey durumu, daha iyi mekanik özellikler ve ayrıca birtakım belirgin fiziksel özellikler kazandırılarak, 1,5 mm'den daha düşük kalınlıklara ulaşmak mümkündür.

Düşük kalınlık, yüzey düzgünlüğü, yüksek şekillendirilebilirlik ve özellikle derin çekilebilirlik özellikleri soğuk haddelenmiş çelik sacların metal ve plastik kaplamalarla beraber çok geniş imalat alanlarında kullanılmalarını sağlamaktadır. Çelik sacların soğuk haddelenmesi aşağıdaki aşamaları içerir;

- 1) Dekapaj, 2) Haddeleme, 3) Tavlama, 4) Temper Haddeleme, 5) Kaplama, 6) Kontrol ve Paketleme.

2.3.1.Dekapaj

Sıcak haddelenmiş şerit üzerinde, üç tabaka halinde oksit vardır. En üst tabakada hematit (Fe_2O_3) bunun altında manyetit (Fe_3O_4) ve en alt tabakada ise demir oksit (FeO) bulunur. Yassı ürün üzerinde bulunan bu tabakalar soğuk haddelemeye uygun olmayan farklı bir kabuk teşkil ettiğinden, bu kabuğun işlem sırasında ürünün iç kısmına karışabileceği ve hadde kilolarına zarar verebileceğinden dolayı yok edilmesi gerekmektedir. Bu tufali yok etmek için çeşitli asit ve alkali (en yaygın kullanılanı sülfürik asittir) solüsyonları içersine yassı ürün daldırılır. Ancak öncelikle, sıcak haddelenmiş bobinler asitleme hatlarında açılır ve yüzeylerindeki tufal tabakaları kırılır. Bunun nedeni, sülfürik asitin hematit ve manyetit tabakalarını geçip en alt tabakadaki demir oksite etki etmesinin zor olmasıdır. Oksit tabakalarının kırılması bir bakıma asit tepkimesinin hızlanması ve işlem verimliliği için önemlidir. Burada şerit sürekli bir gerilim gücü altında küçük yatay rulo serilerinden geçirilip ileri ve geri bükülerek oksit tabakasının mekanik olarak parçalanması sağlanır (Değirmenci, 2006).

Oksit kırıcı merdanelerin sonundaki doğrultma silindirleriyle şerit, doğrultma işleminden geçirilir. Sac rulonun baş ve sonlarındaki bozuk kısımlar uç kesme makaslarında kesilirler. Birbiri ardı sıra gelen bobinlerin uç kısımları, kaynak makinesinde birleştirilerek devamlı şerit haline getirilir (Değirmenci, 2006).

Çelik sac, kesintisiz olarak asitleme işlemine maruz bırakılır (dekapaj). Bu kısımda kullanılan asitleme tanklarının çelik konstrüksiyonu, asite dayanıklı plastik ile kaplanmış ve 30 cm kalınlığında asit tuğlalarıyla örülmüştür. Her bir havuzun boyu 20-23 m, genişliği 2 m,

derinliği 1-1,5 m civarındadır ve bir asitleme hattında 3-4 adet havuz bulunur. Tuğlaların altına yerleştirilen "manyetik bombeleştirici sistemi" şeritin havuza dalarak gitmesini sağlar. Tankın içindeki karışım, buharla ısıtılarak 90°C sıcaklık civarında tutulan %6-26 sülfürik asit içeren su + sülfürik asit karışımıdır. Son teknolojilere sahip asitleme hatlarında, asit ve şeritin tam temasım sağlamak amacıyla havuz şiddetli biçimde çalkalanır. Karışım oranını sabit tutmak için asit, karışıma otomatik olarak beslenir (Değirmenci, 2006).

Asit tanklarından ayrılan şeritin altına ve üstüne soğuk ve minerallerinden arındırılmış su püskürtülerek yüzeydeki asit bulaşıkları yıkanır. şerit sıcak su tankına girer ve buranın çıkışında da lastik sıyırma merdanelerine girerek yüzeye yapışan asit bulaşıkları sıyrılır ve şerit yüzeyi bir nebze kurur. Tam kurutma ise, takip eden kurutma sistemindeki fanlardan buharın, şeritin alt ve st kısımlarına teması ile sağlanır .

Kurutma sisteminin çıkışında, dekapaj sırasında oluşabilecek hız farklarından doğan aksaklıklardan şerhin etkilenmemesi için geliştirilmiş bombeleştiriciler kullanılır. Sıcak haddelenmiş ruloların her iki kenarlarından 15-20 mm gibi bir miktar, dekapaj hatlarında dairesel bıçaklarla kesilir. Bunun nedeni, kenarlarda oluşan ezilme, çentik, yanık gibi kusurları ve genişlik farklılıklarını yok etmektir. Uzun şerit bu işlemten sonra çıkış makasında, kaynak edildiği yerlerden bölünerek başlangıçtaki bobinlerine ayrılır. Daha sonra yağlama makinesinde yağlama merdaneleri ile şeritin alt ve st yüzeyleri homojen bir biçimde yağlanır. Yassı elik, tekrar rulo haline getirilir, tartılır ve asitleme hattından çıkarılır (Değirmenci, 2006).

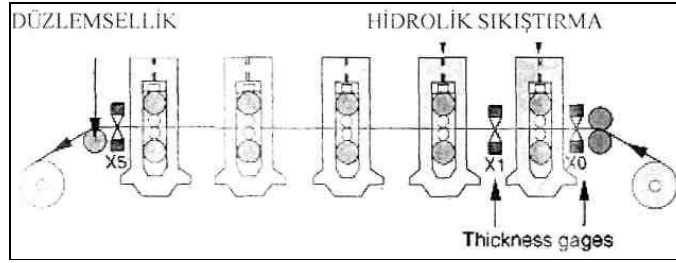
Buraya kadar anlatılan asitleme amaçlı işlemler, hem doğrudan kullanıma yönelik sıcak haddelenmiş rulolar hem de soğuk haddeleme bölümüne gönderilecek elik saclara uygulanabilir. Ancak yalnızca doğrudan kullanıma yönelik sıcak haddelenmiş sac rulolar için itme-çekme hatları adı verilen, nispeten daha az yer kaplayan dekapaj bölümü mevcuttur. İtme-ekme hatları, daha yüksek kalınlıklara sahip (2-12 mm) ve kaynak edilmeyen bobinlere uygulanır. Dolayısıyla, her rulonun ayrı dekape edildiği, küçük ve orta kapasiteli daha ucuz hatlardır. şerit, rulo çözücü tarafından itilir ve rulo sancı tarafından çekilir. Sistemin tankları fazla derin değildir (Değirmenci, 2006).

2.3.2 Soğuk Haddeleme Teknolojisi Ve İşleyişi

Asitleme hatlarından çıkan temizlenmiş, kenarları kesilmiş ve yağlanmış sac rulolar, tersinir tek tezgahta ileri-geri yönlerde veya beş haddeden oluşan sürekli tandem tezgahlarda tek yönde soğuk olarak inceltilerek sıcak haddelenmiş bobinlere nazaran çok daha düzgün bir

yüzey elde edilir. Sürekli tezgahların verimliliklerinin tersinir düzenlere göre çok yüksek olması nedeniyle ülkemizdeki Erdemir A.Ş.'de dahil tüm büyük kapasiteli işletmelerde soğuk haddeleme, sürekli tandem hadde düzenleri ile yapılmaktadır.

Soğuk haddehane giriş konveyörüne gelen bobinler uygun şekilde döndürülür, bobin hazırlama ve besleme grubunda bobin ucu, üstü tahrikli altı avare çekici merdane vasıtasıyla ilk tezgahın iş merdanelerinin arasına kadar yürütülür. İş merdaneleri, bobinin ucunu Kaptıktan sonra, girişteki üst çekici merdane yukarı kaldırılır.



Şekil 2.16 Sürekli soğuk tandem haddeleme işlemi (Taşkiran, 2003).

Şekil 2.16 sacın soğuk haddeleme işlemini göstermektedir. Haddeleme işlemi normal Şartlarda bilgisayar denetimi altında yapılır. Haddeleme için gerekli ön bilgiler (malzemenin giriş ve çıkış kalınlıkları, genişlikleri, kalite cinsi, merdanelerin yüzey durumları ve bobin numarası) hattın girişindeki kontrol terminalinden girilir. Bu bilgilere göre hesaplanan hız değerleri ve hadde aralıkları ile sistem işler. Şekil 2.16'ten de görülebildiği gibi kalınlık ve düzlemsellik ölçümleri geri beslemeli olarak çalışır.

Her n tezgahında kalınlık, giriş e_{n-1} değerinden çıkış e_n değerine azalır. Kalınlık incilmesi ve boydaki artış yanıl bir yayılma meydana gelmeden olur. Sacın tezgah girişinde hızı v_{n-1} ve çıkışta hızı v_n olursa kalınlık akış hızları arasındaki ilişki 2.8 eşitliğindeki gibi olur;

$$v_{n-1} \cdot e_{n-1} = v_n \cdot e_n \quad (2.8)$$

Böylece sac, hadde geçişlerinde sürekli hızlanır .Tandem olarak soğuk haddelemede, 0,4 ila 3 mm arasındaki kalınlıklarda, en yüksek çelik sac hızı, 600 ile 1500 m/d arasında değişmektedir (Erdemir A.Ş.'de 1441 m/d). 1200 mm genişliğinde, 0,13-0,4 mm arasındaki kalınlıklardaki ince paketleme şeritlerinin haddelenmesinde kullanılan hız değerleri ise 1500-2300 m/d arasında değişir (Değirmenci, 2006).

Haddeleme enerjisi çok yüksek tork gerektiren çalışma merdaneleri ile nakledilir. Bir tezgahın gücü 3 ile 8 MW arasında değişir. Birinci tezgahın motorları en az güç üretirken, tezgahların güç değerleri sırayla artmaktadır ve son tezgahta en yüksek güç gereklidir (1. tezgah 2000 BG, 5. tezgah 5000 BG). Günümüzde hadde tezgahları, doğru ve alternatif akımlı elektrik motorları ile tahrik edilmektedir. Motor milleri üzerinde volan bulunmaktadır ve böylece haddeleme sırasındaki azami yükler karşılanabildiği gibi gerekli motor gücü de düşürülebilmektedir. Devir düşürücü dişli, yüksek hızlı elektrik motorunun devir sayısını merdanelerinkine indirgemektedir

2.3.2.1 Hadde Donanımları

Sürekli tandem soğuk haddeleme grubunda bulunan tezgahlar şu donanımlara sahiptir;

- Otomatik kalınlık kontrol sistemi,
- 1. ve 5. tezgahlarda, otomatik kalınlık kontrol sisteminden gelen bilgilere göre hareket ederek baskıyı sağlayan hidrolik silindirler,
- Haddelerdeki ezme kuvvetlerini ölçen yük hücreleri,
- Tezgahlar arasındaki sacın gerginliğini sağlayan gergi merdaneleri,
- 4. ve 5. tezgahlarda iş merdanelerinin hidrolik kuvvetlerle iki yöne bükülmesini sağlayan düzenek,
- 4 ve 5. tezgahlarda hızlı merdane değiştirilmesini sağlayan merdane değiştirme arabaları.

Bilindiği gibi gergi kuvveti ile haddeleme sırasında, haddeleme basıncı düşer. Bu nedenle soğuk haddelemede sac gerginliğini uygun olarak seçmek ve onu sabit tutmak çok önemlidir. Sac gerilimi, merdaneler ve sancıların hızlarının kontrolü vasıtasıyla otomatik olarak sabit tutulur. Bu yüzden otomatik kontrol sistemi, duyurga olarak gerginlik ölçer cihazlar da içermektedir (Değirmenci, 2006).

2.3.2.2 Merdaneler

Soğuk haddelemede kullanılan merdaneler % 3 – 5 arası krom içeren dövülmüş veya dökülmüş çelikten imal edilirler. Daha yüksek alaşımlılar geliştirilmektedir. Merdane yüzeyleri taşlanır ve hatta özel uygulamalar için parlatılır. Bu uygulama, kullanılmış merdanelerde, haddelemenin neden olduğu sertleşmiş yüzeyi yok eder ve istenen pürüzlülük değerini korur. Orta kaliteli tezgahlarda Ra pürüzlülük değeri 0,5µm civarındadır. İnce çelik

sac haddeleme sırasında son tezgahta, 3 - 5 um gibi çok daha yüksek Ra pürüzlülük değerlerine ulaşmak amaçların. Bunun nedeni; yüksek pürüzlülük, sıcak daldırarak galvanizleme yöntemi sırasında çinko kaplamanın yapışma oranını yükseltir, gaz devirdayımını kolaylaştırır ve tavlama sırasında yapışmaya izin verir. Her taşlama sonrasında merdaneler krom kaplanabilir. Bu işlem aşınmayı sınırlar, bir dahaki taşlama süresini geciktirir (Değirmenci, 2006).

İş merdaneleri olarak adlandırılan sac la temas halindeki rulolar, haddeleme basıncına maruz kalırlar ve bükülmeleri, büyük çaplara sahip, daha sağlam destek merdaneleri ile sınırlandırılmıştır. İş merdanelerinin çaplarının küçültülmesi temas yayının boyunu ve böylece haddeleme kuvvetini düşürür. Ancak, iş merdanelerinin sacı sürtünme kuvvetleri vasıtasıyla çektiğinden, temas alanı, haddenin metali kapması için yeterince geniş olmalıdır. Bu yüzden bu gücün haddeleme kararlılığına kritik bir etkisi vardır.

2.3.2.3 Soğutma ve Yağlama

Haddeleme sırasında sürtünmeyi azaltmak ve merdanelerde oluşan ısıyı almak için malzeme ye merdaneler üzerine düşük miktarda haddeleme yağı içeren (% 1-5) emülsiyon tatbik edilir. Soğuk haddeleme işleminin sıcaklığı genellikle 60°C ile 130°C arasında tutulmalıdır (paketleme çelikleri için bazen 1800 C kadar olabilir). Düşük kalınlıklarda sürtünme katsayısı arttığında haddeleme kuvveti artar. Bu nedenle, sac ne kadar ince olursa, yağlama o kadar verimli olmalıdır. Bazı durumlarda, yüksek yağ yoğunluklu (% 6-15) istikrarsız mekanik emülsiyonlar uygulanabilmektedir. Hayvansal, bitkisel yağlar ve sentetik petrol yağları gibi bir çok çeşit yağ, emülsiyonların içerisinde kullanılabilir. Kullanılan emülsiyonlardan, soğutma ve yağlama görevlerinin yanında ısı işlem öncesi kolayca temizlenebilme özelliği de beklenmektedir. Su ve çözülebilir yağ karışımları, yalnızca basınçlı havayla bile kolayca temizlenebilir. Çok ince sac ların soğuk haddelenmesinde su ve çözülemez yağ karışımları kullanılır ve bu emülsiyonların haddeleme sonrası temizlenmesi oldukça güçtür. Tavlama öncesi bu kalıcı yağları ortadan kaldırmak için alkali temizleme işlemi uygulanır (Değirmenci, 2006).

Soğuk haddelemede soğutucu ve yağlayıcı olarak görev yapan sıvıların etkileşim içinde olduğu konular aşağıdaki gibidir;

- Haddeleme kuvveti, farklı merdanelerdeki bükülmelerin derecesini belirler. Çelik sac la temas halindeki iş merdanelerinin düz olması; metalin akış gerilimine, sürtünme katsayısına ve böylece yağlayıcıya bağlıdır.

- Hadde vuruşlarındaki sıcaklık, soğutma verimliliği ile kontrol edilir. Aşın ısınma yağlayıcı filminin bozulmasına neden olacak ve hadde basıncındaki geri tepmeyle birlikte, sac ve merdane arasındaki mikro sürtünmeler nedeniyle lekeler oluşacaktır.
- Sacların yüzey pürüzlülüğünü, iş merdanelerinin yüzey durumu ve ayrıca yağlama etkiler. Aşın yağlama kalın film oluşturur, çelik merdane temasını azaltır ve çelik sac üzerinde daha iyi pürüzlülük değeri sağlar. Ancak aşın yağlama diğer taraftan durağan olmayan, titreşimli haddelemeye ve dolayısıyla sac kalınlığında farklılıklara neden olur.
- Merdanelerdeki ısıl şekil bozuklukları haddeleme hızına ve ayrıca soğutma yoğunluğuna bağlıdır.

2.3.2.4 İstenen Düzlemselliğin Sağlanması

Sıcak haddelemede oluşan kusurlar konusunda da bahsedilen dalgalı kenarlar ve çatlaklar kusurlarının oluşum nedeni olan malzemenin kenar veya merkez liflerinin fazla uzaması, soğuk haddelemede de söz konusudur. Bunun nedeni merdane ve malzeme arasındaki profil farklarından kaynaklanmaktadır ve yeterli düzlemsellik sağlamak adına kalınlık profili, soğuk haddeleme boyunca korunmalıdır.

İşlem sırasında gelen yüke dayanamayan merdanelerin bükülmesi, başlangıçta zaten kötü islenmiş merdane veya ısıl genleşme farklılıkları, malzeme ile merdane arasında oluşan kalınlık profili farklarının nedenleridir. Örneğin ısıl genleşmeden kaynaklanan hataların ortadan kaldırılması için bölgesel soğutma sistemi kullanılır. Bükülmeyi ortadan kaldırmak için ise, tersine bükme momenti oluşturan düzeneklerin kullanımı başta gelir. Bundan başka, altılı veya daha fazla sayıda hadde tertipleri kullanmak, dörtlü hadde düzenlerinde yanal doğrultularda hareket edebilen iş merdaneleri kullanmak, birbirlerine göre ufak yer değiştirmeler yapabilen üst ve alt iş ve destek merdaneleri kullanarak genişlik boyunca basınç dağılımını düzenleyen donanımlar kullanmak diğer önlemlerdir.

Bahsedilen düzlemsellik hataları, haddeleme esnasında malzemedeki gerginlik sebebiyle gözükmebilir. Malzeme üzerindeki gerilmenin kalkmasından sonra ortaya çıkan dalgalanmaları ortadan kaldırmak için, işlem sırasında malzemenin her bir bölgesinin gerginlik bakımından incelenmesi ve bunun bir kontrol sistemine bağlanması üstün sonuçlar verir. Bu amaçla özel gerilim ölçerler kullanılır (Değirmenci, 2006).

2.3.2.5 Kalınlık Farklarının Azaltılması

Soğuk haddelemenin amacı, dar toleranslarla verilen sac kalınlıklarını elde etmektir. Sac kalitesinde kalınlık düzenliliği önemli bir etmendir. Gelişen teknoloji ile beraber soğuk haddelemede, aynı döküm numarasına ait çelik sacların aynı rulo içindeki kalınlık farkları birkaç mikron mertebesine indirgenmiştir.

Çelik sacın kalınlığı bir hadde çıkışında, yüksüz haldeki hadde aralığı ile merdanenin yük anında esnemesinden kaynaklanan aralığın toplamına eşittir. Hadde yükü, çeliğin akış gerilimine, sac genişliğine ve o haddedeki kalınlık indirgenmesine bağlıdır. Diğer Parametreler değiştirilemeyeceğinden, kalınlık indirgenmesi ve dolayısıyla hadde aralığı ayarlanarak sabit kalınlık elde edilmelidir.

Akış kanunundan giriş -çıkış, kalınlık ve hızlarının birbiriyle bağlantılı olduğu aşıkardır. Bu nedenle kalınlıktaki değişim, hadde çıkışlarında hızları değiştirir. Nihai kalınlığı etkilememesi bakımından, bir haddedeki hız farkı diğer bitişik haddelere nakledilir. Kalınlığın ölçümü, X veya gama ışınları yardımıyla ve temassız çalışan ölçü aletleriyle yapılır. Birinci ve ikinci tezgahların arasına yerleştirilen kalınlık ölçü aleti, ilk tezgahtaki hadde aralığı ayarım sağlayan vidalı mili kontrol eder. Birinci tezgah girişine başka bir ölçü aleti monte edilebilir ama bu ölçü aleti, metalin mekanik özelliklerindeki değişimlere duyarlı olmayacaktır. Sabit bir ilk tezgah hızı için, birincil kalınlık değişimleri, giriş hızı v_0 'ın iyileştirilmesi ile telafi edilir.

Kalıcı olabilecek kalınlık değişimleri ilk tezgahın çıkışında fark edilir ve bu tezgahın hızı ayarlanarak düzeltilir (Değirmenci, 2006).

2.3.2.6 Yüzey Temizliği

Soğuk haddeleme birimini terk eden sacların yüzeylerinin temizlik derecesi, demir ve karbon tortularının miktarlarıyla (mg/m^2) nitelendirilir. Bu iki değer çoğunlukla yağlama ve soğutma şartlarına ve iş merdanelerinin pürüzlülüğüne bağlıdır.

İlk tezgahlardaki merdanelerin pürüzlülüğü yapışmayı artırır. Bu nedenle düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmaları tercih edilir. Son tezgahta, ince sacda istenen nihai pürüzlülük değeri yüksektir, ancak verilen kalınlık azalması düşüktür. Böylece meydana gelen yapışma önemsizdir (Değirmenci, 2006).

En iyi yağlama koşulları, sac kalınlığına ve indirgenme oranına bağlıdır. Bu nedenle ilk, orta ve son tezgahların, birbirlerinden ayrı yağlama ve soğutma sistemlerinin olması arzu edilir.

Rulo sac içine taşınan emülsiyon; havayla temizleme ve ısıtarak kurutma yöntemleriyle yok edilir. Rulo sarma gerilimi ve pürüzlülük; nihai temizlik ve fırın tavlamaadaki yapışma için Çok önemlidir. Bu parametreler, rulo sarma anında atmosferik gazların sirkülasyonu ile gelen rulonun yüzeyindeki karbonun yok edilmesini kolaylaştırır. Sacın düzgünlük değerinin kötü olmasından dolayı, düşük pürüzlülük ve aşırı veya düzensiz rulo sıklığı, ısıtarak kurutma temizliğine engel teşkil eder. Bu, takip eden yüksek sıcaklıktaki fırın tavlama işlemi sırasında meydana gelecek olan yapışmayı destekler, rulo açma anında çatlama ve kırılma gibi kusur oluşumuna yol açar ve yüzeydeki artık karbon varlığının fazla olmasına sebep olur (Değirmenci, 2006).

Paketleme işlerinde kullanılan çok ince çelik saclarda, yüksek kalınlık azaltması için gereksinim duyulanlar, takip eden yüzey kaplama işlemleri için istenen temizlik değerleri ile uyuşmaz. Yağ oranı fazla olan haddeleme emülsiyonları, sıcaklık tesiri ile yanıcı ve uçucu özelliğe sahip olmadığı için tavlama hattına gönderilmeden önce temizlenmelidir. Bu nedenle çelik saclar, alkali temizleme hattında sıcak alkali banyosuna daldırma ve sıcak su püskürterek fırçalama yöntemleri ile temizlenir. Hattın çıkışında sıcak hava üfleme suretiyle şerit kurutulur.

2.3.2.7 Soğuk Haddelemede Mikroyapı

Soğuk haddeleme sırasında malzemenin mikroyapısı özellikle, tane şekli değişikliğine uğramaktadır. Taneler, deformasyon yönünde uzarlar ve böylece özellikler yöne bağımlı hale gelir. Soğuk haddeleme oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinin artması deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılır. Deformasyon sertleşmesi, sünekliğin azalmasına yol açtığından, metal sacların soğuk haddeleme oranı sınırlıdır. 1,5 mm kalınlığındaki yumuşak çeliğin % 30 oranında kalınlık azalmasında genel gerilme 60 kgf/mm², sert çelikte aynı oranda 90 kgf/mm²'dir. Soğuk haddeleme, haddelenen metalin genel gerilmesinin 90 kgf/mm² 'ye ulaşmasına kadar devam ettirilir.

Bu yumuşak çelikte %80 toplam kalınlık azalmasına, yüksek karbonlu çeliklerde %30'a varan oranlara ve alaşımlı çeliklerde % 15-20 arasındaki oranlara tekabül eder. Belirli haddeleme oranlarında ise malzemenin sünekliği sıfıra iner ve haddeleme sırasında çatlamaya sebep olur.

Çatlak oluşumunu önlemek ve soğuk haddeleme ile azalan sünekliği arttırmak amacıyla malzemeye zaman zaman ara tavlama işleminin uygulanması gerekir. Artarda yapılan soğuk haddeleme ve tavlama işlemleri genellikle "soğuk haddeleme + tavlama" çevrimi olarak isimlendirilir.

Bu çevrimde uygun bir düzenleme ile malzemeye istenilen mekanik özellikler kazandırılabilir. Çelik sacın tam tavlı malzemeden daha yüksek dayanımlı olması istendiğinde, son işlem, aranan dayanımı sağlayacak deformasyon oranında yapılan soğuk haddeleme olacaktır. Eğer ürünün tamamen yumuşatılmış olması istenirse son soğuk haddeleme kademesini yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde yapılan bir tavlama izlemelidir (Değirmenci, 2006).

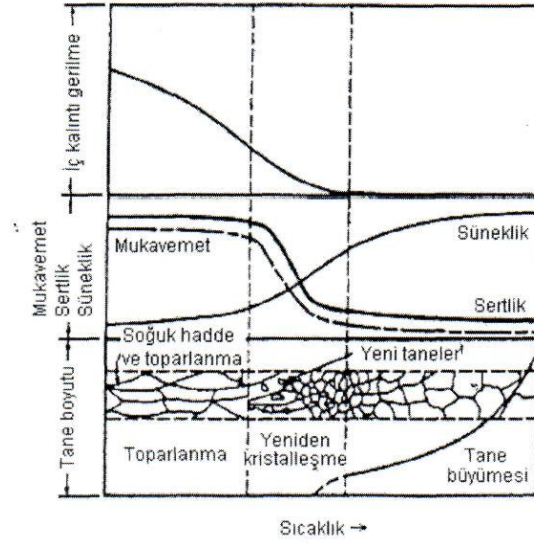
2.3.3 Yeniden Kristalleşme Tavlaması

Düşük karbon içeren (% 0,06-0,10 arası) çelik sac ve bantlar; yumuşatılmak, soğuk işlem sertliğini gidermek, sünekliği arttırmak, yeni ve ince taneli bir içyapı elde etmek ve daha sonra kullanılacağı alanlarda göreceği şekillendirme işlemlerine uygun mekanik özellikleri kazandırmak amacıyla, soğuk haddelemeden sonra 650-720°C sıcaklıkları arasında yeniden kristalleşme tavına tabi tutulurlar. Bu işleme kısaca tavlama denilmektedir.

Yeniden kristalleşme tavlaması çelik saclara iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir. Bunlar; çelik sacın rulo halinde sarılmış olarak kontrollü bir fırın içinde birkaç bobin üst üste tavrıldığı yığın tavlama ve rulo sacın açılarak bir fırından geçirildiği sürekli tavlama seklindedir. İki yöntemin de ayrıntıları ve birbirlerine göre artıları ve eksileri mevcuttur ancak bu konudan önce, yeniden kristalleşme konusunun metalürjik olarak incelenmesinde fayda vardır.

2.3.3.1 Metalürjik İnceleme

Soğuk haddeleme sonucunda çelik malzemede sertleşen ferrit kristalleri yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca tane yapısı bozulur, iç gerilmeler ve anizotropi meydana gelir ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özellikler değişir. Yeniden kristalleşme tavlama ile malzemeye istenen özellikler kazandırılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, bu olayın bir saat içinde tamamlandığı sıcaklık olarak tanımlanır.



Şekil 2.17 Tavlama ısıtma safhalarının metal özelliklerine etkisi (Taşkıran, 2003).

Yeniden kristalleşme tavlı sırasında malzeme içyapısında Şekil 2.17'de de gösterildiği gibi; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi olmak üzere üç safha halinde değişimler baş gösterir.

Toparlanma, soğuk haddelenmiş malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığına varmayan sıcaklıklara maruz bırakılması ile iç gerilmelerinin azaldığı ve büyük ölçüde ortadan kalktığı tavlama safhasıdır. Bu sırada sertlikte önemli bir düşme ve mikroyapıda da gözlenebilir bir değişim olmaz. Ancak elektrik ve ısıl iletkenlik gibi fiziksel özellikler artarak şekil değişiminden önceki değerlere ulaşır. Mekanik özellikler neredeyse sabit kalır. Bu olaya poligonizasyon ya da gerilme giderme tavlı da denilmektedir.

Isıtılmaya devam edilen çelik sacın sıcaklığı, o malzemeye özgü bir sıcaklığa geldiğinde malzemenin mikro yapısında ve mekanik özelliklerinde değişimler başlar. Yeniden kristalleşme sıcaklık aralığında yapılan tavlama sırasında, şekil değişimi yönünde uzamış olan tanelerin yerine, onların arasından, aynı bileşim ve kristal yapıda yeni eşksenli taneler oluşmaya başlar. Yeniden kristalleşme ile malzemenin mukavemet ve sertliğinin azalması, sünekliğinin artması şeklinde mekanik özelliklerinin değişiminin sac üretiminde önemi çok büyüktür (Değirmenci, 2006).

Yeniden kristalleşme sıcaklığına, soğuk haddeleme miktarı, ilk tane boyutu, kimyasal bileşim ve tav süresi gibi etkenler tesir ederler. Bunun yanı sıra şu genellemeler yapılabilir;

- Soğuk haddeleme miktarı arttığında yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.
- Soğuk haddeleme miktarı ne kadar fazla ise tavlama sıcaklığı ne olursa olsun yapı daha ince taneli olur.
- Tavlama sıcaklığı yükseltirirse tavlamanın tamamlanma süresi kısılır.
- Metalin saflığı arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.

Yeniden kristalleşen taneli yapıya sahip malzemeler, tavlama süresince artan sıcaklıklarda uzun süreler daha tutulursa yapıdaki taneler büyür. Aşırı tane büyümesi, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. İri taneli bir çelik sac plastik şekil değiştirdikten sonra, yüzeyi portakal kabuğu görünümünde pürüzlü olur. Bu nedenle derin çekme, bükme, gererek şekillendirme gibi şekil verme işlemlerinde çelik sacların iri taneli olmaması istenir.

2.3.3.2 Yığın Tavlama

Yığın tavlama ya da kullanılabilen diğer adlarıyla fırın veya bobin tavlama aynı tav derecesinden olan bobinler, en büyük çapa sahip olan alta gelmek üzere, göbek delik eksenleri düşey olacak şekilde, bir kaide üzerine istif edilirler.

Azami bobin yükleme yükseklikleri bu fırınların 3 ila 4,3 m arasındadır (Erdemir'de 4,2 m civarında). Dolayısıyla bobin genişliğine göre fırınların yüklendikleri bobin sayıları 2 ila 5 arasında değişir. Oksidasyonu önlemek için, hidrojen-azot karışımı ya da saf hidrojen içeren koruyucu atmosfer gazları kullanılır. Koruyucu atmosfer gazının daha iyi sirkülasyonu ve gömleğin rahatlıkla yerleştirilebilmesi için rulo sacların aynı eksende yüklenilmesine dikkat edilir. Kaide üzerine yerleştirilmiş gömlek içindeki gaz sirkülasyonunu ve bobin sargıları arasındaki ısı iletimini kolaylaştırmak amacıyla, her iki bobin arasına dairesel, ısı yüzeylerinde dilimler olan konvektör plakası konulur. Gömlek içindeki koruyucu gazın sızdırmazlığını temin etmek için, gömlek etek kısılancın yerleştirildiği kaide yuvasına, sızdırmazlık elemanı seramik elyaf serilir (daha ekonomik sızdırmazlık elemanları kum ya da su-yag karışımı kullanılabilir).

Malzeme yükleme işi bittikten sonra paslanmaz çelik sacdan imal edilmiş gömlek yerleştirilir. Daha sonra içerdeki havanın dışa için koruyucu atmosfer gazı verilir ve bir yandan da dışarı alınır. Bu işleme gömlek içindeki atmosferde % 1 oranında oksijen kalana dek devam edilir ki bu da 1,5 - 2 saat zaman alır. Atmosfer hazırlama işlemi tamamlandığında gömlek üzerine çan şeklindeki fırın yerleştirilir. Fırın ve kaide sıcaklıkları malzeme kalitesine göre ayarlanır. Değişik kalitelilerdeki malzemelerin farklı tav dereceleri vardır.

Fırın tabanı, atmosferin, bobinlerin dış yüzeylerinden ve konvektör plakalarından geçerek sirkülasyonunu sağlayan bir fan ile donatılmıştır. Isısını bobine veren gaz, ısı dönüştürücülerine girerek yeniden ısıtılır. Bobinin içi, dışı ve köşeleri taşınım yoluyla ısınırken, aynı zamanda can şeklindeki fırın duvarları da bobinin dış yüzeyini radyasyon yoluyla ısıtır, ancak bu ısıtma oranı nispeten düşüktür. Koruyucu atmosfer gazı olarak kullanılan saf hidrojenin diğer gaz, hidrojen-azot karışımına göre radyal geçirgenliği daha yüksektir (saf hidrojen % 0,15, diğeri %0,06).

Fırın sıcaklığı 700⁰C'nin üzerine çıktığında aşırı tane büyümesi, metal içyapısında baş göstermektedir. Özellikle hidrojen-azot karışımının koruyucu gaz olarak kullanıldığı durumda, azot yapıdaki artık alüminyumla etkileşir ve nitrit oluşturur. Aşırı ısınma, sıcaklığın otomatik kontrolü ile önlenerek, 750°C üst sıcaklık sınırını aşmayacak şekilde ayarlanır. Hidrojen-azot karışımı ile bu sıcaklığa 5 ila 10 saat arası, saf hidrojen ile 10 ila 20 saat arası ısıtma periyodunda ulaşılır.

Soğutma anında ise hidrojenin kullanımı, düşük yoğunluğa sahip olduğundan daha hızlı gaz akışım beraberinde getirir. Böylece, hızlandırılmış soğutma ile bobinlerde daha tek biçim sıcaklık dağılımı ve daha üstün verimlilik elde edilir (Değirmenci, 2006).

Yüksek radyal geçirgenliğe sahip saf hidrojen kullanımı, bobinin yüzey ve iç kısımları arasındaki sıcaklık farkını en aza indirir ve bu da daha tekbiçim mekanik özellikler elde edilmesini sağlar.

Isıtma çevriminin başlangıcında haddeleme işleminden gelen yüzeye yapışmış yağlar yanar. Azot bazlı atmosferlerde, bu aşamada, bobin merkezi ve kenarları arasındaki geniş sıcaklık farkı, daha sıcak kenarlarda oluşan yağın buharı nedeniyle meydana gelen çatlakları tetikler ve böylece siyah kenarlar oluşur. Isıtma hızı bu nedenle sınırlandırılmalıdır. Tabiki bu risk saf hidrojen atmosferinde oluşmaz.

Hidrojen-azot karışımlı koruyucu gazlar ile yapılan yığın tavlama sonucu, yapıya azot geçişi nedeniyle malzeme daha yüksek dayanıma sahip olur. En yüksek sıcaklık elde edildiği zaman, hidrojen-azot karışımı ile metaldeki en fazla sıcaklık farkı 6 saat sonunda 500°C iken saf hidrojen ile 12 saat sonunda 200°C'dir .

Fırın atmosferinde çeşitli yerlerde ve bobin tabanında bulunan ısı ölçerlerden alınan verilere göre işleyen bilgisayar kontrollü sıcaklık çevriminde, her bir fazın süreç ayarı tamamen otomatiktir. Bobinin her tarafında istenen sıcaklığa ulaşıldığında fırının dış kısmı alınır ve bobinler gömlek içinde koruyucu atmosfer altında soğutulur.

İki farklı koruyucu atmosfer gazının uygulama çevrimleri ve aynı malzeme üzerindeki etkileri Çizelge 2.6'da bir örnekle gösterilmiştir. Buna göre her iki atmosferle de uzun çevrimlerde iyi yüzey temizliği kalitesi elde edilmektedir. Ancak düşük sıcaklıktaki kısa çevrimlerde saf hidrojenin üstünlüğü çarpıcı bir şekilde görülmektedir.

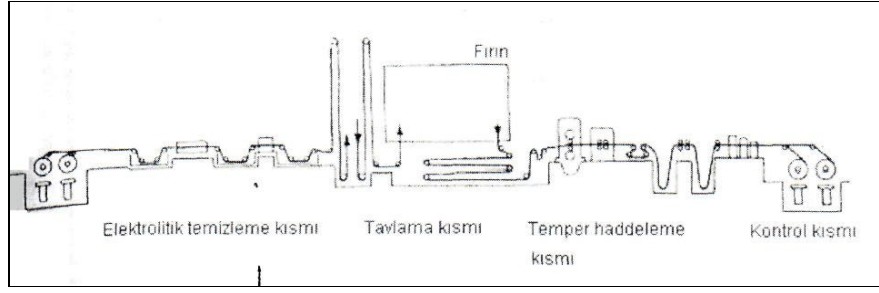
Çizelge 2.6 İki farklı atmosferle yapılan yığın tavlama süreçleri ve etkileri

Koruyucu atmosfer	Tavlamada en düşük sıcaklık	Isıtma süreci (10 saat-temizlemek için)	Soğutma süreci	Verimlilik (ton/saat)	Yüzey temizliği (mg/m)	Akma dayanımı (MPa)
H ₂	650 ⁰ C	20 saat	22,5 saat	1,27	10	190-210
HN _x	650 ⁰ C	30 saat	28 saat	0,93	30	190-230
H ₂	700 ⁰ C	26 saat	22,5 saat	1,15	5	160-180
HN _x	700 ⁰ C	46 saat	28 saat	0,73	7	160-190

2.3.3.3 Sürekli Tavlama

Sürekli tavlama işlemi ilk olarak 1972 yılında, Japonya'nın "Nippon Steel" firmasının Kimitsu İşletmesinde, sac ürünler için hayata geçirilmesinden günümüze kadar olan süreçte, barındırdığı birçok avantajı ile yığın tavlama işlemine alternatif yöntem olarak çelik sac teknolojisindeki yerini almıştır. Sürekli tavlama işleminin beraberinde getirdiği en büyük artısı şüphesiz işlemin çabukluğudur. Şöyle ki, aynı hat üzerinde tavlama ile beraber barındırdığı temper haddeleme ve denetleme işlemleri de dahil yalnızca 10 dakika kadar sürmesi, yığın tavlamaya göre günler mertebesinde zaman kazancı sağlar ve depolama sırasında yapılacak işlerden tasarruf getirir. Ayrıca sürekli tavlama hattında bobinin açılması, artık hadde yağlarının ve bobinlerdeki istenmeyen maddelerin çok iyi şekilde arındırılmasına olanak tanınması da getirdiği ikinci önemli artıdır.

Sürekli tavlama hattı öncelikle, şematik olarak Şekil 2.18'de de gösterildiği gibi yüzey temizliği bölümünde bahsedilen temizleme işlemleri ile başlar. Tavlama işlemi dikey fırınlarda yapılır. Sürekli tavlama fırınının giriş ve çıkış bölümlerinde bulunan biriktirme kısımları, fırın içinde veya kaynak ve kesme işlemleri sırasında meydana gelecek duraklamalar ile sacın etkilenmemesini sağlar. Bu bölümlerin uzunlukları, fırından geçen sacın en yüksek hızının fonksiyonu olarak hesaplanır. Fırın içersinde meydana gelecek bir duraklama sacın kırılarak ayrılmasına neden olur (Değirmenci, 2006).



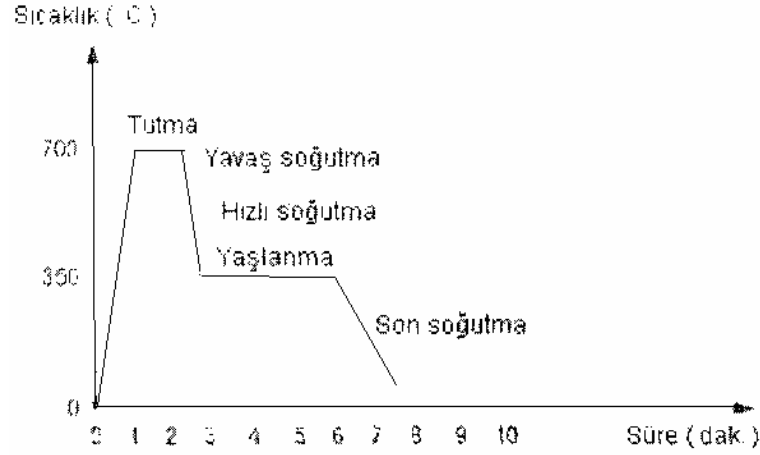
Şekil 2.18 Sürekli tavlama hattı (Taşkiran, 2003).

Başlangıç bölümünde nöbetleşe çalışan bobin çözücüler, bobin başı ve sonu bölgelerini kesen makaslar, kaynak makineleri, elektolitik yağ çözücü, fırçalama, temizleme ve kurutma bölümü ve sac biriktirici kısımları yer alır. Çıkış bölümünde ise sistem, sac biriktirici, makaslar ve iki adet bobin sancıya ek olarak genellikle temper haddeleme tezgahlarını, kenar kesme makaslarını, kaplamasız teslim edilecek sac cinsi için yağlama ünitesini ve kalite gözlem donanımlarını barındırır.

Şekil 2.19'daki sıcaklık-zaman grafiğine göre işleyen sürekli tavlama fırınları şu bölümlerden oluşmaktadır;

- Ürüne göre 620-850°C sıcaklıkları arasında değişen yeniden kristalleşme sıcaklıklarına ulaşmayı sağlayan ısıtma bölgesi,
- Yeterli tane büyümesine izin verecek kadar bir süre (yaklaşık 30 saniye) sıcaklığın sabit tutulduğu tutma bölgesi,
- İçyapı kontrolüne imkan veren, yavaş soğutma bölgesi ($\sim 10^\circ\text{C/s}$),
- Aşırı doymuş çözeltideki yeterli karbon miktarını koruyarak çeliği yaşlanma işlemine hazırlamak amacıyla taşıyan hızlı soğutma bölgesi,
- Çözülmemiş karbonu çökeltmek için ilerde olması muhtemel yaşlanma tepkimelerini önleyen yaşlandırma bölgesi.

Metali oksidasyona uğratmadan sıcaklığın oda sıcaklığına indiren son soğutma bölgesi, fırınlar bütünüyle, ısıya dayanıklı tuğlalarla çevrilidir. İçlerindeki atmosfer, % 1 - 2 H içeren azot-hidrojen karışımından ibarettir. Fırın içindeki kılavuz merdaneler, düşük ısı genleşme gösteren ısı dayanımlı çeliktir. Merdanelerin geometrilerinde buna rağmen, sac merdane ve ortam sıcaklıklarındaki farklılıklardan dolayı değişimler olabilir.



Şekil 2.19 Sürekli döküm sırasında bir çelik sacın sıcaklık-süre grafiği

Bu etkiyi telafi etmek için taşlama işlemleri ile merdanelere özel biçimler verilir (Değirmenci, 2006) Hat boyunca ve özellikle de fırın içersinde merdane aralarından akan sacın eksantrikliği kaçınılmazdır. Bu amaçla eksenel kaçıklığı yer değiştirmelerle telafi eden hareketli merdaneler ve bunları kumanda eden cihazlar kullanılır (Değirmenci, 2006).

Malzeme içyapısını belirleyen soğutma süreci yeniden kristalleşme tavlamasında oldukça önemli bir konudur. Gelişen teknoloji, 30°C/s 'lik soğutma hızlarının üzerine çıkabilmeyi olanaklı kılmaktadır. Ancak soğutma hızından çok sıcaklık kontrolünün hassaslığı mühimdir. Soğutma yüksek basınçlı gaz püskürtme yöntemi ve içten su soğutmalı merdanelerin kullanımı ile yapılırken, optik pirometreler kullanarak sıcaklık ölçümü $\pm 5^{\circ}\text{C}$ aralığında gerçekleştirilir. Aynı zamanda tavlama ile yaşlandırma sıcaklıklarının $+10^{\circ}\text{C}$ 'lik aralıkta kontrol edilmesi büyük oranda tekbiçim metalürjik kalite sağlar (Değirmenci, 2006).

2.3.3.4 Yığın ve Sürekli Tavlamanın Karşılaştırılması

Yığın ve sürekli tavlama yöntemlerinin en önemli teknik farkı, ürünlerin tane boyutlarını etkileyerek nihai özelliklerini değiştiren ve son derece mühim konu olan ısıtma ve tutmadaki sıcaklık-süre çevrimlerindedir. Yığın tavlama yönteminde esas itibarıyla ısıtma koşulları yavaş ısıtma çevrimine uygundur. Şöyle ki, yığın tavlama ısıtma ve tutma çevrimi 40 – 70 saat arasında değişir ve 600°C'nin üstündeki yeniden kristalleşme sıcaklıklarına saatte aşağı yukarı 100C'lik ısıtma hızıyla ulaşılır. Diğer taraftan sürekli tavlama yönteminde ise işlem süresi 90 – 120 saniye arasındadır. Bu hızlı ısıtma çevrimi ile, 700°C' nin üzerindeki yeniden kristalleşme sıcaklıklarına saniyede 100C'lik hızlarla ulaşılır. Çizelge 2.7'de alüminyum ile

sakinleştirilmiş aynı iki çelik sacın mekanik özelliklerinin, ısıtma hızına ve dolayısıyla tavlama yöntemine göre nasıl değiştiği açıklanmaktadır.

Çizelge 2.7 Alüminyumla sakınleştirilmiş iki aynı cinsten malzemenin tavlama yöntemlerine göre mekanik özelliklerinin değişimi (Değirmenci, 2006).

Tavlama yöntemi	Mekanik özellikler	Yığın tavlama	Sürekli tavlama
Tane boyutu		7 - 9 ASTM	10-11 ASTM
Akma dayanımı		160-190MPa	230 - 270 MPa
Çekme dayanımı		290-315MPa	330 - 400 MPa
% Uzama		40-44	31-38
Anizotropi katsayısı		1.6-2.1	1.0-1.4

Bu çizelgeden de görüldüğü üzere, tavlama yöntemlerinin farklılaşmasıyla aynı kalitede sac malzemeden farklı mekanik özellikler elde edilir. Dolayısıyla iki farklı tavlama yöntemi sonucunda aynı mekanik özelliklerin elde edilmesi için, farklı çeşitte sac malzeme kullanılmalıdır.

Çizelge 2.8 Farklı tavlama şartlarında % 100 yeniden kristalleşen aynı kalitedeki çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimi*

Tavlama şartları	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama	r	n
Hedef özellikler	170	345	46	≥ 2	$>0,21$
Yığın tavlama, 670°C	169 ± 17	318 ± 20	$43,8 \pm 2,8$	$1,98 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,01$
Sürekli tavlama, 700°C	327 ± 25	383 ± 18	$43,4 \pm 3,5$	$1,35 \pm 0,12$	$0,32 \pm 0,05$
Sürekli tavlama, 750°C	344 ± 11	373 ± 9	$50,3 \pm 0,7$	$1,62 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,03$
Sürekli tavlama, 800°C	261 ± 9	361 ± 16	$51,2 \pm 0,5$	$2,21 \pm 0,07$	$0,30 \pm 0,01$

Mendoza vd. yapmış oldukları araştırmada, otomotiv endüstrisine yönelik düşük karbonlu çelik sacın (% 0,01 C) farklı tavlama koşullarındaki mekanik özelliklerini incelemişlerdir, imalat aşamaları; slabın 1100°C'de tekrar ısıtılması, 2,6 mm'ye % 91'lik toplam kalınlık

* Değerler 20'şer ölçümün ortalamalarıdır.

azalmasıyla 870°C son sıcaklığa kadar sıcak haddelenmesi, 600°C'de sarılması ve 0,7 mm'ye %3' lük kalınlık azalmasıyla soğuk haddelenmesi şeklindedir. Çizelge 2.8'de, bu işlemlerden sonra çeşitli sıcaklıklarda yeniden kristalleşme tavlmasına tutulan çelik sacların mekanik özelliklerinin değişim aralıkları verilmiştir (Değirmenci, 2006).

İki tavlama yönteminin metalürjik farklarından bir tanesi, AIN çökmesinin oluşma zamanıdır. Yığın tavlama, AIN çökmesi yeniden kristalleşmeden önce oluşur. Bu, içyapı oluşumunu destekler, tane büyümesini ve içyapı gelişimini engellemez. Sürekli tavlama AIN çökmesi yeniden kristalleşmeden sonra yer alır ve 850°C gibi pratikte ulaşılabilen en yüksek seviyeden daha aşağı sıcaklıklarda tane büyümesini güçlü bir biçimde engeller. Dolayısıyla çok ince tane boyutlarına ulaşılır, yüksek akma mukavemeti ve 1 'den çok da fazla olmayan gerinim oranı elde edilir (Değirmenci, 2006).

Sürekli tavlamanın yığın tavlama göre bir artısı, tavlama sonrası malzeme yüzeylerindeki karbon azlığıdır. Sürekli tavlama $C < 3 \text{ mg / m}^2$ iken yığın tavlama 7 mg / m^2 'den daha az seviyelere inmektedir. Yüzeydeki karbon miktarının azlığının önemi, çıplak metalin fosfatlama yeteneğini arttırmada ve fosfatlanmış ve boyanmış sacın korozyon dayanımını arttırmada kendini göstermektedir.

Yığın tavlama bünyesinde gerekli olan bobin taşıma ve transferi gibi işlemler, bobinin sıklığından dolayı, mekanik darbeler ve çizikler gibi kusurların potansiyel kaynaklarıdır. Sürekli tavlama bu işlemlerin olmaması avantajıdır. Ancak sürekli tavlama da kendi içerisinde, örneğin kullanılan merdanelerin çokluğu nedeniyle çizikler ve izler gibi risk oluşturan etkenler vardır. Buna rağmen deneyimler sürekli tavlamanın, kusurlarının azlığı ve işlemin güvenilirliği bakımından daha iyi düzeyde olduğunu doğrulamaktadır (Değirmenci, 2006).

İki yöntemin de birbirlerine göre artılarını sıralamak gerekirse, yığın tavlamanın avantajları;

- Düşük yatırım maliyeti,
- Vakumlama yada titanyum ve niyobyum gibi elementlerle stabilize etme işlemlerini gerektirmeyen alüminyumla sakınleştirilen çeliklerin kullanımı,
- Yeniden üretilmeye müsait mekanik özellikler ve iyi yüzey temizliği garanti edilen kaliteli standartların güvenilir şekilde üretimi.

Sürekli tavlamanın avantajları;

- Depolama ve ilgili işlerden meydana gelen zaman kayıplarının çok çarpıcı şekilde azalması,
- Mekanik özelliklerinde ufak dayanım aralığına sahip, yüksek dayanımlı ve çok iyi derin çekilebilir çelik sacların üretimi,
- Özel uygulamalar için akma dayanımı dar bir aralıkta garanti edilen yada çekme işlemleri için teneke sac kalitelerinin üretimi,
- Çok yüksek yüzey temizliğine sahip sacların üretimi,
- Düşük karbonlu, elektrik uygulamaları amaçlı çelik sacların üretimi,

Sürekli tavlamanın artılarının çokluğuna ve giderek daha yaygın kullanılmasına rağmen, yığın tavlamanın yukarıda sıralanan avantajları nedeniyle, yakın gelecekte ortadan kalkması söz konusu değildir.

2.3.4 Temper Haddeleme

2.3.4.1 Amacı ve Uygulanması

Temper haddeleme, tavlama işlemlerinden sonra yapılan düşük kalınlık azalmasına sahip haddeleme işlemidir. Amacı, işlenen ürünün cinsine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin (karbon, azot gibi elementlerin bulunduğu) arayer katı çözeltilerini içeren çeliklerde temper haddelemenin birinci amacı yeterli gerinim miktarı oluşturarak dislokasyon yoğunluğunu arttırmak ve dolayısıyla akma dayanımı uzamasını ortadan kaldırmaktır. Diğer amaçları, tavllanmış çelik sacın yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve yüzeye matlık yada parlaklık gibi istenilen nihai özellikleri vermektir.

Malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, haddeleme sırasında malzemeye uzama olarak verilen deformasyon miktarına bağlıdır. Derin çekme uygulamalarında kullanılacak malzemelere % 0,25 – 1,00 arası uzama, daha az süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılacak malzemelere ise % 1,00 – 1,50 arası uzama verilir (Değirmenci, 2006).

Temper hadde düzenleri, soğuk haddelemede de olduğu gibi ikili, dördü veya altılı olabilir. Haddelenen ürünün yüzeyi haddelemede kullanılan iş merdanelerinin yüzeylerinin durumuna göre sonuçlanır. Ancak uygulanan basınç, nihayetinde haddeleme kuvveti ve merdane çapı, ayrıca çeliğin akış gerilimi de yüzey görünümünü etkiler. Belirli kalitelere çelik saclar için

(IF çelikleri gibi) haddeleme kuvvetleri düşüktür. Basıncı sınırlamak için, merdane çaplan olabildiğince geniş tutulmalıdır. Bu amaçla dörtlü hadde düzenleri en uygundur. Yüksek uzama değerlerinin gerektiği durumlarda altılı hadde düzenleri kullanılır (Değirmenci, 2006).

Temper haddelemede meydana gelen küçük kalınlık azalmaları nedeniyle gerçekte kayda değer ısınma oluşmaz. Buna rağmen temper haddeleme, merdanelerin su ve kimyasal madde karışımları ile yağlanmasıyla ıslak olarak uygulanır. Saclardaki gerilme kuvvetlerinin olabildiğince sabit tutulabilmesi için; bobin çözücü, temper haddeleme tezgahı ve bobin sarıcı birimlerinin aralarında birer adet gerilim ölçer parçaları bulunur. Sac düzlemselliğini doğrulamak amacıyla, merdane büken pistonlar kullanılır (Değirmenci, 2006).

Temper haddelemenin temel işlevlerinden biri, daha önce de bahsedildiği gibi çelik saca, boyama ve çekme gibi ileriki işlemler için istenilen pürüzlülük değerini vermektir. Bu amaç doğrultusunda, iş merdanelerinin yüzeylerine, mekanik darbe ile aşındırma yöntemi, lazer dokulama, elektriksel yük boşaltarak dokulama ve elektron ışın dokulama teknikleri ile yivli şekiller verilir (Değirmenci, 2006).

2.3.4.2 Etkileri ve Şekil Değişimi Yaşlanması

Çekme testlerinin gerilme-gerinim diyagramlarında belirgin akma gösteren çelik sacların üst akma sınırlarından sonra şekil değişimleri eşeksenli olmaktan çıkar ve akma boyunca çubukta çekme doğrultusu ile yaklaşık 45° açı yapan bantlar oluşur. Bu bantlar Lüders-Hartmann bantları olarak adlandırılır ve akma süresince malzemeye yayılır. Bu olay çelik sacın sonraki deformasyonları sırasında (pres operasyonlarında) açığa çıkarak gözle görülebilen yüzey kusurları oluşturur. Bu nedenle, birçok amaç kapsamında plastik şekillendirilmesi gereken sacların belirgin akma göstermeleri istenmez.

Temper haddelemenin etkilerinden biri, bir önceki konuda da bahsedildiği gibi, tavllanmış çoğu ticari çelik saclarda rastlanan belirgin akma noktasını ortadan kaldırmaktır.

Belirgin akmanın nedeni, metalürjik temele inildiğinde, "Cottrell atmosferi" diye tabir edilen durumla açıklanır. Cottrell atmosferi, çözeltinin ana kafesinde arayerlere yerleşen çözünen karbon ve azot gibi atomlar tarafından, enerji bakımından en uygun yerler olan kenar dislokasyonlarının hemen altındaki çekme gerilmesi bölgesindeki atom yığılmalarıdır. Bu yığılmalar, şekil değişimi sırasında dislokasyonun hareketine engel oluşturur. Dolayısıyla gerilmenin normalde yığılma olmayan durumdaki akma gerilmesi değerinden daha yukarılara çıkmasıyla üst akma gerilmesi ve engelin ortadan kalkmasının hemen ardından da gerilmenin ani olarak akma bölgesinde en aza indiği alt akma gerilmesi oluşur (Değirmenci, 2006).

Temper haddeme işleminin sonrasında malzemedeki belirgin akma uzamalarının ortadan kalkması, işlem sırasında meydana gelen deformasyonların, hidrojen ve azot atomlarından oluşan Cottrell atmosferini dağıtarak bu atomların tekrar, önceki yerleri olan ana kafesin ara yerlerine yayılması nedeniyledir. Ancak şekil değişiminden sonra, sıcaklığa, malzeme özelliklerine ve daha birçok nedene bağlı olarak değişen bir süre zarfında karbon ve azot atomları yayınarak, dislokasyonlar etrafında tekrar atom yığılmalarını oluştururlar. Bu olaya ekil değişimi yaşanması denir. Çizelge 2.9’da mekanik özelliklerin şekil değişimi yaşanması boyunca değişimleri dört aşamada açıklanmaktadır.

Çizelge 2.9 Şekil değişimi yaşanması sırasında mekanik özelliklerin değişimi

Mekanik özellikler	1. Aşama	2. Aşama	3. Aşama	4. Aşama
Alt akma noktası	Artar	Artar	Yavaşça artar	Yavaşça azalır
Akma uzaması	Artar ;	Değişmez	Değişmez	Artabilir
Akma dayanımı	Değişmez	Artar	Yavaşça artar	Azalabilir
Çekme dayanımı	Değişmez	Değişmez	Artar	Yavaşça azalır
Pekleşme üsteli	-	-	Artar	Yavaşça azalır
Toplam ve üniform uzama	-	-	Azalır	Yavaşça artar

Soğuk şekil değiştirmiş malzemenin yaşlanma amacıyla oda sıcaklığında bekletilmesine doğal yaşlanma denir. Doğal yaşlanma haftalar, aylar ve hatta yıllar sürebilmektedir. Buna karşılık sıcaklığın artması atomların yayınma hızım yükselttiğinden, malzeme yüksek sıcaklıkta bekletilirse yaşlanma süresi de kısalarak saatler mertebesine iner. Bu durumda da yapay yaşlanma söz konusudur (Değirmenci, 2006).

Şekil değiştirme yaşlanması ile ilgili en önemli etkenler, ferrit içinde çözülmüş karbon ve azot miktarı ile ön-gerilmenin cinsidir. Sakinleştirilmiş ve tavlanmış çelik saclar, çok az miktarda çözülmüş karbon ve azot içerirler. Bu nedenle bu cins çelik saclar, ortam sıcaklıklarında yaşlanmazlar (Değirmenci, 2006).

Karbon ve azot atomlarının şekil değişimi yaşlanmasına etkileri, demir alaşımlarındaki Çözülebilirlik değerlerinden dolayı farklılaşmaktadır. Yapıdaki karbonların çözülebilirliği, 720°C sıcaklıkta yaklaşık 200 ppm iken oda sıcaklığında 0,001 ppm değerine azalır. Azotun Çözülebilirliği ise 585°C sıcaklıkta 1000 ppm değerlerinden oda sıcaklığında 0,1 ppm değerlerine düşer (Değirmenci, 2006).

Çelik saclara alüminyumun eklenmesiyle, şekil değişimi yaşlanmasının durması, tavlama Malzemedeki durağan alüminyum nitritlerin oluşumu ile açıklanır. Çünkü alüminyum nitritlerin oluşumu ile beraber katı çözültide serbest azot miktarı sıfıra iner. Alüminyum ile beraber, vanadyum, titanyum, niyobyum, kolombiyum ve bor gibi elementlerin de nitrit oluşturma ve şekil değişimi yaşlanmasına etkisini azaltma özellikleri vardır ancak yaygın kullanılmazlar (Değirmenci, 2006).

Yaşlanma etkisinin, çekme gerinimine sahip çeliklerde temper haddelenmiş malzemelerdekinden daha hızlı olması dikkat çeken bir özelliktir. Haddelene ya da gerinme doğrultusuna göre alınan çekme testi numunelerinin doğrultuları, bazı ilginç etkiler ortaya çıkarır. Haddelene yönüne paralel doğrultuda çekilen temper haddelenmiş malzeme numunesi, hadde yönüne dik doğrultuda alınan numuneden daha yavaş yaşlanma etkisi sergiler. Ancak çekme gerinimli saclarda bunun tersi doğrudur. Bu etki, büyük ölçüde kalıntı mikro gerilmelerin heterojen şekilde dağılım düzenine yorulmaktadır.

2.3.6 Soğuk Haddelenede Kontrol

Genel olarak soğuk haddelene başlığı altında toplanan asitleme, soğuk haddelene, tavlama, temper haddelene ve kaplama işlemleri çelik sacların imalat akışının son kısmı olduğundan ve çelik sacların kimyasal içerikleri dışında tüm özelliklerini belirlemelerinden dolayı, tanımlanmalarını etkileyen nihai operasyonlardır. Bu nedenle soğuk haddelemenin her bir işletmesinde yapılan tüm kontrollerin önemi büyüktür. İşlem denetim duyargaları sağlıklı çalışmalı, güvenilir olmalı ve kolay korunmalıdır. Bu takdirde, yaşlanmadan dolayı ve organizasyona giren ürünlerin tekbiçim olmamaları ile çoğunlukla karakteristiklerinin bilinmemesi nedenleriyle, imalat düzeneklerindeki sapmalar hesaba katılmalıdır. Bu da ürünün devamlı olarak monitörlenmesini gerektirdiği gibi düzeneklerin ölçülmesini de lüzumlu hale getirir.

Çizelge 2.10 Soğuk haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri

İşlem	İşlem Kontrol Değişkenleri	Ölçme Tekniği
Asitleme	Banyo içeriği	Hat üzerinde numune alımı ile analiz (X-ışını Flüoresan)
Soğuk Haddeleme	1) Çekme kuvveti 2) Tezgah ayarları 3) Ürün genişliği 4) Ürün Kalınlığı ve kalınlık profili 5) Ürün Düzlemselliği 6) Hız ve kayma	1) Elektriksel ölçümler, uzama ölçerler 2) Mekanik duyarlılar 3) Optik ölçüm 4) X-ışını ölçümü 5) Mekanik, optik, manyetik ve X-ışını
Tavlama	1) Tavlama fırını atmosferi	1) Çözümleme pili
Temper Hadde	1) Yeniden kristalleşme ölçümü	1) Ultrasonik ve manyetik denetim 2) Pürüzlülük ölçümü
Kaplama	1) Fırın atmosferi 2) Sıcaklık 3) Kaplama kalınlığı 4) Kaplama bileşimi	1) Çözümleme pili 2) Pirometre 3) X-ışını ve beta ışını ölçümü Kızılötesi ölçüm

Çizelge 2.11 Soğuk haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri

Ürün Kalite Değişkenleri	Ölçme Tekniği
1) Boyutsal uzunluklar (genişlik, kalınlık, kalınlık profili) 2) Düzlemsellik	1) Optik, mekanik ve X-ışını ölçümleri 2) Mekanik, optik, manyetik ve X-ışını ölçümleri
Mekanik ve yapısal	Hat üzerinden NDE sistemi esasına göre numune alma
1) Yüzey karakteristikleri 2) Yüzey durumları	1) Pürüzlülük ve parlaklık ölçümleri 2) Görsel denetim
Yapıdaki kalıntı içeriği	Hat üzerinde denetim (Ultrasonik, sızıntı akışı yöntemleri ile) ve numune üzerinde denetim (esnek-çekme, manyetik parçacık denetimi)
1) Kaplama kalınlığı 2) Kaplama bileşimi 3) Yüzey durumu	1) X-ışını ve beta ışını ölçümleri Kızılötesi ölçüm 2) X-ışını ölçümü 3) Görsel denetim

Prosesin işleyişini ve sonuçlanan ürünü karakterize eden temel değişkenler ayrıntılı incelenmelidir. Çizelge 2.10'da soğuk haddelemenin kapsadığı tüm işlemlerle beraber işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri açıklanmıştır. Çizelge 2.11'de ise çeşitli soğuk haddeleme operasyonlarında ürün kalite değişkenlerine göre yapılan ölçme teknikleri sıralanmaktadır.

2.3.6.1 Kalıntı Kontrolü

Çelik sacların bünyesinde bulunan ve azlığı kalite göstergesi olan kalıntıların dağılımının ve boyutunun sınırlandırılması amaçlı kontrol işlemleri, mümkün olduğunca imalatın erken safhalarında yapılmalıdır. Nitekim "slabların yüzey ile içyapı temizliği ve kontrolü" bölümünde bu doğrultuda yapılan teftişlerden bahsedilmiştir.

Ancak günümüzde asitleme ve soğuk haddeleme bölümleri arasında "Sollac" ve "IRSID" diye adlandırılan test yöntemleriyle yapılan kontrol işlemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerde ultrasonik "Lamb" dalgaları kullanılır ve sınırlı sayıda duyarga ile geniş kapsamlı kontrol yapılabilir. Yöntem 1 mm ve üzeri kalınlıklardaki çelik saclara iyi uyum sağlar. 500µm boyutundaki kalıntılar, haddeleme öncesinde tespit edilebilmektedir. "Spery" çarkı olarak bilinen teknikten ibaret olan yöntemde, su ile dolu bir çemberin iç kısmına yerleştirilmiş ultrasonik transduser çalışır ve bu çember, sacın hareketine bağlı olarak döner. 5 m/s'lik sac hızına kadar memnun edici sonuçlar alınabilmektedir (Değirmenci, 2006).

2.3.6.2 Genişlik ve Kalınlık Kontrolü

Soğuk haddeleme sırasında genişlik ölçümünde temel prensip, ürün kenarlarının optik olarak taranmasıdır. Fotodiyot ışınları ve hızlı sinyal transferlerindeki gelişmelerin artmasıyla sacın genişliğinin 1/1000'i oranında doğruluğun elde edilmesi mümkündür. Stereoskop düzenleme, dikey sac hareketlerinden kaynaklanan hataları önler.

Kalınlık ölçümünde ise iki sac yüzeyi arasındaki mesafeyi ölçen optik veya mekanik düzenekler olsa da en yaygın kullanılan ölçüm yöntemi, iyonize radyasyonun soğurulması esasına dayanır. Radyo-izotop veya X-ışını tüplerinden ibaret olabilen radyasyon kaynağının seçimi, ölçülen kalınlığın dağılımına ve istenilen doğruluğa bağlı olarak değişir. 0,1-6 mm arası kalınlıklarda çalışan düzeneklerle $\pm 0,1\%$ doğruluk aralığında çalışılabilmektedir (Değirmenci, 2006).

2.3.6.3 İki Boyutlu Ölçümler

Şekilsel düzgünlük kontrolü, ürün yer değiştirmesinin ölçümü ile ilişkili genişlik ölçüm hallerinin işlenmesi ile yapılır. Fotodiyot ışınları kullanarak bir harita yada iki boyutlu

bir çok ölçüm teknolojisi kullanılsa da günümüzde en çok kullanılan sistem, tıp alanında da kullanılan radyografik teftiş esasına dayanır (Değirmenci, 2006).

2.3.6.4 Düzlemsellik Ölçümü

Sıcak haddeleme sırasında meydana gelen düzlemsellik kusurları, şekil bozuklukları olup açıkça görülebilirken, bu kusurlara sebebiyet veren fiber uzunlukları farklarını doğuran çekme kuvvetleri, soğuk haddeleme sırasında genellikle elastik uzamalar tarafından hapsedilir. Bu durumda düzlemsellik kusurları gizlidir ve sonraki şekillendirme operasyonlarında açığa çıkar. Fiberlerdeki uzunlamasına gerilme farklarını ölçen şu anki en yaygın teknik, tensiyometrik merdaneler kullanma tekniğidir. Optik ve X-ışımlı teknikler araştırma ve geliştirme aşamasındadır (Değirmenci, 2006).

2.3.6.5 Kaplama Kalınlığı Kontrolü

Çinko veya kalay gibi metalik kaplamaların kalınlıklarının ölçümü X-ışını flüoresan tekniğine dayanır. Endüstriyel gelişimin bu yöntem bazında günümüzde ulaştığı mevki, 100 ms gibi yanıt zamanlarına olanak tanır. Bu hızlı ölçüm sayesinde ölçü kafası, çelik sacın genişliği boyunca bir baştan diğer başa geçerek kalınlık profilini eşzamanlı olarak çıkarmaktadır. Ancak metaller arası bileşiklerin bulunduğu kaplama malzemelerinde bu yöntemin kullanılamaması yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlere ek olarak, kaplama hattı üzerinde yapılan, tavlama fırınında ürün sıcaklığının ölçümü ve düzenlenmesi kontrolü ile daha sağlıklı alaşımlama ve kaplama malzemesi elde edilebilir (Değirmenci, 2006).

Organik kaplamalarda kalınlık kontrolü için X-ışını flüoresan yöntemi, atom numaralarının düşük olması sebebiyle kaplamalardaki kadar uygun değildir. Bu nedenle bu tür kaplamalarda beta ışınları kullanılır. Böylelikle 20 m/s ürün hızlarında, bir saniyeden daha kısa yanıt zamanları ile $\pm 25 \mu\text{m}$ hassaslık derecesinde kontrol yapılabilir (Değirmenci, 2006).

2.3.6.6 Yüzey Kontrolü

Kaplamalı veya kaplamasız, yassı ürünler için yüzey görünümü son derece önemli bir işlevsel Parametredir. Ancak çoğu işletmelerde yüzey kontrolü görsel olarak, bizzat operatörler tarafından yapılır. Görsel denetimin hataları sezmek ve seçmek bakımlarından ve niteliksel içeriklerinin saptanması açısından avantajları bulunsa da dezavantajları büyüktür. Özellikle güvenilir değildir ve birçok etkene bağlı olarak farklılaşabilir. Ayrıca 1 m/s üretim hızlarının üstünde görsel denetim çok güçleşir. Bu nedenle, sürekli tavlama hattından ayrılan sac ve teneke gibi ürünler için otomatik yüzey denetim düzenekleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu düzenekler, lazer tarama yada doğrusal çalışan kameraları içerirler. Tespit edilen hatalarla ilgili tüm açıklamalar ve görüntüler, operatörün çıkardığı sonuçlarla karşılaştırılabilir ve bir hata bilgi bankasınca saklanabilir. Gelecekte karşılaşılabilecek kusurların bilgi bankası ile mukayese edilebilmesi, otomatik tanımlama ve sınıflandırmaya olanak tanımaktadır. Böylece sistemi durduracak yanlış ikazlardan kaçınılarak kontrolün güvenilirliği artırılmış olur.

2.3.6.7 Nihai Özelliklerin Tahribatsız Yöntemlerle Değerlendirilmesi

Derin çekilebilirlik, sertlik ve pürüzlülük gibi işlevsel ve nihai özelliklerin değerlendirilmesi, temel olarak numunelere uygulanan standart testlerin saptanması ile gerçekleştirilir. Modern laboratuvarlarda robotların kullanılması, yanıt sürelerini oldukça kısaltsa da ne yazık ki, numune alınması ve test sonuçlarının elde edilmesi arasında belli bir zaman kaybı kaçınılmazdır. Bunlara ek olarak, numunelerin genellikle sacın son kısmından alınması dolayısıyla, alınan numuneler muhakkak ki tüm üretim boyunca sacın özelliklerini temsil edememektedir. Bu nedenle, ilk önce sacın tekbiçimliğinin teftişinin yapılması, daha sonra da numunelerin tahribatlı testlerinden ölçülen değerlerin elde edilmesi gereklidir.

Sacların tekbiçimliğinin denetimi için kullanılan yöntemde, tahribatsız testlerle beraber eşzamanlı olarak elde edilen parametreler, mekanik özelliklere ve dolayısıyla metalürjik karakteristiklere uyarlanır. Örneğin bir dizi imalat teknikleri ile üretilen ferritik paslanmaz çelik sacın yeniden kristalleşme durumunun geniş kapsamlı bir şekilde ortaya konması, tavlama fırını çıkışma yerleştirilen ve hat üzerinde ölçüm yaparak çalışan manyetik esaslı yöntem ile mümkündür. Mekanik özelliklerin değerlerinin tam olarak elde edilmesi talep edildiğinde sorun daha da zorlaşır. Bağlılaşım, yani parametreler arasında dönüşüme izin veren fonksiyonlar, birçok farklı durum göz önüne alınarak, tahribatsız deneyler ve onlara özdeş mekanik parametrelerdeki değişimlerin bağlı bulunduğu fiziksel kuralların kullanımı ile kurulmalıdır. Buna ek olarak mekanik zorlayıcı birim ve mekanik sertlik arasındaki bağlantı, çeşitli ısı işlemleriyle farklılaşan her bir karbon çelik kalitesi için deneysel olarak

doğrulanmaktadır. Sertlik, örneğin "Bauhausen Ses Tekniği" esasına göre, zorlayıcı kuvvetin üzerinde ölçülmesi işlemi vasıtasıyla saptanabilir.

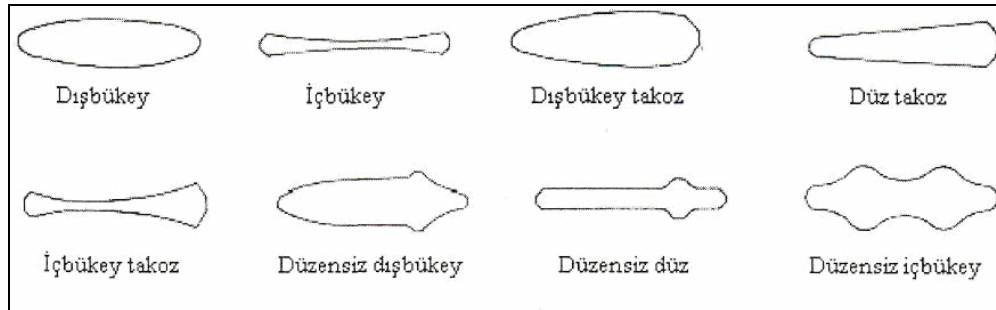
Yüzey düzlemindeki üç doğrultuda (haddeme yönüne 0, 90 ve 45°) farklılaşan ultrasonik dalga hızlarının ölçümü ve X-ışını kırınımının ölçümü yöntemleriyle içyapı izotropisinin nitelendirilmesi, son yıllardaki gelişmelerle mümkün olmaktadır. Bu tekniklerle, kristalografik yönelmelerin dağılım fonksiyonunun hesaplanması ve mekanik bir modelin uygulanmasıyla da plastik anizotropi değeri r 'nin $+0,1$ yaklaşımla ve düzlemsel anizotropi katsayısı ΔR 'nin $+0,2$ yaklaşımla saptanması mümkündür

2.3.7 Soğuk Haddemede Karşılaşılan Kusurlar

Soğuk haddeme işleminde meydana gelen kusurlar, şekil bozuklukları ve yüzey kusurları olarak iki başlık altında açıklanabilmektedir. Bu kusurlar çok ince tolerans aralıklarında, Önceki konuda anlatılan kontrol yöntemleriyle ayıklanmaktadır.

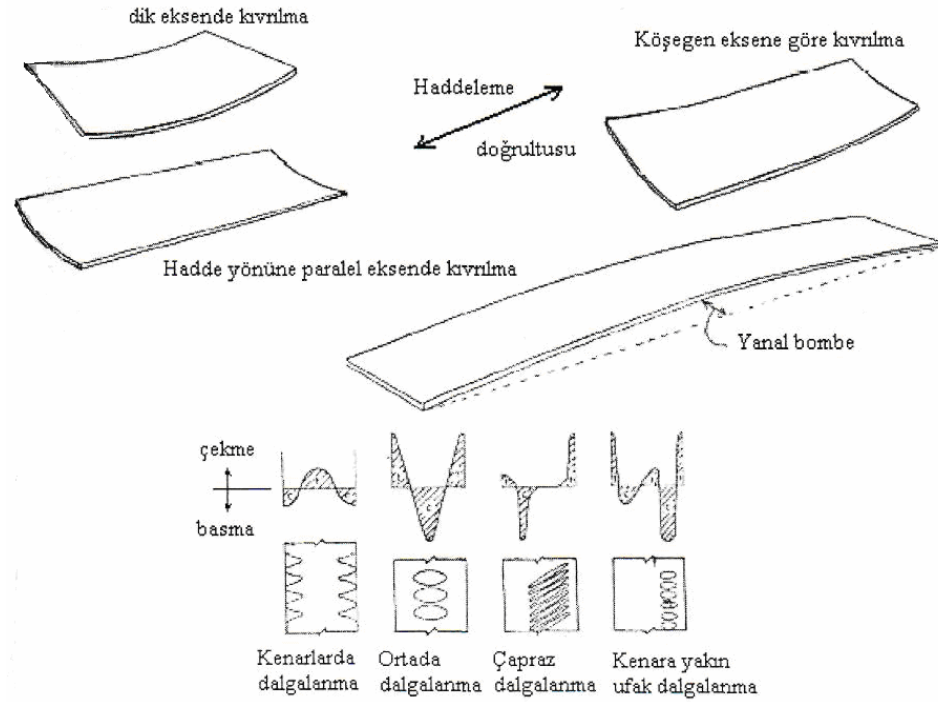
2.3.7.1 Şekil Bozuklukları

Haddelenen saclara tanımlanan "şekil düzgünlüğü" teriminden kastedilen iki farklı anlamdan biri, sacın haddeme doğrultusunda kalınlık kesiti geometrisinin düzgün olması ve ikincisi ise sacın yatay düzlem bir yüzey üzerinde tam temas halinde yatabilme kabiliyetidir. Açıklanan bu iki temel şekil düzgünlüğü toleransının dışında kalan kusurlardan birincisine verilebilecek örnek, en sık karşılaşılan taclaşmadır. Bu kusur, sıcak haddemede kusurlar konusunda da değinildiği gibi, sacın kenarları ve ortasındaki kalınlık farkıdır. Diğer taraftan ikinci tip kusur, geometrik şeklini çarpıtma eğilimde olan denetimsiz iş parçasındaki hataların varlığı ve yokluğu ile ilgilidir.



Şekil 2.20 Sıcak ve soğuk haddelenmiş saclarda karşılaşılan farklı kalınlık kesiti profilleri. soğuk haddemede şekil bozukluklarının ortaya çıkmasında, hem şekil bozukluğu olan sıcak haddelenmiş sacların kullanımının hem de soğuk haddeme parametrelerinin etkisi vardır.

Soğuk haddelemeyi etkileyerek aynı profillerde kusurlu sac imaline yol açabilen sıcak haddelenmiş saclardaki şekil bozuklukları Şekil 2.20'deki gibidir. Farklı kalınlık kesiti profillerinden soğuk haddeleme için kabul edilebilir olanlardan en olanı dışbükey olandır. Dışbükey kalınlık profilinin, sacın tandem hadde ve diğer proses hatlarını kolayca izlemesini sağlamasına rağmen gene de düz profile sahip sıcak sacın sahip olduğu kadar sorunsuz haddelenebilme özelliklerine sahip değildir. Sıcak saclardaki takoz ve içbükey profiller ise şiddetle istenmeyen profillerdir. Bunun nedeni, yalnızca şekil bozukluklarının soğuk haddelenmiş sacda da devam edecek olmasından değil, aynı zamanda dalgalı kenar kambur ve kalınlıktaki ani ölçü değişimleri gibi birçok çeşit düzensiz şekil bozuklukları oluşturmalarıdır.



Şekil 2.21 Soğuk haddeleme değişkenlerine bağlı olarak meydana gelen kusurlar

Soğuk haddeleme işleminin uygulanacağı sıcak haddelenmiş saclardan şu özellikler beklenir.

- Taçlaşma oranı yani sacın orta kısmı ile kenar kısımları arasındaki kalınlık farkı, % 1 veya daha düşük olmalıdır.
- Bölgesel kalınlık farkı 10 µm veya daha az olmalıdır. Sıcak haddelenmiş sacın sertlik dağılımı farkı 5 HRB'yi geçmemelidir.

Sacların soğuk haddeleme parametrelerine bağı olarak meydana gelen şekil bozuklukları Şekil 2.21'de gösterilmektedir.

Hadde yönüne dik eksende kıvrılma kusuru, haddeleme operasyonu sırasında çelik sacın normal bir paso hattına göre oluşan asimetrik koşullarından kaynaklanır. Alt ve üst merdaneler arası çap farkı, iş merdanelerinin konum hataları, yüzey koşulları, hız ya da yağlama farkları bu kusurun oluşmasına yol açan asimetrik koşullardır.

Hadde yönüne paralel eksende kıvrılma kusuru, literatürde az karşılaşılmına rağmen uygulamada en çok rastlanan kusurlardandır. Kusur, sacın iki kenarının da kıvrılması suretiyle simetrik biçimde olabileceği gibi yalnız bir kenarının kıvrıldığı asimetrik biçimde de vuku bulabilir. Oluşum nedenleri, iş merdanelerinin yatay bükülmeleri sonucu meydana gelen taşılaşma biçimi, yağlama yetersizliği ve düşük gergi kuvvetinden ibarettir.

Köşegen eksene göre kıvrılma kusurunun temel nedeni, haddeleme ve haddeleme yönüne dik doğrultu arasındaki bir doğrultuda etkiyen ve iki yüzeyde farklı büyüklüklerde ortaya çıkan kalıcı yüzey gerilmeleridir. Bu kalıcı gerilmelere yol açan etmen ise iş merdanelerinin birbirlerine göre ve son iş merdanesinin gergi merdanesine göre hizasız konumlarıdır.

Yanal bombe ya da diğer adıyla yanal eğilmenin oluşum nedeni, tekbiçim hadde boşluğuna sahip merdanelerin üzerindeki takoz şekilli bir kısmın varlığı veya tekbiçim olmayan hadde boşluğuna sahip ancak kabul edilebilir merdane şekli ile sacın haddelenmesidir.

Kenarlarda ve ortada dalgalanmanın nedeni, sıcak haddelemede kenar ve ortada enlemesine Çatlaklar kusurlarında da bahsedildiği gibi kusur oluşan bölgedeki fazla uzamadan meydana gelmektedir ki buna da sebep olan temel etmen merdanelerin eğilerek taş biçimini almasıdır. Ayrıca yağlamanın eksik yapılması da bu oluşumları arttırmaktadır.

Son olarak, Şekil 2.21'de geri kalan, çapraz dalgalanma ve kenara yakın ufak dalgalanmalar gibi bölgesel ve sacın tümünde görülmeyen kusurların oluşum nedenleri ise şöyledir;

- Hadde merdanelerinin biri veya daha fazlasında oluşan fıçılama,
- Haddeleme yağının sınırlı bölgelerde fazlalaşması,
- Hadde aralığına giren sacın bir bölgesinin geri kalan kısımdan daha yumuşak ve/veya daha kalın olması.

2.3.8 Soğuk Haddelenmiş Levha ve Saclar İçin Son Yüzey İşlemleri

Soğuk haddelenmiş levha ve saclara uygulanan son yüzey işlemleri tavlama ve asitleme işlemi, skinpass hadde işlemi, parlak tavlama işlemi ve parlatma işlemi olarak dört başlık altında incelenebilir.

2.3.8.1 Tavlama Ve Asitleme İşlemi

Çelik soğuk olarak haddelendiğinde, yüzey düzgünlüğü ve kalınlık gelişir ve soğuk deformasyonla sertleştiğinden yumuşatmak ve özelliklerini geri kazandırmak için tavlama işlemi yapılır. Açık atmosfer altında işlem yapıldığında, yüzeyde ince bir oksit tabakası oluşur. Asit banyosunda bu oksit tabakası giderilmelidir. Bu yöntemle işlenen sacın yüzeyi yarı mat gümüşü gri olur ve bitirme işlemi 2D (D=dull – renksiz, mat) olarak bilinir. Bu işlem sonucunda Ra değeri 0,2 – 1 um olur. Bu değer artan sac kalınlığı ile artar. Bu yöntem endüstri ekipmanları, boru ve tüp üretiminde kullanılır (Taşkiran, 2003).

2.3.8.2 Skinpass Haddeleme İşlemi (Temper Hadde)

Soğuk haddelenmiş ve tavlama işlemi yapılmış sac parlatılmış merdaneler arasında az bir hadde işlemi ile daha düzgün bir yüzeye kavuşur. Bu işlem sonucunda yarı parlak gri bir yüzey görüntüsü oluşur. Bu işlem skinpass haddesi veya 2B (B=bright – parlak) olarak bilinir. Gıda endüstrisinde kullanılacak kolay temizlenebilir yüzeyli ekipmanların üretiminde kullanılan işlem sonucu Ra değeri 0,1 – 0,5 um olur.

2.3.8.3 Parlak Tavlama İşlemi

Soğuk haddeden sonra tavlama işlemi koruyucu atmosfer altında yapılırsa, yüzeyde oksit tabakası oluşmayacağından asit banyosu işlemine ihtiyaç kalmayacaktır. Bu işleme parlak tavlama işlemi denir. Bu işlemde yüzey korozif asitlerle temas etmeyeceğinden Ra değeri 0,03 – 0,1 um olur. Beyaz eşyaların üretiminde kullanılmaktadır (Taşkiran, 2003).

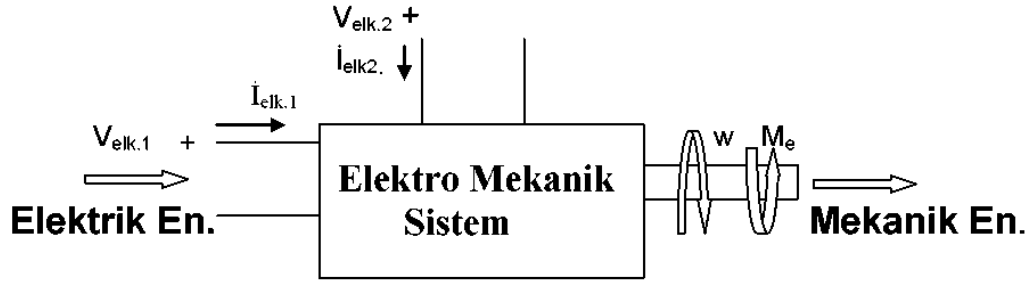
2.3.8.4 Parlatma

Soğuk haddelenmiş sac, belirli bir tane boyutuna sahip parlatma cihazı ile parlatıldığında yüzey gümüşü metalik parlaklığa ve dekoratif bir görünüme kavuşur. Parlatma cihazının yüzey özellikleri iyiye ayna gibi bir yüzey elde edilebilir. Bu işlem sonucunda Ra değeri 0,02 – 0,05 um olur. Islak parlatma işlemi, kuru işleme göre daha temiz ve düzgün yüzey sağlar. Ra değeri 0,04 um altına çekilebilir (Taşkiran, 2003).

3. ELEKTRİKSEL ÇELİKLERE GİRİŞ

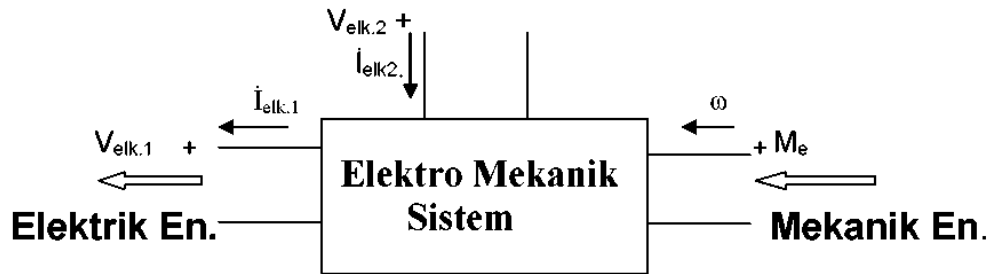
3.1 Motor, Generatör ve Transformatör Tanımları

Bir tarafta elektrik kapı ya da kapıları olan, diğer tarafta ise mekanik kapı yada kapıları olan ve, elektrik ve mekanik kısımları birbiri ile etkileşim içinde olan bir sistem, elektromekanik sistem olarak tanımlanır. Enerji dönüşümü yapan elektromekanik sistemler ya dönme ya da öteleme hareketi yaparlar. Şekil 3.1 'de dönme hareketi yapan bir elektromekanik sistemin ilkesel görünümü verilmiştir (Tacer, 2004).



Şekil 3.1 Elektromekanik sistem

Elektriksel giriş kapılarından aldığı elektrik enerjisini, dönme ya da öteleme hareketi yaparak çıkış kapı ya da uçlarından mekanik enerji olarak veren elektromekanik sistemler motor (Şekil 3.1) olarak adlandırılır. Buna karşın mekanik giriş ya da kapılarından aldığı mekanik enerjiyi gene dönme ya da öteleme hareketi yaparak çıkış elektrik kapı ya da uçlarından elektrik enerjisi olarak veren elektromekanik sistemler ise generatör (Şekil 3.2) olarak adlandırılır. Bunlar yanında elektriksel giriş kapılarından aldığı elektrik enerjisini dönme ya da öteleme hareketi yapmaksızın, enerjinin gerilim ve akım bileşenlerinin değerini değiştirerek çıkış elektrik kapılarından gene elektrik enerjisi olarak veren elektro magnetik sistemler ise transformatör (Şekil 3.3) olarak adlandırılır (Tacer, 2004).



Şekil 3.2 Generatör olarak çalışan elektromekanik sistem

Belli bir zaman için elektrik ve mekanik enerjiler; elektrik ve mekanik güçlerle orantılı olacağından elektriksel güç,

$$p_{elk} = v i \quad (3.1)$$

ve mekanik güç dönme hareketinde

$$p_{mek.} = M \omega \quad (3.2)$$

ile, öteleme hareketinde ise

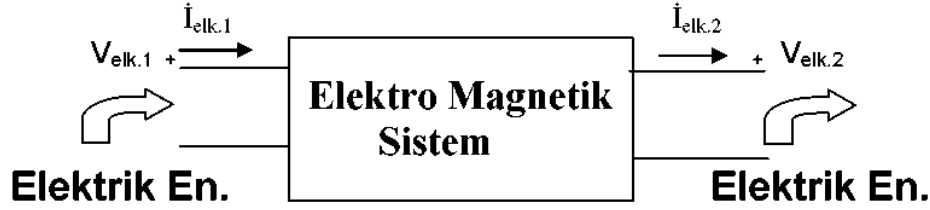
$$p_{mek.} = F v \quad (3.3)$$

eşitlikleri ile belirlenir. Bu eşitliklerde v ve i elektriksel uçlardaki gerilim ve akımı, M ve ω ise mekanik uçlardaki moment ve açısal hızı, F ve v ise kuvvet ve hızı göstermektedir.

Elektrik ve mekanik kapılara sahip elektromekanik enerji dönüşüm yapan sistemlere ilişkin devre ve matematiksel modellerde de devreler ve sistemler teorisindeki referans işaretlerin kullanılması gerekir. Buna göre gerilim için pozitif referans, “ + ” işareti ile; akım için pozitif referans, dışarıdan içeriye doğru yönelmiş “ $\Rightarrow$ ” ok ile; hız ve açısal hız için pozitif referans işaret, “ U ” ok ile ya da akımda olduğu gibi , dışarıdan içeriye doğru yönelmiş “ $\Rightarrow$ ” ok ile ve moment için ise “ U ” ok ile ya da gerilimde olduğu gibi “ + ” işareti ile tanımlanacaktır. Bu tanımlarla;

- $p_{elk} = v i > 0$ ise sistem dışarıdan elektrik enerjisi almakta,
- $p_{elk} = v i < 0$ ise sistemden dışarıya elektrik enerjisi verilmekte
- $p_{mek.} = M \omega > 0$ ise sistem dışarıdan mekanik enerji almakta,
- $p_{mek.} = M \omega < 0$ ise sistemden dışarıya mekanik enerji verilmekte olduğu anlaşılabacaktır.

Yukarıda da tanımlandığı gibi transformatör, bir elektro magnetik sistemdir. Şekil 2.4’de bir transformatörün blok gösterimi verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere bir transformatörde, $p_{elk1} = v_1 i_1 > 0$ olduğundan sistem dışarıdan elektrik enerjisi almakta ve $p_{elk2} = v_2 i_2 < 0$ olduğundan sistemden dışarıya gene elektrik enerjisi alınmaktadır.



Şekil 3.3 Transformatör olarak çalışan elektro magnetik sistem (Tacer, 2004).

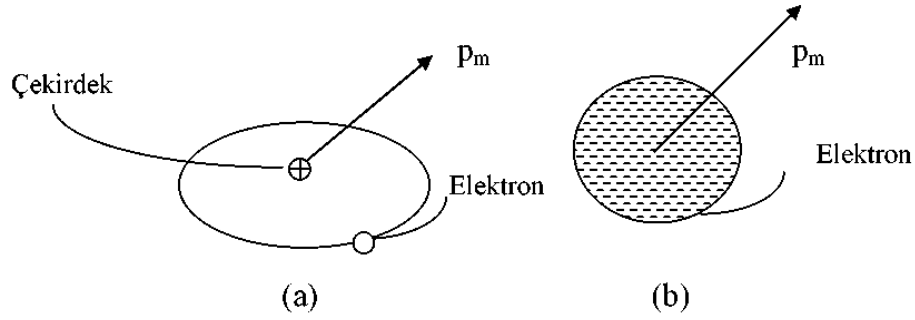
Faraday ve Bio'Savart yasalarına göre bir elektromekanik sistemde enerji dönüşümü olabilmesi için bir magnetik alana gereksinim vardır. Elektromekanik sistemlerde magnetik alan, ya miknatıslarla ya da magnetik malzeme üzerine sarılmış duran sargılardan (bobinlerden) akım geçirilmesi ile sağlanır. Şekil 3.2'de v_2 ve i_2 magnetik alan oluşturma amacı ile kullanıldığı varsayılırsa, $p_{elk1} = v_1 i_1 > 0$ olduğundan sistem dışarıdan elektrik enerjisi almakta ve $p_{mek} = M\omega < 0$ olduğundan sistemden dışarıya mekanik enerji alınmakta olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle sistem motor olarak çalışmaktadır. Buna karşın, Şekil 2.3'de $p_{mek} = M\omega > 0$ olduğundan sistem dışarıdan mekanik enerji almakta ve $p_{elk1} = v_1 i_1 < 0$ olduğundan sistemden dışarıya elektrik enerjisi alınmakta olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile sistem generatör olarak çalışmaktadır. Burada mekanik kapıda moment için "+" ve açısal hız için ok referans işaretler olarak kullanılmıştır (Tacer, 2004).

3.2 Magnetik Alan

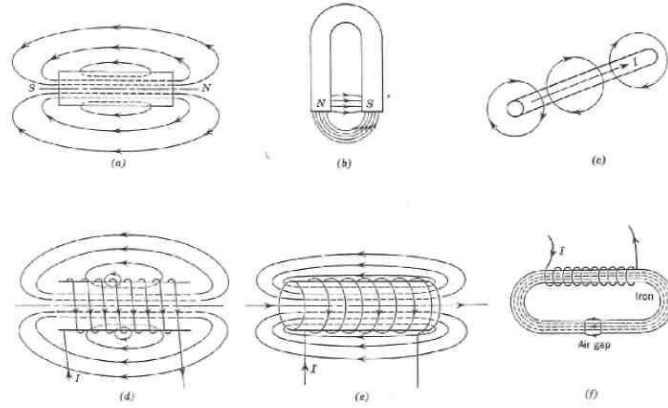
Yukarıdaki ayrıtta da belirtildiği gibi elektromekanik sistemler, Faraday, Bio'Savart ve Amper yasaları üzerine kurulmuştur. Faraday yasasına göre, " Bir magnetik alan içinde hareket eden ya da hareket etmeyen, ancak halkaladığı akısı zamanla değişen iletkenlerde bir gerilim meydana gelir". Bio'Savart yasasına göre ise, "Bir magnetik alan içinde akım taşıyan iletkenlere bir kuvvet etki eder". Bu iki yasa, elektromekanik enerji dönüşümü için bir magnetik alana gereksinim olduğunu ortaya koymaktadır (Tacer, 2004).

Magnetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda ortaya çıkan bir etkidir. Bir maddenin en küçük parçası olan atomlarda negatif yüklü olan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel bir hareket yaptıkları gibi, kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar (Şekil 3.4). Elektrik akımının yüklü parçacıkların hareketi sonucunda meydana gelmesi nedeniyle bu hareketlere, bir çeşit mikroskopik akımlar gözüyle bakılabileceği ve tabii ve yapay miknatısların magnetik özellikler göstermesinde etkin oldukları ilk kez Ampere tarafından ileri sürülmüştür. Magnetik etkilerin, söz konusu bu mikroskopik akımlardan ileri geldiği savı, günümüzde de artık kesinlik kazanmıştır. Bu sava göre elektrik yüklü parçacıklar hareket

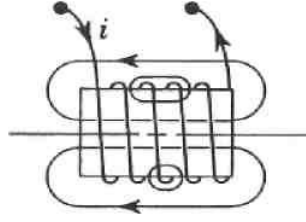
halinde ise ortamda bir değişiklik meydana gelir. İşte akım taşıyan bir bobinin ya da bir mıknatısın bulunduğu ortamda magnetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu değişiklik, magnetik alan olarak adlandırılır. Magnetik alan; doğrultusu, yönü ve şiddeti ile belirlenen vektörel bir büyüklüktür. Her hangi bir ortamdaki magnetik alan, kuvvet çizgileri ya da magnetik akı çizgileri ile gösterilir. Kuvvet çizgileri kapalı bir çevrim oluşturur. Şekil 2.8’da değişik yapıdaki mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde söz konusu olan magnetik alanın kuvvet çizgileri ile gösterimleri verilmiştir (Tacer, 2004).



Şekil 3.4 a) Bir elektronun yörüngesel hareketi b) Bir elektronun magnetik momenti



Şekil 3.5 Değişik mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan a) Çubuk mıknatıs b) At nalı mıknatıs c) Akım taşıyan bir iletken d) Hava çekirdekli selonoid e) Demir çekirdekli selonoid f) Hava ve demir çekirdekli



Şekil 3.6 Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri

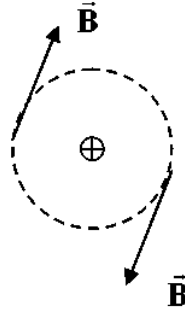
Şekil 3.5’de verilen çubuk ve at nalı mıknatıslardan da görüleceği üzere kuvvet çizgileri, N kutbundan çıkıp S kutbuna girerek mıknatıs içinden geçerek kapalı bir yol oluşturur. İletkenlerden oluşan bir bobin göz önüne alınır ve bu bobinden bir akım geçirilirse, yukarıda da belirtildiği gibi, bir magnetik alan meydana gelir. Bu alanın belirtilmesinde kullanılan kuvvet çizgileri, bobin eksenı yönünde olmak üzere bobinin bir tarafından girip diğer tarafından çıkarlar (Şekil 3.6). Mıknatıslarda olduğu gibi kuvvet çizgilerinin çıktığı bobin ucu N, çıktığı uç ise S kutbunu gösterir.

Magnetik alan oluşturulmasında üç değişik yol söz konusudur. Bunlar; elektrik akımı, daimi mıknatıslar ve elektrik alanının değişimidir. Bunlarla ilgili açıklamaları vermeden önce ilgili bazı kavramları açıklamak yerinde olacaktır (Tacer, 2004).

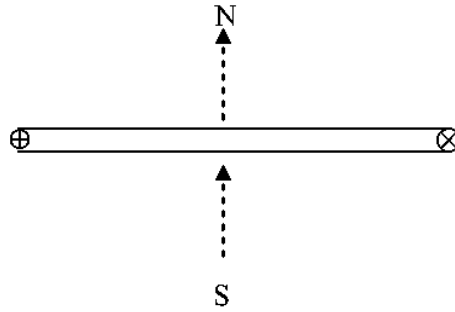
3.3 Magnetik Akı Yoğunluğu

Bir magnetik alan içinde birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu ya da magnetik indüksiyon olarak adlandırılır. Magnetik akı yoğunluğu vektörü, her noktada kuvvet çizgilerinin teğetleri doğrultusundadır. Magnetik alanın yönünü de belirten magnetik akı yoğunluğu yönü, bir N - S mıknatısında N kutbundan S kutbuna doğrudur. Akım taşıyan bir iletkende ise, merkezi iletken üzerinde olan daireye teğet olup, yönü ise akım yönüne bağlıdır. Akım ve magnetik akı yoğunluğu vektörlerinin doğrultuları arasındaki ilişki, sağ el burğu kuralıyla belirlenir. Baş parmak akım yönünü göstermek üzere diğer parmakların doğrultusu, alanın ya da magnetik akı yoğunluğu doğrultusunu gösterir. Bir iletkende akım içeri doğru ise “+” simgesi ile, dışarı doğru ise “x” ile gösterildiğinde sağ el burğu kuralına göre içeri doğru olan bir akım tarafından oluşturulan magnetik alan yönü Şekil 3.7 ’de gösterildiği gibi olur. B simgesi ile gösterilen magnetik akı yoğunluğu uluslararası birim sisteminde, [Wb/m²] simgesi ile gösterilen weber/m² ile ölçülür.

Bir düzlemde bulunan ve kapalı bir çevrim oluşturan bir iletken göz önüne alınır ve bir akım taşıdığı varsayılırsa söz konusu düzlemde akımın girdiği ve çıktığı uçlarda kuvvet çizgileri ile gösterilen bir magnetik alan merydana gelir (Şekil 3.8). Yukarıda verilen açıklamalara göre, akım ve magnteki akı yoğunluğu şekilde gösterildiği gibi olur. Diğer taraftan gene yukarıda belirtildiği üzere bir miknatista kuvvet çizgileri N kutbundan S kutbuna doğrudur. Bu nedenle Şekil 3.8’de verilen iletkenin üst kısmı N kutbu, alt kısmı ise S kutbu olur. Kutup deyimi bir noktayı göstermesine karşın burada N kutbu, kuvvet ya da indüksiyon çizgilerinin iletkenin ya da bobinden dışa doğru, S kutbu ise bobinden içeri doğrudur. Bunun yanında kuvvet çizgilerinin kapalı bir yol oluşturduğu kısımlarda magnetik alan kuvvetli, kapalı yol oluşturmadığı kısımlarda ise zayıftır (Tacer, 2004).



Şekil 3.7 Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki



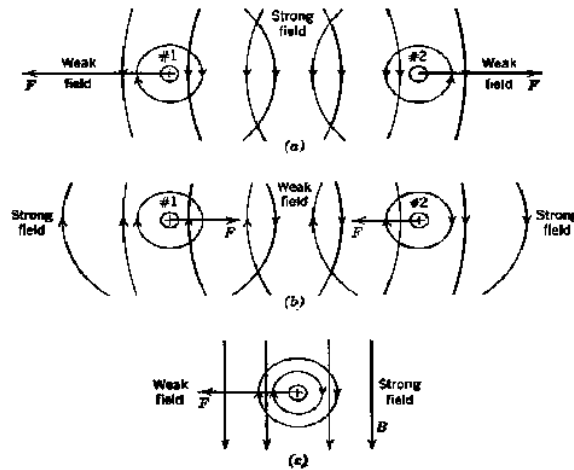
Şekil 3.8 Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri

Şekil 3.9.a’da birbirine ters yönde akım taşıyan paralel iki iletken verilmiştir. Yukarıda tanımlanan burğu kuralına göre kuvvet çizgilerinin yönü şekilde gösterildiği gibi olacaktır. Kuvvet çizgilerinin yönleri, iletkenlerin arasında aynı olduğundan bileşke magnetik alan, bunların toplamı ile belirleneceğinden iletkenler arasında kuvvetli, dolayısı ile enerji iki iletken arasında toplanacak ve oluşacak tepki kuvveti iki iletkeni birbirinden ayırma

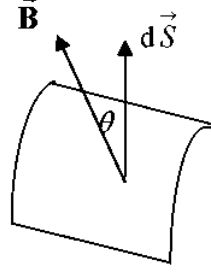
özelliğinde olacaktır. Buna karşın iletkenlerin dış kısımlarında kuvvet çizgileri ters yönlü olduklarından bunların farkı ile belirlenecek magnetik alan zayıf olacaktır. Şekil 3.9 b’de bu kez iletkenler aynı yönde akım taşımaktadır. Bu nedenle iletkenler arasında magnetik alan zayıf, dolayısı ile oluşacak kuvvet iletkenleri birbirine doğru çekecek özellikte olacaktır. Buna karşın dış kısımlarda ise magnetik alan kuvvetli olacaktır. Şekil 3.9 c’de ise düzgün bir magnetik alan içinde akım taşıyan bir iletken verilmiştir. Magnetik alan ve akım sonucunda oluşan kuvvet çizgisi yönleri şeklin sağ tarafında aynı olduğundan bileşke alan kuvvetli, sol tarafta ise yönler ters olduğundan bileşke alan zayıf olacaktır Kuvvet, magnetik akı yoğunluğu yüksek olan kısımdan alçak olan kısma doğru olacaktır (Tacer, 2004).

3.4 Magnetik Akı

Yukarıdaki ayrıtta da belirtildiği gibi birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu tanımdan hareketle magnetik alanda alınan belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı, magnetik akı olarak adlandırılır. Φ simgesi ile gösterilen magnetik akı, uluslararası birim sisteminde [Wb] simgesi ile gösterilen weber ile ölçülür (Tacer, 2004).



Şekil 3.9 Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan



Şekil 3.10 Magnetik akı tanımı

Şekil 3.10’da verilen bir magnetik alan içindeki kapalı bir yol ya da akım taşıyan bir iletkenle oluşturulan bir çevrim için magnetik akı tanımı uygulandığında, genel olarak magnetik akı,

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (3.4)$$

yüzeysel integrali ile belirlenir. Bu eşitlikte dS alan içinde alınan küçük dS yüzeyinin normali olan vektörü, B ise söz konusu küçük dS yüzeyindeki magnetik akı yoğunluğunun genliği ve doğrultusunu gösteren bir vektördür. Şekil 3.10’da B ve dS vektörleri arasındaki açı θ ile gösterilmiştir. Bu iki vektör arasındaki açı π olduğunda, başka bir deyişle magnetik alan homogen olduğunda,

$$\Phi = BS \quad (3.5)$$

dolayısı ile,

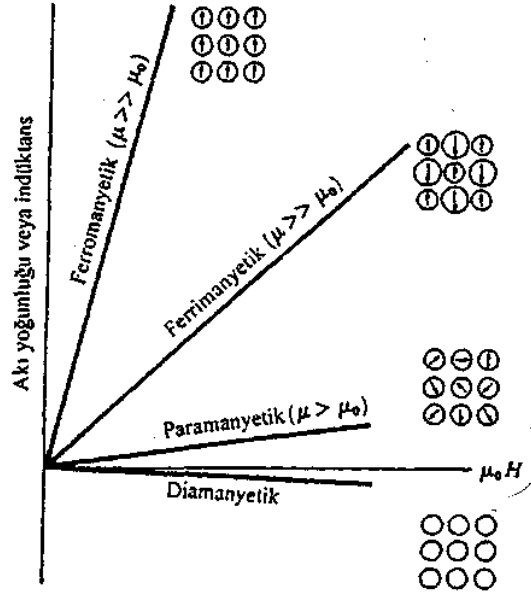
$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (3.6)$$

Magnetik akı biriminin [Wb] , S yüzeyi biriminin m^2 olduğu göz önüne alınırsa, yukarıda belirtildiği gibi magnetik akı yoğunluğu B ’nin birimi [Wb / m^2] olur. Bu da magnetik akı yoğunluğunun, birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı olduğunu gösterir (Tacer, 2004).

3.5 Ferromagnetik Malzemeler

Faraday, yaptığı araştırmalar sonunda tüm maddelerin, magnetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı maddelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir (Marşoğlu, 2005);

1. Diamagnetik Maddeler: Bağıl magnetik geçirgenlikleri $\mu_r < 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler. Diamagnetizma, tek sayıda elektronlara sahip ve tamamlanmamış içi kabuğu olmayan maddelerde görünür. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamagnetik gruba girerler.



Şekil 3.11 Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi (Marşoğlu, 2005).

Diamanyetik malzemelerde manyetik moment üretilmez. Devamlı olarak güçlü momentler, aynı uygulanan alan için, paramanyetik, ferrimanyetik ve ferromanyetiklerde bulunur.

Herhangi bir atom üzerinde bir manyetik alan etkidiğinde yörünge elektronlarından dolayı manyetik momenti etkilemekle ve bütün atomlar için bir manyetik kutup çifti oluşur. Bu kutup çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin manyetikliğin sıfırdan az olmasına neden olur. Bu davranış diamanyetizm olarak adlandırılır, nispeten yaklaşık 0,99995 geçirgenlik sağlar. Diamanyetik davranış, manyetik malzemeler ve cihazların uygulamaları için önemli değildir (Marşoğlu, 2005).

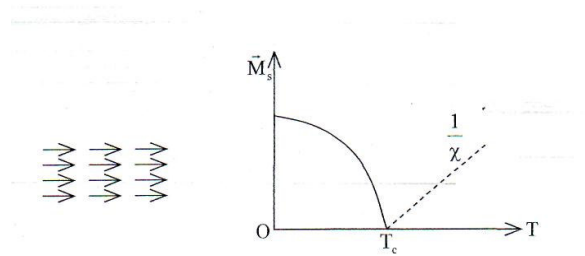
2. Paramagnetik Maddeler: Bağıl magnetik geçirgenlikleri $\mu_r > 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler. Paramagnetizma çift sayıda elektronlara sahip maddelerde görülür. Hava, alüminyum ve silisyum paramagnetik gruba girer. Paramanyetik davranış,

manyetik alan uygulandığında kutup çiftleri alanla hizaya gelerek pozitif bir manyetikleşmeye neden olur. Buna karşın, kutup çiftleri etkileşmediği için, kutup çiftlerini hizaya getirmek amacıyla oldukça büyük bir manyetik alan gereklidir. Paramanyetizm olarak adlandırılan bu etki sadece yüksek sıcaklıklarda etkilidir. Nispi geçirgenlik 0,01'den azdır (Marşoğlu, 2005).

3. Ferromagnetik Maddeler: Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren maddeler bu gruba girer. Ferromanyetik davranış 3d seviyesindeki (demir, nikel ve kobalt) veya 4f seviyesindeki (gadolinyum) doldurulmamış enerji seviyelerinden dolayıdır. Ferromanyetik malzemelerde kalıcı çift olmayan kutup çiftleri uygulanan manyetik alanla kolayca hizaya gelir. Kutup çiftleri manyetik alanla kutup çiftlerinin tabi takviyesinden dolayı kolayca hizaya gelirler. Uygulanan alanın çok büyük bir büyüklüğü, yüksek bir nispi geçirgenlik sağlayan küçük manyetik alanlar için bile üretilir (Marşoğlu, 2005).

3.6 Ferromanyetizma

Ferromanyetizma durumunda spinler birbirine paralel olarak yönelmişlerdir. Böylece komşu spinler arasında kuvvetli bir pozitif etkileşme söz konusudur. Sıcaklık artarken, spin düzeni sıcaklıkla uyarılmaktadır. Böylece kendiliğinden olan mıknatıslanmanın sıcaklık bağımlılığı şeklindeki gibidir .



Şekil 3.12 Ferromanyetizma (Sezer, 2006)

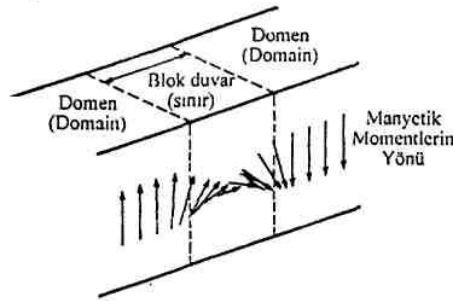
Mıknatıslanma sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır ve belli bir sıcaklıkta değeri sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) denir. Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi, bir histerisis döngüsü ortaya çıkarır. Histerizis döngüsü, değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Sezer, 2006)

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Sezer, 2006)

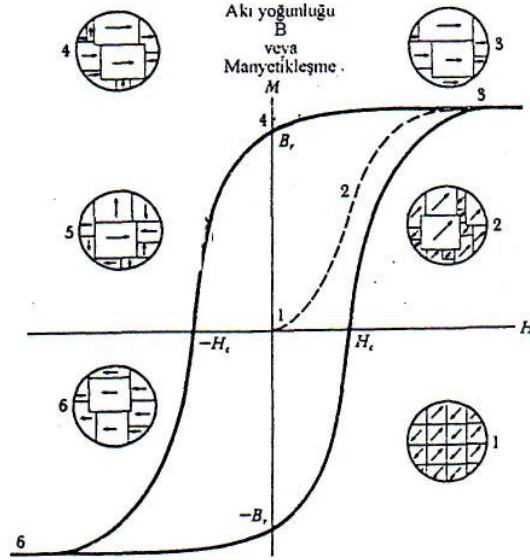
3.7 Domen (Bölge) Yapısı

Ferromanyetik malzemeler, komşu atomların kutup çiftleri arasında pozitif etkileşmelerinden dolayı manyetikleşme üzerine kuvvetli bir etkiye sahiptir. Ferromanyetik bir malzemenin tane yapısı içerisinde manyetik domenlerden oluşan bir alt yapı, dış alanın yokluğunda bile oluşur. Domenler bütün kutup çiftlerinin hizaya geldiği malzemede ki bölgelerdir. Manyetik alana maruz kalmamış bir malzemede bireysel domenler rastgele bir yönlenmeye sahiptir. Malzemede ki net manyetikleşme bütün olarak sıfırdır (Marşoğlu, 2005).

Blok duvarlar olarak adlandırılan sınırlar, tane sınırları gibi bireysel domenleri ayırır. Blok duvarları, manyetik moment yönünün yavaş yavaş ve sürekli olarak bir domenden diğerine değiştiği dar bölgelerdir (Marşoğlu, 2005).



Şekil 3.13: Bitişik atomlardaki manyetik momentler domenler arasındaki sınırlar boyunca sürekli olarak yön değiştirir (Marşoğlu, 2005).



Şekil 3.14 Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme üzerine etkisini göstermektedir. Kutup çiftlerin hizaya gelmesi manyetikleşmenin doymasına neden olur (nokta 3), kalıcı nokta 4, zorlayıcı alan nokta 5. (Marşoğlu, 2005).

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Sezer, 2006)

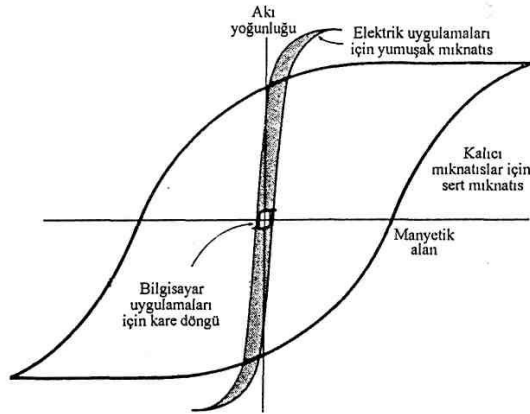
Alan uzaklaştırmasının etkisi; alan uzaklaştırıldığında domen duvarlarla oluşturulan direnç, domenlerin rastgele yönlenmelerde yeniden büyümesini önler. Sonuç olarak domenlerin çoğu orijinal alan yönüne yakın yönlenmiş kalır ve kalıcı olarak bilinen bir kalıntı manyetikleşme malzemelerde vardır. Malzeme kalıcı bir mıknatıs olarak davranır.

Bir alanı değiştirme etkisi; ters yönde bir alan uygulanırsa domenler zıt yönde hizaya gelerek büyür. Bir zorlayıcı alan H rastgele yönlenmiş domenleri zorlama ve birbirlerine etkilerini yok etmek için gereklidir. Alanın dayanımında daha da sonunda zıt yönde doyum için domenleri hizaya getirir.

Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi bir histerisis döngüsü ortaya çıkarır. Histerisis döngüsü değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Marşoğlu, 2005).

3.8 Manyetikleşme-Alan Eğrisinin Uygulanması

Bir manyetik alanda malzeme davranışı histerisis döngüsünün boyut ve şekli ile ilgilidir. Manyetik malzemeler için üç uygulamaya bakalım (Marşoğlu, 2005).



Şekil 3.15 Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histeresis döngüsünün kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatıslar (Marşoğlu, 2005).

Elektrik uygulamaları için manyetik malzemeler; ferromanyetik malzemeler, bir elektrik akımı malzemeyi geçtiğinde oluşan manyetik alanın büyütülmesi için kullanılır. Daha sonra manyetik alanın çalışması beklenir. Uygulamaları elektromıknatıslar için nüveleri, elektrik motorlarını, transformatörleri, jeneratörleri ve diğer elektriksel ekipmanları içerir. Bu cihazlar, nüve malzemenin histerisiz döngüsünü sürekli olarak devretmesi için alan değişimini faydalı hale getirir (Marşoğlu, 2005).

Yumuşak mıknatıslar olarak adlandırılan elektriksel manyetik malzemeler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Marşoğlu, 2005).

1. Yüksek bir manyetik doyum malzemenin daha çok iş yapmasına izin verir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir malzeme seçilirse manyetikleşmenin yüksek bir değeri elde edilir.
2. Domenler, zorlayıcı alan çok küçükse uygulanan en küçük alanla yeniden yönlenebilir.

3. Küçük bir histerisiz döngüsü, bir malzeme değişen bir alana doğru devir yaparsa küçük bir enerji kaybı verir.
4. Küçük bir kalıcılık istenir. Yeniden kullanım için bir yük vagonundan bir çelik fabrikasına hurda çelik transferi için kullanılan bir elektromıknatısta kalıcılık büyükse, uygulanan alan kaldırıldığında hurda bırakılamaz.
5. Kutup çiftleri, malzemenin çalıştığı frekansta kolaylıkla yeniden hizaya gelmelidir. Frekans çok yüksekse domenler her devirde yeniden hizaya gelemez daha sonra cihaz, kutup çifti sürtünmesinden dolayı dielektrik malzemelerdeki gibi ısınabilir.
6. Öz direnç çok küçükse akım eddy akımlarında olduğu gibi alandan sızabilir ve tekrar cihazın ısınmasına neden olabilir. Tipik yumuşak manyetik malzemeler tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Bazı yumuşak elektriksel malzemelerin özellikleri

	Maksimum	Doyum	Zorlayıcı
	Nispi	Manyetikleşmesi	Alan
Malzeme	Geçirgenlik	(tesla)	(A m ⁻¹)
% 99.91 saf demir	5,000	2,15	79.58
% 99.95 saf demir	180,000	2.15	3.98
%3 Fe Si (yönlenmiş)	30,000	2.00	11.93
%4 % Si (yönlenmemiş)	7.000	1.97	39.79
4S çok alaşımlı			
(%54.7 Fe %45 Ni %0.3 Mn)	25,000	1.60	23.87
Süper alaşımlı (%79 Ni, Fe, %5 Mo, %0.3 Mn)	800.000	0.80	159.16
A6 Feroksküb (Mn,Zn) Fe ₂ O ₄		0.40	
B2 Feroksküb (Ni,Zn) Fe ₂ O ₄		0.30	

Demir nikel kobalt kolaylıkla manyetikleşirler (mıknatıslanırlar) ve kalıcı mıknatıslar olarak hizmet verirler. Buna karşın domenler bu saf metallerde kolaylıkla yönlenirler ve B,H ürünleri daha karmaşık alaşımlara göre küçüktür. Manyetik özelliklerde bazı iyileşmeler mikroyapı içerisine hatalar katmakla kazanılır (Marşoğlu, 2005).

Sadece demir, nikel ve kobalttan oluşan küçük bir saf elementler grubunda, aynı sıradaki momentler normal ısıda ferromanyetizma meydana getirir. Bununla beraber, normal ısının biraz altında bu elementlerdeki ferromagnetizma etkilenmez. Isı sonucunda oluşan kuvvetler,

tamamen komşu atomlarda magnetik moment oluşturan elektronlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Mesafenin belli bir değerinde ferromanyetik olan malzeme, bu değer altında manetik olmayan malzeme durumuna geçer. Antiferromanyetik malzemelerde bu mesafe, magnetik olmayan malzemelerin alaşımıyla büyütülebilir. Böylece antiferromanyetik malzemedan, ferromanyetik alaşım meydana getirilebilir (Marşoğlu, 2005).

3.9 Demire Silisyum Katılması

Demire silisyum katılmasının yararlı etkileri;

- Elektriksel direnci, çeliğin öz direncini artırır. Bu yolla eddy akımı kayıplarını azaltır.
- γ sahasını daraltarak istenen tane büyümesini mümkün kılar, açık ferrit sahası oluşturup ferriti kararlı hale getirir.
- Tane yapısında tercihli yönlenmenin gelişimini sağlar.
- Yüksek geçirgenlik ve düşük histerisiz kayıpları sağlar (ASTM Hb. Vol.2).

Saf demirdeki silisyum içeriği yaklaşık olarak $\%2^{1/2}$ 'yi aştığı zaman, demirin α 'dan γ 'ta allotropik dönüşümü engellenir. Dönüşümdeki bu aksaklık daha yüksek silisyum demir alaşımının ergime noktasına kadar tamamen ferritik yapıda olmasına neden olur. Bu davranış, son tavlama da ikincil yeniden kristalleşmenin önlenmesi için üreticiye bu şerit ürünlerin özel soğuk haddeleme ve ısıtma işlem teknikleri uygulanmasına olanak verir. Bu işlemin sonuçları iyi gelişmiş bir kristalografik tekstürde $\{110\}\{001\}$ haddeleme yönüne paralel, bir oryantasyon gösterir (ASTM Hb. Vol.2).

Olumsuz Etkileri ;

- Manyetik doygunluğu azaltır.
- Curie sıcaklığını düşürür
- Ciddi anlamda mekanik olarak sünekliliği düşürür.
- Silisyum seviyesi $\%4$ 'ün üstüne çıktığında alaşım kırılgan olur ve soğuk haddeleme metodları ile üretilmesi zor olur bundan dolayı sadece birkaç ticari çelik tipi $\%3,5$ 'in üstünde Si içerir (ASTM Hb. Vol.2).

3.10 Silisyumun Çeliğe Etkileri

Manyetik alanda aşırı enerji kayıpları olmadan yapılan çalışmaların yanında, silisyum alaşımı katılmış çelikler aşağıda yer alan çeşitli metalografik, fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler (Genç, 2007).

- a. Demir ve Si alaşımları içerdiği %Si miktarı 2,25'e yakın olan bir metalografik gama ilmeği oluştururlar.
- b. %4 Si içeriğine kadar katılan her %1'lik Si için manyetik dönüşüm sıcaklığı (A_2) 9°C azalır. %4 Si içeriğinde manyetik dönüşüm yaklaşık 730 °C'de gerçekleşir.
- c. Eklenen her %1'lik Si, çeliğin elektrik direncini 11.4 mΩ/cm³ artırır.
- d. Çeliğe Si eklenmesiyle alaşımın yoğunluğu düşer.
- e. Düşük karbonlu çeliğe Si eklenmesi yaşlanma eğilimini düşürür (artan zaman ve sıcaklıkla manyetik özelliklere zarar verir), diğer faktörleri ise normal ve kontrol edilebilir yapar. Manyetik yaşlanma teorisi hala tartışılmakta fakat artan silisyum oranıyla yaşlanma eğilimindeki düşüşün çözülebilir nitrojen limitindeki artış ve bileşimlerin karbür ve nitrür olarak çökmesinde azalış nedeniyle olduğu genel olarak kabul görmüştür.
- f. Kırılganlık ya da süneksizlik Si yüzdesinin artmasıyla artar. Bu kırılganlık ticari olarak üretilen silisli çeliklerde en önemli belirleyici faktördür. Eğer kırılganlık fazla olmasa daha yüksek silisyum içeren çelikler üretilebilirdi (Genç, 2007).

3.11 Elektriksel (Si'li) Çeliklerin Kimyasal Bileşimleri

Yassı-düz haddelenmiş elektriksel çelikler özel kimyasal kompozisyonlardan çok manyetik özellik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla üretilmişlerdir. Manyetik özellik en önemli parametredir ve kimyasal kompozisyona bağlı olduğu kadar üretim yöntemine de bağlıdır. Silisyum elektriksel çelikler için en önemli alaşım elementidir. İlave edilir çünkü çeliğin öz direncini artırır ve bu yolla çekirdek (iron) kaybının bir bileşeni olan eddy akımı kaybını azaltır. Silisyum, çeliğin tane yapısını etkiler ve böylece yönlenmemiş elektriksel çeliklerde bir şekilde histerisis bileşenini azaltarak çekirdek(iron) kaybını azaltır. Ürün tipine bağlı olarak elektriksel çeliğe ilave edilen diğer elementler alüminyum ve mangandır. Bunların her biri öz direnç gibi herhangi bir fiziksel etkiden çok metalurjik etkileri açısından eklenirler. Bu alaşım elementlerinden her biri çeliğin tane yapısını iyi bir şekilde etkiler, böylece çekirdek kaybının bir bileşeni olan histerisisi düşürmeye yardımcı olur. Diğer elementler elektriksel

eliklerde mevcuttur fakat bunlar sadece artık formda bulunan empüriteler eklinededir. Karbon ergitmeden son ürüne kadar miktarı değişen tek elementtir. Haddeleme prosesi sırasında özel ısıt ışlemler tam mamulün karbon içeriğini çok düşük değerlere düşürür. Karbon müşteri tarafından tavlama işlemi sırasında yarı-mamül seviyesinde yapıdan ayrılır(örneğin; motor üreticisi) . Eğer taneleri yönlemiş bir elik varsa üreticide, kükürt ve nitrojen gibi empüriteler son kristal oryantasyonu geliştirmeye yardımcı olmaları açısından başlangıç aşamasında istenirler fakat son tavlamada yapıdan kaldırılırlar (EASA/AEMT Hb., 2003).

Yassı haddelenmiş silisli-demir saclar ve çubuklar düşük orandan kükürt içerirler, genel olarak %0,025 daha iyi kalitelere %0,01'dir. Mangan miktarı yaklaşık %0,70 'e kadar çıkabilir. Krom, molibden, nikel, bakır ve fosfor gibi artık elementler de kalabilir. Silisyumdan sonra en büyük alaşımlama katkısı %0,6'ya kadar Al (opsiyonel) (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.12 Neden Lamine Yapılar Tercih Edildi?

Elektrikli makinaların dizaynının ilk zamanlarından beri, çekirdekdeki (iron) kaybolan yararlı enerji, çelikten yapılan çekirdeklerin birçok tabakadan veya katmandan oluşacak şekilde üretilmesiyle belirgin bir şekilde azaltılmıştır. Tabakalar eddy akımı hatlarını sınırlar ve büyük anlamda eddy akımı kayıpları azaltılır. Katmanlar inceldikçe, kayıp azalır. Bu sebepten, yassı-düz haddelenmiş elektriksel çelikler, katmanları üretmekte kullanılır, istiflendiğinde ve uygun bir şekilde yerleştirildiğinde, elektrikli cihazlarda manyetik çekirdekler olarak kullanılırlar(EASA/AEMT Hb., 2003).

3.13 Elektriksel elikler

Pratikte elektriksel çelikler iki ana başlık ve birçok alt başlığa bölünerek sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma malzemenin manyetik özelliklerine, şekline, cinsine veya üretim yöntemine dayandırılarak yapılır. İki ana başlık ise;

- Yönlendirilmiş elikler
- Yönlendirilmemiş eliklerdir.

Yönlendirilmemiş elikler tam mamül ve yarı mamül olarak üretilirler(EASA/AEMT Hb., 2003).

3.13.1 Yönlendirilmiş çelikler

Bu terim elektriksel çelikleri yani manyetik özelliklere sahip ve haddeleme yönüne karşı güçlü bir dağılıma sahip çelikleri tanımlar. Haddeleme ve tavlama prosesi sayesinde uygun alaşım kompozisyonu ve metalik kristal yapı birlikte üretilebilir ve tanelerin dizilimi ile haddeleme yönünde ki manyetik özellikler çok çok üstün olur. Bu sonuçlar farklı yönlerde daha düşük özellikler gösterir ama yine de transformatör çekirdeği olarak büyük oranda ve düşük hızlı senkronik makineler için çekirdek olarak çeşitli şekillerde üretilirler (EASA/AEMT Hb., 2003).

Silisli çelikte tane boyutu; watt kaybı, düşük akı-yoğunluğu geçirgenliği konuları önemlidir. Bununla beraber yüksek akış yoğunluğu geçirgenliği için kristalografik oryantasyonu büyük bir kontrol unsurudur. Silisli çelikler demir gibi, {100}, küp-köşe yönünde kolaylıkla manyetize olurlar(EASA/AEMT Hb., 2003).

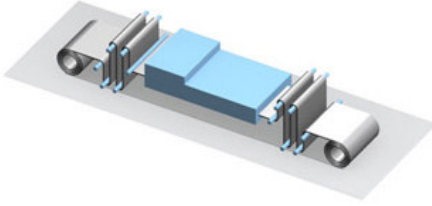
Önceden bahsedildiği gibi, saf demirdeki silisyum içeriği yaklaşık olarak $2^{1/2}$ 'yi aştığı zaman, demirin α 'dan γ 'ta allotropik dönüşümü engellenir. Dönüşümdeki bu aksaklık daha yüksek silisyum demir alaşımının ergime noktasına kadar tamamen ferritik yapıda olmasına neden olur. Bu davranış, son tavlama ikinci kez yeniden kristalleşmenin önlenmesi için üreticiye bu şerit ürünlerin özel soğuk haddeleme ve ısıtma işlem teknikleri uygulanmasına olanak verir. Bu işlemin sonuçları iyi gelişmiş bir kristalografik tekstürde {110}{001} haddeleme yönüne paralel küp-köşe yönünde, küp-köşe oryantasyonunu gösterir. 1970'lerde {110}{001} kristalografik tekstürü kompozisyonun ve prosesin modifikasyonu ile geliştirildi. Geliştirilmiş yüksek geçirgenliğe sahip malzeme genellikle %2,9 ile 3,2 oranında Si içeriyordu. Geleneksel tane yönlendirilmiş çelik, %3,15 Si'li çeliğin tane çapı yaklaşık olarak 3mm'dir. Yüksek geçirgenlik kabiliyeti olan silisli çeliklerin tane boyutu çapları yaklaşık olarak 8 mm ya da daha büyüktür. İdeal olarak, aşırı eddy akımı etkilerini en aza indirmek için tane çapı 3mm'den az olmalıdır. Özel kaplamalar elektriksel yalıtımı sağlar ve çeliğin alt-yapısındaki çekme gerilmelerinin azaltılmasını sağlar(ASTM Hb., Vol.2).

Bu çeliklerde kayıplar en düşük seviyededir. Tane yönlendirilmiş silisli çelikler, düşük çekirdek kaybı ve yüksek geçirgenlik sağlamak için üretilmiş verimli ve ekonomik transformatörlerdir. Bu manyetik numuneler en yüksek manyetik özelliklerini haddeleme yönlerinde sergilerler. Bu yönlendirme işlemi çeliğe özel işlem uygulayarak çok yüksek oranda haddeleme yönüne doğru yönelmiş benzer taneler oluşturmak suretiyle yapılır (Genç, 2007).

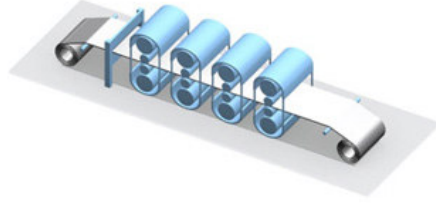
Fe – Si alaşımlarında kafes yapıları kübiktir ve taneler en kolay küp kenarlarına paralel durumda manyetik özellik kazanırlar. Belirli çelik kompozisyonu, sıkı olarak kontrol edilen soğuk hadde ve ısıtma işlem aşamaları sonucu bu yönlendirilmiş silisli çeliğin taneleri haddeleme yönünde küp kenarlarına neredeyse paralel hale gelir. Bu yönde manyetikleştirildiklerinde süper geçirgenlik ve çok düşük çekirdek kaybı sağlarlar. Ayrıca tek yönlü manyetikleşmeyen büyük jeneratörler ve diğer aparatlarda kullanılırlar (Genç, 2007).

3.13.1.1 Yönlendirilmiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması

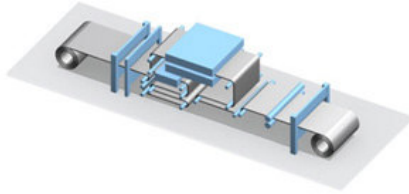
1-Asitle temizleme



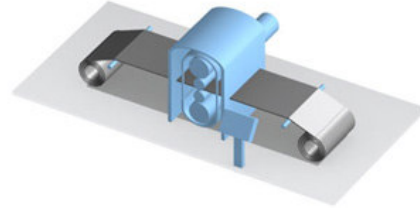
2-İlk soğuk haddeleme



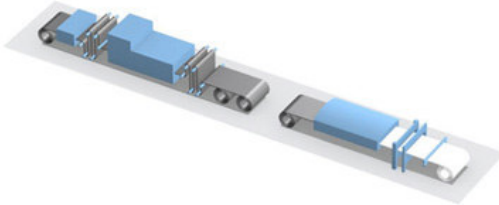
3-Yeniden kristalleşme ve dekarburizasyon



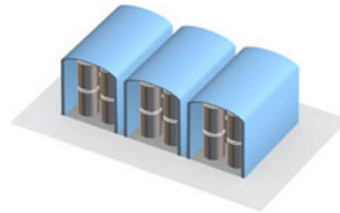
4-Soğuk haddeleme ve son inceltme



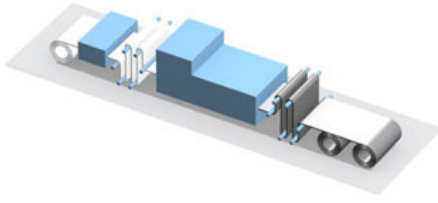
5-MgO Uygulanması



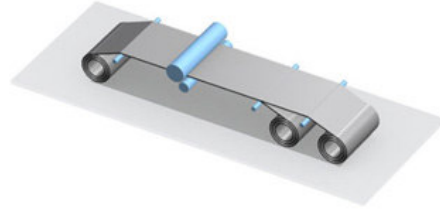
6-Yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi



7-Yalıtım kaplaması ve ısı yassılaşıma



8-Bitirme, kesme, sarma



9-Paketleme



3.13.2 Yönlendirilmemiş çelikler

Elektriksel çeliklerin bu sınıfı malzemenin düzleminde her yöndeki manyetikliği aynı olan bir manyetik özellik gösterirler. Yönlenmemiş terimi bu malzemeleri kesin bir oryantasyon veya yöne bağlı manyetik özellikleri yaratan proseslerle üretilmiş malzemelerden ayırır. Bu tür çelikler endüstriyel elektrik motorları ve jeneratörlerin çekirdeklerinin çok büyük bir kısmını oluşturan çeliklerdir (ASTM Hb., Vol.2).

Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin, yönlendirilmiş elektrik çeliklerine göre güç kayıpları fazladır, manyetik geçirgenlikleri düşüktür ve daha ekonomiktirler (Sezer, 2006).

Yönlenmemiş (izotropik) yassı haddelenmiş ürünler %0,5'ten 3,5'e kadar Si içerenler yarı mamul ve tam mamul şartlara uygundur. Tam mamul yönlenmemiş silisli çeliklerin büyük bir çoğunluğu ya tam genişlikte (8602 dan 1230 mm'ye) ya da bazıları kesilerek satılırlar. Tam mamul elektriksel çelikler tabaka kümelerindeki eddy akımlarını azaltmak için tavlandıktan sonra organik veya inorganik malzemelerle kaplanır (EASA/AEMT Hb., 2003).

Yarı mamul seviye; yarı mamullerin karbon seviyesi genel olarak düşüktür genellikle 0,30'un altındadır. Buna rağmen, yarı mamul ürün genel olarak yeterli derecede dekarbürize edilemez. Bu yüzden potansiyel manyetik kaliteyi geliştirmek ve manyetik yaşlanmadan kaçınmak için dekarbürizasyon ve tavlama kullanıcı tarafından yapılmalıdır. Bu tür tavlama genelikle 790 ile 940⁰ C sıcaklıkları arasında uygun bir dekarbürizasyon atmosferinde yaklaşık 1 saat süreyle yapılır. Metaldeki aşırı oksitlenmeyi önleyip dekarbürizasyonu teşvik etmek için dekarbürizasyon atmosferi yeterli seviyede nem içermelidir (ASTM Hb., Vol.2).

Yarı mamul ürünler genellikle yüzey yalıtımı kaplaması yapılmadan veya sadece ince sıkı bir yapışkan oksitle yalıtma direnci sağlarlar. Tam mamul seviyedekiler karbonu azaltmak için yaklaşık 825⁰C'de nemli hidrojen ortamında üretici tarafından tavlânır. Üretici tarafından yapılan son tavlama işlemi, yüksek bir sıcaklıkta (1100⁰C'den yukarıda sürekli şeritler için) tane büyümesinin engellenmesi ve manyetik özelliklerin geliştirilmesi için yapılır. Arzu edilen manyetik özellikler böylece üretim sırasında elde edilir ve genellikle alıcı tarafından ek ısıt işlemlere gerek kalmaz. Bu ürünlerin öncelikli amacı ticari güç frekansı (50-60 Hz) uygulamalarında, belirli bir akımda maksimum watt kaybı sınırları (tipik olarak 1,5T) için satılır. Yönlendirilmemiş silisli çelikler silisyum içeriği ve ticari olarak kullanımı açısından üç ayrı sınıfta incelenebilirler (ASTM Hb., Vol.2).

3.13.2.1 Düşük Silisyumlu Çelikler

Yaklaşık olarak % 0.5 – 1.5 Si içerirler. Bu tür çelikler genellikle elektrik bobinlerinde ve motorların sabit gövdelerinde kullanılırlar. Yüksek hassasiyet ve mekanik mukavemet istenen büyük makinelerin manyetik kutupları bu saclardan üretilir. Bu tip saclar sadece doğru akımda kullanıldığı için çekirdek kaybı önemli değildir.

Armatür sacları takriben %0.5 – 0.6 Si içerirler. Bu saclar geçirgenlik istenen, çekirdek kayıplarının pek önemli olmadığı yerlerde, küçük motorlarda ve dinamolarda kullanılırlar. Yumuşak ve haddeleme özelliği iyi olan malzemelerdir (Genç, 2007).

3.13.2.2 Orta Silisyumlu Çelikler

Yaklaşık olarak %2.5 – 3.5 Si içerirler. Bu tip çelikler ortalama yüksek verim jeneratör ve motorlarında, orta büyüklükte aralı hizmet transformatörlerinde, reaktörlerde ve motorlarda kullanılırlar (Genç, 2007).

Motor saclarının silisyum içeriği %2.75'tir. Çekirdek kaybı az, haddeleme özelliği iyi ve düşük akı yoğunluklarında geçirgenlikleri yüksektir. Yüksek verimli motor, jeneratör, küçük

ve orta boy transformatör, elektrik motoru yapımında ve genel olarak düşük çekirdek kaybı istenen yerlerde kullanılır (Genç, 2007).

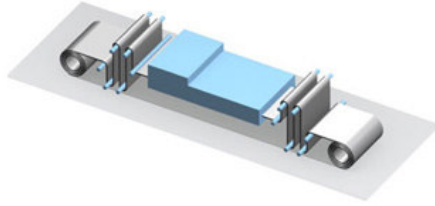
3.13.2.3 Yüksek Silisyumlu Çelikler

Bu tür çeliklerde Si içeriği %3.75-7 arasındadır. Güç transformatörlerinde, yüksek verim motorlarında, jeneratörlerde ve haberleşme aletlerinde kullanılırlar.

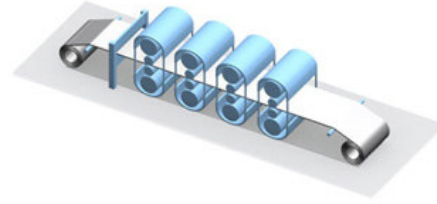
Transformatör saclarının haddeleme özelliği iyi, manyetik özellikleri zamanla değişmezdir. Silisyum oranı ile çekirdek kaybı ve sünekliği değişir. Bu oran azalırken çekirdek kaybı ve sünekliği azalır, indüksiyon geçirgenliği ve elektrik direnci artar. ASTM sınıflandırmasına göre Transformer – 72 (%3.8 Si), 65 (%3.8Si), 52 (%4.50Si) sacları transformatör saclarıdır. (Genç, 2007).

3.13.2.4 Yönlendirilmemiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması

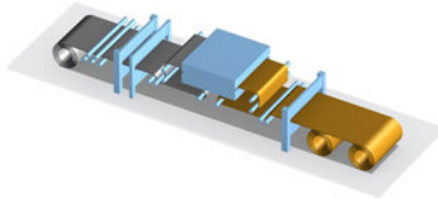
1-Asitle Temizleme



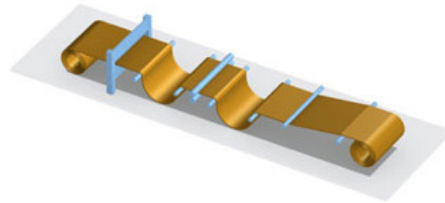
2-Soğuk Haddeleme



3-Dekarbürizasyon ve yüzey temizleme



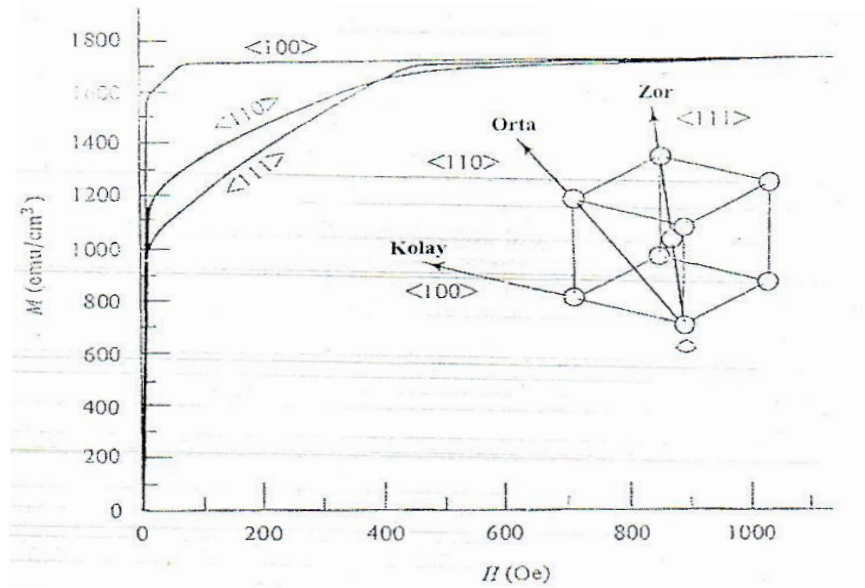
4-Bitirme, Kesme ve Sarma



Çizelge 3.2: Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları

ASTM Tanımlaması	AISI	Nominal (Si+Al) İçeriği	Yoğunluk gr/cm ³	Özellikler ve uygulamalar
Laminasyon çelikler A726veyaA840			7,85	Yüksek manyetik doygunluk, manyetik özellikler garanti edilemez. Zaman zaman küçük motorlarda kullanılır.
Yönlenmemiş elektriksel çelikler	M-47	1,05	7,80	Sünek, iyi basma özellikleri, yüksek indüksiyonda iyi geçirgenlik. Küçük motorlarda, rölelerde
A677 veya A677M(tam mamül) ve A683 veya A683M(yarı mamül)...	M-45	1,85	7,75	İyi basma özellikleri, orta ve yüksek indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, iyi watt kaybı. Küçük jeneratörlerde, yüksek verimli sürekli- döner makinelerde, ac ve dc.
	M-43	2,35	7,70	
	M-36	2,65	7,70	Düşük ve orta indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, düşük watt kaybı. Yüksek reaktan çekirdeklerde,jeneratörlerde, yüksek verimli döner makinelerin statörlerinde.
	M-27	2,80	7,70	
	M-22	3,20	7,65	Düşük indüksiyonlarda mükemmel geçirgenlik, en düşük watt kaybı, küçük güç transformatörlerinde, yüksek verimle çalışan döner makinelerde
	M-19	3,30	7,65	
	M-15	3,50	7,65	
Yönlenmiş elektriksel çelikler	M-6	3,15	7,65	Taneleri yönlemiş çelik yüksek yöne ait manyetik özellikleri, en düşük watt kaybı ve en yüksek geçirgenlik
	M-5	3,15	7,65	
	M-4	3,15	7,65	

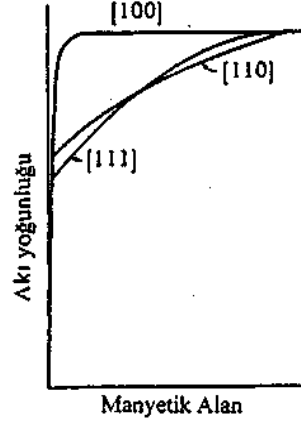
A876 ya da A876M	M-3	3,15	7,65	özellikleri akış yolu haddeleme yönüne paralel olduğunda geçerlidir. Kalın kalınlıklarda güç transformatörlerinde kullanılır, ince kalınlıklarda genellikle dağıtım transformatörlerinde kullanılır. Enerji tasarrufları daha düşük watt kaybıyla gelişir.
Yüksek geçirgenlikli yönlenmiş çelik Sadece ASTM A677		2,9–3,15	7,65	Yüksek indüksiyon işlemlerinde düşük watt kaybı



Şekil 3.16 Demirin mıknatıslanma yönlerini göstermektedir

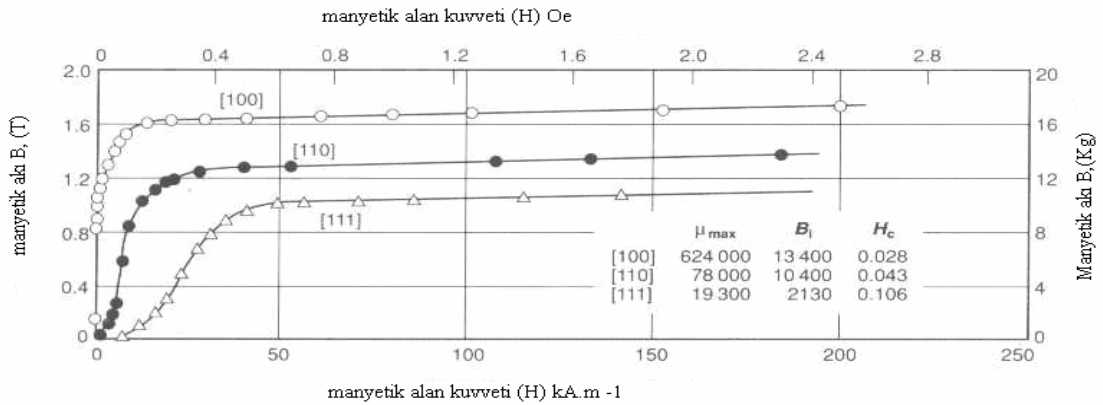
Demir kübik kristal yapısı olan bir elementtir ve küp eksenleri boyunca en az enerji ile mıknatıslanmaktadır ve kolay mıknatıslama eksenini olarak bilinir. Yüzey köşegeni yönünde orta ve küp köşegeni yönünde ise en zor mıknatıslanabilir. Yönlendirilmiş elektrik çelikleri üretim sırasında kübün kenarları mıknatıslanma yönü olacak şekilde yönlendirilmiştir (Sezer, 2006)

Yönlendirme, haddeleme, tavlama ve soğutma işlemlerini içeren ve ileri teknoloji gerektiren bir işlemdir. Yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin manyetik kayıpları düşük, geçirgenliği yüksektir. Yönlendirilmemiş çeliklere göre biraz daha pahalıdır (Sezer, 2006).

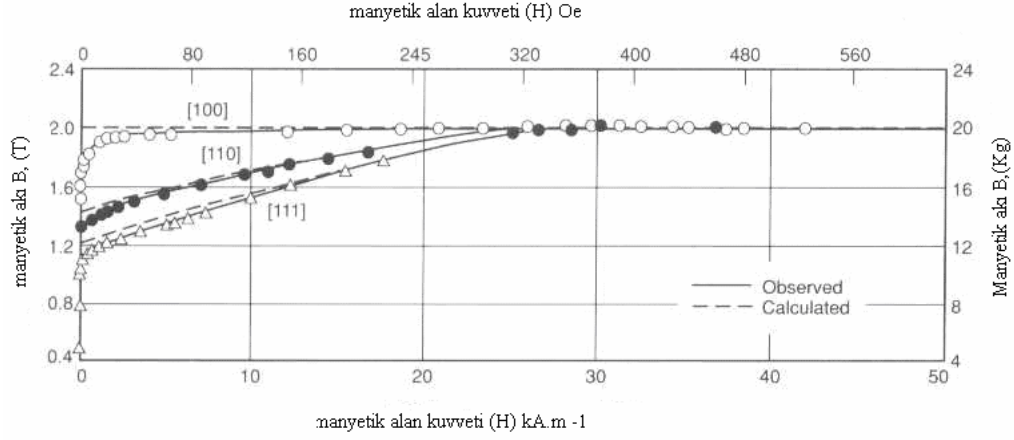


Şekil 3.17 Silisyum demir için manyetikleşme eğrisi başlangıçta oldukça anizotropiktir, manyetikleşme, (100) yönleri alanla hizaya geldiğinde en kolaydır (Marşoğlu, 2005).

Demire %3,5 silisyum katılması, uygun bir işleme uğrayabilen çok küçük histerisiz döngülü mükemmel bir manyetikleşmeye sahip bir alaşım üretebilir. Silisyum demir genellikle motor ve jeneratörlerde kullanılır. Silisyumun anizotropik manyetik davranışının avantajından şöyle faydalanılır. Genellikle küçük histerisiz döngüleri ve zorlayıcı alanlar, silisyumun kristal yapısı, en kolay manyetikleşme yönüyle hizaya geldiğinde elde edilir. Haddeleme ve ardından tavlama sonucu, her tanede (100) yönünde oluşan bir levha dokusu hizaya gelir. Silisyum demir (100) yönlerinde daha kolay manyetikleştiği için histerisiz ve enerji kaybı azdır (Marşoğlu, 2005).



Şekil 3.18 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği) (ASTM Hb., Vol.2).



Şekil 3.19 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği) (ASTM Hb., Vol.2).

3.14 Elektriksel çelik karakteristikleri

Elektriksel çeliklerin elektrikli makinelerde kullanımında üç ana karakteristik önemlidir (EASA/AEMT Hb., 2003).

1. Watt kaybı
2. Manyetik Geçirgenlik
3. Isıl iletkenlik

3.15 Elektriksel Çeliklerde Güç Kayıpları

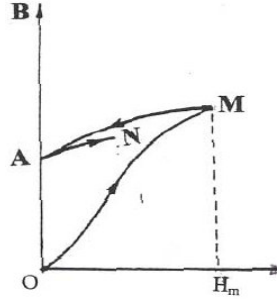
Bir elektrik makinesindeki kayıplar;

- Histerisis kaybı
- Eddy akımı kaybı
- Tabakalararası kayıp
- Rotasyonel kayıp

Histerisis ve eddy akımı kaybı çeliğin kendi özelliğidir, arta kalanlar ise çekirdeğin elektrikli makinede kullanılış şekli ile alakalıdır (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.15.1 Histerisiz Kaybı

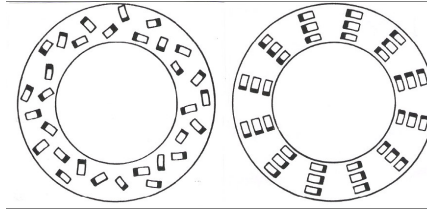
Fiziksel olarak malzemenin mıknatıslanması sırasında atomların yön değiştirmeleri, akı değişimi nedeniyle olur. Bu kayıp çekirdek içinde dahili ısı olarak açığa çıkar. Histerisiz kaybı artan akış yoğunluğuyla ve manyetikliğin değişim sıklığına göre hızlı bir şekilde artar. H'nin aldığı değerler için B'nin farklı değerler alması olayına histerisiz, bu akı yoğunluğu değişiminin çekirdek içinde dahili ısı olarak açığa çıkmasına da histerisiz kaybı denir (EASA/AEMT Hb., 2003).



Şekil 3.20 Basit bir histerisiz eğrisiyle histerisiz kaybının gösterilmesi (Tacer, 2004).

$$p_h = af B_{\max}^n \quad (3.7)$$

Formülde, a ve n maddeye bağlı sabit, n steinmetz sabiti. Bmax manyetik akı tepe değeri, f mıknatıslanma frekansıdır.

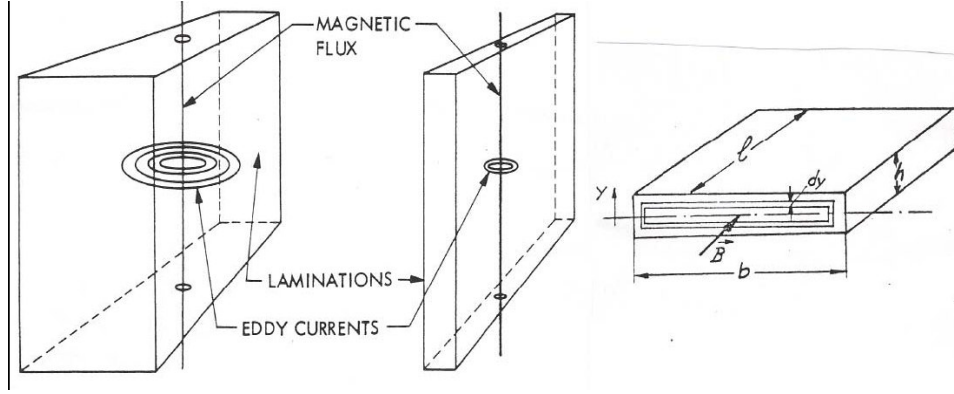


Şekil 3.21 Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış halde atomların dizilimi (Tacer, 2004).

3.15.2 Girdap Akımı Kayıpları Nasıl Oluşur?

Alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzemede ortaya çıkan ısı(joule) kayıplarıdır. Değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde ve ferromanyetik malzemelerin moleküllerinde bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromanyetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen girdap akımları, manyetik alan frekansında olacağından elektronların birbirine sürtünmesiyle moleküller ısınır. Isı kaynağı oluşturan bu kısımlardan cidarlar doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar. Elektrik akımları manyetik bir çekirdeği (hücreyi) çevreleyen iletkenlerin üzerinde yüzer ve manyetik akıntı elektrik akımı meydana getirir yani manyetik akıntıyı yükler. Eğer manyetik akı zengin ise, akıntı hatlarını çevreleyen iletken yollardan herhangi birinde voltaj meydana getirir. Bu iletken yollardan bazıları çekirdek(iron) yapısının içinde bulunur. Yollar boyunca voltaj çekirdek (iron) malzemenin içinde dairesel akımlar yaratır. Bu akımlar eddy akımları olarak bilinir. Eddy akımlarının büyüklüğü frekansın boyutu, manyetik akışın yoğunluğuna, ve (iron) malzemenin spesifik rezistansı ve kalınlığına bağlıdır. Eğer manyetik çekirdek(iron) malzemenin kalınlığı büyük ise, eddy akımları sınırlanamayacak ve bu yüksek enerji kaybıyla sonuçlanacaktır. Bu kayıp da ısı gibi sınırlanabilir ve bu da çekirdeğin sıcaklığını oldukça artırır (Tacer, 2004).

Girdap akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi izledikleri yol da düzgün değildir. Girdap akımları sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından magnetik alanın da zayıflamasına neden olurlar. Şekil 3.22 'de girdap kayıplarına etkiyen büyüklükleri görmek amacıyla kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromanyetik malzemedan oluşan levhayı göz önüne alalım.



Şekil 3.22 Kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromanyetik bir malzemeden oluşan levha(Tacer, 2004).

Levhanın pozitif yönü şekilde B ile gösterilen doğrultuda değişken bir manyetik alanın içinde bulunduğunu varsayalım. Bu değişken magnetik alan sonucunda oluşan girdap akımı devresinin genişliği dy ve uzunluğu l olan kesitte tamamladığı düşüncesiyle bu devre tarafından halkalanan akı için, eğer $h < b$ ise;

$$\Phi = BS = 2ybB \quad (3.8)$$

Değişken magnetik alanın;

$$B = B_m \sin \omega t \quad (3.9)$$

şeklinde zamanla sinüzoidal olarak değiştiği varsayılırsa,

$$\Phi = 2Yb B_m \sin \omega t \quad (3.10)$$

eşitliği elde edilir. Faraday yasasına göre endüklenen gerilim;

$$e = -(d\Phi / dt) = -2yb\omega B_m \cos \omega t \quad (3.11)$$

olur.

Levha malzemesinin öz direnci ρ ile gösterilirse, $2y$ uzunluğunu b genişliği yanında ihmal ederek girdap akımı devresi direnci için;

$$R = \rho 2b / (ldy) \quad (3.12)$$

Endüklenen gerilimin efektif değeri;

$$E = (2yb\omega B_m) / \sqrt{2} \quad (3.13)$$

olduğundan girdap akımının R direncinde meydana getirdiği güç kaybı;

$$dP_w = E^2 / R = (\omega^2 b l B_m / \rho) y^2 dy \quad (3.14)$$

olacağından tüm levhadaki güç kaybı, bunun $y=0$ ile $h=1/2$ arasında integre edilerek,

$$P_{W=(\omega^2 b l B_m^2 h^3 / 24 \rho)} \quad (3.15)$$

ya da,

$$\omega = 2\pi f \quad (3.16)$$

olduğundan,

$$P_w = (\pi^2 f^2 b l B_m^2 h^3 / 6 \rho) \quad (3.17)$$

elde edilir.

Levhanın hacmi $V=bhl$ olduğundan;

$$P_w = (\pi^2 f^2 B_m^2 h^2 V / 6 \rho) \quad (3.18)$$

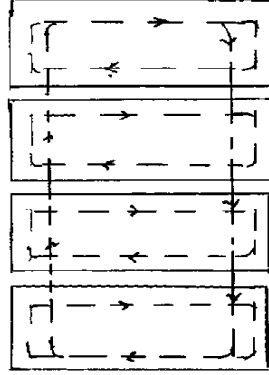
olur.

(3.17) ve (3.18) eşitliklerinden görüleceği üzere girdap akımları nedeniyle oluşan güç kaybı;

1. Levhanın kalınlığının karesi ile ters orantılı
2. Uygulanan mıknatıslanma akımının frekansının karesi ile doğru orantılı
3. Endüksiyonun maks. değerinin karesi ile doğru orantılı
4. Levhanın öz direnci ile ters orantılıdır.

Bu özellikler nedeniyle girdap akımları kayıplarını azaltmak için;

1. Saç kalınlıkları mümkün olduğu kadar küçük olmalı
2. Girdap akımlarının devreleri de birer elektriksel devre olduğu için akımların bir levhadan diğerine geçmesi ile levhalar arasında büyük akım yollarının oluşmaması için levhalar izole edilmelidir.
3. Öz direnci arttırmak için özel alaşımlar kullanılmalıdır.



Şekil 3.23 İzole edilmemiş levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas alan şekli verilmiştir (Tacer, 2004).

Bu şekilde her bir paketteki girdap akımı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Komşu olan levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında bunların birbirlerini yok ettikleri görülmektedir. Bir saç paketi göz önüne alındığında paket çevresinde bütün girdap akımlarının vereceği bir bileşke magnetik etki vardır. Bu bileşke etki nedeniyle esas alan levhanın iç kısmında etkin olmaz. Bu yüzden izole edilirler (Tacer, 2004).

3.15.3 Tabakalararası Kayıp

Eddy akımı kayıplarına ek olarak her tabakada meydana gelir ve buna ek olarak bir güç kaybı, tabakalar arası kayıp olarak bilinir. Tabakalardan biri diğerine göre tamamen yalıtılana dek devam eder. Yalıtımın miktarı, manyetik hücrenin boyutlarına, hücreye uygulanan mekanik basınca, akı yoğunluğuna ve frekansına karşı bu bileşeni ihmal edilebilir kayıplardan bile koruyacak kadar yeterli olmalıdır.

Tabakaların köşelerindeki aşırı çapaklanma tabakalararası kaybı arttıracaktır. Hücreye çok fazla eksenel basınç uygulandığında kayıp da artabilir (ASTM Hb., Vol.2).

3.15.4 Rotasyonel Kayıp

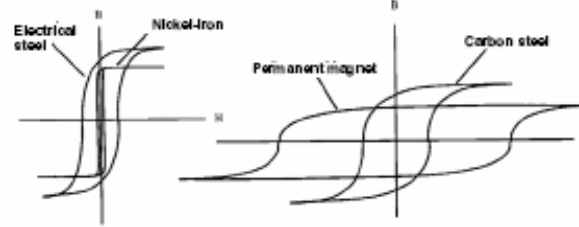
Rotasyonel kayıp stator hücreye aşırı radyal bir basınç uygulandığında ortaya çıkan eddy akım kayıplarının özel bir türüdür. Bunun indüksiyon makinelerindeki sabit bobinlerde önemli bir rolü vardır. Eğer stator (sabit) hücre üzerindeki radyal basınç aşırı derecede yüksekse, yerel ve sirkülasyon yapan eddy akımları her bir tabakadan ve her stator dişinin tepesinden geçer ve belirgin bir şekilde elektrik motorunun hareketsiz kısmındaki(stator) hücre kaybını artırır (ASTM Hb., Vol.2).

3.16 Manyetik Geçirgenlik

Hava boşluğunu bir taraftan diğer bir tarafa geçecek şekilde bir manyetik kuvvet uygulandığında manyetik alan üretilir. Eğer bu hava boşluğu ferromanyetik bir malzeme ile doldurulursa ve aynı manyetik kuvvet sürdürülürse bu durum manyetik akıdaki büyük artışla sonuçlanır. Ferromanyetik malzemede gelişen bu akıyı hava boşluğunda gelişen akıya oranladığımızda ferromanyetik malzemenin geçirgenliğini elde ederiz (ASTM Hb., Vol.2).

Ferromanyetik malzemeler için geçirgenlik bir sabit değildir, uygulanan manyetik kuvvet ve akı yoğunluğuna göre değişir. Manyetik kuvvet lineer olarak artarsa, çelikteki akı yoğunluğu önce yavaşça artar sonra bu artış çok hızlanır, sonra çelik akı açısından doyuma yaklaştıkça kademe kademe bu hız yavaşlamaya başlar (ASTM Hb., Vol.2).

Manyetik kuvvet azaldıkça ve bozulursa (ya da ters yönde ise) akı azalır fakat artış yolu takip ederek azalamaz. Böyle, manyetik güçteki tek bir ters çevrimli bir durum bile akı yoğunluğumanyetik kuvvet grafiğinde bir eğri oluşturur ve genellikle bu eğriye malzemenin histerisiz eğrisi denir. Eğrinin bulunduğu alan çelikteki histerisiz kaybı ile orantılıdır. Şekil farklı çelik tipleri için bir dizi histerisiz eğrilerini ve elektriksel çeliklerin oldukça düşük manyetik kuvvetlerde ve yüksek akı yoğunluklarında uzlaştıklarını gösterir (Nicolau vd., 1996).



Şekil 3.24: Farklı tipte manyetik malzemeler için histerisiz eğrileri (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.17 Isıl İletkenlik

Elektriksel çeliklerde iyi ısı iletkenliği önemlidir çünkü çelikteki kayıplar bir ısı meydana getirir hücrenin bu kısımlarla iletilmek zorunda olan kısımları soğutucu ile (genellikle hava) temas halindedir. Isıl iletkenliği ölçmek kolay değildir, fakat elektriksel iletkenliğe oldukça yakındır ve bağlıdır. Isıl iletkenliğin, elektriksel iletkenliğe oranı yaklaşık olarak sabittir. (yaklaşık 3 civarında bir oran) (EASA/AEMT Hb., 2003).

$$\frac{\text{ısı iletkenlik}}{\text{elektriksel iletkenlik}} = 3(\text{sabit}) \quad (3.19)$$

Bunun sonucunda, çeliğin direncini ölçmek ısı iletkenliği hakkında da bilgi verir. Çeliğin direncinin büyük bir bölümü, çelikte bulunan silisyum yüzdesiyle doğrudan ilişkilidir. Şunu

hatırlamalıyız ki, silisyum yüzdesi düşük veya silisyum ihtiva etmeyen çeliklerin dirençleri yüksek miktarda silisyum ihtiva edenlerden daha düşüktür. Tipik elektriksel çelikler için bu bilgileri ısı iletkenlik cinsinden yazarsak;

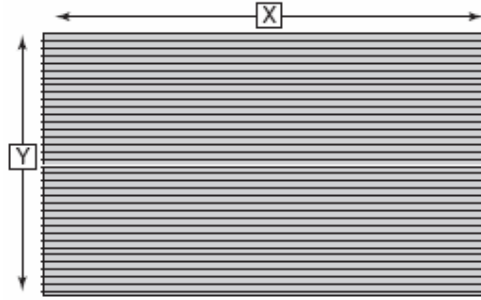
1. Laminasyon düzlemine paralel,

Yönlenmiş çelik 27W/mK

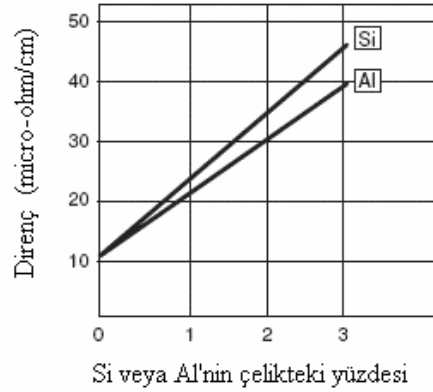
%1,3 Si'li çelik 45W/Mk

Silisyumsuz çelik 66W/Mk

2. Laminasyon düzlemine dik durumda ısı empedans değerleri paralel durumdakine göre %2-3 oranında azalır.



Şekil 3.25 Şekilde bir laminasyon yığını görülmektedir. Tabakalar arası yalıtım oksit kaplamalardan dolayı ısı iletkenlik dik yönde paralel yöndekine göre daha fazla engellenmiştir (EASA/AEMT Hb., 2003).



Şekil 3.26 Silisyum ve alüminyum'un çeliğin direnci üzerine etkilerinin karşılaştırması (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.18 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik

Elektirikli makine tasarımcılarının ortak görüşünden; elektriksel bir makine için kullanılacak olan ideal çelik, düşük bir kayıba sahip olmalı yüksek geçirgenlik ve yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Ne yazık ki silisyumun elektriksel çeliklerde ana alaşım elementi olarak kullanılması kayıpları azaltıp, geçirgenlik ve iletkenliği arttırsa da üretim maliyetini arttırıyor (EASA/AEMT Hb., 2003).

Elektiriksel çelik üreticilerinin, farklı kayıp ve geçirgenlik özelliklerine sahip farklı tip ve kalitelere çelik üretebilmek için hem çeliğin kimyasal bileşimi hem de üretim yöntemiyle ilgili kabul edilebilir fiyatlarda uzlaşmaya varmaları gereklidir. Son yıllarda düşük kayıpları geliştirebilmek için çok düşük karbonlu çelikler üretebilmek için ve çok düşük sülfür içeriklerine ulaşabilmek için araştırmalar yapılıyor (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.19 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri

Çoğu çelik üretim prosesinin çelik kayıpları üzerinde bazı etkileri vardır, fakat alaşımlama dışında en önemli olanları; (EASA/AEMT Hb., 2003).

1. Tavlama
2. Yüzey kaplama veya indükleme
3. Tabaka kalınlıkları

3.19.1 Tavlama

Elektriksel çelik üreticileri haddelme proseslerini iyi yönde manyetik özelliklere sahip malzeme üretebilmek için ve üretilen çelik tipi için gereken özellikleri sağlayabilmek için organize ederler. Yine de eğer bu malzemelerin üreticisi zarar verebilecek olan faktörlerin kontrolünün yapılmasını kanıksamamışsa, bu malzemelerden optimum düzeyde özellikler beklenemez. Bu zararlı faktörler, malzemenin işlenmesiyle oluşan gerilimler, çatlak(ilerleyen) distorsiyon(slitter distortion) , bası distorsiyonu(punching distortion), kenar,köşe çapakları, tabakaların tavlama sırasında tamamlanmamış karbonsuzlaşma, aşırı oksitlenme bunlardan bazılarının isimleridir. Şunu bilmek önemlidir ki en iyi manyetik kalite çekirdeklerin veya tabakaların uygun ve hakkını verecek şekilde tavlama ile mümkündür. Bu da gerilim içermeyen iyi bir şekilde dekarburize edilmiş ve aşırı derecede oksitlenmemiş bir yapıyı anlatır. Tabakaların toplu halde de gerilim içermemesi gereklidir. Müşterinin yapacağı tavlama genellikle iki geniş sınıfa ayırmak mümkündür. Bir gerilim giderme tavlama tam mamül seviyesinde manyetik özelliklerin kazanımı için normal olarak kullanılan bir ısıt

işlemdir. Bir ‘kalite değerlendirme tavlaması’ sadece tabakalarda meydana gelen gerilimi gidermekle kalmaz aynı zamanda karbonsuzlaştırır ve tane büyümesine de katkıda bulunur. (EASA/AEMT Hb., 2003).

Çizelge 3.3 Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları (EASA/AEMT Hb., 2003).

Çelik tipleri	Tavlama Tipi	Tavlamanın öncelikli Amacı
Tane yönlendirilmiş	Gerilim giderme	Gerilimin giderilmesi işleme, sıyırma, şekil verme veya basma sırasında gelişen gerilimlerin giderilmesidir. Yönlendirilmiş çelik manyetik kaliteye zarar verecek olan oksitleyici ve karbürleyici ortamlardan dikkatlice korunmalıdır. Manyetik özelliklerin kazanımı sağlanır.
Yönlendirilmemiş tam mamül	Gerilim giderme	Merdaneler ve yıpratıcı operasyonlarla gelen gerilimlerin giderilmesidir. Manyetik özelliklerin kazanımı. karbonu azaltmak için yaklaşık 825 ⁰ C’de nemli hidrojen ortamda yapılır.
Yönlendirilmemiş yarımamül ve yönlendirilmemiş, zor parçalar	Kalite Değerlendirme Gerilim giderme	Manyetik kalite ve tane büyümesinin engellenmesi. Yüzeyde ayırıcı bir oksit tabakası şekillenmesi Gerilim giderme+karbonsuzlaştırma+ tane büyümesinin önlenmesi etkisi yapar.

Hem gerilim giderme hem de kalite değerlendirme tavlaması çoğunlukla sürekli metodlarla yapılır. Sürekli tavlama fırınları yüksek hacimdeki üretilere uygun dizayn edilmiş ve uygun kontrollü gaz atmosferi sağlanarak çelik oksidasyondan korunur ve manyetik özellikler geliştirilir. Sürekli fırınlar genellikle aşağıdaki kısımlardan oluşur (Dupre’ vd., 2004).

1. Yağlayıcıların yandığı kısım
2. Dekarbürizasyon ve tane büyümesi için yüksek ısı zonları ve
3. Soğutma kısımları aynı zamanda yalıtıcı yüzey oksidi oluşumu için hazırlık

3.19.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı

Eddy akımları kayıplarının sınırlaması, uygun dirençli elektrikli çeliklerle, uygun veriler, yeterli derecede ince tabakalar ve tabakaların etkili elektriksel yalıtımını gerektirir. Eddy akımları tabakaların sadece birinin içinden geçmez, bir hücre gibi bütün çekirdeğin içinden geçerek, tabaka yüzeylerinden bir taraftan diğer bir tarafa akıp gidecektir. Manyetik bir hücreyi basitçe lamine ederken, eğer tabakaların yüzeyi uygun bir şekilde yalıtılmadıysa ve pürüzler, çapaklar çok küçük değilse manyetik hücre bütün hücreyi sirküle ederek gelen fazla akımı engelleyemez (EASA/AEMT Hb., 2003).

Tabaka yüzey yalıtımı direnci, tabakalar arası güç kaybı, toplam güç kaybının genellikle %1-2'si gibi küçük bir oranına düşürüldüğünde oldukça uygun olarak düşünülebilir. Ne kadar büyüklükteki yalıtım uygun ve hangi yüzey yalıtımı daha uygun gibi sorular bazı kompleks sorulardır. Bu soruların cevabı ise aparatın sadece arzu edilen verimliliğine bağlı değil aynı zamanda bir çok dizayn ve üretim faktörlerine bağlı olup bunların her biri tabakalar arası güç kaybının büyüklüğünü de etkilemektedir. Çok küçük beygirli motorlar gibi küçük elektrikli aletler yüzey yalıtımı gerektirmeyebilir bundan ötesi çelik yapımında veya gerilim giderme tavlamasında doğal oksit filmi üretmeleri sağlanabilir. Fakat yalıtıma başka nedenlerden dolayı da ihtiyaç duyulabilir, örneğin korozif ortama maruz kalan aletlerin hücrelerine, oksit filmin bozulmasını ya da bundan kaynaklanan düşük direnci önlemek için yalıtıcı kaplama yapılabilir (EASA/AEMT Hb., 2003).

Yalıtıcı kaplamalar birinci alternatif olarak çeliğin zımbalanabilirliğini (preslenebilirliğini) arttırdığı için kullanılırlar ve kullanım gerekçeleri doğrudur çünkü onlar kalıp ömrünü uzatır ve zımbalama maliyetini düşürürler. Yarı mamül yönlenmemiş elektrikli çeliklerde tabaka yapışmalarını azalttığından yapışmayan kaplamalar kullanılabilir. Kaplamalardaki yenilikler ve gelişmeler sıradan yapışmayan kaplamalara göre daha yüksek sıcaklıklarda tavlama yapılmasına olanak verir, bu da manyetik kaliteyi geliştirip, üretkenliğin artmasıyla sonuçlanır. Tabakalarda kullanılan kaplamanın tipi önemlidir çünkü farklı kaplamaların ısıtılma işlemi olan dirençleri de farklıdır. Örneğin; kaplamanın erkenden bitmesi, yüzeyden gitmesi v.b. (EASA/AEMT Hb., 2003).

Çizelge 3.4: Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri (EASA/AEMT Hb., 2003).

TİP	TANIMLAMA
C-O	Bu tanımlama sadece yassı haddelenmiş silisli çeliğin yüzeyinde oluşan doğal oksit yüzeyidir. Genellikle küçük hücrelerde ve gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanır ve ince fakat etkili tabaka yalıtımı sağlar
C-2	Bu tanımlama inorganik bir yalıtımı anlatan, tane-yönlenmiş silisli çeliğin yüksek sıcaklıkta hidrojen tavlaması sırasında, çeliğin yüzeyine uygulanmış MgO ve silikat kaplaması reaksiyonunun bir sonucu olarak oluşan camsı filmidir. Bu yalıtım havada-soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Normal gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanacak, transformatör hücrelerinin dağılımında kullanıldığı gibi yeterli tabakalar arası dirence de sahiptir. Kaplamanın aşındırıcı doğasından dolayı ezilmiş, basılmış, kalıplanmış tabakalara uygun değildir.
C-3	Bu yalıtım vernikli kaplamaları içerdiğinden havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Tabakalar arası direnç bu kaplama sayesinde sağlanır ve kalıp yağlayıcısı olarak kullanılan C-1 kaplamasından daha üstündür. C-3 kaplaması bir de preslenebilirliği artırır. Normal işlem sıcaklıklarına dayanır fakat gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanamaz.
C-4	Orta derecede yalıtım direnci gerektiren havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Bu kaplama kimyasal muamele edilmiş veya fosfatlanmış yüzeyden oluşur. Gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır ve preslenebilirliği artırır.
C-5	Bu yalıtım C-4 ile aynı ve inorganiktir fakat tabakalararası direnci arttırmak için buna seramik dolgular eklenmiştir. Genellikle taneleri yönlenmiş silisli çeliklerde C-2 kaplamasının üzerine uygulanır. Havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreleri ve yüksek voltajlarda dönen kesilmiş tabakalarda kullanılır. Aynı zamanda yüksek seviyede tabakalararası direnç gerektiren durumlarda da uygulama imkanı bulur. C-2 gibi . nötr veya hassas redükleyici atmosferde gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır. *

* Isı, kaynak ve pres döküm gibi uygulamaları içeren üretim süreçlerinde, bırakılabilindiği kadar az kalıntı bırakabilmek için normal kaplamadan daha ince bir kaplama kullanılması istenebilir. Bu kaplamalar preslenebilirliği artırır ve üretici doğru kalınlığı kullandığından emin olmalıdır. * C-3 genel olarak C-1'in yerini aldığından bu tablodan kaldırılmıştır.

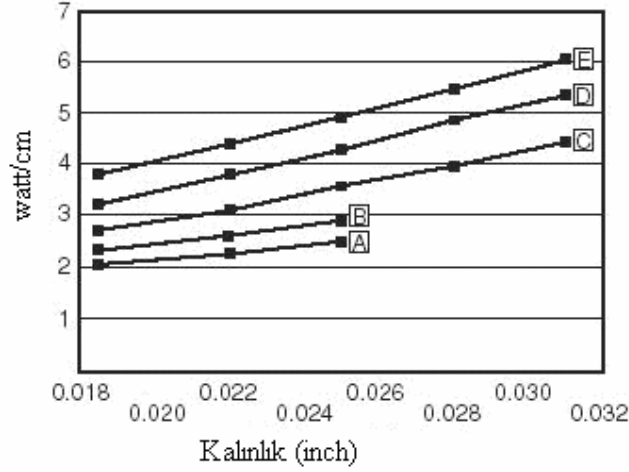
3.19.3 Tabaka Kalınlıkları

Eddy akımı kayıpları lineer olarak tabaka kalınlığını arttıırırlar. Hatta belirli bir çelik için kayıp 2 ise kalınlık da 2 artar denilir, fakat bu basit bir indirgemedir. Şekil 3.27 eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. Teoride, değerleri verilmiş bir çelik için indüklenmiş voltaj, kesit alan oranı arttıkça artar. Teorik olarak, tabakalar incelidikçe özellikler de iyi yönde gelişir. Pratikte ne de olsa daha ince tabakalar hem çelik üreticisi hem de motor üreticisi için pahalıya mal olmaktadır. 0.5 mm'den ince tabakaların işlenmesi zor ve tabakalaşma ve çekirdek hücre üretimi sırasında zarar görmeye meyillidir. Bu nedenle endüstriyel motorları çok azı bundan daha ince tabakalara sahiptir buna rağmen daha ince tabakalar yüksek sıklıkta ve başka özel amaçlı makineler için de kullanılır (EASA/AEMT Hb., 2003).

Tamircilerin parmak bastıkları nokta, tabakalar incelidikçe, eski izleri silmek için daha çok çaba ve dikkat gerekiyor. Bu kaplamasız (finger plate), üretilen hücreler için kısmen doğru bir saptamadır (EASA/AEMT Hb., 2003).

ABD'de ki motorlarda tipik olarak 0,47–0,64 mm arasında ki tabaka kalınlıkları kullanılır, fakat bu bir üreticiden diğerine göre değişir. Avrupa'da ikien çok bilinen tabaka kalınlığı hem küçük hem de büyük beygirli motorlarda 0,5 mm ve 0,65 mm'dir.

Çeliğin kalınlığını değiştirmek motor üreticisi için büyük bir masraftır. Zimba kalıpları belli bir tabaka kalınlığına göre ayarlanmıştır bundan dolayı eğer tabaka kalınlığı değişirse bunlar da yer değiştirmelidir. Zimba kalıplarının kullanımı malzeme kalınlığı belirlenmesinde etkin kılınırsa, bu çapak boyunu kötü bir şekilde etkileyecek ve kalıpların zımbalama sırasında yapışmasına veya kırılmasına neden olabilecektir. Bu yüzden çoğu motor veya tabaka üreticisi herhangi bir özel tabaka çapında ve tek bir tabaka kalınlığında standardize olurlar. Şekil 3.27'de eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir (EASA/AEMT Hb., 2003).



Şekil 3.27 Şekilde kayıpların levha kalınlıklarıyla ilişkisi görülmektedir. Kalınlık arttıkça kayıplar artmaktadır. Teorik olarak, tabakalar inceldikçe özellikler de iyi yönde gelişir (EASA/AEMT Hb., 2003).

3.19.4 Girdap Akımlarına Etki Eden Diğer Faktörler

Levhaların kesilmesi ve işlenmesi esnasında levha kesim ve işleme yerlerinde sertleşme meydana gelir. Bu yüzden girdap akım kayıpları artar. Bunun gibi levhalar arasında bulunan izole edici tabakanın muhtelif yerlerinde sürtünme ve hatalı baskı kuvveti neticesinde zedelenme ve delinme, levhaların girdap akımları için kısa devre olmasına neden olurlar. Tüm yukarıda sıralanan nedenlerden dolayı formüllerle hesaplanan kayıplardan daha büyük girdap akım kayıpları söz konusu olur. Kısa devre oluşmaması durumunda işleme ve kesme sonucunda oluşan kayıplar, teorik olarak hesaplanandan yaklaşık %50 daha büyüktür. Bu nedenle işleme faktörü tanımlanır. Bu katsayı işlemede gösterilecek titizliğe bağlıdır. Kötü işleme durumu için yaklaşık olarak 2 alınabilir. Kısa devrelerin oluşmasında ise bu katsayı 5'e kadar çıkabilir (Sezer, 2006).

3.19.5 Anormal Kayıplar

Klasik girdap akımı kaybı madde boyunca sabit ve tek olan geçirgenlikle doğrusal bir B-H ilişkisi olduğunu varsayar. Böylece, dalga şekli sinüs eğrisi olarak uygulanan bir alan için tüm diğer niceliklerin dalga şekli de sinüs eğrisidir ve ince bir levha içindeki girdap akımı kayıpları Maxwell eşitlikleri yardımıyla hesaplanır (Sezer, 2006).

Bu eşitliklere göre, girdap akımları nedeniyle devir başına düşen enerji kaybı frekansın doğrusal bir fonksiyonudur. Histeresis nedeniyle olan devir başına enerji kaybı frekanstan bağımsızdır. Geleneksel olarak, histeresis ve girdap akımı kayıpları farklı frekanslarda verilen

bir akı yoğunluğu için güç kaybı ölçümlerini alarak ve devir başına düşen toplam güç kaybının frekansa karşı eğimi grafiğe geçirilerek deneysel olarak ayrılabilir. Bu eğriyi sıfır frekansa genişletmek histeresis kaybını verir (Sezer, 2006).

Girdap akımı kayıp bileşeni, ince levhalarda frekanstan bağımsız olan devir başına histeresis kaybının toplamdan çıkarılmasıyla tanımlanır. Bununla birlikte bu yapıldığında, görünür girdap akımı kaybının Eşitlik (3.18)'de hesaplanmış olan değerden daima daha büyük olduğu bulunur. Bu, anormal bir kayıp olarak adlandırılan ileri bir kayıp bileşenini verir (Sezer, 2006).

(3.17) ve (3.18) bağıntıları ile açıklanamayan kayıplar anormal kayıplardır. Toplam güç kayıpları ve bileşenleri Şekil 3.28 'de görülmektedir. Anormal kayıplar kristal büyüklüğü, madde içindeki gerilmeler, domain duvarı hareketleri, madde içindeki kusurlar, yanlış yerleşimler gibi birçok maddeye ait özelliklere bağlıdır (Sezer, 2006).

Yukarıda anlatılan güç kayıplarının bileşenlerini azaltmak için yapılan yöntemler tablo 3.5 'de verilmektedir. Çizelge 3.5’de histeresis kayıplarının azaltılması için, kristal yönelimlerinin geliştirilmesi demir içindeki manyetik olmayan maddelerin mümkün olduğunca azaltılması ve iç gerilmelerin giderilmesi gereklidir (Sezer, 2006).

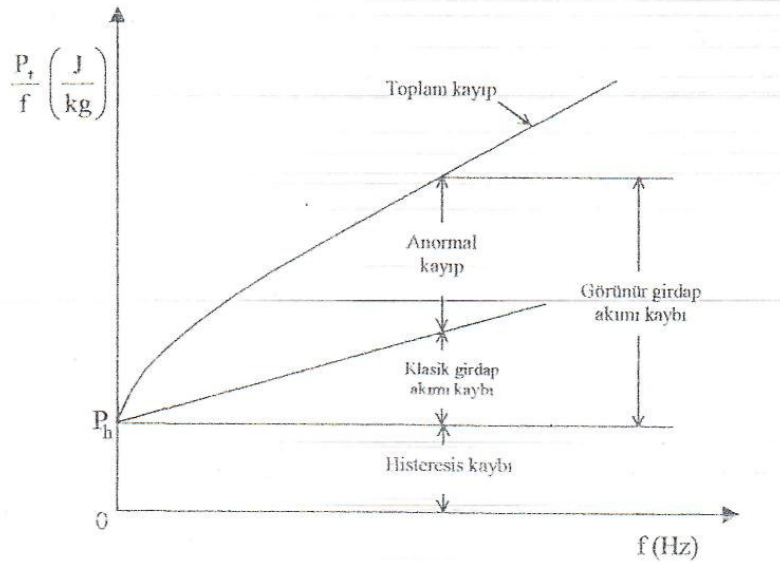
Çizelge 3.5 Elektrik çeliklerinde çekirdek kayıplarını azaltma yöntemleri (Sezer, 2006).

Çekirdek kaybı çeşidi	Çekirdek kaybı azaltma yöntemi
Histeresis	1) Yönelmeyi geliştirmek
	2) Manyetik olmayan maddeleri azaltmak
	3) İç gerilmeleri gidermek
Klasik girdap akımı	1) Maddeyi inceltmek
	2) Si katkısını çoğaltıp, maddenin direncini
Anormal	1) Kristalleri küçültmek
	2) Yüzeyi ince bir filmle kaplamak
	3) Fiziksel yöntemlerle domainleri inceltmek

Elektrik çeliklerinin üretiminde farklı işlemler kullanılıp kristal boyutları küçültülmelidir. Çeşitli kimyasal yöntemlerle çelik içindeki manyetik olmayan maddeler örneğin karbon (C) azaltılmaktadır. Üretim ve maddenin mekanik işlenmesi sırasında oluşan iç gerilmeler elde edilen ürünün tavlanmasıyla giderilmekte ve manyetik özellikler yeniden kazandırılmaktadır. Klasik girdap akımları levha haline getirilmiş elektrik çeliklerinin inceltilmesi ve maddeye Silisyum (Si) katkısıyla azaltılmaktadır. Anormal kayıplar ise kristal boyutlarının küçültülmesi, levha yüzeyinin ince bir filmle (MgO) kaplanması ve fiziksel olarak domainlerin inceltilmesi yöntemleriyle azaltılmaktadır (Sezer, 2006).

Anormal kayıp, güç frekanslarında amorf maddelerinin toplam güç kaybının % 90-99'undan sorumludur. Bu, grainleri yönlendirilmiş Fe-3.2%Si için olan oranın %30-90'nı ile karşılaştırılmalıdır. Bu anormal kaybın temeli çeşitli domain etkilerine katkıda bulunmaktadır. Bunlar;

- a) Domain duvarının oluşumu ve duvar açıları
- b) Dalga şekli sinüs eğrisi olmayan, tek olmayan ve tekrarlamalı olmayan duvar hareketi.
- c) Akının tam nüfuz edememesi ve domain duvarının eğilmesi,
- d) Dalga şekli sinüs eğrisi olmayan akı yoğunluğu ve akı yoğunluğunun bölgesel değişimi,
- e) Domain duvarının yeniden oluşması ve yok olması şeklinde ifade edilmektedir (Sezer, 2006).



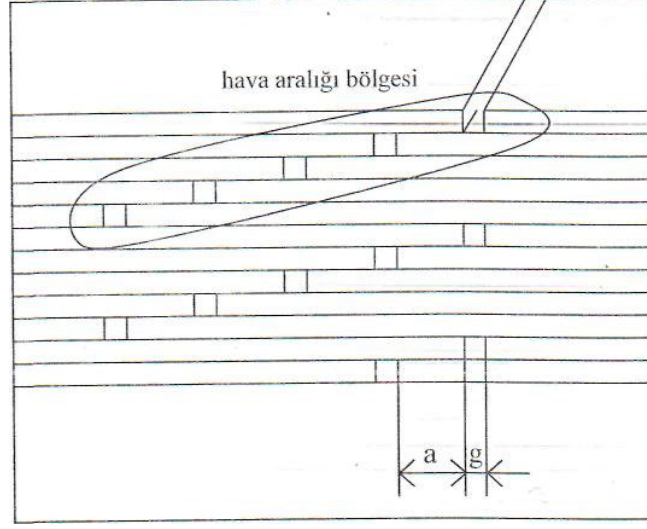
Şekil 3.28 Transformatör çekirdeklerinde kayıpların klasik ayrılması (Sezer, 2006).

3.20 Elektrik Çelikleri Ve Amorf Maddelerde Akı Dağılımı

3.20.1 Farklı Geometriye Sahip Transformatör Çekirdeklerinde Akı Dağılımı

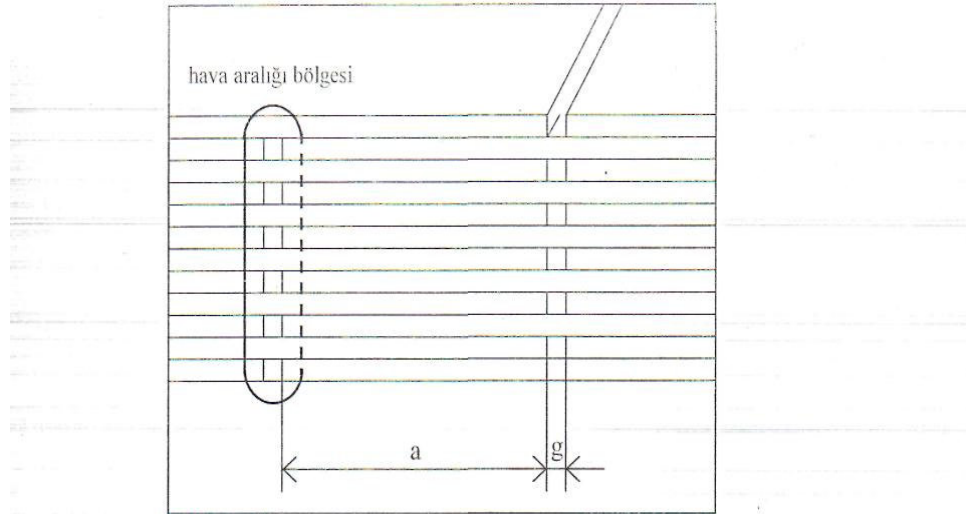
Farklı transformatör üreticileri, güç kaybı ve gürültüsü olmayan en iyi çekirdek özelliğini elde etmek için son derece değişik yöntemler uygulamaktadırlar. Son zamanlarda hem akademik hem de endüstri araştırma laboratuvarları, önemli bir ölçüde-ıştirilen çekirdek eklem (birleşme yeri) yöntemlerini önermektedirler. Bununla birlikte yığılma faktörünü arttıran temel problem bölgelerinin hala bu birleşme yerleri olduğu varsayılır. İkinci bir azalma için birçok çekirdek

üreticisi üst üste binen bölgeler için çok-katlı yöntemleri tanıtmışlardır (Şekil 3.29) (Sezer, 2006).



Şekil 3.29 Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Çok-katlı model ($N = 4$)

Bu yöntemde bitişik iki eklem sonu arasında oluşan hava boşluğu tek-katlı yöntem (Şekil 3.30) durumunda olduğu gibi tek bir levha ile köprülenmez (Sezer, 2006).



Şekil 3.30 Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Tek-katlı model ($N = 1$)

Çok-katlı yöntemde N kat için N tane levha ile köprülenir. Bununla birlikte çok-katlı çekirdek yönteminin oluşumu için artan fiyat gibi bir olumsuzluğa sahiptir. Löffler ve arkadaşlarının (1995) yaptığı çalışmada model çekirdeğin özellikleri üzerinde çok-katlı yapılandırma etkisi araştırılmıştır, g (hava aralığı uzunluğu), levha genişliği w , üst üste binme uzunluğu a gibi geometrik değişkenlerin etkisi vurgulanmaktadır. Buna ilaveten

tek-katlı yapılandırma için kayıplar üzerinde olumsuz etkiye sahip çok sayıda geometrik değişkenlerin var olduğu ve N basamak sayısındaki artışın, böyle değişkenlerin çekirdeğin manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini azalttığı gösterilmektedir.

Transformatör çekirdekleri birleştirilirken hava-aralıkları levha uçlarında doğal olarak 0-3 mm genişliğinde oluşmaktadır. Çekirdekler değişen genişlikteki paketleri içerdiğinden bu paketlerin değiştirilmiş hava aralığı bölgeleri levha düzlemine dik Φ_z akı bileşenlerine ve böylece aşırı girdap akımı kaybına neden olmaktadır. Löffler ve arkadaşlarının (1994) araştırmasındaki genel sonuçlar: (Sezer, 2006).

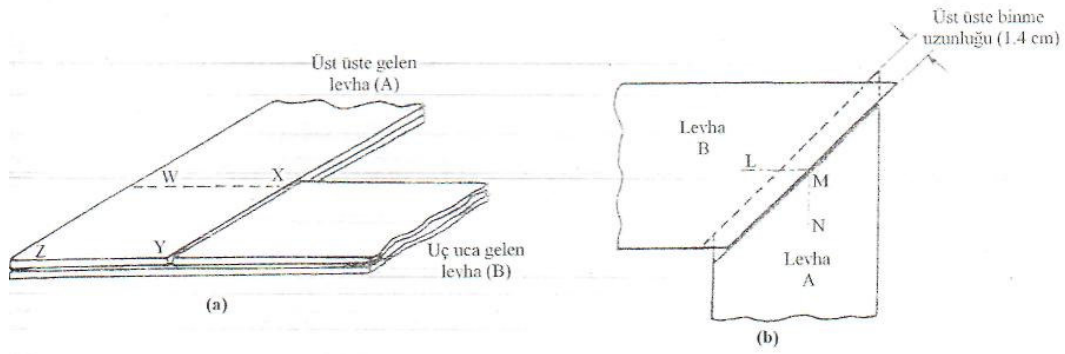
1. Kaydırılmış elektrik çeliklerinin birleşimindeki hava boşlukları, düzlemsel girdap akımları ve akı düzensizliklerine uygun iç levhalardaki akı bileşenlerine sebep olur.
2. Kayıp artışları bağıl bir en küçük değerden geçen değişim uzunluğuna bağlıdır,
3. En yüksek kayıp artışları 1 mm'ye ulaşan boşluk uzunluklarından meydana gelir.
4. Kayıp artışları, boşlukların hem ortalama uzunluğuna hem de bölgesel dağılımına bağlıdır şeklinde verilmiştir

Kaydırılmış elektrik çeliklerinin birleşimindeki hava boşlukları, düzlemsel girdap akımları ve akı düzensizliklerine uygun iç levhalardaki akı bileşenlerine sebep olur. (Sezer, 2006).

Kayıp artışları bağıl bir en küçük değerden geçen değişim uzunluğuna bağlıdır, En yüksek kayıp artışları 1 mm'ye ulaşan boşluk uzunluklarından meydana gelir. Kayıp artışları, boşlukların hem ortalama uzunluğuna hem de bölgesel dağılımına bağlıdır şeklinde verilmiştir (Sezer, 2006).

Transformatördeki güç kayıpları çeliğin kalitesini arttırarak veya daha iyi yapım teknikleri kullanılarak azaltılabilir. Grainleri yönlendirilmiş Si-Fe kullanımı transformatör verimliliğini arttırmada temel bir etkiye sahiptir, fakat tek olumsuz yönü gerilme duyarlılığına sahip olmasıdır. Bir transformatör çekirdeğinin verimliliği birleşme yerlerinin yapılandırılmasına bağlıdır. Bu bölgelerde akı, çeliğin dönme yönünden sapabilir ya da biçim değiştirebilir. Böylece yüksek kayıplı bölgeler oluşur. Önceleri, sadece toplam kayıplar incelendiğinden birleşme yerlerindeki akı dağılımı ve bölgesel kayıplar hakkında fazla bir bilgi elde edilememiştir. Jones ve Moses'm (1974) çalışmasında, Gupta'nın 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimli bir transformatörün verimliliğinin uç uca ve üst üste gelen birleşimle yapılan benzer bir transformatörden

% 7 daha fazla olduğunu ve Brechna'nın da farklı birleşme noktalarını karşılaştırdığı ve 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimin uç uca ve üst üste gelen birleşiminkiyle olandan % 8 - % 10 daha verimli olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte 90° 'den farklı uç uca birleşimleri kullanan bir transformatörün ekonomik olup olmadığı konusunda şüphe olduğunu açıklamıştır. En basit köşe birleşme türü Şekil 3.31 a.'da ki uç uca ve üst üste gelen birleşimlerdir. Bu türde tabakalar çekirdek boyunca A ve B pozisyonları arasında birbirini izleyecek şekilde dizilirler. Şekil 3.31 b' de gösterilen 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimle yapılan transformatörlerin verimliliğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur (Sezer, 2006).



Şekil 3.31 (a) Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerleri (b) kısmen üst üste binen dizilimin şematik gösterimi (Sezer, 2006).

"Büyük çekirdeklerde 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimin uç uca ve üst üste gelen birleşimle yapılandan daha verimli olduğu bilinmesine rağmen iki birleşme türünde akı dağılımının ve kaybının karşılaştırılması önceden yapılmamıştır. Jones ve Moses'ın (1974) araştırmasındaki deneysel sonuçlar kaybın ve akı dağılımının genel şeklini göstermekten başka aşağıdakileri de ortaya çıkarmaktadır;

1. Kısmen üst üste binen dizilimin, uçuca ve üst üste gelen birleşimden 1,5 T ve 50 Hz'de mıknatıslandırılmış 15 cm'lik tabaklarda %18 daha verimlidir.
2. En büyük bölgesel kayıp, uç uca ve üst üste gelen birleşim yerlerinde bulunan koldaki ortalama kayıptan %26 ve 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimde bulunan koldaki ortalama kayıptan da %7 daha büyüktür.
3. Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerlerinde daha yüksek olan bu kaybın nedeni doymuş maddenin ve dönen akının daha büyük değerde olmasıdır (Sezer, 2006).

3.20.2 Manyetik Devreler Ve Zıt Mıknatıslanma Alanları

Verilen bir H manyetik alanında, manyetik bir maddenin varlığı, μ geçirgenliği nedeniyle B manyetik indüksiyonunu etkiler. Manyetik devrelerdeki manyetik akıyı belirlemek için uygun bir kavram, elektriksel direncin manyetik benzeri olan R manyetik direncidir. Ayrıca manyetik madde sonlu bir uzunluğa sahipse, bu maddenin kısımları da manyetik kutupların oluşması uygulanan alanın zıttı bir manyetik alan doğurur. Bu zıt alan zıt mıknatıslanma alanı olarak adlandırılır ve şiddeti maddenin M mıknatıslanmasına ve geometrisine bağlıdır (Sezer, 2006).

M mıknatıslanmasının H manyetik alanının manyetik dipolmomentin varlığı nedeniyle sonlu boyutlarda mıknatıslanmış bir madde içinde zıt yönleri göstermekte olduğu için, madde içinde her ne zaman manyetik kutuplar oluşursa var olan H, zıt mıknatıslanma alanını tanımlamak mümkündür. Bu zıt mıknatıslanma alanı, uygulanan alan sıfıra düşürüldüğünde sonlu uzunluktaki örnekler üzerindeki histeresis ölçümlerinden bulunabilir. Fakat ölçülen alan artık (kalan) mıknatıslanma nedeniyle negatiftir. Zıt mıknatıslanma alanı sadece iki faktöre bağlıdır. Bunlar maddedeki mıknatıslanma ve örneğin şeklidir. Zıt mıknatıslanma alanı, mıknatıslanma ile orantılıdır,

$$\vec{H}_z = N_z \vec{M} \quad (3.20)$$

şeklinde verilir. Burada N_z , örneğin geometrisinden hesaplanan zıt mıknatıslanma sabitidir. N_z için tam analitik çözümler sadece küre ve elipsoid gibi şekiller için elde edilebilir. Çizelge 3.6'da çeşitli geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 Değişik basit geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri(Sezer, 2006).

Geometri	N_z
Toroid	0
Uzun Silindir	0
Silindir $l/d = 20$	0.00617
Silindir $l/d = 10$	0.0172
Silindir $l/d = 8$	0.02
Silindir $l/d = 5$	0.040
Silindir $l/d = 1$	0.27
Küre	0.333

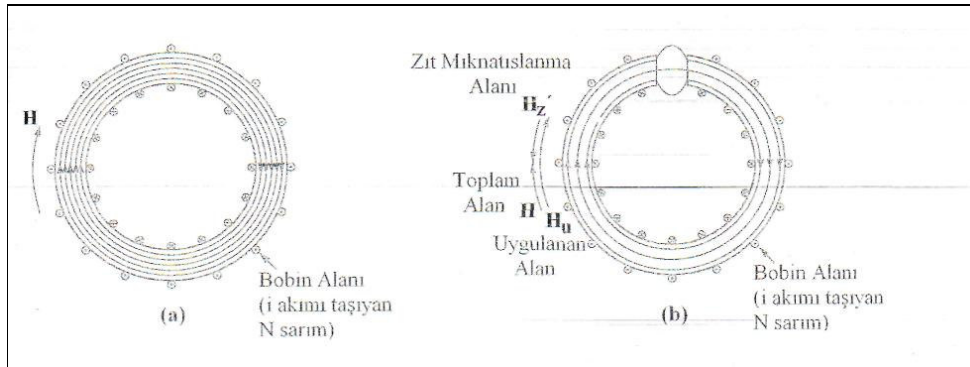
Manyetik akı yolunun bir hava boşluğuyla kesildiği durumlar uygulamada önemlidir. Çünkü sabit mıknatıs, elektrik motorları, jeneratörler ve madde analizi gibi mühendislik uygulamalarında bu olayla karşılaşılır. Burada karşılaşılan problem tek bir maddede hesaplanan akıdan daha karmaşıktır. Bununla birlikte manyetik alan için manyetik akıyla ilgili denklemlerin genelleştirilmesiyle zıt mıknatıslanma fikri, çözümü sağlamak için uygulanabilir (Sezer, 2006).

i akımı taşıyan N sarımlı demir bir halka ele alındığında (Şekil 3.31a.), manyetik alan $N i / l$ olacaktır. Burada l , halkanın ortalama uzunluğudur. Akının, manyetik indüksiyon ve manyetik alan arasındaki ilişkiden, (Sezer, 2006).

$$\Phi = BA = \mu HA = \mu \left(\frac{Ni}{l} \right) A = \frac{Ni}{(l / \mu A)} \quad (3.21)$$

şeklinde yazılır. Burada $l / \mu A$ terimi yolun manyetik direncidir. Bu, bir elektrik devresinde elektriksel direncin benzeridir yani manyetik bir devrede seriler halinde manyetik dirençler toplanabilir. Şekil 3.31b.'de gösterildiği gibi halkada hava aralığı sağlamak için bir yarık oluşturulur. Eğer hava aralığı küçükse aralıktaki akı kaybı az olacaktır. Fakat. $\vec{B} = \mu \vec{H}$ eşitliği havanın ve demir halkanın geçirgenliği çok farklı olduğu için uygulanamaz. Amper devre yasasını kullanarak, hava boşluğuyla birlikte bir demir toroidin içinden geçen akı;

$$\Phi = N i / [(l_{Fe} / Y_{AFe} \mu_{Fe}) + (l_h / Y_{Ah} \mu_h)] \quad (3.22)$$



Şekil 3.32 (a) Kapalı bir yol içeren Demir toroiddeki manyetik akı yolu, (b) hava boşluğu olan demir toroid (Sezer, 2006).

Akı çizgileri demirde yoğunlaşmış daireler gibi görünmektedir. Hava boşluğu manyetik devrenin direncini artırır ve hava boşluğunda olduğu kadar demirde de akı yoğunluğu azalır. Halkadaki manyetik akı hava boşluğunda olduğunda azalmaktadır çünkü daha zayıf geçirgenliği olan hava boşluğundan eşit hacimdeki demirden geçen aynı akıyı geçirmek daha fazla enerji gerektirmektedir (Sezer, 2006).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın ilk aşamasında kullanım ömrünü tamamlamış (hurda) 6 adet silisyumlu çelik sac toplanmış ve Assan Alüminyum firmasından da aynı oranlarda silisyum içeren iki adet orijinal M470 ve M700 tipi (ASTM) Si'lu çelik sac alınmıştır. Bu çelik saclar çeşitli metalografik işlemlere tabi tutulduktan sonra mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların amacı kullanılmış ve kullanılmamış sacların mikro yapı farklarını karşılaştırmaktır. Bu kıyaslamalar aynı zamanda ASTM'deki aynı oranlarda silisyum içeren çeliklerin mikroyapıları da temel alınarak sürdürülmüştür. Hurda yani kullanım ömrünü tamamlamış olan silisli çeliklerin mikro yapılarında silikat inklüzyonlarına ve dejenere olmuş fazlara fazlaca rastlanmıştır.

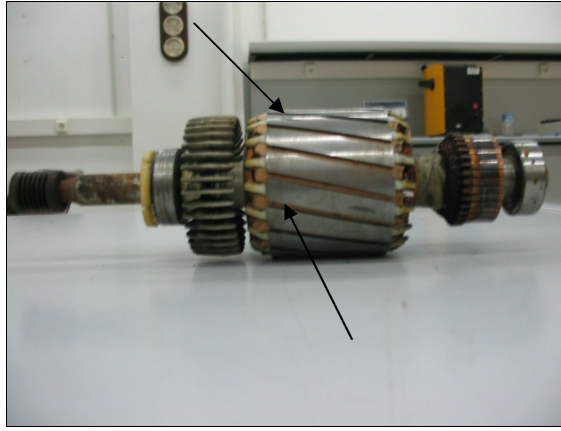
Deneysel çalışmanın asıl amacı olan ikinci aşamasında ise MGE Metal firmasından iki grup halinde alınan M400 tipi silisyumlu sac yine MGE Metal fabrikasında soğuk haddeleme metoduyla ilk grup 0.50 mm'den 0,48mm'ye ikinci grup ise yine 0,50 mm'den 0,43mm'ye haddelenmiştir. Ayrıca sadece bir adet 1m uzunluğundaki sac da 0,50 mm'den 0,40mm'ye haddelenebilmiştir. M400 tipi çelik yüksek oranda silisyum içerdiğinden haddeleme işlemleri sırasında bazı zorluklarla karşılaşmıştır. M400 tipi haddelenen çeliğin ve haddelenmemiş orijinal sacın çekme testleri de MGE Metal fabrikasında yapılmıştır. Daha sonra haddelenen bu parçalar watt kaybı testi için 3x30 cm boyutlarında her parti için 16 adet olmak üzere (toplam 32 adet) dilinmiştir. Bu numuneler Tübitak MAM araştırma merkezine watt kaybı testi yapılmak üzere tarafımda götürülmüştür. Test sonuçlarıyla ilgili yorumlardan ve bilgilerden ileride ki sayfalarda bahsedilecektir.

Watt kaybı testini takiben bu üç farklı kalınlıktaki M400 tipi elektriksel çeliğin mikro yapısı da incelenmiştir.

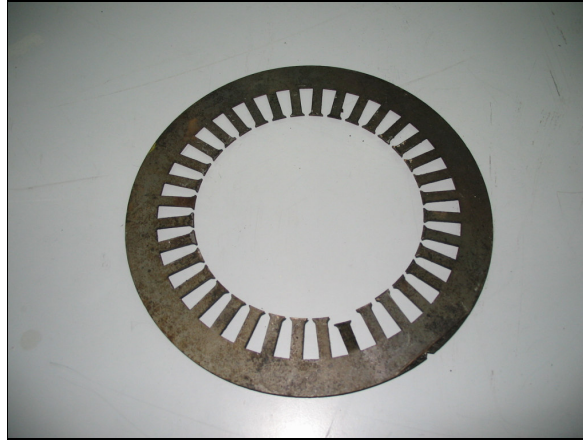
Birinci aşama ve ikinci aşama metalografik işlemlerde hemen hemen aynı işlem kademeleri izlenmiştir. İlk önce numuneler uygun boyutlarda kesilmiş, bakalite alınmış ve monte işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra SiC zımparlarda zımparalanmış ve elmas pastada parlatılmıştır. Numunelerden düşük silisyum içerenler nital2 veya nital3 ile yüksek silisyumlu olan M400 parçalar ise nital4 ile dağlanmıştır. Daha sonra optik mikroskopta mikro yapılar incelenmiştir. Haddeleme prosesinin etkilerini daha belirgin olarak görebilmek için her parça için yüzeyden ayrı olmak üzere bir de kesitten numuneler alınmıştır.



Şekil 4.1 Kullanım ömrünü tamamlamış hurda Si'li sac laminasyon tipinde istiflenmiş



Şekil 4.2 Elektrik motorunun duran kısmı (stator). Ok ile gösterilen kısımlar istiflenmiş silisli saclar.



Şekil 4.3: Elektrik motorunun dönen kısmı (rotor) istiflenmiş tabakalar



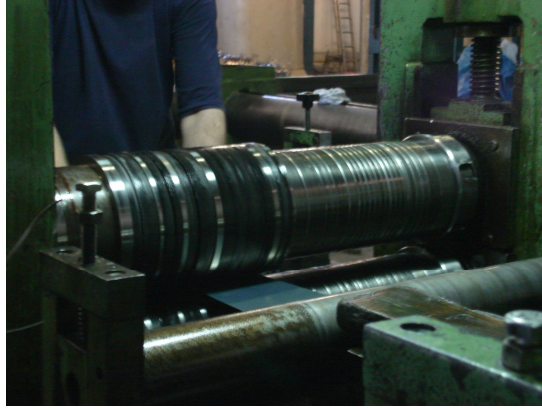
Şekil 4.4: EI tipi trafo sacı, tabaka halinde istiflenmiş



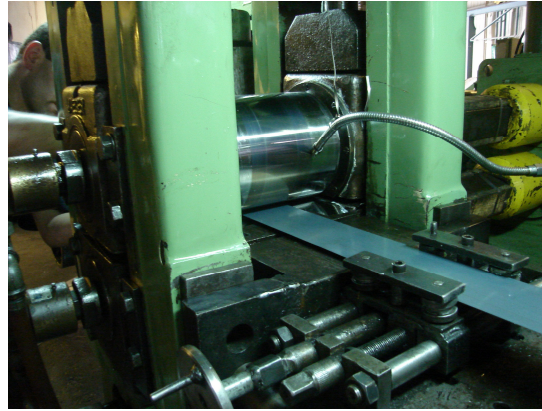
Şekil 4.5. Assan Alüminyum'dan alınan M700 ve M470 tipi orijinal silisli saclar



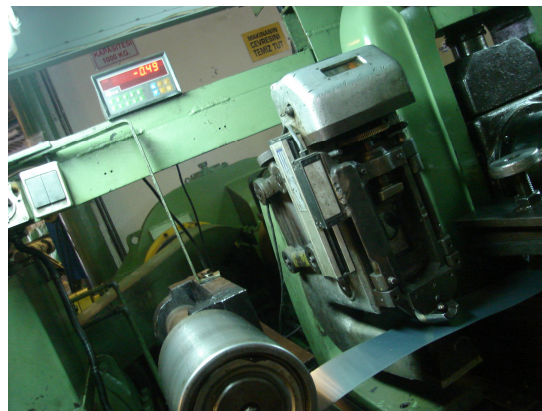
Şekil 4.6 MGE Metal'de M400 silisli sac haddelenmeden önceki hali



Şekil 4.7 MGE Metal’deki dilme makinaları



Şekil 4.8 MGE Metal’deki haddeleme makinası



Şekil 4.9 Haddeleme makinasına bağlı olan mikronmetre

Çizelge 4.1 Kullanım ömrünü tamamlamış Silisli sacların kimyasal analiz sonuçları

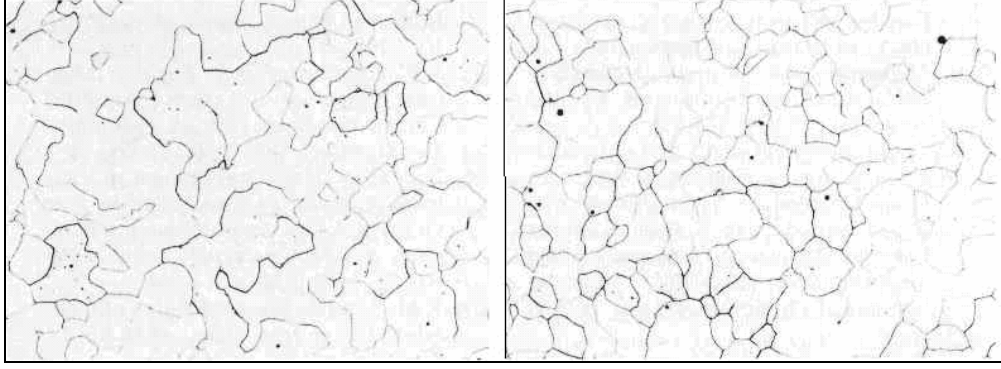
Numune	%Fe ₂	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
No.1	97,44	0,082	1,52	0,261	0,234	0,0107	0,0161	0,023	0,002	0,036
No.2	97,68	0,090	1,28	0,195	0,249	0,0899	0,0214	0,022	0,004	0,025
No.3	97,72	0,121	1,23	0,188	0,244	0,0893	0,0226	0,020	0,003	0,022
No.4	97,66	0,116	1,40	0,186	0,065	0,0560	0,0364	0,052	0,008	0,038
No.5	97,77	0,094	1,39	0,199	0,000	0,0122	0,0396	0,105	0,000	0,028
No.6	97,68	0,147	1,24	0,186	0,241	0,0918	0,0232	0,020	0,003	0,022

Çizelge 4.2 Assan Alüminyumdan alınan orijinal silisli sacların kimyasal analiz sonuçları

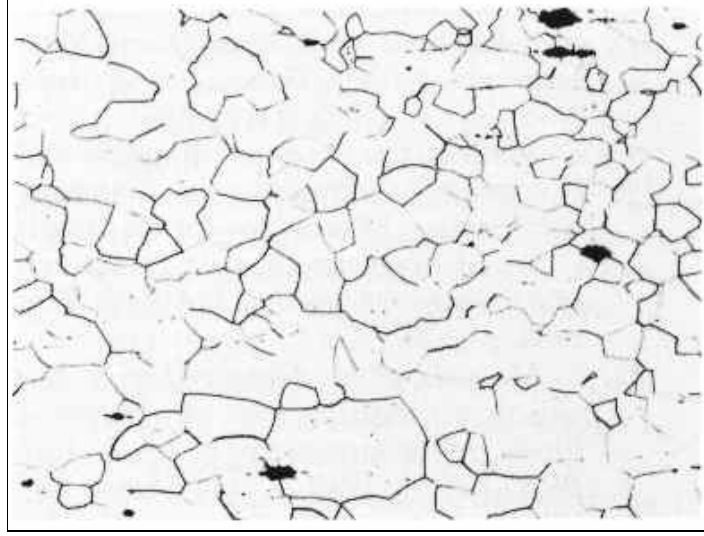
Numune	%Fe ₂	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Cr	%Mo
M470	98,09	0,083	1,13	0,157	0,291	0,0000	0,0026	0,011	0,000
M700	97,61	0,124	1,27	0,182	0,217	0,1464	0,0232	0,038	0,001

Çizelge 4.3 MGE Metal’den alınan M400 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları

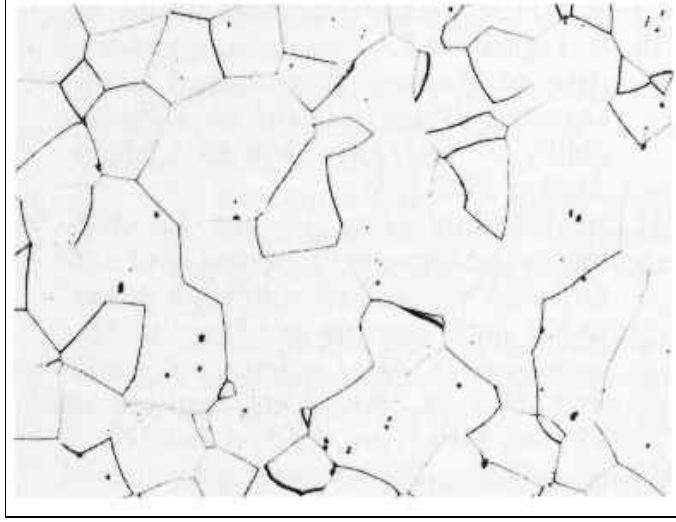
Numune	%Fe ₂	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Cr	%Mo
M400	96,20	0,051	2,84	0,216	0,294	0,0114	0,0157	0,016	0,006



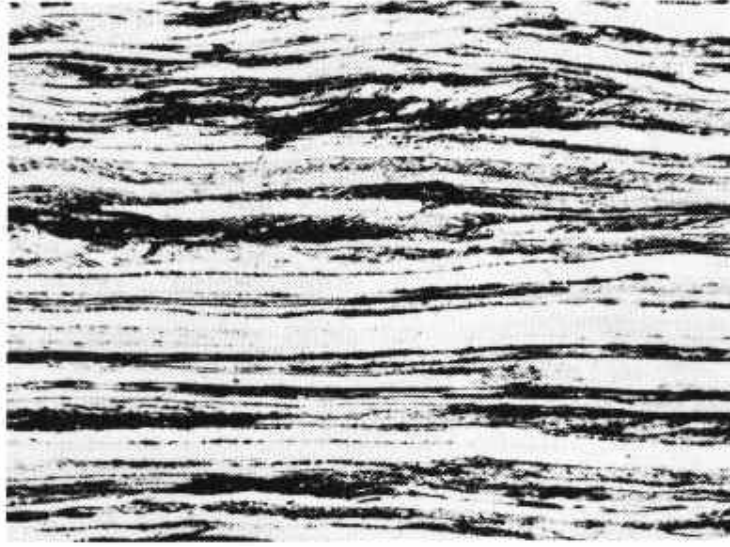
Şekil 4.10 ve 4.11 elektriksel çelik Fe -0,1Mn- 0,1Si - 0,2Cr - 0,08Ni - 0,05V - 0,03Al dekarburizasyon tavlamasından sonra 4 saat ıslak hidrojen banyosunda 845⁰ C’de tutulmuş ve fırında soğutulmuş. 1.ci şekilde dağlama için %2’lik nital 2.cisinde ise ferrit tane sınırlarının daha iyi görülebilmesi için iki kere 5%2’lik nitalle dağlanmıştır. İkisi de X100 (ASTM Hb., Vol.9).



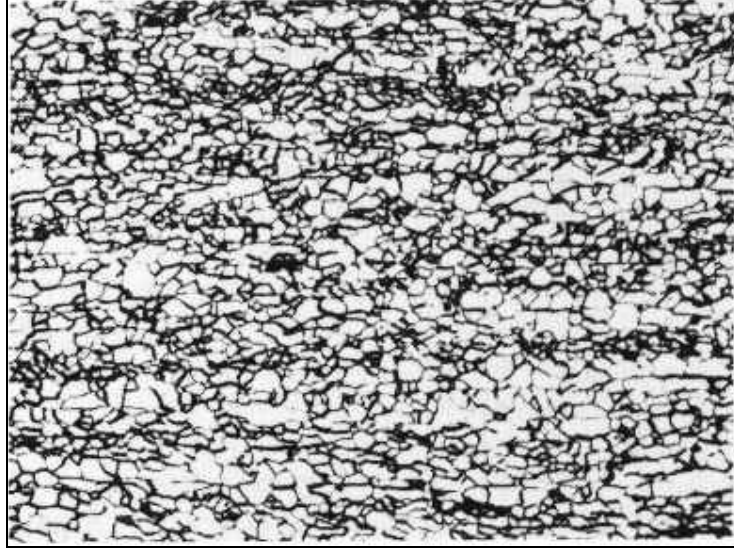
Şekil 4.12 %1 silisli elektriksel çelik sac (M45) %70 soğuk haddelenmiş ve kalınlığı yaklaşık olarak 0,6 mm’ye düşürülmüş nemli ve dekarburize edici ortamda 3 dak. 815⁰’de tavllanmış. Yapıda ferrit taneleri (ASTM Tane boyutu 6) ve siyah olanlar silikat inklüzyonları Nital x100 (ASTM Hb., Vol.9).



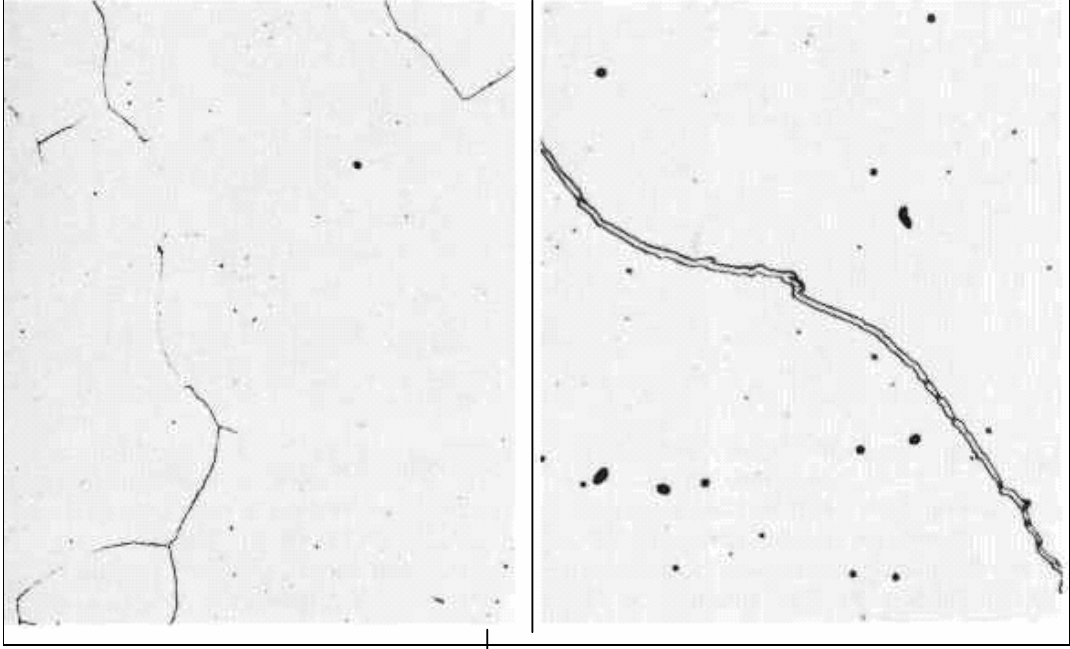
Şekil 4.13 Yönlenmemiş C5 silisli çelik, (Fe-2,0,3Si0,44Al). Boylamsal kesit ferrit tanelerini gösterir. %2 Nital. X100 (ASTM Hb., Vol.9).



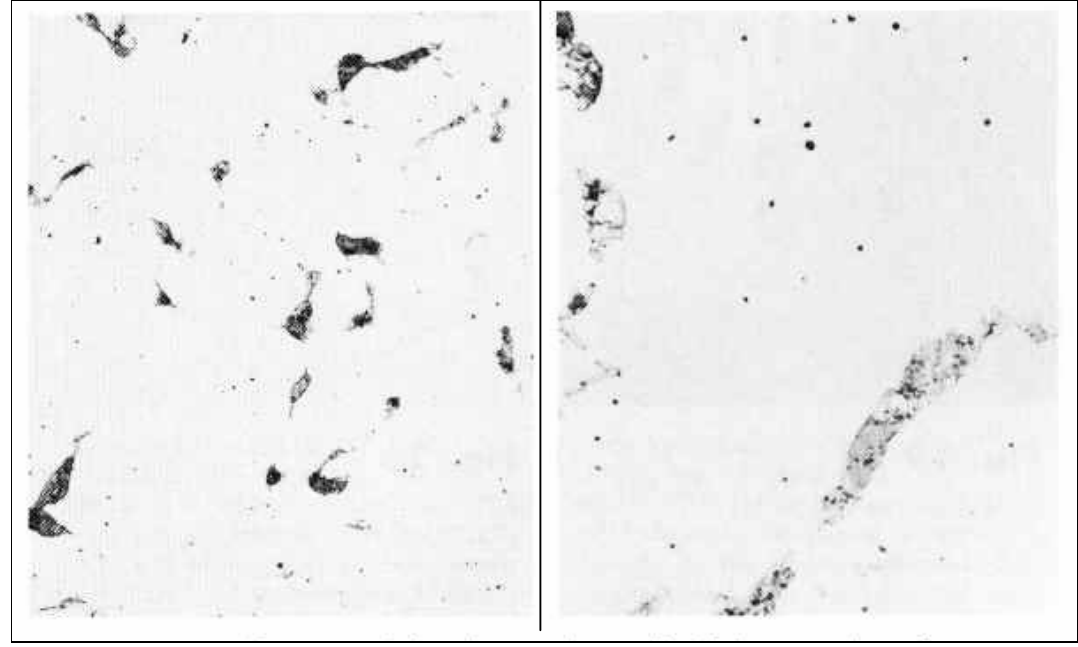
Şekil 4.14 %2,5 silisli yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik. Sürekli olarak haddelenmiş 6 mm kalınlığa %70 inceltilmiş. Yapı uzamış ferrit tanelerinden oluşmuştur. %3 Nital. X100. (ASTM Hb., Vol.9).



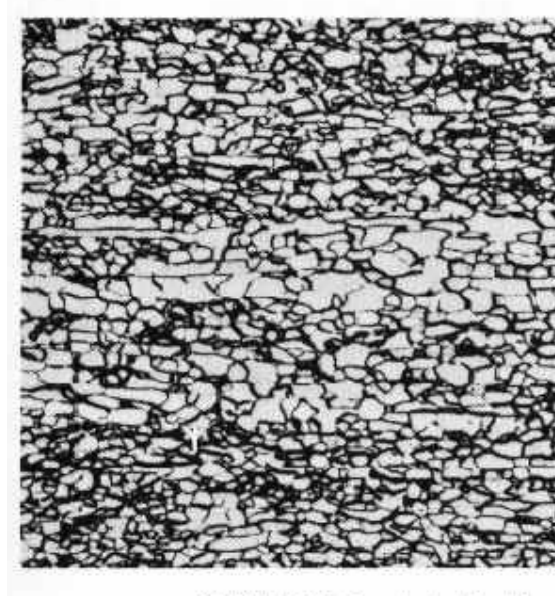
Şekil 4.15 Kalınlık ve soğuk haddeleme bir önceki malzeme ile aynı. 2 dak. 830⁰ C Yapı rekristalize olmuş ince ferrit tanelerinden oluşmuştur. %3 Nital. X100(ASTM Hb., Vol.9).



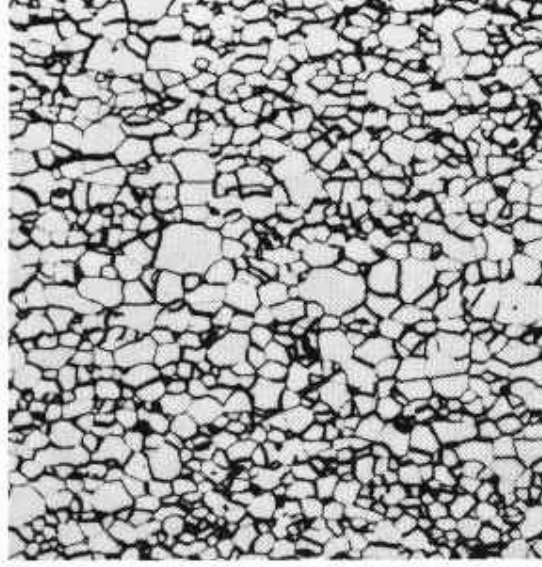
Şekil 4.15 ve 4.17 Silisli demir çubuk (silicon core iron) Fe0,4 Mn-2,5 Si-0,1P. 13,5 mm çapında 4 saat ıslak hidrojen banyosunda 845⁰ C’de tutulmuş ve fırında soğutulmuş. Numune çubuğun yüzeyine yakın yerden alınmış ve zayıf tane sınırı sementitini gösterir. Tamamlanamamış bir dekarbürizasyon söz konusu. İkisi de %4 pikral ile dağlanmış. 1.resim X100- 2.resim X1000(ASTM Hb., Vol.9).



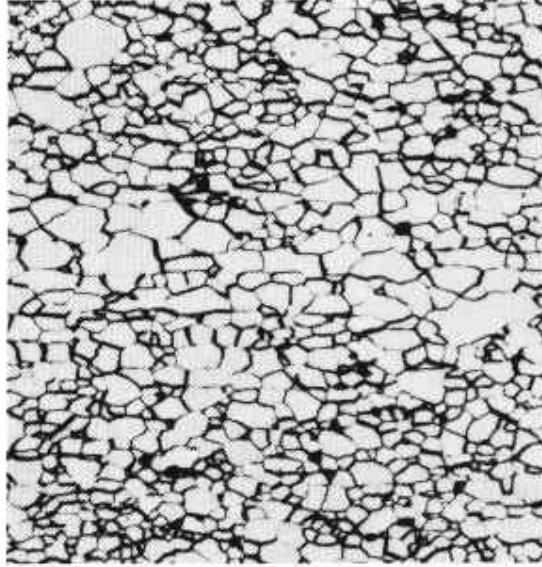
Şekil 4.18 ve 4.19 Bir öncekiyle aynı malzeme ve üretim yöntemi. 13,5 mm çaplı çubuğun merkezinden alınmış numune. Tipik bir ön dekarbürizasyon yapısı perlit kümeleri. İkisi de %4 pikral ile dağlanmış. 1.resim; X400 2.resim X1000(ASTM Hb., Vol.9).



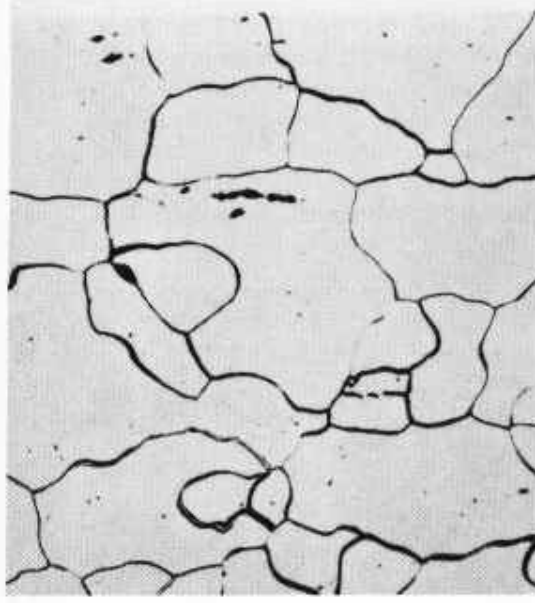
Şekil 4.20 %2,5 Si'li yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik elektriksel sac %70 oranında 6 mm kalınlığa soğuk haddelenmiş 830⁰C 'de 2 dak. Tavlanmış daha ek olarak %10 daha temper haddelenmiş. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100 (ASTM Hb., Vol.9).



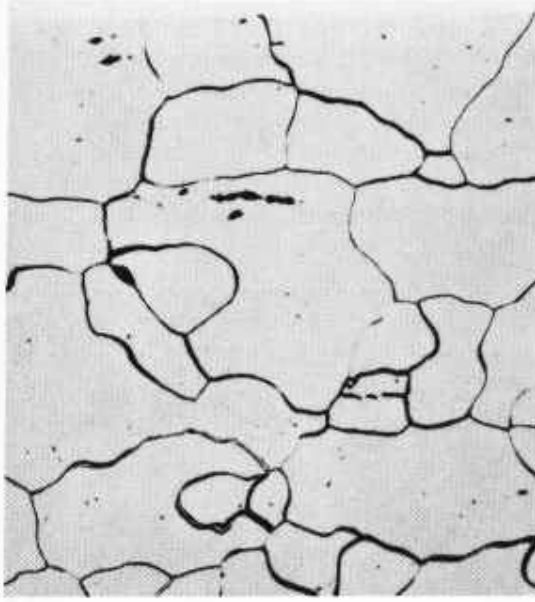
Şekil 4.21 Bir öncekiyle aynı malzeme, kalınlık ve soğuk haddeleme fakat 940⁰C’de 2 dakika tavllanmış. Daha yüksek sıcaklıkta tavlama rekristalize olmuş ferrit tanelerinin bir önceki resme göre daha kabalaştığı görülüyor. %3 nital . X100(ASTM Hb., Vol.9).



Şekil 4.22: Soğuk haddeleme, tavlama ve temper haddeleme, %10 ek haddeleme. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100 (ASTM Hb., Vol.9).



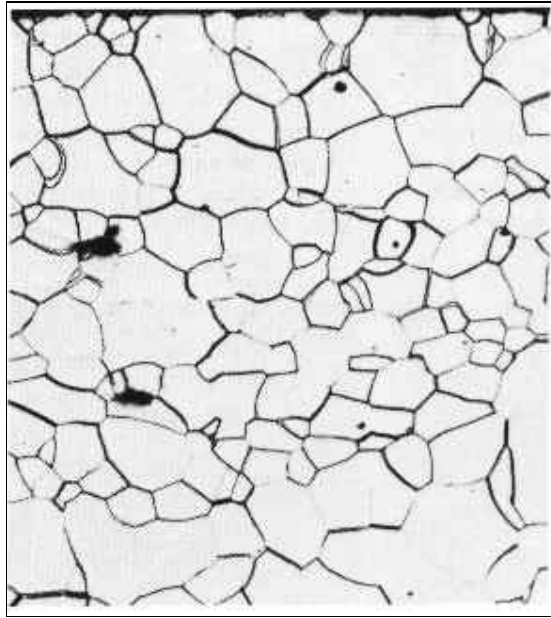
Şekil 4.23 Soğuk haddeleme, tavlama ve temper haddeleme, %10 ek haddeleme. Fakat 940°C 'de 2 dakika tutulmuş rekristalize olmuş ferrit taneleri çok büyük. %3 nital. X100 (ASTM Hb., Vol.9).



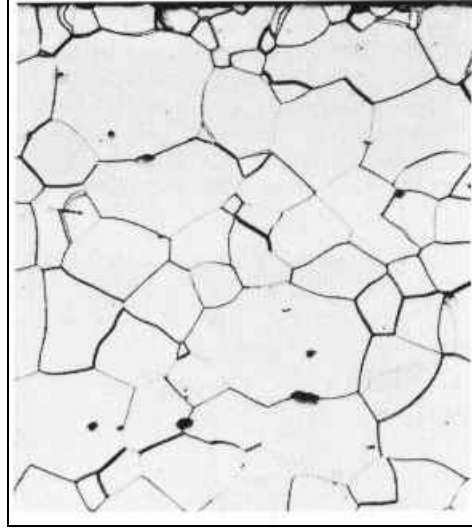
Şekil 4.24 Soğuk haddeleme, tavlama, temper hadde işlemleri. Fakat tekrar 940°C 'ye ısıtılmış ve 2 dak. Tutulmuş. Yapı; yeniden kristalleşmiş büyük ferrit taneleri. %3 nital. X100 (ASTM Hb., Vol.9).



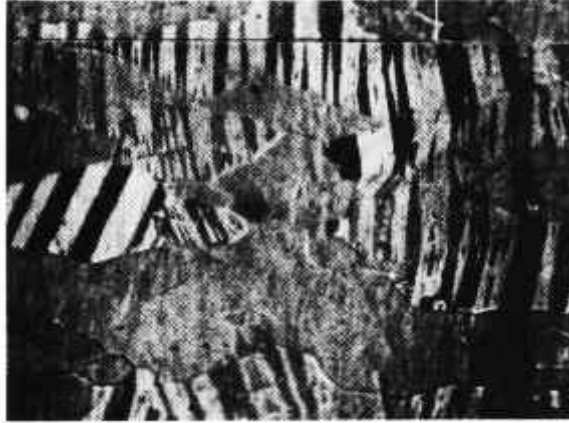
Şekil 4.25 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektriksel sac (M22) %70 oranında 0.6 mm'ye indirilmiş.Yapı: ferrit taneleri haddeleme yönünde uzamış. %10 nital. X100(ASTM Hb., Vol.9).



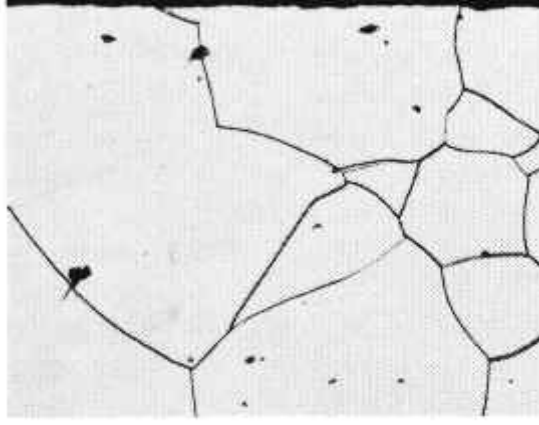
Şekil 4.26 815⁰C 'deki nemli hidrojen atmosferinde dekarbürizasyon tavlaması ve kuru hidrojen atmosferinde 870⁰C'de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X100(ASTM Hb., Vol.9).



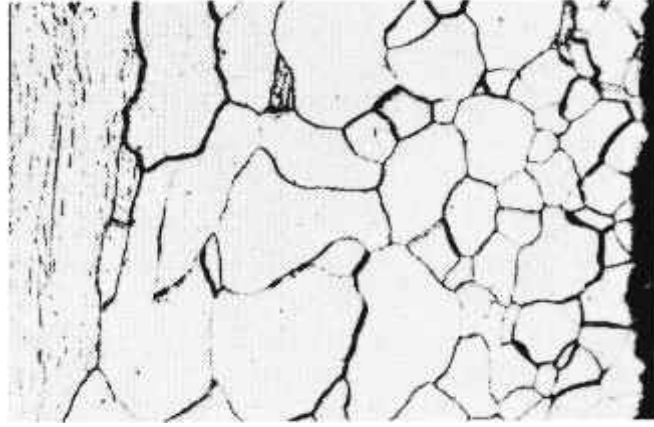
Şekil 4.27 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektriks el sac (M22) %70 oranında 0.6 mm'ye indirilmiş. 815⁰ C'deki nemli hidrojen atmosferinde dekarbürizasyon tavlama s ve kuru hidrojen atmosferinde 870⁰ C'de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X100 (tane boyutu büyük ferrit.) (ASTM Hb., Vol.9).



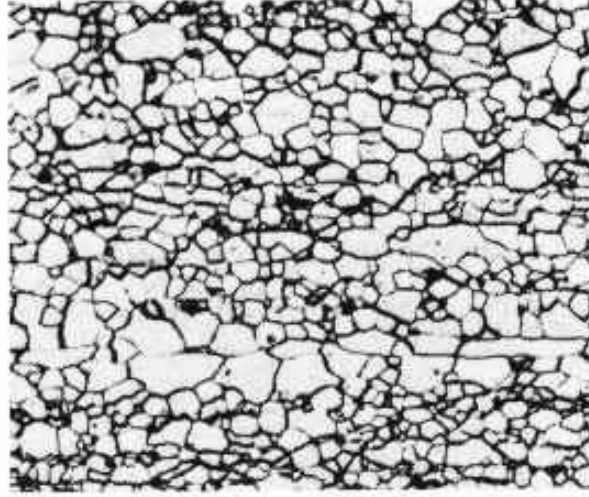
Şekil 4.28 %3,25 Si'li soğuk haddelenmiş elektriks el sac 0,3 mm kalınlığında, 1175⁰ C'de tavllanmış (100) [001] etki alanını gösteren yönl enmiş malzeme. Numune 60 Hz'de demagnetize edilmiş. Bu alan [001] yönündeki sapmanın paralelden 3-4⁰'den fazla olmadığını gösterir (ASTM Hb., Vol.9).



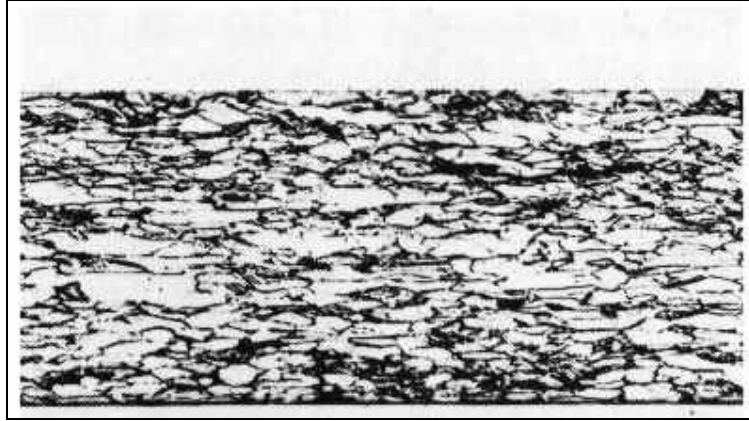
Şekil 4.29 %3Si'li yassı haddelenmiş elektriks el çelik, %70 oranında soğuk haddelenmiş yaklaşık 0,6 mm kalınlığa. Nemli hidrojen atmosferinde 815⁰ C'de dekarbürizasyon tavlamaı ve 1040⁰ C'de tane büyümesi için yapılan tavlama.. %10 nital X100 (ASTM Hb., Vol.9).



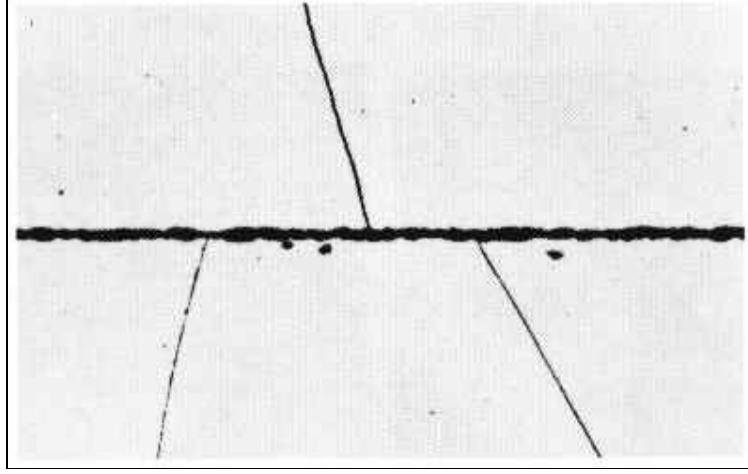
Şekil 4.30 %3 Si'li yassı haddelenmiş yönlendirilmiş elektriks el sıcak bant, sıcak haddelenmiş hali. Yüzeyden (sağ) yaklaşık 0,5 mm derinliğe kadar alınmış numune. Sıcak işlem (bitirme işlemleri) sıcaklığı 900⁰ C'de yapı ferrit taneleri. Yüzeyde ve merkezdeki tane şekli farkı göz ardı edilmemeli. %10 nital X100 (ASTM Hb., Vol.9).



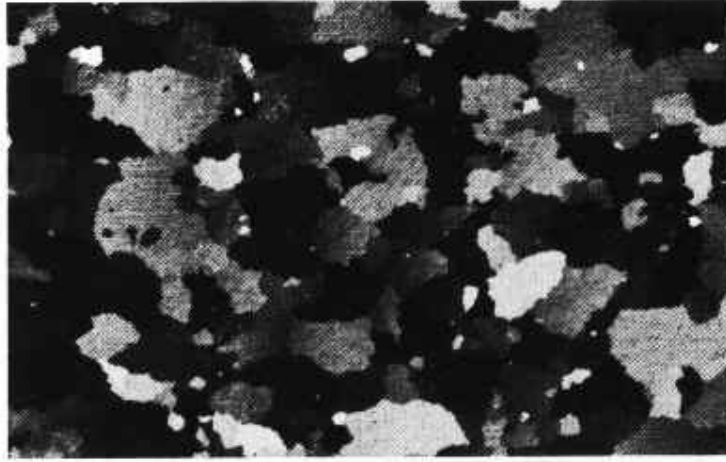
Şekil 4.31 %3Si'li yassı haddelenmiş yönlenmiş elektriksel çelik, %65 oranında soğuk haddelenmiş ve 925⁰ C'de tavlanmış. Yapı; yeniden kristalleşmiş ferrit taneleri. Malzeme son soğuk haddeleme işlemine ve tane kabalaştırma tavlamasına hazır durumda. %10 nital X100. (ASTM Hb., Vol.9).



Şekil 4.32 Fakat son sac kalınlığına ulaşmak için %50 oranında ikinci bir soğuk haddeleme yapılmış. Ferrit taneleri uzamış ve tane-kabalaştırma tavlamasına hazır. %10 nital X100 (ASTM Hb., Vol.9).



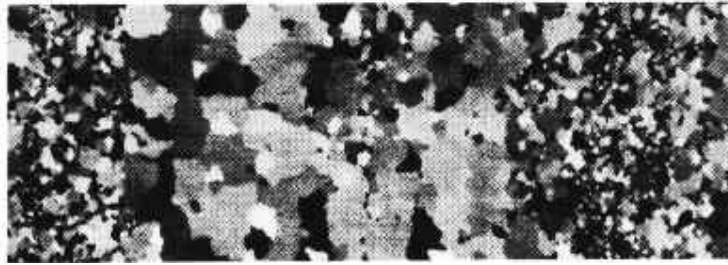
Şekil 4.33 Tane büyütücü işleminden sonra hidrojen atmosferinde 1095°C 'den 1205°C 'ye kadar tavllanmış. En üstteki çizgi iki tanenin oranını, daha alttaki çizgi ise bir tam ve iki kısmen tane gösterir. %10 nital X100 (ASTM Hb., Vol.9).



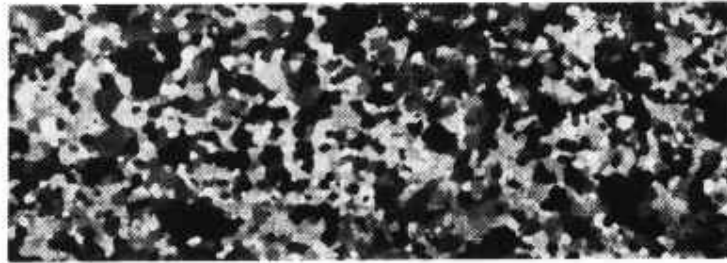
Şekil 4.34 %3,25 Si'li yassı haddelenmiş, yönlenmiş elektriksel sac. 0,3 mm kalınlığına kadar sürekli haddelenmiş. 1175°C 'de tavllanmış. Makrograf ikincil yeniden kristalleşmiş ferrit tanelerini kenar-köşe oryantasyonu ile göstermektedir. 5ml HCl, 1ml HF, 8ml H_2O (ASTM Hb., Vol.9).



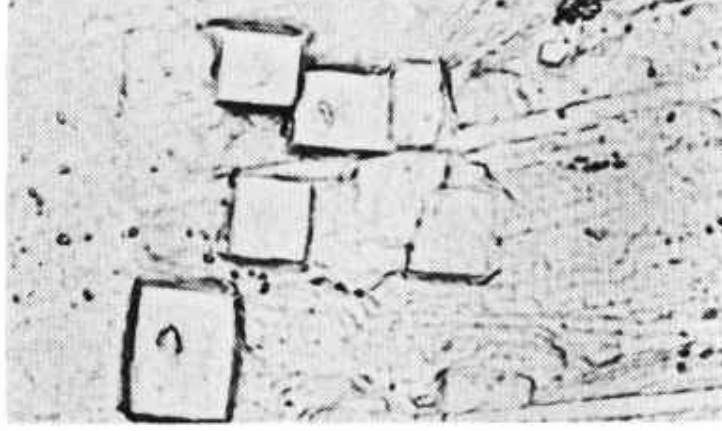
Şekil 4.35 %3Si'li çelik 0,35 mm kalınlığında. Kademeli olarak tavlanmıştır. 760⁰ C'de 1 saat, daha sonra 1065⁰ C'ye kadar her bir kademede 1 saat tavlanmıştır. Ve sıcak bir şekilde kuru hidrojen banyosunda 3 saat tutulmuş. İkinci tane kabalaşması yaklaşık 815⁰ C'de başlamış. Tane büyüklüğü tipiktir. %20 HNO₃, sonra %20 HCl (ASTM Hb., Vol.9).



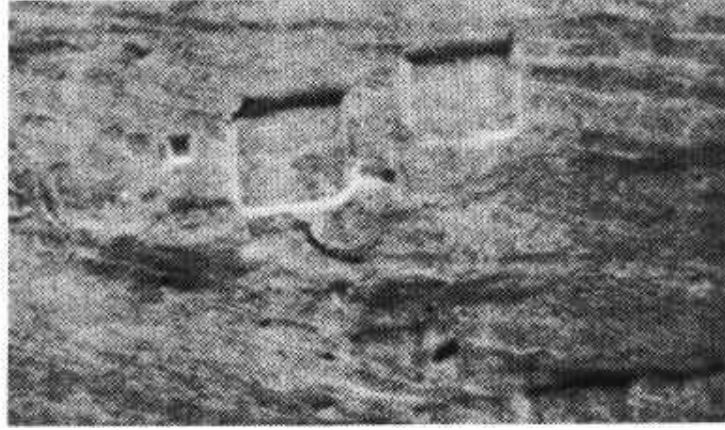
Şekil 4.36 %3Si'li çelik 0,35 mm'ye sıcak haddelenmiş. 1150⁰ C'de 24 saat kuru hidrojen atmosferinde tavlanmış. Taneler ince fakat haddeleme yönündeki oryantasyonları çok kötü. Normal matriste tanelerin oryantasyonu çok iyi. Bunun nedeni inklüzyonlardan bazıları veya ölççe uygun haddelemeden olabilir. %5 HF, %10 HNO₃ (ASTM Hb., Vol.9).



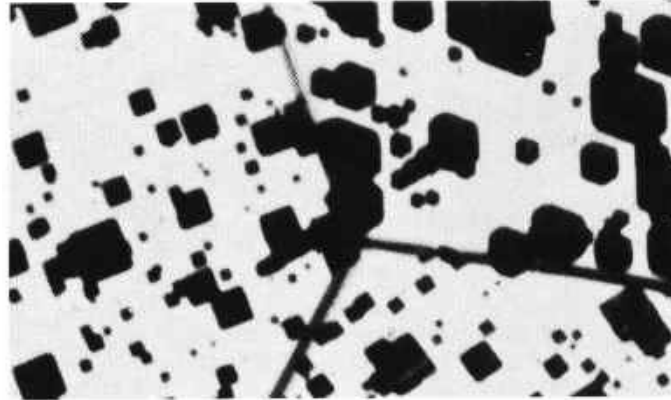
Şekil 4.37 %3Si'li çelik 0,35 mm kalınlığında 1175⁰ C'de kuru hidrojen atmosferinde 7,5 saat tavlanmış. Numune kötü oryantasyona sahip anormal küçük tane boyutunu gösterir. Bu belki soğuk haddeleme yüzdesinin yanlış veya 1010⁰ C üzerine çok hızlı ısıtılmasından olabilir. %20 HNO₃, sonra (sonradan değiştirilmiş) % 20 HCl (ASTM Hb., Vol.9).



Şekil 4.38 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte küp ve yüzeylerde dağılayıcı oyukları. Görünen alan 1175⁰ C veya daha yüksek sıcaklıkta elde edilmiş tek bir ferrit tanesi. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ X1000. (ASTM Hb., Vol.9).



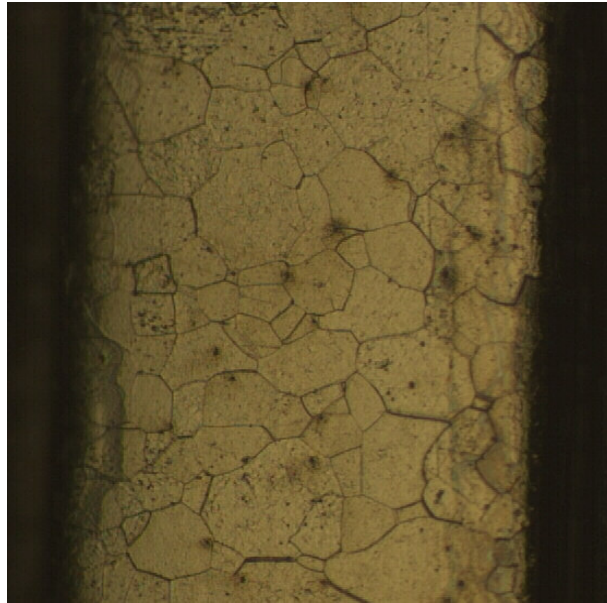
Şekil 4.39 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte küp ve yüzeylerde dağılayıcı oyukları. SEM ile çekilmiş bir mikro fotoğraf. Görünen alan tek bir ferrit tanesi. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ X1000 (ASTM Hb., Vol.9).



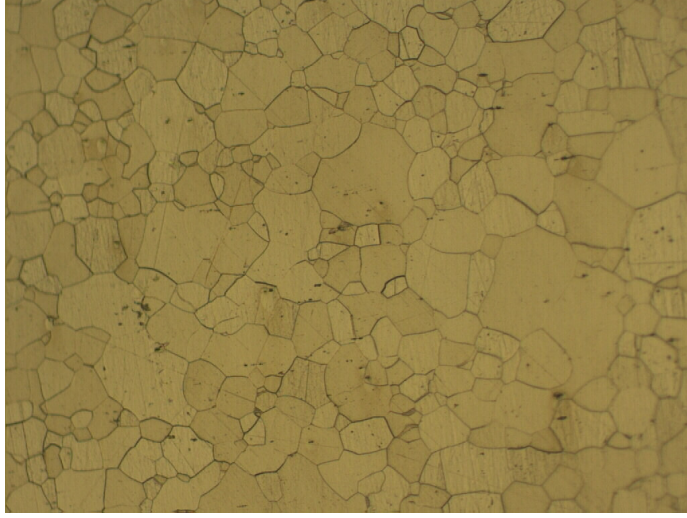
Şekil 4.40 %3 silisli tane-yönlenmiş çelikte dağılayıcı oyukları iki oryantasyon gösteriyor. Hegzagonal oyuklar küp-köşe oryantasyonu diğerleri küp-kenar. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ X1000 (ASTM Hb., Vol.9).



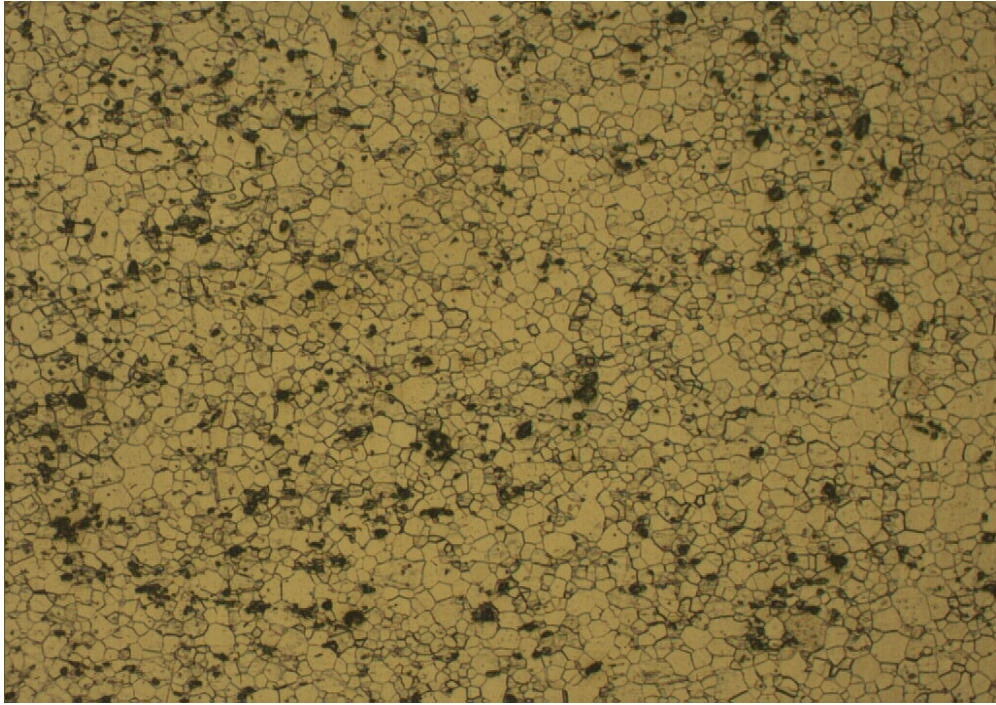
Şekil 4.41 %3 silisli tane-yönlendirilmiş çelikte termal yönlendirilmiş veya oyuklanmış ferrit tabakaları, 0,3'ten 0,1 kalınlığına soğuk haddelenmiş ve 3 saat kuru hidrojen atmosferinde 1205°C 'de tavlansmıştır. Hidrojende termal dağlama 1205°C 'de (ASTM Hb., Vol.9).



Şekil 4.42 1. numune kullanım ömrünü tamamlamış %1,52 Si içeren çelik sacın kesitinden alınan görüntü. Nital x200



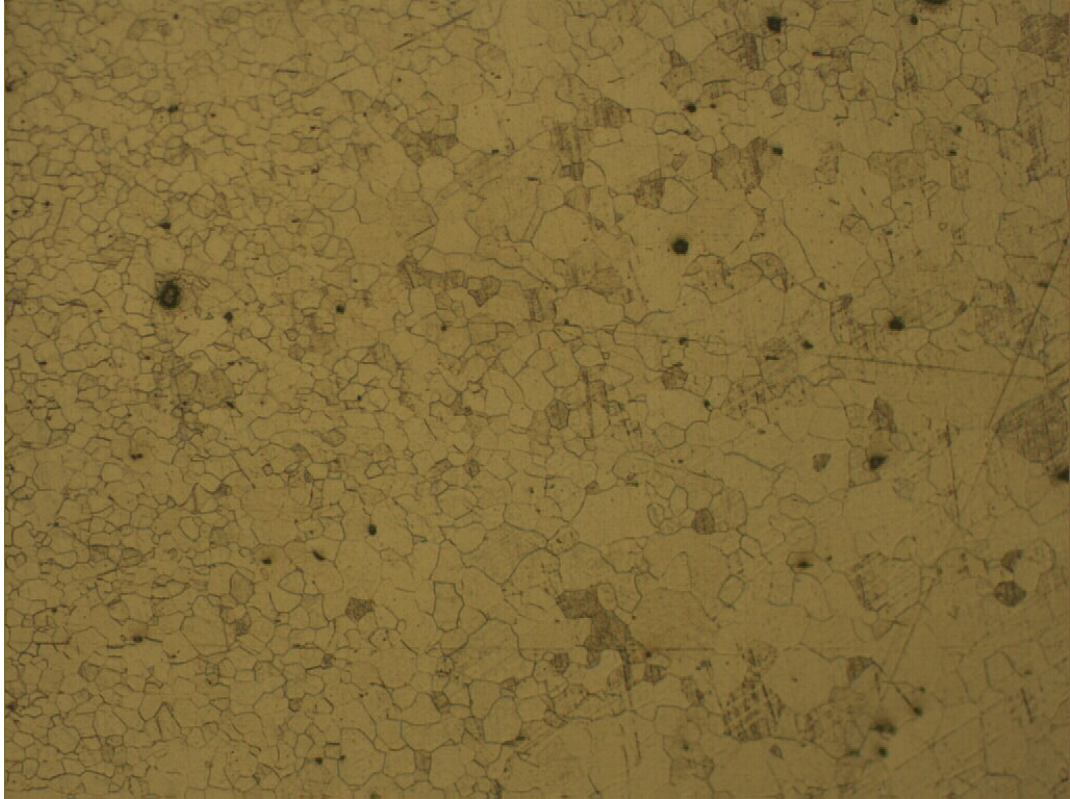
Şekil 4.43 1. numune. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,52 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital x200



Şekil 4.44 Numune 2. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,28 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital3 x200



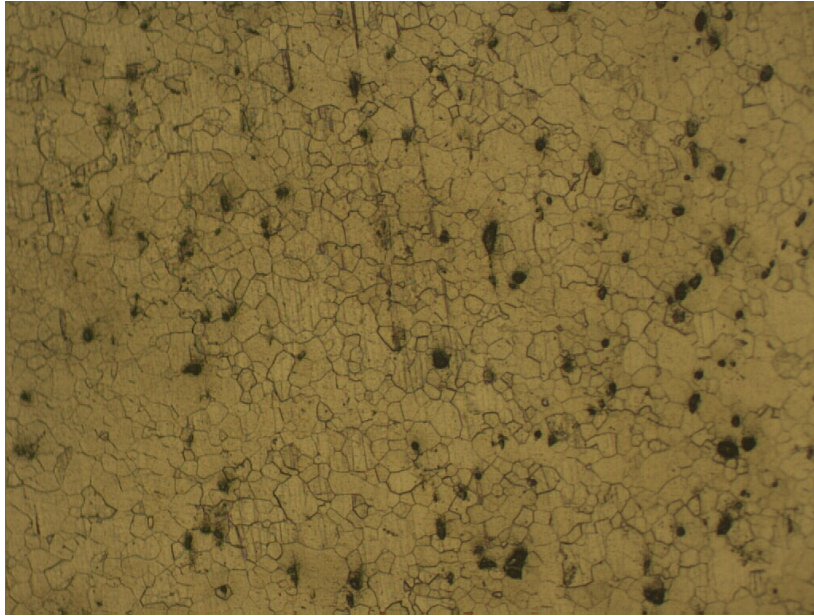
Şekil 4.45 Numune 3. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,23 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200



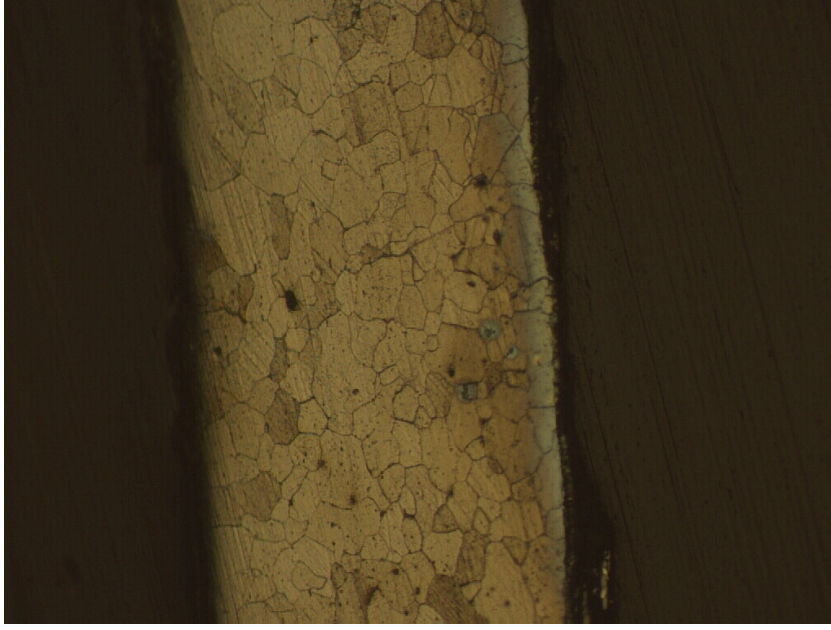
Şekil 4.46 Numune 3. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,23 Si içeren çelik sacın yüzeyden alınan görüntüsü. Nital3x200



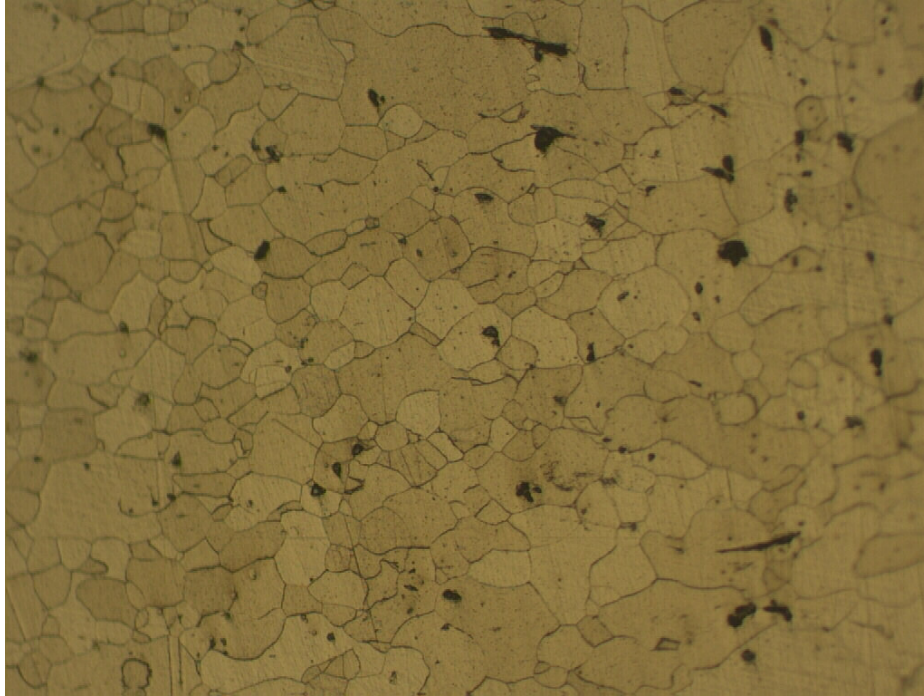
Şekil 4.47 Numune 4. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,40 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200



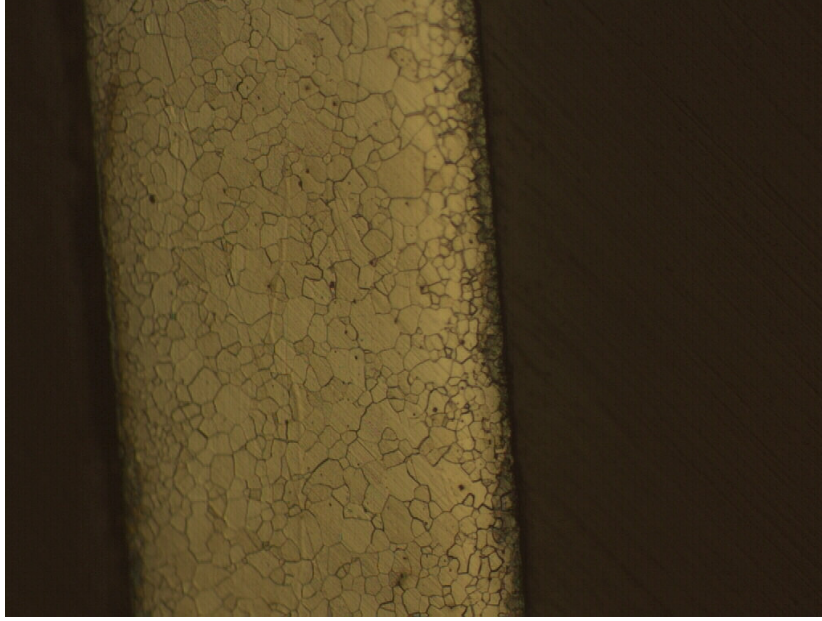
Şekil 4.48 Numune 4. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,40 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200



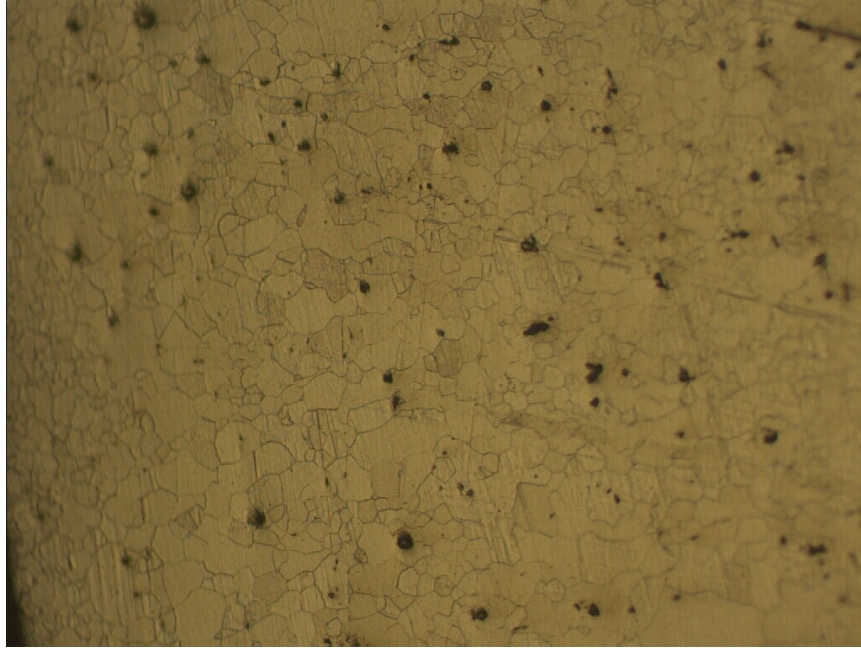
Şekil 4.49 Numune 5. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,39 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200



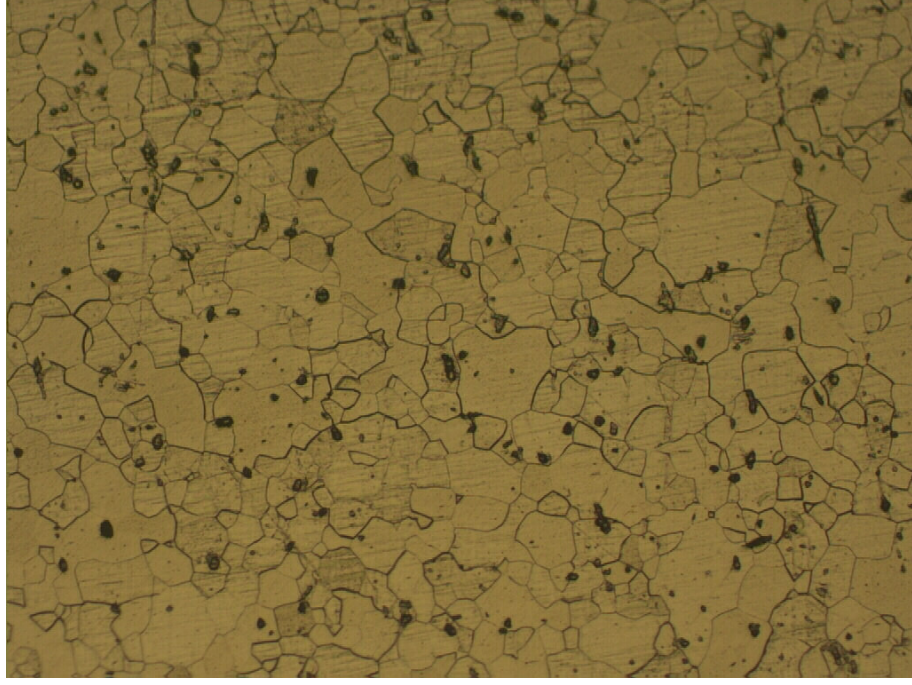
Şekil 4.50 Numune 5. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,39 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200



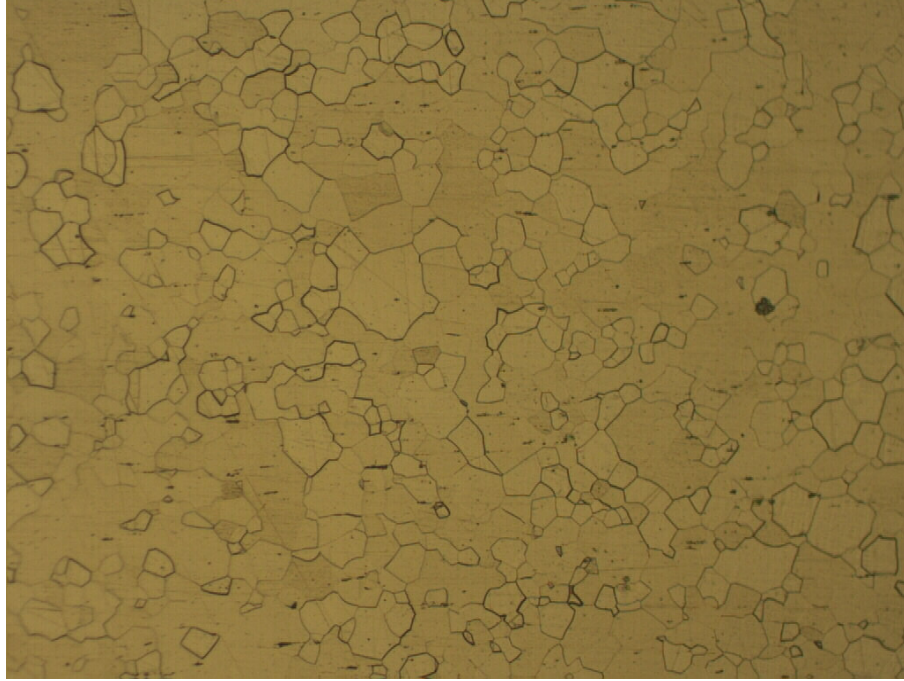
Şekil 4.51 Numune 6. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,24 Si içeren çelik sacın kesitten alınan görüntüsü. Nital3x200



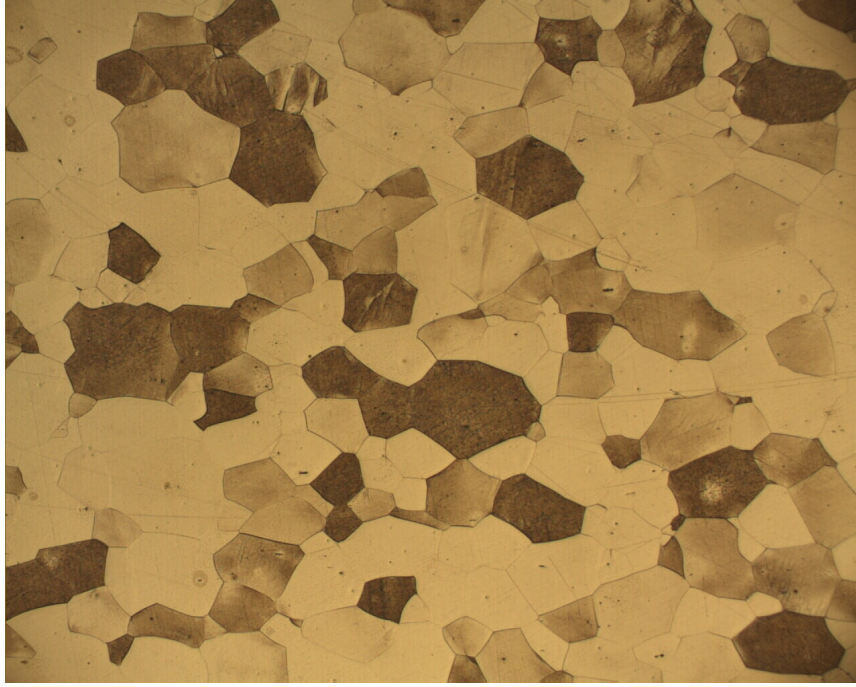
Şekil 4.52 Numune 6. Kullanım ömrünü tamamlamış %1,24 Si içeren çelik sacın yüzeyinden alınan görüntü. Nital3x200



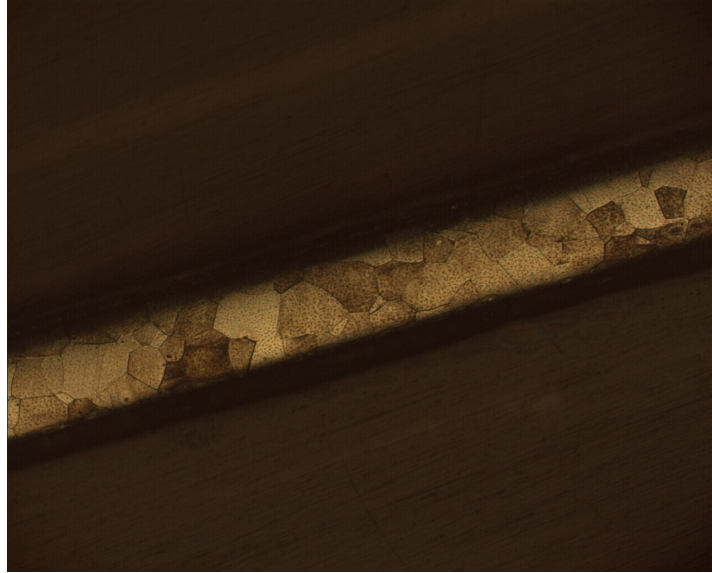
Şekil 4.53 Assan alüminyum'dan alınan M470 tipi orijinal silisli çelik. %1,13Si. Görüntü yüzeyden alınmıştır. Nital 3. x200



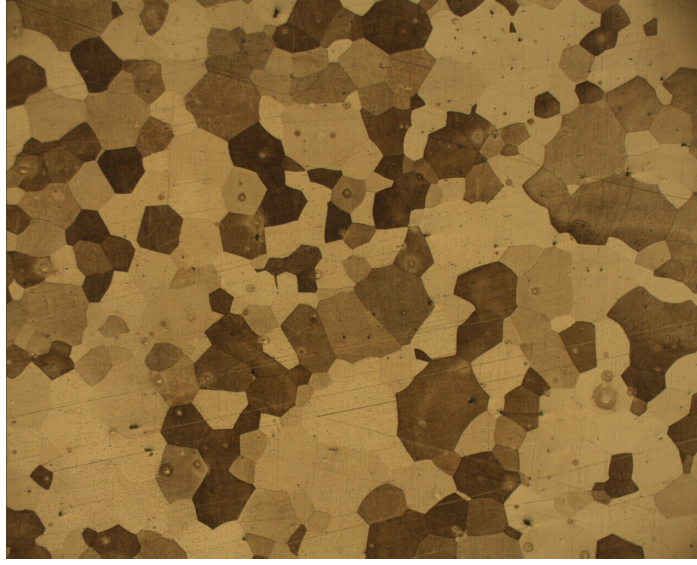
Şekil 4.54 Assan alüminyum'dan alınan M700 tipi orijinal silisli çelik. %1,27Si. Görüntü yüzeyden alınmıştır. Nital 3. x200



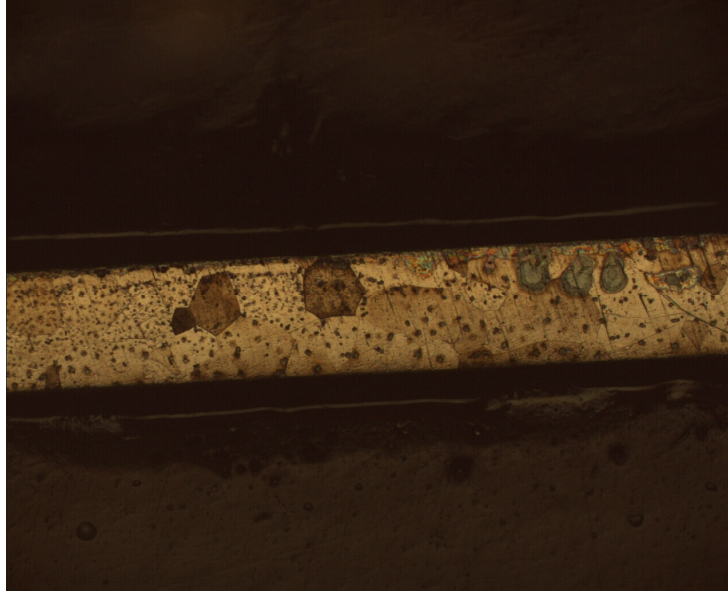
Şekil 4.55 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm’den 0,40 mm’ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.



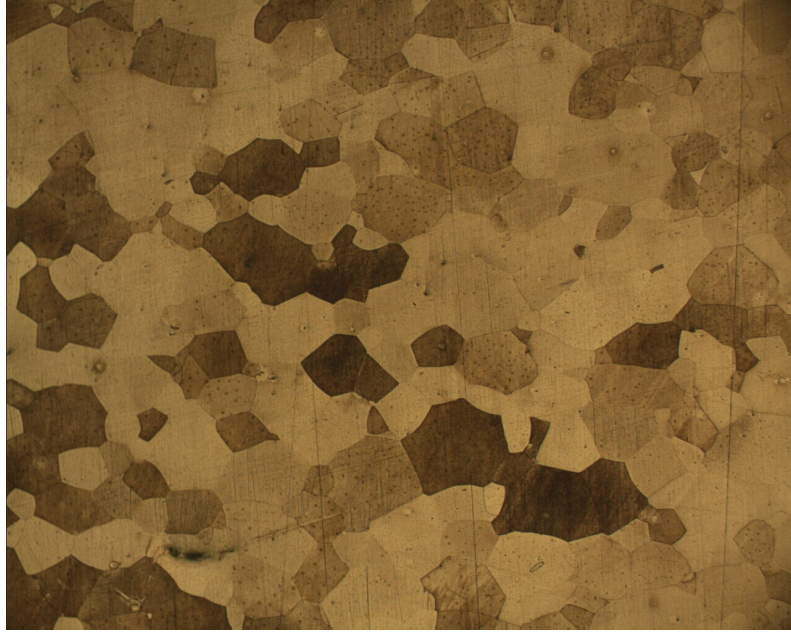
Şekil 4.56 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm’den 0,40 mm’ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.



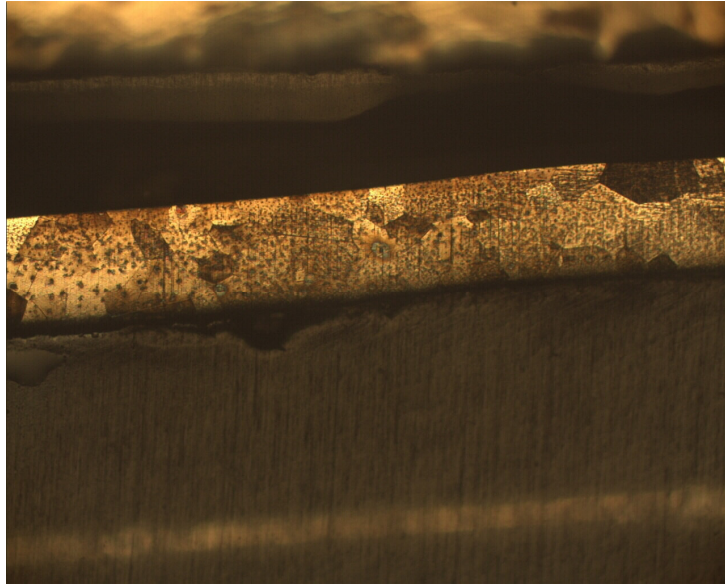
Şekil 4.57 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm'den 0,43 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.



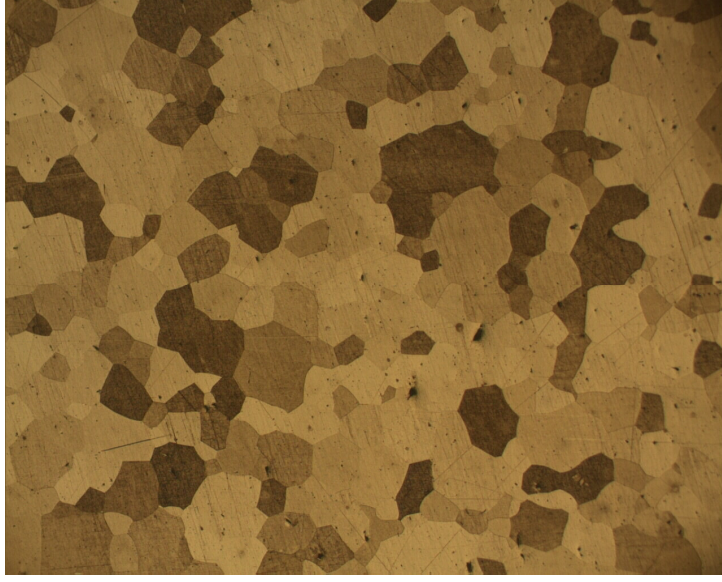
Şekil 4.58 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm'den 0,43 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.



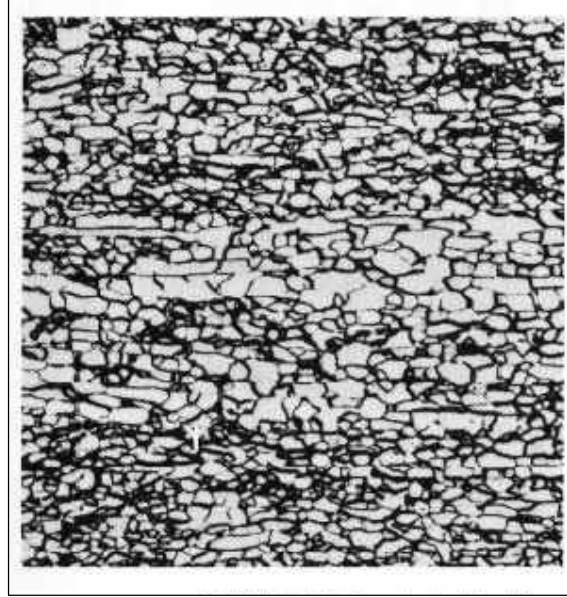
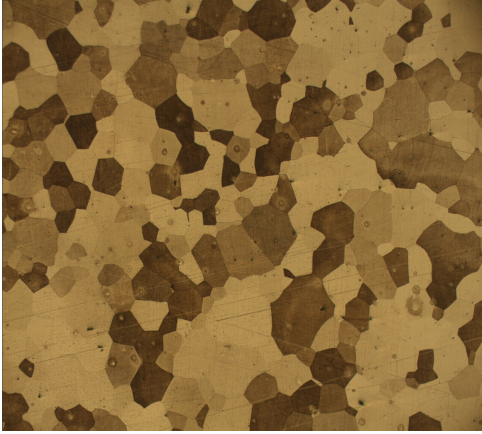
Şekil 4.59 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm'den 0,48 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.



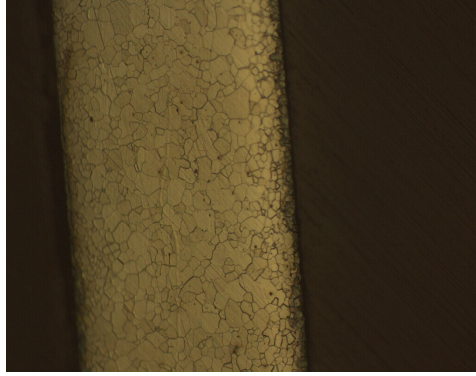
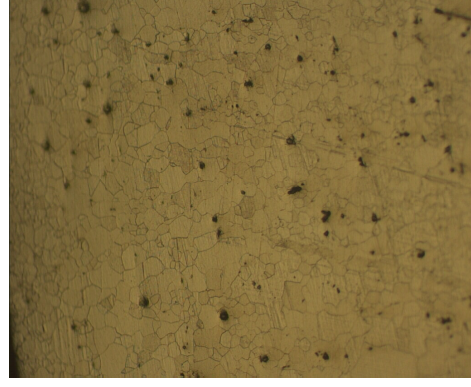
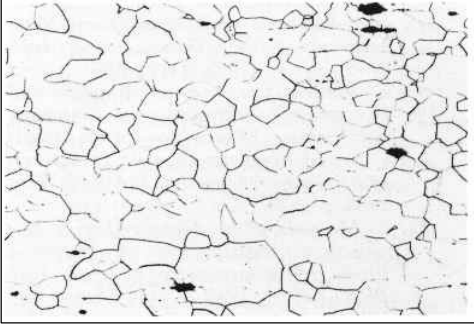
Şekil 4.60 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip elektriksel çelik. Soğuk haddeleme metoduyla 0,50 mm'den 0,48 mm'ye haddelenmiştir. Nital4 x100. Görüntü kesitten alınmıştır.



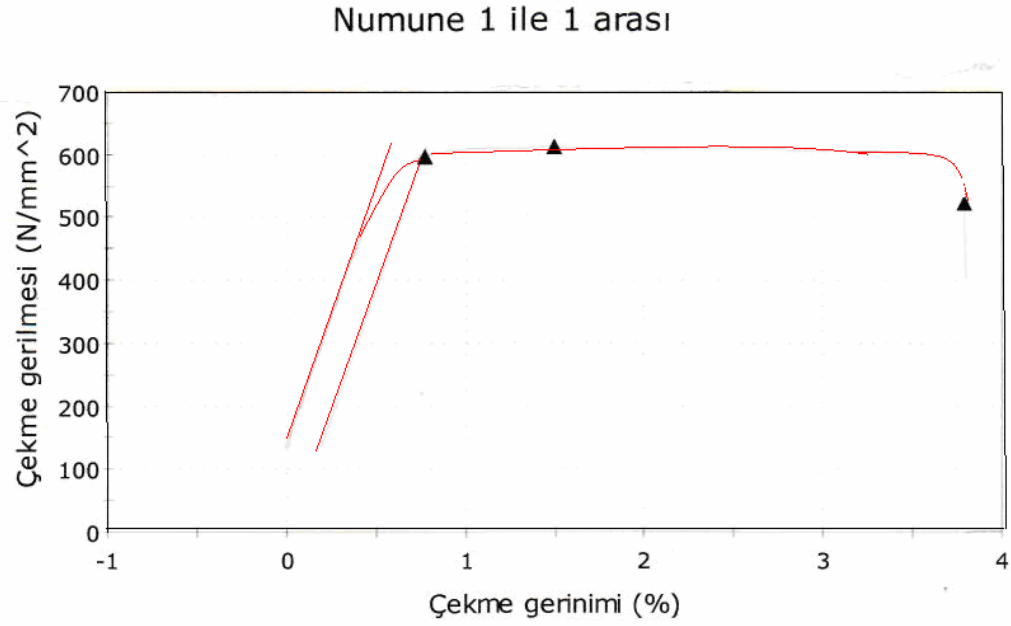
Şekil 4.61 MGE Metal'den alınan %2,84 Si içeren M400 tip orijinal elektriks el çelik. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.



Şekil 4.62 %2,5 Si'li yassı haddelenmiş (M36) elektriks el çelik. elektriks el sac %70 oranında 6 mm kalınlığa soğuk haddelenmiş 830⁰C 'de 2 dak. Tavlanmış daha ek olarak %10 daha temper haddelenmiş. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100. Birinci yapı ise %2,84 Si'li M400. %20 oranında 0,4 mm kalınlığa soğuk haddelenmiştir.



Şekil 4.63 Sırasıyla ilk şekil %1 silisli elektriksel çelik sac (M45) %70 soğuk haddelenmiş ve kalınlığı yaklaşık olarak 0,6 mm'ye düşürülmüş nemli ve dekarbürize edici ortamda 3 dak. 815⁰ 'de tavllanmış. Yapıda ferrit taneleri (ASTM Tane boyutu 6) ve siyah olanlar silikat inklüzyonları Nital. X100(2) ~%1 silisli hurda sac. %0,147C, ferrit taneleri ve inklüzyonlar, nital2, x200(3) ~%1 silisli hurda sacın kesit mikroyapısı



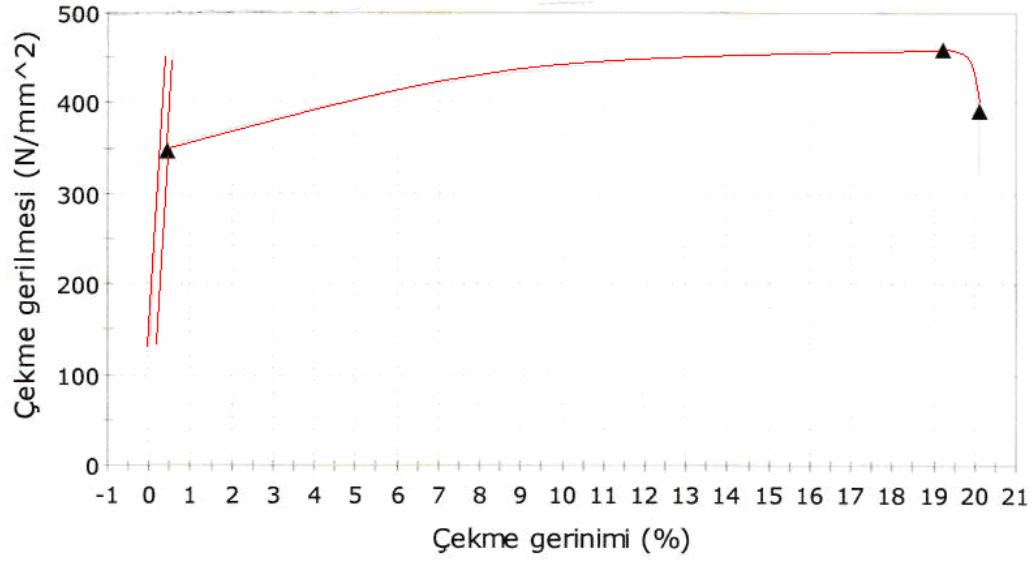
Şekil 4.64 MGE Metal’den alınan 0,43 mm’ye haddelenmiş M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,43x30mm)

Çizelge 4.4 M400 çeliğinin (0,43 mm) çekme testi sonuçları

	a0 (mm)	b0 (mm)	L0 (mm)	S0 (mm ²)	E-modülüs (N/mm ²)	Rp 0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)
1	0,4	18,73	133,00	8,05	80779,45	596,06	610,19
Ortalama	0,4	18,73	133,00	8,05	80779,45	596,06	610,19
s	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Min	0,4	18,73	133,00	8,05	80779,45	596,06	610,19
Maks	0,4	18,73	133,00	8,05	80779,45	596,06	610,19
R	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Fm (N)	Ag (%)	A (%)
1	4914,45	3,31	3,78
Ortalama	4914,45	3,31	3,78
s	-----	-----	-----
Min	4914,45	3,31	3,78
Maks	4914,45	3,31	3,78
R	0,00	0,00	0,00

Numune 1 ile 1 arası



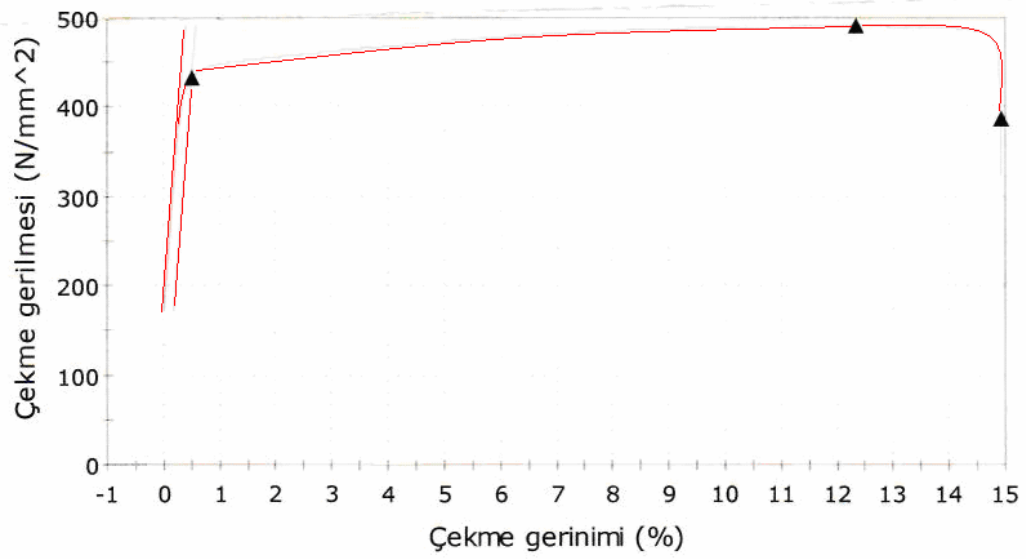
Şekil 4.65 MGE Metal’den alınan 0,50 mm orijinal M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,50x1000mm)

Çizelge 4.5 M400 çeliğinin (0,50 mm) çekme testi sonuçları

	a0 (mm)	b0 (mm)	L0 (mm)	S0 (mm ²)	E-modülüs (N/mm ²)	Rp 0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)
1	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
Ortalama	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
s	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Min	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
Maks	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
R	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Fm (N)	Ag (%)	A (%)
1	4390,60	19,78	20,09
Ortalama	4390,60	19,78	20,09
s	-----	-----	-----
Min	4390,60	19,78	20,09
Maks	4390,60	19,78	20,09
R	0,00	0,00	0,00

Numune 1 ile 1 arası



Şekil 4.66 MGE Metal’den alınan 0,48 mm M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,48x30mm)

Çizelge 4.6 M400 çeliğinin (0,48 mm) çekme testi sonuçları

	a0 (mm)	b0 (mm)	L0 (mm)	S0 (mm ²)	E-modülüs (N/mm ²)	Rp 0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)
1	0,5	18,75	139,00	9,00	80390,51	432,07	490,20
Ortalama	0,5	18,75	139,00	9,00	80390,51	432,07	490,20
S	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Min	0,5	18,75	139,00	9,00	80390,51	432,07	490,20
Maks	0,5	18,75	139,00	9,00	80390,51	432,07	490,20
R	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Fm (N)	Ag (%)	A (%)
1	4411,81	14,66	14,93
Ortalama	4411,81	14,66	14,93
S	-----	-----	-----
Min	4411,81	14,66	14,93
Maks	4411,81	14,66	14,93
R	0,00	0,00	0,00

Çekme testi sonuçları incelendiğinde açıkça görülüyor ki, deformasyon oranı arttıkça çekme mukavemeti değerlerinde oldukça belirgin artışlar görülmektedir. %uzama değerlerinde ise yine deformasyon oranı arttıkça bir azalma görülmektedir. Akma mukavemetinde ise yine artan deformasyon oranlarında belirgin artışlar görülmektedir. Örnek vermek gerekirse sırasıyla 0,50 mm, 0,48 mm, 0,43 mm kalınlıklarında, yani deformasyon oranı arttıkça, çekme mukavemeti değeri sırasıyla 459,75 N/mm², 490,20 N/mm², 610 N/mm² ‘ye kadar artmıştır.

Çizelge 4.7 Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Numune	Çekme muk. N/mm ²	Akma Muk. N/mm ²	% Uzama
0,50 mm	459,75	346,63	20,09
0,48 mm	490,20	432,07	14,93
0,43 mm	610,19	596,06	3,78

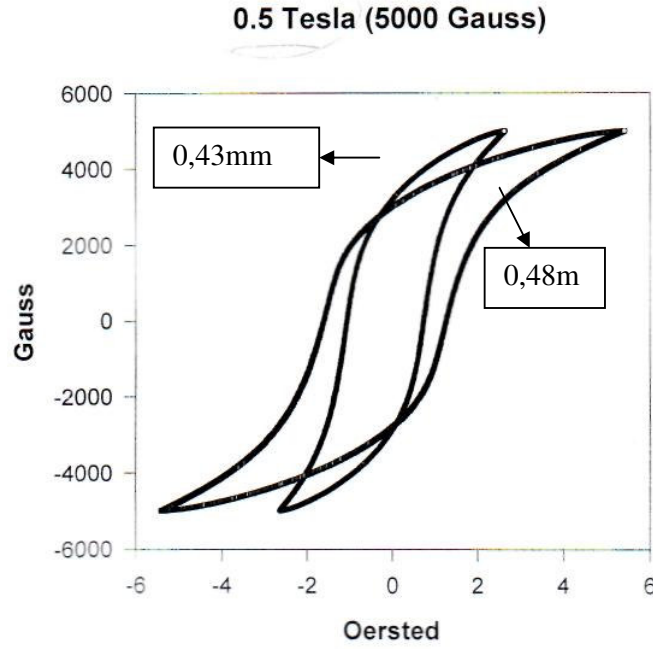
4.1 WATT KAYBI TESTİ SONUÇLARI

32 adet 2 grup elektriksel sacın 50 Hz'de 0.5, 1, 1.2 ve 1.4 Tesla'da Watt kaybı Walker LDJ Scientific. INC. AMH-25 cihazı ile test edilmiş ve sonuçları ve histerisis eğrileri aşağıda verilmiştir. Sacın yoğunluğu 7,60 gr/cm³

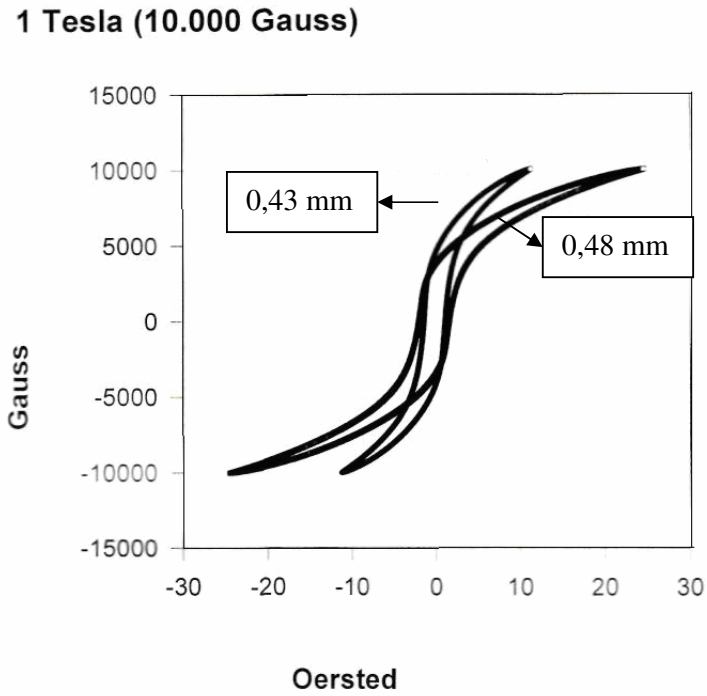
Çizelge 4.8 Watt kaybı test sonuçları

Kalınlık	Watt Kaybı (W/kg)			
	0,5 Tesla	1 Tesla	1,2 Tesla	1,4 Tesla
0,43	0,758	2,280	2,946	3,698
0,48	1,258	3,406	4,335	5,425

Manyetik akı yoğunluğu arttıkça, manyetik doyum mıknatıslanmasının artar bu yüzden de 0,5 tesladan 1,4 teslaya doğru bir artış görülür. Ayrıca tablodan da görüleceği üzere kalınlık azaldıkça watt kaybı değeri düşmüştür.

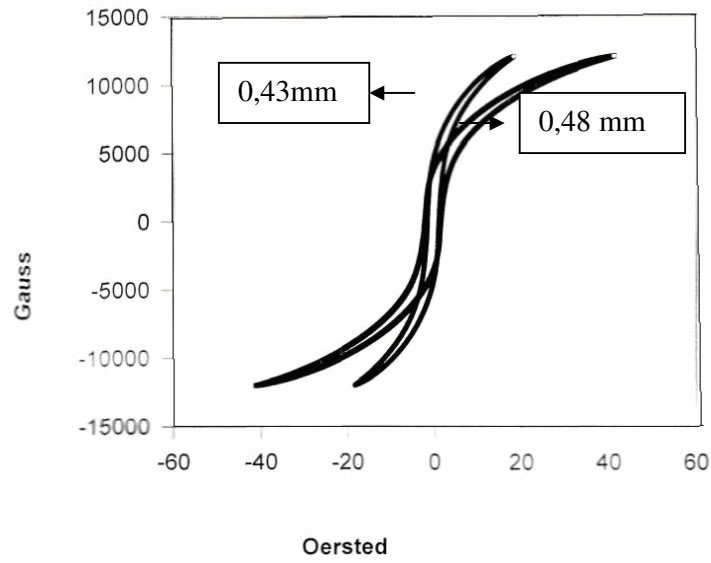


Şekil 4.67 0,5 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri



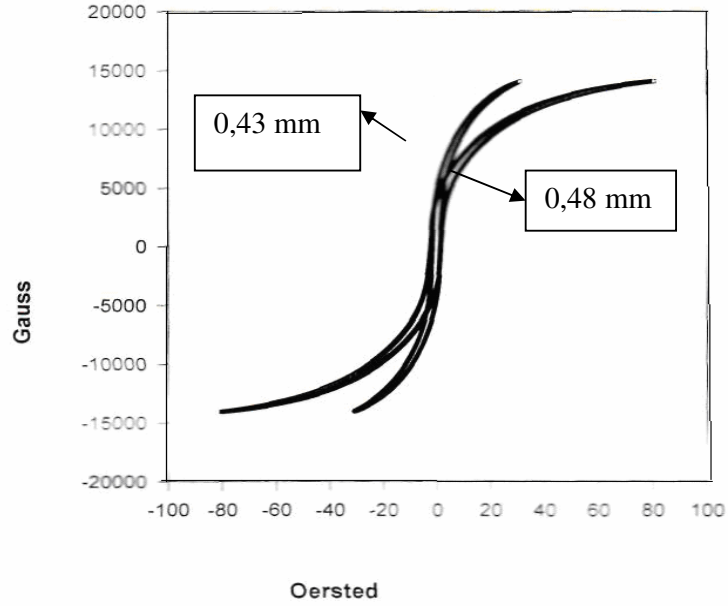
Şekil 4.68 1 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri

1.2 Tesla (12.000 Gauss)



Şekil 4.69 1,2 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri

1.4 Tesla (14.000 Gauss)



Şekil 4.70 1,4 Tesla’da yapılan watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri

Bu histerisiz eğrileri incelendiğinde 0,48 mm'lik parçadaki histerisiz kaybı bileşenin 0,43 mm kalınlığındaki parçaya göre dört farklı manyetik akı yoğunluğu değeri için daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Eğrilerdeki akı yoğunluğu arttıkça meydana gelen daralmanın nedeni doyum mıknatıslanması değerinin akı yoğunluğu ile birlikte artmasıdır.

4.2 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Soğuk haddeleme deneyi sonuçları;

1. Numuneler makaraya sarılacak kadar fazla miktarda olmadığı için sacta kıvrılmalar, katlanmalar yaşandı. Yani sac gergin bir şekilde haddeden geçirilemedi.
2. M400 tipi elektriksel çelik düşük karbon ihtiva etmesine rağmen içeriğindeki yüksek silisyum oranından dolayı (yüksek sertlikte olduğundan) homojen bir kalınlık azalması sağlanamadı.
3. Çok yüksek haddeleme basınçlarında parçanın kopması, yamulması, merdanelere yapışması, katlanması gibi durumlar gerçekleştiğinden 0,50 mm kalınlığındaki M400 elektriksel çeliği için maksimum 0,40 mm kalınlığa inilebildi yani ancak %20 oranında haddelenebildi.
4. Eğer numune için ideal olan yani dekarbürize edici, oksitlenmeyi önleyici bir ortamda ara tavlama ile parça haddelenebilseydi daha yüksek haddeleme oranlarına çıkılabilirdi.
5. M400 çeliği tam mamül olarak üreticiden alındığından yüzeyinde bulunan ve lak adı verilen izolasyon malzemesi ile birlikte haddeden geçirilmiştir. Normal şartlarda laklanmış malzemenin haddeden geçirilmesi doğru değildir. Fakat numuneler daha sonra kullanılmayacağından deneysel sonuçları etkilememiştir.
6. Deformasyon oranı arttıkça çekme mukavemeti değerlerinde oldukça belirgin artışlar görülmektedir. %Uzama değerlerinde ise yine deformasyon oranı arttıkça bir azalma görülmektedir. Akma mukavemetinde ise yine artan deformasyon oranlarında belirgin artışlar görülmektedir. Örnek vermek gerekirse sırasıyla 0,50 mm, 0,48 mm, 0,43 mm kalınlıklarında, yani deformasyon oranı arttıkça, çekme mukavemeti değeri sırasıyla $459,75 \text{ N/mm}^2$, $490,20 \text{ N/mm}^2$, 610 N/mm^2 'ye kadar artmıştır.

Watt kaybı testi sonuçları;

7. Watt kaybı testi sonucu elde edilen histerisiz eğrileri incelendiğinde 0,48 mm'lik parçadaki histerisiz kaybı bileşenin 0,43 mm kalınlığındaki parçaya göre dört farklı manyetik akı yoğunluğu değeri için daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.
8. Deney sonuçları incelendiğinde kalınlık arttıkça kayıplar artmaktadır.
9. Manyetik akı yoğunluğu arttıkça, manyetik doyum mıknatıslanmasının artar bu yüzden de 0,5 tesladan 1,4 teslaya doğru kayıplarda bir artış görülür.

Mikroyapı incelemeleri sonuçları;

10. Hurda yani kullanım ömrünü tamamlamış olan silisli çeliklerin mikro yapılarında silikat inklüzyonlarına ve dejenere olmuş fazlara fazlaca rastlanmıştır.
11. Soğuk haddelenen M400 tip silisli çeliğin mikroyapısında haddeleme izlerine çok az rastlanmıştır. Bunun muhtemel nedeni ancak %20 oranında haddelenebilmiş olmasıdır.
12. M400 tipi silisli çeliğin mikroyapısında hurda olan silisli çeliklere nazaran daha az oranlarda silikat inklüzyonlarına rastlanmıştır.
13. Mikroyapılarda baskın yapı ferrit ve silikat inklüzyonlarıdır.

KAYNAKLAR

ASTM Handbook, (1989), Magnetic And Electrical Materials, Metallographic Techniques And Microstructures, Vol.9, Chapter 3 ,542-545.

ASTM Handbook, Magnetic And Electrical Materials, Special Purpose Materials, Vol.2, Chapter 2, s.766-768.

Değirmenci, H., (1996), Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler ve Nedenleri ile Bunların Şekillendirme Prosesi Üzerindeki Etkileri, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dupre´ L., Pulnikov A.ve Melkebeek J., (2004), “ 2D magnetization of grain-oriented 3%-Si steel underuniaxial stress”, 1-4.

EASA/AEMT Rewind Study, (2003), The Effect Of Repair/Rewinding On Motor Efficiency, Missouri Usa And York, England UK, 64-72.

GENÇ, A., (2007), Yüksek Silisyumlu Çeliklerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Lisans Tezi, YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi.

Krueger M., Pawelski H.ve Sudau P., (2003), “Cold Rolling of Grain-Oriented Silicon Steel” Sms Demag Ag, 1-2.

Nicolau A.C., Marcos F.C. ve Fernando J.G., (2006), “Effect of Deformation And Annealing On The Microstructure And Magnetic Properties Of Grain-Oriented Electrical Steels”, 1-3.

Marşoğlu M., (2006), “Elektriksel ve Manyetik Malzemeler”,YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Sezer E., (2006), Transformatör Çekirdeklerinde Kullanılan Elektrik Çelikleri ve Amorf Şeritlerin Uç Uca Gelen Birleşim Yerlerindeki Manyetik Akı Dağılımının Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi, Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tacer E., (2005), “Elektromekanik Enerji Dönüşümü”, İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi, İstanbul.

Taşkıran İ.A., (2003), Alaşımsız Düşük Karbonlu Çelikten Soğuk Haddeli Sacların Kalitesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.09.1984	
Doğum yeri	Bursa	
Lise	1998-2002	Y.D.A Nuri Erbak Lisesi
Lisans	2002-2006	Yıldız Üniversitesi Kimya- Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Müh.,Üretim Anabilim Dalı