

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN TERMOMEKANİK HADDELEME YOLU İLE
ÜRETİLMESİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİ**

SİNEM YILDIRIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SİBEL DAĞLILAR**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN TERMOMEKANİK HADDELEME YOLU İLE
ÜRETİLMESİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİ**

SİNEM YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması .././.... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Faik Nüzhet OKTAR

Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma ile otomotiv sektöründe kullanılan yeni nesil çeliklerin önemi vurgulanmış, üretim teknolojisi ve proses parametrelerinin bu çelikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma boyunca desteğini, ilgisini ve sevgisini eksiksiz hissettiren sevgili danışmanım Prof. Dr. Sibel Dağlılar'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Labaratuvar çalışmalarındaki desteğinden dolayı İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. ve değerli yöneticilerime, iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca aldığım en büyük sevgi ve desteğin kaynağı sevgili aileme teşekkür ederim.

Temmuz, 2015

Sinem YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2.....	4
ÇİFT FAZLI ÇELİKLER	4
2.1 Otomotiv Sektörüne Genel Bakış.....	4
2.2 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Çelikler.....	6
2.3 Çift Fazlı Çeliklerin Özellikleri	9
2.4 Çift Fazlı Çeliklerin Üretimi.....	9
2.4.1 Slab Isıtma	10
2.4.2 Kaba Hadde.....	11
2.4.3 Serit Hadde	12
2.4.4 Duşlu Masa (Run Out Table)	14
2.4.5 Bobin Sarma Ve Bobin Soğutma	18
2.5 Çift Fazlı Çeliklerde Faz Oluşumu ve Mikroyapı	18
2.5.1 Östenit Oluşumu ve Büyümesi	19

2.5.2	Ferrit Oluşumu	20
2.5.3	Kalıntı Östenit Oluşumu	21
2.5.4	Martenzit Oluşumu	21
2.6	Çift Fazlı Çeliklerde Mekanik ve Kimyasal Özellikler	22
2.6.1	Akma Mukavemeti	23
2.6.2	Çekme Mukavemeti	24
2.6.3	Süneklik	26
2.6.4	Kimyasal Bileşim	27
BÖLÜM 3		29
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		29
3.1	Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar	29
3.2	Deneylerin Yapılışı	33
3.2.1	Haddeleme ve Haddehane Parametreleri	33
3.2.2	Duşlu Masada Gerçekleştirilen Isıl İşlem	34
3.2.3	Deney Numunelerinin Alınması ve Hazırlanması	35
3.2.4	İç Yapı İncelemesi	36
BÖLÜM 4		38
DENEY SONUÇLARI		38
4.1	Kimyasal Bileşim	38
4.2	Bobin Sarma Sıcaklıklarının Ölçülmesi	39
4.3	Çekme Testi Sonuçları ve Bobin Sarım Sıcaklığı Arasındaki İlişki	40
4.4	Mikroyapı Görüntüleri ve Bobin Sarım Sıcaklığı Arasındaki İlişki	44
BÖLÜM 5		49
DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER		49
KAYNAKLAR		52
ÖZGEÇMİŞ		56

SİMGE LİSTESİ

°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
mm	Milimetre
Kg	Kilogram
P	Basınç
S	Saniye
MPa	Megapaskal
t _R	Haddeleme süresi
V _R	Soğuma Hızı
t _{RN}	Ara bölge bekleme süresi
F	Hadde standı
MnE	Mangan eşdeğeri
CR	Kritik soğuma
Ms	Martenzit başalama sıcaklığı
Mf	Martenzit bitiş sıcaklığı

KISALTMA LİSTESİ

DP	Dual phase (çift faz)
MHO	Martenzit hacim oranı
IF	Interstitial free
CP	Kompleks çelikleri
TRIP	Transformation induced plasticity
MART	Martenzitik çelikler
HSLA	High strength low alloy
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
EPA	Environmental Protection Agency

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Çeşitli marka otomobillerin yıllar içinde değişen ağırlıkları [1]	5
Şekil 2. 2 Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik türlerinin dönemsel gelişimi [7]	5
Şekil 2. 3 Çelik kalitesine bağlı olarak kullanılan malzemenin kalınlık – malzeme tasarrufu ilişkisi [7].....	6
Şekil 2. 4 Çift fazlı çelik kullanılarak üretilmiş çeşitli otomobil parçaları [45].....	7
Şekil 2. 5 Otomobil dizaynında farklı projelerde kullanılan HSLA çeliklerin oranı [8]	8
Şekil 2. 6 Çeliklerin mukavemet özelliklerine göre uzama miktarlarındaki değişim [1] ...	8
Şekil 2. 7 Çift fazlı çelik üretim prosesinin şematik görüntüsü [23].....	10
Şekil 2. 8 Östenit tane boyutu ile yapıdaki mikroalaşım elementi ve sıcaklık arasındaki ilişkisi [11]	11
Şekil 2. 9 Sıcak Hadehane Metalurjik Prosesi [11]	12
Şekil 2. 10 Sıcak Hadehane Metalurjik Prosesi [11]	13
Şekil 2. 11 Bobin soğutma rejiminin şematik gösterimi [13]	15
Şekil 2. 12 Çift fazlı çeliklere ait termomekanik haddeleme ve mikroyapısı arasındaki ilişki [22]	16
Şekil 2. 13 Sıcak haddehane, soğutma sistemi ve sıcaklık ölçerlerin şematik resmi[13]	16
Şekil 2. 14 Akma dayanımı ile mikro alaşım elementi ilişkisi [11].....	18
Şekil 2. 15 Kritik sıcaklıklar arasında östenit çekirdeklenmesi[20]	19
Şekil 2. 16 MHO'nın tavlama ve sıcaklığı yapıdaki karbon oranına bağlı değişimi [11]..	22
Şekil 2. 17 Fe – Fe ₃ C denge diyagramı.....	23
Şekil 2. 18 Martenzit hacim oranlarının çekme mukavemeti ile ilişkisi [17]	25
Şekil 2. 19 Martenzit hacim oranının gerilim-gerinim eğrileri üzerine etkisi [2]	26

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 3mm kalınlığındaki DP 600 kalite haddeleme koşulları[11]	13
Çizelge 3. 2 Isıl işlem sıcaklık parametreleri	34
Çizelge 3. 3 Çekme test numunesi ölçüleri	36

**ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN TERMOMEKANİK HADDELEME YOLU İLE
ÜRETİLMESİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİ**

Sinem YILDIRIM

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Otomotiv endüstrisindeki yakıt tasarrufu üzerine yapılan çalışmalar malzeme teknolojisinin gelişmesini zorunlu hale getirmiş ve devamında yüksek dayanımlı düşük alaşımlı, ticari olarak kullanılabilir çift fazlı çelikler geliştirilmiştir. Bu çelikler, araçta kullanılan parçalarda herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın, parça kalınlıklarının azaltılması ile ağırlık azaltılmasını sağlamaktadır.

Ülkemizdeki yerli çelik üreticileri için sıcak haddelenmiş çift fazlı çelik üretimi kısa bir geçmişe sahiptir. Özellikle otomobil jantı üretiminde kullanılan ve nihai ürün olarak ihraç edilen sıcak haddelenmiş yassı mamul halindeki çift fazlı çelikler geniş kullanım alanı ve yüksek katma değeri ile günümüz otomotiv üreticileri için vazgeçilemez bir malzeme haline gelmiştir.

Bu çalışmada termomekanik haddeleme yöntemi ile DP600 kalite çift fazlı çelik üretimi hedeflenmiş ve proses parametrelerinin faz oluşumuna ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sıcak haddehanede termomekanik haddeleme yöntemi ile üretimden bir bobin farklı sarılma sıcaklıklarına tabi tutularak, bobin sarma sıcaklığının etkileri gözlenmiştir. Yapılan deneylerde farklı sarım sıcaklığına sahip, dolayısıyla farklı ısıtım parametreleri ile haddelenen malzemelerin faz oranları ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin ışığında bobin sarım sıcaklığının, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, uzama değeri, malzemenin mikroyapısındaki faz dağılımı ve martenzit hacim oranı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift faz, termomekanik Haddeleme, bobin sarım sıcaklığı, DP600, martenzit hacim oranı

ABSTRACT

EFFECTS OF PRODUCTION PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOMECHANICALLY ROLLED DUAL PHASE STEEL

Sinem YILDIRIM

Metalurgy and Meterial Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Sibel Dağlılar

Low alloyed multi-phase steels are subject to extensive research efforts especially with regard to automotive applications due to their attractive combinations of mechanical properties. For the automotive/heavy transportation industry, these steels are primarily used for underbody components, which require good press formability and ductility as well as acceptable surface appearance despite in most cases being hidden away. In addition to developing steels that satisfy customer requirements, the additional challenge facing strip steel producers of today is in the production of a hot rolled coil with optimum mechanical properties that satisfy the demands of the final application (i.e. fitness for purpose), whilst causing minimal disruption to rolling practices or increasing costs.

In this study, effect of rolling and coiling temperature in thermo mechanical controlled process (TMCP), on the microstructure and mechanical properties of dual phase (DP) steel according to martenzite volume fraction (MVF) rate was investigated. By using various finishing mill exit temperature and cooling conditions that is controlled laminar cooling system, the microstructural evolution of coil improves the mechanical properties with lower costs and higher productivity, in comparison to the heat treatment after rolling. The main part of the paper contains the result of tensile, yield and microstructure properties of DP600 steel produced on hot strip rolling plant and run- out table line. The results show that a higher MVF and an increasing cooling rate after the last deformation raised strength of the DP600 steel. The yield strength and ultimate tensile strength increase by decreasing coiling temperature.

Keywords: Dual phase steel, finishing rolling cooling rate, coiling temperature, laminar cooling system

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Çift fazlı çelikler otomotiv sektörünün en büyük bileşenlerinden olan petrol kaynaklarının hızla tükenmesi, küresel rekabet ve enerji bilinci, sektörün yeni nesil malzemelere yönelmesinin bir sonucu olarak geliştirilmiştir. Sektör, yakıt sarfiyatını ve egzoz gazı emisyonunu azaltmak amacıyla otomobillerin mevcut özelliklerini koruyacak ve hatta daha da geliştirecek araç hafifletme projelerine yönelmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte, güvenlik ve hafifliğin ön planda olduğu araçların dizaynında önemli yollar katedilmiştir. Bu çalışmalar sektördeki Ar-Ge faaliyetlerini yüksek mukavemetli, kolay şekil alabilir çeliklere yöneltmiştir.

Otomotiv endüstrisindeki yakıt tasarrufu üzerine yapılan çalışmalarla geliştirilen bu çelikler, araçta kullanılan parçalarda herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın, parça kalınlıklarının azaltılması ile ağırlık azaltılmasını sağlamaktadır. Böylece yeni nesil araçlar yakıt tasarrufu ve düşük CO₂ salınımıyla hayatımıza girmektedir. Bu çelikler ayrıca enmiyetin de çok önemli olduğu otomotiv sektöründe araç gövdesinde kazalar neticesinde oluşabilecek hasarları en iyi şekilde karşılayabilme özelliğine sahiptirler. [1-41]

Çift fazlı çelikler bileşim bakımından sade karbonlu çeliklere benzer. Çift fazlı mikroyapı, uygulanan ısıtma işlemleriyle elde edilir. [3] Çift fazlı çelikler sünek ve küçük taneli ferrit matriste % 10–30 arasında sert martenzit parçacıkları ile beraber az miktarlarda kalıntı ostenit ve beynit fazlarını içermektedir. Çift fazlı çelikler üstün

özelliklerini; martenzitin yüksek mukavemetinden ve ferritin iyi sünek yapısından almaktadır. [2]

Çift-fazlı çelikler, HSLA (High Strnegh Low Alloy / Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşım) çelikler ile kıyaslandığında; yüksek pekleşme oranı, sürekli akma davranışı, düşük akma dayanımı, yüksek uzama oranı, benzer veya daha yüksek dayanım, yüksek yorulma dayanımı, korozyon direnci gibi arzu edilen özellikler göstermektedirler. [41] Bu özellikler ile çift-fazlı çelikler; kolay şekillendirme, şekillendirme sonrası daha da yüksek dayanım, daha az malzeme kullanımı ile taşıt ağırlığının azaltılması gibi çok değerli ekonomik ve teknolojik yararlar sağlamaktadır.[4]

Bu tür çelikler yapılarında yeteri miktarda alaşım elementi bulunmadığından, normal koşullarda su verme prosesiyle beklenen dayanım ve sertliğe ulaşamazlar. Bu sebeple belirli sıcaklıklar arasında tutulup, ardından özel bir soğutma rejimi uygulanarak ferrit ve östenitten oluşan yapının % 10-30 oranında martenzit içeren bir yapıya dönüşmesi sağlanır. Bu tür çeliklerin ticari üretiminde, özet olarak proses; uygun analizdeki karbon çeliğinden dökülmüş slabın slab ısıtma fırınlarında yaklaşık 1200 °C'ye ısıtılması, sıcak haddehanede istenilen kalınlığa kadar haddelenmesi ve hadde çıkışı sıcaklığı 760 – 900 °C olan bobinin uygun soğutma rejimi ile ısıl işlem pratiğinin uygulanmasından oluşur.[11]

Çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktör soğuma rejimi yani ısıl işlemdir. Isıl işlem ile çelikten beklenen ferrit-martenzit ana yapısı oluşur. Çelik, yapıdaki martenzit fazından dolayı mukavim, martensiz etrağındaki dislokasyonlar sayesinde iyi şekillendirilebilir ve içyapının yaklaşık % 80 ini oluşturan ferrit fazı sayesinde sünek özellik gösterir. [16]

1.2 Tezin Amacı

Otomotiv endüstrisinde yaşanan gelişmelere bakacak olursak, son yıllarda iki ana faktör üzerinde yoğunlaşıldığı görölmektedir. Artan küresel rekabet ve enerji bilinci, otomotivde enerji tasarrufunu kaçınılmaz kılmıştır. [1]

Bu yaklaşım temel alındığında; otomobillerin ağırlığı, üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Bu çalışmada İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. fabrikalarında

deneme üretimleri yapılan çift fazlı çeliklerin haddeleme parametreleri incelenmiş, bu parametrelerin mekanik özelliklere etkisi belirlenmiştir.

1.3 Hipotez

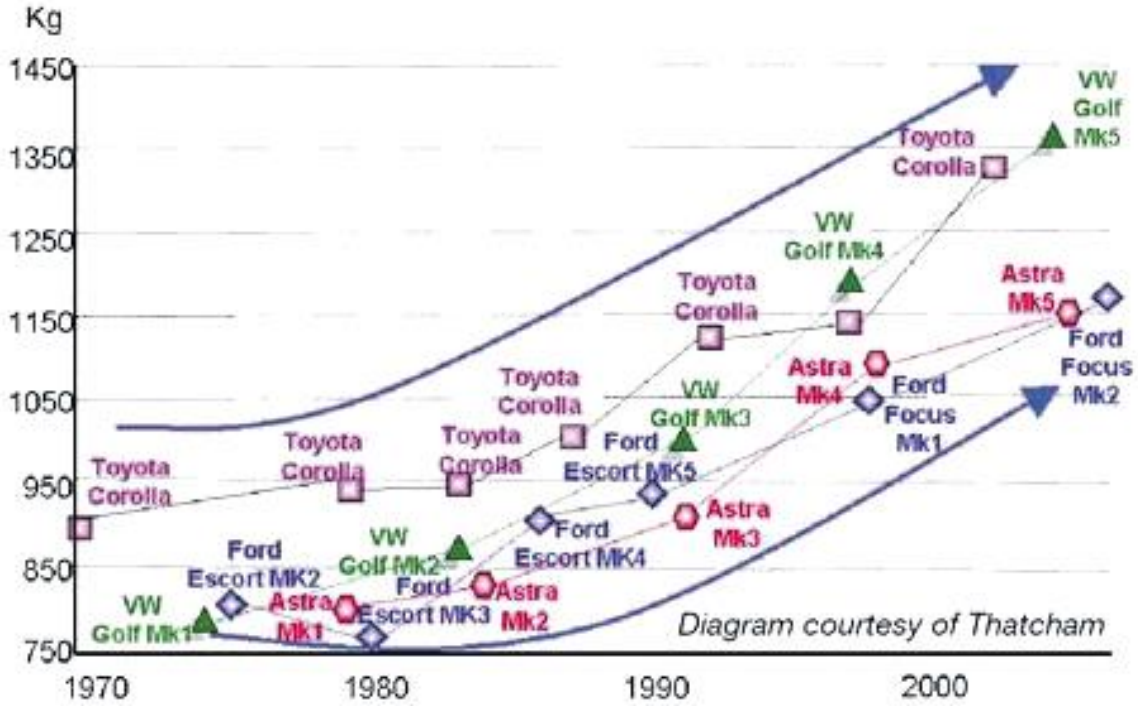
Çift fazlı çelik üretiminde temel noktanın ısıtım işlem parametreleri olduğu düşünülmüş, bu sebeple çeşitli parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çift fazın sağlanması için martenzit dönüşümüne izin verecek bir soğuma rejiminin olması gerektiği düşünülmüştür. Fazın oranı ise yine dönüşüm oranında gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Soğumanın kontrolü için duşlu masa pratiğinin önemi bilindiğinden ürün faz dönüşümüne izin verecek şekilde kademeli olarak soğutulmuştur.

BÖLÜM 2

ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

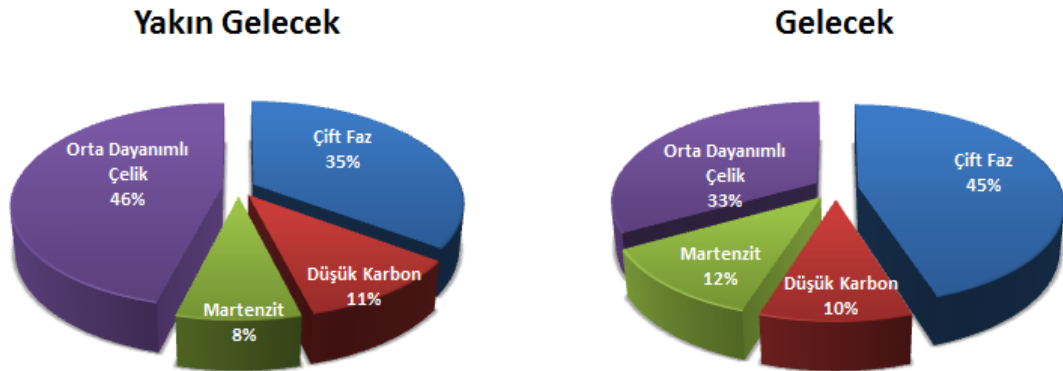
2.1 Otomotiv Sektörüne Genel Bakış

Gelişen teknoloji, tasarım ve artan ihtiyaçlara paralel olarak konfor ve güvenliği öne çıkaran yeni sistemler otomobillere eklenmiş, böylece otomobillerin ağırlığında zamanla bir artış olmuştur. Şekil 2.1'de yıllar itibariyle çeşitli modellerdeki otomobillerin ağırlıklarındaki artış grafik olarak verilmiştir.[6] 1970 'li yıllardan günümüze kadar olan süreçte yaklaşık 900 kg olan taşıt ağırlığı 1300 kg seviyelerine çıkmış durumdadır. [1-6]



Şekil 2. 1 Çeşitli marka otomobillerin yıllar içinde değişen ağırlıkları [1]

Otomotiv sektöründeki en önemli hedeflerden biri taşıt güvenliği olduğunda çelik gibi yüksek mukavemetli ve ağırlıkça fazla malzemeler kullanılmaktadır. Amerikan demir ve çelik enstitüsünün yaptığı bir araştırmada otomobilde kullanılan malzeme türleri ile kazalardan korunma arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Buna göre çelik yapılar ile üretilen bir otomobilde kazalardan korunma oranı %90 iken, bu oran alüminyum, plastik ve fiberglass malzemelerde % 3 e kadar düşmektedir. Bir otomobildeki malzemelerden yaklaşık %25 inin çelikten oluştuğu düşünülürse, kullanılan çeliğin dayanımının arttırılarak miktarının azaltılması ana hedeflerdendir. Bu nedenle her geçen yıl kullanılan çelik kalitelerinde iyileştirmeler yapılmaktadır. Şekil 2.2’de otomotiv endüstrisinde kullanılan bazı çelik türlerinin gelişimi gösterilmektedir.[1] Yakın gelecekte ise çift fazlı çeliklerin taşıtlarda kullanım miktarının % 45’lere kadar artacağı öngörülmektedir.

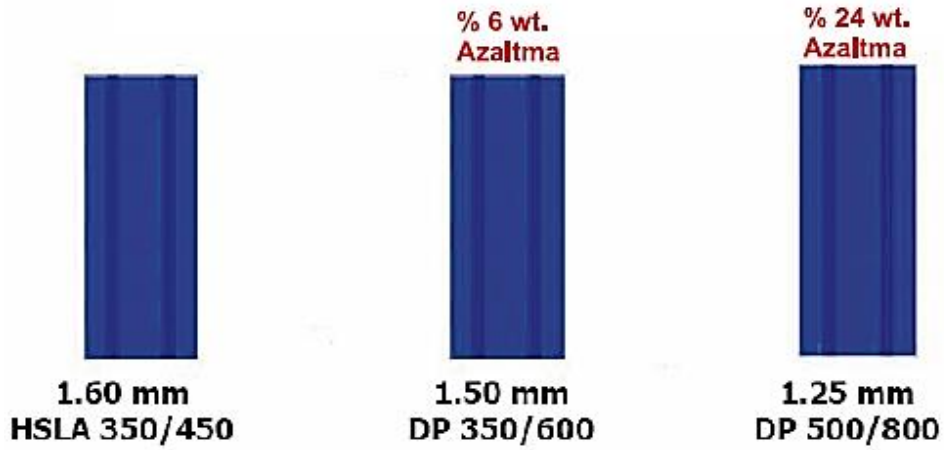


Şekil 2. 2 Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik türlerinin dönemsel gelişimi [7]

CAFE (Corporate Average Fuel Economy) ve EPA (Environmental Protection Agency) kuruluşları otomobil, hafif ticari ve ağır vasıta araçların ağırlık ve CO₂ emisyonlarının düzenlenmesi için 2025 yılına kadar gerçekleştirilmesi gereken standartları belirlemişlerdir. Araç türlerine göre farklılık göstermekle birlikte tahmini olarak hafif ticari araçlarda 2014-2018 yılları arasında % 1,7, 2018 – 2021 yılları arasında % 11,4 ve 2021-2025 yılları arasında % 13,5 ağırlık tasarrufu hedeflenmektedir. Bu hedefler kapsamında ABD’de litre yakıt başına katedilen mesafenin 2025 yılında mevcut durumun 2 katından fazlasına çıkması gerekmektedir. Avrupa Komisyonu ise her

gram CO₂ emisyonu artışı için 2020 yılı sonrasında 95€/g ceza uygulayacaktır. Günümüzde kullanılan çeliklerle 2021 yılına kadar hedeflenen ağırlık tasarrufunu yapmak için yeni araçlar dizeyn edilmeyi veya kullanılan çelik türlerini hafifletmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır.[44]

1.400 kg ağırlığındaki bir taşıtın ağırlığı, hafif malzemeler kullanılarak 1.100 kg' a düşürüldüğünde taşıtın ömrü boyunca harcadığı yakıtta 3.000 lt tasarruf edilebilmektedir. Ayrıca taşıtın ömrü boyunca çevreye bıraktığı CO₂ miktarında da 2.800 kg'lık azalma sağlamak mümkün olabilmektedir.[6] Şekil 2.3'te taşıtlarda kullanılan malzemenin kalınlığının azaltılması durumunda, taşıtın toplam ağırlığında meydana gelecek değişim görülmektedir. [7] Ülkemizde AB direktifleri doğrultusunda yeni araçların CO₂ emisyonu, 2012 yılında ortalama kilometrede 160 gramdan 130 grama düşürülmüş ve bu gelişme ile birlikte Kyoto Protokolünün öngördüğü kilometrede 120 gram hedefine yaklaşılmıştır. [9]



Şekil 2. 3 Çelik kalitesine bağlı olarak kullanılan malzemenin kalınlık – malzeme tasarrufu ilişkisi [7]

2.2 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Çelikler

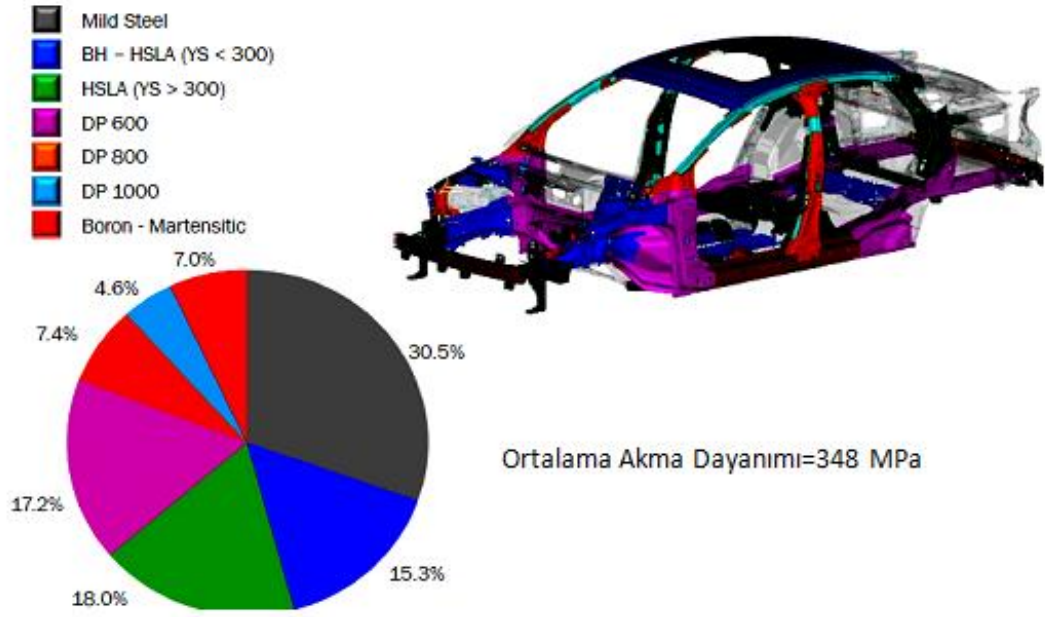
HSLA çeliklerinin şekillendirilebilme kabiliyetlerinin düşük olması nedeniyle 1975 yılı sonlarına doğru çift fazlı çelikler otomobil endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek mukavemet ve yüksek sünekliğin bir arada olması bu çeliklerin tekerlek jantı, koltuk çerçevesi, tampon, kapı panelleri gibi presle biçimlendirilebilen çeşitli otomobil

parçalarının yapımında kullanılmasını mümkün kılmaktadır. [2] Şekil 2.4'te çift fazlı çelik kullanılarak üretilen çeşitli otomotiv parçaları yer almaktadır.



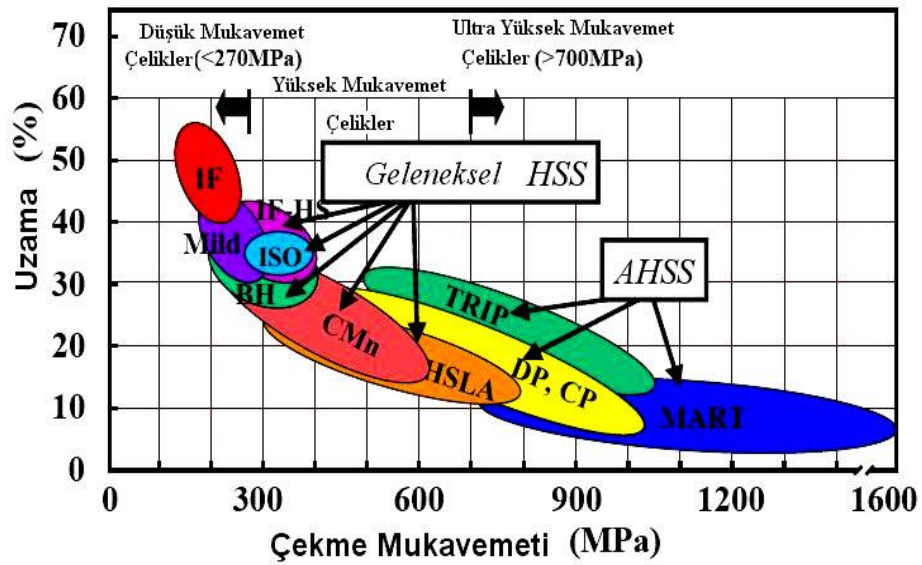
Şekil 2. 4 Çift fazlı çelik kullanılarak üretilmiş çeşitli otomobil parçaları [45]

Son yıllarda otomotiv sektöründeki gelişmelerle paralel olarak kullanılan çelik kaliteleri de değişiklik göstermiştir. Şekil 2.5'te bir taşıtta kullanılan çeşitli çelik türlerinin kullanım miktarına göre dağılımı verilmiştir. Bu malzemelerin mukavemet özelliklerinin yanı sıra şekillendirilebilirlikleri de büyük önem taşımaktadır. Çünkü parçaların üretim sürecince tasarlanan geometrilerinin, HSLA malzemeler tarafından kabul edilebilir ölçülerde olması gerekmektedir. Fakat bu malzemelerde çok büyük oranda geri esneme problem ortaya çıkmaktadır. Bu sorun çeliklerin kullanımını önemli ölçüde sınırlamaktadır.



Şekil 2. 5 Otomobil dizaynında farklı projelerde kullanılan HSLA çeliklerin oranı [8]

Malzemeleri şekillendirilebilme kabiliyetlerinin bir göstergesi olan uzama miktarlarının belirlenmesi istenilen tasarımın gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceği hakkında önemli fikirler vermektedir. Şekil 2.6.'da otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan çelik türlerinin uzama miktarları gösterilmektedir. Genelde malzemelerde artan mukavemet ile birlikte şekillendirilebilirlik azalmaktadır.



Şekil 2. 6 Çeliklerin mukavemet özelliklerine göre uzama miktarlarındaki değişim [1]

2.3 Çift Fazlı Çeliklerin Özellikleri

Tek faz ve çok fazlı terimleri ışık mikroskobu ile yapılan mikroyapısal bir tanımlamadır. Düşük miktarlarda bulunan çökelti gibi mikroyapısal öğeler bu faz tanımında yer almamaktadır. Düşük karbonlu çeliklerde tek fazlı mikroyapı sadece tane boyutu ve şekli ile tanımlanırken, dual fazlı, dupleks ve çok fazlı mikroyapılarda aşağıdaki bazı niceliklerin ölçülmesi gerekir;

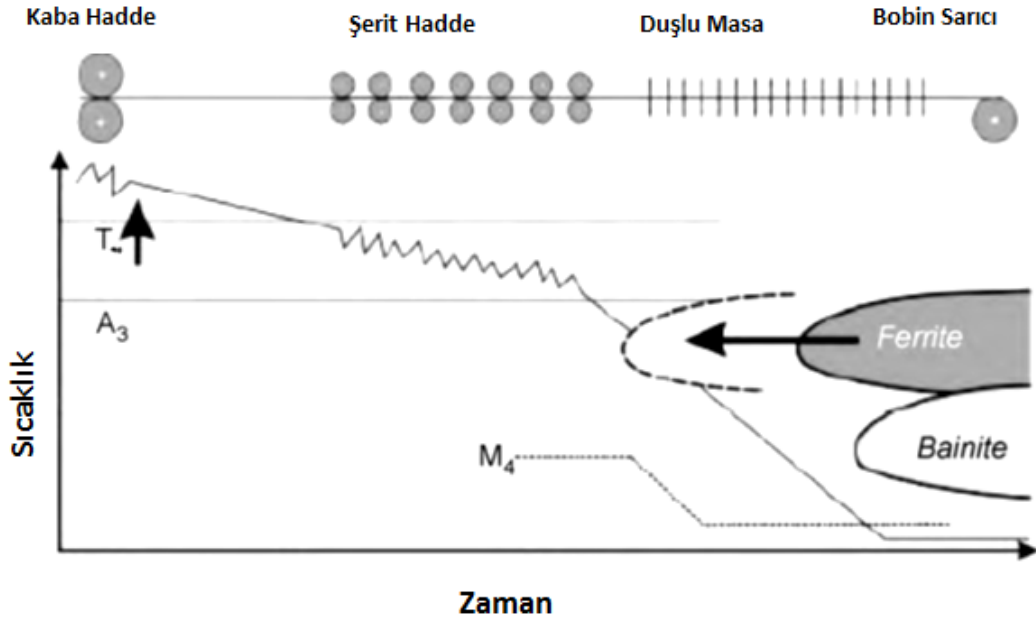
- Fazların hacimsel miktarları
- Her bir fazın tane boyutu
- Sert faz ile yumuşak faz arasında sertlik oranı
- Yarı kararlı fazların mekanik stabilitesi

Çift fazlı çelikler, yüksek dayanımlı çelikler gurubunda, içerisinde yumuşak ferrit matris ile birlikte % 10–30 dolayında martenzit fazı içeren çeliklerdir. Çift faz terimi bu çeliklerin ferrit ve martenzit fazlarından dolayı kullanılmaktadır. [2-10] Çift fazlı çelikler üstün özelliklerini metalografik yapısından almaktadır. Yani bir fazın üstün özelliklerinden yararlanılırken, aynı fazın istenmeyen özelliklerinin baska bir faz yardımı ile denetim altına alınmaktadır. Şöyle ki fazlardan biri sert olup (martenzit) gerekli dayanımı sağlarken, diğeri yumuşak faz olup (ferrit) süneklik sağlar. Her iki özelliğin bir arada bulunması ile dayanım ve süneklik özelliği yüksek olan bir mikroyapı elde edilmiş olur.[2]

Yumuşak ferrit fazı, mikroyapının % 75-80'ini oluşturduğundan sert martenzit tanecikleri çift fazlı çeliklerin sekillendirilebilirlik kabiliyetlerinde ihmal edilebilecek küçük bir etkiye sahiptir. Mikroyapının % 10-30'unu oluşturan martenzit tanecikleri gerilme altında uzamayı azaltırlar. [2]

2.4 Çift Fazlı Çeliklerin Üretimi

Çift fazlı çeliklerin üretim aşamaları şekil 2.7 'deki şematik sıcak haddehane resmi ile açıklanmaktadır. [23] Sürekli döküm yöntemi ile üretilen slabların slab ısıtma fırınlarında ısıtılarak kaba haddeye verilmesi ile üretim başlamakta, haddelemeden sonra soğuma bölgesindeki ısı işlem ile faz yapısı kazandırılmaktadır.



Şekil 2. 7 Çift fazlı çelik üretim prosesinin şematik görüntüsü [23]

2.4.1 Slab Isıtma

Dökümden elde edilen slabın sıcak haddehaneye verilmesi için belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmaları gerekmektedir. Sürekli döküm üretim hatlarından gelen slabın, ısıtma fırınlarına verilmesi için 3 farklı yöntem mevcuttur.

1. Soğuk şarj
2. Sıcak Şarj
3. Direkt Şarj

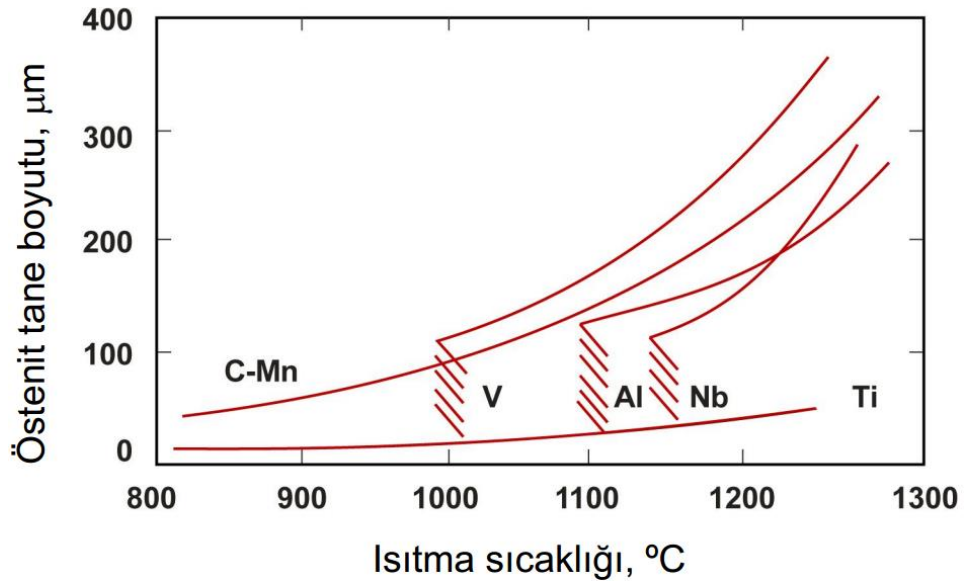
Genellikle slablar, kalite grupları ve ebatlarına göre sınıflandırıldıkları için, fırına soğuk olarak şarj edilmektedirler. Slabın doğrudan şarj edilmesi durumunda ciddi miktarda enerji tasarrufu edilirken, slab yüzey incelemesine olanak vermemektedir. Yürüyen tabanlı ve itmeli tip olmak üzere iki tip slab ısıtma fırını vardır. İtmeli tip fırınlarda slab skid denilen su soğutmalı bölgeler üzerinde ilerlediğinden skidlere denk gelen bölgelerde sıcaklık farkları oluşmaktadır. [11]

Malzeme ostenitleme sıcaklığına ısıtılırken sırasıyla homojen ösenit oluşumu, yapı içindeki çökeltilerin çözünmesi ve östenit tanelerinin büyümesinin sınırlandırılması

aşamaları gerçekleşir. Bu süreçlerin gerçekleşebilmesi için ısıtma hızı, bekletme sıcaklığı ve bekletme zamanının belirlenmesine dikkat edilmelidir.

Homojen Östenit Oluşumu: Sementit ve diğer fazların çözünmesinden kaynaklanan homojensizlikler, östenitte difüzyon olaylarıyla dengelenmelidir.[12]

Çökeltilerin Çözünmesi: Mikroalaşım elementlerinin çözünürlükleri belirli termodinamik şartlar altında gerçekleşmektedir. Uygun koşullardaki çözeltilerin bir kısmı çözünürken henüz çözünmemiş partiküller de kabalaşmaktadır. Tamamen çözünmüş, kısmen çözünmüş ve hiç çözünmemiş partiküllerin oranı deformasyon sürecinde gerçekleşen çökeltme miktarını etkilemektedir.[12] Östenit tane büyümesi sıcaklığın yanı sıra, yapıdaki mikroalaşım elementleri ile kontrol edilebilmektedir. [11] Şekil 2.8’de Östenit tane boyutu ile sıcaklık ve yapıdaki mikroalaşım elementleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.

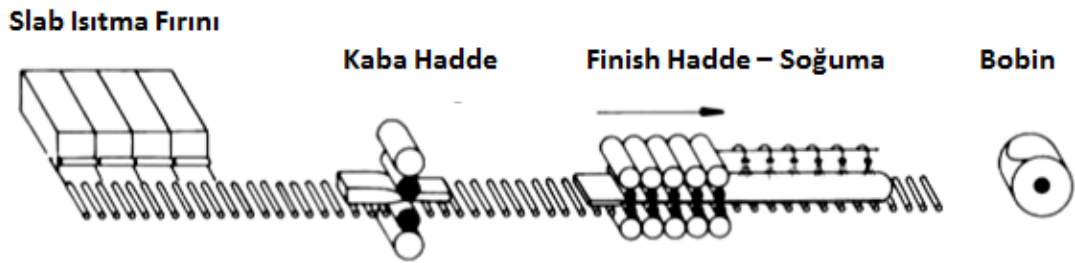


Şekil 2. 8 Östenit tane boyutu ile yapıdaki mikroalaşım elementi ve sıcaklık arasındaki ilişkisi [11]

2.4.2 Kaba Hadde

Bir slabın haddeme prosesi iki aşamada gerçekleşmektedir. Deformasyon olarak tanımlanan, slabın nihai kalınlığına haddememesi işlemi için öncelikle kaba hadde

aşamasından geçirilmesi ve belirli bir kalınlığa kadar inceltmesi gerekmektedir. Bu aşama slabın şerit haddeme prosesine hazırlanması aşamasıdır. Slab fırınından çıkan yaklaşık 1250 °C deki slaba kaba haddeye girmeden önce yüksek basınçlı su püskürtme düzenekleri (descaler) yardımı ile su püskürtülmekte ve slab üzerinde oluşan tufal tabakasının yüzeyden ayrılması sağlanmaktadır. Ardından giriş kalınlığı 225 mm olan slablar 35 mm'ye kadar kaba haddelenerek döküm yapısının kırılması ve yeniden kristalleşme ile homojen östenit yapısının oluşması sağlanmaktadır. Şekil 2.9'da sıcak haddehane prosesinin şematik resmi yer almaktadır. [11]



Şekil 2. 9 Sıcak Hadehane Metalurjik Prosesi [11]

Ön deformasyon alışlagelmiş östenitleme sıcaklıklarının biraz üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Deformasyon başlangıcında mikroyapı; çözünmüş, kısmen çözülmüş ve çözünmemiş çökelti içeren östenitten oluşmaktadır. Öndeformasyon boyunca çelik, dislokasyon blokajı ve yeni dislokasyon oluşumundan dolayı pekleşmektedir.[12]

Kaba olarak haddelenen bobin, coil box denilen ara bobin sarıcıda sarılarak hem ısının homojen olarak dağılması sağlanmakta, hem de şerit haddenin sürekli beslenmesine olanak vermektedir. Bu bölgede yaklaşık bobin sıcaklığı 1045 °C civarında ölçülmektedir.

2.4.3 Serit Hadde

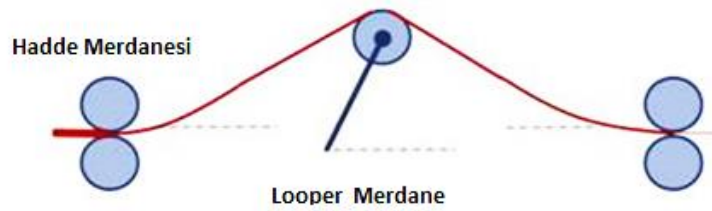
Coil box'tan çıkan bobin, merdaneye girmeden önce, dış sargısının uç kısmındaki düz olmayan bölge kesilerek çıkartılmaktadır. Böylece bobinin merdane tarafından kavranması daha kolay olmaktadır. Ayrıca bobin yüzeyinde kalan tufallerin

haddeme esnasında merdanelere yapışmaması ve batık tufal kusuru oluşturmaması için merdane girişi öncesi descale işlemi yapılmaktadır. Son deformasyonda da bobin birden fazla pasoda haddelenmektedir. Şerit hadde, farklı deformasyon oranlarına sahip 6 adet hadde ayağından (stand) oluşmaktadır. Çizelge 2.1’de örnek olarak 3mm kalınlığında bir DP 600 çeliğinin 1. standdan 7. standa kadar değişen parametrelerine yer verilmektedir. [11]

Çizelge 2. 1 3mm kalınlığındaki DP 600 kalite haddeme koşulları[11]

	1. Stand	2. Stand	3. Stand	4. Stand	5. Stand	6. Stand	7. Stand
Sıcaklık (° C)	1020	990	960	935	910	890	865
Gerinim	0,57	0,41	0,43	0,34	0,27	0,28	0,14
Gerinim Oranı (s⁻¹)	9	15	29	46	66	101	98
Hadde Hızı (ms⁻¹)	1,2	2,1	4,5	5	6,1	7,9	9,5

Haddeme boyunca slab tüm stantlardan geçmekte, deformasyon sonucu slabda meydana gelen uzama üretim hattında ilerleyen malzemenin hızında değişikliğe neden olmaktadır. Uzamadan kaynaklanan yavaşlamanın giderilmesi için looper merdaneler ile hız optimizasyonu yapılmaktadır. Şekil 2.10’da looper merdanelerin işlevi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. 10 Sıcak Hadehane Metalurjik Prosesi [11]

Kaba haddede belirli bir kalınlığa indirilmiş olan slab, şerit haddede her standdan geçerken farklı oranlarda deformasyona uğramaktadır. Deformasyon oranı haddehanedeki merdaneler üzerine uygulanan yük ile kontrol edilmektedir. Şerit haddede her stand giriş ve çıkışında descaler denen yüksek basınçlı su püskürten mekanizmalar bulunmaktadır. Böylece üretim hattı üzerinde ilerleyen malzemenin

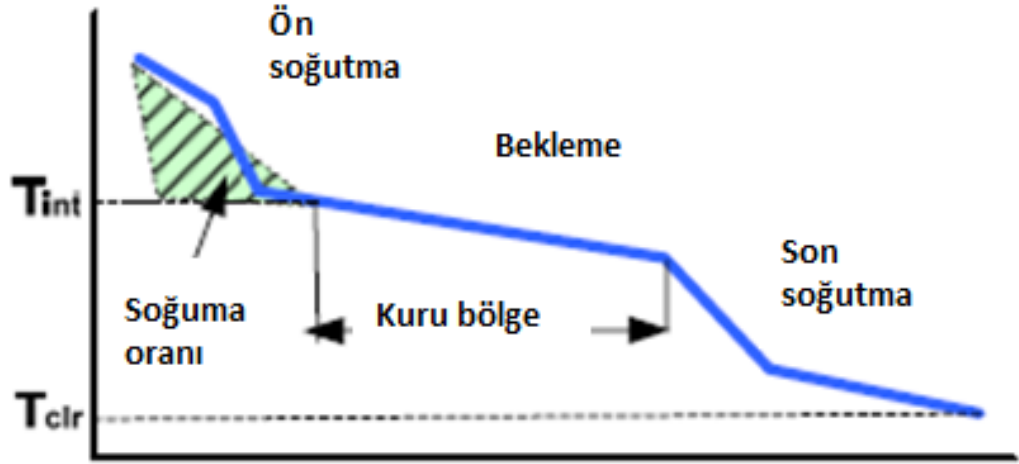
yüzeyinde oluşabilecek tufal tabakası yüksek basıçlı su ile yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Ancak bu esnada malzemede soğuma meydana gelmektedir. Düşük malzeme sıcaklığı, merdanelerin yeteri kadar deformasyon verebilmesi için daha fazla yük uygulanmasını gerektirmektedir.

Optimumu yük, hız ve deformasyon oranı dengesine ek olarak haddeleme boyunca sıcaklığın demir-karbon denge diyagramına göre AC3 sıcaklığının üzerinde tutulması gerekmektedir. Üretim hattı üzerinde ilerleyerek hadde merdaneleri arasından geçen malzeme kenarlardan soğuma eğilimi göstermektedir. Kenar ve merkez arasındaki sıcaklık farkı 20 °C' yi bulabilmektedir. Bu değer her standda bulunan sıcaklık ölçerler ile sürekli ölçülerek kontrol edilmektedir. Eğer haddeleme boyunca sıcaklık kenarlarda AC3 sıcaklığının altına düşerse, yapıda yeni oluşan ferrit deformasyona uğramaktadır. Yapıyı kritik sıcaklıklar arasında haddelemek, mikroyapıyı, dolayısıyla tokluğu etkilemektedir.

2.4.4 Duşlu Masa (Run Out Table)

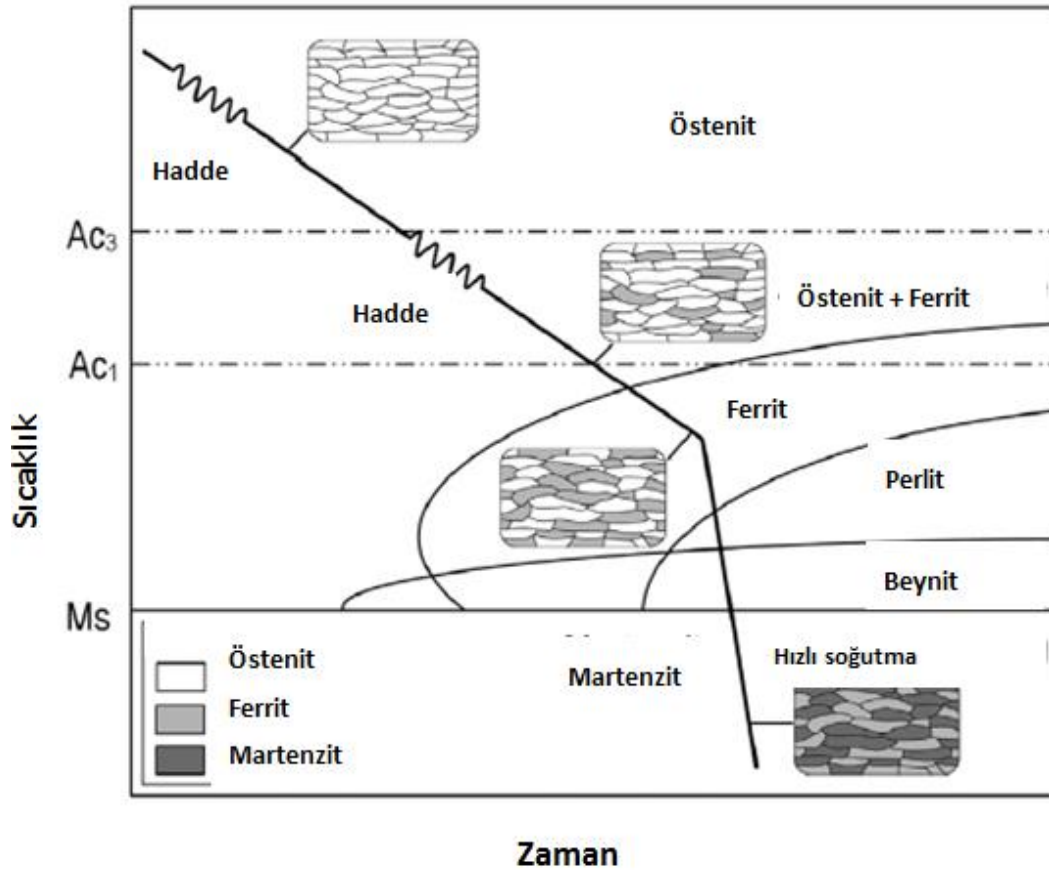
Çift fazlı çelikler, Sekil 2.11' de şematik olarak gösterildiği gibi, AC1 – AC3 kritik sıcaklık arasındaki çeliğin sertleşme kabiliyetine bağlı olarak, uygun bir hızda soğutulmasıyla elde edilir. Duşlu masa üzerinde ilerleyen haddelenmiş çelik 3 farklı soğuma bölgesinden geçmektedir. Bunlar sırasıyla ön soğutma, ıslak bölge ve havada soğutmadır. [14]

Haddelenmiş ürün, hadde sonunda X-Ray kalınlık ve genişlik ölçümünden geçerek, soğuma bölgesine gelmektedir. Yüksek dayanımlı çeliklerin üretiminde en önemli aşama, soğuma koşullarının belirlenmesidir. Haddeleme ile müdehale edilemeyen mekanik özellikler uygun soğutma şartları ile kontrol altına alınmaktadır. [11]



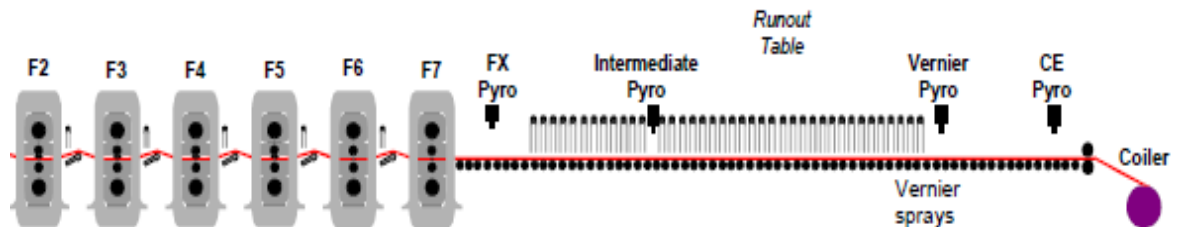
Şekil 2. 11 Bobin soğutma rejiminin şematik gösterimi [13]

Hadde çıkış sıcaklığı 760 - 900 °C arasında değişebilen bobin duşlu masada öncelikle ön soğutmaya tabi tutulmaktadır. Sıcaklık iki fazlı bölgeye düşünce ferrit, primer ostenit tane sınırları boyunca çekirdeklenmekte ve büyümektedir. Ferrit ve ostenitten oluşan yapı hızla soğutulduğunda ferrit yapı tarafından çevrelenmiş kaba martenzit parçacıkları meydana gelmektedir. Mikroyapının şekli, sürekli soğuma diyagramı (CCT) ile belirlenen kontrollü soğumaya göre oluşmaktadır. Duşlu masaların uzunluk kısıtından dolayı soğuma hızının istenilen noktaya gelmesi çok önemlidir. Aksi halde faz dönüşümleri için gerekli sıcaklığa erişilememektedir.[32] Bu diyagramlar istenilen mekanik özelliklere göre soğuma rejimini belirlemektedir. Soğuma sonunda bobin 100 – 200 °C sıcaklık aralığında yer almaktadır. Şekil 2.12 'de termomekanik haddeleme boyunca malzemenin içyapısında gerçekleşen değişimler gösterilmektedir. [22]



Şekil 2. 12 Çift fazlı çeliklere ait termomekanik haddeleme ve mikroyapısı arasındaki ilişki [22]

Çeliğin soğutulduğu duşlu masanın şematik görüntüsünü şekil 2.13'te verilmektedir. Boyu yaklaşık 100 - 120 metre arasında değişen duşlu masa üzerinde alttan ve üstten su püskürten zonlar yer almaktadır. Ayrıca giriş ve çıkışlarda yer almak üzere sıcaklık ölçücü pirometreler bulunmaktadır.



Şekil 2. 13 Sıcak haddehane, soğutma sistemi ve sıcaklık ölçerlerin şematik resmi[13]

Duşlu masanın sonunda istenilen sıcaklığa erişmek için yapılacak hesaplamalarda aşağıdaki parametreler kullanılmaktadır.

1. Tahmini hadde hız profili
2. Hadde çıkış sıcaklığı
3. Hedef kalınlık
4. Çeliğin kimyasal bileşimi
5. Duşlu masa su sıcaklığı

Tanaka ve ark. (1979), Forming and Properties of Ferrite Plus Martensite Dual Phase Structures adlı makalelerinde yaptıkları deneyler sonucunda, çift fazlı çelik mikro yapısını elde etmek için gereken minimum soğutma hızı ile ilgili bir bağıntı geliştirmişlerdir.[10-15] Bu bağıntı (2.1) eşitliğinde gösterilmektedir.

$$\text{Log CR [}^{\circ}\text{C/s]} = -1.7 \text{ MnE} + 3.95 \quad (2.1)$$

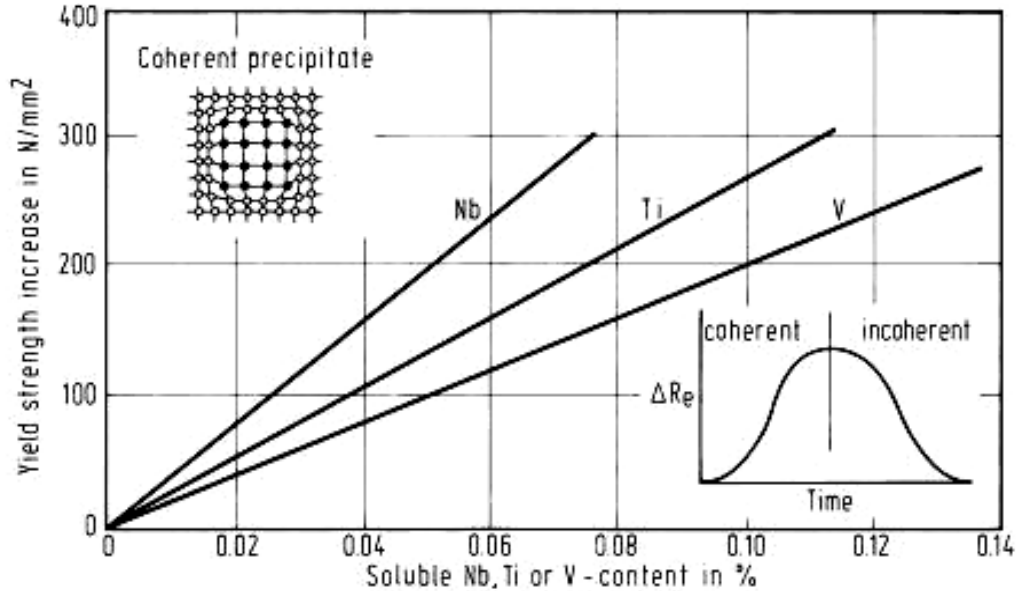
Bağıntıda, CR kritik soğutma hızı ve MnE ise manganez eşdeğeri olup manganez eşdeğerine krom ve molibden miktarı da etmektedir ve bu değer (2.2) eşitliğindeki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{MnE [\%]} = (\% \text{Mn}) + 1.3 (\% \text{Cr}) + 2.67 (\% \text{Mo}) \quad (2.2)$$

AC1 –AC3 kritik sıcaklıklar arasındaki östenit, perlit veya beynite dönüşmeden, martenzit oluşacak şekilde soğutulmalıdır. Östenitin dönüşümü soğutma hızına bağlıdır. Yavaş soğutma sırasında (20 °C/s) mikro yapıda daha fazla ferrit oluşurken, soğutma hızının biraz daha artması (50 °C/s) östenitin perlite ve soğutma hızının daha da artması (80 °C/s) östenitin martenzite dönüşmesine neden olmaktadır. Östenitin tamamen martenzite dönüşmemesi mikroyapıda kalıntı östenitin bulunmasına neden olmaktadır. [10- 15]

2.4.5 Bobin Sarma Ve Bobin Soğutma

Bileşiminde Nb, V ve Ti alaşım elementlerinden birini içeren bir çeliğin soğutma işlemi tamamlandıktan sonra, yumuşak ferrit matrisi içinde karbürler oluşmaya başlamaktadır. Yapıda alaşım elementinin bulunması ferrit tane yapısını inceltirken, akma mukavemeti ve tokluğu da arttırmaktadır. Bu etki şekil 2.14' te verilen grafikte görülmektedir. [11]



Şekil 2. 14 Akma dayanımı ile mikro alaşım elementi ilişkisi [11]

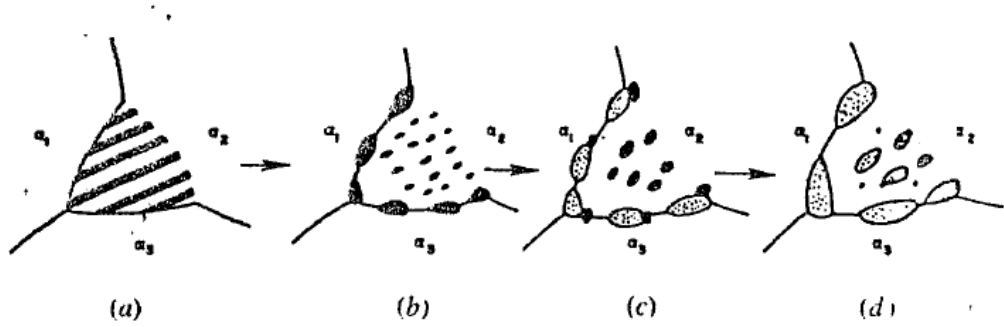
Bobin sarma sıcaklığı mikroyapı bileşenleri ile beraber aynı zamanda alaşım elementinin çökeltiye alınması sebebiyle çökelti sertleşmesi de kontrol edilir. Yüksek sıcaklığa çıkılmasıyla, östenit sahasında çökeltilerin şekillenmesi ikincil sertleşmeye neden olmamaktadır. Soğutma sıcaklığının doğru seçilmesi malzemenin nihai özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca bobin sarıcının gücüne göre daha soğuk haddelenmiş şeritler elde edilebilir. Bobin sarıcının gücü sıcak haddehanelerde sonucu etkileyici faktor olarak bilinmektedir. [11]

2.5 Çift Fazlı Çeliklerde Faz Oluşumu ve Mikroyapı

Bir çift fazlı çeliğin üretimi sırasında yapıda östenit, ferrit, martensit, beynit ve kalıntı östenit gibi değişik fazlar görülebilmektedir.

2.5.1 Östenit Oluşumu ve Büyümesi

AC1 – AC3 kritik sıcaklıkları arasındaki ısı işlem uygulamasında, öncelikle östenitin çekirdeklenmesi, devamında ise östenit tanelerinin büyümesi gerçekleşmektedir. Östenit öncelikle ferrit tane sınırlarında çekirdeklenmektedir.[20] Östenitin çekirdeklenmesi şekil 2.15’te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. 15 Kritik sıcaklıklar arasında östenit çekirdeklenmesi[20]

- (a) Ferrit ve perlitten oluşan başlangıç mikroyapısı
- (b) Ferrit tane sınırlarında sementitin küreselleşmesi ve büyümesi
- (c) Ferrit tane sınırlarındaki sementit parçacıkları üzerinde östenit çekirdeklenmesi
- (d) Küreselleşmiş perlit kolonilerinde östenitin çekirdeklenmesi

Çekirdeklenen östenitlerin büyümesi ise temel olarak üç aşamada gerçekleşir;

1. Perlit taneleri içerisinde östenit tanelerinin büyümesi,
2. Ferrit taneleri içerisinde östenit tanelerinin büyümesi,
 - a) Karbon difüzyon kontrollü büyüme,
 - b) Mangan difüzyon kontrollü büyüme,
3. Nihai dengenin kurulması

Perlit tanelerinin östenit tanelerine dönüşmesi, karbon difüzyonu ile kontrol edilmektedir. Difüzyon mesafesi çok kısa olduğundan, östenit tanelerinin oluşması için gerekli zaman ihmal edilecek kadar kısadır. Sözü edilen difüzyon mesafesi, perlit

lamelleri arasındaki mesafe olan 0,2µm kadardır. Perlit tanelerinin östenit tanelerine dönüşümü, düşük sıcaklıklarda, yer alan alaşım elementlerinden etkilenir ve düşük sıcaklıklarda Mn gibi yer alan alaşım elementlerinin yavaş difüzyonu sebebiyle, büyüme oranı oldukça azalır.[17]

İkinci aşama, ferrit taneleri içerisinde östenit tanelerinin büyümesi aşamasıdır. Bu aşamada östenit tanelerinin büyümesi, karbon ve mangan kontrolü ile gerçekleşmektedir. Ferrit taneleri içerisinde östenit tanelerinin karbon difüzyonu ile büyümesi, birinci aşama bittikten sonra veya birinci aşamayla birlikte oluşmaktadır. AC1 - AC3 dönüşüm sıcaklıkları arasında, kaldırma kuralı gereğince, ferrit-östenit dengesi kuruluncaya kadar, östenit taneleri ferrit taneleri içerisinde büyümektedir. Bunun nedeni, konsantrasyon farkından doğan itici güce bağlı olarak, Mn elementinin yeniden dağılıma uğramasıdır.[17]

Östenit tanelerinin oluşmasında, son aşama nihai dengenin kurulmasıdır. Nihai denge, östenit fazı içerisinde Mn elementi konsantrasyon gradyanının yok olması ile kurulmaktadır. Östenit taneleri içerisinde Mn difüzyonu çok yavaş olduğundan, bu dengenin kurulması için geçen süre oldukça uzundur.[17]

2.5.2 Ferrit Oluşumu

Ferrit; yeni ferrit ve eski ferrit olarak iki kısımda incelenebilir; ikisinin de çelik özelliklerine farklı etkileri vardır. Haddemele sonrasında soğutma esnasında östenitin ferrite dönüşmesiyle oluşan yeni ferrit çelik deformasyon davranışı üzerinde etkilidir ve eski ferritten kompozisyon bakımından farklıdır.[17]

Çift fazlı çeliklerin özelliklerinin belirlenmesinde; ferrit tane boyutu, ferrit matriste bulunan çökelti, arayer ve yer alan elementlerinin bulunması gibi önemli parametreler göz önünde bulundurulmaktadır. Ferrit tanelerinin eş eksenli olması arzu edilmektedir. Düşük dönüşüm sıcaklıklarına sahip çift fazlı çeliklerde oluşan ignesel ferrit, mukavemeti arttırmakta fakat sünekliği azaltmaktadır. Çift fazlı çeliklerde optimum özellikler için ferrit tane boyutunun da küçük olması istenmektedir. [17]

Kritik soğuma hızından daha yavaş olan soğutma hızlarında, oluşan yeni ferritin eski(kalıntı) ferrit üzerinde bir çekirdeklenme olmadan oluştuğu ve östenit tanelerine doğru bir büyüme gösterdiği ifade edilmektedir. Eski (kalıntı) ve yeni ferriti mikroyapıda ayırt etmek için Lawson'un geliştirdiği özel dağlama yöntemi kullanılır. Alkali kromat solüsyonunda dağlanan mikroyapıda martenzit siyah, eski ferrit gri ve yeni ferrit ise beyaz olarak açığa çıkmaktadır. [17-18]

2.5.3 Kalıntı Östenit Oluşumu

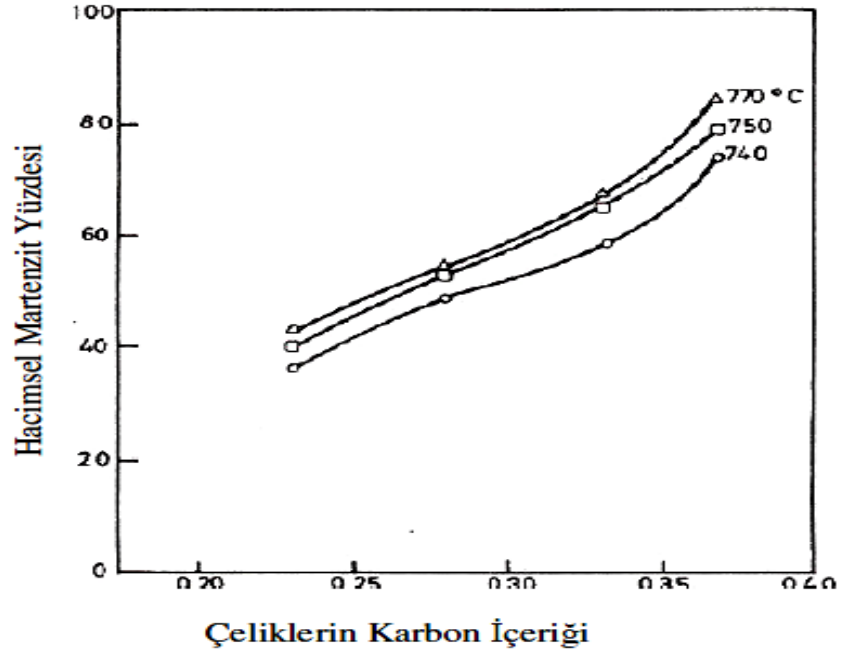
Suda soğutma ile östenitin tamamen martenzite dönüşmemesi çift fazlı çeliklerde %2-9 civarında kalıntı östenit bulunmasına sebep olmaktadır. Kalıntı östenit yapıda farklı şekillerde bulunabilmektedir. Kalıntı östenit; martenzitik yapıda ince bir tabaka olarak, martenzitle birlikte veya küçük adacıklar şeklinde ferrit taneleri içinde yada tane köselerinde de bulunabilmektedir. [17-19]

Çift fazlı çeliklerin yapısında bulunan kalıntı östenitin büyük bir kısmının deformasyon sırasında martenzite dönüşmesi toplam uzamayı artırır. Ancak kalıntı östenit miktarı düşük ise, toplam uzamadaki artış ihmal edilebilmektedir.[17]

2.5.4 Martenzit Oluşumu

Çift fazlı çeliklerin mikroyapısında bulunan martenzit miktarı; çeliğin karbon içeriğine, tavlama sıcaklığına ve östenit tanelerinin sertleşme kabiliyetine bağlıdır.

Çift fazlı çeliklerin martenzit miktarı, artan tavlama sıcaklığı ve artan karbon miktarı ile artmaktadır.[17] Şekil 3.10' da tavlama sıcaklığı ve % C oranına bağlı olarak martenzit hacim oranının değişimi görülmektedir.

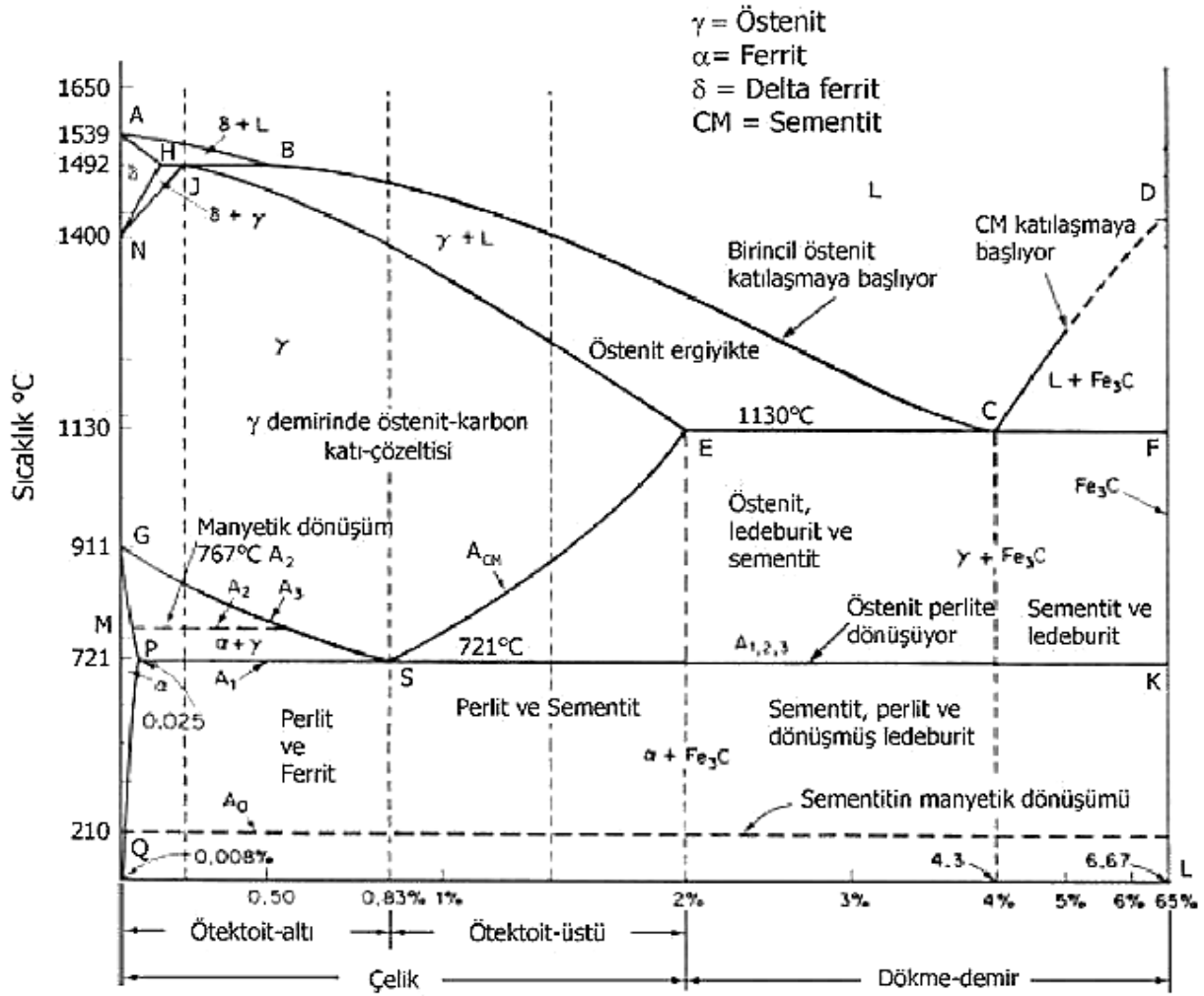


Şekil 2. 16 MHO'nın tavlama ve sıcaklığı yapıdaki karbon oranına bağlı değişimi [11]

2.6 Çift Fazlı Çeliklerde Mekanik ve Kimyasal Özellikler

Çift fazlı çelikler HSLA ve karbon çelikleri ile kıyaslandığında, sürekli akma davranışı, düşük akma dayanımı, yüksek pekleşme hızı, düzgün ve sürekli uzama ve düşük akma oranı gibi ideal özelliklere sahiptir. [35] Çift-fazlı çeliklerin dayanımları büyük oranda martenzit fazına, süneklikleri ise ferrit karakterine bağlıdır. Bu çeliklerin mekanik özelliklerinin diğer çeliklere göre iyileşmesinin nedeni dönüşüm sonucunda oluşan martenzit fazının miktarı ve çevresindeki yoğun hareketli dislokasyonlarla açıklanmaktadır [19-23].

Çift fazlı yapının üretimi şekil 2.17' de demir-sementit denge diyagramında da gösterilen AC1 ve AC3 sıcaklıkları arasında tavlanan ötektoid altı çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak uygun hızla soğutulması ile elde edilir. Farklı morfolojilerde çift faz oluşturulması mümkündür [17].



Şekil 2. 17 Fe – Fe₃C denge diyagramı

2.6.1 Akma Mukavemeti

Çift fazlı çeliklerin akma mukavemetleri HSLA ve sade karbonlu çeliklere göre daha düşüktür. Aynı zamanda belirgin bir akma noktası göstermeyip sürekli akma özelliğine sahiptirler. Sürekli akmanın nedeni, östenitin martenzite dönüşümü sırasında kimyasal bileşimine bağlı olarak yapının hacimce % 2–4 oranında hacimce büyümesidir. Ferrit matrisli çift fazlı çeliğin deformasyona maruz kalması sonucu martenzit parçacıklarının çevresinde hareketli dislokasyon yoğunluğu artmakta ve sürekli akma davranışı sergilemektedir[2]. Kübik yüzey merkezli yapıya sahip östenitin, hızlı soğuma ile martenzite dönüşümü esnasında kafes yapısında meydana

gelen değişiklikten dolayı hacim artışı gözlenmektedir. Yapının tetragonal hale gelmesiyle birlikte % 2-4 oranında genişleme olur. Bu martenzitlerin etrafındaki ferrit tanelerinde gerilmeler ve hareketli dislokasyonlar ortaya çıkar. Bu sebeple malzeme sürekli bir akma gösterir [21-25].

Akma gerilmesi, martenzit hacim oranına bağlı olarak doğrusal bir değişim gösterir ve martenzit fazının karbon içerigine bağlı değildir. Çift fazlı çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını MHO'nın bir fonksiyonu olarak, Davies tarafından (3.3) eşitliğindeki formüllerle belirlenmiştir; [17]

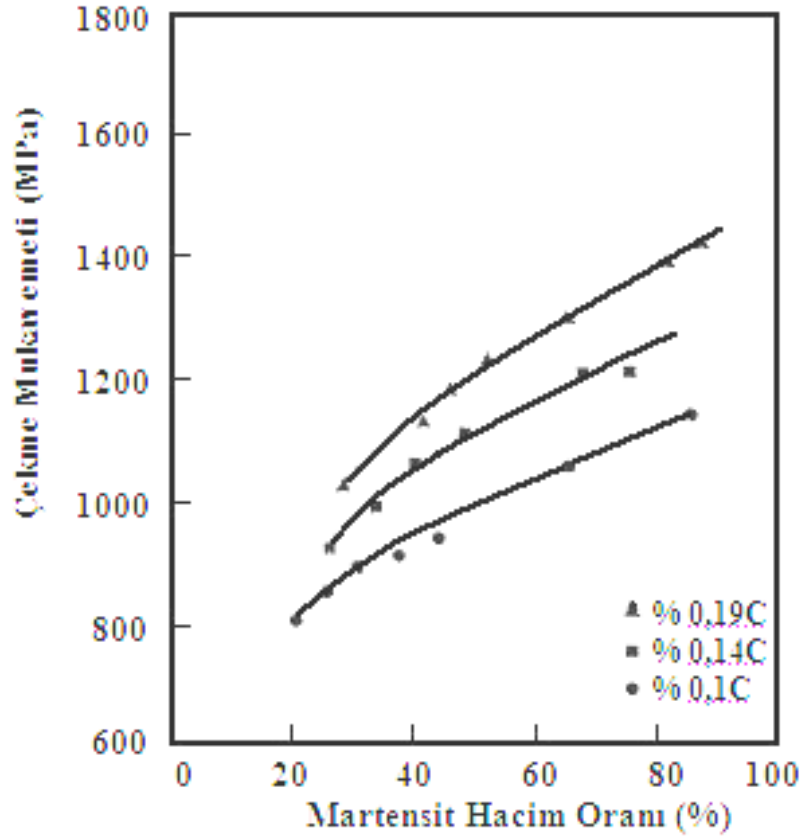
$$\sigma_{0,2} = 172 + 15,5 \%MHO \quad (2.3)$$

2.6.2 Çekme Mukavemeti

Çift fazlı çeliklerin çekme mukavemeti, martenzit hacim oranına bağlıdır. Martenzit hacim oranı arttıkça çekme mukavemeti de martenzit parçacık boyutuna bağlı olmaksızın artması değişik araştırmacıların deney sonuçlarıyla da kanıtlanmaktadır.[2-21] Çekme mukavemeti ile martenzit hacim oranı arasındaki ilişki (2.4) eşitliği verilmektedir. [2]

$$\sigma_{\text{ç}} = 235 + 3,8\%MHO \quad (2.4)$$

Sekil 2.18, değişik karbon içerigine sahip çift fazlı çeliklerde martenzit hacim oranı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

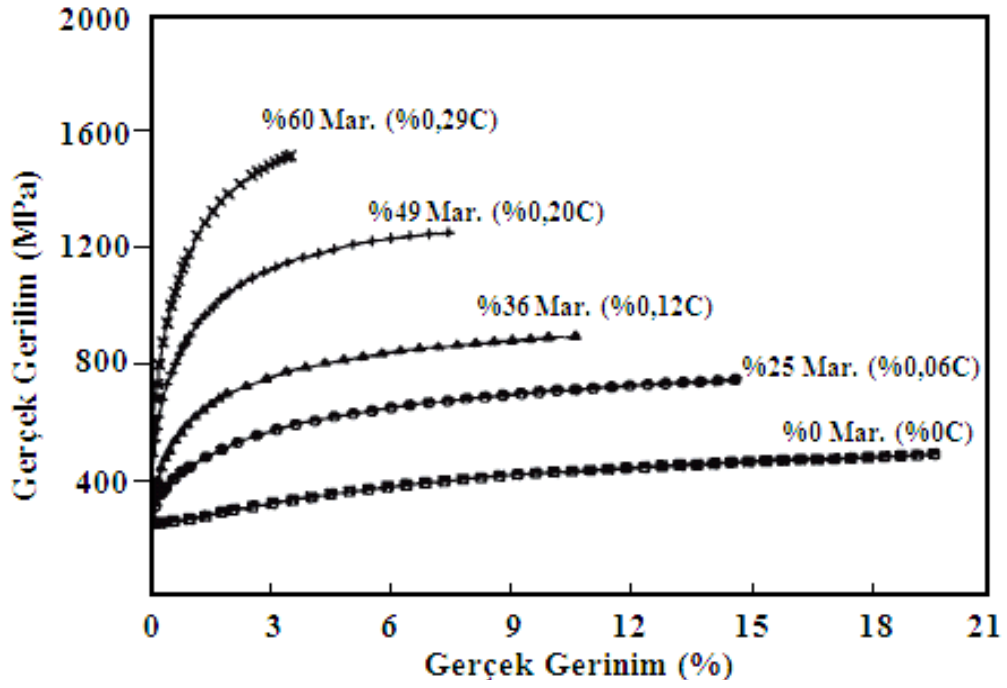


Şekil 2. 18 Martenzit hacim oranlarının çekme mukavemeti ile ilişkisi [17]

Kim ve Thomas (1981) çift fazlı çeliklerin çekme özelliklerine etki eden faktörleri; ferrit ve özellikle martenzit (ikinci faz) morfolojisi, martenzit hacim oranı ve martenzitin karbon içeriği olarak belirlemişlerdir.

Speich and Miller'in, değişik karbon ve martenzit oranlarına sahip düşük alaşımlı ve alaşımsız bir çelik üzerinde yaptıkları çalışma sonrası elde ettikleri gerçek gerilim ve gerinim grafiklerinin yüzde martenzitle olan değişimi şekil 2.19' da görülmektedir.[2]

Çift fazlı çeliklerin çekme dayanımını arttırabilmek için östenit miktarının fazla olması ve sertik arttırıcı alaşım elementlerinin (Mn, Cr , Mo, V, Ni vb.) bulunduğu çeliklerin seçilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte bu alaşım elementleri yapıda ferritin saflığını bozmayacak miktarda bulunmalıdır. [26]



Şekil 2. 19 Martenzit hacim oranının gerilim-gerinim eğrileri üzerine etkisi [2]

2.6.3 Süneklik

Çift fazlı çelikler, aynı mukavemet değerlerinde HSLA çeliklerine göre daha iyi süneklığe sahiptirler. HSLA çeliklerinin toplam uzama değerleri % 18 kadar arttırılabilirken çift fazlı çeliklerin toplam uzama değerleri % 28'e ulaşabilmektedir. Bu durum çift fazlı çelikleri ticari açıdan da cazip kılmaktadır.[2]

Çift fazlı çeliklerde süneklik büyük oranda ferrit hacim oranı ve morfolojisine bağlıdır.[15-2] İyi süneklik değerleri için ferritin saf ve hacim oranının %70'den fazla olması gerekmektedir. Düşük karbon içerikli martenzit fazı da süneklığın yüksek olmasını sağlamaktadır. Düşük karbonlu martenzitin çatlaması ve ferrit-martenzit ara yüzeyinin ayrılması zordur [2].

Rashid, çift fazlı çeliklerde yüksek deformasyon oranlarında dahi martenzit-ferrit arayüzeyinde herhangi bir ayrışma ya da kopma olmadığını martenzit-ferrit ara yüzeyinin çok iyi bir uyum sağlaması ile açıklamaktadır.[17]

2.6.4 Kimyasal Bileşim

Bir çift fazlı çelikten beklenen mekanik özelliklerin karşılanması için uygun soğutma koşullarının yanı sıra, uygun bir kimyasal bileşim, kusursuz üretim aşamaları ve fabrika üretim şartları, sertleşebilirlik-tavlama-soğuma profili önemlidir. [20-27]

Çift fazlı çeliklerin üretiminde birinci aşama çeliğin (slabın) AC1-AC3 sıcaklıkları arasında ısıtılmasıdır. Fe-Fe₃C denge diyagramında kritik bölge olarak adlandırılan bu bölgenin geniş olması faz miktarlarının kontrolü açısından önemlidir. Yapıda bulunan Si, Mn, Cr, Mo gibi alaşım elementleri kritik bölgeyi genişletirler[20-26]

Östenit fazına ısıtılan çelik, belirli bir hızla soğutulduğunda sıcaklık öyle bir noktaya gelir ki Ms olarak adlandırılan martenzit başlama sıcaklığında martenzitik dönüşüm başlar. Bu dönüşüm Mf olarak adlandırılan martenzit dönüşümü bitiş sıcaklığına kadar devam eder. Her iki sıcaklık noktası da kimyasal bileşime bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eşitlik (2.5) 'te martenzit başlama sıcaklığı (Ms) için Andrews bağıntısı verilmiştir. [24] Martenzit dönüşüm sıcaklığı birçok alaşım elementinden etkilenmektedir. Bu nedenle çelik bileşimi çok önemlidir.

$$Ms (^\circ C) = 550 - 350 (\%C) - 40 (\%Mn) - 20 (\%Cr) - 10 (\%Mo) - 17 (\%Ni) - 8 (\%W) - 10 (\%Cu) + 15 (\%Co) + 30 (\%Al) \quad (2.5)$$

Mf sıcaklığı ise özellikle karbon oranından etkilenmektedir. Karbon oranı % 0,5–0,6 oranına yaklaştıkça bu sıcaklık sıfır dereceye düşmekte ve karbon oranı arttıkça da sıfırın altına düşmektedir. [28]

Yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı sınıfında yer alan çift fazlı çeliklerin yapısında %0,05 'ten % 0,7 'e kadar karbon bulunabilmektedir. Ana alaşım elementi olan manganın yapıdaki miktarı en fazla % 2 seviyesindedir. Ti, Nb ve V gibi mikro alaşım elementleri ise nitrokarbür çökeltilerine katılarak ana sertleşme mekanizmasında rol alırlar. Bu elementler oluşan yeni ferritin tane yapısını iyileştirirken, çökelti sertleşmesine de katkıda bulunurlar. [34] A.Fallahi yapmış olduğu çalışmada Ti ve Nb elementlerinin mikroyapı üzerindeki etkisine değinmektedir. Çalışmada yapıya katılan mikroalaşım elementlerinin ferrit fazının tane boyutunu küçülttüğü gözlenmektedir. [30]

Her fabrikanın üretim şartlarına göre normal çift-fazlı çelik yapısı ve özelliklerini elde edebilecek şekilde alaşım elementi miktarını tespit edilmesi gerekmektedir. Üretim şartları hassas olan bir fabrika daha az miktarda alaşım elementi kullanarak üretimini gerçekleştirebilirken, üretim şartları hassas olmayan bir fabrikanın daha fazla alaşım elementi kullanması gerekmektedir. [29]

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada DP600 kalite çelik elde etmek üzere İskenderun Demir ve Çelik AŞ. sıcak haddehanesinde slabların haddelenmesi ve haddelemenin ardından duşlu masada soğutularak bobin hale getirilmesi incelenmiş, duşlu masada gerçekleştirilen ısı ilemin ardından bobin sarma sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu kapsamda, rulo olarak üretilen malzemedan bobin boyunca belirli aralıklarla numuneler alınmış önce mekanik özellikleri belirlemek için çekme testi, ardından faz oranlarının belirlenmesi için içyapı incelemesi yapılmıştır. Numune alınmasına karar verilen her bölgede ikişer adet sağ ve sol taraftan, iki adet de orta bölümden olmak üzere 6'şar adet çekme deneyi numunesi çıkarılmıştır.

Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiş, deney öncesi ön hazırlıklar açıklandıktan sonra mekanik testler yapılmış, optik mikroskop yardımı ile çift faz ısı işleminin meydana getirdiği mikroyapısal değişiklikler incelenmiş ve malzemenin mikroyapısını oluşturan fazların oranı hesaplanmıştır.

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

Deneyde kullanılan malzemeler yarı mamul ve nihai mamul olmak üzere iki aşamada açıklanabilir.

İskenderun Demir ve Çelik TAŞ. Tesislerinde DIN EN 10025 standardına göre üretilen 225x1205x12000 mm ebatlarındaki slab önce slab ısıtma fırınında 1200 °C sıcaklığa ısıtılmış, ardından kaba haddede 5 aşamalı haddelenmenin sonucunda 34 mm kalınlığa indirilmiştir. Kaba hadde çıkışında coil box işlemi uygulanmış ve malzeme yaklaşık 1050° C sıcaklık ile şerit haddeye girmiştir. 6 ayaklı şerit hadde de toplamda % 89,12 oranında deformasyon gerçekleştirilerek ürün 3,7 mm kalınlığa ve 1190 mm genişliğe haddelenmiştir. Bu aşamadan sonra elde edilen ürün duşlu masada ısıl işleme tabii tutularak nihai ürün elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda nihai ürün olarak rulo mamul kullanılmıştır. Deneyde kullanılan numuneler şekil 3.1’de yer alan Thermoarl 4460 optik emisyon spektrometresinde kimyasal analiz bakımından incelenmiştir. Cihazda analizi yapılan elementler; N, P, S, Sn, C, As, Si, W, Cu, Co, V, Ti, Zn, Ca, B (toplam, çözülmüş, çözülmemiş), Mg, Sb, Al (toplam, çözülmüş, çözülmemiş) Cr, Nb, O, Pb, Fe, Mn, Mo, Zr, Ni’dir. Ayrıca cihazda bunlara ek olarak çelikte kirliliğin miktarını gösteren SparkDat programı bulunmaktadır.



Şekil 3. 1 Thermoarl 4460 optik emisyon spektrometresi

İskenderun Demir ve Çelik TAŞ. Sıcak Haddehane’sinde haddeleme işlemi, aynı hat üzerine yer alan kaba haddede ve şerit haddede olmak üzere iki aşamada

yapılmaktadır. Kaba haddede belirli oranda deformasyon verildikten sonra malzeme şerit haddeye giderek nihai kalınlığına burada ulaşmaktadır. Kaba haddehane girişi şekil 3.2’de ve şerit hadde Şekil 3.3’te yer almaktadır.



Şekil 3. 2 İskenderun Demir ve Çelik TAŞ. sıcak haddehanesindeki kaba hadde (giriş)



Şekil 3. 3 İskenderun Demir ve Çelik TAŞ. sıcak haddehanesindeki şerit hadde

Haddeleme işlemleri sırasında malzeme sıcaklığı hat üzerinde kaba hadde giriş ve çıkışında, şerit hadde çıkışında ve bobin sarıcıdan önce yer alan pirometreler ile yapılmıştır. Kaba hadde girişindeki pirometre Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3. 4 Kaba hadde girişinde yer alan pirometreler

Isıl işlem parametrelerinin nihai kalınlığa haddelenen rulo mamüller üzerinde mekanik özellikler etkisini belirlemek için şekil 3.5'te gösterilen 60 tonluk Zwick marka çekme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3. 5 Zwick marka çekme cihazı

Çekme test sonuçları ile mikroyapı arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere bobin boyunca çekme test numunesi alınan bölgelerden aynı zamanda metalografik inceleme için de numuneler alınmıştır. Yapıdaki fazların mikroyapı incelemeleri şekil 4.3'te gösterilen Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskopta yapılmış, fazların oranı Clemex PE 4 + CIR görüntü analiz yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 6 Deneyde kullanılan Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop

3.2 Deneylerin Yapılışı

Bu çalışma aynı haddeme parametreleri ile haddelenen malzemelerin çift faza dönüşüm ısı işlemi ve ısı işlem sonucu içyapıdaki faz dağılımının ölçülmesi işlemleri olmak üzere iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Bu işlemler ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1 Haddeme ve Haddeme Parametreleri

Sürekli döküm yöntemi ile üretilen slab, 3,7 mm kalınlık ve 1190 mm genişlikte rulo mamül olarak haddelenmiştir. Slab önce kaba haddede toplamda %84,41 oranında

deformasyona uğratarak 34 mm kalınlığa indirilmiş, daha sonra şeriti haddenin doğası gereği coil box uygulaması yapılmıştır. Coil box'ın ardından 1000 – 1050 °C sıcaklık aralığında şerit haddeye girmiş ve 6 ayaklı haddehanede toplamda %89,12 oranında deformasyona uğratarak 3,7 mm kalınlığa indirilmiştir. Malzeme ebat açısından istenilen değerlere gelse de, haddeleme işlemi amaçlanan çift faz oluşumu bu şamada sağlanmamaktadır. Rulo mumülün istenilen mekanik özellikleri kazanması için termomekanik haddeleme sistemlerinin ikinci kısmı olan soğutma bölgesinden (duşlu masa) belirli parametreler eşliğinde geçirilmesi gerekmektedir.

3.2.2 Duşlu Masada Gerçekleştirilen Isıl İşlem

İsdemir sıcak haddehanesinde bulunan duşlu masa 99,7 metre soğutma bölgesi ve 43,8 metre ara bekleme bölgesine sahiptir. Soğutma bölgesinde bulunan nozullar ile dakikada 205 m³ su püskürtebilmektedir.

Şerit haddeden çıkan ve bobin olarak adlandırılan yassı mamulün duşlu masaya giriş sıcaklığı, girişte yer alan pirometre tarafından 865 °C ölçülmüştür. Deneyde kullanılan bobin üretim hattından belirli bir hız ile geçirilirken soğutma bölgesindeki nozullardan püskürtülen su ile soğutulmuştur. Soğutma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci bölgede ıslak işlem yapılmış, ara bölgede malzemenin bir süre havada soğuması sağlanmış, son olarak da ikinci soğuma bölgesinde nozullardan su püskürtülerek soğutma prosesi tamamlanmıştır. Ara bölge sıcaklığı 660 ° C olarak ölçülmüş, malzeme bu bölgede bir süre bekletildikten sonra tekrar su püskürtülerek sarım sıcaklığına soğutulması hedeflenmiştir. Çizelge 3.1 'de duşlu masada gerçekleştirilen ısı işlem parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 Isıl işlem sıcaklık parametreleri

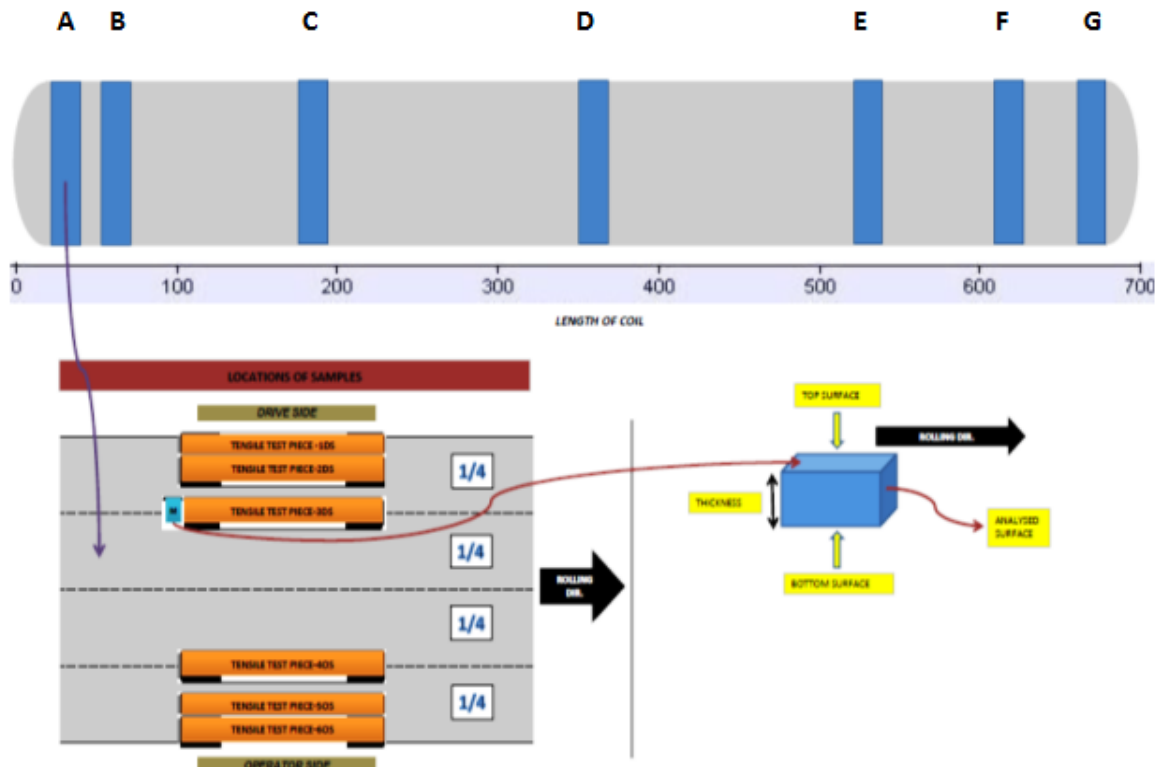
Hedef İkmal Sıcaklığı (° C)	Hedef Ara Bölge Sıcaklığı (° C)	Sarılma Sıcaklığı Ortalama (° C)
865	660	225-375

Deneyde kullanılan bobinin sarılma sıcaklığı ısı işlemin sonuçlarını belirlemektedir. Çizelge 3.1'de ortalama sarım sıcaklığı verilmekle beraber, bu değer bobinin bazı

noktaları için farklılık göstermektedir. Mekanik testler ve içyapı incelemelerinde bobinin farklı sarılma sıcaklıklarında gösterdiği davranış incelenmiştir.

3.2.3 Deney Numunelerinin Alınması ve Hazırlanması

Mekanik özellikleri belirlemek için, farklı sarım sıcaklığına sahip bölgelerden alınan numunelere sabit hızda çekme testleri uygulanarak akma ve çekme mukavemet değerleri ile % uzama değerlerini tespit etmek için farklı sarım sıcaklığına sahip bölgeler incelenmiştir.



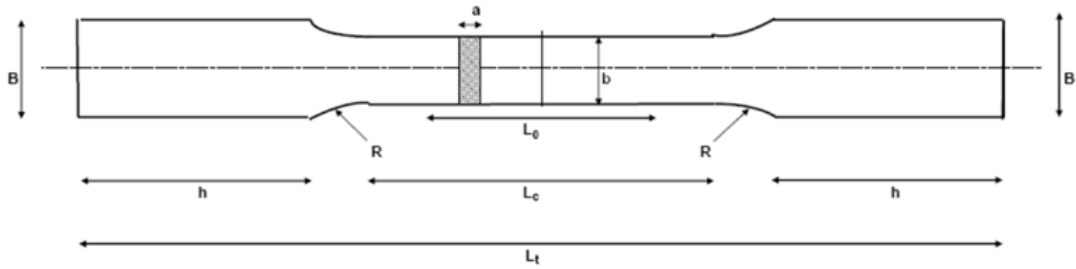
Şekil 3. 7 Bobin boyunca numune alınan bölgelerin ve numunelerin şematik gösterimi

Metallik malzemelerin çekme testi TS EN ISO 6892-1 standardına göre numuneler uzunluğu 100 mm, genişliği 25 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. TS EN ISO 6892-standardına göre, bobin boyunca 7 ayrı noktadan, hadde yönüne dik olarak 6'şar adet çekme çubuğu numunesi alınmıştır. Bobin boyunca gerçekleştirilen numune alma işlemi şekil 3.7'de şematik olarak gösterilmiştir. Bölgeler sırasıyla A'dan G'ye kadar isimlendirilmiştir.

Şekil 3.8’de gösterilen, DIN EN 10338:2009 standardına göre üretilen DP600 kalite malzemelerin çekme test numuneleri Şekil 3.8’deki teknik resme göre hazırlanmıştır. Bu resimde yer alan değerler Çizelge 3.2’da yer almaktadır.



Şekil 3. 8 Çekme test numunesine ait teknik resim



Şekil 3. 9 Çekme test numunesine ait teknik resim [46]

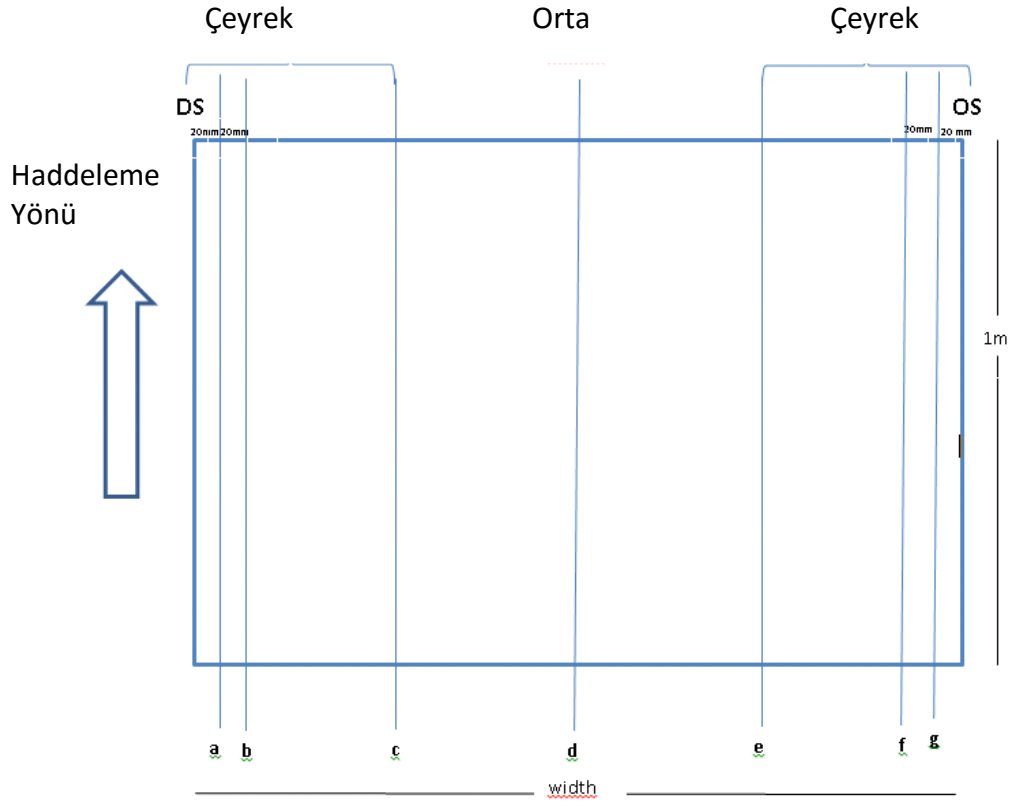
Çizelge 3. 3 Çekme test numunesi ölçüleri

Malzeme Standardı	Kalınlık (mm) a	Genişlik (mm) b	Marka Boyu (mm) L0	Paralel Uzunluk (mm) Lc	Oyuğun Yarıçapı (mm) R	Kavrama Genişliği (mm) B	Kavrama Uzunluğu (mm) h	Toplam Uzunluk (mm) Lt
DIN EN 10338:2009	$\geq 3,7$	25 ± 1	100 ± 1	≥ 150	≥ 12	$\geq 32 \leq 35$	≥ 90	≥ 330

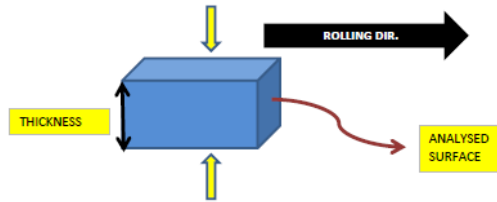
3.2.4 İç Yapı İncelemesi

Isıl işlem sonrası içyapıda oluşan martenzit hacim oranının ölçülmesi amacıyla bobinin çekme numunesi alınan her bir bölgesinden metalografik inceleme numunesi çıkarılmıştır. Kesilen parçalar bakalite alınıp zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş, ardından uygulanan kimyasal bileşim ile parlatıldıktan sonra % 5 nital ile

dağlanarak ve optik mikroskopta 1000 büyütmede incelenmiştir. İçyapıdaki faz oranları Clemex adlı yazılım programı ile hesaplanmış ve mekanik özelliklerle ilişkisi kurulmuştur. Numuneler şekil 3.10 'da belirtilen şekilde bobin ortasından alınmıştır.



a	20mm from DS
b	40mm from DS
c	Quarter of width
d	Centre
e	Quarter of width
f	40mm from OS
g	20mm from OS



Şekil 3. 10 Metalografik numune kesim planı

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde her dökümden haddelenen 4 adet bobinden alınan numunelerin mukavemet değerleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

4.1 Kimyasal Bileşim

Deneyde kullanılan malzemenin spektral analiz sonuçları ve DIN EN 10338:2009 standardına göre üretilen DP600 kalite malzemenin uluslararası standartta yer alan bileşimi çizelge 4.1 gösterilmektedir. Kullanılan ürünün kimyasal bileşimi uluslararası standarda uygun olarak seçilmiştir.

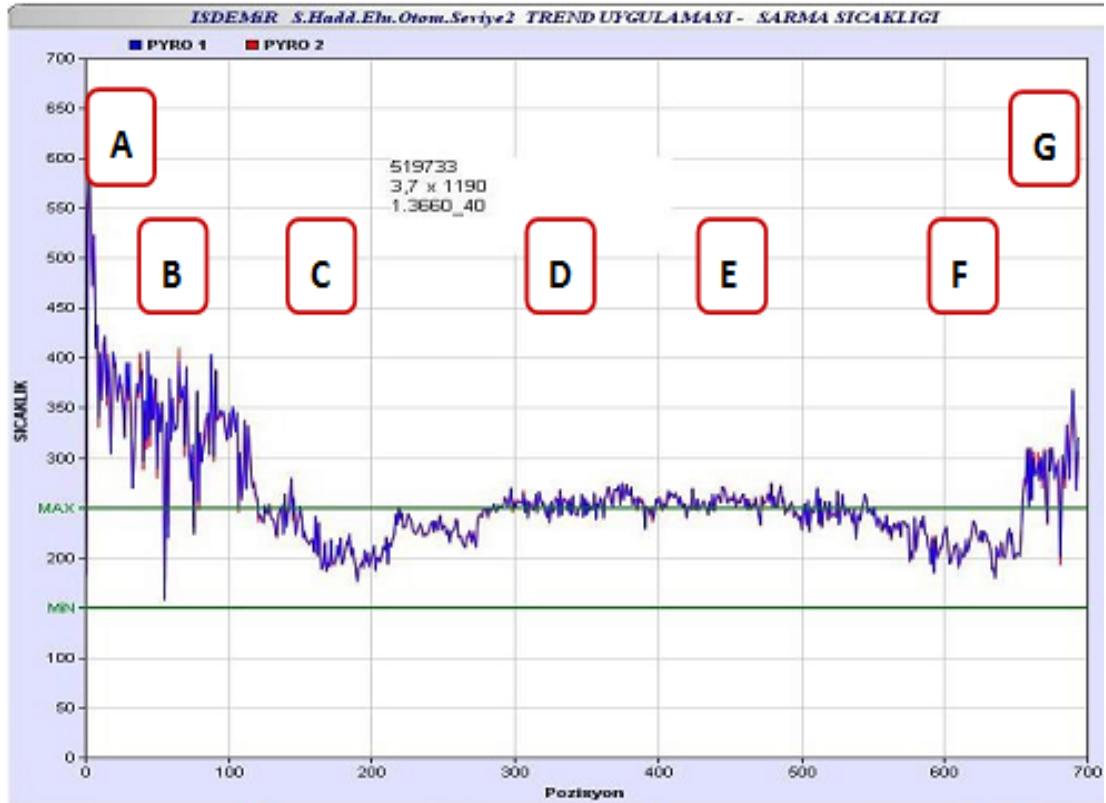
Çizelge 4. 1 Deneyde kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları ve standarttaki karşılıkları.

Malzeme	Kimyasal Kompozisyon-DP600											
	C	Mn	P	S max	Si	Cr	Mo	Al	Nb	Ca	Al	N max
S	0,0 7- 0,1	0,6- 0,8	0,04- 0,05	0,00 8	0,1- 0,2			0,02- 0,06				0,009
B	0,0 7	0,88	0,03	0,00 4	0,24	0,6 2	0,06	0,05	0,00 12	0,0 02	0,0 5	0,007

B: kullanılan bobin, S: standartta olması gereken kimyasal kompozisyon aralığı

4.2 Bobin Sarma Sıcaklıklarının Ölçülmesi

721 metre boyundaki bobinin her bölgesindeki sıcaklık pirometreler ile taranarak bobin boyunca sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.1’de bobin boyunca ölçülen sıcaklıkların dağılımı gösterilmektedir. Çeşitli sıcaklıklardaki bölgelerin mekanik özelliklerini test etmek amacıyla bobin yedi ayrı kısma ayrılmıştır.



Şekil 4. 1 Bobin boyunca numune alınan bölgelerdeki sıcaklık değişimi

Şekil 4.1’de belirlenen her bölgenin bobin sarım sıcaklığı birbirinden farklıdır. Bobin başından itibaren ilk 150 metrede ve son 70 metrede sıcaklık sert değişimler göstermiştir. İnceleme yapılacak olan bölgeler özellikle hızlı bir sıcaklık değişimi gösteren alanlardan seçilmiştir. Belirlenen bölgelerin, şerit haddehane çıkışında pirometrelerce ölçülen bobin sarım sıcaklıkları çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2 Numune alma bölgelerinde ölçülen bobin sarım sıcaklıkları

Numune Alınan Bölge	Bobin Üzerindeki Konumu (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (°C)
A	27	375
B	51	325
C	189	225
D	351	250
E	525	250
F	633	225
G	675	312

4.3 Çekme Testi Sonuçları ve Bobin Sarım Sıcaklığı Arasındaki İlişki

Bobin üzerinde belirlenen 7 ayrı bölgeden alınan 6’şar adet numune ile çekme deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışma ile o bölgedeki akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değeri belirlenmiştir. Çizelge 4.3’de A bölgesi için 6 farklı konumdan alınan numunelerin çekme testi sonuçları gösterilmektedir. DP 600 kalite çift fazlı çeliklerin EN 10338:2009 standardındaki minimum akma mukavemeti 300 MPa, minimum çekme mukavemeti ise 580 MPa’dır.

Çizelge 4. 3 A bölgesi için 6 farklı konumdan alınan numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (°C)	Akma Dayanımın (MPa)	Çeme Dayanımı (Mpa)	% Uzama Lo=5,65vSo
A	27	375	341	532	31
			358	590	33
			374	532	25
			355	546	24
			363	574	32
			350	549	27
Ortalama A			357	554	28,7

Her bir bölgeden alınan 6’şar adet numunenin çekme test sonuçları bobin sarma sıcaklığının mekanik değerler üzerindeki etkisi hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 4.4’de çekme dayanımı değerlerinin standardı sağlamadığı görülmektedir.

Çizelge 4. 4 B bölgesi çekme testi sonuçları (325 °C)

Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (°C)	Akma Dayanımın (MPa)	Çeme Dayanımı (Mpa)	% Uzama Lo=5,65vSo
B	51	325	409	584	28
			385	574	29
			373	552	29
			358	544	31
			406	582	24
			400	543	32
Ortalama B			389	563	28,8

Bobin sarma sıcaklığı 352 °C’ye düşünce mekanik değerlerde bir miktar artış gözlenmiştir.

C bölgesinde sıcaklık 225 °C ölçülmüştür. Bu sıcaklıktaki mekanik test sonuçları çizelge 4.5’te görülmektedir.

Çizelge 4. 5 C bölgesi çekme testi sonuçları (225 °C)

Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (C)	Akma Dayanımın kg/mm2)	Çeme Dayanımı (kg/mm2)	% Uzama Lo=5,65VSo
C	189	225	380	622	24
			411	632	24
			426	642	25
			413	625	27
			416	621	25
			419	636	27
Ortalama C			411	630	25,3

D ve E bölgelerinde bobin sarma sıcaklığı bir miktar artarak 250 °C’ye ulaşmıştır. Bu bölgelerden yapılan çekme test sonuçlarını çizelge 4.6’te gösterilmiştir. Sarım sıcaklığının artmasıyla beraber mekanik özelliklerde bir miktar düşüş gözlenmiştir.

Çizelge 4. 6 D ve E bölgeleri çekme testi sonuçları (250 °C)

Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (°C)	Akma Dayanımın (MPa)	Çeme Dayanımı (Mpa)	% Uzama Lo=5,65vSo
D	351	250	364	630	32
			378	602	27
			415	610	25
			401	602	25
			385	607	28
			387	605	24
Ortalama D			388	609	26,8
E	525	250	358	626	25
			413	640	27
			424	628	25
			416	609	28
			388	625	24
			331	617	24
Ortalama E			388	624	25,5

E bölgesi ve E bölgesi aynı sarım sıcaklığına sahip olduğu benzer özellik göstermektedir. F bölgesinde bobin sarma sıcaklığı tekrar düşmüş, bunun bir sonucu olarak da muavemet değeri artmıştır. Çekme test sonuçları çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 7 F bölgesi çekme testi sonuçları (225 °C)

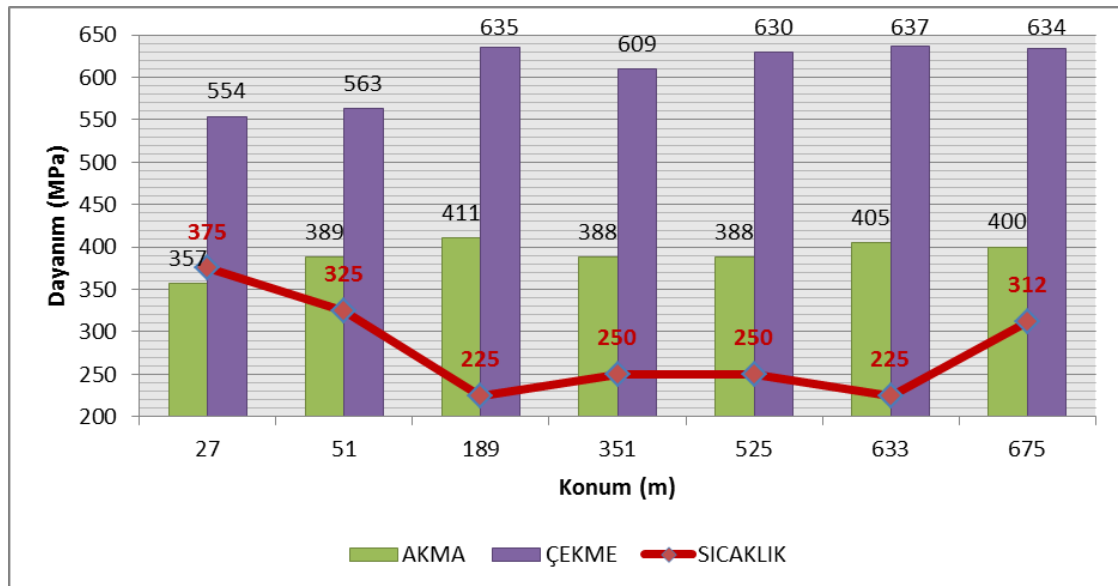
Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (°C)	Akma Dayanımın (MPa)	Çeme Dayanımı (Mpa)	% Uzama Lo=5,65V So
F	633	225	384	647	25
			388	620	29
			423	633	24
			437	634	25
			424	657	28
			371	631	24
Ortalama F			405	637	25,8

Bobin boyunca ölçülen bobin sarma sıcaklığı bobin başı ve sonunda en yüksek değeri göstermiştir. Bu bölgelerden beklenen mekanik değerler en düşük seviyededir. G bölgesi için yapılan mekanik test sonuçları tablo 4.8’ de verilmektedir.

Çizelge 4. 8 G bölgesi çekme testi sonuçları (225 °C)

Numune Bölgesi	Konum (m)	Bobin Sarma Sıcaklığı (C)	Akma Dayanımın kg/mm2)	Çeme Dayanımı (kg/mm2)	% Uzama Lo=5,65VSo
G	675	312	374	650	28
			406	636	29
			414	632	25
			405	604	29
			433	648	28
			369	635	27
Ortalama G			400	634	27,7

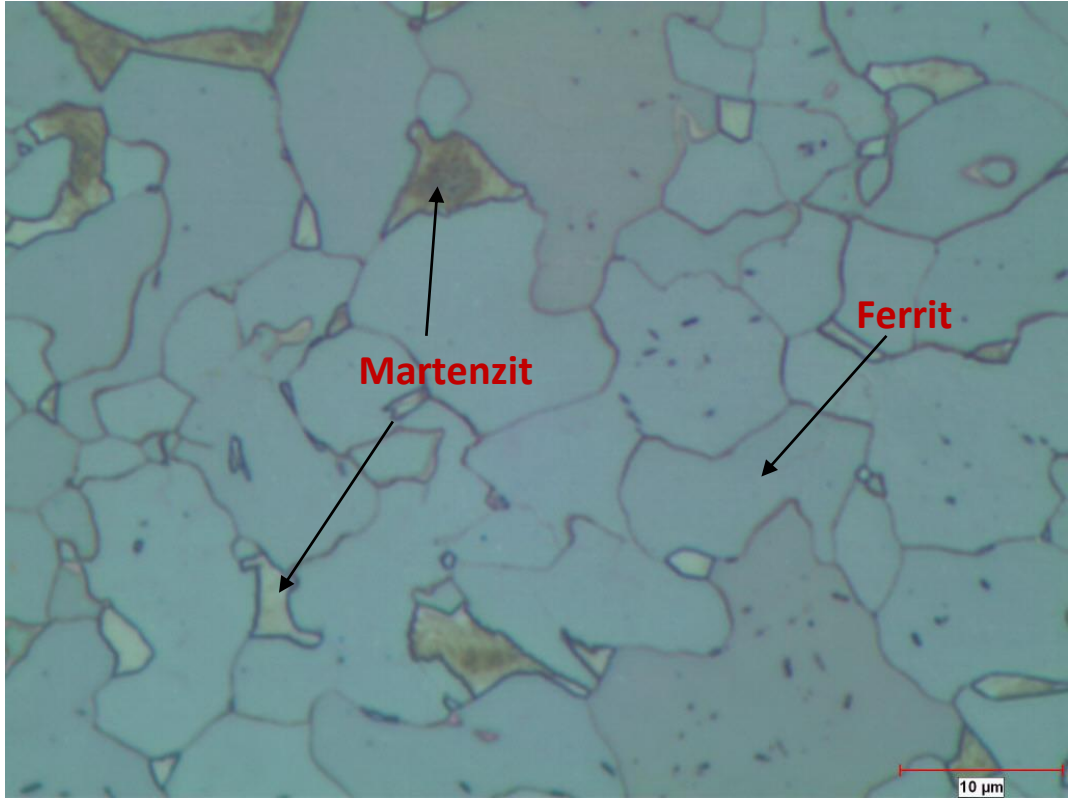
Bobin sarma sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi şekil 4.2’deki grafikte görülmektedir. Bobin sarma sıcaklığının düşük olduğu bölgeler, diğer bölgelere göre soğumanın daha hızlı gerçekleştiği bölgelerdir. Bu bölgelerde akma ve çekme mukavemeti en yüksek seviyededir.



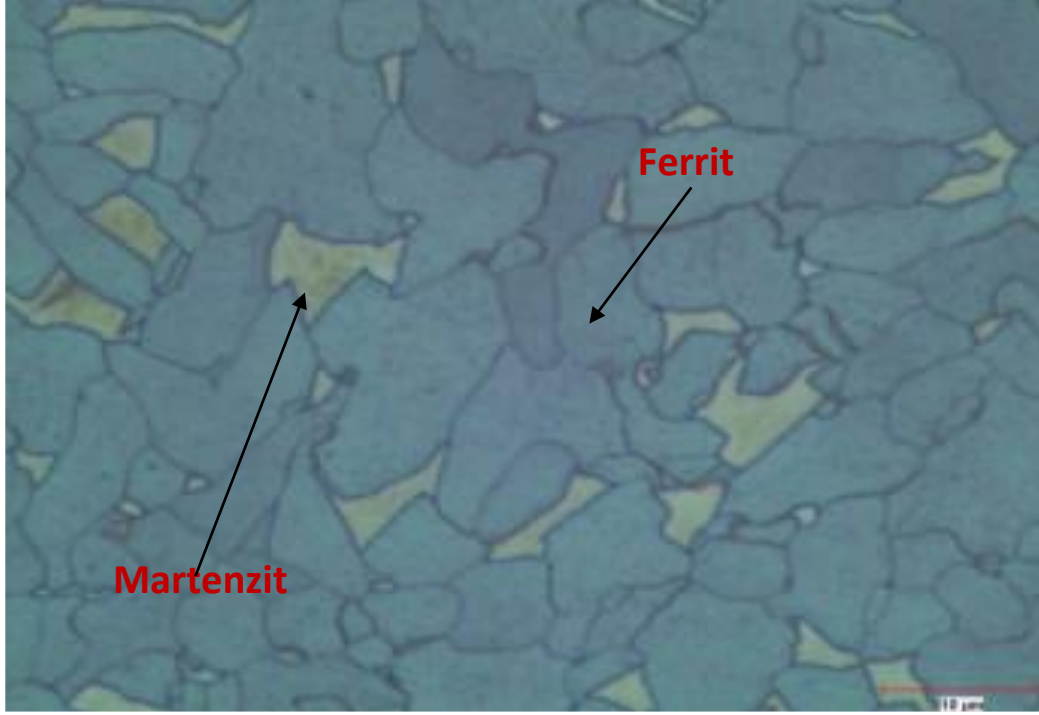
Şekil 4. 2 Bobin boyunca numune alınan bölgelerdeki sıcaklık değişimi

4.4 Mikroyapı Görüntüleri ve Bobin Sarım Sıcaklığı Arasındaki İlişki

Bobin üzerinde belirlenen 7 ayrı sıcaklık bölgesinden mikroyapı inceleme numuneleri alınmıştır. Bobin sarma sıcaklığının düşük olduğu bölgeler, diğer bölgelere göre soğumanın daha hızlı gerçekleştiği bölgelerdir. Soğuma hızı, karbon difüzyonuna etki etmektedir. Bu etkiden dolayı, farklı mikroyapılar oluşabilmektedir. Farklı mikroyapılar ise malzemeye mekanik özellikler olarak yansımaktadır. Belirlenen bölgelere ait martenzit hacim oranları çizelge 4.9’da verilmekte ve 1000 büyütmede çekilmiş mikroyapı görüntüleri şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9 ‘ da yer almaktadır. Yapıdaki beyaz bölgeler martenzitleri göstermektedir.



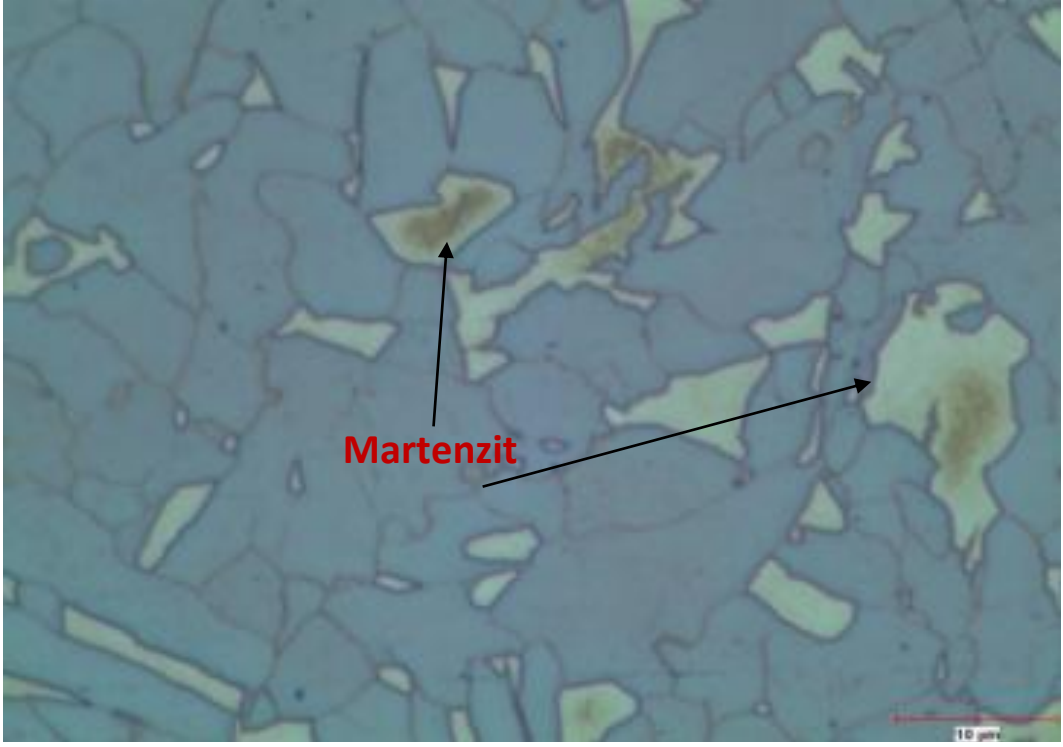
Şekil 4. 3 A bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 5,1 (Sıcaklık 375 °C)



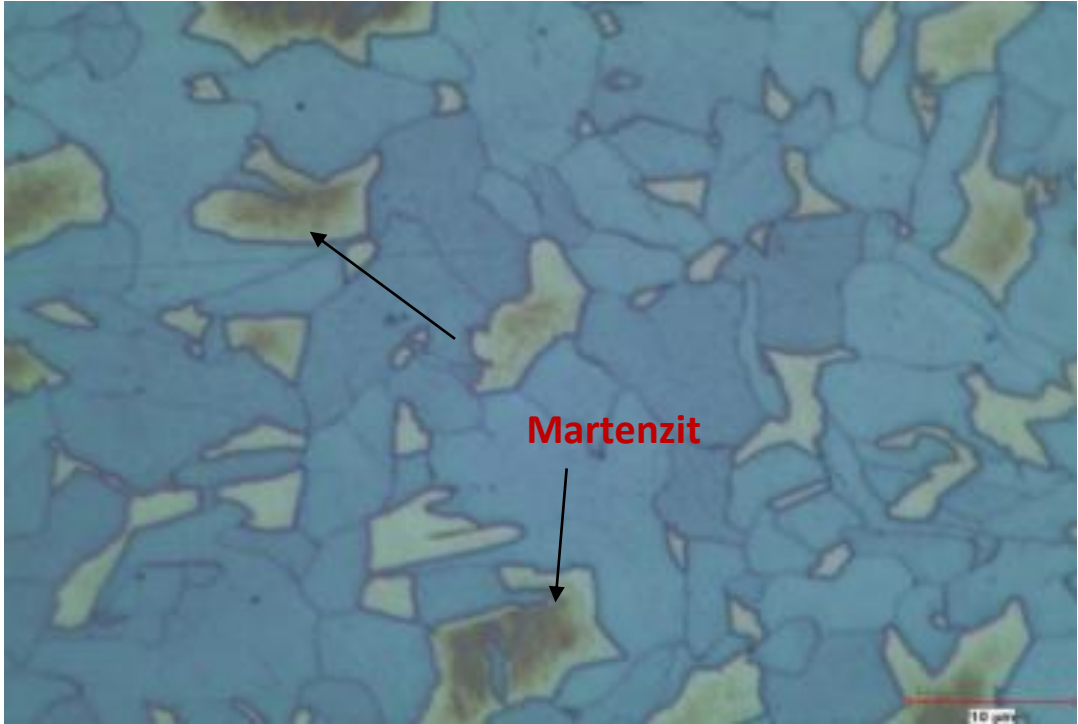
Şekil 4. 4 B bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 9 (Sıcaklık 325 °C)



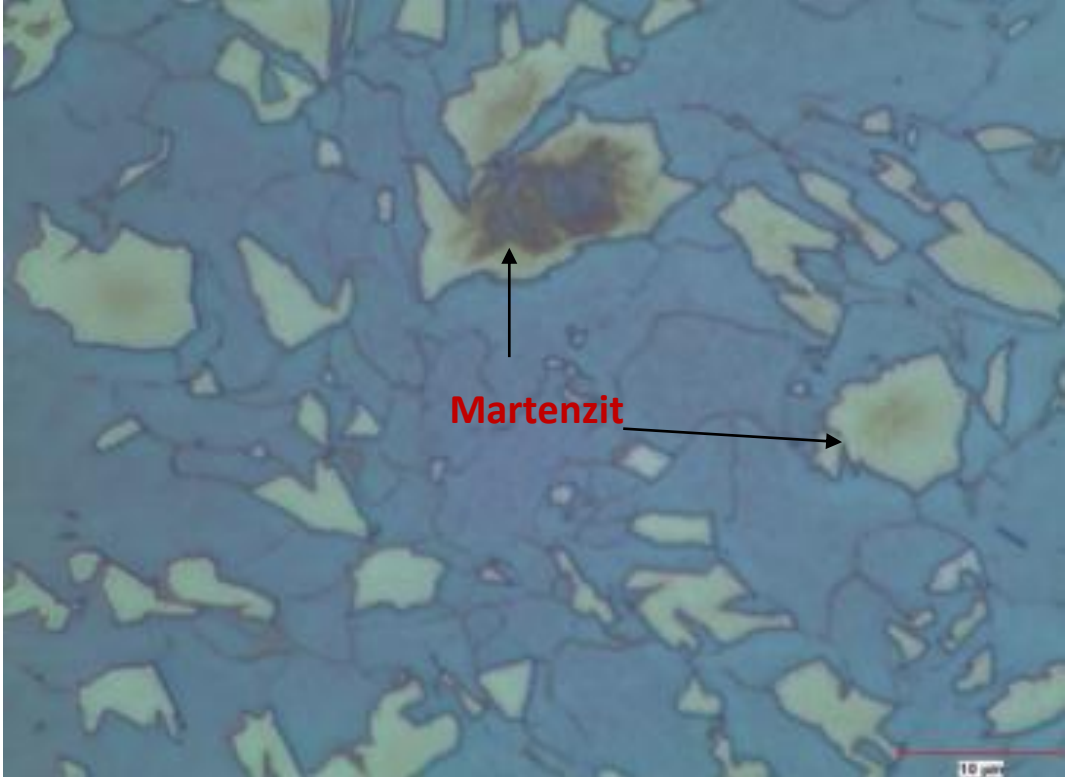
Şekil 4. 5 G bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 13 (Sıcaklık 312 °C)



Şekil 4. 6 D bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 15 (Sıcaklık 250 °C)



Şekil 4. 7 E bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 16,5 (Sıcaklık 250°C)



Şekil 4. 8 C bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 22 (Sıcaklık 225 °C)

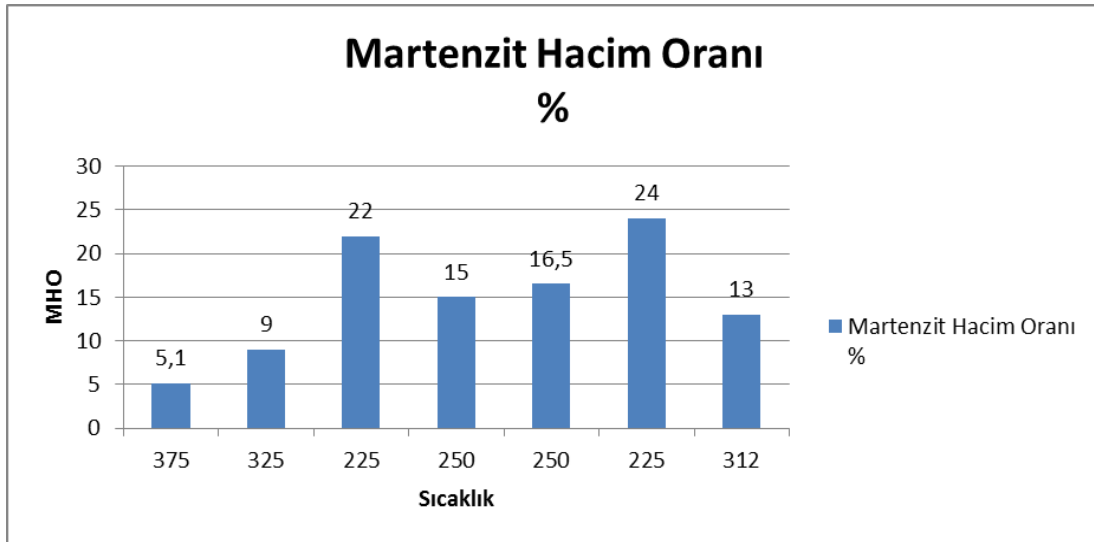


Şekil 4. 9 C bölgesi mikroyapı görüntüsü X1000 büyütme, MHO % 24 (Sıcaklık 225 °C)

Çizelge 4. 9 Bölgelere göre MHO

Bölge	Sıcaklık °C	Martenzit Hacim Oranı %
A	375	5,1
B	325	9
C	225	22
D	250	15
E	250	16,5
F	225	24
G	312	13

Bobin sarma sıcaklığının azalmasıyla birlikte içyapıyı oluşturan fazlardan martenzit hacim oranının arttığı gözlenmiştir. Deneyde kullanılan çeliğin Mn içeriği % 0,8 civarındadır. Şekil 4.10 % 0,8 seviyesinde Mn içeren deney malzemesinin farklı sarım sıcaklıklarındaki MHO'nı göstermektedir. Bu seviye beklenen martenzit dönüşümünü sağlamakla birlikte, Yang [27] yaptığı çalışmada Mn oranını arttırılarak östenitin ferrite dönüşmesinin engelleneceğini, böylece dönüşmemiş östenit tanelerinin martenzite dönüşeceğini ortaya koymuştur.



Şekil 4. 10 Bobin sarım sıcaklığı ile MHO arasındaki ilişki

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Otomotiv endüstrisindeki yakıt tasarrufu üzerine yapılan çalışmalar araştırmacıları malzeme teknolojisine yönlendirmiştir. Araç ağırlığının önemli bir kısmını kullanan çeliğin ağırlığı oluşturmaktadır. Araçta kullanılan parçalarda herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın, parça kalınlıklarının azaltılması ile ağırlık azaltılmasını sağlamaktadır. Böylece yeni nesil araçlar yakıt tasarrufu ve düşük CO₂ salınımıyla hayatımıza girmektedir. Bu çelikler ayrıca enmietenin de çok önemli olduğu otomotiv sektöründe araç gövdesinde kazalar neticesinde oluşabilecek hasarları en iyi şekilde karşılayabilme özelliğine sahiptirler.

Bu çalışmada hafifliği ve dayanımı ile ön plana çıkan çift fazlı çeliklerin üretimi incelenmiştir. Termomekanik haddeme yöntemi ile DP600 kalite çift fazlı çelik üretimi hedeflenmiş ve proses parametrelerinin faz oluşumuna ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde farklı sarım sıcaklığına sahip, dolayısıyla farklı ısı işlem parametreleri ile haddelenen malzemelerin faz oranları tespit edilmiştir. Faz oluşumu için temel parametre bobin sarma sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

1. Bobin sarma sıcaklığı mekanik özellikler üzerinde doğrudan etki göstermektedir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte daha hızlı bir soğuma gerçekleşmekte ve hızlı soğumanın etkisi ile faz dönüşümü tetiklenmektedir. Malzemenin hızlı bir şekilde soğutulması ile martenzitik dönüşüm başlamaktadır.

2. Bobin sarılma sıcaklığı malzemenin mikroyapısındaki faz oranını etkilemektedir. Sarım sıcaklığı düşük olan bölgelerde daha yüksek martenzit oranı tespit edilmiştir.
3. 375 °C sıcaklıkta yapılan deneylerde soğuma hızı düşük kaldığı için etkin bir martenzit oluşumu göstermemiştir. Bu sıcaklık çift faz oluşturmak için gerekli olan faz dönüşümünün başlamasına yeterli olmamıştır.
4. 375 °C sıcaklığa sahip bölge için ölçülen mekanik değerler standardın altında kalmıştır. Bir çift fazlı çelikte, çeliğe mukavemet veren faz martenzittir, süneklik veren faz ise ferrittir. Martenzit oranının düşük olması malzemenin akma ve çekme dayanımını düşürmektedir.
5. Martenzit hacim oranını belirleyen temel faktörler, hadde çıkış sıcaklığı, soğuma hızı, ara bölge bekleme sıcaklığı ve süresi ve bobin sarım sıcaklığıdır.
6. En yüksek martenzit oranı 250 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Bu sıcaklık deneylerde kullanılan en düşük sıcaklık olup, yapıda % 24 oranında martenzit fazı oluşmasına neden olmuştur. Yüksek martenzit oranına bağlı olarak en iyi mekanik özellikler bobinin 250 °C sıcaklıkta sarılan kısmında ölçülmüştür.
7. Diğer tüm parametrelerin sabit olması koşuluyla bobin sarım sıcaklığı düşük olan bölgelerde akma ve çekme mukavemeti ve % MHO en yüksek seviyededir. % uzama ise MHO'nın artmasıyla birlikte azalmıştır. İç yapıdaki ferrit oranı malzemenin % uzama oranını doğrudan etkilemektedir. Sarım sıcaklığı düşük olan bölgede malzemenin mikroyapısında yüksek oranda martenzit, düşük oranda ferrit bulunmaktadır. Bu nedenle en düşük uzama değeri 250 °C sıcaklıkta ölçülmüştür.
8. Mikroyapı incelemelerinde martenzit tanelerinin globular bir görüntü verdiği gözlenmiştir. Bobin sarım sıcaklığının düşmesiyle daha ince taneli bir yapı elde edilmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar, malzemenin kullanım yerine göre seçilebilir. Otomotivde görünür yüzeyde kalan kısımlarda kullanılacak DP 600 kalite çelik için

yüzey kalitesinin iyileştirilmesi önemli bir aşama olabilir. Üretiminin doğası gereği su ile temas halinde olan bu çeliklerde korozyon konusu araştırılabilir.

Slab fırınında yüksek ısı ve bekleme süresinin de etkisi ile malzeme yüzeyinde FeO oksit tabakası oluşmaktadır. Haddeme sıcaklığının 900° C 'nin altında gerçekleşmesi yüzeydeki bu oksit tabakasının kırılarak tozlaşmasına ve artan yüzey alanına bağlı olarak Fe₂O₃ oluşmasına neden olmaktadır. Bu yapışkan ve kırmızı oksit tabakası çelik yüzeyinde deformasyon oluşmaktadır. Bu tür çeliklerin otomotiv endüstrisinde kullanılması yüksek yüzey hassasiyeti gerektirdiğinden ilerleyen çalışmalarda oksit tabakasının giderilmesi incelenebilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Esener, E. ve Uysal, E., (2009). "Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi", Mühendis ve Makine Dergisi, 50:44-49.
 - [2] Sinan, U., (2009). "Çift Fazlı Çelikler", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6:100-113
 - [3] Çetinel, H., (2004). "Çift Fazlı Çelik Saclarda Şekil Alabilirlik", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi , 6(2): 73–80.
 - [4] Hayat, F. ve Demir, B., (2009). "Ticari DP600 Çelik Sacı NDK Birleştirmelerinde Kaynak Süresinin Dalma Derinliği ve Dayanıma Etkisi", 5. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
 - [5] Özcömert, M., "Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum", İstanbul Ticaret Odası, İstanbul 2006.
 - [6] Helms, H., ve Lambrecht, U. (2006). "The potential contribution of light weighting to reduce transport energy consumption", The International Journal of Life Cycle Assessment.
 - [7] Anderson, D., "Application and Repairability of Advanced High-Strength Steels", American Iron and Steel Institute 2008
 - [8] Advanced High-Strength Steel Technologies in the 2013 Ford Fusion, <http://www.worldautosteel.org/>, 24.05.2015
 - [9] Unfccc Kyoto Protokolü
 - [10] Granbom, Y.,(2010). Structure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Materials Science and Engineering Division of Mechanical Metallurgy, Stockholm.
 - [11] Patel, J., Klinkenberg, C., Hulka, K., "Hot Rolled Hsla Strip Steels For Automotive And Construction Applications", Niobium Products Company GmbH
 - [12] Taş, Z., (2006). "Çeliklerde Termomekanik İşlem Uygulamaları", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(1-2):171-178 [13]DPT, (1985). Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Yayın No: 19, Ankara.

- [13] Filipczyk, W., Williams, F., Fu-Hsiang, C., "Advanced Control Of Coiling Temperature In China Steel's Hot Mill", 2005.
- [14] De Cosmo, M., L. M. Galantucci, and L. Tricarico. "Design of process parameters for dual phase steel production with strip rolling using the finite-element method." *Journal of Materials Processing Technology* 92 (1999): 486-493.
- [15] Akay, K., (2005). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çift Fazlı Çeliklerin Fiziksel özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Bursa
- [16] Ahmad, E., et al. "Effect of thermomechanical processing on hardenability and tensile fracture of dual-phase steel." *Materials & Design* 29.2 (2008): 450-457.
- [17] Kabakçı, F., (2006). Çift Fazlı Çeliklerde Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen ilimleri Enstitüsü Metal eğitimi Anabilim Dalı, Karabük
- [18] Buriková, Katarína, and Gejza Rosenberg. "Quantification Of Microstructural Parameter Ferritic-Martensite Dual Phase Steel By Image Analysis." *Hradec nad Moravicí*, 19. – 21. 5. 2009
- [19] Acarer, M., (2005). " Düşük Karbonlu Çelik saclardan Çift Fazlı Çelik Üretimi ve MHO'nın Çekme Özellikleri Üzerine Etkisi " *Teknoloji*, 8(3):237-244
- [20] Demir, B.,Çift Fazlı Çelik Üretimi,Çift Fazlı Çeliklerde Martenzit Hacim Oranı ve Morfolojisinin Çekme Özellikleri Üzerinde etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara
- [21] Hayat, F., Uzun, H. (2011). Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and fracture behaviour of ship and dual phase steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(8), 65-72.
- [22] Krajewski, S., and J. Nowacki. "Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14.2 (2014): 278-286.
- [23] Niakan, H., and A. Najafizadeh. "Effect of niobium and rolling parameters on the mechanical properties and microstructure of dual phase steels." *Materials Science and Engineering: A* 527.21 (2010): 5410-5414.
- [24] Dağışan, E., (2007). Çift Fazlı Çeliklerin Eroziv Aşınma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri
- [25] Gündüz,s., ve Türkmen, V. (2013). "Çift Fazlı Çeliklerde Martenzit Morfolojisinin Statik Deformasyon Yaşlanma Davranışı Üzerine Etkisi" *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 28, No 2: 353-362

- [26] Thomas, G., and J-Y. Koo. "Developments in Strong, Ductile Duplex Ferritic--Martensitic Steels." *Structure and Properties of Dual-Phase Steels* (1979): 183-201.
- [27] TAN, W., HAN, B., WANG, S. Z., YANG, Y., ZHANG, C., & ZHANG, Y. K. (2012). Effects of TMCP Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Economical Dual Phase Steel in CSP. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 19(6), 37-41.
- [28] CAN, A.H., *Malzeme Bilgisi*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006.
- [29] Önal, Ö., (2012). Gazaltı Özlü Telle Birleştirilmiş Çift-Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri Ve % 3,5 NaCl Çözeltisindeki Korozyonu, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Anabilim Dalı, Sakarya
- [30] Fallahi, A. (2001), "Microstructure Properties Correlation of Dual Phase Steels Produced by Controlled Rolling Process", *J Mater. Sci. Technol.* , 18(5)
- [31] Bleck, W., Hulka, K., & Papamentellos, K. (1998). "Effect of Niobium on the Mechanical Properties of TRIP steels", *Materials science forum* (Vol. 284, pp. 327-334).
- [32] Suwanpinij, P., Prah, U., Bleck, W., & Kawalla, R. (2012). Fast algorithms for phase transformations in dual phase steels on a hot strip mill run-out table (ROT). *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(3), 305-311.
- [33] Hu, J., Du, L. X., Wang, J. J., & Sun, Q. Y. (2014). Cooling process and mechanical properties design of hot-rolled low carbon high strength microalloyed steel for automotive wheel usage. *Materials & Design*, 53, 332-337.
- [34] Džupon, M., Homolová, W., Sinaiová, I., Čiripová, J., (2010) "Possibilities Of Prediction Of The Martensite Volume Fraction In Dualphase Microalloyed Low-Carbon Steels", 18. - 20. 5. 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Česká Republika.
- [35] Erdogan, M., & Tekeli, S. (2002). The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface-carburized AISI 8620 steel with a dual-phase core microstructure. *Materials Characterization*, 49(5), 445-454.
- [36] Sun, S., & Pugh, M. (2002). Properties of thermomechanically processed dual-phase steels containing fibrous martensite. *Materials Science and Engineering: A*, 335(1), 298-308.
- [37] Peng-Heng, Chang, and A. G. Preban. "The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel." *Acta Metallurgica* 33.5 (1985): 897-903.
- [38] Erdogan, M. (2003). Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steel. *Scripta Materialia*, 48(5), 501-506.

- [39] Hüseyin, A., Havva, K. Z., & Ceylan, K. (2010). Effect of intercritical annealing parameters on dual phase behavior of commercial low-alloyed steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(4), 73-78.
- [40] Ning, L. X., Yang, D. J., Lin, J., & Dean, T. A. (2010). Effect of Laminar Cooling on Phase Transformation Evolution in Hot Rolling Process. *Journal of iron and steel research, International*, 17(10), 28-32.
- [41] Dziedzic, M., & Turczyn, S. (2010). Experimental and numerical investigation of strip rolling from dual phase steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(4), 21-30.
- [42] Peranio, N., Li, Y. J., Roters, F., & Raabe, D. (2010). Microstructure and texture evolution in dual-phase steels: Competition between recovery, recrystallization, and phase transformation. *Materials Science and Engineering: A*, 527(16), 4161-4168.
- [43] Lee, J., Lee, S. J., & De Cooman, B. C. (2012). Effect of micro-alloying elements on the stretch-flangeability of dual phase steel. *Materials Science and Engineering: A*, 536, 231-238.
- [44] Marcus, P. (2014). Autobody Warfare, Aluminium Effect. *World Steel Dynamics*.
- [45] Vehicle Design Lightweighting Kit, <http://www.worldautosteel.org/>, 24.05.2015

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sinem YILDIRIM
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.06.1987 - Hekimhan
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : sinemyildirim@yandex.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Met. Ve Malz. Müh	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Malatya Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Ereğli Demir Ve Çelik Fab. TAŞ.	Ürün Uzmanı (Sıcak haddlenmiş ve Levha Ürünler)
2010	Ereğli Demir Ve Çelik Fab. TAŞ.	Satış ve Pazarlama Uzmanı

YAYINLARI

Bildiri

1. Dağlılar S., Yıldırım S., "Effect of laminar cooling parameters on martensite volume fraction and mechanical properties of hot rolled dual phase steel",VI. International Metallurgical Congress, Metallurgy, Materials, Enviromental (MME), Ohrid, Macedonia, 73, 29 May-01 Jun 2014.