

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİKSO DÖVME PROSES PARAMETRELERİNİN
ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İsa Metin ÖZKARA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

EYLÜL 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİKSO DÖVME PROSES PARAMETRELERİNİN
ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**İsa Metin ÖZKARA
(506082411)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

EYLÜL 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506082411 numaralı Doktora Öğrencisi İsa Metin ÖZKARA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TİKSO DÖVME PROSES PARAMETRELERİNİN ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Burak ÖZKAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Can KURNAZ
Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Selim Yıldırım
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 12 Temmuz 2019
Savunma Tarihi : 18 Eylül 2019



Rahmetli Babama,





ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim süresince büyük bir sabır ve özveriyle bana her yönden destek olan, tüm bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşarak karşılaştığım sorunlara yardımcı olan ve bana her konuda desteğini esirgemeyen danışman hocam Sn. Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, lisansüstü eğitimindeki ilk günden itibaren her zaman desteğini benden esirgemeyen, her konuda bana yol gösteren, karşılaştığım sorunlarda bana pratik çözümler sunarak farklı bakış açıları kazanmamı sağlayan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU ve Sn. Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya, çalışmalarımız sırasında bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen Sn. Dr. Öğr. Üy. Nuri SOLAK'a, Sn. Uzm. Faiz MUHAFFEL'e, Sn. Dr. Öğr. Üyesi Yakup YÜREKTÜRK'e ve İ.T.Ü. Mekanik Metalurji laboratuvarında çalışan tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Lisans eğitimimden itibaren, gerek yüksek lisans ve gerekse doktora çalışmalarım süresince, desteğini, bilgi birikimini, tecrübesini ve imkanlarını esirgemeyen ve beni her zaman motive eden değerli hocam Sn. Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm çalışmalarda sağladıkları imkanları, paylaştıkları tecrübeleri, bu alanda yetişmemi, ilerlememi sağlayan bir okul niteliğindeki ortamıyla, bu çalışmanın en büyük destekçilerinden başta Kanca A.Ş. Genel Müdürü Sn. Alper KANCA'ya, Üretim Müdürü Sn. Nail TEZSAY'a, Sonlu elemanlar analizinde ve tasarım çalışmalarındaki destekleri için Sn. Hakan ÖZTÜRK'e, Ar-Ge Bölümünde çalışan değerli ekip arkadaşlarıma ve desteğini esirgemeyen tüm Kanca A.Ş. ailesine teşekkürü borç bilirim.

Profesyonel iş hayatıma ilk adımımı attığım günden itibaren, her konuda beni destekleyen, bana inanan ve yol gösteren, karşılaştığımız her sorunda yeni çözümler sunan, bilgi ve tecrübesini hiçbir şekilde benden esirgemeyen, Kanca A.Ş. Ar-Ge müdürü, Sn. Taner MAKAS'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım süresince tüm imkanlarıyla bana destek olan, teknik sıkıntılar karşısında yeni çözümler bulan ve benimle birlikte mesai yapan tüm SAYKON İndüksiyon çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın başlangıcında yaşanan teknik sıkıntılar karşısında tüm imkanlarıyla bana destek olan, tecrübe ve fikirlerini esirgemeyen ve bu süreçte her zaman beni motive eden yol arkadaşlarım Özgür YURTGAN, Mustafa ÇETİNKAYA ve Ümit KAPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimim boyunca iyi ve kötü günde yanımda olan değerli dostlarım Dr. Öğr. Üyesi Levent ÖNCEL, Dr. Öğr. Üyesi Ramazan KARSLIOĞLU, Yaşar AKÇA ve Fatih KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni her yönden destekleyen ve her zaman yanımda olan, bana inancını hiç yitirmeyen çok değerli ailemin tüm bireylerine ve özellikle çalışmalarım sırasında bana en çok inanan, yanımda olan ve her türlü fedakarlığı gösteren, beni cesaretlendiren çok değerli eşime ve aslında onunla geçirmem gereken tüm zamanlardan fedakarlık gösterip de ona güzel bir gelecek kurmak için çabaladığım oğluma sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Unutmayın, inanırsanız üstün gelecek olan sizlersiniz.

Eylül 2019

Saygılarımla

Met ve Malz.Yük.Müh. İsa Metin ÖZKARA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. METALLERİN MEKANİK ŞEKİLLENDİRİLMESİ	3
2.1 Mekanik Şekillendirmeye Genel Bakış	3
2.1.1 Soğuk şekillendirme	4
2.1.2 Ilık şekillendirme	5
2.1.3 Sıcak şekillendirme	5
2.2 Metallerin Mekanik Şekillendirme Yöntemleri	6
2.2.1 Ekstrüzyon	6
2.2.2 Haddeleme	8
2.2.2.1 Çubuk ve profillerin haddelenmesi	9
2.2.3 Dövme	11
2.2.3.1 Soğuk dövme	12
2.2.3.2 Ilık dövme	13
2.2.3.3 Sıcak dövme	15
2.2.4 Dövme yöntemlerinin endüstriyel uygulaması	16
3. YARI KATI ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ	17
3.1 Yarı Katı Şekillendirme Yöntemlerine Giriş	17
3.2 Çeliklerin Yarı Katı Şekillendirilmesi İle İlgili Literatür Çalışmaları	20
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
4.1 Deneysel Malzemeler	32
4.2 Yarı Katı Faz Aralığının Belirlenmesi	32
4.3 Yarı Katı Fazların Elde Edilmesi için Ön Hazırlık Çalışmaları	33
4.4 Mikroyapı Karakterizasyonu	34
4.5 Sertlik Ölçümleri	35
4.6 Tikso Dövme İşlemi	35
4.7 Çekme Deneyi	37
4.8 Çekme Deney Numuneleri Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	37
4.9 Tikso Dövme Numunesinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi	38
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	39
5.1 Tikso Dövme Sıcaklığına Isıtmak Amacıyla Kullanılan Sistemler	39
5.1.1 Levha indüksiyon sistemi	39

5.1.2 Yatay indüksiyon sistemi	43
5.1.3 Dikey indüksiyon sistemi	44
5.2 Yarı Katı Faz Aralığının Belirlenmesi	48
5.3 Mikroyapı İncelemeleri ve Sertlik Ölçümleri	51
5.3.1 Tikso sıcaklığından su verilen 100Cr6 kalite çeliğin mikroyapı incelemeleri	53
5.3.2 Tikso sıcaklığından su verilen C70S6 kalite çeliğin mikroyapı incelemeleri	57
5.4 Dikey İndüksiyon Sisteminde İyileştirme Çalışmaları	60
5.4.1 Sonlu elemanlar analiz modelinde iyileştirme	63
5.5 Tikso Dövme İşleminin Uygulanması	66
5.6 Tikso Dövme Numunesi Çekme Deneyi Sonuçları	69
5.7 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	71
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

LTT	: Düşük Tikso Dövme Sıcaklığı (Low Thixoforging Temperature)
Sn.	: Saniye
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi (Energy Dispersive Spectroscopy)
vd.	: Ve diğerleri
NNS	: Son Şekle Yakın Ürün (Near Net Shapes)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
Tc	: Termoçift (Thermocouple)
TZM	: Titanyum-Zirkonyum-Molibden Alaşımı
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition)
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapour Deposition)
Hz	: Hertz
kW	: Kilo watt
Pt	: Platin
Gr	: Gram
mm	: Milimetre
kJ	: Kilojoule
kN	: Kilonewton



SEMBOLLER

°C : Santigrat Derece

% : Yüzde

Ø : Çap





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Ticari C38 ve 100Cr6 ve LTT alaşımlarının katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıkları.....	29
Çizelge 4.1 : C70S6 mikroalaşımlı çeliğine ait kimyasal içerik.....	32
Çizelge 5.1 : Seçilen alaşımlara ait belirlenen solidüs – likidüs sıcaklıkları.....	51
Çizelge 5.2 : Orijinal 100Cr6 ve C70S6 çeliklerine ait mikro sertlik ölçümleri.	53
Çizelge 5.3 : Geleneksel sıcak dövme ve optimum parametredeki tikso dövme biyel kolu mekanik özellikleri.	71



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Çeliklerin tikso şekillendirme sıcaklıkları ve hacimsel sıvı oranları	19
Şekil 3.2 : (a) X210CrW12 (b) 100Cr6 çeliklerin mikroyapı fotoğrafları	23
Şekil 3.3 : “Rheo-route” yönteminin proses adımları.....	25
Şekil 3.4 : “Rheo-route” yöntemi ile elde edilen (a) X210CrW12 ve (b) 100Cr6 kalite çeliklerin mikroyapı fotoğrafları	26
Şekil 4.1 : Tikso şekillendirme için tasarlanan biyel kolu kalıbı.....	36
Şekil 4.2 : Tikso şekillendirilmiş biyel kolundan ASTM E-8/8M standartlarına göre hazırlanan çekme numunesi şekil ve boyutları	37
Şekil 5.1 : Mengene ağızı sertleştirilmesinde kullanılan indüksiyon cihazı.....	40
Şekil 5.2 : Levha indüksiyon cihazında ısıtılan 100Cr6 numunesi ve farklı sıcaklıklardaki mikroyapı fotoğrafları.....	41
Şekil 5.3 : Levha indüksiyon cihazında ısıtılan C70S6 numunesi ve farklı sıcaklıklardaki mikroyapı fotoğrafları.....	42
Şekil 5.4 : Özel tasarım yatay indüksiyon sistemi.....	43
Şekil 5.5 : Yatay indüktörde (a) kısmi ergime ve (b) tikso sıcaklık aralığında ısıtılan numuneler.....	44
Şekil 5.6 : Özel tasarım dikey indüksiyon sistemi.....	45
Şekil 5.7 : (a) ve (b) 1380°C’den su verilerek soğutulan 100Cr6’a ait mikroyapı görüntüleri.	47
Şekil 5.8 : (a) ve (b) 1400°C den su verilerek soğutulan 100Cr6 çeliğine ait mikroyapı görüntüleri.....	47
Şekil 5.9 : ThermoCALC programı ile elde edilen C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliğe ait faz diyagramı.....	48
Şekil 5.10 : C70S6 kalite çeliğe ait soğuma eğrisi ve belirlenen sıcaklıklardaki katı-sıvı oranı.....	49
Şekil 5.11 : ThermoCALC programı ile elde edilen 100Cr6 kalite mikro alaşımlı çeliğe ait faz diyagramı.	50
Şekil 5.12 : 100Cr6 kalite çeliğe ait soğuma eğrisi ve belirlenen sıcaklıklardaki katı-sıvı oranı.....	50
Şekil 5.13 : Orijinal (a) 100Cr6 ve (b) C70S6 kalite çeliklerin farklı büyütmelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları.	52
Şekil 5.14 : Farklı sıcaklıklardan ani su verilmiş 100Cr6 numunelerinin optik mikroyapı fotoğrafları	54
Şekil 5.15 : 1340°C’den su verilen 100Cr6 mikro alaşımlı çeliğin optik mikroyapı fotoğrafı.....	55
Şekil 5.16 : Su verilmiş 100Cr6 numunelerine ait sertlik ölçüm sonuçları.....	56
Şekil 5.17 : Farklı sıcaklıklardan su ortamında soğutulmuş C70S6 numunelerinin optik mikroyapı fotoğrafları	57
Şekil 5.18 : Farklı yarı katı şekillendirme sıcaklıklarında C70S6 kalite çeliğe ait hacimsel katı ve sıvı faz oranları.....	59

Şekil 5.19 : 1450 °C’den su verilen C70S6 numunesine ait (a) SEM görüntüsü ve (b) İnküzyonun EDS analizi.....	60
Şekil 5.20 : Su verilmiş C70S6 numunelerine ait sertlik ölçüm sonuçları	60
Şekil 5.21 : Dikey indüksiyon sisteminde tikso sıcaklığına ısıtılan C70S6 numuneleri	61
Şekil 5.22 : Farklı sıcaklıklarda yapılan ilk tikso dövme denemelerinde elde edilen biyel kolu örnekleri	62
Şekil 5.23 : 1440°C’de tikso şekillendirilmiş biyel kolundaki dövme kusurları (a) Kusurların genel görünümü (b) Katlanma hatasının makro dağlama ile kesitten tespiti ve mikroyapı görünümü.	64
Şekil 5.24 : Sonlu elemanlar analizi sonucu görüntülenen dövme hataları	64
Şekil 5.25 : Yeni tasarlanan biyel kolu formu	65
Şekil 5.26 : Eski ve yeni tasarım biyel kolunun sonlu elemanlar analiz sonuçları....	65
Şekil 5.27 : Tikso şekillendirme için hazırlanan biyel kolu kalıbı	66
Şekil 5.28 : Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen biyel kolları	67
Şekil 5.29 : (a) Geleneksel sıcak dövme mikroyapısı (b) Tikso dövme mikroyapısı	68
Şekil 5.30 : (a) Geleneksel dövme (b) tikso dövme numunelerinin SEM mikroyapı fotoğrafları.....	68
Şekil 5.31 : Tikso dövme ve geleneksel dövme ile şekillendirilen biyel kollarına ait deney numuneleri	70
Şekil 5.32: Tikso dövme ve geleneksel dövme ile şekillendirilen biyel koluna ait gerilme - yer değiştirme eğrisi.....	70
Şekil 5.33 : Çekme deneyi sonrası elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. (a) ve (b), geleneksek sıcak dövme numuneleri, (c) ve (d) tikso dövme numuneleri.....	72

TİKSO DÖVME PROSES PARAMETRELERİNİN ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu doktora tez çalışmasının amacı yarı katı faz dönüşüm sıcaklıklarında çeliklerin tikso dövme ile şekillendirilmesi için gerekli parametrelerin incelenmesi ve en uygun parametrelerde endüstriyel bir prototip ürün üretilmesini sağlamaktır.

Çeliklerde tikso dövme ile ilgili günümüze kadar laboratuvar ölçekli çok sayıda çalışma yapılmış olması sebebiyle, öncelikle tikso dövme için gerekli koşullar belirlenmiş ve başarılı olan tüm çalışmalarda belirtilen parametreler üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

Yapılan çalışmaların en önemli iki özelliği, tikso sıcaklık aralığı geniş metallerin kullanılması ve ısıtma ekipmanı olarak indüksiyon sisteminin tercih edilmesidir. İndüksiyon sistemi, özellikle metal ve alaşımlarında daha hızlı ve stabil bir ısıtma sağladığı için bu sistem tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın özgün yanı, hali hazırda ticari olarak kullanılan bir çelik kalitesinde (C70S6) tikso dövme çalışmasının yapılmış olması ve bu çelik kullanılarak üretilen biyel kolunun endüstriyel tikso dövme proses parametrelerin belirlenmiş olmasıdır.

Yapılan bu çalışmada otomotiv sektöründe en çok kullanılan C70S6 ve 100Cr6 mikro alaşımlı çelikler tercih edilmiştir. Bu çeliklerin diğer bir özelliği ise, yarı katı faz aralığı geniş olması sebebiyle tikso dövmeye uygun çelikler olmasıdır. Özellikle 100Cr6 yarı katı şekillendirme çalışmalarında en çok tercih edilen mikro alaşımlı çelik türüdür. C70S6 ise 100Cr6'ya göre yarı katı faz aralığı dar olmasına rağmen, otomotiv sektöründe en çok kullanılan mikro alaşımlı çeliktir.

Yapılan bu çalışmada öncelikle, mevcut bilimsel çalışmalar değerlendirilmiş ve yarı katı şekillendime çalışmalarının bilimsel ve teknik anlamda ortak noktaları belirlenmiştir. Bu sayede kullanılacak yöntemler ve teçhizatlar konusunda araştırmalar yapılmıştır.

Deneyisel çalışmaların başarılı olabilmesi için öncelikle proses gereksinimleri tanımlanmıştır. Bu sebeple, ısıtma düzeneğinin en önemli unsur olduğu farkedilmiştir. Yapılan mevcut çalışmalarda farklı indüksiyon sistemleri kullanıldığından, mevcut çelik türlerinin yarı katı faz aralığına doğru şekilde ısıtılması için farklı tip indüksiyon cihazlarında denemeler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle levha tip indüksiyon cihazı kullanılmış ve proses sıcaklığı belirlenerek elde edilen mikroyapılar incelenmiştir. Daha sonra ısıtma rejiminin avantajı kullanılarak yatay indüksiyon fırını kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak yatay indüksiyon cihazında, yüksek sıcaklıklarda numunelerin transferinde yaşanan zorluklar ve sıcaklık ve ısıtma süresinin kontrollü olmaması sebebiyle sistem geliştirilerek dikey tip indüksiyon cihazı kullanılmasına karar verilmiştir.

Dikey indüksiyon sisteminde her iki elik için yarı katı faz aralığı belirlenerek, bu faz aralığında seçilen sıcaklıklara kadar numuneler ısıtılmış ve su verilerek elde edilen mikroyapı farklılıkları incelenmiştir.

Her iki elik için farklı tikso dövme sıcaklıkları belirlendikten sonra, otomotiv sektöründe biyel kollarında kullanılan C70S6 mikro alaşımlı çeliğinin belirlenen parametrelerle tikso dövme ile şekillendirilmesi sağlanmıştır.

Farklı sıcaklıklarda yapılan denemeler sonrasında, kapalı kalıp sisteminde tikso dövme işlemi ile biyel kolu prototipi üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelenerek, proses parametreleri geliştirilmiş ve iyileştirme çalışmaları üzerinde durulmuştur.

Optimum parametreler ile elde edilen biyel kolu prototipinde çeşitli mekanik deneyler yapılmış ve sonuçlar geleneksel sıcak dövme ile üretilen biyel kolu numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan alışmalar sonucunda tikso dövme ile üretilen biyel kolunun mekanik özelliklerinin, geleneksel dövme ile üretilen biyel kolunun mekanik özelliklerini yeterli oranda karşıladığı görölmüştür.

Tüm bu alışmalar TÜBİTAK TEYDEB (Proje No: 3130030) projesi kapsamında gerçekleştirilmiş ve başarılı şekilde sonuçlandırılmıştır.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THIXO FORGING PROCESS PARAMETERS ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF STEELS

SUMMARY

The purpose of this doctoral thesis study is to examine the thixoforging parameters of steels at semi solid phase transformation temperatures and to produce an industrial prototype product with the most suitable parameters.

Since there are many laboratory scale thixoforging studies for various steels in the literature, the required parameters for the thixoforging have been determined and improvements have been made on the process parameters specified in all these successful studies. The two most important characteristics of the subjected thixoforging studies are the use of metals which have wide thixo temperature range and the preference of the induction heating system as an equipment.

The novelty of this study arises from a commercial grade steel (C70S6) was employed and industrial thixoforging process parameters of a prototype connecting rod made of this steel was determined.

In this study, the most commonly used C70S6 and 100Cr6 micro alloyed steels which are also preferred in the automotive industry have been preferred for our trials. Another feature of these steels is that they are suitable for thixoforging applications due to their wide range of semi-solid phase.

In particular, 100Cr6 is the most preferred type of micro alloyed steel in semi-solid forging works and C70S6 is the most widely used micro alloy steel in the automotive industry, although the semisolid phase range is narrow. Based on this reason, limited laboratory scale trials were performed by using this type of steel until now.

In this study, firstly, the existing scientific studies were evaluated and the common points of the semi-solid shaping studies in scientific and technical terms were determined. In this way, researches have been made on the methods and equipments to be used.

During the study, firstly, semi-solid phase intervals were determined for both steels and the samples were heated up to the selected temperatures in this range and the microstructure differences obtained by water quenched were investigated. Both, numerical and theoretical ways were used for identifying semi solid intervals and phase diagrams for both steels.

Especially, ThermoCALC software was used for determining semi solid temperatures and intervals, then trials in different induction devices helped us for confirming all outputs of ThermoCALC software.

In order for the experimental studies to be successful, the process requirements are defined first. Therefore, it has been recognized that the heating device is the most important element. Since different induction systems are used in the current studies, different types of induction devices have been tested for the proper heating of the existing steel alloys to determine semi solid phase range.

For this purpose, plate induction device was used firstly and microstructures obtained by determining process temperature were examined. This plate induction device is already used in forged hand tools production line for hardening of tool surfaces.

Plate induction device helped us for first trials of thixoforging temperatures which we want to reach out. Thanks to this device, the effects of the temperatures mentioned in the literature were confirmed on the microstructure of the steels. It was then decided to use the horizontal induction furnace using the advantage of the heating regime. In addition, homogenous heating can be obtained by horizontal induction furnace by using different type of thermocouples.

Due to some issues on heating control inputs and transferring problem between furnace and die tools, vertical induction furnace were designed and further trials were performed in this developed system. By using new vertical induction system, different thixoforging temperatures were confirmed which was already mentioned by ThermoCALC results previously.

After experimental studies at elevated temperatures, the prototype of the connecting rod was produced by thixoforging method in the closed die system. For this purpose, 1/7 scales of commercial connecting rod was designed for trials and thixoforging was done within selected temperatures. In order to manufacture the connecting rods by thixoforging process, a fully closed die assembly was designed. In this design, the sample workpiece is first placed on the punch of the lower die. After closing the upper and lower dies, lower punch is moved upward by a mechanical press with a capacity of 400 tons into the closed die cavity to form the billet. The connecting rod was ejected from the die and cooled down to room temperature in air.

After determining different thixoforging temperatures for both steels, it was ensured that C70S6 micro alloyed steel used for connecting rods in automotive industry was shaped by thixoforging with selected heating parameters in the range of 1400-1460°C

During all experiments, die temperature was controlled in the range of 100 and 150°C. At the temperature of 1400°C, the die could not be completely filled by the material and only the big end of the connecting rod could be formed. Increasing the forging temperature by about 20°C (1420°C), although a larger volume of the die could be filled by the material, it was still insufficient for obtaining the connecting rod in its final form and some materials resulted in flash formation around the big end. Thixoforging temperature of 1440°C exhibited almost complete formation of the big end without any flash formation. At this temperature, however, the small end of the connecting rod could not be properly obtained, and a fold formation in the big end toward the beam section of the connecting rod was also observed.

Further increasing the forging temperature to 1460°C to see the effect of much higher temperature, although provided material flow in some extent toward the small end, the obtained shape was far from the desired geometry of the connecting rod and the flash formation around the big end was reappeared.

According to the results of thixoforging experiments performed in this study, the samples thixoforged at 1440°C resulted in better forms of the connecting rod among the others. In those samples, liquid volume fraction was estimated around 0.35. On the other hand, those samples still contain some imperfections such as incomplete formation of the small end and fold formation in the big end toward the beam section of the connecting rod, both of which need to be corrected.

The induction heating device and the mechanical press were located very close to each other to minimize the temperature drop as much. By analyzing the obtained results, optimum process temperature was determined due to flash ratio and visual inspection results about surface quality. Then, process parameters were developed and improvement studies were emphasized for new trials. Thixoforging experiments were repeated by using the modified die design, and it was shown that these imperfections on the connecting rod could be eliminated.

Various mechanical tests and microstructural examinations were performed on the connecting rod prototype obtained by optimum parameters and the results were compared with the connecting rod samples produced by conventional hot forging.

For the microstructural examinations, samples were prepared in the standard metallographic procedure and examined by optical microscope and scanning electron microscope after etching. A scanning electron microscope equipped with EDS was also used for semiquantitative identification of the second-phase particles in the microstructure of as-quenched samples. Prior austenite grain size was determined according to the lineal intercept method, while volume fraction was estimated by the point counting method. Interlamellar spacing of pearlite was calculated as the mean true spacing in accordance with the procedure proposed. Hardness was measured under a load of 10 kg. At least five measurements were taken on the surface of each sample, and the results were averaged.

Tensile test samples which were machined from the thixoforged connecting rods were subjected to tensile test at a crosshead speed of 2 mm/min. Samples which were produced by conventional hot forging at 1280°C were also subjected to tensile test for comparison. Following the tensile tests, fracture surface of the samples was examined by a scanning electron microscope. In order to check the thixoforged connecting rods against any defects arising from the forming process and die design, finite element analysis was performed by a finite element analysis software.

As a result of this study, the mechanical properties of the thixoforged connecting rod meet the mechanical properties of conventional hot forging. Thixoforging of C70S6 steel has been assessed by using a scaled-down model of a commercial vehicle connecting rod. The current work has demonstrated that C70S6-grade steel can be successfully thixoforged at 1440°C in the form of scaled-down connecting rod without excessive flash formation.

Mechanical test results showed that hardness and strength values after thixoforging can be maintained at almost similar levels with those presented by conventional hot forging. However ductility is significantly decreased due to grain boundary ferrite network upon thixoforging. This results tell us for the success of this study and also means thixoforging may used for different type of forged parts instead of conventional hot forging for several industrial application.

All of these studies were carried out within the scope of TÜBİTAK TEYDEB project (Project No: 3130030) and were successfully completed.

1. GİRİŞ

Metal şekillendirmenin tarihi, insanoğlunun ateşi bulması, madenleri keşfetmesi ve tüm bunları kendi ihtiyaçları doğrultusunda kullandığı dönemlere kadar uzanmaktadır. İnsanlar madenleri işlemeyi ve şekillendirmeyi keşfettikten sonra, dönemin ihtiyaçları doğrultusunda, savaş aletleri, tarım araçları, madeni paralar ve mücevherler üretmişlerdir. Tüm bunların üretiminde, çoğunlukla madenleri ateş ve kas gücü ile şekillendirmeyi başarmışlardır. Günümüzdeki çok çeşitli ve farklı teknolojilere sahip cihaz ve ekipmanlar yerine, o dönemlerde insanlar metalleri kas gücüyle şekillendirmekteydi.

Günümüzde kullanılan birçok araç ve teknolojinin temeli, aslında insanlık tarihin en eski dönemlerine kadar uzanmaktadır. Üretim yöntemleri açısından günümüzde birçok yeni teknoloji kullanılsa da dövme yöntemi, metal şekillendirme yöntemleri içerisinde en eski olanlarından biridir.

Yaşam şartlarının değişmesiyle, farklı madenler ve malzemeler keşfedilmiş, kullanım ihtiyaçları artmış ve insanlar mevcut yöntemleri geliştirmek zorunda kalmışlardır. Zamanla teknolojiye yaşanan değişim, ticari ve sosyoekonomik devrimler sayesinde üretimler endüstriyel hale gelmiştir.

Metalurji ve malzeme bilimi, yukarıda bahsedilen tüm bu gelişmelerden en çok etkilenen ve insanlık tarihinin temelinde olan bir bilimdir. İnsanlar ihtiyaçları arttıkça, zamanla yeni kaynaklar, metaller, alaşımlar, üretim yöntemleri keşfetmiş ve bunu hayatlarını kolaylaştırmak için kullanmışlardır. Parçanın kullanıldığı yere göre üretim yöntemi de değişmektedir. Çünkü kullanılan malzemenin türüne ve istenilen özelliklere göre üretim yöntemi de değişmesi gerekir. Ekstrüzyon, haddeleme, döküm ve dövme, üretimde en çok tercih edilen şekillendirme yöntemleridir. Tüm bu şekillendirme yöntemlerinin temelinde malzemelerin plastik şekil değiştirme esasları vardır. Genellikle mekanik özelliklerin önemli olduğu, basit geometriden çok, karmaşık şekilli parçalara ihtiyaç duyulduğunda dövme yöntemi ön plana çıkmaktadır.

Günümüzde dövme teknolojisi, artık kas gücüyle değil büyük presler, makineler ve teçhizatlar kullanılarak yapılmaktadır. Dövme yönteminde, basit şekilli bir parçaya kalıplarla basınç uygulandıktan sonra, parça istenilen şekilde elde edilmektedir. Bölüm 2’de detaylı olarak anlatıldığı gibi dövme teknolojisi kendi içinde çeşitlere ayrılmaktadır ve bu yöntemi etkileyen birçok parametre mevcuttur. Genellikle sıcaklık ve kullanılan kalıbın türü, dövme türünü belirleyen en önemli parametredir. Günümüzde dövme ile üretilen parçalar başta otomotiv olmak üzere, havacılık, uzay, savunma sanayi, tarım ve el aletleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Tüm üretim yöntemlerinde olduğu gibi gerek ekonomik sebepler gerekse teknik yetersizlikler ve kalite ihtiyacındaki artış sebebiyle yeni ve gelişmiş üretim yöntemleri üzerine çalışmalar her alanda devam etmektedir. Dövme yöntemi de bu alanda en çok çalışmanın yapıldığı sektörlerden birisidir. Özellikle farklı üretim yöntemlerinin avantajlarını bir araya getirerek daha ekonomik, daha kolay ve daha kaliteli ürünler üretme fikriyle uyumlu olarak, gerek laboratuvar ortamında gerekse endüstriyel alanda çalışmalar sürekli olarak devam etmektedir. Tikso dövme yöntemi bu çalışmalardan biridir. Tikso dövme, kısaca, döküm ile dövmenin avantajlarının bir araya getirildiği, döküm gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan ve karmaşık şekilli parçaların üretimine izin veren ve mekanik özellikleri de neredeyse dövme kadar iyi olan parçaların üretilbildiği bir yöntemdir. Hafif metal alaşımları ve çelikler üzerinde uzun yıllar akademik olarak, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmalar bu alanda mevcuttur ancak endüstriyel alanda sadece alüminyum gibi hafif metal alaşımların seri üretimi gerçekleştirebilmiştir. Çeliklerin endüstriyel anlamda tikso dövme çalışmaları, teknik sebeplerden ötürü başarılı olamamıştır. Ancak son yıllarda bazı çelik üreticilerinin dahil olduğu projeler sayesinde bu alanda olumlu gelişmeler mevcuttur.

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe çokça tercih edilen mikro alaşımlı çeliklerin, endüstriyel ortamda tikso dövme ile şekillendirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmış ve otomotivde kullanılan biyel kolunun prototip üretimi tikso şekillendirme ile üretimi gerçekleştirilmiştir.

2. METALLERİN MEKANİK ŞEKİLENDİRİLMESİ

2.1 Mekanik Şekillendirmeye Genel Bakış

Metal şekillendirme, malzemelerin plastik deformasyonu aracılığı ile istenilen son şekilde ya da son şekle yakın parçaların üretilmesini sağlayan en etkili ve en pratik üretim yöntemlerinden biridir. Bu geleneksel üretim yöntemi, yüksek verim gibi cazip avantajların yanında, ileri mekanik özellikler, düşük üretim maliyeti ve karmaşık parça geometrisi elde etme gibi eşsiz avantajlar da sunmaktadır (Baxter vd. 2008; Fu 2017).

Metal şekillendirme, levha, çubuk, kütük, tel, boru gibi farklı şekillerdeki malzemelerin kütle, içerik değişimi olmaksızın son şekli almasını sağlayan bir takım plastik deformasyon yaklaşımıdır. Malzemelerin deformasyonu, dış kuvvetler yardımıyla şekil veya boyutlarındaki değişim olarak tanımlanabilir. Bu kuvvet, çekme, basma ve kayma kuvvetleri gibi farklı türlerde olabilir.

Plastik deformasyon, malzemelerin kalıcı olarak şekil değişimi anlamına gelmekte ve bu sayede malzemeler mevcut şeklinden başka bir şekle dönüştürülmektedir. Bu işlem sırasında iki önemli değişiklik meydana gelir: Birincisi, şekillendirilen kütlenin geometrik olarak değişimi, ikincisi ise malzeme mikroyapısında meydana gelen değişimdir.

Şekillendirme prosesi malzemenin bir geometriden diğerine geçmesini sağlayan ve gerekli mekanik özellikleri karşılayacak bir geometrinin üretilmesini sağlayan en etkili üretim yöntemlerinden birisidir. Bu proseste malzeme kaybı gerçekleşmez, malzeme sadece deforme olur ve şekillenme sırasında yer değiştirir, hacminde de bir değişim görülmez. Dahası, proses farklı çalışma sıcaklıklarında uygulanabilir. Bu sebeple sıcak, ılık ve soğuk şekillendirme olarak sınıflandırılabilir (Baxter vd. 2008; Cerit 1994; Fu 2017).

2.1.1 Soğuk Şekillendirme

Soğuk şekillendirme, oda sıcaklığı ile malzemenin mutlak ergime sıcaklığının %30'una kadar olan sıcaklıklarda yapılan şekillendirmedir ve bu sıcaklık genellikle yeniden kristalleşme sıcaklığının altındadır. Dislokasyonların artması ve birbiriyle etkileşmesi sonucu, dislokasyon hareketleri zorlaşır. Bu sayede, deformasyonla birlikte malzemenin dayanımı da artmış olur. Eğer malzemeye uygulanan gerilme malzemenin çekme dayanımını aşarsa, deformasyon sırasında kırılma meydana gelir. Bu sebeple soğuk şekillendirme operasyonlarından sonra bir sonraki operasyona geçmeden, malzemeye yeniden kristalleşme sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda bir ısıtma işlemi uygulanarak iç gerilmeler azaltılır ve sünekliğin artması sağlanarak söz konusu kırılmanın önüne geçilebilmektedir. Yeniden kristalleşme tavlama, ara tav olarak da isimlendirilmektedir. Ara tav işlemiyle malzeme, soğuk şekillendirme öncesi özelliklerini kazanmakta ve böylece ilave soğuk şekillendirme mümkün olmakta ve üretimin devamı sağlanmaktadır. Soğuk şekillendirme yönteminde, tane yapısında sürekli değişim görülmektedir ve sertlik ve dayanım artmaktadır. (deformasyon sertleşmesi, pekleşme), korozyona dayanım, süneklik ve elektrik iletkenliği ise azalır. Dolayısıyla, soğuk şekillendirme işlemi için ihtiyaç duyulan gerilme değeri ve işlem sayısı, sıcak şekillendirmeye karşılaştırıldığında çok fazla olmaktadır. Ancak soğuk şekillendirme ile üretim sonrası parça boyut toleransları sıcak şekillendirmeye göre daha dar bir aralıkta kontrol edilebilmekte, ayrıca yüzey kalitesi de daha iyi olmaktadır. (Cerit 1994; Fu 2017).

Soğuk şekillendirme operasyonları sırasında bir ısıtma ihtiyacı bulunmamaktadır. İlave ısıtma işlemi gerek duyulmadığı için de farklı proseslerden kaynaklı kontaminasyon riski en aza indirgenmiş olur. Yüzey kalitesi ve boyutsal tolerans hassasiyeti iyi olduğundan, bu proses bazı zamanlar ılık ve sıcak şekillendirme prosesleri sonrasında yüzey kalitesini ve boyutsal toleransı iyileştirmek için de kullanılabilir. Soğuk şekillendirmenin dezavantajı, yüksek yükleri uygulayabilen büyük kapasiteli ekipmana gerek duyulmasıdır. Bu süreçte kullanılan ekipmanların takımlarının yüksek dayanım ve sünekliğe sahip malzemelerden imal edilmiş olması gerekmektedir. (Baxter vd. 2008; Cerit 1994; Fu 2017).

2.1.2 Ilık şekillendirme

Ilık şekillendirme, malzemenin mutlak ergime sıcaklığının yaklaşık % 30-60'ı oranındaki sıcaklıklarda yapılan şekillendirme olarak tanımlanmaktadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan şekillendirme işlemleri de ılık şekillendirme olarak tanımlanmaktadır. Bu proseste, şekillendirme için, soğuk şekillendirmeye göre daha düşük kuvvet kullanılmaktadır. Yüzey kalitesi ve boyut hassasiyetinin ise soğuk şekillendirme kadar iyi olmasa da, sıcak şekillendirmeden daha iyi olduğu söylenebilir (Fu 2017).

Soğuk şekillendirme ile karşılaştırıldığında, ılık şekillendirmede plastik gerilme (flow stress) değeri daha düşüktür, malzeme kolay şekillenebilir ve şekillendirme için gerekli enerji tüketimi daha düşüktür. İlave olarak malzemenin sünekliği artar ve orta karmaşık geometrili parçaların üretimi bu şekillendirme yöntemiyle yapılabilir. Ayrıca, işlem sırasında yeniden kristalleşme gerçekleşmemektedir. (Fu 2017).

2.1.3 Sıcak şekillendirme

Malzemenin mutlak ergime sıcaklığının yaklaşık % 61'i ve üzeri sıcaklıklarda yapılan şekillendirmedir, genellikle yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, malzeme düşük plastik gerilme değerine sahiptir ve bu sebeple şekillendirme için gerekli yük daha düşük olup, işlem daha düşük kapasiteli ekipmanlar ile yapılabilmektedir. Sıcak şekillendirme sırasında, taneler bir taraftan deforme olurken, aynı anda yeniden kristalleşme de gerçekleştiği için, işlem sırasında yeni ve deformasyonsuz tanelerin oluşmasıyla deformasyonun sürekliliği sağlanabilmektedir. Ayrıca sıcak şekillendirmenin, difüzyonu mümkün kılan yüksek sıcaklıklarda yapılması sayesinde, malzeme içerisinde kimyasal bileşim farklılıkları ortadan kalkmakta ya da azalmakta, ayrıca mikro boşluk gibi yapısal kusurlar, uygulanan büyük plastik deformasyon ile ortadan kalkabilmektedir. Öte yandan sıcak şekillendirmenin dezavantajları arasında, yüksek sıcaklıklarda malzeme ile atmosfer arasında oksidasyon gibi istenmeyen reaksiyonlardan dolayı oksit oluşumu ve buna bağlı olarak yaşanan yüzeyden malzeme kaybı ve ısıl genleşmelere bağlı olarak boyut hassasiyetinin azalması sayılabilir. (Fu 2017).

Sıcak şekillendirme için yapılan ısıtma, üretim maliyetini artırmaktadır. Sıcak şekil verilmiş mamullerin yüzeyinde ısı sebebiyle ve hava ile temastan ötürü oksit tabakası

oluştugu gözlemlenmektedir. Bu tabakanın kalınlığı, ısıtma fırınına kontrollü atmosfer uygulaması yapılarak büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Fakat oksitlenme sadece parçanın ısıtılması aşamasında değil, parça fırından çıkarıldıktan sonra taşınma sırasında da oluşabilmektedir. Örneğin çevresel sebeplerden yüzeyde oluşan oksitler, şekil değiştirme işleminde malzeme yüzeyine gömülerek kalitenin bozulmasına ve kusurlarının oluşmasına sebep olabilmektedirler. (Cerit 1994).

2.2 Metallerin Mekanik Şekillendirme Yöntemleri

2.2.1 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, büyük bir kuvvet yardımıyla malzemenin silindirik bir bloğunun içinde kalıptan geçirilmesiyle kesitinin küçültülerek şekillendirilmesi işlemidir. Ekstrüzyon işlemi özel olarak tasarlanan bir preste gerçekleşmektedir ve bu presin en önemli parçası ekstrüzyon kalıbı olarak tanımlanmaktadır. Katı malzemelerin ekstrüzyonu için üretilmek istenen ürünün geometrisine göre hazırlanmış ve ısıtma işlemi uygulanmış çelik kalıplar kullanılmaktadır (Baxter vd. 2008; Klocke 2013).

Ekstrüzyon işlemi, kullanılan sistemin karmaşıklığı ve işlem parametrelerinin hassasiyeti gereği diğer plastik şekil değiştirme yöntemlerine göre daha zor bir işlemdir. Ancak boru ve profil üretiminde yine diğer plastik şekil verme yöntemlerine göre kolaylık sağladığı için çoğunlukla tercih edilen bir üretim yöntemidir.

Ekstrüzyon işleminde kullanılan metal bloğa biyet adı verilir. Bu işlem sırasında oluşturulan basma kuvvetleri etkisiyle biyet, daha küçük kesitli kalıbın içinden geçerek şekillendirilmektedir. Şekil değişimi sırasında biyet ile kalıp arasında oluşan etkileşim sonucu, malzeme yüksek basma kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler de malzeme içerisinde çatlak oluşumunu önlemektedir. Malzeme açısından incelendiğinde biyet döküm yapısına sahiptir. Ekstrüzyon işlemi sırasında biyetin mevcut döküm yapısı değişerek mekanik özelliklerin iyileşmesi sağlanmaktadır. Sanayide çoğunlukla iki çeşit ekstrüzyon kullanılmaktadır. Bunlar biyetin mevcut kalıp içerisindeki hareketine bağlı olarak ileri ekstrüzyon ve geri ekstrüzyon yöntemleridir.

Hafif metal alaşımlarının şekillendirilmesinde en çok ileri ekstrüzyon yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde basınç sayesinde metalin akış yönü iticinin hareket yönü

ile aynı yönde olmaktadır ve itici yardımıyla oluşturulan yüksek basıncın etkisiyle parça kalıp içerisinden geçirilerek şekillendirilmesi amaçlanır. İleri ekstrüzyon yöntemi genellikle çubuk ve boru üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemde kalıp yapısına bağlı olarak değişmekle birlikte, farklı kesitlerde profiller, içi boş veya dolu olarak da üretilmektedir.

Geri ekstrüzyon yönteminde ise içi boş ıstampaya bağlanan kalıp, ekstrüzyon kovanı içinde hareket sağlamaktadır. Biyet ise kalıp içinde sabittir. Dolayısıyla bu yöntemde, sürtünme, kovan ile biyet yüzeyi arasında gerçekleşmez ve biyet merkezindeki malzeme dış çeperlere göre hareket etmemektedir. (Baxter vd. 2008; Klocke 2013).

Ekstrüzyonun gerçekleşmesini sağlayan en önemli parametrelerden birisi uygulama basıncının büyüklüğüdür ve şekillendirme işleminin başarılı olabilmesi için bu değerin pres kapasitesinin altında olması gerekmektedir. Bunun haricinde ekstrüzyonu etkileyen faktörler şunlardır:

- Ekstrüzyon sıcaklığı
- Kovan, kalıp ve takımların sıcaklıkları
- Ekstrüzyon basıncı
- Ekstrüzyon oranı
- Ekstrüzyon hızı
- Biyet uzunluğu
- Biyetin bileşimi

Metallerin ekstrüzyonunda, yukarıda belirtilen faktörler arasında bazı temel ilişkiler vardır; Bunlar,

- Biyet sıcaklığı arttıkça gerekli ekstrüzyon basıncı azalır,
- Ekstrüzyon oranı arttıkça, ekstrüzyon basıncı artar,
- Ekstrüzyon hızı belirli limitler dahilinde arttırılırsa gerekli ekstrüzyon basıncı çoğunlukla hiç değişmez.
- Ekstrüzyon için gerekli basınç, biyet boyu ile doğru orantılıdır.

Ekstrüzyonun işleminin başarılı olması için ihtiyaç duyulan kuvveti etkileyen ve kalıptan çıkan malzemenin kalitesini belirleyen temel unsurlar mevcuttur. Örneğin alüminyumun ekstrüzyonunda, düşük ekstrüzyon oranı ile şekillendirilen malzeme yapısı, dökme alüminyumun mikroyapısı gibi kaba tanelidir ancak oluşan mikroyapı

mekanik özellikler açısından zayıftır ve ekstrüzyon oranı %10'dan daha düşük olan parçalarda fiziksel ve mekanik özellikler, önceden belirlenen gereksinimleri karşıladığı iyi denetlenmelidir (Akgül 2007; Baxter vd. 2008).

Sıcaklık ekstrüzyon işlem parametrelerinden en önemlisidir. Sıcaklık yükseldikçe malzemenin akma dayanımı düşeceğinden şekil değiştirme kabiliyeti artmakta ve şekil değişimi daha kolay olmaktadır. Böyle bir senaryoda başlangıçtaki sıcaklık yükseldikçe şekillendirme işleminde malzemede kısmi ergimeler görülebileceğinden mümkün olan ekstrüzyon hızı azalmaktadır.

Bir metalin ekstrüzyon işlemindeki şekillendirme başarısı deformasyon hızı ile belirlenebilmektedir. Deformasyon hızındaki artış ekstrüzyon basıncında da artışa sebep olur ve ekstrüzyonda oluşan sıcaklık da bu sebeple artabilmektedir. Bu artışın sebebi, deformasyon hızıyla ıstampa hızının birbiriyle doğru orantılı olması ve oluşan ısı miktarının da deformasyon hızıyla doğru orantılı olmasıdır. İstampa hızı düştükçe şekillendirme sırasında oluşan ısının homojen bir şekilde tüm malzemeye dağılması için yeterli süre sağlanmış olmaktadır.

Plastik şekil değişimi sırasında şekillendirme için gerekli kuvvet ya da gerilme, ürün geometrisine, sürtünme katsayısına ve malzemenin akma dayanımına bağlı olduğundan akma dayanımı ekstrüzyon işlemi için çok önemlidir. Akma dayanımı, malzemenin kimyasal bileşimi, mikroyapısı gibi farklı parametrelerce değişmektedir (Akgül 2007; Baxter vd. 2008; Klocke 2013).

2.2.2 Haddeleme

Üretim için kullanılan torna, freze gibi talaşlı imalat yöntemleriyle parça yüzeylerinde belli bir yüzey kalitesi elde edilebilmektedir. Yüzey kalitesinde iyileştirmeye gereksinim varsa, taşlama veya haddeleme uygulanması gerekmektedir. Haddeleme, parça yüzeylerinden talaş kaldırmadan, parçayı merdaneler arasından geçirerek kesitinin azaltılmasını sağlayan bir üretim yöntemidir. (Cerit 1994; Sönmez 2009).

Haddeleme, yüksek üretim hızı, üretimde süreklilik, işlemin ve ürünün kolay kontrolüne imkân tanınması sebebiyle en çok tercih edilen şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Plastik deformasyon uygulanan bütün malzemelerin yaklaşık % 95'e yakını haddeleme ile şekillendirilmektedir (Cerit, 1994; Yesil, 2003; Sönmez,

2009). Haddemele işleminde malzeme kesiti, basma kuvvetleriyle etkisiyle azaltıldığından, bu işlemin başarılı olabilmesi malzemenin suneğliğine bağlıdır.

Haddemele işleminde, malzeme yuzyeyinde elde edilen puşuşluğluğ, yuzyeye uygulanan basınçla ters orantılıdır. Basınç arttıka, yuzyey puşuşluğluğu azalmakta ve malzemenin yuzyey kalitesi artmaktadır (Borisov 2002; Suńmez 2009).

Haddemenin ilk ařamasında ingotların sıcak iřleme tabi tutulmasıyla, blum, slab ya da kuťuť olarak isimlendirilen yarı uřuńler elde edilir. Daha sonra bu uřuńler yeni bir hadde iřleminde geuřirilerek, ray, sac, profil, uťubuk ve boru gibi uťeřitli uřuńler elde uřetilmektedir.

Haddemele sırasında oluřan plastik deformasyon, merdanelerin oluřturduđu radyal basma gerilmeleri ve yuzyey kayma gerilmeleriyle sađlanmaktadır. Aynı zamanda suřtunme kuvvetleri, malzemenin ileri yuńde hareketini sađlar. Buylece haddelenen malzemenin kesitinde kuťuľme, geniřliđinde artma ve boyunda uzama guřuľmektedir.

Buťuń metalik malzemelerde haddemele iřlemi genellikle ingottan veya suřekli duķuń ile elde edilen slab, kuťuť veya blum gibi yarı uřuń malzemelerden yapılmaktadır. Ayrıca haddemele yuńteminde bu yarı mamuller haricinde metal tozları da kullanılarak řerit řeklinde uřuńler de elde edilebilir. Bu yuńteme toz haddemede adı verilir ve merdaneler arasına akıtılan metal tozları basınç etkisi altında řekillendirilir. řekillendirilen bu metal tozları sinterlenerek sıcak haddemele ile veya sođuk haddemele ve tavlama iřlemleriyle son řekli alır. Toz haddemenin en uńemli avantajı ara kademedeki haddemele iřlemlerini ortadan kaldırdıđından uřretim ve yatırım maliyetinin az olmasıdır. Diđer avantajı ise duķuń hammaddeden elde edilen hadde mamullerine guře daha kuťuť tane boyuna sahip uřuńlerin uřetilmesini sađlamasıdır. Bu uřuńler geleneksel yuńteme guře mekanik ve fiziksel olarak daha uřtun uźelliklere sahiptir.

Temel olarak sıcak ve soğuk haddemede esas amau malzemenin başlangıu kalınlığını azaltmaktır. Ancak haddemele yuńteminde malzeme kalınlığında değişim olmadan sadece şekillendirilmesini sağlamak da muńkunduř (Klocke 2013; Yesil 2003).

2.2.2.1 uťubuk ve profillerin haddelenmesi

uťubuk, profil, kuťeıben ve ray gibi farklı kesitlerdeki uřuńler sıcak haddemele yuńtemi ile uřetilmektedirler. Kullanılan ingot ve kuťuťuđın kesiti haddelele sırasında sırayla

değiştirilerek kesitte istenilen değişimi sağlamaktadır. Merdaneler kullanılacak kademeye göre kesitleri ayarlanarak üretilmektedirler. Böylece merdaneler arasındaki boşluğun istenilen kademeye göre ayarlanmış olması sağlanmaktadır. Merdaneye işlenen şekiller kalibre, bu tür merdaneler de kalibreli merdanele olarak isimlendirilir. Haddeleme sırasında merdaneler arasında verilen her şekle de paso denir. (Cerit 1994; Song vd. 2017).

Üretim aşamaları

Haddeleme yönteminde şekillendirme işlemi dört aşamada gerçekleştirilir.

1. **Malzemenin Haddeleme İşlemine Hazırlanması:** Haddelenecek malzemenin yüzey kusurlarından arındırılmış olması gerekir ancak genellikle ingotlara özel bir yüzey temizleme prosedürü yapılmamaktadır.
2. **Isıtma:** Sıcaklık ve süre, ısıtma işleminde öncelikli iki parametredir. Doğru haddeleme işlemi için, uygulanması gereken en yüksek ısıtma sıcaklığı malzemenin solidüs sıcaklığının 100°C-150°C altında olmalıdır. Haddeleme işleminde sürenin gereğinden uzun olması maliyet artışına sebep olmakla birlikte, yüzeyden malzeme kaybı ve dekarbürizasyona sebep olmaktadır.
3. **Haddeleme:** Haddelenenin başlangıcında sıcaklık mümkün olan en yüksek seviyede olmalıdır. Bu sıcaklık yukarıda bahsedildiği gibi malzemenin solidüs sıcaklığının 100°C-150°C altında olmalıdır. Haddeleme sonundaki sıcaklık ise, ötektoid altı çeliklerde A₃ sıcaklığının yaklaşık 50°C-100°C üstünde, ötektoid üstü çeliklerde ise A₁ sıcaklığının üstünde seçilmelidir. Genel olarak, ürünün mekanik özellik gereksinimlerine göre bu sıcaklıkların seçilmesi gerekmektedir.
4. **Tamamlama İşlemleri:** Haddelenen malzemenin kontrolünün sağlanması amacıyla seri olarak yapılan tamamlama işlemleri uygulanmaktadır. yüzey temizleme, doğrultma, yüzeyde çatlak varlığının incelenmesi ve ultrasonik inceleme bu işlemlere birer örnektir (Cerit 1994).

Haddeleme, işlem sıcaklığına göre soğuk ve sıcak olmak üzere ikiye ayrılır.

Soğuk haddeleme ile sac, folyo, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli ürünler elde edilmektedir. Bu yöntem ile üretilen ürünlerin yüzey kalitesi düzgün, boyutları hatasız ve dayanımı yüksektir. Ayrıca bu yöntemde kesit daralmasının sebep olduğu

deformasyon sertleşmesi malzemenin dayanımını artırmaktadır. Bu sayede haddeleme işlemi için gerekli haddeleme kuvveti artmaktadır. Demirdışı metallerin büyük bölümünün üretiminde son paso genel olarak soğuk haddeleme ile yapılmaktadır (Song vd. 2017; Yesil 2003).

Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılan işlemler ise sıcak haddeleme olarak isimlendirilir. Bu sayede malzemenin döküm yapısı bozulmakla birlikte işlem sonunda daha yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip ürünler üretilmektedir. Bu yöntem çoğunlukla ingot ve kütük dökümlerin haddelenmesinde kullanılmaktadır. Bu ürünlerde kesit daralmasının yüksek oranda olması istenmektedir ve bu sebeple sıcak haddeleme tercih edilmektedir.

Sıcak haddeleme yaklaşık olarak 1100°C-1300°C arasında yapılmaktadır. Son pasoda ise sıcaklık 700°C-900°C arasında değişmekle birlikte, eş eksenli ferrit yapısı elde etmek için, alt kritik sıcaklığının (A_1) üzerinde olmalıdır (Klocke 2013; Yeşil 2003).

2.2.3 Dövme

Dövme, malzemenin katı haldeyken şekil değiştirmesini sağlamak için çelik kütüklere veya külçelere termal ve mekanik enerjinin uygulanmasıdır. Dövme, termal döngü ve deformasyon sürecinin bir sonucu olarak yeniden kristalizasyon ve tane boyutu küçülmesine neden olur.

Dövme işlemi sırasında, proses kontrolü sağlanarak plastik şekil değişimi sırasında, malzemede tane boyutu küçülmesi ve mekanik özelliklerin iyileşmesi gibi farklı mekanizmalar da gerçekleşmektedir (Baxter vd. 2008; Lange 1988; Yiğitarslan 2009).

Bu üretim yöntemi daha çok çalışma koşulları gereği yüksek mekanik yüklere maruz kalan ve üstün dayanım özellikleri gerektiren kritik parçalar ile karmaşık şekle sahip parçaların üretilmesine tercih edilmektedir (Kuş 1990). Bu parçalara örnek olarak krank milleri, el takımları, civata kafaları, dişliler, tekerlekler, biyeller, kancalar örnek gösterilebilir (Cerit 1994; Lange 1988).

Dövme üretim yöntemi, kullanılan kalıba, uygulama sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır. Uygulama sıcaklığı açısından; soğuk dövme, ılık dövme ve sıcak dövme olarak 3 çeşittir. Kullanılan kalıba göre de hassas dövme, kapalı ve açık kalıpta dövme şeklinde sınıflandırılabilir.

Dövme işlemi için tercih edilen yöntemler daha çok üretilmesi istenen parça türlerine ve miktarlarına göre belirlenmektedir. Örneğin, açık kalıpta dövme düz kalıplar veya çok basit şekilli kalıplar kullanılarak yapılabilirken genellikle az sayıda fakat büyük hacimli parçalar için tercih edilir. Ayrıca açık kalıpta dövme yöntemi, kapalı kalıpla dövme için gerekli ön şekillendirme adımı olarak da uygulanmaktadır.

Kapalı kalıpla dövme yönteminde ise, malzeme, üretilmek istenen şekle göre hazırlanan kalıplar arasında dövülmektedir. Bu yöntem, uygulanan yüksek basınç sayesinde malzemenin kalıbı tamamen doldurarak karmaşık şekilli parçaların çok küçük boyut toleransları ile üretimini sağlamaktadır (Lange 1988; Yiğitarslan 2009).

2.2.3.1 Soğuk dövme

Soğuk dövme, metal kütüğün ilk ve ara aşamalarda herhangi bir ısıtma işlemi olmadan oda sıcaklığında şekillendirilmesidir. Soğuk dövmede uygulanan basma gerilmeleri, kalıp içerisinde asimetric veya asimetric olmayan metal akışı oluşturarak metalin istenen yönde şekillendirilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durumda kalıp etrafında çapak oluşumu da gözlemlenmektedir. Soğuk dövme prosesinde genellikle mekanik veya hidrolik presler kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde birden fazla dövme adımları kullanılarak döküm hammadde veya kütükten başlayarak basit geometrik şekillerden çok karmaşık ürünler elde edilebilmektedir (Altan ve Ngaile 2005; Lange 1988).

Soğuk dövme ile üretilen parçalar çoğunlukla otomotiv, havacılık, savunma sanayi başta olmak üzere, bisiklet, motosiklet, tarım araçları, el aletleri ile somun ve cıvata gibi bağlantı elemanları üretiminde kullanılmaktadır.

Malzeme seçimi açısından ise oda sıcaklığında belirli bir süneklik, esneklik gösteren metaller soğuk dövme için uygundur. Bu malzemelere örnek olarak alüminyum ve bazı çelikler gösterilebilir. Bakır alaşımları, çinko, titanyum, berilyum ve nikel de özel uygulamalar için soğuk dövme ile şekillendirilebilen diğer malzemelerdir. Paslanmaz çelikler genellikle dövme için tercih edilmeyen malzemelerdendir ancak gelişen malzeme teknolojileri ile savunma sanayinde örnekleri görülebilmektedir. Özellikle östenitik ve östenitik-ferritik çelikler yüksek güç ve pres basıncı gerektirdiğinden soğuk dövme için tercih edilmezler. Ayrıca bu malzemeler kolay yağlanabilme özelliğine sahip değildir. Bu açıdan, soğuk dövme sırasında metal-metal teması

sebebiyle çeşitli yüzey problemlerine sebep olabilmektedir (Altan ve Ngaile 2005; Kurt Lange 1988) .

Soğuk dövme ile üretimin en önemli avantajı yüksek boyutsal tolerans ve üretim hızının yüksek olmasıdır. Dövme işleminde parlak yüzeyli iş parçaları kullanıldığından üretilen parçanın yüzeyleri sıcak dövmeye göre çok daha iyi özellikler göstermektedir. Bazı uygulamalarda soğuk dövme ile üretilen parçaların talaşlı imalat ile üretilen parçalar kadar yüksek yüzey kalitesine sahip olduğu bilinmektedir.

Yukarıda bahsedilen olumlu özelliklerin yan sıra soğuk dövme işlemini kısıtlayan bazı faktörler de vardır. Soğuk dövme ile bir malzemenin şekillendirilebilmesi için, dövme sırasında kullanılan takımların yüksek akma dayanımına sahip olması gerekir. Şekillendirilecek parçanın boyutları pres kapasitesine bağlıdır, yüksek oranda deformasyon gerektiren ve karmaşık şekilli asimetric parçalar bazı durumlarda şekillendirilemeyebilir. Soğuk dövme ile şekillendirilecek çeliklerin karbon oranının % 0,5'den, diğer alaşım elementlerinin toplam oranının ise % 3'den az olması gerekmektedir. Dövme sırasında pekleşme etkisini gidermek için ilave tavlama ısı işlemi gerekebilir. Dövme kalıpları ve diğer kullanılan pres takımları pahalı olduğundan, üretimin ekonomik olması için çoğunlukla yüksek adetli parçaların üretimi için bu yöntem tercih edilmektedir.

Yukarıda bahsedilen sınırlamalar incelendiğinde dövme işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması daha uygun görünse de eğer parçanın soğuk olarak dövülmesi mümkünse kesinlikle bu yola gidilmelidir. Çünkü sıcak dövmenin büyük tane boyutuna yol açması ve yüzeyde tufal oluşumu gibi olumsuz sonuçlarının yanı sıra maliyeti de daha yüksek olmaktadır (Altınbalık 2000; Baxter vd. 2008; Lange 1988).

2.2.3.2 Ilık dövme

Dövme endüstrisinde amaç ideal parça formunun en ekonomik yöntemle üretilmesidir. Soğuk dövmede kısmi de olsa karmaşık şekilli parçalar üretilebilir olmasına rağmen dövme basıncı oldukça yüksek ve malzeme sünekliği nispeten düşük olduğundan takım ömürleri kısa olur. Ayrıca dövme sırasında parçada oluşan kusurlar sebebiyle de planlandığı kadar ekonomik olmayabilir. Bu durum üretimde çeşitli kısıtlamalara sebep olur. Böyle durumlarda ılık dövme tercih edilmektedir. Ilık dövme, oda sıcaklığı

ile sıcak dövme sıcaklığı arasındaki sıcaklıklarda yapılan dövme işlemidir. Genellikle işlem sıcaklığı olarak yeniden kristalleşme sıcaklığının altı tercih edilir ve bu sıcaklık malzemeye bağlı olarak değişmektedir. Örneğin çeliklerde bu sıcaklık aralığı 600°C-900°C'dir.

Ilık dövmenin diğer yöntemlere göre başlıca avantajları şunlardır;

- Malzemenin akma dayanımı daha düşüktür. Bu durum özellikle yüksek alaşımlı metallerde geçerlidir. Dolayısıyla takımlar üzerinde oluşan gerilme daha düşük olur ve daha az şekillendirme basıncına ihtiyaç duyulur.
- Süneklik daha yüksektir ve böylece soğuk dövmeye göre daha karmaşık şekilli parçalar dövülebilir.
- Deformasyon sertleşmesi düşük olduğundan şekillendirme ve tavlama gibi ilave üretim adımlarının sayısı daha azdır.
- Ilık dövme ile üretilen parçaların toklukları iyidir.
- Faz dönüşümünün kontrollü olması ve tane incelmeye imkân vermesi sayesinde parçanın mekanik özellikleri daha iyi olmaktadır.

Sıcak ve ılık dövme prosesleri özellikle parçaların seri üretiminin ekonomik olması bakımından son derece önemlidir. Her iki proses sayesinde aşağıda belirtilen nitelikler sağlanabilmektedir;

- Büyük üretim kapasitesi,
- Hassas boyut toleransı ve yüzey özellikleri,
- İşlenebilirliğin iyi olması,
- Deformasyon sertleşmesi bağlı olarak, hammaddeye göre dövme parçaların çekme dayanımının daha yüksek olması,

Ilık dövmede kullanılan araçlar soğuk dövmede kullanılanlar ile aynıdır ancak ılık dövmede kalıplar üretim süresince zamanla ısındıkları için, kalıp sıcaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir (Altan ve Ngaile 2005; Baxter vd. 2008).

Yüksek alaşımlı çeliklerin şekillendirilmesine izin veren ılık dövme işleminin uygulama alanı geniştir. Ilık dövmenin en çok tercih edilme sebeplerinden birisi soğuk ve sıcak dövmenin avantajlarını birleştirebilmesidir. Ilık dövmede parçanın boyut

hassasiyeti soğuk dövmede olduğu gibi yüksek ve şekillendirme kabiliyeti sıcak dövmedeki kadar iyidir. Ilık dövmenin dezavantajı, işlemin karmaşık olması ve hem soğuk hem de sıcak dövme prosesine göre kalıpların daha pahalı olmasıdır. İşlem sıcaklığı iş parçasının özelliklerine göre belirlenmektedir. Malzemenin akma dayanımı dövme ekipmanlarıyla şekillendirilebilecek kadar düşük olmalı ve parçada bölgesel ya da tamamen kırılma olmadan şekillendirme işlemi yapılabilmelidir (Altınbalık 2000; Baxter vd. 2008).

2.2.3.3 Sıcak dövme

Sıcak dövme çoğunlukla otomotiv, savunma, havacılık ve tarım sanayinde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilmek istenen parçalar yüksek darbe direnci ve çekme dayanımı gerektiren parçalardır (Kuş 1990). Endüstride çoğunlukla sıcak dövme kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin plastik deformasyonu daha kolaydır ve bu sebeple dövme sırasında preslerin uyguladığı kuvvet daha düşüktür (Yiğitarıslan 2009).

Bir çubuğun dövme işleminden önce östenit bölgesine ısıtılması sırasında, mikroyapı zaman ve sıcaklık ile büyüeyebilen östenite dönüşür. Daha sonra, sıcak dövme sırasında statik ve dinamik yeniden kristalleşme gerçekleşir. Yeniden kristalleşen östenit taneleri uygun sıcaklık ve süreye bağlı olarak büyüeyebilir. Söz konusu dönüşüm öncesi östenit (prior östenit) tane boyutu, dönüşüm sonrası oluşacak ferrit tane boyutunu belirleyen önemli bir parametredir. Ferrit tanelerinin ve diğer mikroyapısal bileşenlerin ince boyutlu olması daha yüksek dayanım ve tokluk sağlamaktadır. Dönüşüm öncesi östenit tane boyutunun yanı sıra, mikro alaşım çökeltileri de (karbürler ve nitro karbürler), nihai ferrit tane boyutunun belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Mohanty 2017).

İş parçasının sıcaklığındaki artış akma dayanımını düşürürken şekillendirme kabiliyetini de artırmaktadır. Sıcak dövme işlemi, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilir ve bu sayede kalıp boşluğunun doldurulması soğuk dövmeye göre daha kolay olmaktadır. Böylece parçanın şekillendirilmesi sırasında takımlara daha düşük kuvvet uygulanır ve işlem için daha düşük deformasyon enerjisi, dolayısıyla daha düşük kapasiteli bir pres yeterli olmaktadır. Ayrıca işlem sıcaklığını artırarak mevcut ekipman ile aynı kapasiteyle daha büyük parçaların dövülmesine imkân sağlanabilir. Yukarıda bahsedilen bu avantajlarla

beraber termal genleşme gibi ısı faktörleri, yağlayıcıda meydana gelen değişiklikler dövülen parçanın boyutsal toleransını düşüren faktörlerdir. Ayrıca, sıcak şekillendirme sırasındaki takım aşınması soğuk şekillendirmeye göre daha yüksektir (Baxter vd. 2008; Kurt Lange 1988).

2.2.4 Dövme yöntemlerinin endüstriyel uygulaması

Dövme işlemi, endüstride en çok tercih edilen üretim yöntemlerinden birisidir. Günümüzde havacılık, savunma sanayi, otomotiv, makine, tarım, rulman, sağlık ve el aletleri sektörlerinde dövme ile üretilen parçalar kullanılmaktadır. Bugün sağlık alanında kullanılan ortopedik ve medikal bazı parçalar dövme ile üretilmektedir.

Dövme ürünlerin yaklaşık % 70'i otomotiv sektörüne yönelik olarak üretilmektedir. Taşıtlarda hareketi sağlayan motor, vites, aktarma parçaları ve tekerlek bağlantıları gibi önemli parçalar yine dövme ile üretilmektedir.

Tarım sektöründe de dövme parçalar kullanılmakta ve sayısı her geçen gün artmaktadır. Dövme parçalar tarihte ilk tarım sektöründe kullanılmıştır ve otomotiv, makine ve diğer sanayiiler gelişene kadar dövme işlemi, sürekli olarak tarım sektörüne hizmet etmiştir. Günümüzde tarımda kullanılan, el aletlerinin yüzde yüzü ve makine parçalarının yüzde kırkı dövme yöntemi ile üretilmektedir.

İş Makinelerinin, motorları, kepçe tırnakları, aktarma ve emniyet parçaları dövme yöntemi ile üretilir.

Makine sanayiinde ise dişliler, aktarma organları, rulman, flanş, ayna ayakları, sıkma pabuçları gibi pekçok parça dövmedir. Gelişen makine teknolojisi içinde dövme parçaların oranı sürekli olarak artmaktadır.

El aletleri sektöründe üretilen parçaların % 90'ı dövmedir. Çekiç, balyoz, keski, keser, mengene, pense ve örs gibi günümüzde kullanılan bütün el aletleri dövme ile üretilmektedir. Savunma Sanayiinde de kullanılan araçların birçok parçası dövmedir (Hess vd. 2016; Lange 1988; Pekuz 1999).

3. YARI KATI ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

3.1 Yarı Katı Şekillendirme Yöntemlerine Giriş

Yarı katı şekillendirme, döküm ve dövmenin avantajlarını birleştiren ve halen üzerinde akademik ve teknolojik araştırmalar devam eden bir üretim yöntemidir. Bu yöntem özellikle geleneksel dövme ile üretilemeyen karmaşık şekilli parçaların üretimine yönelik olarak geliştirilmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda alüminyum ve magnezyum esaslı karmaşık şekilli parçaların bu yöntemle endüstriyel olarak üretilmesi başarılmıştır. Çeliklerin yarı katı şekillendirmesi konusunda ise çok sayıda laboratuvar çalışmaları yapılmış olmasına rağmen endüstriyellemesi konusundaki araştırmalar halen devam etmektedir (Püttgen vd. 2007).

Yarı katı şekillendirme tanımı ilk olarak Flemings ve arkadaşlarının 1972’de yaptığı bilimsel çalışma ile ortaya çıkmıştır (Spencer vd. 1972). Bu çalışma sonrasında günümüze kadar olan süreçte birden fazla yöntem yarı katı şekillendirme başlığı altında gerçekleştirilmiştir (Hirt vd. 2006; Spencer vd. 1972).

Yarı katı şekillendirme konusunda günümüze kadar yapılan çalışmaların çoğunda alüminyum ve magnezyum alaşımlarının olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların ortak yönü ise düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların tikso şekillendirme için seçilmiş olmasıdır. Bu çalışmaların devamında ise özellikle 1990’lardan sonra çeliklerin aynı yöntemle şekillendirilmesi konusundaki bilimsel çalışmalara da rastlanmaktadır (Püttgen vd. 2007).

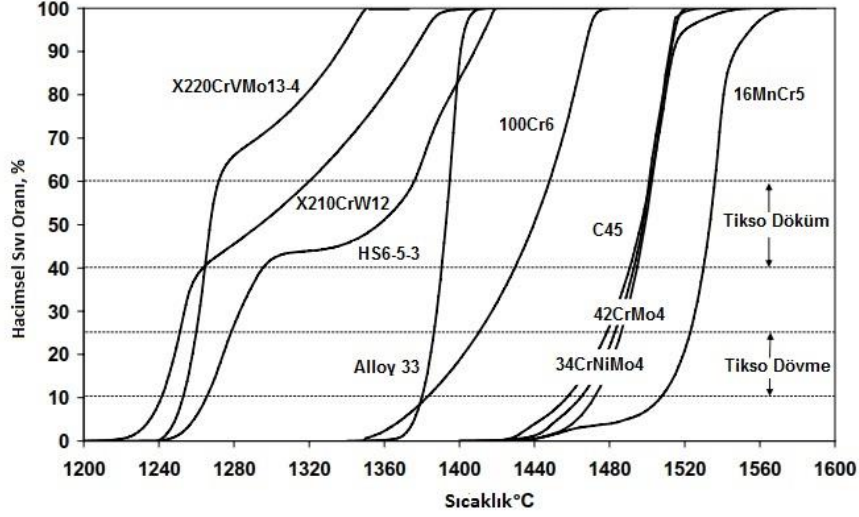
Yarı katı şekillendirme, geleneksel döküm ile dövme yöntemlerinin tam arasında yeralan bir konumdadır. Bu yöntem, yüksek mekanik özelliklere sahip ve üretilmesi istenen son şekle yakın ürünler (near net shapes) elde edilmesini sağlar (Modigell ve Maier 2006).

Yarı katı şekillendirme prosesinde malzemenin şekillendirilmesi, solidüs-likidüs (sıvı + katı) faz aralığında gerçekleşir. Bu işlem sırasındaki yarı katı hal durumu ve küresel mikroyapı, malzemenin tiksotropik özellik kazanmasını sağlamaktadır. Tikso şekillendirme işlemi, malzeme sıcaklığının her noktada eşit dağılım gösterdiği

aşamada kolaylıkla yapılabilir. Ancak tikso dövme veya tikso döküm gibi endüstriye yönelik denemelerde bu homojen ve eşit sıcaklık dağılımı çeşitli nedenlerde mümkün olamamaktadır. Bunun temel nedenlerinden biri tikso şekillendirmede kullanılan takımların proses sıcaklığından oldukça düşük sıcaklıkta çalışması ve iş parçasının bu durumdan etkilenmesidir. Tikso şekillendirme işlemi, matristeki sıvı yüzdesinin % 20-60 arasında olduğu zaman gerçekleşmektedir (Sołek ve Kuziak 2009).

Spencer vd. malzemenin sıvı katı yüzdelerinden yola çıkarak bu tanımı detaylandırmıştır. Spencer'a göre malzemenin hacimsel olarak sıvı yüzdesi % 50-60 oranındayken yapılan şekillendirme işlemine tikso döküm, hacimsel sıvı yüzdesi % 20-30 iken gerçekleştirilen şekillendirme işlemi tikso dövme olarak isimlendirilmektedir (Spencer vd. 1972). Bu konuda yapılan bir diğer çalışmada ise, Atkinson, yukarıda bahsedilen bu iki yöntemi kapsayacak şekilde, % 30-40 sıvı faz oranında yapılan şekillendirme işlemlerinin genel adı olarak tikso şekillendirme tanımı kullanmıştır (Atkinson 2012).

Tikso şekillendirme işlemlerinde kullanılacak malzemelerin belirli özelliklerde olması gerekmektedir. Özellikle çeliklerin tikso şekillendirilmesinde hacimsel katı-sıvı oranı, prosesin hassas bir şekilde kontrol edilmesi açısından önemlidir. Daha önce bahsedilen malzemelerin düşük ergime sıcaklığı kadar, seçilen malzemenin solidüs - likidüs aralığının (katılaşma aralığının) geniş olması da ayrı bir önem taşımaktadır. Bu iki kriter, termomekanik hesaplamalar veya DTA gibi ölçüm analiz yöntemleriyle her malzeme için hassas olarak tanımlanabilmektedir. Ancak saf demir ve ötektik sınıra yakın alaşımlar tikso şekillendirmeye uygun olmamaktadır. Çünkü bu malzemelerde ergime, sırasıyla ya tek bir sıcaklıkta ya da çok dar bir aralıkta gerçekleşmektedir. Tikso şekillendirme için öncelikle geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlar tercih edilmektedir (Püttgen vd. 2007). Şekil 3.1'de bu çeliklere örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Çeliklerin tikso şekillendirme sıcaklıkları ve hacimsel sıvı oranları (Püttgen vd. 2007).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi çelikler, farklı kimyasal bileşimlerinden dolayı, farklı sıcaklıklarda farklı sıvı oranlarına sahiptir. Şekil 3.1 incelendiğinde, 100Cr6 kalite çeliğin sıvı faz oranının sıcaklığın artmasıyla lineer bir artış gösterdiği, ancak HS 6-5-3 kalite çelikte bu oran lineer şekilde artmadığı görülmektedir. Daha net bir tanımla, yüksek alaşımlı çelikler geniş bir solidüs-likidüs aralığına sahip olduğu için tikso şekillendirme açısından diğer alaşımlara göre daha elverişlidir. Ancak düşük alaşımlı çeliklerde bu aralık dar olduğundan ve likidüs sıcaklıkları çok yüksek olduğundan, düşük alaşımlı çelikler tikso şekillendirme için uygun değildir (Püttgen vd. 2007).

Tikso şekillendirmenin başarılı olabilmesi için temel kriter uygun malzeme seçimi olarak görünse de malzeme haricinde, ısıtma kabiliyeti, uygun tezgâh seçimi, tezgâha bağlı kalıplar ve diğer takımlar da sistemin düzgün çalışması için önemlidir.

Buraya kadar anlatılan bilgiler ışığında yarı katı şekillendirme ve tikso dövme tanımları arasındaki farkı terminolojik olarak şu şekilde açıklanabilir: Yarı katı şekillendirme işlemi, metallerin katılaşıma aralığında yapılan her türlü şekillendirme işleminin genel tanımıdır. Bu faz aralığı, birçok bilimsel çalışmada tikso aralığı olarak da tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasının esas konusu da olan tikso dövme işlemi ise kapalı kalıpta tikso faz aralığında yapılan dövme işleminin adıdır. Tezin bundan sonraki kısımlarında, bilimsel çalışmalarda yazarların kendi kullandıkları terminoloji (yarı katı şekillendirme ya da tikso dövme) kullanılmıştır.

3.2 Çeliklerin Yarı Katı Şekillendirilmesi İle İlgili Literatür Çalışmaları

Çeliklerin yarı katı şekillendirilmesi üzerine birçok ülkede farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu bölümde tikso şekillendirme üzerine özellikle çelikler üzerinde yapılan laboratuvar ölçekli ve endüstriye yönelik bilimsel çalışmalardan bahsedilecektir.

Çelikler, yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulması ve olası yüzey oksidasyonu sebebiyle tikso şekillendirme açısından zor malzemelerdir (Rogal vd 2012).

Tikso şekillendirmede esas olan, proses süresince malzemenin sıcaklık ve yapısının homojen olarak kalmasını sağlamaktır. Ancak tikso dövme ve tikso döküm gibi endüstriyel uygulamaya yönelik metotlarda bu pek mümkün olmamaktadır. Dengesiz sıcaklık dağılımının temel nedenlerinden birisi, kullanılan takımların sıcaklığının çok düşük olması nedeniyle iş parçası ile takım arasında yoğun ısı transferi sonucu soğumanın gerçekleşmesidir (Sołek vd. 2008; Kuziak vd 2009).

Tikso şekillendirme ile ilk çelik prototip denemesi 1993 yılında yapılmıştır (Kirkwood 1993). Bu çalışmada M2 kalite takım çeliği kullanılarak tikso dövme ile dişli çark üretilmiştir. Yapılan incelemeler göstermiştir ki, tikso dövme ile üretilen bu parçanın mekanik özelliklerinin ve farklı ısı işlemleri sonucu elde edilen sertlik sonuçlarının, geleneksel yöntemle üretilen modele göre daha yüksek olduğunu ispatlamıştır (Püttgen vd. 2007).

Balan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada X38CrMoV5-3 kalite takım çeliğinin yarı katı şekillendirmesi üzerine denemeler yapmışlar ve bunun için 6 eksenli bir robot kullanan bir sistem tasarlamışlardır. Bu çelik şekillendirme öncesi 250°C'ye ön ısıtılmıştır. Dövme işleminin başlamasından hemen önce kütüğün kalıba transferi 5 sn.'ye düşürülmüştür. Nümerik simülasyonlar ve deneysel çalışmalar göstermiştir ki transfer esnasında, maksimum sıcaklık (ve dolayısıyla sıvı faz oranı), kütüğün dış yüzeyi % 100 katı oranına ulaşmasına rağmen kütük eksen boyunca tamamen korunmuştur.

Sıvı faz yüzdesinin direk olarak ölçülmesi çoğu çelik alaşımları için mümkün değildir ve bu yüzden DTA yöntemiyle dolaylı olarak ölçülebilmektedir (Balan vd. 2017).

Balan ve arkadaşları bu çalışma için laboratuvar ortamında bir deneysel düzenek hazırlamış ve vidalı bir pres kullanılmıştır. Bu pres, 31,5 kJ kapasiteye ve 680 mm/s

dövme hızına sahiptir. 6 eksenli robot sisteme dahil edilerek ısıtma sonrası parçanın pres kalıbına transfer işlemi kolaylaştırılmıştır. Dövme kalıbı 710x710x940 mm³ hacminde dir. Üretilmesi istenen parça malzemesi C38LTT kalite çelikten üretilmiştir. Bu çalışmada, dövülen parçanın yapısı incelendiğinde, kısmi ergime bölgesinin kütüğün çekirdek kısmında olduğu gözlemlenmiştir. Parça farklı ısıtma döngülerinde dövülerek proses limitlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatür çalışmalarında, ısıtma prosesinin iki adımdan oluşması önerilmektedir. Birinci adım, yüksek ısıtma gücü ile hızlı sıcaklık artışının sağlanması, ikinci adım ise düşük ısıtma gücü ile ulaşılması istenilen sıcaklığa parçanın tamamında homojen olarak ulaşılmasını sağlamaktır. Parçadaki farklı sıcaklık dağılımları genellikle ilk ısıtma adımında gerçekleşmektedir. Aynı parçanın farklı bir dövme firmasında da denemesi gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel ölçekte 25 ton kapasiteli bir dövme presinin ve 2x8 indüksiyon ısıtma hücresinin kullanıldığı çalışmada, ısıtma hücrelerinin toplam gücü 600 kW'dir. Hedef ısıtma sıcaklığı 1430°C olup bu sıcaklığa ortalama 160 sn.'de ulaşılmıştır. Sıcaklık toleransı $\pm 7^{\circ}\text{C}$ dir. Isıtma normal atmosfer koşullarında gerçekleşmiştir. Dövme kalıbı ise X38CrMoV5-3 kalite takım çeliğinden üretilmiştir. Bu sayede Balan ve arkadaşları bir saat içerisinde 450 parça üretmeyi başarmışlardır. Bu sistemde farklı parametreler kullanılarak 3500 parça 3 gün içerisinde üretilmiştir. Kullanılan tezgâh ve takım aşınmalarının ise konvansiyonel üretim yöntemlerine göre biraz daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama olarak 740 gr. ağırlığında bir parçanın yarı katı şekillendirme ile üretimi için gereken ortalama yükün 450 kN olduğu belirtilmiştir (Balan vd. 2017).

Solek ve Rassili ise yaptıkları yarı katı şekillendirme çalışmasında sıcak dövülmüş ticari 100Cr6 kalite çelik kullanmıştır. Yapılan çalışmanın ilk aşaması özellikle doğru sıcaklık aralığının belirlenmesi üzerine gerçekleşmiştir. Çalışmada özellikle, tikso şekillendirme öncesinde termodinamik hesaplamaların tamamıyla katılma ve sıvılaşma sıcaklıklarının doğru tespitine dayandığı belirtilmiştir. 100Cr6 kalite çelik için katılma ve sıvılaşma faz dönüşüm sıcaklıkları sırasıyla 1132°C ve 1457°C olarak tespit edilmiştir. Solek ve Rassili, çalışmanın devamında belirlenen bu sıcaklık aralığında malzeme davranışını incelemiştir. Tiksotropik malzeme davranışının temelinde, deformasyon sıcaklığı tanımının malzemenin yumuşamaya başladığı sıcaklık olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın devamında, tikso şekillendirme için kullanılan malzemenin 1400°C'de % 40 sıvı oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.

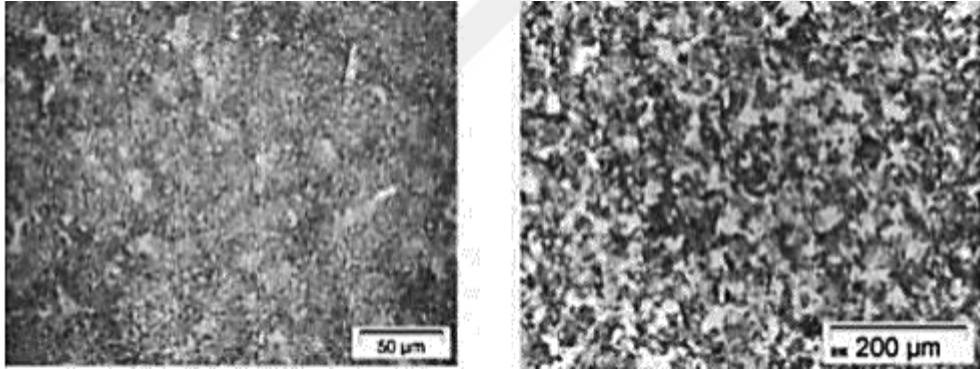
100Cr6, çoğunlukla ticari parçalarda kullanılan bir çelik kalitesidir. Dolayısıyla şekillendirilmesinde hidrolik pres, indüksiyon ısıtma sistemi ve 2 adet endüstriyel robottan oluşan bir sistem kurulmuştur. Şekillendirme için kullanılan ekipman 3 parçadan oluşmaktadır. Bunlar alt kalıp, üst kalıp ve pistondur. Kalıplar da yine çelikten imal edilmiştir. Çalışma sırasında kalıpların çabuk aşınmasını önlemek amacıyla tikso parça ile kalıpların temaslarının çok kısa olması sağlanmıştır. İlave olarak da kalıpların yüzeyleri bornitrür ile kaplanmıştır. Çalışmada numunenin sıcaklığı 3 farklı noktadan ölçülerek sıcaklık kontrolü sağlanmıştır. Bu sebeple termoçift ile numunenin içinden ve dış yüzeylerinden ayrı ayrı ölçümler yapılarak ısıtma sırasındaki değişiklikler belirlenmiş, şekillendirilmesi düşünülen parçalar için doğru kalibrasyon hedeflenmiştir. Bu sayede istenilen sıcaklığa ulaşmada ölçülen sıcaklık ile parçanın gerçek sıcaklığı arasında ölçüm farkı en aza indirgenmiştir. Çalışmanın devamında, parçaların homojen ısıtılabilmesi için 3 ayrı ısıtma rejimi belirlenmiştir. Bunun için ilk aşamada 40°C/sn., ikinci aşamada 20°C/sn. ve son aşamada ise 1,6°C/sn. ısıtma rejimi kullanılmıştır. Bu sayede sıcaklığının 10°C hassasiyetle kontrol edilebildiği belirlenmiştir. Bu yöntemle ısıtılan parçanın mikroyapısı incelendiğinde daha küresel tane yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir ki bu da tikso şekillendirme için en ideal tane yapısını oluşturmaktadır (Solek vd. 2010).

Solek ve Rassili tüm bu parametreler kullanılarak tikso şekillendirme işlemini gerçekleştirmiş ancak parça kenarında, kalıpların birleşme noktalarında ince çapak gözlemlenmişlerdir. Bu durum belirlenen sıcaklıkta parçadaki sıvı faz oranının katı faz oranından beklenenin üstünde daha fazla olduğunu ve bu nedenle parça yüzeyinde çatlakların oluştuğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, sıvı faz oranının aslında % 40 yerine % 20-30 arasında olmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Tikso şekillendirilen parça mikroyapısı incelendiğinde, mikroyapıda küresel tanelerin bulunduğu görülmüştür. Bu mikroyapı, işlem için belirlenen parametrelerin tikso şekillendirme için uygun olduğunu göstermiştir (Solek vd. 2010).

Hirt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada çeliklerin yarı katı şekillendirilmesi üzerine basit bir fizibilite örneği sunmaktadır ve çalışmalarının temel amacı endüstride yarı katı şekillendirme konusunda karşılaşılan temel zorlukların iyileştirilmesidir. Bu zorluklar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir;

- 1350°C'den yüksek sıcaklıklarda yapılan yarı katı şekillendirmede, yüksek sıcaklık sebebiyle kullanılan takım ömürleri düşüktür,
- Yarı katı şekillendirilmiş parçada inklüzyonların parça içerisindeki dağılımının belirlenmesi için yeterli ölçüm yapılması gerekmektedir,
- Tekrarlı veya seri üretimde yeterli sıvı yüzdesi oranının sağlanabilmesi için, özel kontrol yöntemleri ve sistemleri gerekmektedir,
- Laboratuvarda elde edilen parça özelliklerinin endüstriyel üretimde sağlanabilmesi için otomasyon şarttır ve işlem parametrelerinin hassas control edilmesi gerekmektedir,
- Segregasyonun kabul edilebilir aralıkta olması için kontrol edilmesi gerekmektedir.

Hirt ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada malzeme olarak 100Cr6 ve X210CrW12 kalite çelik kullanılmıştır. X210CrW12 soğuk iş takım çeliğidir ve yapısı martensitik matriks içinde ledeburitik ve ince karbür yapılarından oluşmaktadır (Şekil 3.2a).



Şekil 3.2 : (a) X210CrW12 ve (b) 100Cr6 kalite çeliklerin mikroyapı fotoğrafları (Hirt vd. 2005).

Bu çelik çoğunlukla kesme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu kalite ticari çeliklerin ilk mikroyapısı yarı katı faz aralığına ısıtıldıkça küresel taneli yapılara dönüşmektedir. Yapılan çalışmada bu çeliğin seçilme nedeni yarı katı faz aralığından su verilerek kolayca soğutulabilmesi ve böylece mikroyapı araştırmaları için uygun olması olarak belirtilmiştir. 100Cr6 kalite çelik, ferritik-perlitik matriks içerisinde ince karbürlerin dağıldığı bir mikroyapıya sahiptir (Şekil 3.2b) ve çoğunlukla rulman çeliği olarak bilinmektedir. Soğuk işlemeye uygun olup iyi mekanik özellikler

göstermektedir. Bu sebeple yarı katı şekillendirme çalışmaları için uygun olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Hirt vd. 2005).

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi literatürde yarı katı şekillendirme çalışmalarında sıvı faz oranı çoğunlukla % 40-60 arasında olan malzemeler tercih edilmektedir. Hirt ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada katı-sıvı faz aralığı açısından X201CrW12 kalite çeliğin geniş, 100Cr6 kalite çeliğin ise dar bir katılaşma aralığına sahip olduğu belirtilmiştir (Hirt vd. 2005).

Hirt ve arkadaşları deneysel çalışmalarında tiksotropik kütük üretimi üzerine de önemle durmuşlardır. Tiksotropik kütük üretimi iki yolla gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemde kütük indüksiyon yöntemiyle yarı katı şekillendirme aralığına ısıtılır. “Reo-route” yönteminde ise sıvı fazdaki yapı yarı katı şekillendirme sıcaklığına indirgenerek işlemler devam eder.

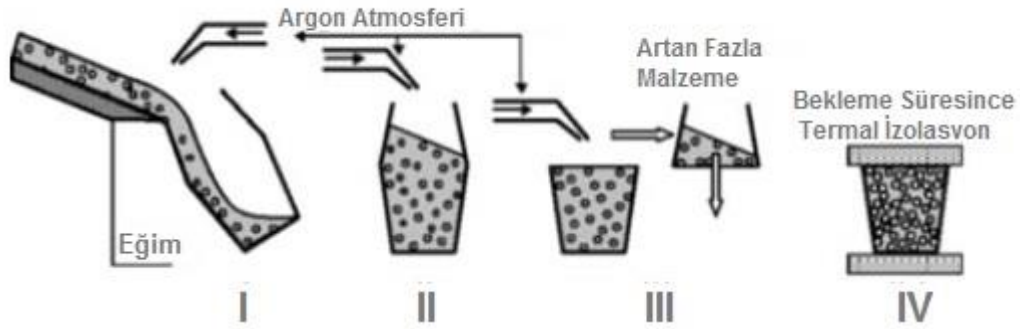
Geleneksel yöntemde, Ø 34mm x 50 mm ebatlarında ve 355 gr. ağırlığında deney numuneleri kullanılmıştır. Yarı katı şekillendirme sistemi, malzeme besleme ünitesi, taşıyıcı robot, indüksiyon fırını, hidrolik dövme presi ve kalıpları, parça çıkarma aparatı ve işlem kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan indüksiyon fırını 50 kW güce ve maksimum 2 kHz frekansa sahiptir. İndüksiyon fırınının dizaynı ve bulunduğu pozisyon ısıtma verimi ve kütük malzemenin sıcaklık dağılımı açısından oldukça önemlidir. Isıtma ünitesi birbirinden ayrılabilir alt ve üst 2 kısımdan oluşmaktadır ki bu ısıtılması istenen parçanın ünite içerisinde kolay hareket ettirilmesini sağlamaktadır. Çevresel ısı kayıplarının önlenmesi için izole malzeme ile sistem koruma altına alınmaktadır. Ayrıca malzeme yüzeyinde oksitlenme ve tufal oluşumu engellemek amacıyla tüm işlemler koruyucu atmosfer altında yapılmaktadır. Bu şekilde dizayn edilen bir yarı katı şekillendirme ünitesi ile ısıtılan parçanın merkezi ile dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının en fazla 15°C olduğu belirtilmiştir. Isıtılan çelik kütükler su verilerek sertleştirilmiş ve hemen sonrasında tekrar ısıtılarak içinde sıvı faz yapısına sahip küresel mikroyapının oluşması sağlanmaktadır.

Hirt ve arkadaşları oluşturdukları bu sistemde ısıtma ünitesinin daha verimli çalışması için farklı bir ısı kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu çalışma için, 1 - Sabit güçte ısıtma, 2 - Sıcaklığın yarı katı faz aralığına ulaştığını otomatik algılayan bir denetleme mekanizması, 3 - Sıvı oranına bağlı olarak ergime için gerekli enerjinin uygulanması,

4 - İş parçasının homojen ısınması için ısı kayıplarını telafi edecek verilerin belirlenmesi birimlerinden oluşmaktadır.

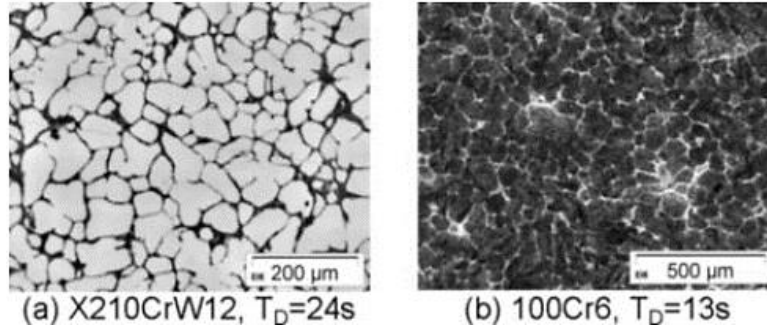
Isıtılan iş parçasının prese ve kalıplara transferinin sağlanması için 6 eksenli robot kullanılmıştır. Bu sistem için robotun iş parçasını tuttuğu aparat özel seramik malzeme ile kaplanmış, işlem öncesinde ve sırasında oksidasyonun önlenmesi için koruyucu gaz kullanılmıştır.

“Reo-route” yöntemi ise bu çalışmada kullanılan ikinci bir yöntemdir. Bu yöntemin temeli, homojen çekirdeklenme yardımıyla küresel mikroyapıya sahip “bulamaç” malzeme (slurry) oluşturulmasını sağlamaktır. Bu yöntem genellikle alüminyum alaşımlarının üretilmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde de geleneksel yöntemde kullanılan alaşımlar kullanılmış olup, sıvı metal soğutma kabına dökülerek belirli bir süre bekletildikten sonra dövülmektedir. Şekil 3.3’de yöntemin detayları görülmektedir.



Şekil 3.3 : “Reo-route” yönteminin proses adımları (Knauf vd., 2006).

Pota içerisinde bulunan bu yarı katı çamur farklı sürelerde katılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, geleneksel yöntemde göre karakteristik olarak en ince tane yapısının 100Cr6 kalite çelikte elde edildiği belirtilmiştir. Ancak Şekil 3.4’de de görüldüğü gibi her iki çelikte de geleneksel yöntemde elde edilen içi sıvı faz dolu küresel yapı (intra granuler liquid) elde edilememiştir.



Şekil 3.4 : “Reo-route” yöntemi ile elde edilen (a) X210CrW12 ve (b) 100Cr6 kalite çeliklerin mikroyapı fotoğrafları (Knauf vd, 2006).

Hirt ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada üretmeyi hedefledikleri parça endüstride dizel yüksek basınç sistemlerinde kullanılan bir parçadır. Yarı katı şekillendirme yöntemi ile bu parça için hedeflenen, yüzey kalitesinde bozulma olmadan işleme oranının mevcut yöntemlere göre daha az yapılmasını sağlamaktadır. Halihazırda bu parça sıcak dövme ile şekillendirildikten sonra işlenmektedir (Hirt vd. 2005).

Yapılan çalışmada kullanılan kalıplar şekillendirme öncesinde yaklaşık 500°C’ye ısıtılmıştır. Özellikle kullanılan kalıp aparatları sayesinde çapak oluşumuna izin verilmeyecek bir dizayn seçilmiştir. Şekillendirme öncesi yapılan termal sonlu elemanlar analizinde, kalıp yüzeyleri incelenmiş ve özellikle kalıp çıkıcısının en yüksek sıcaklığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple aşınmaları önlemek ve ömrü artırmak adına kalıbın bu yüzeyi Si_3N_4 ile kaplanmıştır. Alt ve üst kalıp ise PVD/CVD yöntemi kullanılarak bir molibden alaşımı olan TZM (Titanyum, Zirkonyum, Molibden alaşımı) ile kaplanmıştır.

Yukarıda bahsedilen otomasyon sistemi ve kaplamalı takımlar kullanılmadan önce ilk parçaların üretiminde geleneksel üretimde kullanılan kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplar kaplamasız olup 1.2999 kalite çelikten üretilmiştir. Yapılan bu ön çalışmada amaç 100Cr6 kütüğünün alt kalıba dik şekilde yerleştirilerek, alt-üst kalıbın hizalamasının doğru şekilde ayarlanmasıdır. Bu sistem kullanılarak yapılan ön çalışma ile üretilen parçaların mikroyapısı incelenmiştir. Mikroyapılarda çekme (shrinkage) veya poroziteye rastlanmamıştır. Ancak parça etrafında oluşan oksit tabakasında bazı mikro çatlaklara rastlanmaktadır. Bu sebeple seri üretimde otomasyon sistemi ve inert gaz kullanılarak bahsedilen bu problemler engellenmiştir. Bu şekilde üretilen parçaların sertlik incelemesinde, parça sertliğinin merkezden yüzeye doğru artarak yaklaşık 250-310 HV₁₀ aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bunun sebebinin, farklı

bölgelerin farklı soğutma hızına maruz kalması veya segregasyon olduğu düşünülmektedir. “Rheo-route” ile üretilen parçalarda ise malzemenin kalıbı laminar ve asimetrik bir şekilde doldurduğu, ancak yüzey kalitesinin geleneksel yöntemle göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Tikso şekillendirme ile ilgili endüstriyel bir diğer çalışma Becker ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ileri ve geri eksenli tikso şekillendirme sistemi ile SAE1006 (C05) kalite çelikten boru üretimi incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar benzer örneklerde olduğu gibi indüksiyon fırını kullanılarak ve parçanın çapaksız üretilmesi hedeflenerek yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tikso-ekstrüzyon yöntemi daha önce Hirt ve arkadaşlarının 100Cr6 kalite çelik kullanarak yaptığı çalışmada (Hirt vd. 2005) kullanılan yöntemdir. Becker ve arkadaşları (Becker vd. 2018) yaptıkları bu çalışmada Ø45 mm x 60 mm ebatlarında ve yaklaşık 750 gr ağırlığında SAE1006 kalite çelik kullanmıştır. Deneysel çalışma öncesinde yarı katı şekillendirme sıcaklığının belirlenmesi amacıyla ThermoCalc yazılımı ve Scheil-Gulliver modeli (katılaşma hesap modeli) kullanılmıştır. Yapılan hesaplama sonuçlarına göre 1520°C’de % 32 sıvı faz oranı tespit edilmiştir. 1520°C’ye ulaştıktan sonra ise sıcaklık değişimindeki en ufak artışın sıvı faz oranında ciddi artışlara sebep olduğu belirtilmiştir. Şekillendirme işleminde ise, iki yönlü ekstrüzyon yöntemi ve şekillendirme hızı olarak 300 mm/sn. kullanılmıştır. Şekillendirme öncesi, iş parçası 75 kW gücünde ve 1400 Hz frekansta çalışan bir indüksiyon fırını ile ısıtılmıştır. Isıtma sırasında sıcaklık sürekli olarak ölçülerek homojen bir ısıtma sağlanmıştır. Yapılan ön ısıtma denemelerinde, yüksek sıcaklıklarda parça yüzeyinde hızlı bir şekilde oksit tabakası (tufal) oluşmakta ve bu tabaka şekillendirme sırasında kalıp yüzeyi ile doğrudan temas ettiğinden kalıplarda çok hızlı aşınmaya sebep olmaktadır. Buna ilave olarak, şekillendirme için gerekli kuvvetin artmasına da sebep olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla atmosfer kontrollü ısıtma üniteleri kullanılmasına karar verilmiştir. Becker ve arkadaşları çalışmanın devamında ısıtma döngüsünün optimizasyonu üzerine de çalışmalar yürütmüştür. Bunun amacı parçanın her noktasının homojen bir şekilde ısıtılması ve proses süresince bunun devamını sağlamaktır. Yaklaşık olarak bu sürenin 3 dk’dan az olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu sayede endüstriyel üretim şartlarına benzer şekilde parça üzerinde oluşabilecek oksit tabakasının engellenmesi sağlanmıştır. Bu amaçla parça sıcaklığını ölçmek için 3 adet S tipi Pt/Pt-Rh türü termocift kullanılmıştır. Bunların birisi parçanın merkezine, ikincisi merkez ve yüzey

arasındaki orta noktaya, sonuncusu da parçanın kalıba yakın yüzey kısmına yerleştirilmiştir. Bu yöntem sadece parçanın homojen ısıtılması için yapılan ayarlamalarda kullanılmış ve tikso dövme işleminde kullanılmamıştır. İlk ısıtma ve dövme denemelerinde C38LTT kalite çelik tercih edilmiştir. Bunun amacı SAE1006 kalite çelik için gerekli işlem parametrelerinin belirlenmesidir. C38LTT kalite çelik için şekillendirme öncesi 1420°C sıcaklık hedeflenmiştir. 3 termoçift ile yapılan deneme çalışmalarında bu sıcaklığa yaklaşık 126 sn.'de ulaşılmıştır ve ölçülen sıcaklık aralığı 1428°C±25,5°C'dir ve maksimum sıcaklık 1454°C olarak ölçülmüştür. Bu zaman ve sıcaklık değerleri ile ısıtılan numune yüzeyinde herhangi bir sıvı metal oluşumuna veya oksidasyona rastlanmamıştır. Isıtıcının durdurulması sırasında geçen süre de hesaplama katıldığında 144 sn.'de homojen bir ısıtma olduğu gözlemlenmiş ve bu değer ortalama 1420°C olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamada parçanın ortası ile diğer 2 ölçüm noktasında sıcaklık farkı yaklaşık 16°C dir. Ön denemelerde belirlenen bu parametreler SAE1006 kalite çeliğin tikso dövülmesi için kullanılmıştır. ThermoCALC sonuçlarına göre SAE1006 kalite çelikte 1470°C'de % 2 sıvı oranı görülmektedir. İş parçası 112 sn. süreyle ısıtılmış ve 7 sn.'de ısıtma durdurulmuştur. İş parçasının yüzeyi ile orta noktasında ölçülen sıcaklık yaklaşık 1480°C'dir. Bu farkın transfer sırasında kullanılabileceği değerlendirilmiş ve şekillendirme sırasında parça sıcaklığının ortalama 1472°C ±8°C olacağı öngörülmüştür. Bu sıcaklık değerlerinde sıvı faz oranının yaklaşık % 1,6 ile % 2,4 arasında olacağı tahmin edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda SAE1006 kalite çeliğin C38LTT den yaklaşık 14 sn. daha hızlı ısıtılabildiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda ayrıca parçanın kalıba transferi için 6 eksenli robot kullanılmıştır. Burada amaç üretim sırasında tekrar edilebilirliği sağlamak ve prosesi geliştirmektir. Bu çalışmada, kalıp malzemesi olarak X38CrMoV5 kalite çelik ve yarı katı şekillendirme işlemi için vidalı bir pres kullanmıştır. Bu pres yaklaşık 31.5 kJ enerji kapasitesine ve maksimum 680 mm/sn. şekillendirme hızına sahiptir. Şekillendirme öncesinde Forge® simülasyon yazılımı kullanılarak kalıp içerisinde malzeme akışı, mekanik gerilme değerleri ve sıcaklık analizi yapılmıştır. Bu çalışmalarla yaklaşık 230 parça tikso dövme ile üretilmiştir. Bu 230 parçadan 210'u C38LTT kalite çelikten, 24 tanesi de SAE1006 kalite çelikten üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile bunun öncesinde yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, bazı bölgelerde şekillendirme yükünün % 30 civarında değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Her iki çalışma için boyutsal sonuçlar

değerlendirildiğinde, C38LTT ve SAE1006 kalite çeliklerden üretilen parçaların yaklaşık olarak 0.2 mm'den az ölçüsel toleransa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Üretilen parçaların farklı bölgelerindeki mikroyapısının tane boyutu ASTM 7-9 arasında değişen ferrit tanelerinden oluştuğu gözlenmiştir. Bu sonuç simülasyon değerlerinden daha farklı bir malzeme akışı ve soğuma olduğunu göstermektedir. Ancak yeniden kristalleşme gözlemlenmemiştir. Parça yüzeyinde herhangi bir kavitasyon, çekilme ve inklüzyona rastlanmamıştır.

Robelet ve Rassili, tikso şekillendirme sonrası çeliklerin mikroyapıları ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada tikso dövme için endüstride uygun olan çelikler ve ayrıca tikso dövme için özel olarak üretilen malzemeler kullanılmıştır (Robelet vd, 2006). Çelikler yarı katı şekillendirme aralığında deformasyon sırasında kalıp içerisinde oldukça iyi bir metal akışına sahiptir. Solidüs ve likidüs aralığında şekillendirilen bu parçalar son şekle yakın veya tam geometride üretilebilmektedir. Genellikle tikso dövme ile üretilen parçaların % C oranı 0,35'dir. Şekillendirme için gerekli olan sıcaklık ise % 15-40 arasında sıvı fazın elde edildiği sıcaklık olarak belirtmiştir. Bu aralığın, alaşım elementlerine bağlı olarak yaklaşık 1350°C-1400°C aralığına denk geldiği vurgulanmış ve bu sıcaklık aralığı DSC yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. C38 kalite çelik, bu çalışmada seçilen alaşımlardan birisidir. Ascometal firması solidüs likidüs aralığının standart kalite C38 ve 100Cr6'dan daha geniş olduğu çelikler üretmiş ve tikso şekillendirme denemelerinde kullanmıştır. Bu çelikler C38LTT ve 100Cr6LTT olarak isimlendirilmiştir. Firmanın kendi ürettiği standart alaşımlar ile LTT kalite alaşımların likidüs ve solidüs sıcaklıkları ile katılma aralığı Çizelge 3.1'de verilmiştir. LTT düşük tikso şekillendirme sıcaklığı (Low Thixoforging Temperature) anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.1 : Ticari C38 ve 100Cr6 kalite çelikler ile LTT kalite çeliklerin, solidüs ve likidüs sıcaklıkları ile katılma aralıkları (Robelet vd, 2006).

Çelik Kalitesi	Solidüs Sıcaklığı, °C	Likidüs Sıcaklığı, °C	Katılma aralığı, °C
C38	1430	1530	100
C38 LTT	1380	1510	130
100Cr6	1315	1480	165
100Cr6 LTT	1280	1460	180

Yapılan bu çalışma % 0,38 C oranına sahip çeliğin, % 1 C oranına sahip çelikten daha yüksek sıcaklık aralığında tikso dövme ile şekillendirilebileceğini göstermiştir. Bu

yüzden bu çalışmaya LTT modifikasyonu ismi verilmiştir. Yapılan çalışmada dikkat çeken diğer bir noktada da kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığının elde edilen mikroyapıyı önemli ölçüde etkileyen diğer bir faktör olduğu belirtilmiştir. Öyle ki, kalıp sıcaklığı 150°C ve altında olursa, parça kullanım özelliklerini belirleyen temel fazlar olumsuz etkilenmekte, yapıda karışık martensit, beynit ve perlit yapısı görülmektedir. Mekanik özelliklerin ve sertlik değerlerinin istenen kabul kriterlerini sağlaması için, böyle parçalara normalizasyon ısı işlemi uygulamak gerektiği vurgulanmıştır. Eğer kalıp sıcaklığı 400°C ve üzerinde olursa, istenen mikroyapı elde edilmekte ve bu durumda tikso şekillendirme sonrası ısı işleme ihtiyaç duyulmayacağı belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada ayrıca, ısı işlem sonrası veya ısı işlemsiz tikso şekillendirme ile elde edilen mikroyapıların, geleneksel dövme mikroyapısına yakın olduğu vurgulanmaktadır. Yorulma deney sonuçlarına göre tikso şekillendirme sonrası elde edilen ince taneli mikroyapıların yorulma dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmektedir.

Robelet ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışma sonucunda elde edilen başarılı numunelerin endüstriyel uygulamaya geçilmesi için tikso şekillendirme sırasında işlemin son derece kontrollü yönetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu sayede, geleneksel döküm ve dövme parçaların yerine bu yöntemle elde edilen parçaların rahatlıkla kullanılabileceği belirtilmiştir (Robelet vd. 2006).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, bir önceki bölümde terminolojisi verilen ve günümüze kadar yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak, bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların içeriğinden bahsedilecektir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, tikso dövme prosesi için gereksinimlerin belirlenmesi ve bu gereksinimler doğrultusunda uygun parametrelerin seçilerek endüstriyel anlamda kullanılabilecek bir prototip üretilmesi hedeflenmiştir. Çeliklerin yarı katı şekillendirilmesi konusunda yapılan literatür araştırmalarında, özellikle yarı katı faz aralığını belirleyen deneysel çalışmaların, endüstriyel uygulamalara göre daha çok olduğu görülmektedir. Diğer bir dikkat çeken nokta da şu ana kadar yapılan literatür çalışmalarında kullanılan alaşımların ortak özelliği olarak, özellikle solidüs-likidüs faz aralığı geniş çelik türlerinin tercih edilmiş olmasıdır.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, literatür araştırmalarında yer alan çeliklerin yarı katı faz aralığındaki davranışları temel alınmış ve bu doğrultuda otomotiv sektöründe çok kullanılan C70S6 ve 100Cr6 kalite çeliklerin davranışları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, kullanılan iki farklı alaşımdaki çeliklerin yarı katı faz aralığının belirlenmesi için literatür çalışmalarından, deneysel ısıtma işlem verilerinden ve ThermoCalc analiz sonuçlarından yararlanılmıştır. Seçilen malzemelerin fiziksel ve termodinamik özelliklerine bağlı olarak uygun faz aralığına ısıtılması amacıyla indüksiyon sistemi tercih edilmiş ve proses gereksinimlerine bağlı olarak özel bir sistem tasarlanmıştır. İndüksiyon sisteminin tasarım özellikleri ve teknik verileri, yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak daha iyi sonuçlar elde etmek için sürekli olarak tez çalışmaları süresince geliştirilmiştir. Hazırlanan deneysel sistemde yarı katı sıcaklık aralığına ısıtılan numuneler, faz yapısındaki değişimin incelenmesi için hava ve su ortamlarında soğutulularak karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan karakterizasyon çalışmalarıyla, öncelikle belirlenen sıcaklıkların, tikso şekillendirme işlemi için uygun olup olmadığı malzeme mikroyapıları incelenerek

değerlendirilmiştir. Daha sonra numuneler belirlenen sıcaklıklara ısıtılmış, hidrolik preste şekillendirilmiş ve şekillendirilen malzemeler endüstriyel şartlara benzer şekilde havada soğutulmuştur. Daha sonra üretilen parçalarından alınan numunelerin yapısal ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.1 Deneysel Malzemeler

Tikso dövme öncesi malzeme seçiminde, literatür çalışmalarından elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Bölüm 3’deki örneklerle detaylı olarak bahsedildiği gibi literatürde yapılan çalışmalarda, faz diyagramında solidüs-likidüs aralığı yani yarı katı faz aralığı geniş malzemeler tercih edilmiştir. Bu kapsamda çelik malzemelerin yarı katı fazda şekillendirmek için karbon oranı yüksek malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla otomotiv sanayiinde de sıkça tercih edilen %0,7 C oranına sahip C70S6 çeliği ile %1 C oranına sahip 100Cr6 çeliği bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Her iki çeliğin kimyasal bileşimi, optik emisyon spektrometresi ile belirlenerek Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : C70S6 ve 100Cr6 kalite çeliklerin kimyasal bileşimi.

Çelik kalitesi	Kimyasal bileşim, % ağı.															
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Sn	V	Ti	Pb	Nb	Zr
C70S6	0,68	0,23	0,50	0,019	0,063	0,17	0,01	0,08	0,003	0,105	0,007	0,031	0,001	0,009	0,003	0,001
100Cr6	1,007	0,31	0,33	0,011	0,014	1,54	0,01	0,04	0,023	0,005	0,003	0,004	0,002	0,009	0,003	0,001

Bu çelikler sıcak haddeleme yoluyla üretilmiş olup uzunluğu 500 mm ve çapı 30 mm’dir. Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılacak numuneler, her iki çelik alaşımından 20 mm uzunluğunda ve 25 mm çapında kesilerek hazırlanmıştır. Herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamış ve şekillendirme işlemine tabi tutulmamış olan bu numuneler, tezin bundan sonraki bölümlerinde “orijinal” olarak adlandırılacaktır.

4.2 Yarı Katı Faz Aralığının Belirlenmesi

Bölüm 3’de bahsedildiği gibi yarı katı şekillendirme sistemlerinde kullanılan malzemeler çoğunlukla indüksiyon sistemleri ile yarı katı faz aralığına kadar ısıtılarak şekillendirilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında indüksiyon sisteminde ısıtılacak numunelerin deney sıcaklıklarının belirlenmesi için öncelikle çeliklerin yarı katı faz

aralığının belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda aynı türde veya benzer içerikteki çelik alaşımlarının solidüs- likidüs sıcaklıkları belirli olsa da alaşım oranlarındaki farklılıklar sebebiyle yarı katı sıcaklık aralığında ciddi değişimler görülebilmektedir.

Ayrıca çok yüksek sıcaklıkta proses kontrolünün zor olması sebebiyle, faz aralığının belirlenmesi için daha hassas ölçümler yapılması gerekmektedir. Bu sebeple 100Cr6 ve C70S6 mikro alaşımlı çeliklerin Çizelge 4.1’de verilen kimyasal bileşim değerleri kullanılarak ThermoCALC programı ile sıvı faz oranları tespit edilmiştir. Bu programda CALPHAD yaklaşımı kullanılmış ve her iki mikro alaşımlı çelik için de Scheil Solidification katılaşma modeli kurulmuştur. Bu modelde C ve Si elementleri hızlı yayılan elementler “Hızlı Difüze Olan Element” (Fast Diffuser) olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışma sonrasında genel olarak 1320°C ile 1480°C sıcaklık aralığındaki sıvı-katı faz oranları esas alınarak her iki kalite çelik için bu oranlar ayrı ayrı belirlenmiştir. Her iki mikro alaşımlı çelik için elde edilen sonuçlar Bölüm 5’de detaylı olarak anlatılacaktır.

4.3 Yarı Katı Fazların Elde Edilmesi için Ön Hazırlık Çalışmaları

Bölüm 3’de bahsedildiği gibi literatürde yapılan deneysel uygulamalarda tikso şekillendirme işleminde indüksiyon sisteminin daha çok tercih edildiği bilinmektedir (Becker vd. 2018; Hirt vd. 2005; Robelet vd. 2006).

Yapılan bu çalışmada indüksiyon sisteminin olması gereken parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle yüzey sertleştirmede kullanılan bir tip indüksiyon cihazı ile deneysel çalışmalar başlatılmıştır (bkz: Şekil 5.1). Bu cihaz özellikle el aletleri grubunda mengenelerin ağız kısımlarının yüzey sertliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ancak bu cihaz sadece bölgesel ısıtma yapabildiğinden, endüstriyel anlamda istenen gereksinimleri karşılayabilmek için Şekil 5.4’de görülen özel tasarım indüksiyon sistemi hazırlanmıştır. Bu sistem, düşük frekanslı (35 kW, 2–10 kHz) alternatif akım güç kaynağı, yatay indüksiyon bobini (pnömatik sistem) ve bobin içerisindeki deney numunesinin sıcaklığını ölçen lazer pirometreden oluşmaktadır. Çalışmanın ileriki aşamalarında yatay indüksiyon bobini ile üretilen numunelerde yaşanan sıkıntılar sebebiyle, proses kapasitesini artırmak ve iyileştirmek amacıyla

Şekil 5.6’da gösterilen dikey indüksiyon sistemi tasarlanmış ve sistem daha optimum parametrelerle çalışabilir hale getirilmiştir.

Sistem kurulduktan sonra tikso şekillendirme denemelerinde kullanılacak C70S6 kalite çelik Ø20x25 mm ebatlarında hazırlanarak tikso faz aralığına ısıtılmış, özel tasarlanan kalıpta şekillendirildikten sonra havada oda sıcaklığına soğutulmuştur. Üretilen prototiplerde görülen dövme kusurları sebebiyle, kalıpta, biyel modelinde ve proses parametrelerinde iyileştirme yapılarak, geleneksel sıcak dövme ile üretilen biyel kolunun endüstriyel gereksinimlerini karşılayan tikso biyel kolu üretimi gerçekleştirilmiştir.

Sistemdeki bu değişikliklerin ve iyileştirme çalışmalarının etkileri Bölüm 5’de detaylı olarak anlatılmaktadır.

4.4 Mikroyapı Karakterizasyonu

Mikroyapı karakterizasyonu öncesinde farklı ebatlarda C70S6 ve 100Cr6 kalite çeliklerden hazırlanan numuneler, ThermoCALC programı ile belirlenen yarı katı faz aralığında önceden belirlenen sıcaklıklara ısıtılarak, pnömatik piston vasıtasıyla sistem dışına alınıp su ve hava ortamlarında soğutulmuştur. Her iki ortamda elde edilen mikroyapıların incelenmesi amacıyla, numuneler geleneksel metalografi yöntemleriyle hazırlanmış ve dağlanmıştır. Bu aşamada numuneler öncelikle dikey olarak kesilmiş, bakalit ile kalıplanarak yüzeyleri zımparalanmış ve elmas parlatıcı çözelti ile parlatılmış ve sonrasında %3’lük nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Numunelerin mikroyapıları, Leica ICC50 HD model optik mikroskobun yanı sıra Hitachi TM-1000 ve JEOL 6060 taramalı elektron mikroskopları (SEM) kullanılarak incelenmiş ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ile yarı kantitatif element analiz yapılmıştır.

Ayrıca su ve hava ortamında soğutulan numunelerin mikroyapılarındaki fazların belirlenmesi için, renkli metalografi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda farklı dağlayıcı konsantrasyonları kullanılarak oluşan martensit ve ferrit fazları ile perlit yapısının farklı renklerde görüntülenmesi sağlanmıştır.

4.5 Sertlik Ölçümleri

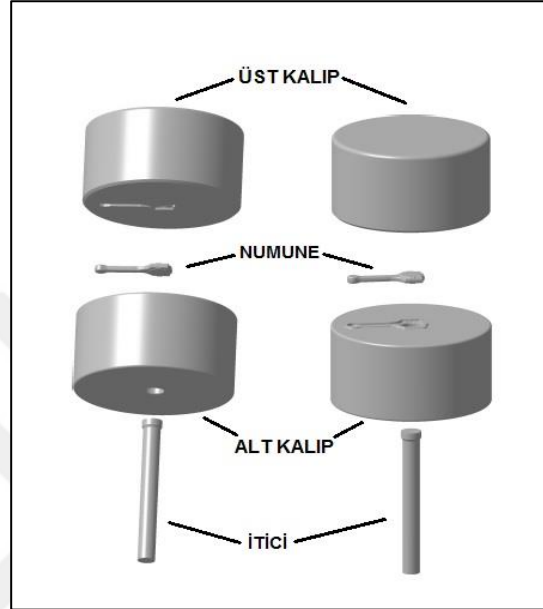
Yarı katı faz aralığına ısıtılarak su ve hava ortamlarında sertleştirilen numunelerin kesitleri, kalıplandıktan sonra geleneksel metalografik yöntemleriyle parlatılarak farklı noktalardan sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler Zwick/Roell ZHV10 marka sertlik cihazında 10 kg yük altında gerçekleştirilmiştir. Her numune için 10 ölçüm yapılmıştır. Ayrıca yarı katı dövme işlemi sonrasında şekillendirilen biyel kolu numunesinde de aynı cihaz ve yük kullanarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve geleneksel dövme ile üretilen biyel kolu numunesi ile karşılaştırılmıştır.

4.6 Tikso Dövme İşlemi

Yapılan bu çalışmada öncelikle yukarıda bahsedilen şekillendirme öncesi tikso faz aralığına numuneleri ısıtmak için, 5 Şekil 5.4’de görülen düşük frekanslı indüksiyon sistemi (35 kW, 2–10 kHz) kurulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi, numune sıcaklıkları S-tipi termočift (Pt/Rh 90%-10% Pt) ve lazer pirometre birlikte kullanılarak yapılmış ve kalibrasyon amacıyla sistem önce kapalı devre olarak çalıştırılmıştır. Kapalı devre çalışma prensibinde sistem istenilen sıcaklığa ayarlandıktan sonra ısıölçer ve pirometreden alınan değerler dijital ekrandan okunmaktadır ve ayarlanan sıcaklık değerine ulaşıldığında sistem kendisini otomatik olarak kapatmaktadır. Sıcaklık kalibrasyonunda tikso faz aralığındaki ölçüm değerleri $\pm 5^{\circ}\text{C}$ sapma payı olacak şekilde ayarlandıktan sonra kullanılacak çeliklerin faz aralık değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle ve hava sirkülasyonu gibi çevresel etmenlerin tufal oluşumunu artırması sonucu pirometre değerlerini olumsuz etkileyebileceği düşünülerek sistem tekrar açık devre konumuna getirilmiş ve deneysel çalışmalara devam edilmiştir. Açık devre sistemlerde cihaza müdahale edilmediği sürece indüksiyon bobini sürekli olarak çalışmakta ve numune ergiyene kadar ısıtılmaya devam etmektedir. Bu durum ilk bakışta olumsuz gibi görünse de özellikle C70S6 gibi dar tikso faz aralığına sahip çeliklerin indüksiyon ile ısıtılmalarında manuel kontrole imkân vermesi bakımından daha kullanışlı olduğu yapılan deneysel çalışmalarda görülmüştür.

Isıtma sistemi ayarlandıktan sonra, söz konusu düzenekte kullanılmak üzere otomotiv sektöründe ticari olarak kullanılan bir biyel koluna ait kalıp tasarımı yapılmıştır. Bu biyel kolu, ticari olarak kullanılan modelin 1/7 oranında küçültülmüş halidir.

Şekillendirme sonrası kütlesi yaklaşık 530 gr olacak şekilde hazırlanan biyel koluna ait tasarlanan kalıpların küçültülmüş hali Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 : Tikso şekillendirme için tasarlanan biyel kolu kalıbı.

Şekil 4.1’de görülen kalıp, tasarımsal olarak kapalı kalıp sistemi olarak bilinmektedir ve literatürde “yüzen kalıp” (floating mold/die) olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemde şekillendirme süresince üst kalıp ve alt kalıp birbirini dikey yönde simetrik olarak karşılayacak şekilde kapanmakta ve çapak vb. gibi malzeme kaybına sebebiyet vermeden çalışmaktadır. Bu kapalı kalıp sistemi tez çalışması kapsamında C70S6 kalite mikro alaşımlı çelikten Ø20x25 mm ebatlarında hazırlanan numunelerin tikso dövme işlemleri için kullanılmıştır.

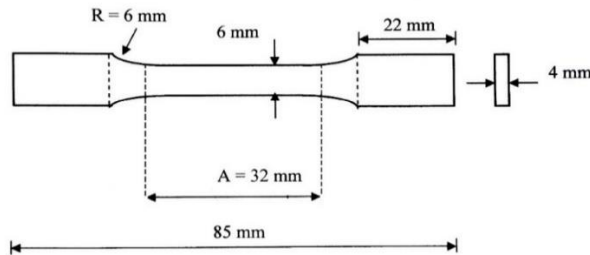
ThermoCALC sistemi kullanılarak C70S6 mikro alaşımlı çeliğin katılaşma ve sıvılaşma faz aralığı belirlendikten sonra numuneler, bu aralık içinde belirlenen sıcaklıklara ısıtılmıştır. Numunelerin yarı katı faz aralığına ısıtılma süreleri süreleri ortalama 120 sn’dir.

Bu süre, çeşitli denemeler sonucu numunelerin istenilen sıcaklığa ulaşabildiği optimum süre olarak belirlenmiştir. Bölüm 5’de detaylı olarak sıcaklık bilgisi verilen numuneler Lasco marka 400-ton kapasiteli mekanik preste şekillendirilmiştir. Yapılan

denemeler sonucunda istenilen formun yakalanabilmesi için kalıplar arası mesafe yaklaşık 350 mm olarak sabitlenmiştir. Şekillendirme sonrasında kalıpların açılmasıyla birlikte kalıp-pres sistemine bağlı otomatik olarak çalışan itici vasıtasıyla şekillendirilen biyel kolu kalıptan çıkartılarak havada oda sıcaklığına soğutulmuştur.

4.7 Çekme Deneyi

C70S6 kalite mikro alaşımlı çelikten hazırlanan numuneler, tikso faz aralığındaki sıcaklık değerlerine ısıtılarak kapalı kalıpta şekillendirildikten sonra, bu prototiplerden Şekil 4.2’de boyutları görülen ve ASTM E8/8M standartlarına göre hazırlanan çekme deneyi numuneleri hazırlanmıştır. Çekme deneylerinde iki tür numune kullanılmıştır. Bunlardan birincisi yukarıda bahsedilen şartlarda optimum tikso sıcaklığı olarak belirlenen 1440°C’de şekillendirilen biyel kolları. İkincisi de ticari şartlarda 1280°C’de geleneksel sıcak dövme ile şekillendirilen biyel kollarından üretilen deney numuneleridir. Çekme deneyleri 100 kN kapasiteli Shimadzu AG-IC model elektromekanik kontrollü deney cihazında 2 mm/dk. çene hızı ile gerçekleştirilmiş ve her iki tür biyel kolundan 4 numune kullanılmıştır.



Şekil 4.2 : Tikso şekillendirilmiş biyel kolundan ASTM E8/8M standartlarına göre hazırlanan çekme deneyi numunesi şekil ve boyutları.

4.8 Çekme Deney Numuneleri Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

1/7 oranında ölçeklendirilerek tasarlanan kapalı kalıp sisteminde 1280°C’de geleneksel dövme ile şekillendirilen ve 1440°C’de tikso şekillendirme ile üretilen biyel kollarının çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyleri, HITACHI TM-1000 model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

4.9 Tikso Dövm Numunesinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi

Bölüm 5’de detaylı anlatıldığı gibi, yapılan ön şekillendirme çalışmalarında birtakım revizyonlara ihtiyaç duyulmuştur. Ön şekillendirme çalışmaları ile muhtemel proses parametreleri belirlendikten sonra, ilk tikso şekillendirme çalışmalarına devam edilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen prototipler ile optimum proses parametreleri tanımlanmıştır. Ancak bu prototiplerde görülen dövm kusurları sebebiyle, kalıp sisteminde revizyona ihtiyaç duyulmuştur. Kusurların oluşmasına sebep veren kök nedenin detaylı incelenebilmesi için gerek kalıp gerekse prototip üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizleriyle ve simülasyon çalışmaları ile kusurlar doğrulanmış ve tasarım değişikliğine ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmalar kapsamında dövm sektöründe sıklıkla kullanılan Simufact Simuforge® yazılımı kullanılmıştır. Bu analizde yaklaşık olarak 8022 mesh atanarak model oluşturulmuş ve her bir meshin ortalama boyutu yaklaşık olarak 0,8 mm olarak belirlenmiştir. Tespit edilen bu hatalar yine sonlu elemanlar analizi ile düzeltilme yoluna gidilerek kalıp ve prototip numunede tasarım değişiklikleri yapılmıştır. Bu değişiklikler sonrası yine sonlu elemanlar analizi yapılarak ilk tasarımda görülen kusurların ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir ve yeni tasarım ile tikso şekillendirme işlemlerine devam edilmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Önceki bölümlerde örnekleri verilen ve tikso şekillendirme konusunda önderlik eden çalışmalar esas alınmış ancak proses detayları konusunda yeterli bilgi bulunmadığı için, tez kapsamında yapılacak çalışmalarda tikso sıcaklığına ulaşmak için kullanılacak indüksiyon ısıtma sistemi için farklı cihazlarda denemeler yapılmıştır. Çalışma öncesinde Bölüm 3’de detayları verilen örnek literatür çalışmalarında belirtilen yöntemler (Cezard vd 2008; Hirt vd. 2006; Rogal vd. 2014; Sołek vd. 2008) incelenerek deneysel sistem kurulumu ve işlem parametrelerinin geliştirilmesi üzerine denemeler gerçekleştirilmiştir.

5.1 Tikso Dövme Sıcaklığına Isıtmak Amacıyla Kullanılan Sistemler

Literatürde yapılan tikso dövme çalışmaları incelendiğinde ısıtma amacıyla indüksiyon sistemi kullanıldığı görülmektedir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinin hepsi benzer çalışma prensibine sahiptir ancak kullanm amacı ve ihtiyaca göre farklı düzeneklere sahiptir. Bu çalışma kapsamında 3 farklı indüksiyon cihazı kullanılmıştır.

5.1.1 Levha indüksiyon sistemi

Bu kapsamda öncelikle bu tez için seçilen çeliklerin (100Cr6 ve C70S6) indüksiyon sisteminin performansını belirlemek açısından çoğunlukla el aletlerinde yüzey sertleştirme amaçlı kullanılan levha indüksiyon (plate induction) sistemi tercih edilmiştir.

Şekil 5.1’de görülen bu sistem halihazırda bu tez kapsamındaki deneylerin gerçekleştiği fabrika ortamında sürekli olarak üretimde kullanılmakta olup, mingenelerin metalleri tuttuğu ağız kısımlarındaki levhanın sertleştirilmesinde kullanılmaktadır.



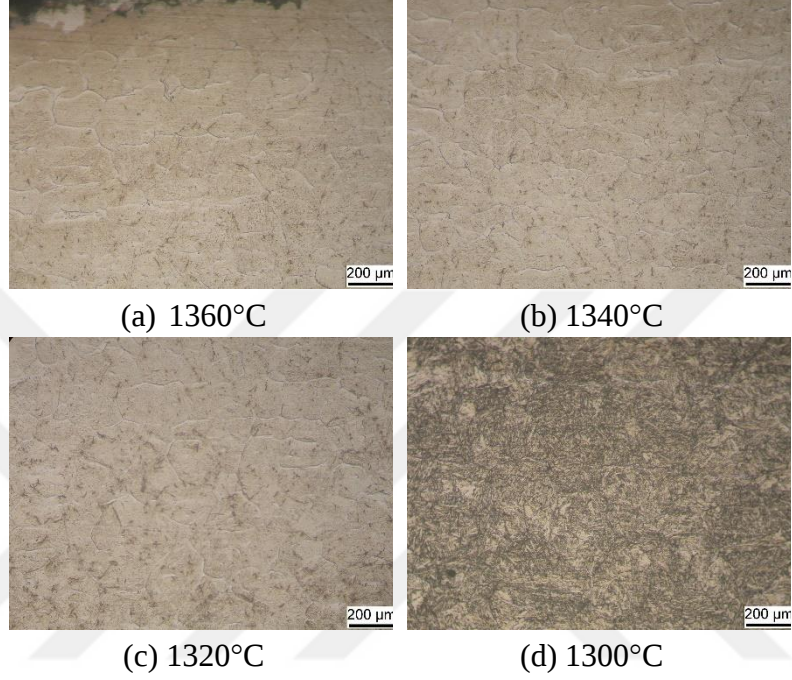
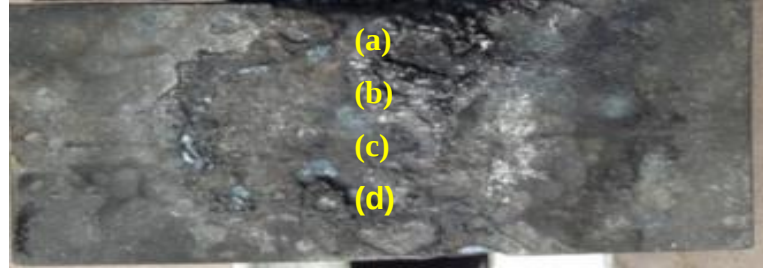
Şekil 5.1 : Mengene ağzı sertleştirilmesinde kullanılan indüksiyon cihazı.

Şekil 5.1’de gösterilen ve seri üretimde kullanılan bu cihazda, mengenerler bant üzerinde ayarlanabilir bir hızda ilerlemekte ve cihazın mengene yüzeyine olan mesafesi ayarlanarak indüksiyonla sertleştirme gerçekleştirilmektedir.

C70S6 ve 100Cr6 kalite çelikler, farklı parametrelerde denemeler yapılmak üzere aparat vasıtasıyla indüksiyon cihazına bağlanmıştır. Bu parametreler, yüzey mesafesi, bant hızı oranı ve sıcaklıktır. Yapılan ön çalışmanın verilerinin doğru takip edilmesi açısından bant hızı ve numune yüzey mesafesi sabit tutularak farklı sıcaklıklarda denemeler yapılmıştır. Bu amaçla bant hızı 2 mm/sn ve indüktör-numune yüzeyi arası mesafe 10 mm olacak şekilde sabitlenmiştir.

Numuneler bant üzerinde sabit hız ve mesafede ilerlerken indüktör hizasında konumlandırılan seyyar lazer pirometre ile sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey sıcaklıkları tüm numuneler için 1320°C -1460°C arasında ölçülmüştür. Numuneler referans olması açısından, Bölüm 4’de belirtilen metalografik tekniklerle hazırlanarak optik mikroskopta incelenmiştir.

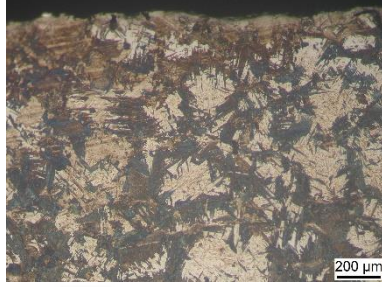
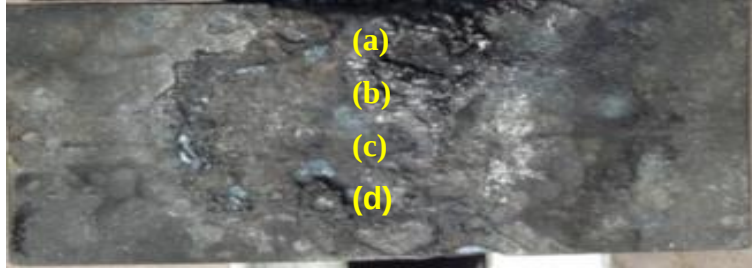
Elde edilen bu mikroyapı görüntüleri referans alınarak tekrar hazırlanan 100Cr6 kalite çelikler bölgesel olarak 4 farklı sıcaklıkta ısıtılmış ve ani su verme ile soğutularak optik mikroskopta mikroyapıları incelenmiştir. Sıcaklıklara bağlı olarak elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.2’de görülmektedir.



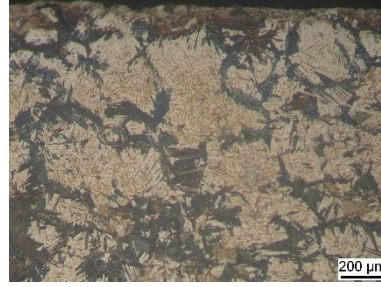
Şekil 5.2 : Levha indüksiyon cihazında ısıtılan 100Cr6 numunesi ve farklı sıcaklıklardaki mikroyapı fotoğrafları.

100Cr6 kalite çeliğin optik mikroyapı fotoğraflarında, numunelerin tane sınırlarında beyaz bir faz görülmekte ve bu fazın oranının sıcaklığın azalmasıyla doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir.

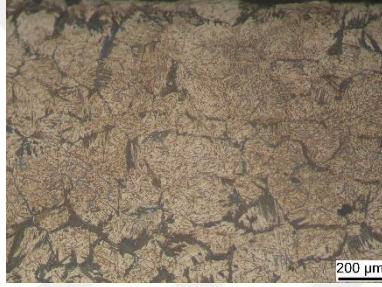
100Cr6 kalite çelikte yüzey sertleştirme cihazıyla yapılan işlemler C70S6 kalite çelikte de aynı şartlarda yapılmıştır. Numune yüzeyi 4 farklı sıcaklığa ısıtılarak, bu sıcaklıklardan ani su verilerek soğutulmuştur. Su verme sonrası numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.3’de görülmektedir.



(b) 1470°C



(b) 1450°C



(c) 1430°C



(d) 1410°C

Şekil 5.3 : Levha indüksiyon cihazında ısıtılan C70S6 numunesi ve farklı sıcaklıklardaki mikroyapı fotoğrafları.

C70S6 kalite çelik için önceden de bahsedildiği gibi literatür araştırmalarında tikso şekillendirme mikroyapılarına rastlanmamıştır. Ancak 100Cr6 kalite çelik için yapılan işlemler referans alınarak C70S6 kalite çeliğe de aynı işlemler uygulanmış ve mikroyapısı incelenmiştir. Bu incelemelerde Şekil 5.3’de görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarında koyu kahverengi renkte bir faz belirlenmiş ve bu fazın oranının sıcaklık azaldıkça azaldığı görülmüştür. Bu fazın, solidüs sıcaklığı üzerindeki sıvı fazın hızlı soğumasıyla oluştuğu değerlendirilmektedir.

Elde edilen bu sonuçlardan yola çıkılarak her iki çelik için farklı sıcaklıklarda yapılan denemelerin başarılı olduğu ve yeterli sıcaklığa ısıtıldığında tikso şekillendirme için gerekli olan yarı katı faz bölgesine ulaşılabilceği görülmüştür. 100Cr6 kalite çeliğe göre C70S6 kalite çeliğin yarı katı sıcaklık aralığı daha dar ve solidüs sıcaklığı daha yüksek değerdedir. Bu sonuçlar çalışmanın devamında bahsedilecek olan ThermoCALC analiz sonuçlarıyla uyumludur.

5.1.2 Yatay indüksiyon sistemi

Farklı sıcaklıklara ısınan numune yüzeylerinden elde edilen mikroyapı analiz sonuçları esas alınarak numunelerin homojen sıcaklıklara ulaşabilmesi için yüzey indüksiyon cihazı yerine bobin indüksiyon sisteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu sistem literatürde yapılan çalışmalarda çokça tercih edilen bir sistemdir. Kullanılan çelik numunelerin tikso sıcaklık aralıklarına ulaşabilmesi için Şekil 5.4’da gösterilen yatay indüksiyon sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 5.4 : Özel tasarım yatay indüksiyon sistemi.

Şekil 5.4’de görülen bu özel tasarım indüksiyon sistemi, düşük frekanslı (35 kW, 2–10 kHz) alternatif akım güç kaynağı, yatay indüksiyon bobini ve bobin içerisindeki deney numunesinin sıcaklığını ölçen lazer pirometreden oluşmaktadır.

Sistemde, C70S6 ve 100Cr6 kalite çeliklerden hazırlanan farklı ebatlardaki numunelerin ısıtma denemeleri yapılmıştır. Bu denemelerde amaç, hazırlanan sistemde kullanılacak çelik numunelerin tikso sıcaklık aralığına homojen şekilde ulaşp ulaşmadığının kontrolünü sağlamaktır. Her iki çelikten farklı ebatlarda kesilen numuneler yatay indüktör içerisinde ısıtılmış ve sıcaklık kontrolü için lazer pirometre kullanılmıştır.



(a) (b)
Şekil 5.5 : Yatay indüktörde (a) kısmi ergime ve (b) tikso sıcaklık aralığında ısıtılan numuneler.

Yatay indüksiyon sisteminde ısıtılan farkı ebatlardaki numunelerde birden fazla önemli problem ile karşılaşmıştır. Birincisi, numuneler homojen olarak ısınmamıştır. Şekil 5.5’de de görüldüğü üzere bazı numunelerin uç kısımlarında kısmi ergime gözlemlenmiştir. Bu durum indüksiyon sisteminin ısıtma rejiminin yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. İkinci önemli problem ise, istenilenden daha yüksek sıcaklığa ulaşarak ergiyen numuneler indüktör bobini içerisinde çıkartılamamıştır. Bu durum, hem istenilen hassasiyette sıcaklık kontrolünün sağlanamaması hem de artan sıcaklığa bağlı olarak numune hacmindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Numune yüzeylerinde oluşan tufal sebebiyle de tüm bölgelerden pirometre ile homojen ölçüm alınamamıştır. İlave olarak, numuneler istenen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren herhangi bir sıcaklık kaybı olmadan numunenin ortam dışına ve pres kalıbına taşınmasında ciddi sıkıntılar yaşanmıştır. Karşılaşılan bu problemlerden ötürü indüksiyon sisteminde tasarımsal olarak değişiklikler yapılmasına karar verilmiştir.

Gerek yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça oluşan tufal sebebiyle yatay olarak hareket ettirme zorluğu gerekse ısınan numunenin şekillendirme amaçlı kalıba transferinde yaşanan sıkıntılar sebebiyle dikey indüksiyon sistemi kullanımına karar verilmiştir.

5.1.3 Dikey indüksiyon sistemi

Yatay indüksiyon sisteminde yaşanan problemler sebebiyle numunelerin homojen ısıtılabilmesi ve ısıtılan numunelerin bobin dışına transferinin daha kolay

yapılabilmesi açısından indüksiyon ünitesinde tasarımsal ve donanımsal değişiklikler yapılmıştır. Bu sebeple Şekil 5.6’da gösterilen bir sistem tasarlanmıştır.



Şekil 5.6 : Özel tasarım dikey indüksiyon sistemi.

Yeni tasarlanan sistemde indüksiyon bobini dikey olarak konumlandırılmış ve ısıtılan numunelerin transferinin hızlı ve kolay yapılabilmesi için sisteme dikey yönde çalışan pnömatik piston ilave edilmiştir. Manuel anahtar ile çalışan pnömatik piston sayesinde numune bobin içerisinde istenilen konumda hizalanmakta ve istenilen sıcaklığa ulaşıldığında tekrar eski konumuna getirerek kolaylıkla dışarı alınabilmektedir. Aynı zamanda pistonun hızı ayarlanabilmekte ve kalıba transfer öncesinde ısı kaybı en aza indirgenebilmektedir.

Dikey indüksiyon sisteminden istenilen verimin alınabilmesi için farklı çap ve ebatlarda numunelere hazırlanarak, uygun bobin çapı ve piston yüksekliği belirlenmiştir. Piston yüksekliğinin belirlenmesi sayesinde numunenin bobin sargısının ortasında hizalanması sağlanmış ve ısıtma verimi artırılmıştır. Yapılan bu denemelerde sisteme bağlı lazer pirometre ve S tipi termoçift ile hedeflenen tikso sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Doğal hava sirkülasyonu ve ısıtma sırasında numune yüzeyinde oluşan tufal sebebiyle, lazer pirometrenin okuduğu sıcaklık değerlerinin doğruluğunun kontrolü için S tipi termoçift (Pt/Rh 90%-10% Pt) ile sistemin sürekli olarak kalibrasyonu sağlanmıştır.

Hazırlanan bu sistem önce pirometreye bağlı kapalı devre olarak tasarlanmış, daha sonra sıcaklık kontrol aralığının genişletilmesi amacıyla açık devre sisteme

dönüştürülmüştür. Tikso şekillendirme işleminin çalıştırılması sırasında elde edilen sıcaklık değerleri dijital gösterge ile anlık olarak kontrol edilmiştir.

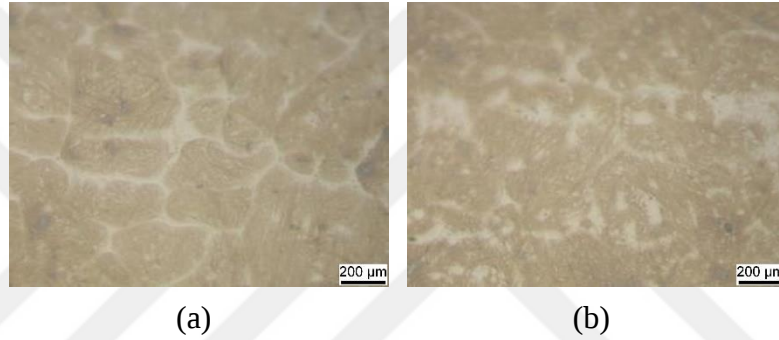
Numuneler sırası ile küçük çap ve boydan başlayarak büyük çap ve boya göre değişim gösterecek şekilde hazırlanarak, indüksiyon ısıtma sisteminin kontrollü bir şekilde çalışma performansı izlenmiştir. Burada amaç hazırlanan tikso ısıtma sisteminde istenilen tikso sıcaklık aralığına en ideal şekilde ulaşabilecek numune boyutlarını ve sistem parametrelerini tespit etmektir. Çünkü numune ebatlarındaki değişim indüksiyon sisteminin verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Suda ve havada soğutma sonucu elde edilecek mikroyapıların incelenmesinde farklı ebatlarda C70S6 ve 100Cr6 kalite mikro alaşımlı çelikten hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında da tikso şekillendirme için bugüne kadar yapılan çalışmalarda dikey indüksiyon sisteminin tikso şekillendirme de en çok tercih edilen sistem olduğu görülmektedir. Bölüm 3’de detayları belirtilen literatür çalışmalarının tamamında tikso şekillendirme sistemlerinde indüksiyon yöntemi kullanılmıştır.

Yapılan ilk deneysel çalışmalarda çelikler ergime sıcaklığına kadar kontrollü olarak ısıtılmıştır. Ancak Fe-C denge diyagramı referans alınarak yapılan ısıtma denemelerinde numunelerin belirlenen sıcaklığa ulaşmadan ergidiği gözlemlenmiştir. Bu durum, Fe-C denge diyagramında tahmini olarak belirlenen katılaşma sıcaklığının doğru olmadığını göstermektedir. Belirlenen katılaşma sıcaklığının farklı olmasının sebebi olarak C70S6 ve 100Cr6 kalite çeliklerin mevcut alaşım elementlerinin denge diyagramındaki solidüs-likidüs sıcaklıklarını değiştirmesi olarak öngörülmektedir.

Yapılan literatür araştırmalarında C70S6 kalite çelik için için tikso dövme konusunda yeterli bilgiye rastlanmadığı daha önce de vurgulanmıştı. Ancak 100Cr6 kalite çelik için yapılan literatür araştırmasında yeterli miktarda çalışmaya rastlanmaktadır. Bunun başlıca sebebi, 100Cr6 kalite çeliğin solidüs sıcaklığının C70S6 kalite çeliğe göre daha düşük olmasıdır. Bu sıcaklık değerinin düşük olması daha düşük sıcaklıklarda deneysel çalışmanın yapılmasını kolaylaştırmaktadır (Robelet vd. 2006).

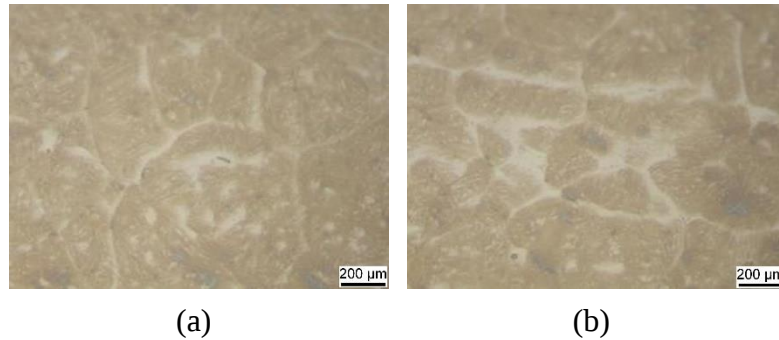
Özellikle C70S6 kalite çelik için yapılan araştırmalarda ihtiyaç duyulan bilgilere rastlanamaması sebebiyle, 100Cr6 kalite çelik referans alınarak deneysel çalışmalar devam ettirilmiş ve elde edilen bilgiler doğrultusunda C70S6 kalite çeliğin parametreleri değiştirilerek çalışmalara devam edilmiştir.

Rogal ve arkadaşları, 100Cr6 kalite çeliğin 1390°C'ye ısıtılarak yarı katı şekillendirmesi üzerine yaptıkları çalışmada elde ettikleri numunelerin mikroyapılarında tanelerin etrafında beyaz bölgelerin olduğunu görmüşler ve bu beyaz renkli bölgenin kısmi olarak tane içerisinde de mevcut olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklık düştükçe elde edilen bu beyaz bölgelerin oranının azaldığını fark etmişler ve yapılan bu çalışmalarda sıcaklığa bağlı olarak beyaz faz bölgesinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu sonuçlardan yola çıkarak elde edilen beyaz bölgenin sıvı faz bölgesine ait yapı olduğunu tespit etmişlerdir (Rogal vd. 2010). Rogal ve arkadaşlarının elde ettikleri mikroyapı ile bu doktora tez çalışmasında 1380°C'den su verme sonrası elde edilen mikroyapının (Şekil 5.7) birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7 : (a) ve (b) 1380°C'den su verilerek soğutulan 100Cr6'a ait mikroyapı görüntüleri.

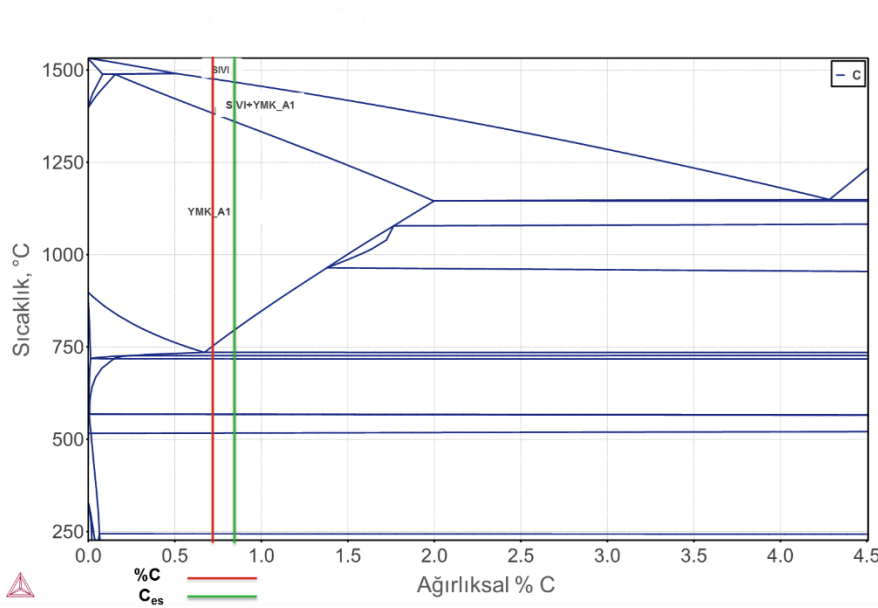
Püttgen ve arkadaşları da, yaptıkları benzer bir çalışmada 100Cr6 kalite çeliği 1425°C'ye ısıtmış ve su verme sonrası mikroyapısını incelemiştir. Elde edilen mikroyapıda tane sınırları boyunca görülen beyaz bölgelerin sıvı fazdan katılaştıran bölgeler olduğu ve bu bölgelerde bir miktar kalıntı östenitin de bulunduğunu belirtmişlerdir (Puttgen vd. 2007). Elde edilen mikroyapının Şekil 5.8'de 1400°C'de elde edilen mikroyapı ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.8 : (a) ve (b) 1400°C'den su verilerek soğutulan 100Cr6 çeliğine ait mikroyapı görüntüleri.

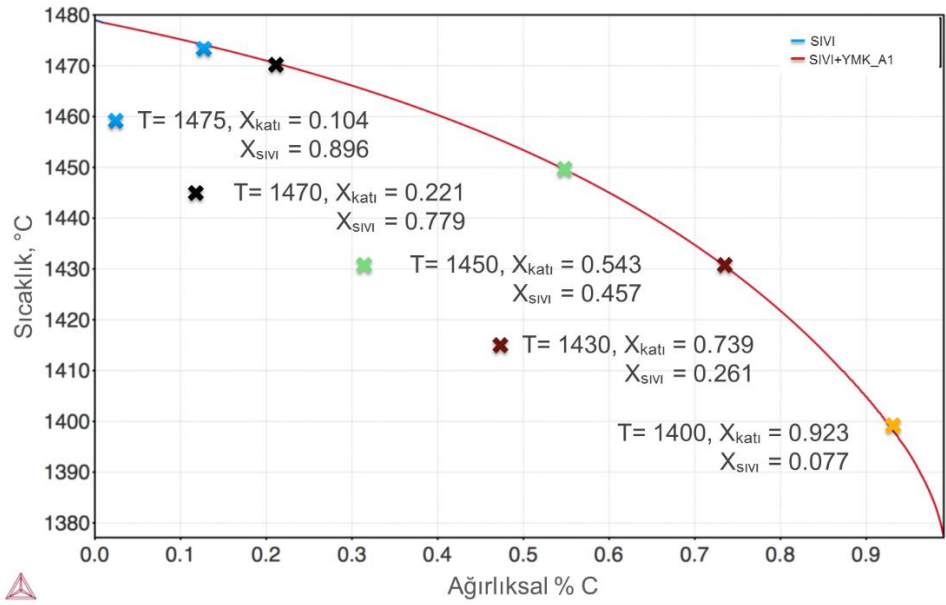
5.2 Yarı Katı Faz Aralığının Belirlenmesi

Kullanılacak çeliklerin faz dönüşüm sıcaklıkları, ThermoCALC programı ile yapılan modelleme ile belirlenmiştir. Öncelikle yapılan analiz sonuçlarına bağlı olarak seçilen mikro alaşımlı çeliklerin faz diyagramları ThermoCALC yazılımı ile elde edilmiştir ve her iki alaşımların karbon C oranı ve karbon eşdeğeri (C_{es}) elde edilen faz diyagramlarında renkli çizgilerle belirtilmiştir. ThermoCALC programı ile elde edilen C70S6 kalite çeliğe ait faz diyagramı Şekil 5.9 de görülmektedir.



Şekil 5.9 : ThermoCALC programı ile elde edilen C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliğe ait faz diyagramı.

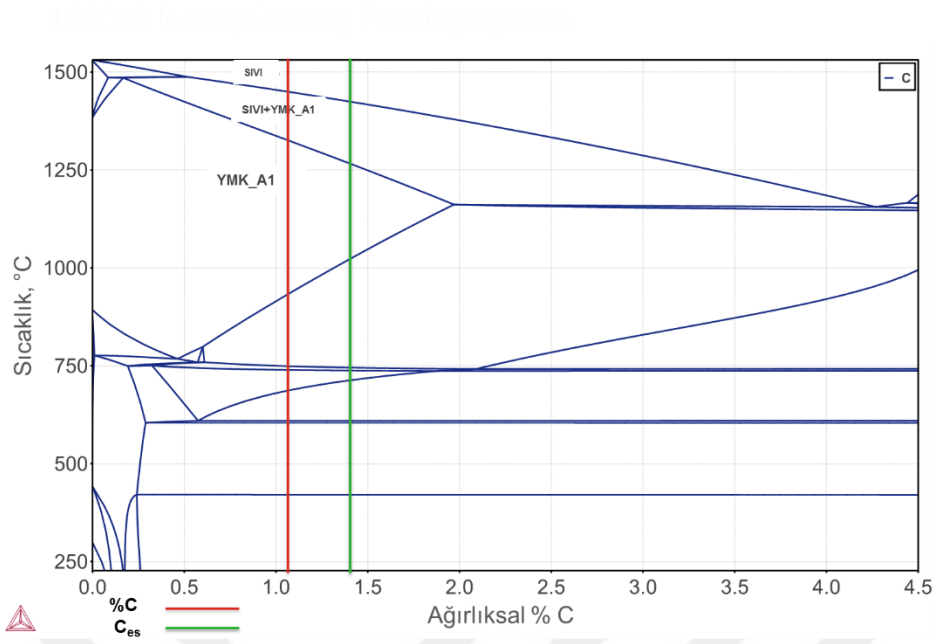
Şekil 5.9’de görülen faz diyagramına göre C70S6 kalite çelik için yine ThermoCALC programında soğuma eğrisi oluşturulmuştur. Bu soğuma eğrisine göre yapılan hesaplamalar sonucu yapılan tikso dövme deneylerinde seçilen sıcaklıklara göre mevcut katı-sıvı oranı belirlenmiş ve bu oranlar Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 : C70S6 kalite çeliğe ait soğuma eğrisi ve belirlenen sıcaklıklardaki katı-sıvı oranı.

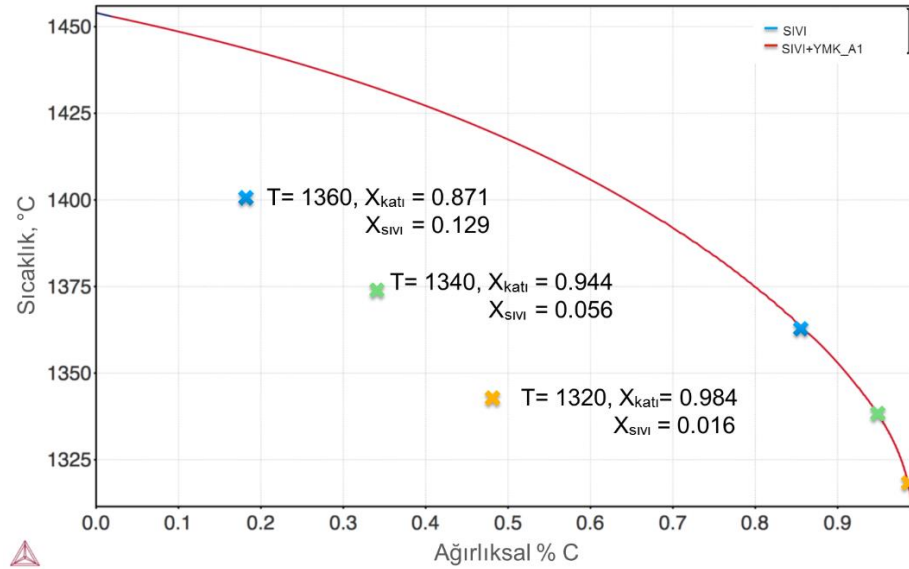
Oluşturulan faz diyagramı ve soğuma eğrisi analiz sonuçlarına göre C70S6 kalite çeliğin katılaşma ve sıvılaşma faz aralığı olarak 1390°C – 1470°C belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, sistemin $\pm 5^\circ\text{C}$ ısıtma toleransını da dikkate alarak tikso şekillendirme işlemi için sırasıyla 1390°C-1400°C, 1410°C-1420°C, 1430°C-1440°C ve 1450°C-1460°C sıcaklıkları belirlenerek numuneler ısıtılmıştır.

C70S6 kalite çelik için yapılan analizlere benzer şekilde 100Cr6 kalite mikro alaşımlı çelik için de aynı ThermoCALC modelleme parametreleri kullanılarak yapılan analiz sonucu, 100Cr6 mikro alaşımlı çelik için katılaşma ve sıvılaşma faz aralığı 1336°C-1450°C olarak belirlenmiştir. Bu yöntemle 100Cr6 kalite çelik için elde edilen faz diyagramı Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11 : ThermoCALC programı ile elde edilen 100Cr6 kalite mikro alaşımlı çeliğe ait faz diyagramı.

Şekil 5.11’de görülen faz diyagramına göre 100Cr6 kalite çelik için yine ThermoCALC programında soğuma eğrisi oluşturulmuştur. Bu soğuma eğrisine göre yapılan hesaplamalar sonucu seçilen sıcaklıklara göre mevcut katı-sıvı oranı belirlenmiş ve bu oranlar Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12 : 100Cr6 kalite çeliğe ait soğuma eğrisi ve belirlenen sıcaklıklardaki katı-sıvı oranı.

Bu aşamaya kadar yapılan çalışmanın amacı, tıksa şekillendirme için gerekli katı-sıvı oranını tespit ederek planlanan şekillendirme için doğru proses sıcaklığını

belirlemektir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4’de bahsedilen örnek çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde, tikso şekillendirme sıcaklığının kimyasal bileşim ve karbon oranına bağlı olarak değiştiği teyit edilmiş olmaktadır. Buna göre, 100Cr6 ve C70S6 kalite mikro alaşımlı çelikler için belirlenen solidüs-likidüs sıcaklıkları Çizelge 5.1’de görülmektedir.

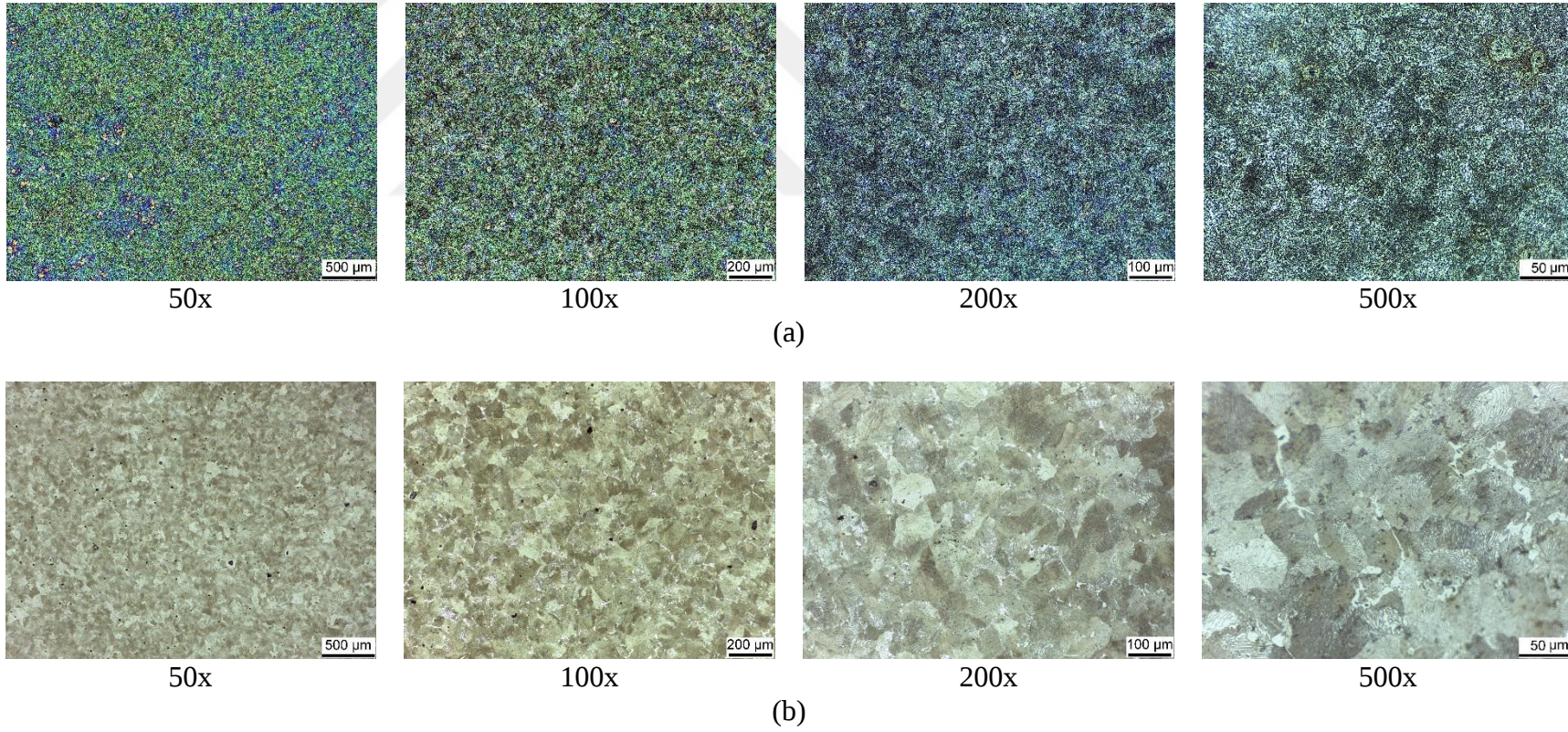
Çizelge 5.1 : İncelenen çeliklere ait belirlenen solidüs ve likidüs sıcaklıkları ile katılma aralığı.

Çelik kalitesi	Solidüs Sıcaklığı, °C	Likidüs Sıcaklığı, °C	Katılma aralığı, °C
100Cr6	1336	1450	114
C70S6	1390	1479	89

Şekillendirme öncesinde numuneler, Çizelge 5.1’de verilen solidüs ve likidüs sıcaklıkları esas alınarak ısıtılmıştır. Isıtma sırasında hedeflenen sıcaklık kontrolü bir lazer pirometre ile yapılmıştır. İstenen sıcaklığa ulaşan numuneler 10 sn. bu sıcaklıkta bekletilmiş, daha sonra ayrı ayrı su ve hava ortamında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra numunelerde metalografik iç yapı incelemesi ve mikrosertlik ölçümü yapılmıştır.

5.3 Mikroyapı İncelemeleri ve Sertlik Ölçümleri

Orijinal 100Cr6 ve C70S6 kalite mikro alaşımlı çelikler, ThermoCALC analizleri ile belirlenen tikso sıcaklığına ısıtılarak 10 sn. bekletildikten sonra su verilerek soğutulmuştur. Bu numuneler geleneksel metalografik numune hazırlama yöntemleriyle hazırlanarak % 3’lük nital çözeltisi ile dağlanmış ve mikroyapıları optik mikroskopta incelenmiştir. Optik mikroskopta farklı büyütmelerde görüntülenen 100Cr6 ve C70S6 kalite çeliklerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.13 (a) ve (b)’ de görülmektedir.



Şekil 5.13 : Orijinal (a) 100Cr6 ve (b) C70S6 kalite çeliklerin farklı büyütmelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları.

Şekil 5.13(a)'da yer alan orijinal 100Cr6 kalite çeliğin mikroyapısı, ferrit ve perlit yapısından oluştuğu görülmektedir (Hirt vd. 2005). Şekil 5.5(b)'de orijinal C70S6 kalite çeliğin farklı büyütmelerdeki mikroyapıları incelendiğinde, mikroyapının çoğunlukla perlit ve tane sınırlarında beyaz faz olarak görünen ferritten oluştuğu görülmektedir (Sridhar 1999; Zhang vd. 2010).

Küresel formdaki bazı gri partiküllerin de sülfür inklüzyonlarına bağlı olarak mikroyapıda bulunduğu gözlemlenmektedir. Şekil 5.13'de optik mikroyapı fotoğrafları görülen orijinal 100Cr6 ve C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliklerin 1 kg yüküyle yapılan mikrosertlik ölçümlerine ait ortalama sonuçlar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

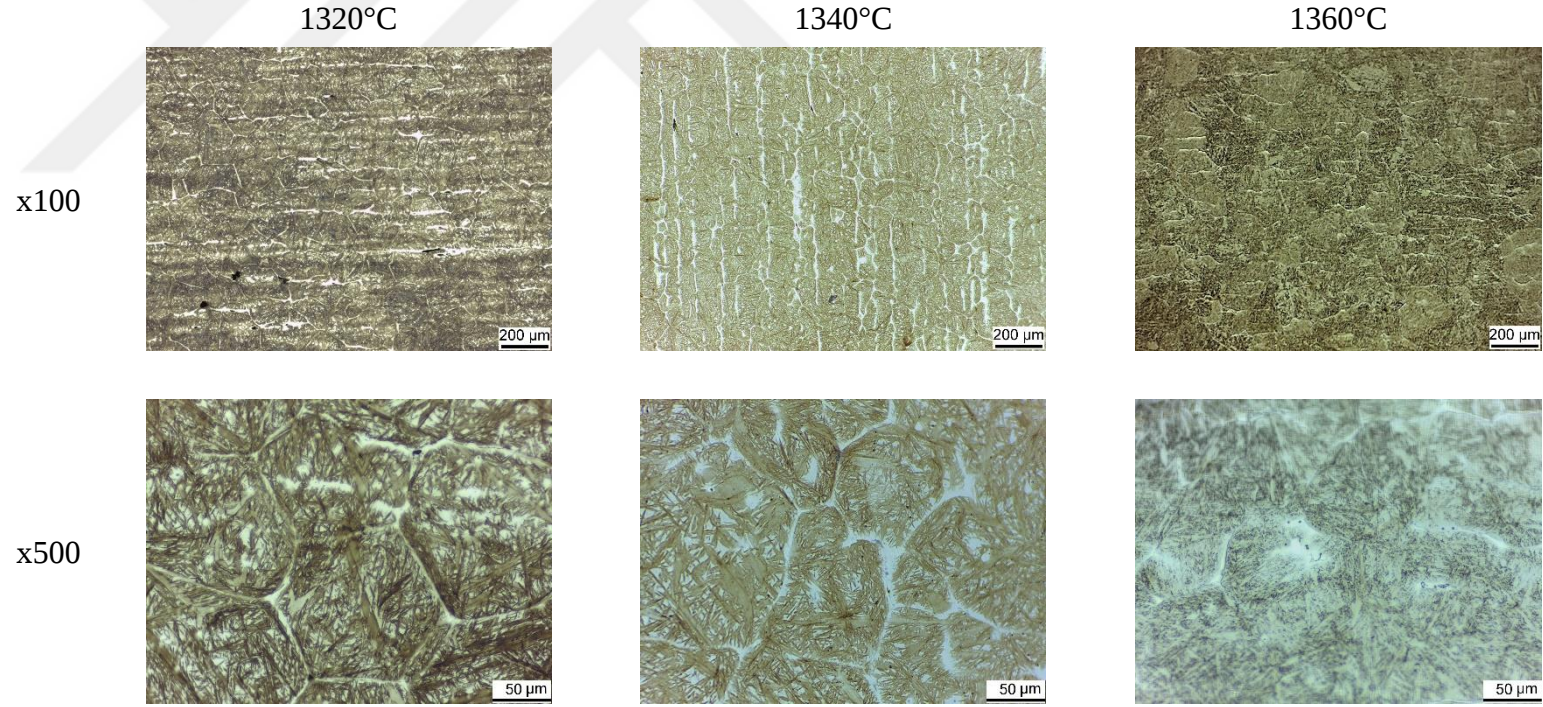
Çizelge 5.2 : Orijinal 100Cr6 ve C70S6 kalite çeliklerin mikrosertlik ölçüm sonuçları.

Numune	Mikrosertlik (Hv ₁)
100Cr6	261
C70S6	306

5.3.1 Tikso sıcaklığından su verilen 100Cr6 kalite çeliğin mikroyapı incelemeleri

Önceki kısımlarda bahsedilen ThermoCALC analiz sonuçlarına göre orijinal 100Cr6 kalite çeliğin faz diyagramı incelendiğinde katılaşma sıcaklığı 1336°C olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler bu sıcaklık referans alınarak belirlenen alt ve üst sıcaklıklara indüksiyon cihazı ile ısıtılarak su ortamında ani soğumaları sağlanmıştır. Bu çalışmalarda, malzeme yapısında sıcaklığa bağlı olarak oluşan sıvı fazın ani soğutma ile incelenebilir durumda olması hedeflenmiştir. Bu sebeple katılaşma sıcaklığının alt ve üst sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Su ortamında farklı sıcaklıklardan ani soğutulan 100Cr6 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.14'de verilmiştir.

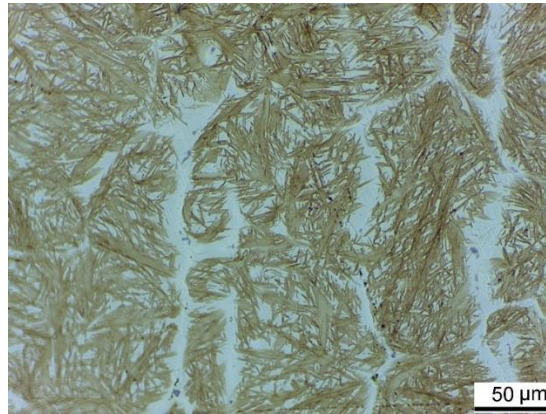


Şekil 5.14 : Farklı sıcaklıklardan ani su verilmiş 100Cr6 numunelerinin optik mikroyapı fotoğrafları.

Şekil 5.14’de görüldüğü gibi mikroyapılar homojen bir görünümündedir. Mikroyapılarda tane sınırlarında sürekli bir ağ şeklinde beyaz faz ve tane içlerinde martensitik yapı görülmektedir. Aynı zamanda tane sınırlarında var olan beyaz fazın noktalar halinde tane içlerinde de varlığı belirgin olarak görülmektedir.

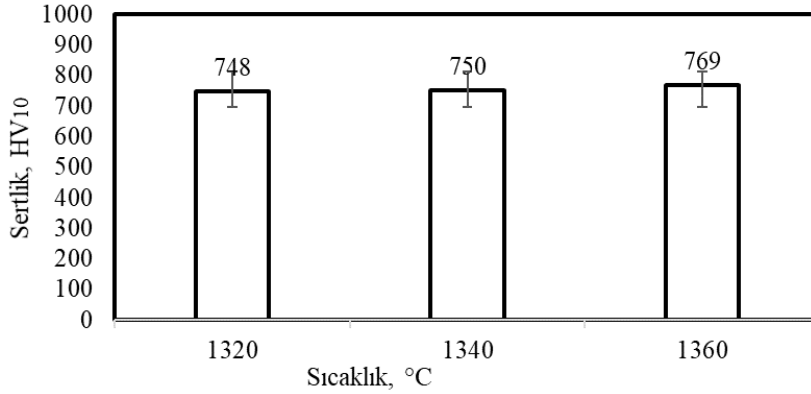
Püttgen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, martensitik yapının, seçilen yarı katı şekillendirme sıcaklık aralığında kararlı olan östenit ve sıvı fazdan, östenitin suda soğutma sonucunda martensite dönüşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 5.7’deki mikroyapıda görülen beyaz renkli bölgeler, tikso sıcaklığında kararlı olan sıvı fazdan dönüşen bölgeleri göstermektedir. Bu bölgelerin bir miktar östenit içermekle birlikte, sıvı fazın tamamen östenite dönüşmediği, ayrıca Ms sıcaklığının çok düşük ($\sim 60^{\circ}\text{C}$) olmasından dolayı tane sınırlarındaki beyaz bölgelerin martensite de dönüşmediği belirtilmiştir (Püttgen vd. 2007). Seçilen en düşük yarı katı sıcaklık olan 1320°C ’den oda sıcaklığına su verme sonrasında oluşan martensitin morfolojisi iğnesel iken; 1360°C ’de bu morfolojinin bir miktar kabalaştığı görülmektedir.

ThermoCalc analizi ile 100Cr6 kalite çelik için belirlenen yarı katı sıcaklığında sıvı ve katı faz oranları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.11’de verilmiştir. Analiz sonuçları yarı katı faz sıcaklığı arttıkça, sıvı faz oranının arttığını göstermekle birlikte, oda sıcaklığındaki mikroyapıların tane sınırlarında gözlenen beyaz bölgelerin oranlarında yarı katı sıcaklığa bağlı olarak belirgin bir sistematik değişim görülmemektedir. Bu durum Püttgen ve arkadaşları tarafından 100Cr6 kalite çelik için vurgulanmış ve farklı yarı katı sıcaklıklarından su verilen numunelerin mikroyapısında kalıntı östenit açısından belirgin bir fark görülmediği belirtilmiştir (Püttgen vd. 2007).



Şekil 5.15 : 1340°C ’den su verilen 100Cr6 mikro alaşımlı çeliğin optik mikroyapı fotoğrafı.

Su verme işleminden sonra martensitik bir yapı elde edilmiştir. Şekil 5.15’de gösterilen martensitik mikroyapı, tane içlerinde martensit, tane sınırlarında ise sıvı faz varlığı bakımından yarı katı sıcaklığından su verilen numunelerin literatürde verilen mikroyapısı ile aynı karakteristik özellikleri taşımaktadır. Elde edilen bu numunelerde 10 kg yükte farklı noktalardan sertlik ölçümü yapılmıştır. Mevcut numunelere ait sertlik deneyi sonuçları Şekil 5.16’da görülmektedir.



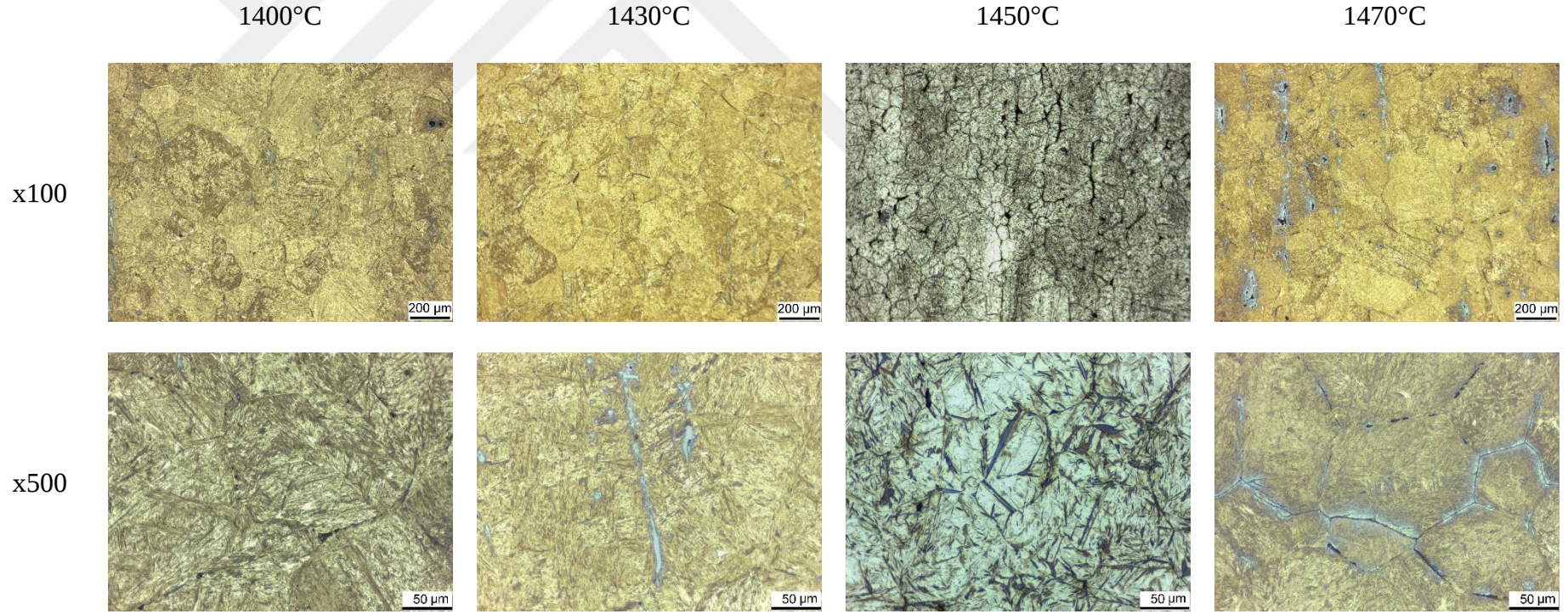
Şekil 5.16 : Su verilmiş 100Cr6 numunelerine ait sertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 5.16’da su verilerek sertleştirilmiş 100Cr6 kalite mikro alaşımlı çeliğe ait sonuçlar ile literatürde yapılan benzer çalışmalar karşılaştırıldığında, tablodaki sertlik değerlerinin martensitin sertlik değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. (Meng vd. 2014; Püttgen vd. 2007; Rogal ve Dutkiewicz 2012)

5.3.2 Tikso sıcaklığından su verilen C70S6 kalite çeliğin mikroyapı incelemeleri

Önceki kısımlarda bahsedilen ThermoCALC analiz sonuçlarına göre orijinal C70S6 kalite çeliğinin faz diyagramı incelendiğinde katılma sıcaklığı $\sim 1390^{\circ}\text{C}$ olarak görülmektedir. Bu sıcaklık referans alınarak belirlenen katılmanın alt ve üst sıcaklık limitlerine ($1400^{\circ}\text{C} - 1479^{\circ}\text{C}$) göre hazırlanan numuneler indüksiyon sisteminde ısıtılarak denemeler yapılmıştır. Belirtilen sıcaklıklara ısıtılan numuneler ani olarak suya atılarak sertleştirilmiştir. Yapılan bu işlemde amaç daha önce 100Cr6 kalite çelikte olduğu gibi katılma sıcaklığı üzerine ısıtılan malzemenin ani olarak soğutulduğunda sıvı fazın içeride hapsolmesini sağlamaktır.

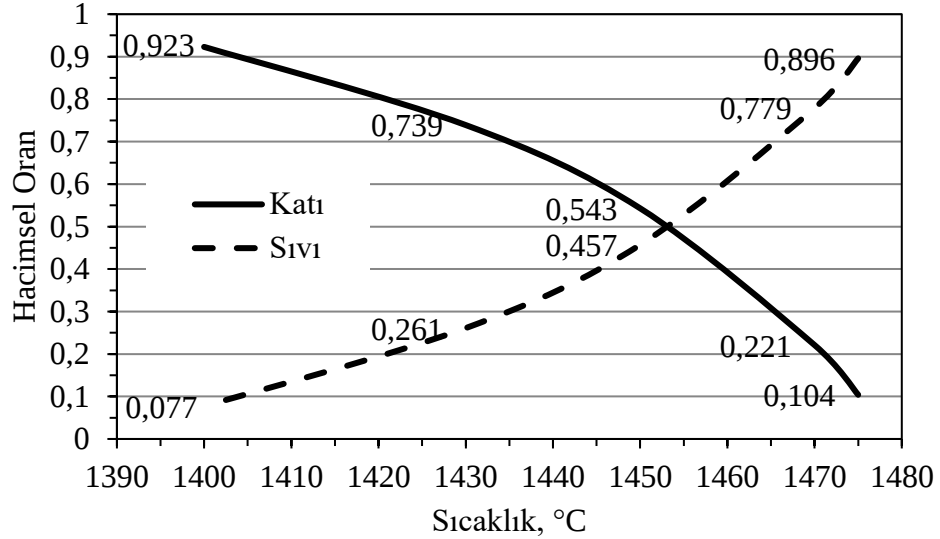
Su verilerek farklı sıcaklıklardan soğutulan 100Cr6 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Farklı sıcaklıklardan su ortamında soğutulmuş C70S6 numunelerinin optik mikroyapı fotoğrafları.

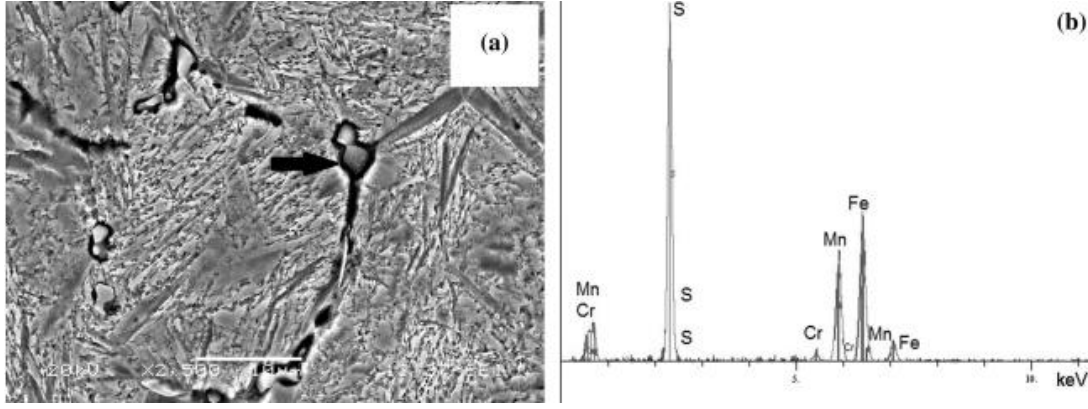
Şekil 5.17’de görüldüğü gibi farklı sıcaklıklardan su verilerek sertleştirilen C70S6 kalite çeliklerin mikroyapıları martensitiktir ve kısmi olarak bazı bölgelerde inklüzyonlar mevcuttur. Martensitik yapı incelendiğinde ise morfolojik olarak mikroyapı genelinde bir farklılık görünmemektedir. Ancak bazı bölgelerde tane sınırlarında ayrılmalar görülmektedir. Taneler arasında görülen bu ayrılmalar özellikle diğer numunelere göre daha yüksek yarı katı sıcaklık aralığından su verilen malzemelerin mikroyapılarında mevcuttur. 1400°C, 1430°C, 1450°C ve 1470°C’de elde edilen bu mikroyapılara ait tane boyutları sırasıyla 132 ± 25 µm, 168 ± 35 µm, 133 ± 21 µm ve 155 ± 16 µm’dir. Balart ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada V-N mikro alaşımlı orta karbonlu çeliğe sıcak şekillendirme sonrası ısıtma işlemi yaparak elde edilen mikroyapıda ortalama tane boyutu 160 µm olarak ölçülmüştür (Balart vd. 2000). Bu sonucun yukarıda belirtilen tane boyutu değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak elde ettiğimiz mikroyapılarda yüksek yarı katı şekillendirme sıcaklığı sebebiyle tane boyutları arasında sistematik bir korelasyon görülmemektedir.

Yukarıdaki bilgilere ilave olarak, Şekil 5.17’deki mikroyapılarda küresel formda veya tane sınırı boyunca uzamış formda ikinci faz partikülleri görülmektedir. Bu fazlara Şekil 5.13’de belirtilen orijinal mikroyapıda da benzer şekilde rastlanmaktadır. Yarı katı şekillendirme sıcaklığından yüksek hızlarda soğutmaya bağlı olarak, tane sınırlarında çatlaklar görülmektedir ve bunlar yüksek su verme sıcaklıklarının kaynaklanan “su verme çatlakları” olarak değerlendirilmektedir. Şekil 5.18’de görülen, 1400°C ve 1470°C arasında seçilen yarı katı şekillendirme sıcaklıklarında numunelerin hacimsel olarak sıvı faz oranları sırasıyla 0,08 ile 0,78 arasında olduğu halde, Şekil 5.25’de de görüldüğü gibi oda sıcaklığındaki mikroyapılarda sıvı fazın olduğuna dair herhangi bir kanıt bulunmamaktadır. Bu sonuç, Gu’nun 100Cr6 ve C38LTT çelikleri için yapmış olduğu çalışmayla uyumludur (Gu, 2013).

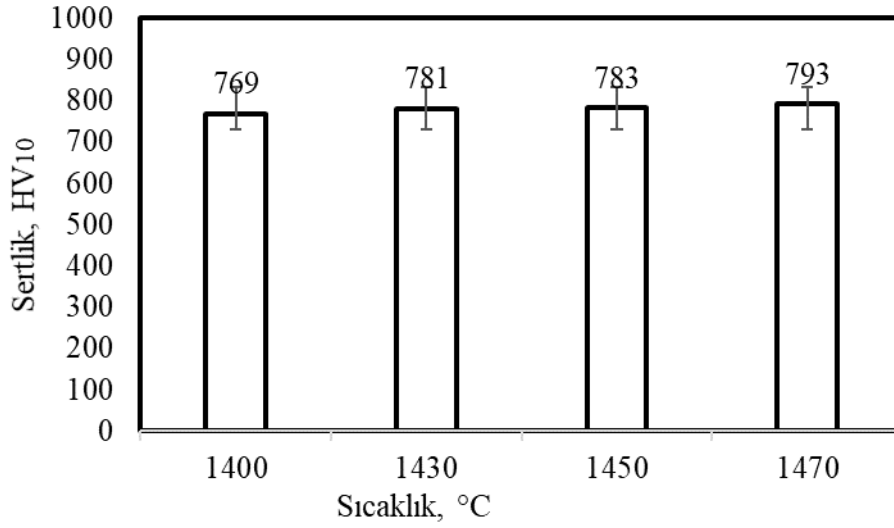


Şekil 5.18 : Farklı yarı katı şekillendirme sıcaklıklarında C70S6 kalite çeliğe ait hacimsel katı ve sıvı faz oranları.

Ayrıca C70S6 kalite çeliğin kimyasal bileşiminde yüksek oranda (ağ. % 0,063) S bulunmaktadır. Kimyasal bileşimdeki S, Mn ile birleşerek bazı bölgelerde MnS yapısını oluşturur. Yarı katı şekillendirme sıcaklığından soğutulan numunelerin mikroyapısı incelendiğinde yer yer bazı bölgelerde ve özellikle tane sınırlarında MnS fazına rastlanmaktadır. MnS fazı, C70S6 gibi yüksek C oranına sahip çeliklerde işlenebilirliği artırmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca bilindiği gibi, Mn çeliğin kimyasal bileşimine, MnS oluşumunu sağlaması ve zararlı FeS faz oluşumunu engellenmesi için de ilave edilmektedir (Behrens vd. 2006). (Fe, Mn)S inklüzyonları tercihen tane sınırlarında oluşmaktadır. Tane sınırlarındaki (Mn,Fe)S partiküllerinin Mn içeriğindeki farklılık, Fe'ce zengin (Fe,Mn)S inklüzyonlarından kaynaklanmaktadır (Sridhar vd. 1999). Şekil 5.19'da 1450°C'den su ile sertleştirilen C70S6 kalite çeliğin SEM mikroyapı fotoğrafı yer almaktadır. Bu bölgede siyah ok ile gösterilen konumdan alından EDS analizi (Fe,Mn)S oluşumunu göstermektedir. Su verme sonrası, C70S6 kalite çeliğin sertlik ölçüm sonuçları, Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.19 : 1450°C'den su verilen C70S6 numunesine ait (a) SEM görüntüsü ve (b) İnküzyonun EDS analizi.



Şekil 5.20 : Su verilmiş C70S6 numunelerine ait sertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 5.20’de belirtilen sertlik değerleri, su verilerek sertleştirilmiş C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliğin martensitik mikroyapısı ile uyumludur. Ancak otomotiv sektöründe çokca tercih edilen C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliğin ısıl işlemi endüstriyel olarak kontrollü soğutma ile tamamlanmaktadır ve su verme işlemi uygulanmamaktadır. Bu nedenle, geleneksel dövme ve tikso dövme sonucu elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

5.4 Dikey İndüksiyon Sisteminde İyileştirme Çalışmaları

Yüzey sertleştirme için kullanılan indüksiyon cihazında ısıtılan numunelerin mikroyapı incelemesinde hedeflenen sonuçların elde edilmesiyle, tikso dövme için hazırlanan yatay ve dikey bobinli indüksiyon sisteminde denemeler yapılmıştır. Bu

denemelerin hazırlık çalışmalarında sistemde mevcut bulunan indüksiyon bobinin verimli çalışması için gerekli tasarım değişikliklerine ihtiyaç duyulmuştur. Öncelikle ısıtılmak istenen çelik numunelerin boyutları farklı ölçülerde hazırlanmış ve istenilen tikso sıcaklık aralıklarına ulaşılabilmesi için çalışmalar devam etmiştir. Hazırlanan farklı boyutlardaki numune örnekleri Şekil 5.21’de görülmektedir.



Şekil 5.21 : Dikey indüksiyon sisteminde tikso sıcaklığına ısıtılan C70S6 numuneleri.

Yapılan denemeler sonucunda Bölüm 5.3’de metalografik incelemesi ve sonuçları detaylı olarak anlatılan numuneler $\varnothing = 25 \text{ mm}$ $L = 54 \text{ mm}$ ebatlarında hazırlanmış ve her iki çelik için belirlenen tikso sıcaklık aralıklarında ısıtılarak su verilmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan metalografik incelemeler sonucu tikso şekillendirme için hedeflenen mikroyapı ve ısıtma şartları için gerekli sıcaklıklar belirlenmiş ve tikso şekillendirme çalışmaları başlatılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar analiz edilerek 100Cr6 kalite çelik için tikso şekillendirme sıcaklık aralıkları ve faz yapısı belirlenmiş, aynı şartlar C70S6 kalite çeliğin kendi tikso faz aralığı için de uygulanarak şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan ilk tikso şekillendirme denemeleri sonrasında kullanılan değişkenlere göre Şekil 5.22’de görülen farklı formlarda numuneler elde edilmiştir.



Şekil 5.22 : Farklı sıcaklıklarda yapılan ilk tikso dövme denemelerinde elde edilen biyel kolu örnekleri.

Şekil 5.22’de görüldüğü gibi denemelerde, proses parametrelerinin optimum olarak ayarlanmasına bağlı olarak biyel formunda iyileşmeler görülmektedir. Burada ilk parametre kalıp ile tezgâh arasındaki yüksekliktir. Şekilden de görüleceği üzere 3. denemeden itibaren biyel kolu formu oluşmaya başlamış ancak kalıpta doldurmama problemi görülmüştür. Bu problem geleneksel sıcak dövmede de sıklıkla karşılaşılan problemlerden birisidir. Bu problemin muhtemel nedenlerinden birincisi yeterli sıcaklığa ulaşmayan malzemede uygulanan basınçla birlikte kalıpta yeterli metal akışının sağlanmaması, diğer sebep ise kalıptaki tasarım hatasıdır. Bu sebeple öncelikle, tezgâh yüksekliği çeşitli denemelerden sonra istenilen seviyeye getirilmiş ve alt-üst kalıp arası mesafe 350 mm olarak ayarlanmıştır.

Daha sonra işlem sıcaklığının optimize edilmesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Sıcaklık 10°C’lik artışlar ile daha önceden ThermoCALC analizleri sonucunda karar kılınan yarı katı faz sıcaklıklarına ulaşmaya kadar şekillendirme denemeleri devam etmiştir. Bu aşamada yarı katı faz aralığına girildiğinde, metal akışının daha düzgün formda olduğu ve 1410°C’den itibaren biyel kolu formunun oluşmaya başladığı ancak halen yetersiz olduğu görülmektedir.

Proses parametreleri kontrol edildiğinde özellikle yüksek pres basıncında yapılan şekillendirme işlemlerinde çok yüksek oranda çapak görülmektedir. 1410°C ve 1420°C’de şekillendirilen biyel kolları bunun bir kanıtıdır.

Metal akışı sırasında sıvı formdaki metal, kalıbı doldurmak yerine kalıp dışına taşıdığı için biyel formunun ince uç kısmı oluşturulamadığı gözlemlenmiştir. Bu problemi aşmak için pres basıncı bir miktar düşürülerek aynı oranda sıcaklıklar optimum seviyeye getirilmek adına şekillendirme işlemleri 1460°C’ye kadar devam etmiştir.

Sıcaklığın artışının etkisinin gözlendiği bu aşamada en yüksek sıcaklık olan 1460°C’de hem sıvı faz oranının fazla olması sebebiyle metal akışı arttığından, kalıp dışına metal taşarak yüksek oranda çapak oluşmuş hem de biyel kolu yüzeylerinde de yüksek sıcaklığa bağlı olarak yanmış bölgeler görülmüştür. Ayrıca yüksek sıvı faz oranına bağlı olarak dengesiz metal akışı sebebiyle biyel formunda bozukluklar mevcuttur. Bu sonuçlar Şekil 5.10 de gösterilen hacimsel katı-sıvı oranlarının sıcaklığa bağlı olarak değişimiyle uyumludur.

Gözlenen bu problemler diğer sıcaklıklar ile karşılaştırıldığında istenilen biyel formuna en yakın şekillendirmenin 1440°C’de gerçekleştiği görülmektedir. Bu sebeple pres parametreleri sabit kalmak şartıyla 1440°C optimum şekillendirme sıcaklığı olarak seçilmiştir.

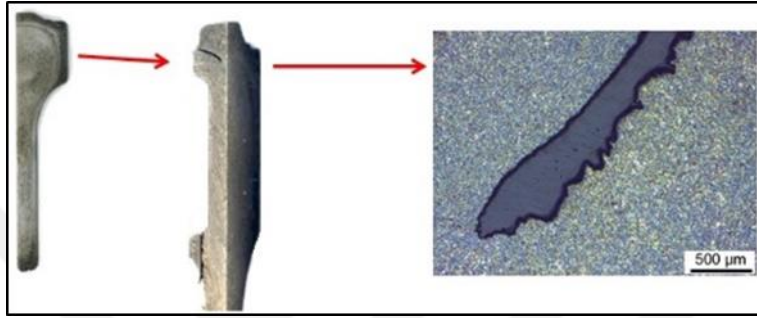
5.4.1 Sonlu elemanlar analiz modelinde iyileştirme

Optimum parametrelerde yapılan dövme işleminin ardından üretilen numunelerde yapılan incelemede yüzeysel bazı hataların olduğu görülmüştür. Şekil 5.23 (a)’da siyah oklar ile işaretlenmiş kısımlarda detaylı olarak görülebileceği gibi elde edilen 1440°C’de elde edilen biyel formunun ince uç kısmı ile büyük kafa formunda hatalar görülmektedir. Geleneksel sıcak dövme tecrübeleri doğrultusunda, bu hataların kalıp tasarımından kaynaklı katlanma ve doldurmama problemi olduğu düşünülmektedir. Kesiti alınan bu numunenin, makro dağlama ve mikroyapı incelemesi sonucu katlanma kusurunun doğruluğu tespit edilmiş ve Şekil 5.23(b)’de verilmiştir.

Şekil 5.23’de görülen hataların ortadan kaldırılması için, Simufact Simuforge® yazılımı kullanılarak kalıbın ve biyel kolunun modellenmesi yapılmış, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle de mevcut tasarımdaki hataların simülasyon yardımıyla analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.24). Burada biyel kolunun büyük kafa kısmından itibaren gövde kısmından devam eden metal akışının olduğu küçük kafa bölgesine doğru bir katlanma olduğu açık kırmızı renkte görülmektedir. Aynı zamanda küçük kafa kısmında da kalıp içerisinde yeterli temas sağlanmamasından ötürü boşluk ve çatlakların olduğu mavi renkli bölge de görülmektedir. Bu sorunların giderilmesi için kalıp tasarımında değişiklik yapılmıştır.

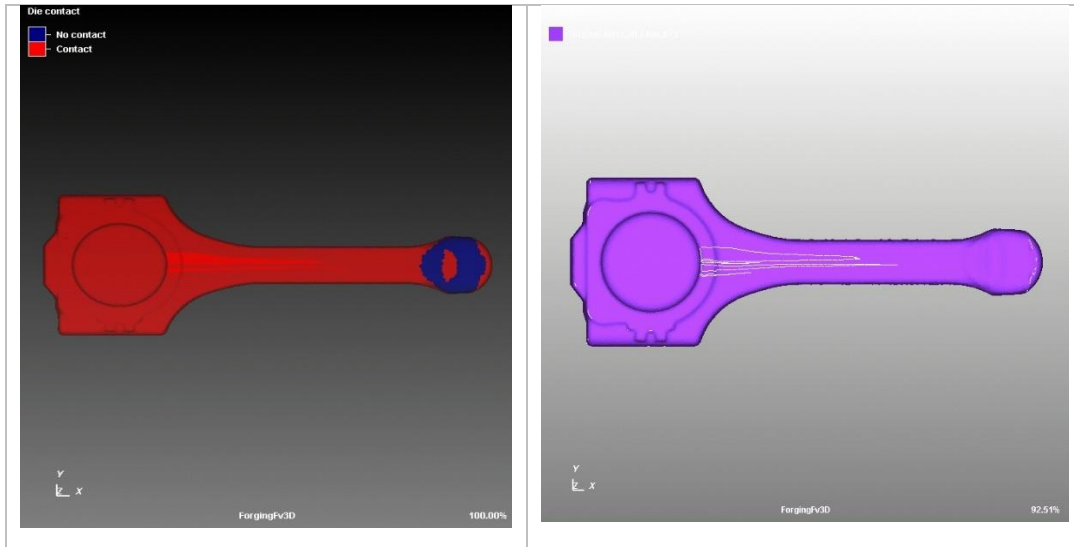


(a)



(b)

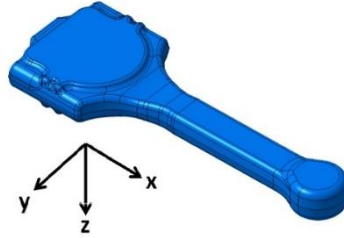
Şekil 5.23 : 1440°C’de tikso şekillendirilmiş biyel kolundaki dövme kusurları.
(a) Kusurların genel görünümü (b) Katlanma hatasının makro dağlama ile kesitten tespiti ve mikroyapı görünümü.



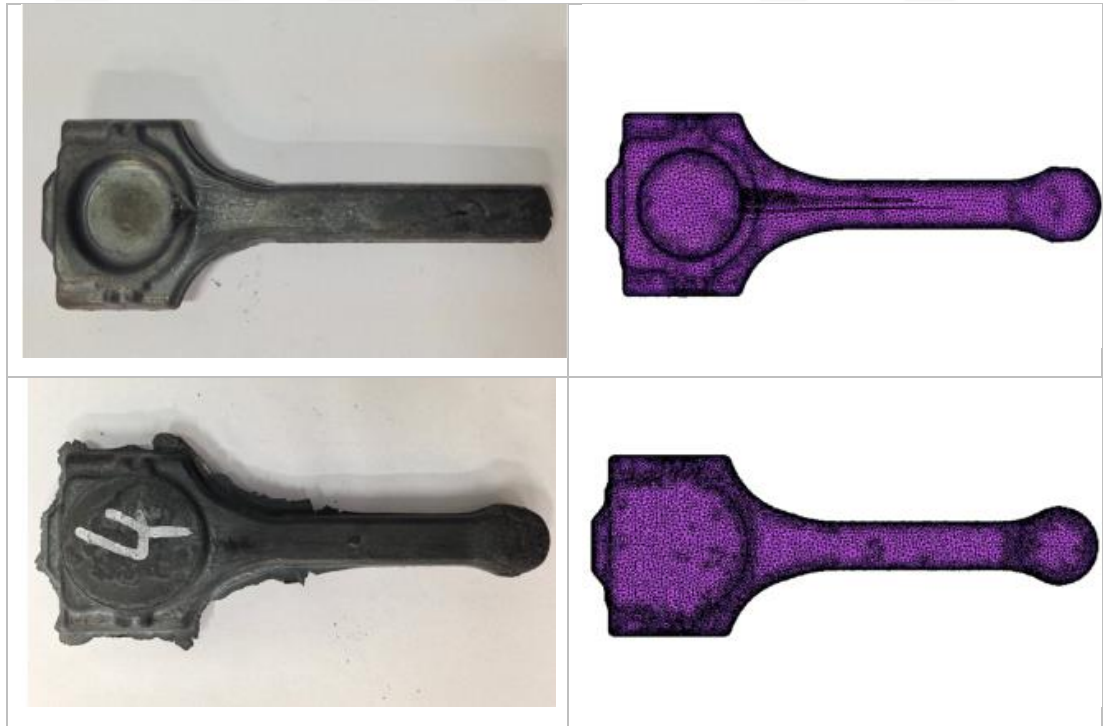
Şekil 5.24 : Sonlu elemanlar analizi sonucu görüntülenen dövme hataları.

Şekil 5.25’de görülen yeni tasarımda, biyel kolunun büyük kafa kısmındaki alan doldurularak şekillendirme sırasında yeterli metal akışının sağlanarak hem gövde kısmındaki katlanma hem de uç kısmındaki eksik kalan hatalı bölgenin giderilmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda kullanılan numune boyutlarında artış yapılarak yeni tasarımda doldurulan büyük kafa kısmı için yeterli malzeme akışının sağlanması hedeflenmiştir.

Yeni biyel kolu tasarımı ile üretime geçilmeden önce yine sonlu elemanlar analizi yardımıyla dövme simülasyonu gerçekleştirilmiş ve modeller üzerine mesh atanarak sonuçlar eski tasarımla karşılaştırılacak şekilde Şekil 5. 26’da gösterilmiştir.



Şekil 5.25 : Yeni tasarlanan biyel kolu formu.



Şekil 5.26 : Eski ve yeni tasarım biyel kolunun sonlu elemanlar analiz sonuçları.

Şekil 5.26’da görüldüğü üzere ilk tasarımda ortaya çıkan doldurmama ve katlanma problemleri yeni tasarımda görülmemektedir. Yeni tasarlanan kalıp ile üretilen biyel kolunda da sonlu elemanlar analiz sonuçlarına uyumlu olarak herhangi bir problem görülmemiştir.

5.5 Tikso Dövme İşleminin Uygulanması

Bölüm 3’de detaylı olarak bahsedildiği üzere endüstriyel anlamda C70S6 çeliği otomotiv sektöründe başta biyel kolu olmak üzere birçok güvenlik parçasında kullanılmaktadır. Mikro alaşım özelliği, fiber yapısı ve yüksek karbon içeriği sayesinde sertleşebilirlik oranının yüksek olması da C70S6’nın tercih sebeplerinden birisidir.

Tikso şekillendirme için otomotiv sanayinde üretilen biyel kolu tercih edilmiştir. Ön hazırlık olarak biyel kolunun 1/7 oranda küçültülmüş hali için kalıp hazırlanmıştır. Kalıp çeliği olarak 1.2343 kalite kalıplık çelik kullanılmıştır. Hazırlanan biyel kolu kalıbı Şekil 5.27’de gösterilmektedir.



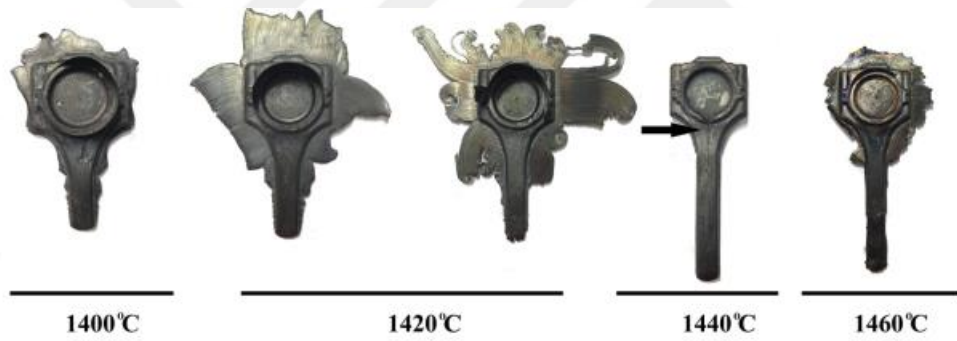
Şekil 5.27 : Tikso şekillendirme için hazırlanan biyel kolu kalıbı.

Numunelerin bahsedilen sıcaklık aralıklarına kadar ısıtılma süreleri ortalama 120 sn’dir. Yapılan denemelerde bu sürenin altında numunenin dış çeperinin sıcaklığının merkeze göre daha düşük olduğu ve ayrıca dış çeperde oluşan oksit kabukları (tufal) sebebiyle kalıpta doldurmama ve numunede yarananma problemine sebep olduğu

görülmüştür. Bu problemler geleneksel dövme parçalarda da sıklıkla görülen hasarların başında gelmektedir. Optimum sürenin üzerinde yapılan ısıtma denemelerinde ise, sistem açık devre olarak çalıştığından istenilen sıcaklığın çok üzerine kontrolsüz şekilde çıkarak likidüs sıcaklığını aştığı ve bu sebeple numunenin kısmi veya tamamen ergidiği ve istenilen formda kalıba yerleştirilemediği görülmüştür.

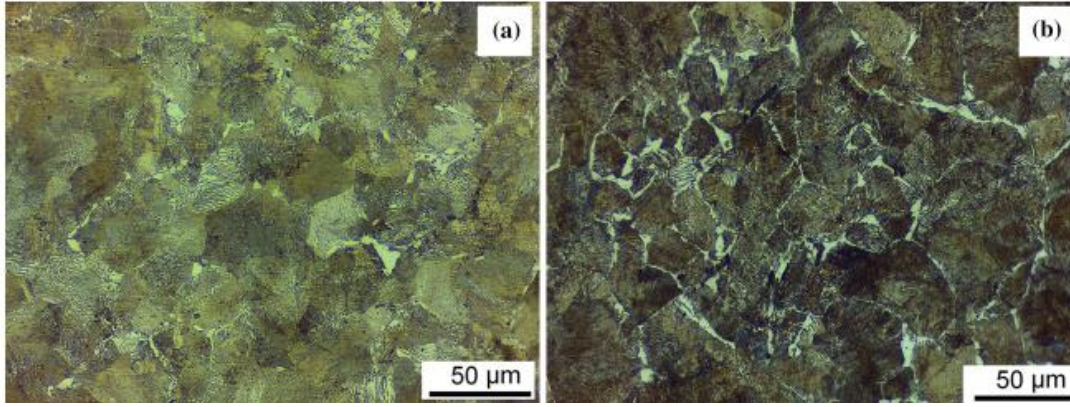
Kalıpların hazırlanması işleminden sonra ön çalışmalar sırasında önceki bölümlerde belirlenen sıcaklıklara numuneler ısıtılmış ve Bölüm 4.7’de bahsedilen şekillendirme parametreleri kullanılarak şekillendirilmiştir.

İyileştirme çalışmaları sonrasında 1400-1460°C arasında farklı sıcaklıklarda şekillendirilen ve oda sıcaklığında soğutulan biyel kolları Şekil 5.29’de gösterilmektedir.



Şekil 5.28 : Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen biyel kolları.

Şekil 5.28’de gösterilen numuneler incelendiğinde, pres basıncı ve pres çekiç yüksekliği sabit tutularak farklı sıcaklıklarda yapılan şekillendirmelerde, sıcaklığın şekillendirme üzerine etkisi açıkça görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda numunenin kalıbı doldurmama problemi ve numunede form bozukluğu görülürken, yüksek sıcaklıklarda ise mikroyapıdaki sıvılaşma oranının yükselmesi sebebiyle çapak artışı görülmektedir. Yapılan şekillendirme çalışmalarında en ideal form olarak 1440°C’de şekillendirilen biyel kolu görülmektedir.

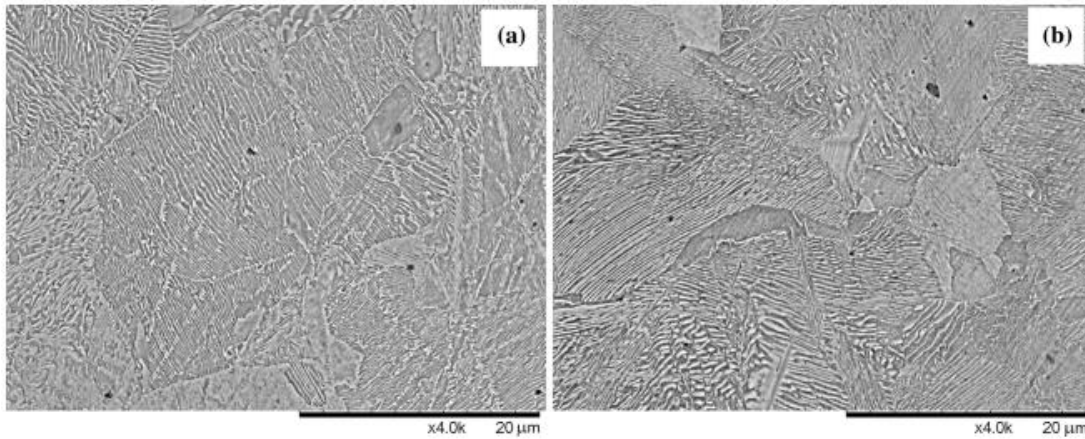


Şekil 5.29 : (a) Geleneksel sıcak dövme mikroyapısı (b) Tikso dövme mikroyapısı.

Şekil 5.29’da geleneksel sıcak dövme ile elde edilen mikroyapının, tikso şekillendirme sonucu elde edilen mikroyapıyla karşılaştırılması görülmektedir. Her iki mikroyapının çoğunlukta perlitik olduğu ve tane sınırlarında ferrit fazının bulunduğu görülmektedir.

Ancak tikso dövmede geleneksel dövmeden farklı olarak, tane sınırlarındaki ferritik yapı daha belirgin ve miktar olarak fazladır ve tüm tane sınırları boyunca varlığını korumaktadır.

Geleneksel sıcak dövme ve tikso dövme mikroyapısında hacimsel olarak ferrit oranının sırasıyla % 4,5 ile 7,8 olduğu tespit edilmiştir



Şekil 5.30 : (a) Geleneksel dövme (b) tikso dövme numunelerinin SEM mikroyapı fotoğrafları.

Şekil 5.30’de geleneksel dövme ve tikso dövme ile elde edilmiş numunelerin mikroyapılarının SEM görüntüleri verilmektedir. Perlit yapısında lameller arası mesafe ölçülerek, geleneksel dövme için $0,27 \pm 0,08 \mu\text{m}$ ve tikso dövme için ise $0,22 \pm 0,08 \mu\text{m}$

olarak belirlenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki perlitin lameller arası mesafesi geleneksel dövme numunesinde tikso dövme göre biraz daha yüksektir. Numunelerin bu mikroyapısal özellikleri, yüksek soğutma hızlarından ve özellikle tikso dövmede çok yüksek dövme sıcaklıklarından kaynaklı istikrarsız soğuma şartlarından ileri gelmektedir (Xu vd, 2008).

Bilindiği üzere, mikro alaşımlı çeliklerde, çeşitli ferrit morfolojisi çoğunlukla yüksek sıcaklıklardan yapılan soğuma hızlarına ve önceki östenitik tane boyutuna bağlı olarak oluşmaktadır. Mikroyapıda yüksek soğuma hızı iğnesel ferrit oluşumuna yardımcı olurken, düşük soğuma hızı ise tane sınırlarındaki ferritin oluşumunu desteklemektedir (Esmailian 2010; Fang vd. 2009; Rasouli vd. 2009).

Daha büyük östenit taneleri, tane içinde iğnesel ferrit oluşumu için tercih edilen bölgelerdir ve östenit tane boyutu azaldıkça, tane sınırı ferritin oluşması daha olasıdır (Zhang vd. 2012). Benzer şekilde, Gosh ve Mula'nın belirttiği gibi, sıcak şekillendirme sonrasında mikro alaşımlı bir çeliği hava ile soğuturken, iğnesel ferritin oluşumu artar ve tane sınırı ferritin olasılığı azalır (Ghosh ve Mula 2015).

Ferrit morfolojisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi ile ilgili önceki çalışmalarda bahsedildiği gibi, daha düşük soğuma hızlarında oluşan tane sınırı ferrit fazı süneklik ve tokluğu olumsuz yönde etkilemektedir. Çünkü tane sınırındaki ferritte klivaj çatlakları, iğnemsel ferrite göre daha kolay yayılmaktadır (Mirzaei vd. 2013; Miyamoto vd. 2016; Xu vd. 2007). Bu sebeple, yüksek soğuma hızı ile oluşan iğnesel ferrit morfolojisinin, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi adına soğutma sonrasında oluşması tercih edilmektedir.

Tokluk, nihai çekme dayanımı ve kopma uzamasının çarpımı olarak alındığında, geleneksel sıcak dövme numunelerle neredeyse aynı dayanım seviyesine sahip olmasına rağmen, tikso dövme numunelerin daha düşük tokluğa sahip olduğu sonucuna varılabilir. Geleneksel dövme numuneler ile karşılaştırıldığında, tikso dövme numunelerde, daha yüksek miktarda tane sınırı ferritin oluşması sebebiyle, tikso dövme numunelerin tokluğu daha düşük olduğu söylenebilir.

5.6 Tikso Dövme Numunesi Çekme Deneyi Sonuçları

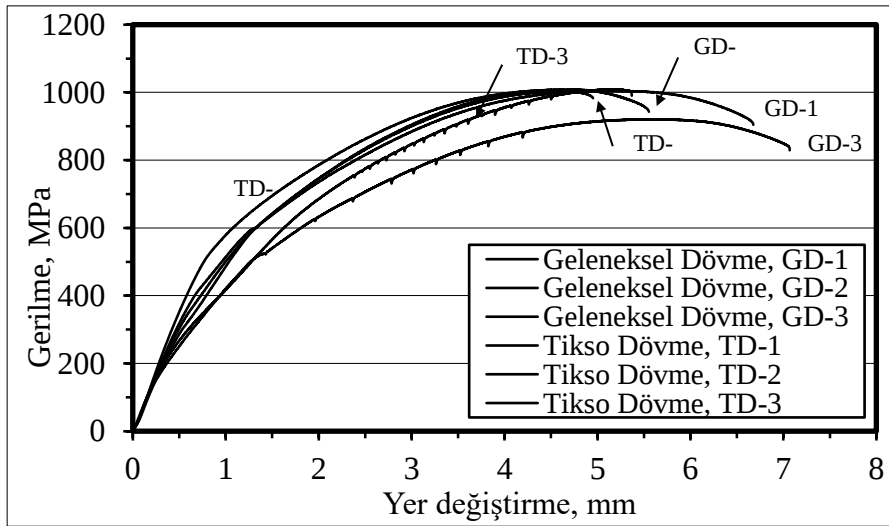
Biyel kolları hazırlanan deneysel düzenekte 1440°C sıcaklıkta şekillendirilen biyel kolundan deney numuneleri hazırlanarak 2 mm/dk çene hızıyla çekme deneyi

yapılmıştır. Böylece hem 1280°C’de yapılan geleneksel dövme işlemiyle hem de 1440°C tikso dövme sıcaklığında şekillendirilmiş biyel kolu numunelerinin çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi önemli mekanik özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan çekme deney numuneleri Şekil 5.31’de görülmektedir.



Şekil 5. 31 : Tikso dövme ve geleneksel dövme ile şekillendirilen biyel kollarına ait deney numuneleri.

Şekil 5.32’de tikso dövme ve geleneksel dövme ile şekillendirilen biyel kollarına ait gerilme – yer değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 5.32 : Tikso dövme ve geleneksel dövme ile şekillendirilen biyel koluna ait gerilme - yer değiştirme eğrisi.

Şekil 5.32’de verilen sonuçlar incelendiğinde, sıcaklığın artışıyla geleneksel dövme sıcaklıklarında çekme dayanımının kısmi olarak artış gösterdiği, ancak yarı katı faz bölgesinde yapılan tikso şekillendirme işlemleri sonucu çekme dayanımında düşüş

gözlendiği görülmektedir. Aynı zamanda kopma uzamasında sıcaklık artışına bağlı olarak azalma görülmektedir. Ancak elde edilen bu çekme deneyi sonuçları, otomotiv sektörünün en önemli parçalarından birisi olan biyel kolunda istenilen orijinal değerler ile karşılaştırmasıyla doğru yorumlanabileceği düşünülmektedir. Ticari binek araçlarında kullanılan biyel kolu da bu çalışmada kullanılan C70S6 mikro alaşımlı çeliğinden geleneksel sıcak dövme yöntemiyle üretilmektedir. Ticari biyel kolu için genellikle 900 - 1050 MPa aralığında çekme dayanımı, minimum %10 süneklik istenmektedir.

Çizelge 5.3’de her iki yöntemle üretilen biyel kollarının tüm mekanik özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu çizelgede de görüldüğü gibi optimum sıcaklıkta (1440°C) tikso şekillendirilen biyel kolu, 1280°C’de geleneksel sıcak dövme ile şekillendirilen biyel kolunun, çekme dayanımını karşıladığı ve sünekliğin bir ölçüsü olan kopma uzamasının da çok yakın olarak elde edildiği görülmektedir.

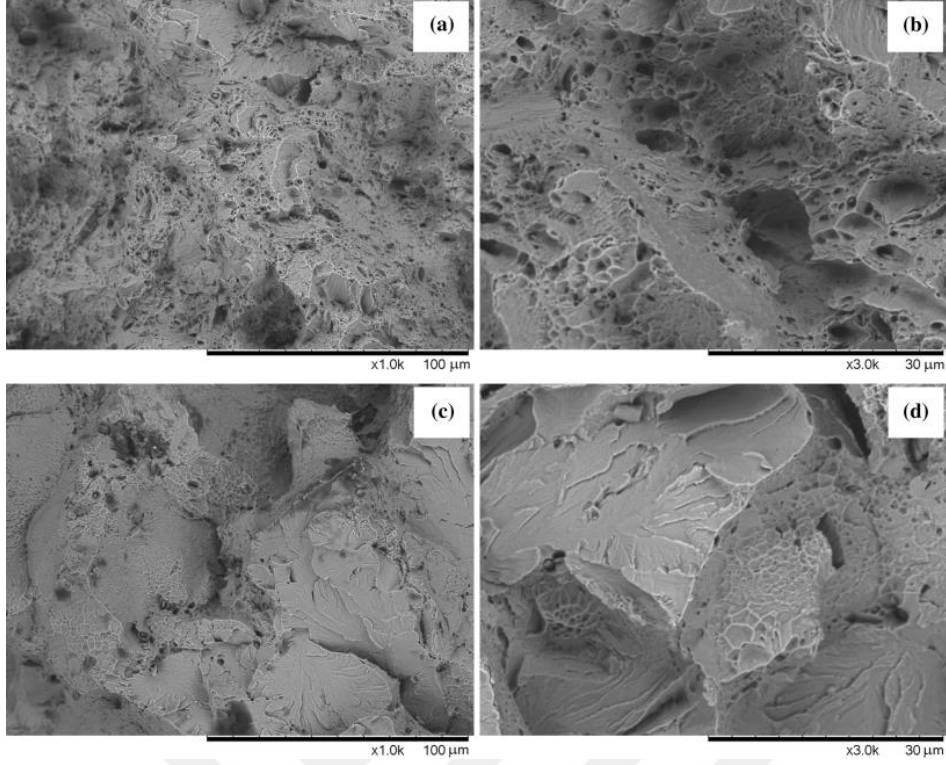
Çizelge 5.3 : Geleneksel sıcak dövme ve optimum parametredeki tikso dövme biyel kolunun mekanik özellikleri.

Dövme Türü	Dövme Sıcaklığı, °C	Numune No	Sertlik, HV ₁₀	Akma Dayanımı, MPa	Çekme Dayanımı, MPa	Kopma Uzaması, %
Geleneksel Dövme	1280	1	274	590	1005	19
		2	284	622	1009	14
		3	283	513	920	16
Tikso Dövme	1440	1	286	529	1006	10
		2	293	588	1004	10
		3	289	642	1009	6,9

5.7 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Bölüm 4’de detayları verilmiş olan parametreler ile tikso dövülmüş parçalara yapılan çekme deneyi sonucunda, deney numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmiştir.

Şekil 5.33 (a) ve (b) geleneksel sıcak dövme, (c) ve (d) ise 1440°C tikso dövme numunelerinin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 5.33 : Çekme deneyi sonrası elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. (a) ve (b) geleneksek sıcak dövme numuneleri, (c) ve (d) tikso dövme numuneleri.

Geleneksel olarak sıcak dövme numunelerine ait kırık yüzeyinin, daha az miktarda gevrek kırılma görünümü ile esas olarak sünek kırılma özellikleri sergilediği açıktır (Şekil 5.33 (a) ve (b)). Diğer taraftan, tikso dövme örneklerin kırılma yüzeyi, sırasıyla çukur (dimple) formasyonu ve klivaj cephelerini gösteren hem sünek hem de gevrek kırılma özelliklerine sahiptir (Şekil 5.33 (c) ve (d)). Her iki numunenin kırılma yüzey fotoğrafları, Şekil 5.29 (a) ve (b)'de görülen mikroyapısal özellikler ve Çizelge 5.4'de verilen mekanik özelliklerle uyumlu olduğudur.

Sıvı - katı segregasyonu sonucu değişen karbon oranı, homojen olmayan mekanik özelliklere sebep olmaktadır (Rassili ve Atkinson 2010a). Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, örnek verilen çeliklerde tikso dövme sırasında en iyi sonuç alabilmek için, tiksotropik özellikleri sergileyen sıvı matriste küresel taneler elde edilmesini sağlayan ve işlem başlangıcından itibaren izlenmesi gereken bazı adımlar mevcuttur. Bazı ön işlemlerin yanında, tikso şekillendirme sonrasında yapılan ısıtma aşamaları ve kontrollü soğutma, katı sıvı segregasyonunun azalmasına ve mikroyapının homojenleşmesine yardımcı olur ve böylece daha iyi mekanik özellikler elde edilir (Kopp vd. 2002; Rassili ve Atkinson 2010b). Örneğin Kopp ve arkadaşları

alışmalarında tikso şekillendirilmiş 100Cr6 kalite çeliğe ait homojen olmayan sertlik değerleri rapor etmişlerdir. Bu numuneye yapılan su verme ve temperleme ısıı işlemleri sonrasında, literatürde bu elik alaşıımı için verilen değerlere göre sertlik sonuçlarında ciddi bir artış elde edilmiş ve aynı zamanda saçılma azalmıştır (Kopp vd. 2002; Rassili ve Atkinson 2010b).

Benzer şekilde, Pierret ve arkadaşlarının raporlarına göre 100Cr6-LTT alaşıımına ait en iyi homojen yapı, numunenin 650°C’de 2 saat tutularak yavaş soğutulmasıyla elde edilmiştir (Pierret 2008). Bu durum, bu çalışmada yapılan tikso şekillendirilmiş biyel kolunun mekanik özellikleri, ön veya son ısıı işlem uygulanarak kontrollü soğutulduğunda potansiyel olarak geliştirilebilir ki bu şu ana kadar yapılan tüm literatür çalışmalarındaki raporlarla uyumludur. Bahsedilen bu ilave üretim adımları, başka bir çalışma da detaylı olarak ele alınmalıdır.



6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

1. Yapılan analizler sonucu 100Cr6 kalite çelik için yarı katı faz aralığı 1336°C-1450°C, C70S6 kalite çelik için yarı katı faz aralığı 1390°C - 1470°C olarak belirlenmiştir.
2. Yarı katı faz sıcaklığı arttıkça, mikroyapı içerisindeki sıvı faz oranı sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmaktadır.
3. Yarı katı faz sıcaklığından su verilerek sertleştirilen 100Cr6 kalite çeliğin mikroyapısında tane sınırlarında sürekli bir ağ şeklinde beyaz faz ve tane içlerinde martensitik yapı olduğu görülmüştür. Tane sınırlarında gözlenen beyaz faz, yarı katı sıcaklığında bulunan sıvı fazın katılaşması ile oluşmaktadır.
4. C70S6 kalite çeliğin yarı katı faz sıcaklığından su verilerek elde edilen mikroyapısında yarı katı faz sıcaklık aralığından çok hızlı soğutma sebebiyle tane sınırlarında çatlak oluşumunun yanı sıra, tane sınırlarında küresel formda (Fe,Mn)S partikülleri görülmüştür.
5. Numunelerin tikso dövme öncesinde yarı katı faz aralığındaki sıcaklıklara ulaşması için kullanılan dikey bobin indüksiyon sisteminin diğer indüksiyon sistemlerine göre daha avantajlı olduğu görülmüştür.
6. İndüksiyon sistemi ile numuneler ısıtılırken, kontrollü bir atmosfer ortamı bulunmadığından ısıtma rejimi değişebilmekte ve sıcaklık artışına bağlı olarak numune yüzeyin tufal tabakası olduğu görülmektedir. Endüstriyel uygulamalarda kontrollü atmosfer uygulaması ile bu problem çözülebilir.
7. C70S6 kalite mikro alaşımlı çeliğin 1440°C’de fazla çapak oluşumu gözlemlenmeden veya kalıp doldurmama problemi yaşanmadan başarılı bir şekilde tikso dövme işlemi gerçekleştirildiği görülmüştür. 1440°C’den düşük sıcaklıklarda yeterli metal akışı sağlanmadığı için kalıpta doldurmama problemi ile karşılaşmıştır. Benzer şekilde 1440°C’den yüksek sıcaklıklarda ise mikroyapıdaki sıvı faz oranı çok fazla olduğu için şekillendirme sırasında sıvı

metalin kalıp dışına çıkarak çapak oluşumuna ve şekil bozukluğuna sebep olduğu görülmüştür.

8. Belirlenen optimum parametreler kullanılarak tikso dövme ile üretilen biyel kollarındaki form bozuklukları ve iç yapı hataları, kalıp tasarımında yapılan iyileştirmeler ve buna bağlı olarak hacimsel kütle artışı ile giderildiği görülmüştür.
9. Tikso dövme ile üretilen biyel kolu numunelerin ferrit+perlit mikroyapısından oluştuğu gözlemlenmiştir. Geleneksel dövme numunelerinden farklı olarak tikso dövme numunelerinde ferritik yapı daha fazladır ve tüm tane sınırlarında varlığını korumaktadır. Perlitik yapıda ise lameller arası mesafe geleneksel dövme numunesinde tikso dövmeye göre bir miktar daha yüksektir.
10. Mikroyapı incelemeleri göstermiştir ki, süneklik özelliği mikroyapıda görülen tane sınırı ferrit ağı sebebiyle azalmıştır.
11. Mekanik deney sonuçları, tikso dövme sonrası sertlik ve dayanım değerlerinin, geleneksel sıcak dövme ile sunulanlarla hemen hemen aynı seviyelerde muhafaza edilebildiğini göstermiştir. Aynı zamanda geleneksel sıcak dövme ile üretilen biyel kolları için istenen dayanım değerlerini sağlarken, süneklik değerleri bir miktara daha düşük elde edilmiştir.
12. Geleneksel sıcak dövme sonrasında endüstriyel uygulamalarda yapılan ısıtıl işlem, bu tez kapsamında tikso dövme biyel kollarına uygulanmamıştır. Ancak ısıtıl işlem sonrası elde edilen mevcut mekanik özelliklerin iyileşerek sonuçları daha olumlu hale getireceği beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgül, H.** (2007). *Çeşitli Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüzyon Kalıplarında Şekillendirilmesi*.(Bilim Uzmanlığı Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Altan, T. ve Gracious N.** (2005). *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM Int, USA.
- Altınbalık, T.** (2000). *Dişli taslaklarının kapalı kalıpla yığılmasında kuvvet ve malzeme akışının incelenmesi*.(Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya.
- Atkinson, H.V.** (2012). Alloys for Semi-Solid Processing. *Solid State Phenomena* 192–193:16–27. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.192-193.16
- Balan, T., Eric B., Laurent L., ve Régis B.** (2017). A new route for semi-solid steel forging. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66(1):297–300.
- Balart, M. J., Davis, C. L. ve Strangwood M.,** (2000). *Cleavage initiation in Ti–V–N and V–N microalloyed ferritic–pearlitic forging steels*. C. 284. doi: 10.1016/S0921-5093(00)00803-0
- Baxter, R., Hastings N. ve Law A.** (2008). *Handbook of Mechanical Engineering*. C. 39 edit. Professor Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote., Würzburg.
- Becker, E., Régis B., Sophie R., ve Pierre F.** (2018). Experimental investigation of the thixoforging of tubes of low-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology* 252:485–97.
- Behrens, B., Fischer D., Haller B., Rassili A.,** (2006). Series Production of Thixoformed Steel Parts. *Solid State Phenomena* 116–117:686–89.
- Cerit, A. M.** (1994). Makine Mühendisliği El Kitabı *Üretim ve Tasarım Cilt 2*. 2. baskı. pp:32-61 TMMOB. Ankara
- Cezard, P. ve Sourmail T.** (2008). Thixoforming of steel: A state of the art from an industrial point of view. *Solid State Phenomena* 141–143:25–35.
- Esmailian, M.** (2010). The effect of cooling rate and austenite grain size on the austenite to ferrite transformation temperature and different ferrite morphologies in microalloyed steels. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering* 7(1):7–14.
- Fang, F., Yong, Q-l, Yang, C., ve Su, H.** (2009). Microstructure and Precipitation Behavior in HAZ of V and Ti Microalloyed Steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 16(3), 68-77.
- Flemings, M.C.** (1991). Behavior of metal alloys in the semisolid state. *Metallurgical Transactions A* 22(5):957–81.

- Fu, M. W.** (2017). Design and Development of Metal Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation. Ss. 1–558 içinde *Engineering Materials and Processes, Engineering Materials and Processes*, Springer International Publishing.
- Ghosh, S. ve Suhrit M.** (2015). Thermomechanical processing of low carbon Nb-Ti stabilized microalloyed steel: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A* 646:218–33.
- GU, G.** (2013). École Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers Metallurgical characterization of thixoforged steel parts for a better controlled manufacturing process (Doctoral dissertation), Paris Ins.of Technology
- Hess, N., Carlson D. J.** (2016). *SCHULER Metal forming handbook*. C. 65. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
- Hirt, G., W. Bleck, Püttgen W.** (2006). Semi solid casting and forging of steel. *Solid State Phenomena* 116–117:34–43.
- Hirt, G., Shimahara H., Kopp R.** (2005). Semi-Solid Forging of 100Cr6 and X210CrW12 Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54(1):257–60.
- Borisov I.A.** (2002). A Study of Heat-Resistant Steels For Cold Rolling Rolls. *Metal Science and Heat Treatment* 44(1–2):20–23.
- Kirkwood, D.H.** (1993). Semisolid processing of high melting point alloys. *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* 207:320–25.
- Klocke, F.** (2013). *Manufacturing Processes 4*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Knauf, F., Seidl I., ve Hirt G.** (2006). Rheoforging of steel. *Semi- Solid Processing of Alloys and Composites* 116–117:464–67.
- Kopp, R., Kallweit J. ve Müller T.** (2002). Forming and joining of commercial steel grades in the semi-solid state. *Journal of Materials Processing Technology* 130(131):562–68.
- Lange K.,** (1988). *Handbook of Metal Forming*. C. 16. editör Dr. Kurt Lange. Society of Manufacturing Engineers. Germany
- Kuş, A.,** (1990). *Sıcak dövme kalıpları tasarımı*. (Yüksek L. Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Meng, Y., Sumio S., ve Jun Y.** (2014). Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Cr-V-Mo steel processed by recrystallization and partial melting method. *Journal of Materials Processing Technology* 214(1):87–96.
- Meng, Y., Sumio S., ve Jun Y.** (2017). Study on the effects of forming conditions on microstructural evolution and forming behaviors of Cr-V-Mo tool steel during multi-stage thixoforging by physical simulation. *Journal of Materials Processing Tech.* 248:275–285.
- Mirzaei, M., Jeshvaghani R. ve Yazdipour A.** (2013). Study of welding velocity and pulse frequency on microstructure and mechanical properties of low alloy steel. *Materials and Design* 51:709–13.

- Miyamoto, G., Yosuke K., ve Tadashi F.** (2016). Formation of grain boundary ferrite in eutectoid and hypereutectoid pearlitic steels. *Acta Materialia* 103: 370–381.
- Modigell, M., Pape L., ve Maier H.R.** (2006). Rheology of semi-solid steel alloys at temperatures up to 1500 degrees C. *Semi- Solid Processing of Alloys and Composites* 116–117:606–9.
- Mohanty O.N.** (2017) *Automotive Steels. Forging Grade Steels for Automotives* (C:13) 451-454, Elsevier, United Kingdom.
- Pekuz, Y.** (1999). “Türkiyede Dövme Sanayi”. editör Y. D. D. M. Kalyoncu. Konya: TMMOB Makine İmalat Sempozyumu.
- Pierret, J. C.** 2008. Steel thixoforming, influence of forming parameters on the microstructure. *Int J Mater Form* 1011–14.
- Puttgen, W., Hallstedt B., Bleck W., Löffler J. F. ve Uggowitzer P. J.** (2007). On the microstructure and properties of 100Cr6 steel processed in the semi-solid state. *Acta Materialia* 55(19):6553–60.
- Püttgen, W., Hallstedt B., Bleck W., ve Uggowitzer P.J.** (2007). On the microstructure formation in chromium steels rapidly cooled from the semi-solid stat”. *Acta Materialia* 55(3):1033–42.
- Püttgen, W., Bleck W., Hirt G., ve Shimahara H.** (2007). Thixoforming of steels - A status report. *Advanced Engineering Materials* 9(4):231–45.
- Rasouli, D., ve Daneshi G. H.** (2009). Optimization of mechanical properties of a micro alloyed steel. *Materials and Design* 30:2167–72.
- Rassili, A. ve Atkinson H. V.** (2010). A review on steel thixoforming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 20(SUPPL. 3):s1048–54.
- Robelet, M., Rassili A., ve Fischer D.** (2006). Steel Grades Adapted to the Thixoforging Process: Metallurgical Structures and Mechanical Properties. *Solid State Phenomena* 116–117:712–16.
- Rogal, L., Dutkiewicz J., Czeppe T., Bonarski J.** (2010). Characteristics of 100Cr6 bearing steel after thixoforming process performed with prototype device. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 20(SUPPL. 3):1033–36.
- Rogal, L., ve Dutkiewicz J.** (2012). Effect of annealing on microstructure, phase composition and mechanical properties of thixo-cast 100Cr6 steel. *Materials Characterization* 68:123–30.
- Rogal, L., Dutkiewicz J.** (2014). Mechanical properties and corrosion resistance of steel X210CrW12 after semi-solid processing and heat treatment. *Materials Characterization* 88:100–110.
- Solek, K. P. ve R. Kuziak.** (2009). Rheological properties of alloys near solidus point intended for thixoforming. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* IX(1):111–17.
- Solek, K.P., Mitura Z. ve Dutkiewicz J.** (2008). Analysis of Rheological Properties of Steel near Solidus Point Using Gleeble® Simulator. *Solid State Phenomena* 141–143:325–30.

- Solek, K. P., Rassili A., Pierret J. C., ve Vaneetveld G.** (2010). Characterization of thixoforming process of 100Cr6 steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 20(3):916–20.
- Solek, K. ve Mitura Z.** (2008). Analysis of Rheological Properties of Steel near Solidus Point Using Using Gleeble® Simulator. *Solid State Phenomena* 141–143:325–30.
- Song, J., Liu Z., ve Yongtang L.** (2017). *Cold Rolling Precision Forming of Shaft Parts: Theory and Technologies*. DOI 10.1007/978-3-662-54048-0
- Sönmez, F.** 2009. *Haddeleme İşleminin Yüzey Pürüzlülüğü ve Yüzey Sertliğine Etkilerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Spencer, D. Mehrabian B. ve Flemings M. C.** (1972). Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range. *Metallurgical Transactions* 3(7):1925–32.
- Sridhar, G.ve Das S.** (1999). Failure analysis of low carbon free-cutting steel wire rods. *Engineering Failure Analysis* 6(3):155–72.
- Xu, J. ve Zhou S.H.** (2008). Calculation Models of Interlamellar Spacing of Pearlite in High-Speed 82B Rod. *Journal of Iron and Steel Research International*. Volume 15, Issue 4, 57-60
- Wang Q. F., Ve Yang C.F.** (2007). Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Microstructure and Toughness of a V-N Microalloyed Steel. *Journal of Iron and Steel Research International* 14 (5.1):234–39.
- Wang Y. ve Song R.** (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of 9Cr18 steel after thixoforging and heat treatment. *Materials Characterization* 127:64–72
- Yesil, H.** (2003). *Düşük karbonlu çelik malzemelerde haddeleme yön ve miktarının işlenebilirlik üzerine etkileri*. (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yiğitarıslan, E.** (2009). “Sıcak Dövme İşleminde Karşılaşılan Hatalar,Önlenmesi ve Maliyete Etkisi”.(Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, X. F., Han P., Terasaki H., Sato M. ve Komizo Y.** (2012). Analytical Investigation of Prior Austenite Grain Size Dependence of Low Temperature Toughness in Steel Weld Metal. *Journal of Materials Science and Technology*. 28(3):241-248
- Zhang, X. Z., Cai Q. ve Zhou G.F.** (2010). Development on Microalloyed High Carbon Steel Used for Fracture Splitting Connecting Rods. *Advanced Materials Research* 152–153:301–8.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : İsa Metin ÖZKARA
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.02.1983 Çorum
E-posta : isametinozkara@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2006-2009 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Metalurji Laboratuvarında Proje Asistanı olarak Mikro Ark Oksidasyon projeleri üzerine çalıştı.
- 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans çalışmalarını tamamladı.
- 2010-2012 arasında Orto-Med Medikal Ltd. Şti'inde Genel Koordinatör olarak çalıştı.
- 2012-2015 yılları arasında Kanca A.Ş. 'de Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı ve doktora tezi kapsamında 3130030 nolu Tübitak Teydeb projesinin yürütücülüğünü gerçekleştirdi ve projeyi tamamladı.
- 2015 yılından itibaren halen GE Aviation şirketinde Malzeme Uygulama Mühendisi olarak Ar-Ge projelerinde çalışmaktadır.
- 2019 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora çalışmalarını tamamladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Makas T., Öztürk H., **Özkara.İ.M.**, 2014. Miscellaneous Examples of Flashless Forging Process. *International Congress - Proceedings of the 47th ICFG Plenary Meeting (ICFG2014)*, September 21-24, 2014, 2014 Ankara, Turkey.

- **Özkara, İ.M.**, Baydoğan, M. 2016. Optimization of Thixoforging Parameters for C70S6 Steel Connecting Rods,. *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 25, Issue 11, pp 5020–502.
- KANCA A.Ş. (**Özkara,İ.M.**, Karakol,Y.,Makas T.) 2014.Biyel Kolu İmalatında Kapalı Kalıpta Çapaksız Ön Dövme Üretiminde Yenilik.
Tescil No: 2014 15742, Evrak No: 2014-GE-94354

