İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALAŞIMSIZ VE DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERDE KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİNİN OPTİMİZASYONU VE HASSAS KESME İŞLEMİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akın KÜTMEN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALAŞIMSIZ VE DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERDE KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİNİN OPTİMİZASYONU VE HASSAS KESME İŞLEMİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akın KÜTMEN
(506181402)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

ŞUBAT 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506181402 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Akın KÜTMEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ALAŞIMSIZ VE DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERDE KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİNİN OPTİMİZASYONU VE HASSAS KESME İŞLEMİNE ETKİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

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

Doç. Dr. Sebahattin KIRTAY .....
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 10 Ocak 2022
Savunma Tarihi : 03 Şubat 2022

Canım Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans hayatım süresince bana her zaman yol gösteren, teknik bilgisi, imkanlarını, inancını benden esirgemeyen ve akademik ortamda olduğu kadar insani ilişkilerdeki desteğiyle gelişimime katkıda bulunan saygıdeğer danışman hocam Sn. Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN'a ve Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca benimle her konuda paylaşımda bulunan ve çalışmalarımın ilerleyişinde büyük katkısı olan Mekanik Metalurji Laboratuvarında çalışmış/çalışmakta olan hocalarıma ve arkadaşlarıma, ayrıca Öğr. Gör. Dr. Faiz MUHAFFEL'e, Arş. Gör. Doğukan ÇETİNER'e ve Arş. Gör. Mertcan KABA'ya teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin her aşamasında gösterdiği yakın ilgiden ve desteklerinden dolayı MGE Metal A.Ş. firmasından Makine Müh. Sn. Özgür GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini ve sevgisini çok yakından hissettiğim, her zaman arkamda duran ve bana özgüven veren canım AİLEME, Gizem KALAYCI'ya ve sevgili arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ocak 2022

Akın KÜTMEN
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxix**
SUMMARY ..... **xxxi**
1. GİRİŞ **1**
2. KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ VE MEKANİZMALARI **3**
2.1 Küreselleştirme Mekanizmaları 3
2.1.1 Rayleigh pertürbasyon teorisi 4
2.1.2 Modifiye edilmiş pertürbasyon teorisi 5
2.1.3 Termal oluk teorisi 5
2.1.4 Kusur göçü teorisi 6
2.1.5 Modifiye edilmiş kusur göçü teorisi 8
2.1.6 Ostwald kabalaşması 8
2.1.7 Modern teoriler 10
2.2 Küreselleştirme Isıl İşlemi 11
2.2.1 Kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi 14
2.2.2 Kritik sıcaklık arası küreselleştirme işlemi 14
2.2.3 Çevrimsel küreselleştirme işlemi 15
2.2.3.1 Çevrim sayısının küreselleştirmeye etkisi 15
2.3 Küreselleştirme Kinetiği 18
2.4 Normalizasyon Isıl İşlemi 19
3. SAC KESME VE HASSAS KESME İŞLEMLERİ **21**
3.1 Geleneksel Kesme ve Hassas Kesme İşlemleri 22
3.2 Kesme İşlemi ve Hassas Kesme Sonucu Yüzey Morfolojisi 28
3.2.1 Kırılma yüzeylerinin kristallografik yapısına göre sınıflandırılması 29
3.2.1.1 Kopma kırılması 29
3.2.1.2 Kesme kırılması 29
3.3 Kesme İşlemi Sonucu Oluşan Kenar Morfolojisi 29
3.4 Kırılma Sırasında Küresel Mikroyapının Etkisi 32
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI **35**
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **43**
5.1 Deneylerde Kullanılan Çelik Kaliteleri 43
5.2 Numune Hazırlama İşlemleri 44
5.3 Isıl İşlem Çalışmaları 44
5.4 Metalografik İşlemler 44
5.5 Görüntü Analiz Yazılımı ile Yapılan Çalışmalar 45

5.6 Sertlik Deneyleri 45
5.7 Erichsen Test Cihazı ile Yapılan Kesme İşlemleri 45
5.8 Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi 45
6. DENEYSEL SONUÇLAR 47
6.1 AISI 4140 Kalite Çelik 47
6.1.1 Mikroyapıların incelenmesi 47
6.1.2 Sertlik analizleri 62
6.1.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler 63
6.1.4 Kırılma yüzeyinin incelenmesi 70
6.2 AISI 6150 Kalite Çelik 74
6.2.1 Mikroyapıların incelenmesi 74
6.2.2 Sertlik analizleri 88
6.2.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler 89
6.3 AISI 1045 Kalite Çelik 95
6.3.1 Mikroyapıların incelenmesi 95
6.3.2 Sertlik analizleri 110
6.3.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler 111
6.4 AISI 1070 Kalite Çelik 117
6.4.1 Mikroyapıların incelenmesi 117
6.4.2 Sertlik analizleri 132
6.4.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler 133
6.5 Optimize Edilen Isıl İşlem Koşulları 139
7. GENEL SONUÇLAR 141
KAYNAKLAR 145
ÖZGEÇMİŞ 151

KISALTMALAR

AISI **:** Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SEM **:** Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM **:** Geçirimli Elektron Mikroskobu
HRB **:** Rockwell B Sertlik Değeri
DIN **:** Alman Standardizasyon Enstitüsü

SEMBOLLER

Fe_3C	**:** Demir Karbür/ Sementit
M_3C	**:** Metal Karbür
l	**:** Lif Uzunluğu
d	**:** Lif Kalınlığı
α	**:** Alfa Fazı
β	**:** Beta Fazı
µm	**:** Mikrometre
Δt	**:** Sıcaklık Değişimi
Fe-C	**:** Demir Karbon Faz Diyagramı
A_1	**:** Alt Kritik Sıcaklık
A_{c3}	**:** Ötektoid Altı Çeliklerde Üst Kritik Sıcaklık
A_{cm}	**:** Ötektoid Üstü Çeliklerde Üst Kritik Sıcaklık
D	**:** Ortalama Karbür Çapı
n	**:** Birim Alan Başına Karbür Sayısı
s	**:** Parçacıklar Arası Boşluk
r	**:** Partikül Yarıçapı
r_0	**:** Başlangıç Partikül Yarıçapı
γ	**:** Ferrit - Sementit Arayüzey Enerjisi
C	**:** Ferrit Denge Karbon Konsantrasyonu
D_c	**:** Karbon Difüzyon Katsayısı
V_m	**:** Partikül Molar Hacmi
R	**:** Gaz Sabiti
T	**:** Sıcaklık
t	**:** Zaman
D_C^{eff}	**:** Karbon İçin Etkin Difüzyon Katsayısı
D_{Fe}	**:** Demir İçin Difüzyon Katsayısı
x_c	**:** Karbon Mol Oranı
x_{Fe}	**:** Demir Mol Oranı
V_{Fe_3C}	**:** Sementit Molar Hacim
V_{Fe}	**:** Demir Molar Hacim
mm	**:** Milimetre
cm	**:** Santimetre
kgf	**:** Kilogram Kuvvet
dk	**:** Dakika

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Nokta sayımı analiz sonucu **18**
Çizelge 3.1: Kırılmanın gruplandırılması **28**
Çizelge 5.1: Çelik kalitelerinin kimyasal bileşimi (% ağ.) **43**
Çizelge 6.1: AISI 4140 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları **49**
Çizelge 6.2: AISI 4140 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları **54**
Çizelge 6.3: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin sertlik değerleri **62**
Çizelge 6.4: Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin sertlik değerleri **62**
Çizelge 6.5: AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **64**
Çizelge 6.6: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680°C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **65**
Çizelge 6.7: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670°C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **66**
Çizelge 6.8: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **67**
Çizelge 6.9: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **69**
Çizelge 6.10: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **69**
Çizelge 6.11: AISI 6150 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları **75**
Çizelge 6.12: AISI 6150 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları **80**
Çizelge 6.13: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin sertlik değerleri **88**
Çizelge 6.14: Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin sertlik değerleri **88**
Çizelge 6.15: AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **90**
Çizelge 6.16: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **91**
Çizelge 6.17: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **92**

Çizelge 6.18: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **93**
Çizelge 6.19: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **94**
Çizelge 6.20: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **95**
Çizelge 6.21: AISI 1045 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları **98**
Çizelge 6.22: AISI 1045 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları **102**
Çizelge 6.23: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin sertlik değerleri **110**
Çizelge 6.24: Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin sertlik değerleri **110**
Çizelge 6.25: AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **112**
Çizelge 6.26: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **113**
Çizelge 6.27: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **114**
Çizelge 6.28: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **115**
Çizelge 6.29: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **116**
Çizelge 6.30: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **117**
Çizelge 6.31: AISI 1070 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları **119**
Çizelge 6.32: AISI 1070 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları **124**
Çizelge 6.33: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin sertlik değerleri **132**
Çizelge 6.34: Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin sertlik değerleri **132**
Çizelge 6.35: AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **134**
Çizelge 6.36: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **135**
Çizelge 6.37: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **136**
Çizelge 6.38: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **137**
Çizelge 6.39: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690°C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **138**

Çizelge 6.40: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları **139**
Çizelge 6.41: Optimum küreselleştirme ısıl işlem koşulları..... **139**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Rayleigh pertürbasyon teorisi **4**
Şekil 2.2 : Modifiye edilmiş pertürbasyon teorisi **5**
Şekil 2.3 : Termal oluk modeli (a) Şematik gösterim, (b) TEM morfolojisi **6**
Şekil 2.4 : Kusur göçü teorisinin ve lamellerin kararsızlığının şematik gösterimi **7**
Şekil 2.5 : Tane sınırı boyunca sementit küreselleşmesi **7**
Şekil 2.6 : Mikroyapıda Ostwald kabalaşması ve sonlandırma bölgesi **9**
Şekil 2.7 : Küreselleştirme işlemi sırasında mikroyapı değişiminin şematik gösterimi **10**
Şekil 2.8 : (a) Sementit levhanın kenar-göç mekanizması yoluyla küreselleştirilmesi. (b) Kenarlar boyunca kimyasal-potansiyel gradyanlar. (c) Kimyasal-potansiyel gradyanının gelişimi **11**
Şekil 2.9 : Isıl işlem türlerinin sıcaklık aralıkları **12**
Şekil 2.10 : Küreselleştirme yöntemleri (a) Kritik sıcaklık altı küreselleştirme, (b) Kritik sıcaklık arası küreselleştirme (c) Çevrimsel küreselleştirme **14**
Şekil 2.11 : Lamellerin kalınlaşması ve kırılması **16**
Şekil 2.12 : (a) Lamel boyunca termal olukların oluşması ve küreselleşen taneler (i) alt sınır gelişimi, (ii) oluklardan düz alanlara difüzyon etkisiyle çözünme (iii) lamellerin ayrılması (iv) parçalanma, (v) boyunlaşma ve lameler kırılması (b) SEM görüntüsü **16**
Şekil 2.13 : Farklı çevrim sayılarının mikroyapıdaki değişimleri (a) 5000x (b) 10000x **17**
Şekil 3.1 : Metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması **21**
Şekil 3.2 : Geleneksel kesme ve hassas kesme işlemlerinin karşılaştırılması **22**
Şekil 3.3 : Standart kesme ve hassas kesme sonucu ürün karşılaştırılması **23**
Şekil 3.4 : Şematik hassas kesme işlemi ve kesme yüzeyi **23**
Şekil 3.5 : Hassas kesim işlem adımları **24**
Şekil 3.6 : Karbür bantlaşmasının çatlak yolundaki değişiklikler üzerindeki etkisi . **26**
Şekil 3.7 : Hassas kesme işleminde meydana gelen kesme bandının yayılması sırasındaki yapısal evrimi **27**
Şekil 3.8 : Geleneksel kesme ve hassas kesme sonucu ürün kalitesi **27**
Şekil 3.9 : Kenar morfolojileri (a) Geleneksel kesme, (b) Hassas kesme **30**
Şekil 3.10 : Kırılma sonucunda oluşacak karakteristik bölgeler ve olası hatalar **31**
Şekil 3.11 : Farklı ısıl işlem sürelerinde kenar morfolojisinin değişimi **33**
Şekil 4.1 : AISI 4037 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemleri (a) 4 saat kritik sıcaklık arası (b) 12 saat kritik sıcaklık arası, (c) 4 saat kritik altı, (d) 12 saat kritik altı **36**
Şekil 4.2 : AISI 4147 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi (a) Isıl işlem öncesi, (b) 3 saat, (c) 6 saat, (d) 9 saat **36**
Şekil 4.3 : AISI 6145 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi (a) Isıl işlem öncesi, (b) 1 çevrim, (c) 3 çevrim, (d) 5 çevrim, (e) 6 çevrim **37**

Şekil 4.4 : Çevrim sayısının etkisi (a) Mühendislik şekil değişimi, (b) Mekanik özellikler **38**
Şekil 4.5 : AISI 1040 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi (b) Sonrası..... **38**
Şekil 4.6 : AISI 1050 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi (b) Sonrası..... **39**
Şekil 4.7 : AISI 1060 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi başlangıç yapısı ince perlit (b) Isıl işlem öncesi başlangıç yapısı kaba perlit, (c) Isıl işlem sonrası başlangıç yapısı ince perlit, (d) Isıl işlem sonrası başlangıç yapısı kaba perlit..... **39**
Şekil 4.8 : AISI 1060 kalite çelikte farklı küreselleştirme sürelerindeki küresellik oranının değişimi **40**
Şekil 4.9 : % 0,6 C içeren çeliğin mikroyapıdaki değişim (a) Isıl işlemsiz, (b) 1 çevrim, (c) 5 çevrim, (d) 8 çevrim **40**
Şekil 4.10 : Farklı çevrim sayılarına göre mikroyapıların SEM görüntüleri (a) 1 çevrim, (b) 3 çevrim, (c) 5 çevrim, (d) 7 çevrim **41**
Şekil 4.11 : Sementit küreselleşmesi **42**
Şekil 4.12 : Kırılma yüzeyi morfolojisi (a) Isıl işlemsiz, (b) 3 çevrim (c) 5 çevrim . **42**
Şekil 6.1 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **48**
Şekil 6.2 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **49**
Şekil 6.3 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı..... **50**
Şekil 6.4 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **51**
Şekil 6.5 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **52**
Şekil 6.6 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **52**
Şekil 6.7 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **53**
Şekil 6.8 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **54**
Şekil 6.9 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **55**
Şekil 6.10 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı **56**
Şekil 6.11 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **57**
Şekil 6.12 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı **58**

Şekil 6.13 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı **59**
Şekil 6.14 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı **60**
Şekil 6.15 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı..... **61**
Şekil 6.16 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi..... **63**
Şekil 6.17 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **64**
Şekil 6.18 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **64**
Şekil 6.19 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680°C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **65**
Şekil 6.20 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **66**
Şekil 6.21 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **66**
Şekil 6.22 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **67**
Şekil 6.23 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **67**
Şekil 6.24 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **68**
Şekil 6.25 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **68**
Şekil 6.26 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı..... **69**
Şekil 6.27 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği halde Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı **70**

Şekil 6.28 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 1 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı **71**
Şekil 6.29 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı **71**
Şekil 6.30 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı **72**
Şekil 6.31 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı ısıl işlem uygulandıktan sonra Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı..... **73**
Şekil 6.32 : Endüstriyel hassas kesme işlemine tabi tutulan (a) Temin edildiği haldeki, (b) 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 10 çevrim küreselleştirme işlemi uygulanan ve (c) 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı küreselleştirme uygulanan numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları **73**
Şekil 6.33 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **74**
Şekil 6.34 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **75**
Şekil 6.35 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı..... **76**
Şekil 6.36 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **77**
Şekil 6.37 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **78**
Şekil 6.38 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **78**
Şekil 6.39 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **79**
Şekil 6.40 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **80**
Şekil 6.41 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **81**

Şekil 6.42 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **82**
Şekil 6.43 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **83**
Şekil 6.44 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **84**
Şekil 6.45 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **85**
Şekil 6.46 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **86**
Şekil 6.47 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı..... **87**
Şekil 6.48 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi..... **89**
Şekil 6.49 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **90**
Şekil 6.50 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **90**
Şekil 6.51 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **91**
Şekil 6.52 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **92**
Şekil 6.53 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **92**
Şekil 6.54 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **93**
Şekil 6.55 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **93**
Şekil 6.56 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **94**
Şekil 6.57 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **94**

Şekil 6.58 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **95**
Şekil 6.59 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları **96**
Şekil 6.60 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları **97**
Şekil 6.61 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **98**
Şekil 6.62 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı **99**
Şekil 6.63 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı **100**
Şekil 6.64 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **100**
Şekil 6.65 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **101**
Şekil 6.66 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **102**
Şekil 6.67 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **103**
Şekil 6.68 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **104**
Şekil 6.69 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **105**
Şekil 6.70 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **106**
Şekil 6.71 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **107**
Şekil 6.72 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **108**
Şekil 6.73 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı **109**
Şekil 6.74 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi **111**

Şekil 6.75 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **112**
Şekil 6.76 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **112**
Şekil 6.77 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **113**
Şekil 6.78 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı ... **114**
Şekil 6.79 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı ... **114**
Şekil 6.80 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **115**
Şekil 6.81 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **115**
Şekil 6.82 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **116**
Şekil 6.83 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **116**
Şekil 6.84 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı..... **117**
Şekil 6.85 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **118**
Şekil 6.86 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları..... **119**
Şekil 6.87 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı..... **120**
Şekil 6.88 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **121**
Şekil 6.89 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **122**
Şekil 6.90 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **122**
Şekil 6.91 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı..... **123**

Şekil 6.92 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı **124**
Şekil 6.93 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **125**
Şekil 6.94 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **126**
Şekil 6.95 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **127**
Şekil 6.96 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı **128**
Şekil 6.97 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı..... **129**
Şekil 6.98 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740°C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı..... **130**
Şekil 6.99 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı..... **131**
Şekil 6.100 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi..... **133**
Şekil 6.101 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **134**
Şekil 6.102 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **134**
Şekil 6.103 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **135**
Şekil 6.104 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı..... **135**
Şekil 6.105 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı..... **136**
Şekil 6.106 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı..... **136**

Şekil 6.107 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **137**
Şekil 6.108 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **137**
Şekil 6.109 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **138**
Şekil 6.110 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı **138**

ALAŞIMSIZ VE DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERDE KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİNİN OPTİMİZASYONU VE HASSAS KESME İŞLEMİNE ETKİSİ

ÖZET

AISI 4140 ısıl işlem uygulamaları sonucunda sertleşebilir özellikte olan, yüksek dayanım ve süneklik özelliği gösteren bir ıslah çeliğidir. Yapısal özellikleri dolayısıyla makine imalat, otomotiv, savunma ve havacılık sanayisinde kendisine geniş bir yer bulmaktadır. AISI 6150 çelik kalitesi yüksek aşınma direnci, dayanım, darbe tokluğu gibi özellikleri dolayısıyla otomotiv sanayisi başta olmak üzere makine imalat sanayisinde kullanılan bir yay çeliğidir. AISI 1045 ve AISI 1070 çelik kaliteleri ise alaşım elementi içermeyen orta ve yüksek karbonlu yaylık çelikler grubunda bulunmaktadır. Sahip oldukları yüksek dayanım ve sertlik özelliklerinin yanı sıra düşük maliyetlerinden dolayı yine benzer sektörlerde kullanımı zamanla yaygınlaşmıştır.

Çalışmada kullanılan çelik kalitelerinin ortak kullanım alanları arasında bulunan otomotiv sektörüne yönelik parça üretimleri sırasında bu malzemelerin ısıl işlem kabiliyetlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde kullanıma ihtiyaç duyulan parça geometrisinin kompleks olması ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Çeliklerin sahip olduğu bu yüksek dayanım ve gevrek yapıları ise parçaların şekillendirmesinde performansı kısıtlayıcı bir rol oynamaktadır.

Sac şekillendirme prosesinin sonucunu etkileyen diğer parametreler ise kalıp geometrisi ve pres işlemidir. Makine imalat sektöründe günümüz teknolojinin gelişmesiyle yüksek yüzey kalitesinde ve boyutsal doğrulukta parça üretimi için geleneksel kesme proseslerinin yerini hassas kesme prosesi almaya başlamıştır. Hassas kesme prosesinde kullanılan kalıpların ve hidrolik preslerin çok düşük toleranslarda ve yüksek hassasiyette çalışan sistemleri meydana getirmesi nedeniyle çok yüksek verim eldesi sağlanabilmektedir. Bu sebeple ürün kalitesini arttırmak amacıyla malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli ısıl işlem metotları geliştirilmiştir.

Malzemelerin şekillendirilebilirliğini arttırmak için sünekliğinin arttırılması ve gevrekliğinin düşürülmesi gerekmektedir. Tokluğu arttırılan malzemelerin üzerine uygulanan kuvvet sonucunda deforme olmadan şekillenmesini sağlamaktadır. Bu yapının elde edilebilmesi için küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan malzemenin yumuşaması sağlanır. Bu özelliğin elde edilebilmesi için küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanmakta olup bu tavlamanın üç farklı çeşidi bulunmaktadır. Çevrimsel, kritik sıcaklık altı ve kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işlemi olarak gruplandırılan bu işlemleri birbirinden ayıran temel fark tavlama sıcaklığı ve bekleme süreleridir.

Küreselleştirme ısıl işlemi sırasında karbon çeliklerinin yapısında bulunan demir karbür (sementit) yapısının miktarı, dağılımı ve şekli önemli bir yer tutar. Ötektoid perlit ve ötektik alaşımlar gibi iki fazlı malzemelerde lameler bir mikroyapı bulunmaktadır. Küreselleştirme ısıl işlemleri sırasında bu lameler yapının küresel

forma dönme eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu konuda çeşitli teorilerin ortaya atılmasına rağmen küreselleştirme mekanizması üzerine çalışmalar halen sürmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde yapısal hatalardan kaynaklı olarak arayüzeyler arasında oluşan kimyasal gradyan farkı olduğu tespit edilmiştir. Daha kararlı hale geçebilmek için difüzyon kontrollü olarak atomların göç etmeye başlamasıyla beraber kalınlaşan bölgenin çözünmesi sonucunda küresel taneler oluşmaya başlamaktadır.

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda mikroyapıyı etkileyen parametreler araştırılmış ve etkileri gözlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda küreselleştirme ısıl işlemi sırasında farklı üst sıcaklık, alt sıcaklık, tutma süreleri ve çevrim sayısı parametreleri ile bu çeliklerin mikroyapı, sertlik ve hassas kesme prosesine davranışları karşılaştırılmıştır. Ayrıca benzer sürelere tekabül edecek şekilde çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi ile kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemlerinin sonuçları kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Numunelerin ısıl işlemler öncesi ve sonrası mikroyapı değişimleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Tavlamaların sonucunda sertlik deneyleri yapılarak malzemelerin değişen morfolojilerine göre sertlik değerleri ölçülmüştür. Clemex Professional® görüntü analiz yazılımı kullanılarak yapıdaki karbürlerin en/boy oranı, küresellik oranı, ortalama çapı ve % alanı hesaplanmıştır. Hassas kesme ve Erichsen deneyleri ile malzemelerin şekillenme kabiliyetleri hakkında değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma neticesinde mikroyapının küreselleştirilmesi için 5 dakika tutma süresinin yeterli olmadığı görülmüş olup, küresel karbürlerin boyut ve sayısını etkileyen parametrenin düşük sıcaklık parametresi olduğu anlaşılmıştır. Aynı koşullar altında 1,5 ve 10 çevrim sayılarında gerçekleştirilen küreselleştirme ısıl işlemleri sonucunda çevrim sayısının artmasıyla malzeme sertliğinin daha fazla düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca soğuk hadde uygulanan numunelerin, sıcak haddelenmiş numunelere göre daha yüksek sertlikte olduğu ve genellikle ısıl işlemler neticesinde daha yüksek performans sergilediği görülmüştür.

OPTIMIZATION OF SPHEROIDIZING HEAT TREATMENT IN UNALLOYED AND LOW ALLOYED STEELS AND ITS EFFECT ON FINE BLANKING PROCESS

SUMMARY

AISI 4140 is a tempered steel with high strength and ductility, which can be hardened as a result of heat treatment applications. Due to its structural features, it finds a wide place in the machinery manufacturing, automotive, defense and aerospace industries. AISI 6150 steel grade is spring steel used in the machinery manufacturing industry, especially in the automotive industry, due to its features such as high wear resistance, strength and impact toughness. AISI 1045 and AISI 1070 steel grades are in the group of medium and high carbon spring steels that do not contain alloying elements. Due to their high strength and hardness properties, as well as their low cost, their use in similar sectors has become widespread over time.

The heat treatment capabilities of these materials are frequently used during the production of parts for the automotive sector, which is among the common areas of use of the steel grades used in the study. The complexity of the part geometry, which is especially needed in the automotive industry, causes a decrease in product quality. These high strength and brittle structures of steels play a restrictive role in the shaping of parts.

Other parameters that affect the result of the sheet metal forming process are the die geometry and the pressing process. With the development of today's technology in the machinery manufacturing sector, the traditional cutting processes have started to be replaced by the fine blanking process for the production of parts with high surface quality and dimensional accuracy. Due to the fact that the molds and hydraulic presses used in the fine blanking process create systems that operate with very low tolerances and high precision, very high efficiency can be achieved. For this reason, various heat treatment methods have been developed to improve material properties in order to increase product quality.

After the traditional cutting process, fracture surface and shear surface are observed in the edge morphology of the piece. Fracture area has a rough structure because of formed as a result of tearing. It is known that the mechanical performance of the material decreases because these indentations and protrusions in the rough structure. Material tearing is affected by die design, punch geometry, cutting speed, and material microstructure. Preferred the fine blanking process, it is aimed to obtain an edge morphology with the entire sheared surface. After this cutting, in which burr, tearing, roll over and fracture penetration is minimal, the surface of the piece is formed higher quality.

In order to increase the formability of the materials, it is necessary to increase the ductility and decrease the brittleness. It enables the materials with increased toughness to be shaped without deformation as a result of the force applied on them. In order to

obtain this structure, the softening of the material, which is subjected to spheroidization heat treatment, is provided. In order to achieve this feature, spheroidization heat treatments are applied and there are three different types of this annealing. The main difference that distinguishes these processes, which are grouped as Cyclic, Subcritical and Intercritical spheroidization heat treatment, is the annealing temperature and soaking times.

During the spheroidization heat treatment, the amount, distribution and shape of the iron carbide (cementite) phase in the structure of carbon steels have an important place. Two-phase materials such as eutectoid pearlite and eutectic alloys have a lamellar microstructure. It has been observed that this lamellar structure tends to return to the spherical form during spheroidization heat treatments. Although various theories have been put forward on this subject, studies on the globalization mechanism are still ongoing. As a result of the studies, it has been determined that there is a chemical gradient difference between the interfaces due to structural errors. In order to become more stable, spherical grains begin to form as a result of the dissolution of the thickened region, as the atoms begin to migrate under diffusion control.

In this thesis, the parameters affecting the microstructure as a result of spheroidization heat treatment of unalloyed and low alloy steels, which are frequently used in the automotive industry, were investigated and their effects were tried to be observed. In this context, different upper temperature, lower temperature, holding times and cycle number parameters during the spheroidization heat treatment and the microstructure, hardness and behavior of these steels to the fine blanking process were compared. In addition, the results of cyclic spheroidization heat treatment and subcritical spheroidization heat treatment corresponding to similar duration were compared and evaluated.

Within the scope of the study, the microstructures before and after the heat treatment were examined under the optical microscope and scanning electron microscope by performing metallography processes. Materials supplied in sheet form were cut in 40 mm x 60 mm dimensions. Samples which put into graphite melting pot with iron chips were heat treated. As a result of the heat treatment performed at 740-680 °C for 5 minutes for 5 cycles, the aimed change could not be observed. Due to the spherical carbides observed in the original microstructure were applied to normalization heat treatment at 950 °C. It was determined that the spheroidization heat treatments applied to the normalized samples gave worse performance. Then, the heat treatment conditions were customized for each material, and these parameters were applied as 1, 5 and 10 cycles.

Microstructure changes of the samples before and after heat treatment were examined under optical microscope and scanning electron microscope. As a result of annealing, hardness tests were made and hardness values were measured according to the changing morphologies of the materials. Aspect ratio, sphericity, sphere diameter and % area of carbides in the structure were calculated using Clemex Professional® image analysis software. Fine Blanking or Erichsen experiments were used to evaluate the forming abilities of the materials.

As a result of the study, it was seen that the holding time of 5 minutes was not sufficient for the spheroidization of the microstructure. It has been understood that the parameter affecting the size and number of spherical carbides is the low temperature parameter. As a result of spheroidization heat treatments performed at 1,5 and 10 cycles under the same conditions, it was determined that the hardness of the material decreased more

with the increase in the number of cycles. In addition, it has been observed that the cold rolled samples have higher hardness than the cold rolled samples and generally show higher performance as a result of heat treatment.

1. GİRİŞ

Çelikler düşük maliyetli oluşları, geniş kullanım yelpazelerine sahip olmaları ve çok yüksek işlenebilir özellikleri nedeniyle popüler bir malzeme grubudur. Gelişen teknolojiyle beraber çelik uygulamaları da çeşitlenmiş olup, özellikle alaşımlama ve ısıl işlem teknikleriyle beraber morfolojik değişimlere imkan tanınmaktadır.

AISI 4140 çelik kalitesi krom ve molibden alaşım elementlerini içeren yüksek dayanımlı düşük alaşımlı bir çeliktir. Bu çelik kalitesi yapısı gereği, uygulanan ısıl işlem çeşidine göre mukavim ve tok bir özellik gösterebileceği gibi sünek ve işlenebilir hale de dönüştürülebilmektedir. Bu yapısı gereği gaz ve petrol endüstrisinin yanı sıra savunma, otomotiv ve havacılık sektörlerinde dişli, şaft ve diğer makine parçaları şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

AISI 6150 çelik kalitesi krom ve vanadyum alaşım elementlerini içeren, orta karbon içeriğine sahip bir düşük alaşımlı çeliktir. Yüksek dayanım, darbe tokluğu ve yorulma performansları ile kalıp çelikleri, yay çelikleri ve yüksek hız çelikleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Yay çelikleri küreselleştirme ısıl işleminin yaygın olarak kullanıldığı çelik gruplarından birisidir [2,3].

AISI 1045 çelik kalitesi, alaşım elementi içermeyen orta karbon içeriğine sahip en yaygın imalat çeliği türlerinden birisidir. Yüksek dayanımı, sertliği ve düşük maliyeti nedeniyle inşaat, savunma sanayi, otomotiv, enerji, havacılık, petrol ve gaz dahil olmak üzere mühendislikte çok çeşitli uygulamalara sahiptir [4].

AISI 1070 çelik kalitesi, alaşım elementi içermeyen yüksek karbon içeriğine sahip bir çeliktir. Yüksek dayanımı ve sertliği nedeniyle otomotiv, beyaz eşya, elektronik ve inşaat gibi sektörlerde kullanılmaktadır.

Hassas kesme prosesi, otomotiv, havacılık ve elektronik sektörleri başta olmak üzere yüksek parça hassasiyeti ve performansın istendiği durumlarda tercih edilen bir sac metal kesme işlemidir. Geleneksel kesme sonucunda parçanın yüzeyinde çatlaklar ve süreksizlikler meydana gelmesinden dolayı ürün kalitesi olumsuz etkilenmektedir [5,6].

Proses, kalıp tasarımının çok düşük toleranslara sahip olmasıyla beraber kesme bölgesindeki metalin malzeme plastisitesini arttıran üç yönlü sıkıştırma gerilmesi oluşturan bir mekanizmaya sahiptir [7]. Hassas kesme prosesi sonucu elde edilen parçanın boyutsal toleransları parçanın şekli, takım kalitesi, malzeme kalınlığı ve özelliklerine bağlıdır [8]. Hassas kesme prosesinde en yaygın olarak karbon çelikleri, düşük alaşımlı çelikler, alüminyum alaşımları ve bakır alaşımları şekillendirilmektedir.

Geleneksel kesme yöntemlerine kıyasla hassas kesme işlemi ile yüksek verim elde edilebilir hale gelinmesinin ardından parça kalitesini arttırmaya yönelik olarak şekillendirilecek malzemeler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Hassas kesme işlemi sırasında malzemenin deforme olmadan veya yırtılma gözlenmeden şekillendirilebilmesi için sünekliğinin arttırılması gerekmektedir. Bu sebeple malzemeyi yumuşatarak sertliğinden feragat edip hassas kesme prosesinden daha yüksek performans gözlenmesi amaçlanmıştır. Malzeme mikroyapısının, malzeme özelliklerini etkileyen en temel faktör olmasından dolayı istenen özelliklerin elde edilebilmesi için en çok tercih edilen yöntem ısıl işlemler olmuştur [9].

Çeliklerin ısıl işlemi sırasında malzeme özelliklerini etkileyen en önemli etkenler arasında karbürlerin dağılımı, şekli ve miktarı gelmektedir. Demir karbür fazı sert ve gevrek bir yapıya sahip olmasından dolayı hassas kesme prosesini kritik ölçüde etkilemektedir. Malzemelerin mikroyapısındaki demir karbürlerin dağılımını, miktarını ve şeklini değiştirmek için küreselleştirme ısıl işlemi uygulanarak plastisite arttırılır ve daha yumuşak, sünek bir malzeme haline getirilir [10].

Bu çalışmada sıcak hadde ürünü AISI 4140, AISI 1045, AISI 1070 ve AISI 6150 çelik kalitelerine uygulanan küreselleştirme ısıl işlemleri sırasında çevrim sayısı, sıcaklık aralığı ve tutma süresi parametreleri kıyaslanmıştır. Ayrıca çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi ve kritik sıcaklık altı ısıl işleminin karşılaştırılmasıyla mikroyapı ve mekanik performansları incelenmiştir. Küreselleştirme ısıl işlemlerinin ardından Clemex Professional® görüntü analiz yazılımı kullanılarak mikroyapılarındaki karbür dağılımları sayısal olarak hesaplanmış ve HRB cinsinden sertlik analizleri yapılarak mekanik özellikleri araştırılmıştır. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan numunelerin hassas kesme performansları AISI 4140 çelik kalitesi özelinde karşılaştırılmış olup en uygun ısıl işlem koşullarının belirlenmesine çalışılmıştır.

2. KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ VE MEKANİZMALARI

2.1 Küreselleştirme Mekanizmaları

Malzemelerde şekillendirme sırasında deformasyon gözlenebilmektedir. Bu sebeple malzemelerin işlem öncesinde işlenebilirliğini ve şekillenebilirliğini arttırmak amacıyla malzemenin yumuşatılması gerekmektedir. Genellikle karbon çeliklerinde, malzemenin sünek ve işlenebilir hale getirilmesini sağlamak için birtakım işlemler gerçekleştirilir. Şekillenebilirliği etkileyen faktörlerden birisi olan malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile daha kolay, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli sonuçlar elde edilebilir. Bu kapsamda genellikle karbon çelikleri olan demir esaslı alaşımlar için küreselleştirme ısıl işlemi uygulanabilir. Bu yöntem ile malzemenin mikroyapısında sıcaklık ve zaman faktörleri kullanılarak istenen değişiklikler elde edilebilir. Ancak uygulamalar sırasında bu potansiyellere ulaşmak için küreselleşme mekanizmasının ve kinetiğinin iyice anlaşılması gereklidir.

Ötektoid çelik gibi alaşımlarda lameler bir mikroyapı bulunmaktadır. Böyle bir yapının, tavlama sırasında küçük küreler halinde parçalanma eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Yapılan 2 boyutlu incelemelerle küreselleşme mekanizmasına yönelik birçok araştırma gerçekleştirilmiş ve modellemeler yapılmıştır. Ancak bu teorilerin günümüzde bile cevap veremediği birtakım sorular bulunmaktadır [11]. Lameler yapıların küreselleşme mekanizmaları için birçok model önerilmiş ancak dört ana model kabul görmüştür. Modern çalışmalar bu modellemelerin geliştirilmiş hallerini oluşturmaktadır.

I. Rayleigh Pertürbasyon Teorisi (Rayleigh's Perturbation Theory)

II. Termal Oluk Teorisi (Thermal Groove Theory)

III. Kusur Göçü Teorisi (Fault Migration Theory)

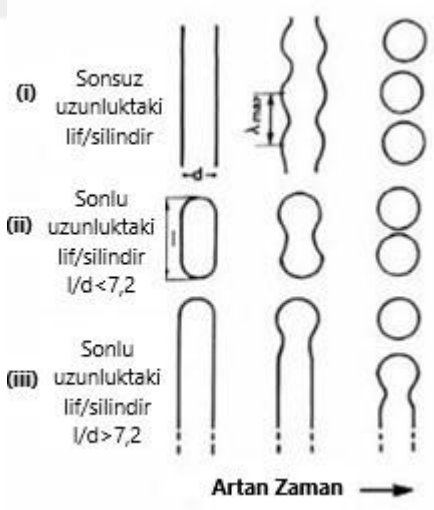
IV. Ostwald Kabalaşması (Ostwald Ripening)

Bu teoriler yararlı bilgiler vererek küreselleştirme sürecinin belirli taraflarını açıklamasının yanı sıra sürecin açıklanamayan detayları da bulunmaktadır. Örneğin bu

teoriler kusursuz malzemeleri açıklayabilirken kristallografinin anizotropi yönünü ve mikroyapılardaki arayüzey enerjisini veya kusurları hesaba katmaz. Dahası bu teorileri desteklemek için yapılan deneylerde tahmin edilen aktivasyon enerjisi geniş bir aralıkta değişmektedir ki önerilmiş olan hız kontrol difüzyon mekanizmaları birbirinden tamamen farklılık göstermektedir. Ek olarak, perlit küreselleşmesinin kinetiğine gerekli önem gösterilmemiştir [12]. Muhtemelen bu hataların varlığının kolayca tespit edilememesi veya görselleştirilememesi sebeplerinden dolayı modellemeler sırasında dikkate alınmamıştır. Bundan dolayı çalışmalar teoride doğru olmasının yanında pratikte başarısız olmaktadır.

2.1.1 Rayleigh pertürbasyon teorisi

Rayleigh pertürbasyon teorisi sadece çeliklerdeki küreselleştirme mekanizmasından ziyade fizikteki bütün küreselleştirme mekanizmalarını açıklamak için ortaya atılmış bir teoridir. Rayleigh pertürbasyon teorisi, kararsız olan uzun silindirik çubuk veya lifin yüzey geriliminin etkisi altında kendiliğinden bir dizi küresel parçacığa bölünmesini açıklamaktadır ve Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilmektedir. Ancak bu teori kılcallığın etkili olduğu şekilleri açıklamamaktadır [13].



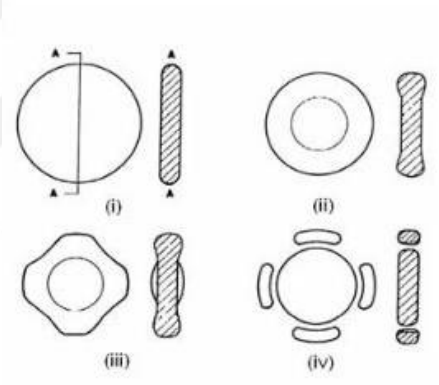
Şekil 2.1 : Rayleigh pertürbasyon teorisi [13].

Rayleigh pertürbasyon teorisi silindir şeklinin küreselleşmesini, yüzey enerjisindeki azalmadan ve plakanın geometrisinden kaynaklandığını ele almıştır. Model, bir çubuk yüzeyinde bulunan bozunmalar (disturbance) arasındaki mesafenin kritik bir eşiği aşması sonucunda yüzey geriliminin etkisiyle kendiliğinden kırılma gözleneceğini

ortaya atmaktadır [14]. Mesafedeki bu kritik değer kütle taşıma mekanizmalarına bağlı olarak değişmektedir.

2.1.2 Modifiye edilmiş pertürbasyon teorisi

Rayleigh pertürbasyon teorisinin sementit lamellerinin örnek gösterilebileceği lamel (platelet) şeklinin küreselleşmesini yorumlamak için Mullin ve Nichols tarafından ortaya atılan teoridir. Uzun çubuk şeklinin yapısal olarak kararsız olduğu hem teorik olarak hem de deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bunun aksine lamel şekli kılcallığın neden olduğu herhangi bir pertürbasyona karşı stabildir. Mullin tarafından verilen teorik analize göre düz bir arayüzeydeki herhangi bir pertürbasyonun zamanla bozulacağı gösterilir ve Rayleigh pertürbasyon teorisinin lameler yapıların kararsızlığını açıklamak için doğrudan kullanılamayacağı anlamına gelir. Mullin tarafından modifiye edilmiş teori Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



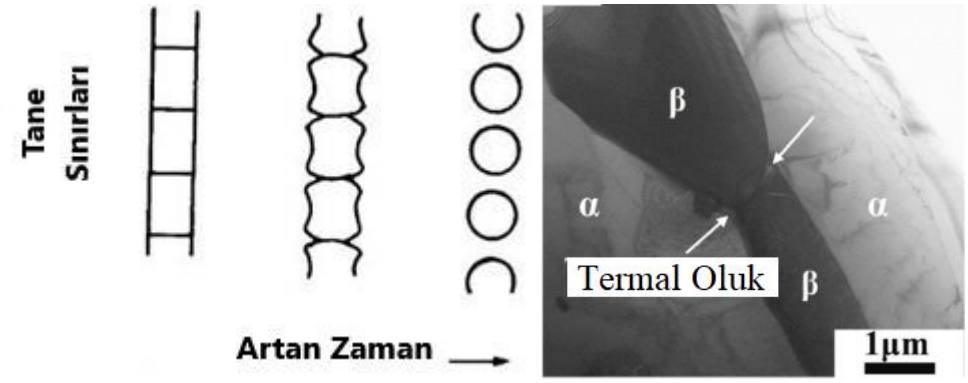
Şekil 2.2 : Modifiye edilmiş pertürbasyon teorisi [13].

Ancak Lai ve Kraft'ın gerçekleştirdiği çalışmada, lamel kenarının etrafında oluşan kürelerin varlığı tespit edilememiş olup modelde bulunan belirsizlikler nedeniyle geçerli bir model olarak kabul edilmemektedir [12].

2.1.3 Termal oluk teorisi

Katmanlı yapıların difüzyon etkisiyle kırılması için alt tane sınırları boyunca meydana gelen değişimlerin ifade edildiği teoridir. Şekil 2.3' de gösterildiği gibi şematize edilen süreç, üçlü bağlantı noktalarının her birinde başlangıç yüzey gerilimi dengesinin kurulması sonucunda bir sınır oluğu oluşturmaktadır. Bu durum katmanlı arayüzeye bir eğrilik ve kimyasal potansiyel gradyanı meydana getirmektedir. Kimyasal potansiyel gradyanına yanıt olarak kavisli oluktan ayrılan atomların difüzyonu

sonucunda oluğun büyümesi zorlanacak ve sonunda bir lamel plakasının kırılmasına neden olacağı açıklanmaktadır [12].

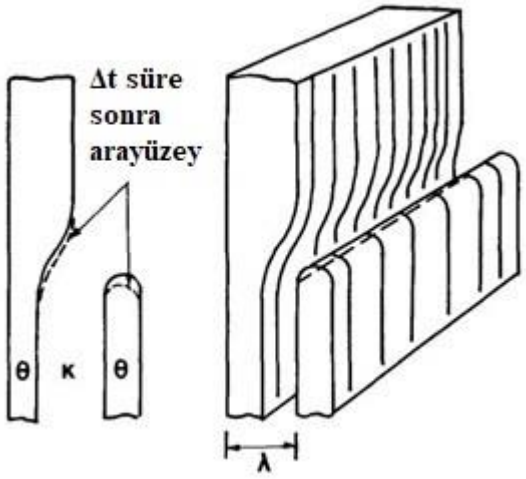


Şekil 2.3 : Termal oluk modeli (a) Şematik gösterim, (b) TEM morfolojisi [15].

2.1.4 Kusur göçü teorisi

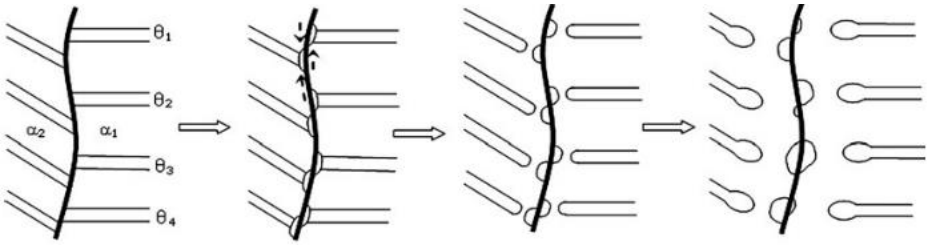
Önceki teoriler tek bir izole edilmiş çubuk veya lifin kararsızlığıyla ilgilenmektedir. Ancak malzemelerin yapılarında birden fazla lamel bulunmaktadır ve birbirleriyle difüzyonel etkileşimleri dikkate alınmalıdır. Bu teoriye göre yapılar sonsuz paralel çubuklardan oluşan ideal yapılar ve kusurlar içeren gerçek yapılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Sonsuz uzunluktaki kusursuz yapılarda, arayüzey eğriliğinin bulunmaması nedeniyle difüzyonel etkileşim meydana gelmemektedir. Gerçek malzemelerde ise arayüzeylerdeki eğriliklerden kaynaklı olarak kimyasal gradyan meydana gelmektedir. Sementit lamellerde daha yüksek eğrilikteki kusurlara her zaman sahiptir. Kusurları içeren bu bölgeler daha yüksek kimyasal potansiyele sahiptir.

Bu sebeple genel olarak lameler yapılarda kabul edilen teori kusur göçü teorisi olmaktadır. Anlaşıldığı gibi küreselleştirme için itici güç, kusurlarından kaynaklı eğrili lameller ve bitişiğindeki düz arayüzeyler arasındaki kimyasal gradyan farkıdır. Kararlı hale geçebilmek için atomlar, sonlandırma bölgesinden komşu düz arayüzeye göç etmekte ve sonlandırma bölgesinin çözülmesine sebep olmaktadır. Ardından bitişik plaka kalınlaşır. Kusur göçü teorisi Şekil 2.4'de şematize edilmiş olup, arayüzeyler ve göç sonucu çözünen plaka gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Kusur göçü teorisinin ve lamellerin kararsızlığının şematik gösterimi [16].

Ara yüzeydeki kusurlar veya eğrilikler son derece kararlı iken düz sementit levha küreselleşmenin başlangıç noktasıdır. Tian ve Kraft, kusurların yapısal hatalar olan dislokasyonlar, alt sınırlar ve delikler, bükülmeler, çatlaklar, kavisli ara yüzeyler gibi morfolojik hatalardan kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir. Perlit lamellerinin büyümesi sırasında termodinamik pertürbasyon ve perlit lamellerinin en düşük enerjide değişme eğiliminin bir sonucu olarak kıvrımlar veya eğrilikler oluşmaktadır. Kimyasal potansiyel gradyanı oluşturmaya ek olarak, kıvrımlar veya eğimli yüzeyler, çatlakların ve deliklerin oluşumu için çekirdeklenme bölgeleri olarak görev yapar. Deliklerin ve çatlakların sürekli büyümesi ve birleşmesi yapı içindeki boşlukları birleştirir ve sementit lamellerini küçük parçacıklara ayırır. Bu nedenle kusur göçü teorisi, delikler ve çatlaklar dikkate alınarak açıklanmaktadır. Cline ise geliştirdiği matematiksel model ile kusur göçünün ilk andan itibaren irileşmeye neden olduğunu ve irileşmenin başlangıcında etkili olduğunu tespit etmiştir [17]. Şekil 2.5'de tane sınırları boyunca lamellerin sonlanma bölgelerinde çözünen kısımlar ve lamel kalınlaşmasının meydana gelerek küreselleşmenin şematize edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Tane sınırı boyunca sementit küreselleşmesi [18].

2.1.5 Modifiye edilmiş kusur göçü teorisi

Rayleigh pertürbasyon teorisi ve termal oluk teorisi hatasız sementit lamellerinin küreselleşmesinin erken ve sonraki aşamalarda sınırlı tutmaktadır. Lai ve Kraft yapmış olduğu 3 boyutlu modellemeler ve SEM incelemeleri sonucunda ana küreselleşme mekanizmasının kusur göçü teorisi olduğunu düşünmektedir. Morfolojik değişimin başlangıcının ve gelişiminin perlit kolonileri arasında heterojen bir şekilde dağıldığı bilinmektedir. Bu değişimlerin, yapıda bulunan lamel sonlanmaları, bükülmeler, delikler, yüksek kavisli arayüzeyler gibi hatalarla doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple kusur göçü teorisinde belirtilen kusur tanımlarının arttırılarak teorinin geliştirilmesi gerekmiştir. Her malzemenin mikroyapısının kusursuz olmaması ve küreselleşme işlemi sırasında yeni oluşan bu deliklerin ve çatlakların büyümelerine neden olmaktadır.

Modifiye edilmiş kusur göçü teorisinden aşağıdaki sonuçlar çıkartılmaktadır.

- Perlitik katmanlı yapı kusursuz olmamakla birlikte her zaman çatlaklar, delikler, sonlanmalar içermektedir. Küreselleşme bu bölgelerden başlamakta olup yeni hataları da oluşturur.

- Küreselleşmenin itici gücü yüksek derecede eğimli yüzeyler ve komşu düz yüzeylerle aralarındaki yüksek kimyasal potansiyel farkıdır.

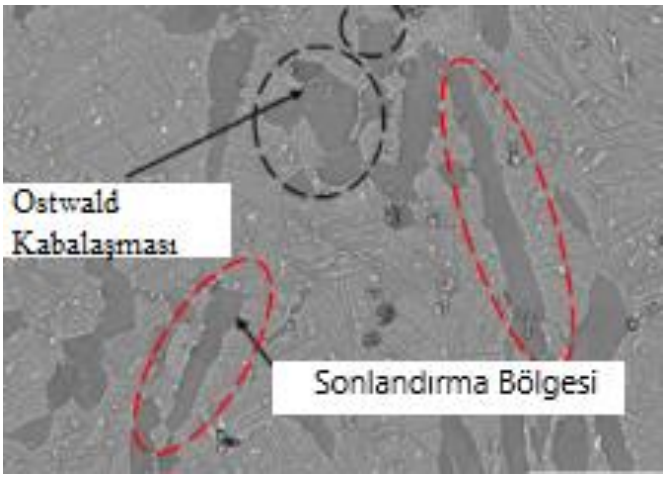
- Morfolojik değişim anizotropiktir ve hataların en sık gözlendiği düzlemler [010] ve [210] yönleridir. Anizotropik davranış Fe_3C arayüzey enerjisinin anizotropisine atfedilmektedir.

- Deliklerin ve hataların büyümesi ile sementit lamellerin küçük parçacıklar halinde bölünmesine neden olmakta ve Ostwald kabalaşması nedeniyle toplam yüzey enerjisinin azaltılması amacıyla taneler büyür [12].

2.1.6 Ostwald kabalaşması

Ostwald kabalaşması, ikinci faz kabalaşması olarak da bilinen ve çeşitli boyutlardaki parçacıkların bir matris içerisinde dağıldığı çok sayıda metalik ve metalik olmayan sistemlerde gözlenen faz dönüşüm işlemidir. Bu sürecin itici gücü toplam yüzey serbest enerjisindeki azalmadır. Kabalaşma, küçük partiküllerin difüzyon etkisiyle daha büyük partiküllerle birleşmesi sonucunda oluşmaktadır [19]. Şekil 2.6'da

küreselleştirme ısıl işlemi sırasında Ostwald kabalaşması ve sonlandırma bölgesinin SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2.6 : Mikroyapıda Ostwald kabalaşması ve sonlandırma bölgesi [15].

Küreselleştirme sırasında; tavlama süresi ile parçacık yarıçaplarının değiştiği, ortalama yarıçapın büyüdüğü, parçacık sayısının azaldığı ancak toplam hacim oranının neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Tavlama sırasında katı veya sıvı partiküllerin dağılımı ve arayüzey alanı ile ilişkili arayüzey enerjisinin varlığından dolayı toplam enerji artmaktadır. Sistem ise enerjiyi en aza indirmeye çalışmasından dolayı arayüzey alanını zamanla azaltmaktadır. Bundan dolayı arayüzey alanını azaltma amacıyla parçacıkların sayısı azalmakta ve yarıçapları büyümektedir. Çünkü sistem içerisinde bulunan parçacıkların boyutları kıyaslandığında; büyük parçacıklar aynı hacme denk gelen çok sayıdaki küçük parçacıklardan daha düşük arayüzey alanına sahiptir. Bu sebeple parçacık sayılarındaki artış arayüzey alanında bulunan enerjiyi arttırır. Bu enerjiyi azaltmaya yönelik olarak ise parçacıklar kabalaşır veya olgunlaşır [20].

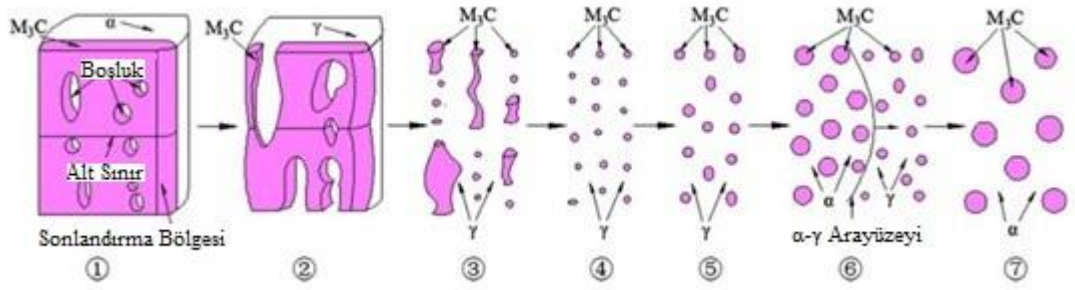
Gerçekleştirilen çalışmalar ile küreselleşmenin % 60-70 oranlarından sonra düştüğü gözlenmiştir. Atasoy ve Özbilen, bunun nedeninin küreselleşmemiş kısımdaki azalmadan olduğunu keşfetmiş olup küreselleştirme nedeniyle yeni parçacıkların oluşum hızının halihazırda küreselleşmiş parçacıkların kaybolma hızına eşit olduğunu keşfetmiştir [21,22]. Partikül kabalaşmasının meydana geldiği bu sürece Ostwald kabalaşması denilmektedir. Küreselleştirme ve Ostwald kabalaşması için gereken itici güç sistemin yüzey serbest enerjisindeki düşüşten kaynaklanmaktadır [20]. Küçük parçacıklar geniş yüzey alanı/hacim oranına sahip oldukları için toplam yüzey

enerjisini azaltmak amacıyla küçük kürelerin büyük küreler haline kabalaşması meydana gelmektedir.

2.1.7 Modern teoriler

Küreselleştirmenin oluşum mekanizmalarının ve itici güçlerinin araştırılması günümüz imkanlarıyla sanal ortamlarda devam etmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda küreselleştirme işlemi adım adım modellenebilmekte ve izlenebilmektedir. Bu sürecin modellenmesiyle küreselleştirme ısıl işlemleri daha verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır.

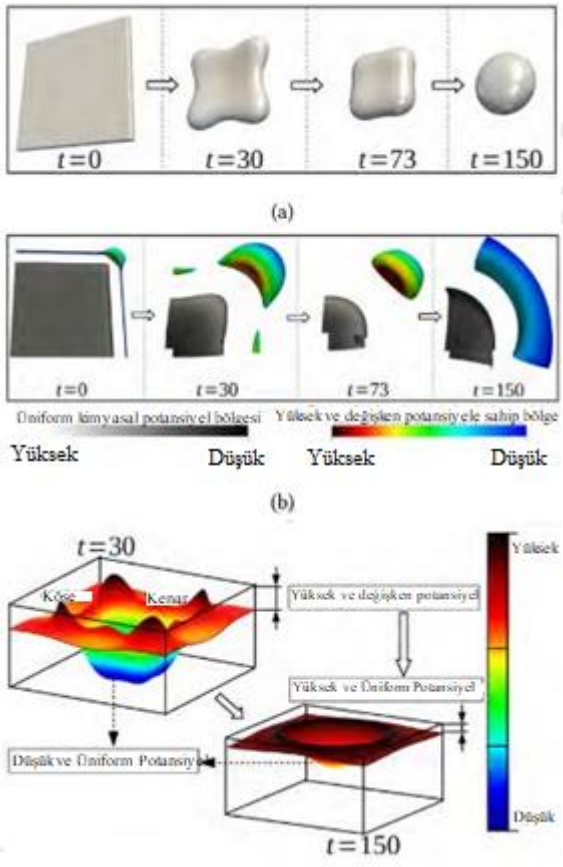
Wang vd. [11] ise yaptıkları çalışmada ötektoid perlitik çeliğin lameler yapıdaki sementitlerinin küreselleşmesi sırasında değişen morfolojisini 3 boyutlu görselleştirme teknolojisi kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Saha'nın çalışmasını destekler nitelikte olup sementit lamellerde bulunan boşluk ve hataların, küreselleşmenin başlaması ve ilerlemesinde önemli rol oynadığını tespit etmişlerdir. Bu boşlukların birleşmesi ve genişlemesi ile lamellerin uzun, dar şeritler halinde parçalanmasının arkasındaki itici gücün yüzey enerjisindeki farktan veya boşluk kenarları ile lamellerin bitişik düz yüzeyi arasındaki eğrilikten meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yapıdaki hatalardan başlayan ve oluşan kürelerin Ostwald kabalaşması sürecini içeren küreselleştirme işlemi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Küreselleştirme işlemi sırasında mikroyapı değişiminin şematik gösterimi [23].

Amos vd. [24] gerçekleştirdiği çalışmada, perlitik küreselleşme mekanizmasını 3 boyutlu faz alanı simülasyonu ile sanal ortamda modelleyerek küreselleşmenin boyut ve dağılımlarını belirleyen faktörleri incelemiştir. Yapılan çalışma sırasında kılcallık etkisiyle sementit plakaların küreselleşmesi, faz alan modellemesi yoluyla araştırılmıştır. Çalışma sonucunda arayüzey enerjisinin kritik bir rol oynadığı ve

sementit en/boy oranına bağlı olarak küreselleşme mekanizmasının değiştiği gözlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 2.8'deki gibidir.



Şekil 2.8 : (a) Sementit levhanın kenar-göç mekanizması yoluyla küreselleştirilmesi. (b) Kenarlar boyunca kimyasal-potansiyel gradyanlar. (c) Kimyasal-potansiyel gradyanının gelişimi [24].

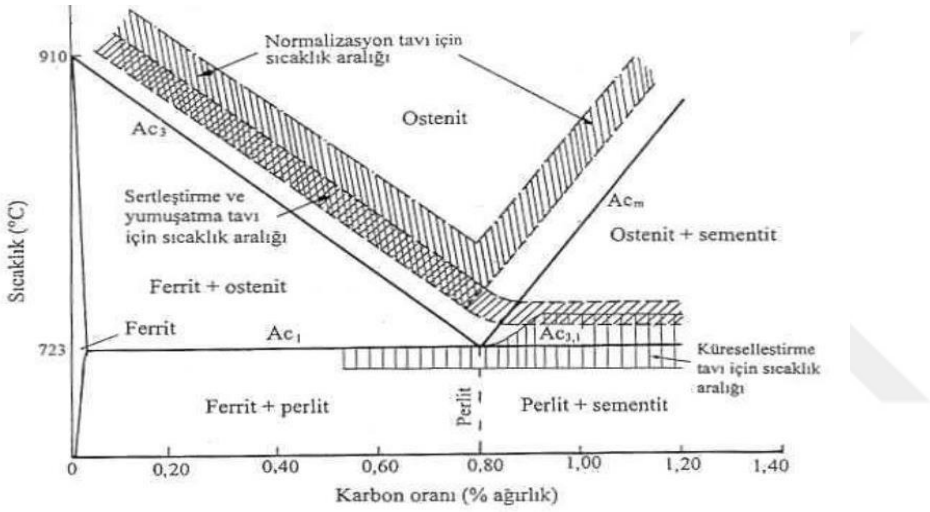
2.2 Küreselleştirme Isıl İşlemi

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte özellikle çeliklerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Malzeme özelliklerindeki beklentilerin değişebilmesi sebebiyle ihtiyaç duyulan niteliklerde malzemelerin kazanılması amacıyla ısıl işlem prosesleri gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen ısıl işlemler ile malzeme mikroyapısında meydana getirilen değişiklikler sonucunda, malzeme özelliklerinin istenen şekilde iyileştirilmesi sağlanabilmektedir [25].

Isıl işlemler; malzemeyi katı halde belirli bir sıcaklığa ısıtma, bu sıcaklıkta bir süre bekletme ve kontrollü soğutma işleminin yapılması sonucunda malzeme mikroyapısında istenen özelliklerin kazandırılması amacıyla uygulanan işlemlerin

genel adıdır. Çeliğin yapısındaki karbon miktarına göre uygulanacak ısıl işlem hakkında bilgi sahibi olunabilir. Isıl işlemde amaç, malzemeye katı halde iken istenen özellikleri veren mikroyapıyı kazandırmaktır [26]. Isıl işlemde sıcaklık kadar önemli diğer faktörler zaman ve ortamdır. Gerçekleştirilen ısıl işlemlerin kontrollü tamamlanması malzeme özelliklerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Malzeme mikroyapısının, istenen mekanik özelliklere göre iyileştirilmesinin sağlanması amacıyla, farklı sıcaklıklarda ve soğutma hızlarında gerçekleştirilerek uygulanan işlemlerdir. Şekil 2.9'da gösterilen Fe-C faz diyagramının çelik bölgesinde ötektoid altı ve üstü çeliklere uygulanan ısıl işlemlerin sıcaklık aralıkları temsil edilmektedir.



Şekil 2.9 : Isıl işlem türlerinin sıcaklık aralıkları [27].

Ötektoid üstü çelikler mikroyapılarında sert ve gevrek sementit fazının bulunması nedeniyle işlenmeye elverişli değildir. Bu tür çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak ve sünekliğini artırmak amacıyla küreselleştirme ısıl işlemi uygulanır. Mikroyapısının küreselleştirildiği çelikler önceki hallerine kıyasla şekil değişimi veya talaşlı işleme kabiliyeti arttırılmış, daha yumuşak ve daha sünek hale getirilmiş olur. Küreselleştirilmiş mikroyapının yüksek sünekliği, ferritik matris ile ilişkilidir. Küreselleştirilmiş mikroyapı, plaka tipi katmanlı sementit ve ferritik matristen oluşan perlit mikroyapısından daha düşük sertliğe ve daha yüksek sünekliğe sahiptir [28].

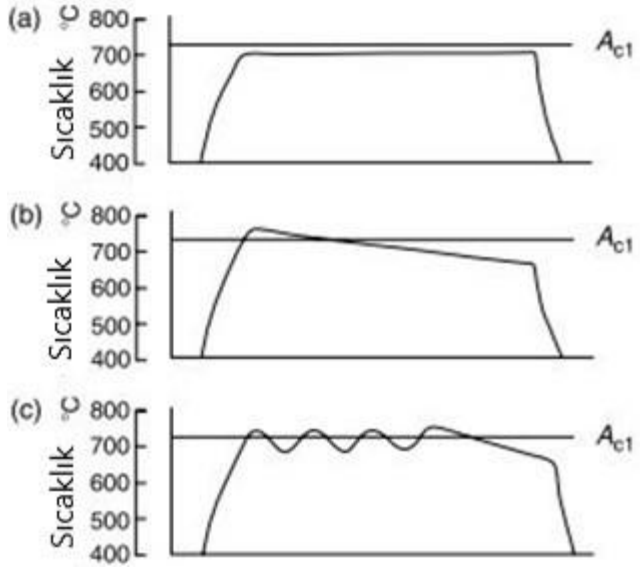
Küreselleştirme ısıl işlemi, çelik yapısını yumuşatmak ve talaş kaldırma kabiliyetini artırmak için çeliğin östenit sıcaklığının (A_1) hemen altındaki sıcaklıklarda uzun süre tutulması ile sementitin küreselleşmesi işlemidir. Yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bu proses sırasında parçacıkların küresel forma geçmesi doğal bir olaydır. Geometrisi

itibariyle küreler, diğer şekillere kıyasla minimum spesifik yüzey alanına sahip olması nedeniyle bir mikro bileşenin küreselleşmesi sonucunda yüzey serbest enerjisinde azalma gözlenir [27]. Ferrit matrisindeki gerilmenin giderilmesi ve sementit partikülü ile ferrit matris arasındaki birim hacim başına minimuma indirilmiş yüzey alanı nedeniyle küreselleştirilmiş mikroyapı en kararlı olanıdır. Küresel partikül oluşumunun itici gücü de ferrit ve sementit arasındaki yüzey alanının birim hacim oranındaki azalmanın neden olduğu bu yüzey enerjisindeki azalmadır [29].

Malzemenin plastik akış gerilmesini (flow stress) azaltması dolayısıyla soğuk şekillendirme için küresel bir mikroyapı istenir. Plastik akış gerilmesi, ferrit ile karbürlerin oranı ve dağılımı ile belirlenir. Ferritin dayanımı, tane boyutuna ve soğuma hızına bağlıdır. Karbürlerin perlitteki lameler veya küresel morfolojisi, şekillenebilirliği doğrudan etkilemektedir [30]. Özellikle yüksek karbon içeren çeliklerin mikroyapıları yüksek oranda perlit içermektedir. Bu mikroyapı malzemenin sertliğini arttırmakta ve şekillenebilirliğini düşürmektedir. Bunun nedeni perlit içindeki sementitin, sert ve gevrek yapısından kaynaklanmakta olup bu sementit lamelleri, perlit içerisindeki ferrit tanelerinin şekillenmesini kısıtlamaktadır [31].

Sementitlerin küreselleşmesi sırasında tüm süreç difüzyon kontrollü gerçekleştirilir. Ferrit içindeki karbon difüzyonundan doğrudan etkilenmesi nedeniyle küreselleştirilmiş parçacıkların ortalama boyutu arttıkça küreselleşme hızı kademeli olarak düşer. Bu sebeple Titanyum, Vanadyum, Niyobyum gibi çözünen veya çökelti olarak güçlü karbür oluşturucu alaşım elementlerinin eklenmesi ferrit içindeki karbonun difüzyonunu azaltacağından küreselleşme hızını yavaşlatır.

Sementitlerin birleşmesiyle mikroyapıda küresel formu oluşturmalarını sağlayan küreselleştirme tavı birkaç farklı şekilde uygulanabilir. Küreselleştirme sıcaklıkları ve süreleri ile birbirinden ayrılan bu üç yöntem kritik sıcaklık altı, kritik sıcaklık arası ve çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi olarak gruplandırılır. Şekil 2.10'da küreselleştirme ısıl işlemlerinin sıcaklık aralıklarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.10 : Küreselleştirme yöntemleri (a) Kritik sıcaklık altı küreselleştirme, (b) Kritik sıcaklık arası küreselleştirme (c) Çevrimsel küreselleştirme [32].

2.2.1 Kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi

Çelik malzemeler A_1 sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklığa ısıtılarak lameler sementitin küresel morfolojiye döndürülmesi için gereken süre boyunca bekletildiği bir prosestir. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemi, küresel sementitin oluşumuna göre kritik sıcaklık arası küreselleştirme yöntemine göre daha hızlıdır. Daha kısa sürede daha homojen küresel karbürler elde etme imkânı sağlamaktadır. Sertlikteki azalma çok ani değildir. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlem sürecinde elde edilen homojen küresel form, işlenebilirliği önemli ölçüde artırmaktadır [33, 34].

O'brien ve Hosford [35] gerçekleştirdikleri çalışmada kritik sıcaklık altı ve kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işlemleri sonucunda küreselleşme oranını karşılaştırmak amacıyla AISI 4037 çelik kalitesindeki numuneleri kullanmıştır. Deneyler sonucunda kritik sıcaklık altı küreselleştirme işleminde küreselleşmenin çok daha hızlı oluşmaya başladığını ve yüksek şekillendirme özelliğinin kazandırılması için daha kısa zamana ihtiyaç duyulduğunu tespit etmiştir. Ayrıca kritik sıcaklık arası küreselleştirme işleminde sertliğin daha hızlı düştüğü gözlenmiştir.

2.2.2 Kritik sıcaklık arası küreselleştirme işlemi

Kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işleminde çelik malzemeler A_1 sıcaklığının üzerine ısıtılır ve daha sonra uzun süre beklemeye bırakılır. Ardından A_1 sıcaklığının

altında bir sıcaklığa kadar soğutulur. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemiyle karşılaştırıldığında; sertlik çok hızlı düşer ve daha kaba perlit yapıları gözlenir. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işleminde çok iyi süneklik elde edilirken, kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işlemi aynı sünekliği ve işlenebilirliği elde etmek için çok uzun bir süre gerektirir, bu da ekonomik olarak daha fazla maliyet gerektirir [33].

2.2.3 Çevrimsel küreselleştirme işlemi

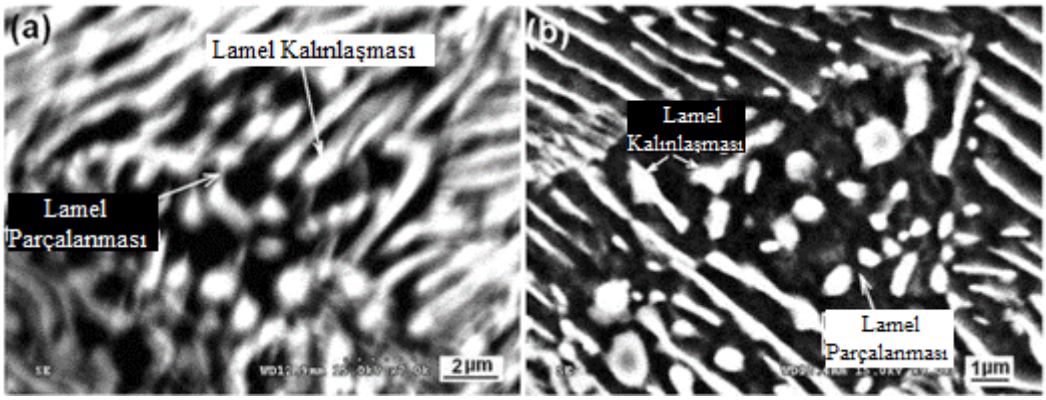
Çevrimsel küreselleştirme yöntemi sementit lamellerin küresel forma dönüşümünü hızlandırmak için gerçekleştirilir. Çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi, numuneyi A_l sıcaklığının üzerinde ve altında daha kısa sürelerde bekletmek suretiyle salınımlı bir şekilde gerçekleştirilir. Sıcaklığın A_1 üzerine çıkartılması sementit lamellerinin çözünmesini kolaylaştırır. Takip eden A_1 sıcaklığının altındaki sıcaklıkta tutma sırasında çözünme süreci kesintiye uğrar ve sınır yüzey enerjisine daha az dirençli olan kırılmış parçalar daha hızlı ve kolay bir şekilde katılaşır [30]. Sementitin A_1 sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkta tutulması sırasında çözünmesi, A_1 altında tutulması aşamasında ise oluşumu gerçekleşir. Bu işlemin tekrarlanması sonucunda sementit küresel morfoloji kazanır. Lv vd. [36] gerçekleştirdiği çalışmada çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemindeki ters sıcaklık etkisini atomların uyarılmasına neden olan ana faktör olarak açıklamakta ve aktivasyon enerjisini azaltarak işlem kinetiğini arttırdığını belirtmektedir.

Yüksek sıcaklıkta yapılan bu ısıl işlem, çeliğin içerisindeki perlitik yapı ile sementit ağının parçalanarak dağılmasına neden olur. Küreselleştirme tavı sonucunda, ferritik bir matris ile bunun içerisinde dağılmış durumda bulunan küre biçimindeki karbürlerden oluşan bir mikroyapı elde edilir. Küreselleştirme tavı sonunda çeliğin sertliği azalır, buna karşılık sünekliği artar. Bu işlem sonucunda, ötektoid üstü çelikler işlenmeye elverişli hale getirilir.

2.2.3.1 Çevrim sayısının küreselleştirmeye etkisi

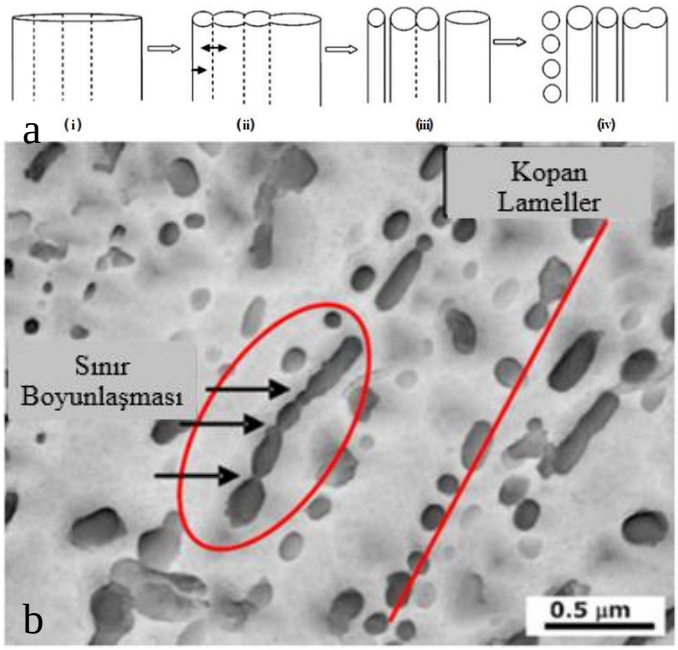
Isıl işlem sırasında malzeme mikroyapısında sıcaklığın etkisiyle sementit lamellerinin yapısında değişim ve sementit ile matris bölgeleri üzerinde kusurlar oluşmaya başlamaktadır. Bu kusurların etkisiyle kusur göçü teorisinde belirtildiği gibi katmanlı yapıların arasında ve kusurlu bölgelerde kimyasal bileşim farkı oluşmasıyla difüzyon kontrollü olarak sementitin çözünmesi başlar. Bunun sonucunda bitişik düz

yüzeylerdeki sonlandırma bölgesinde lamellerin kalınlaşması gözlenir [36]. Şekil 2.11'de atomik difüzyon sonucunda kalınlaşan lamellerin SEM görüntüsü görülmektedir.



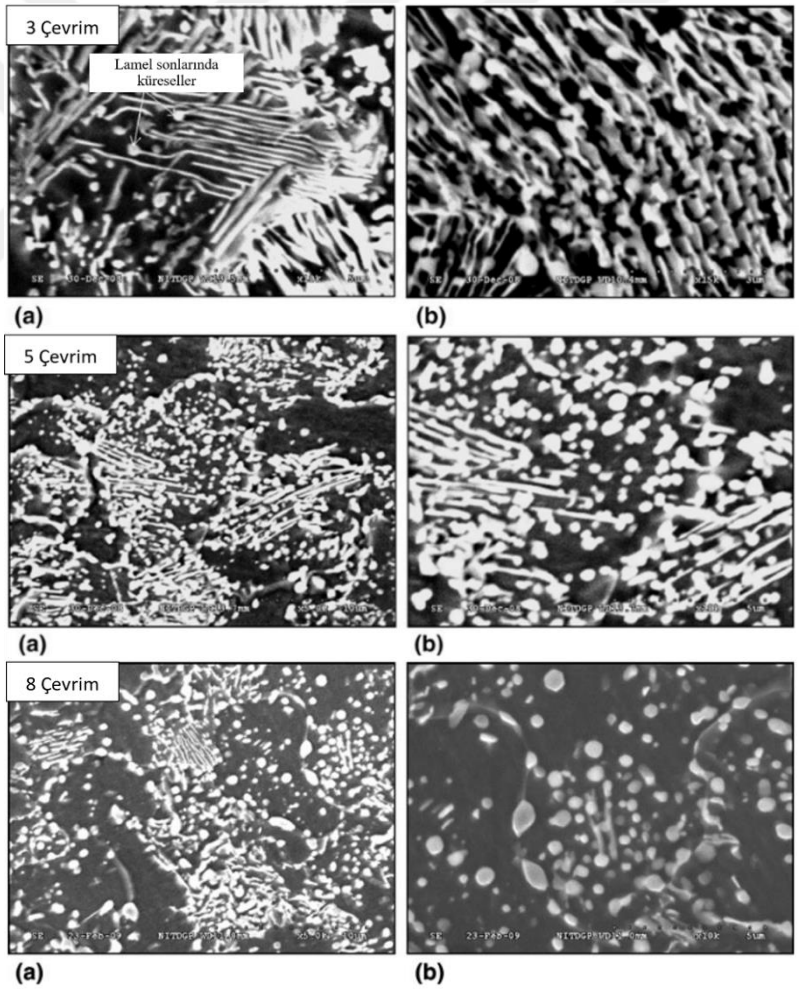
Şekil 2.11 : Lamellerin kalınlaşması ve kırılması [38].

Kalınlaşan lamellerin kırılması, küreselleştirme ısıl işleminde A_{c1} sıcaklığının üzerinde kısa süreli tutma sırasında gerçekleşir. Sementit içindeki hata bölgelerinden, yapıda oluşmaya başlayan östenit bölgelerine atomik difüzyonun artmasıyla çözünme artar. Şekil 2.12'de difüzyon etkisiyle oluşan boyunlaşma ve sınırların ayrılmasıyla oluşan küresel taneler görülmektedir.



Şekil 2.12 : (a) Lamel boyunca termal olukların oluşması ve küreselleşen taneler (i) alt sınır gelişimi, (ii) oluklardan düz alanlara difüzyon etkisiyle çözünme (iii) lamellerin ayrılması (iv) parçalanma, (v) boyunlaşma ve lameler kırılması (b) SEM görüntüsü [18].

Tanenin yapısında gerçekleşen bu ayrılma, küreselleştirme ısıl işlemindeki çevrim sayısının artmasıyla bütün yapının dönüşümüne ve sonrasında kabalaşmasına kadar devam eder. Saha vd. % 0,6 C içeren çeliğe uygulanan farklı çevrim sayıları sonucunda yapıda gerçekleşen değişimleri gözlemlemiştir. Bu çalışmada birinci çevrim sonucunda sementit lamellerinin parçalanmaya başladığı tespit edilmiştir. Üç çevrim sonucunda 0,7-1,0 en-boy oranına sahip sementit kürelerinin, yapının %10'unu kapladığı gözlenmiştir. Artan çevrim sayılarında daha fazla küre oluşumu ve Ostwald kabalaşması sürecine girerek kabalaştığı belirlenmiştir. Sekiz ısıl işlem çevriminden sonra ise mikroyapıda % 3 oranında perlit ile birlikte, ferrit matris içinde yüksek oranda küreselleşmiş sementit görülmüştür [39]. Şekil 2.13'de lamellerin uçlarında oluşan küreselleşmeler ve çevrim sayısına göre değişimlerinin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.1'de çevrim sayılarına göre faz oranları belirtilmiştir.



Şekil 2.13 : Farklı çevrim sayılarının mikroyapıdaki değişimleri (a) 5000x (b) 10000x [39].

Çizelge 2.1: Nokta sayımı analiz sonucu [39].

Isıl İşlem Çevrim Sayısı	% Ferrit	% Perlit	% Küresel Sementit
0	28	72	-
1	39	61	-
3	44	46	10
5	46	39	15
8	61	3	36

Li vd. [40] gerçekleştirdikleri çalışmada 50CrV4 çeliği için 840 ºC'de 200 saniye ve 700 ºC'de 60 saniye olacak şekilde farklı çevrim sayılarının küreselleşmeye ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan çevrim sayısı ile sertliğin, akma ve çekme dayanımının giderek azaldığı ve kopma uzamasının belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir. 5 çevrim sonucunda %100 oranında küreselleştirme oranına ulaşılırken, üzeri çevrimlerde tane kabalaşması gözlenmiş ve kopma uzaması değeri azalmıştır. Ayrıca kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerinin incelenmesi sonucunda beş çevrim sonrası tüm kırılma yüzeylerinde gamzeler (dimple) tespit edilmiş olup altıncı çevrimden sonra bu gamzelerin büyüdüğü gözlenmiştir.

2.3 Küreselleştirme Kinetiği

Yapılan çalışmalar ile küreselleştirme ısıl işlemini etkileyen faktörler ve işlem sonucunda oluşan karbürlerin sayısı ile dağılımlarını etkileyen parametreler de araştırılmış olup çeşitli matematiksel modeller hazırlanmıştır. Modellerden çıkarılan sonuçlar doğrultusunda perlitik çeliklerin küreselleşmesi başlangıç mikroyapısı ile yakından ilişkilidir [30]. Bu sebeple yapılarda bulunan boşlukların yoğunlukları, lameller arası mesafe ve perlit koloni boyutları incelenmiş ve karbürlerin ortalama çapının (D), birim alan başına karbür sayısı (n) ve parçacıklar arası boşluk (s) ile ölçülebildiği bir model hesaplanmıştır [23].

$$D = (14{,}88n^{\frac{3}{2}} + 2{,}78)^{-1/3} \tag{2.1}$$

$$D = (28{,}84s^{-3} + 7{,}30)^{-1/3} \tag{2.2}$$

Isıl işlem sonucunda küreselleşen sementitlerin kabalaşması sürecinde kabalaşma hızı üzerindeki karbon difüzyonunun etkisi Eşitlik 2.3'de belirtilen formül ile hesaplanabilmektedir. Formüldeki r partikül yarıçapını, r_0 başlangıç partikül yarıçapını, γ ferrit ve sementit arasındaki arayüzey enerjisini, D_C karbonun difüzyon katsayısını, C ferritteki denge karbon konsantrasyonunu, V_m partikülün molar hacmini, R gaz sabitini, T sıcaklığı ve t zamanı ifade etmektedir [28].

$$r^3 - {r_0}^3 = \frac{8\gamma D_C C V_m}{9RT} t \tag{2.3}$$

Küreselleşme mekanizmaları ve teorilerinin incelenmesi sonucunda, süreci etkileyen mekanizmanın difüzyon kontrollü gerçekleştiği belirlenmiştir. Chattopadhyay ve Sellars [22] gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda küreselleşmiş hacim yüzdesi, en-boy oranı dağılımı, sementit parçacıkların boyutu ve yoğunluğuna ilişkin ölçümler yaparak karbür plakaların düzenli aralıklarla parçalanmasıyla küresel tanelerin oluştuğunu göstermiştir. Daha sonrasında en-boy oranının azalmasıyla difüzyon kontrollü şekilde tane kabalaşması gözlenir. Burada belirtilen D_C^{eff} karbon için etkin difüzyon katsayısı, x_c , x_{Fe} sırasıyla karbon ve demirin mol oranlarıdır. D_{Fe} demir için difüzyon katsayısını, V_{Fe_3C} ve V_{Fe} ise sırasıyla sementit ile demir için molar hacim değerlerini vermektedir.

$$x_C D_C^{eff} = \frac{x_C D_C x_{Fe} D_{Fe}}{(\frac{V_{Fe_3C} - 3V_{Fe}}{V_{Fe}})^2 \, x_C D_C + x_{Fe} D_{Fe}} \tag{2.4}$$

2.4 Normalizasyon Isıl İşlemi

Normalizasyon ısıl işlemi tane küçültmek, homojen bir mikroyapı elde etmek ve mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla yapılan bir ısıl işlem çeşididir. Normalizasyon tavı ile soğuk şekillendirme ve üretim hatalarının mikroyapıda bıraktığı etkileri gidererek homojen bir yapı elde edilir. Normalleştirme ısıl işlemi ile iç gerilmelerin giderilmesi, tokluğun iyileştirilmesi ve tane boyutunun iyileştirilmesi sağlanır [41]. Çeliğin karbon miktarına bağlı olarak östenitleme sıcaklığına çıkılması amacıyla ötektoid altı çelikler için A_3, ötektoid üstü çelikler için ise A_{cm} eğrilerinin 30 - 50 °C üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Bu sıcaklığa ısıtılan malzemeler

kalınlıklarına göre 30-90 dakika arasında bu sıcaklıkta tutulmasının ardından havada soğutulur. Karbon oranı % 0,25 ve üzeri olan çeliklerde normalleştirme sonrası tavlama tercih edilir [42,43]. Normalize edilen çeliklerin dayanım ve tokluk değerleri tavlama ile elde edilen değerlerden daha yüksek olmakla beraber ince taneli mikroyapı elde edilir. Normalizasyon sonucunda çeliğin yapısında bulunan sementit lamellerinin birbirine yakın veya sık dizilmeleri sayesinde çeliğin sertliği arttırılarak şekillendirme kabiliyeti kazandırılır.

Isıl işlem yapılacak sıcaklığa ulaşıldıktan sonra istenen mikroyapıların elde edilebilmesi amacıyla yüksek sıcaklıkta bekletme ve soğutma işlemleri gerçekleştirilir. İzotermal dönüşüm diyagramları olarak bilinen grafiklerin kullanılmasıyla ısıl işlem sonucunda elde edilebilecek mikroyapılar önceden hesap edilebilmektedir [44]. Diyagramlarda dikey sütun sıcaklık değişimini, yatay satır ise zamanı göstermektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda sıcaklık ve zaman değişkenlerine göre değişen mikroyapı geçişleri bu diyagramlarda gösterilmektedir [45].

3. SAC KESME VE HASSAS KESME İŞLEMLERİ

Metal şekillendirme işlemleri, yarı ürünlerin endüstriyel ürünlere dönüştürülmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Toplam malzeme hacmini ve kütlesini değiştirmeden yüksek plastik deformasyon sonucunda malzemenin şeklinin değiştirilmesi amaçlanmaktadır. Metal şekillendirme yöntemleri genel olarak kütlesel (bulk) metal şekillendirme ve sac metal şekillendirme olarak iki gruba ayrılabilir [46]. Metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

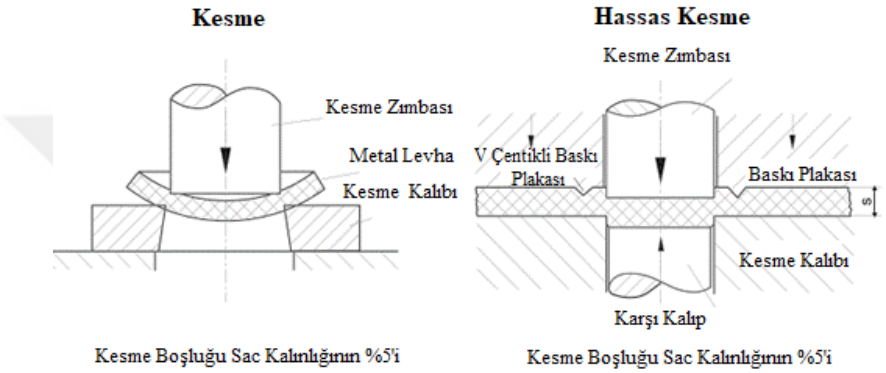


Şekil 3.1 : Metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması [47].

Sac şekillendirme işlemleri; yüksek dayanım elde edilmesi, yüksek boyut hassasiyetine sahip olması, yüzey kalitesinin iyi düzeyde olması, daha düşük maliyet gerektirmesi ve seri imalata uygun olması nedenleriyle tercih edilmektedir. Çelik metal levhaların kesilmesi özellikle beyaz eşya, otomotiv ve havacılık sektörlerinde mekanik parçaların üretimi sırasında sıklıkla kullanılan bir yöntem olup imalat teknolojisinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak şekillendirme sırasında yüksek verim alınması için malzeme özellikleri, kalıp ve parça geometrisi düzgün parça üretiminin yanı sıra atık malzeme miktarını da minimize ederek maliyet düşüşü sağlar [48].

3.1 Geleneksel Kesme ve Hassas Kesme İşlemleri

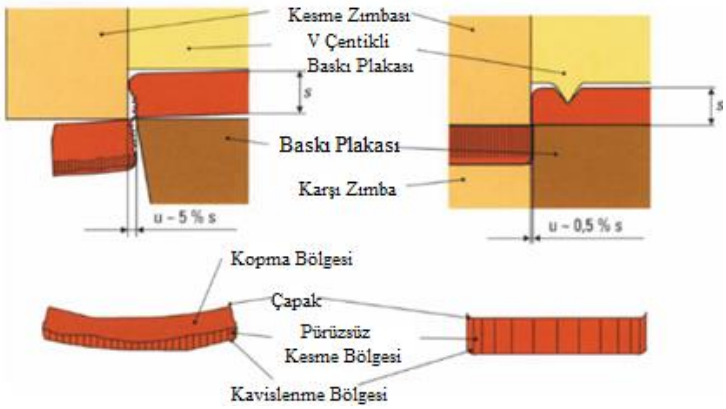
Modern uygulamalarda daha yüksek dayanıma sahip malzemelere duyulan ihtiyacın artması nedeniyle yapılan çalışmalarla süneklik ve tokluğun, deformasyon sırasında harcanan enerji ile ters orantılı olduğunun anlaşılması sonucunda şekillendirme süreçlerinin iyileştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Ortaya çıkan bu ihtiyaçtan hassas kesme işlemi geliştirilmiş olup geleneksel kesme işlemine kıyasla daha düzgün yüzey ve hassas toleranslı şekillendirmeye imkan tanınmıştır. Geleneksel kesme işlemi ve hassas kesim arasındaki fark Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Geleneksel kesme ve hassas kesme işlemlerinin karşılaştırılması [49].

Geleneksel kesme işleminde iş parçası birbirine geçen iki adet kesme yüzeyinin arasından ayrılmaktadır. Tek baskı zımbası içeren bu çok zamanlı kesme işlemi sırasında malzemenin ayrılması aynı zımba üzerinde gerçekleştirilirken, hassas kesim işlemi iki adet taslak tutucu, bir adet basınç zımbası ve karşı basınç uygulayan zımba içeren tek kademeli bir kesme işlemidir. Elde edilen boşluklu yüzey sayesinde iş parçasının çapaktan ve kusurdan arındırılması sağlanmaktadır. Hassas kesim işlemini geleneksel kesim işleminden ayıran temel fark malzemenin her taraftan sıkıştırılmasının ardından kırık bir yüzey oluşturmadan malzeme akışının bir sonucu olarak ayrılmasıdır [50]. Kalıp tasarımında bulunan V çentikli baskı plakası yardımıyla malzemenin yırtılmasının önüne geçilerek malzemenin yanal akışı önlenmektedir.

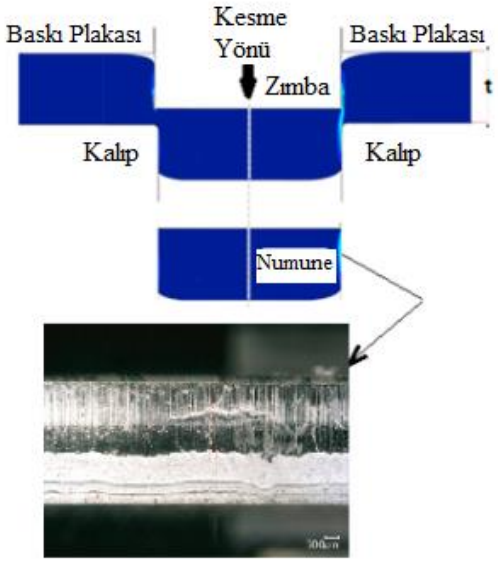
Hassas kesme işlemi ile pürüzsüz olarak gözüken kesme bölgesinin yoğunluğunun arttırılması sağlanmaktadır. Bu doğrultuda Şekil 3.3'de şematize edilen işlemler arası farklılık gösterilmiştir. Kesilen ürünün incelenmesi sonucunda pürüzsüz kırılma yüzeyinin %100 oranında olduğu ve çapak (burr) ile kavislenme uzunluğu (die roll) miktarının daha düşük olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.3 : Standart kesme ve hassas kesme sonucu ürün karşılaştırılması [50].

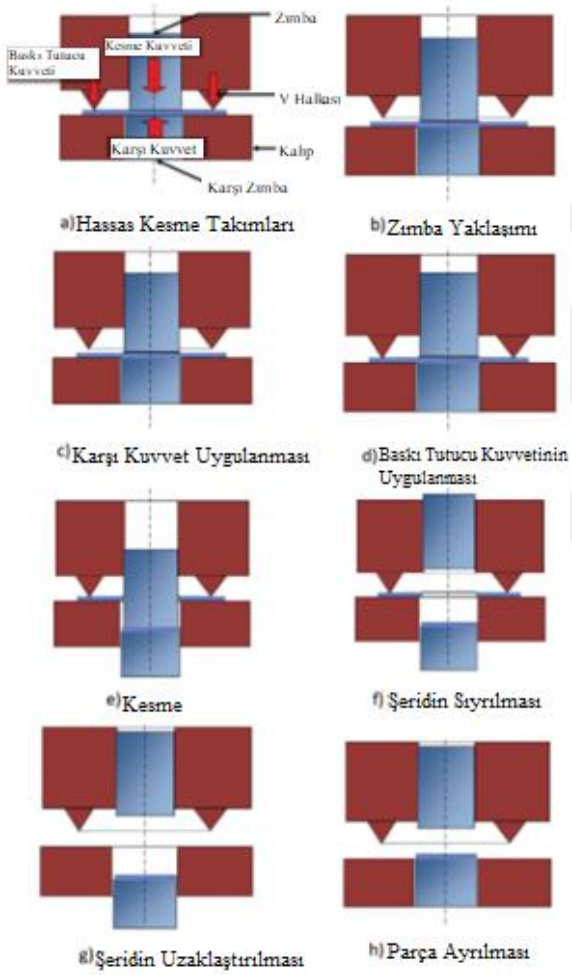
Hassas kesme işlemi basit gibi görünür ancak etken parametreleri çoktur ve bu parametreler parçaların kalitelerini doğrudan etkileyen karmaşık bir ilişkiye sahiptir. İşlem sonucu parçaların kaliteleri 3 ana kriter kullanılarak değerlendirilir. Hassas kesim işlemi sonucunda; çapak miktarı, kesme kenarının görünümü ve boyutsal doğruluk kriterleri incelenir.

Hassas kesme işlemi, bir zımbanın hareketine bağlı olarak yüksek lokalize kayma deformasyonu aracılığıyla bir boşluğu bir tabakadan Şekil 3.4'deki gibi ayırmayı içerir. Hassas kesme işleminden sonra kesilen kenarın kalitesi yalnızca kullanılan malzemeye değil, aynı zamanda boşluk tutma kuvveti, zımba ve kalıp kenarının keskinliği, hassas kesim hızı, yağlama, sıcaklık ve zımba ile kalıp arasındaki boşluk gibi birçok parametreye bağlıdır [51].



Şekil 3.4 : Şematik hassas kesme işlemi ve kesme yüzeyi [51].

Küçük bir kalıp açıklığı ile tek adımlı şekillendirme işlemi olan hassas kesme, tüm iş parçası üzerinde düzgün kesilmiş kenarlara sahip işlevsel metal bileşenler üretmek için hassas bir şekillendirme işlemidir. Ayrıca, üretim süresini ve maliyetlerini en aza indiren hassas kesme işlemi ile üretilen parçalar için başka ikincil işlem gerekmez. Hassas kesme işlemi bir zımbanın hareketine bağlı olarak yüksek lokalize kayma deformasyonu aracılığıyla bir boşluğu bir tabakadan ayırma işlemidir. Şekil 3.5'de hassas kesme işleminin aşamalarını göstermektedir.



Şekil 3.5 : Hassas kesim işlem adımları [52].

Metal kesme işlemi yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Genel işlem koşulları belirli olmasına rağmen, karışık şekillerin üretimi ve yüksek boyut hassasiyeti gereken parçaların üretimi için çalışmalar sürdürülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar sırasında hassas kesimi etkileyen parametreler belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modeli kullanarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda hassas kesme işlemini etkileyen dört ana parametre belirlenmiş ve etkileri aşağıda özetlenmiştir.

- Açıklık Etkisi

Zımba ve kalıp arasındaki açıklıktır. Kesilmiş bir kenarın en iyi sonucu vermesi için doğru açıklık gerekmektedir. Doğru açıklık temiz bir kırılmaya izin vermektedir. Kalıp açıklığı ve malzeme kalınlığının sabit olması şartıyla, malzeme ne kadar yumuşak olursa parlatma bölgesinin o kadar geniş olduğu ve daha sert metaller için daha geniş bir açıklık gerektiği tespit edilmiştir.

- Zımba Aşınma Etkisi

Takım aşınması, çapak oluşumuna neden olur ve çapak uzunluğunu arttırır. Çapak uzunluğunun artması parça kalitesini düşürmektedir. Takım aşınmasının etkisi, daha yüksek boşluklu işlemlerde daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

- Levha Kalınlığının Etkisi

Artan sac kalınlığı ile boşluk enerjisi artmakta ve daha yüksek enerji kullanımı gerekmektedir. Ayrıca artan kalınlık ile farklı derinliklerde malzeme özelliklerinin değiştiği gözlenmiştir.

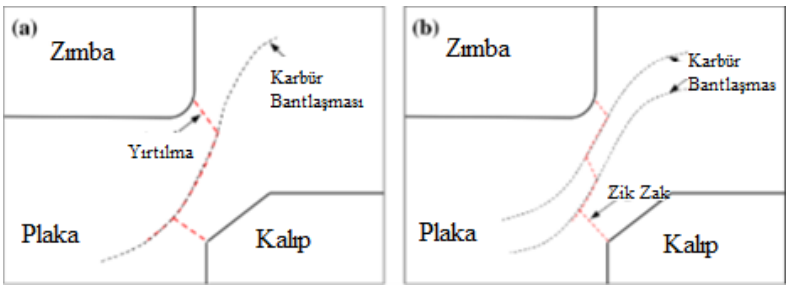
- Malzeme Türünün Etkisi

Parça kenar kalitesi aynı zamanda işlem yapılan malzemenin türüne de bağlıdır. Yüksek sünekliğe, düşük akma dayanımına ve homojenliğe sahip malzemelerin daha iyi kesilmiş kenar kalitesine ve boyut toleransına sahip olacağı tespit edilmiştir [53].

İşlem sırasında kaliteli ürün elde etmek için doğru malzeme seçimi önemlidir. Zımba için seçilecek malzeme kesme yüzeyi, boyutsal doğruluk ve ömür dahil olmak üzere ürün kalitesini etkiler. Bu sebeple yüksek dayanıma sahip malzemelerin işlenmesi sırasında takım ömrünü uzatmak amacıyla sıkıştırma kuvveti minimuma indirilirken, presleme kuvvetinin maksimize edilmesi gereklidir.

Bir malzemenin ısıl işlemle belirlenebilen mikroyapısal özellikleri, hassas kesme ürünlerinin kalitesini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, karbürün morfolojisi ve dağılımı, karbon çeliğindeki en hayati özelliklerdir. Tam küreselleşme, yüksek dağılım ve küresel karbürün eşit dağılımı, hassas kesme için temel özelliklerdir. Ferrit-sementit çeliğin deformasyon direncinin karbür içeriğindeki artışla arttığı ve karbür eğilmesinin, hassas kesme sırasında kesme bölgesindeki malzemenin mikroskobik hasarı hızlandırdığı bulunmuştur [54]. Ayrıca şiddetli karbür bantlaşması, Şekil 3.6'de

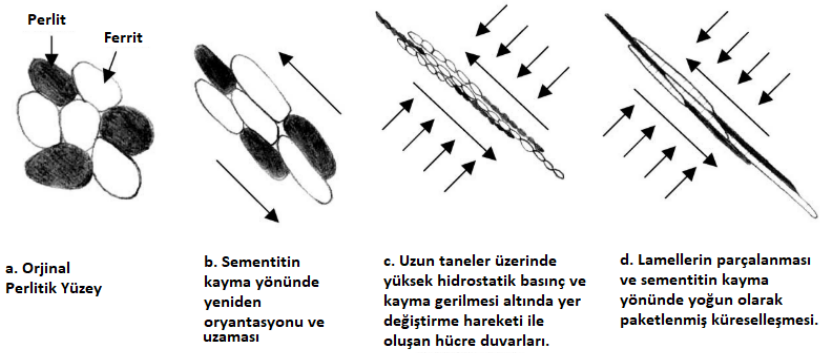
şematize edildiği gibi tabakalardaki makro yolu değiştirerek kırılma yüzeyinin kalitesini olumsuz etkilemiştir [55].



Şekil 3.6 : Karbür bantlaşmasının çatlak yolundaki değişiklikler üzerindeki etkisi [55].

Zhuang vd. [55] gerçekleştirdiği çalışma ile hassas kesme işlemini sanal ortamda mikroyapı ölçeğinde modellenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, malzemelerdeki deformasyon ve hasar davranışının mikroyapılarla yakından ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Hassas kesme sırasında kesme yönüne paralel olarak kesme (shear) bantları gözlenmiştir. Rastgele partikül dağılımlı modellerde kayma bandı boyunca oluşan mikro çatlaklar, karbür bantlı modellerde ise karbür bantlama bölgesi içerisinde mikro çatlaklar ortaya çıkmış ve ilerlemiştir. Karbür bantlanmanın şiddetli olduğu bölgelerde mikroskobik hasarın oluşma hızı önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Ek olarak kesme açıklığındaki artış ile mikroskobik hasarın arttığı tespit edilmiştir.

Chen vd. [56] gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda; hassas kesme işlemi sırasında penetrasyonun artmasıyla kesme bantları ve kesme bantlarının oluştuğu yüzeylerde bölgesel sıcaklıkların arttığı görülmüştür. Yükselen sıcaklığın termal yumuşatma etkisi, kesme bantlarının ilerlemesini teşvik etmektedir. Kesme bantlarında hem karbürlerin parçalanması hem de karbon ve demir difüzyon yollarının sıkıştırılması nedeniyle yüksek hidrostatik basıncın etkisiyle mikroyapıdaki gerçekleşen değişimler Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, ince ferrit alt taneciklerin oluşturulmasıyla lamel karbürlerin küreselleşmesi şeklinde yorumlanmıştır. Kesme bandında çok büyük kayma birim şekil değişimi meydana gelmesine rağmen, mikro çatlakların oluşumu yüksek hidrostatik basınç ile bastırılır. Bu nedenle termal etki, işlem sırasında kritik öneme sahiptir. Bu nedenle işlem sonucunda numunelerde pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmektedir.

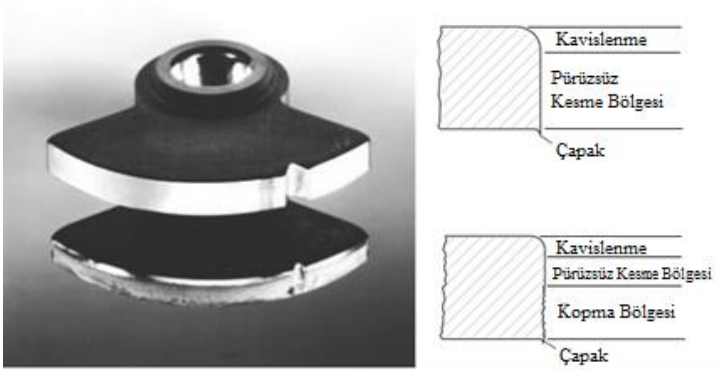


Şekil 3.7 : Hassas kesme işleminde meydana gelen kesme bandının yayılması sırasındaki yapısal evrimi [56].

Hassas kesim işlemi sonucunda yüzeyleri temiz ve montaja uygun parçalar üretilebilmektedir. Aşağıda belirtilen avantajları sayesinde hassas kesme işlemi endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

- Hızlı ve çabuk uygulama açısından ekonomik tasarruf sağlar.
- İlave işlemlere ihtiyaç duyulmaz.
- Yüksek hassasiyette, temiz ve montaja hazır üretim sağlar.
- Sistem takımlarının kullanımı kolaydır.
- İstenilen farklı boyut ve şekillerde delikler açmak için idealdir.
- Çok hızlı üretim sağlar.

Hassas kesme ve geleneksel kesme işleminin sonucunda elde edilen ürün kalitesi Şekil 3.8'de gösterildiği gibidir. Hassas kesme işlemi sonucunda düz pürüzsüz bir yüzey elde edilirken, geleneksel kesme yönteminde gerçekleşen yırtılma işleminden dolayı pürüzlü kopma yüzeyi gözlenmektedir. Bu bölgenin artması performansı ve kaliteyi düşürmektedir.



Şekil 3.8 : Geleneksel kesme ve hassas kesme sonucu ürün kalitesi [49].

3.2 Kesme İşlemi ve Hassas Kesme Sonucu Yüzey Morfolojisi

Kırılma tanım olarak, bir malzemenin yük altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması demektir. Malzemede meydana gelen çatlaklar kırılmaya sebebiyet verir ve bu çatlaklar mekanik performansları doğrudan etkiler. Kırılma ve malzeme kaybı, artan statik veya tekrarlı yükler sonucunda başlangıçta malzeme yapısında bulunan kusurlardan başlayarak yerel bir çatlak çekirdeklenmesiyle başlar [57]. Kırılmanın karakteri malzemenin özelliğine göre değişmekte ve genellikle üzerine etkiyen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma mikro çatlakların ve mikro boşlukların yoğunlaşması ve ilerlemesini, dislokasyon mekanizmalarını ve kayma bantlarını içeren bir prosestir. Kırılma, kırılma anındaki deformasyon miktarına göre "Sünek - Gevrek Kırılma", kırılma yüzeyinin kristallografik yapısına göre "Kayma- Klivaj Kırılması" ve kırılma yüzeyinin görünümüne göre "Lifi – Kristalin" olarak çeşitli türlere ayrılmaktadır.

Mikroskopik ölçekte kırılma süreci 3 ardışık kesintisiz aşamadan oluşmaktadır. Bunlar, bir mikro çatlağın oluşumu, partikül ve matris arasındaki sınır boyunca çatlağın büyümesi ve bu çatlağın bitişik tanelere doğru ilerlemesidir [58]. Çatlağın taneler boyunca ilerlemesi sonucunda meydana gelen kırılma davranışını etkileyen parametreler, tane boyutu, şekli, yönü ve tane sınırlarının özellikleridir.
Lotfolahpour vd. [59] gerçekleştirdiği sanal ortam modellemesi ile çok kristalli kırılgan malzemelerde çatlak yayılımını ve mekanik tepkisini incelemiştir. Deneyler sonucunda çok kristalli malzemelerde tane içi ve taneler arası çatlak ilerlemesinin gerçekleşebileceğini ve bu ilerlemenin dayanım etkisinde olduğunu gözlemlemiştir.

Çizelge 3.1: Kırılmanın gruplandırılması [59].

Karakteristik	**Tanım**	
Kırılma Birim Şekil Değiştirme	Sünek	Gevrek
Kristallografik Mod	Kesme (Kayma)	Kopma (Klivaj)
Görünüş	Mat ve Lifli	Parlak ve Kristalin
Çatlak İlerlemesi	Tane İçi	Taneler Arası

Yapılan çalışmada, hassas kesme işlemi sonucunda malzemelerin kırılma morfolojisinin incelenmesi sırasında kristallografik özelliklerine göre kıyaslanacakları için bu grup detaylandırılmıştır.

3.2.1 Kırılma yüzeylerinin kristallografik yapısına göre sınıflandırılması

3.2.1.1 Kopma kırılması

Kırılmanın belirli kristallografik düzlemler boyunca meydana gelmesi sonucunda bölgesel ve homojen olmayan plastik deformasyon oluşmaktadır En düşük yüzey enerjisine sahip düzlemler olan klivaj düzlemlere, dik uygulanan normal gerilmelerin kritik değeri aşması ile klivaj düzlemlere dik atom bağlarının kopması sonucunda oluşmaktadır. Ayrıca kırılma sırasında çok az plastik deformasyon gözlenir ve çok az enerji harcanır. Bu nedenle kopma kırılması, düşük gerilme, düşük deformasyon ve düşük tokluk ile karakterize edilir [60] ve gevrek tane içi (transgranüler) kırılma olarak tanımlanır. Kopma kırılması klivaj kırılma olarak da tanımlanmaktadır. Makroskopik ölçekte ise klivaj kırılma düz ve pürüzsüz bir görünüme sahiptir. Bu kırılma tipinde tanelerin şekli bozulmadığı için yüzeyin görünümü düzdür ve ışığı yansıtmalarından dolayı parlak bir görünüme sahiptirler. Mikroskobik ölçekteki kırılmanın incelenmesiyle kırılma yüzeyinde nehir paterni halinde çok sayıda parlak kristalin yüzey gözlenir.

3.2.1.2 Kesme kırılması

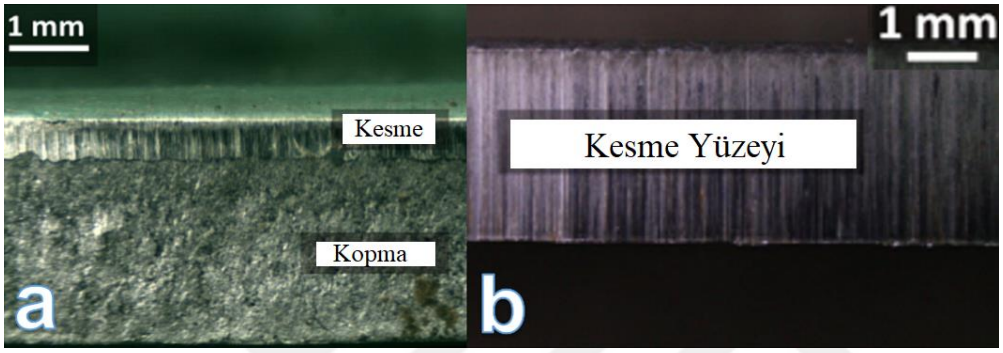
Kesme kırılması, malzeme üzerine uygulanan kuvvet nedeniyle kayma gerilmesinin kritik bir değere ulaşması sonucunda atom düzlemlerinin kayması ve atom bağlarının kopması nedeniyle meydana gelmektedir Kesme kırılması, metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci en az olan düzlemlerin kayması ile oluşur. Bu düzlemlere kayma düzlemleri ismi verilmektedir. Çatlak ilerleme yönünün gerilme yönüne dik olmasından dolayı kırık yüzey, gri ve lifli bir görünüme sahiptir. Kayma kırılması sonucu oluşan kırılmada gamzeye benzeyen çukurlar görülür ve lifli kırılmayı oluşturur. Kesme kırılmasına kayma kırılması ismi de verilmektedir.

3.3 Kesme İşlemi Sonucu Oluşan Kenar Morfolojisi

Hassas kesme işlemi, geleneksel kesme işlemlerine kıyasla pürüzsüz kesim yüzeyli parçaların üretilmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Standart kesim işlemlerinde olduğu gibi DIN 8580 standardına girmesinin yanı sıra proses DIN 8588 standardında da detaylı olarak açıklanmaktadır.

Standartlarda belirtilen farklılıklar doğrultusunda hassas kesme işleminde, geleneksel

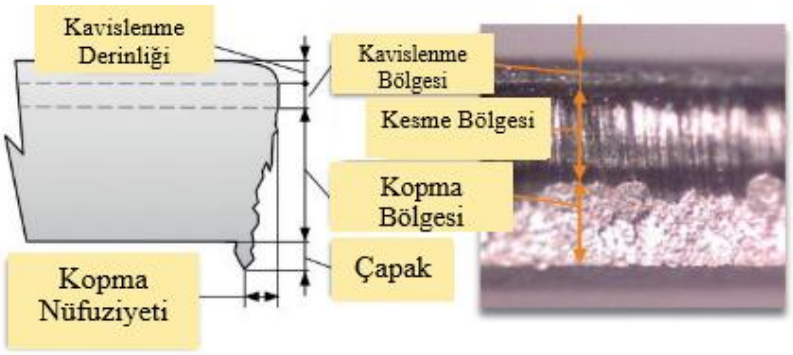
kesme işlemlerine göre daha yüksek yüzey kalitesine sahip ürün elde edilmektedir. Şekil 3.9'da geleneksel kesme ve hassas kesme işlemleri sonucunda elde edilen kenar morfolojileri gösterilmektedir. Geleneksel kesme işlemleri sonucu elde edilene ürünün kenarında kesme ve kopma kırılması karakteristiklerine sahip bölgeler bulunmaktayken, hassas kesme işleminde sadece kesme kırılması karakteristikleri gözlenmiştir. Burada görülen kopma kırılması yoğunluğunun artması sonucunda yüzey kalitesi düşmekte ve üründen istenen performans elde edilememektedir. Bu sebeple hassas kesme işlemi sonucunda daha yüksek performans gözlenmektedir.



Şekil 3.9 : Kenar morfolojileri (a) Geleneksel kesme, (b) Hassas kesme [61].

İşlem sonucunda Şekil 3.10'da gösterildiği gibi çeşitli hatalar gözlenebilmektedir. Günümüzde bu hataların olabildiğince minimize edilmesi ve optimum şartların belirlenmesi üzerine çalışmalar sürmektedir. Kırılma yüzeyinde gözlenen morfolojiler şu şekilde sıralanabilir:

- Kavislenme Bölgesi: Zımba tarafından levhaya çizilen kenarın parçasıdır.
- Kesme Bölgesi: Kırılma başlangıcından önce zımba tarafından oluşturulan ve pürüzsüz olan bölgedir.
- Kopma Bölgesi: Yırtılma sonucu oluşan pürüzlü bir bölgedir. Sünekliğin arttırılması ve iyi bir yağlama sonucunda önlenebilir. Yırtılma boşluk, zımba geometrisi, kesme hızı ve malzeme mikroyapısından etkilenir.
- Çapak: Kırılma başlangıcının spesifik konumu nedeniyle oluşur. İş parçasında istenmez.
- Kopma Nüfuziyeti: Yetersiz yağlama veya çok yüksek kesme hızı nedeniyle karşılaşılan ve malzeme kaybına neden olan hatalardır [62].



Şekil 3.10 : Kırılma sonucunda oluşacak karakteristik bölgeler ve olası hatalar [63].

Hassas kesme işlemi sonucunda elde edilecek ürünün kalitesini yükseltmek amacıyla çapak ve kalıp silindiri uzunluğunun azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple bu hataların oluşumunu etkileyen parametreler belirlenmiş olup bunlar; kalıp ile zımba arasındaki boşluk, malzeme özellikleri, zımba ve kalıbın keskinlik derecesi, V çentikli baskı plakası mesafesi ve v çentikli baskı plakası girinti düzeyidir [64]**.**

Hassas kesme işleminde ürün kalitesi etkileyen parametrelerin incelenmesi sonucunda daha yüksek düzeyde kalite yakalanmasına yönelik çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Djavanroodi vd. [65] geliştirdikleri sanal ortam analizleri sonucunda zımba ile kalıp arasında boşluğun azaltılması ve V çentikli baskı plakası uzunluğunun arttırılması ile hidrostatik basıncın arttığını ve kalıp silindiri uzunluğunun düştüğünü gözlemlemiştir. Ayrıca karşı zımba ve tabaka tutucunun (sheet holder) artan kuvveti ile de hidrostatik basıncın arttığını, ürün kalitesinin ve boyut hassasiyetinin arttığını göstermişlerdir.

Benzer şekilde Taşdemir gerçekleştirdiği çalışmada hassas kesme işleminde kalıp boşluğunun ve malzeme kalınlığının etkisi sonlu elemanlar analizi ile araştırılmış olup kalıp boşluğunun artmasıyla erken kırılmanın gözlendiği, kavislenme derinliği ile genişliğinin arttığı, kesme bölgesinin azalarak kopma bölgesinin arttığını tespit etmiştir. Malzeme kalınlığının 1 mm'den 2 mm'ye çıkartılmasıyla kavislenme derinliği ve genişliğinin önemli ölçüde arttığını gözlemiştir. Bu çalışmada kalıp boşluğu ve malzeme kalınlığının ürün kalitesi ile arasındaki olan ilişki ortaya konulmuş ve hassas kesim işleminde boyut hassasiyetinin çok yüksek olduğu belirlenmiştir [66].

3.4 Kırılma Sırasında Küresel Mikroyapının Etkisi

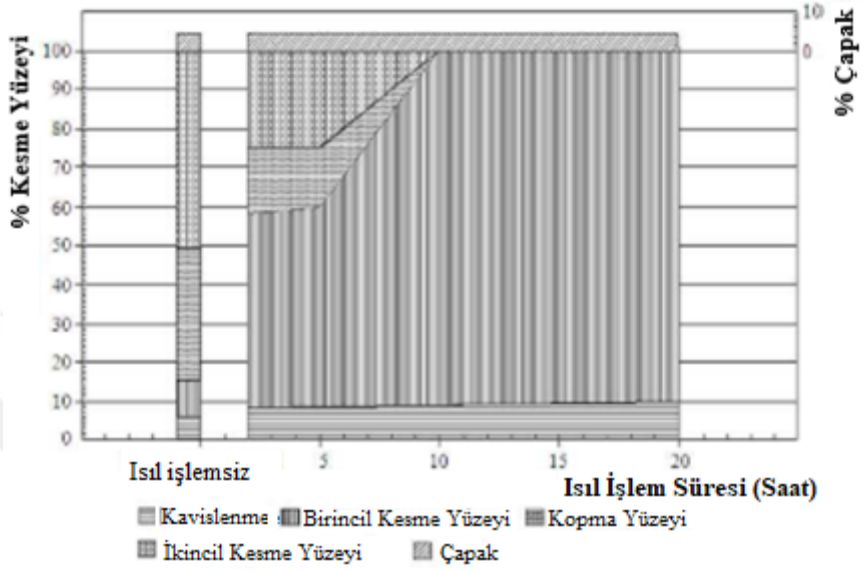
Mikroyapıdaki ikinci fazların varlığı ilk olarak çatlağın çekirdeklenmesini etkilemektedir [67]. Çeliğin sementit oranının artması kırılmayı teşvik etmektedir. Ayrıca mikroyapıda perlit içeriğinin artmasıyla beraber süneklik azalmaktadır. Sünek kırılmaya karşı duyarlılığın ölçülmesini yansıtan darbe deneyleri sonucunda perlit nedeniyle absorbe edilen enerji miktarının neredeyse 6 kat azaldığı tespit edilmiştir. Karşılaşılan bu farkın ise ferrit matrise kıyasla karbür lamellerinin görece daha sert ve kırılgan oluşları neden olmaktadır. Tokluğu etkileyen mikroyapısal parametreler, dönüşüm öncesi östenit tane boyutu, ferrit oranı, perlit oranı, perlit lameller arası mesafesi ve sementit kalınlığıdır [68]. Lamel kırılmasının kolay olması nedeniyle gerilme etkisiyle bir dizi mikro çatlak veya boşluk oluşabilir. Çeliğin sünek veya gevrek davranış göstermesi ise ferrit matrisin, mikro çatlaklara karşı tepkisine bağlıdır [69].

Mikroyapıda bulunan perlitin ana etkisi, sünek kırılmaya karşı direnci azaltmaktır. Bu sebeple küreselleştirme, kırılma direncini arttırmanın bir yoludur. Lameler morfolojideki karbürlerin kırılması küresel morfolojideki karbürlere göre daha kolaydır [23]. Küresel karbür oluşumunun itici gücü ise, küresel morfoloji nedeniyle yüzey enerjisindeki azalmadır. Kim vd. [29] sementit hacim oranının ısıl işlem yönteminden bağımsız olarak mekanik özellikleri kontrol ettiğini, sementit hacim oranının artmasıyla, akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliğin azaldığını, kopma uzamasının ise arttığını belirlemiştir.

Caruso ve Godet [70], farklı tavlama koşulları sonucunda ince ve kaba perlitik yapılar içeren numuneler üretmiştir. Kaba perlitik yapı daha yüksek sıcaklıklarda oluşmasından dolayı, ince perlitik yapıya göre daha az kusur içerir. Buna rağmen lameller arası mesafenin artması nedeniyle lamellerin parçalanması için gereken sürenin artmasından dolayı küreselleşme oranında azalma gözlenmiştir.

Bubphachot [71] küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda kırılma mekanizmasındaki değişimi incelemiştir. Bu kapsamda küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda kopma uzaması artmış, akma ve çekme dayanımı azalmıştır. Zımba ve kalıp yüksek hassasiyette tasarlanmasına rağmen mikroyapıda kalan perlitik bölgelerin kenar morfolojisinde kopma kırılması bölgelerine neden olduğu ancak mikroyapının küreselleşme oranının artmasıyla kopma kırılması bölgesinin yoğunluğunun azaldığı

gözlenmiştir. Mikroyapının tamamen küresel hale gelmesi sonucunda ise kopma kırılması yerine tamamen kesme kırılması gözlenmiştir. Bu çalışmada küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda malzemenin sünekleştirilmesi ile daha hassas kırılma yüzeyleri elde edileceği anlaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kenar morfolojisindeki değişim Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

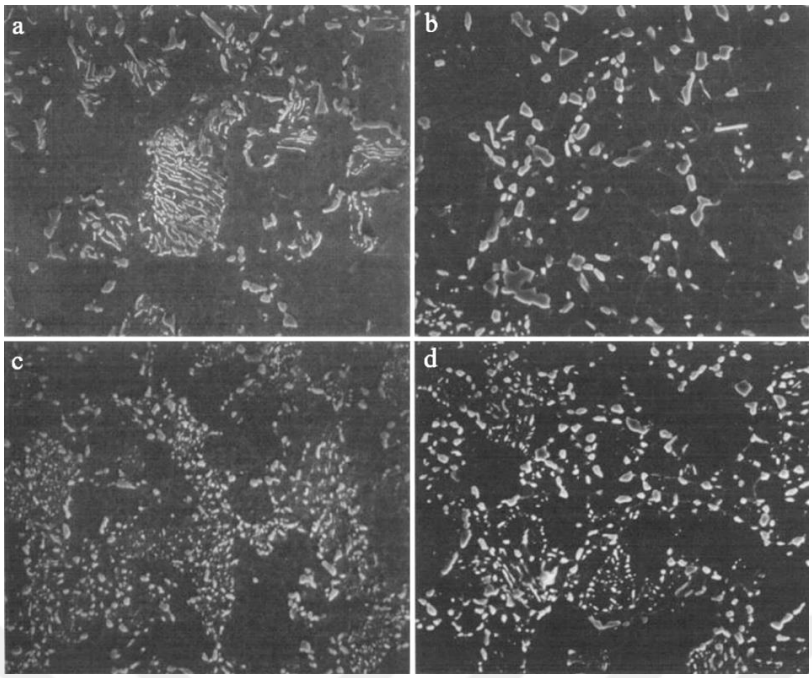


Şekil 3.11 : Farklı ısıl işlem sürelerinde kenar morfolojisinin değişimi [71].

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

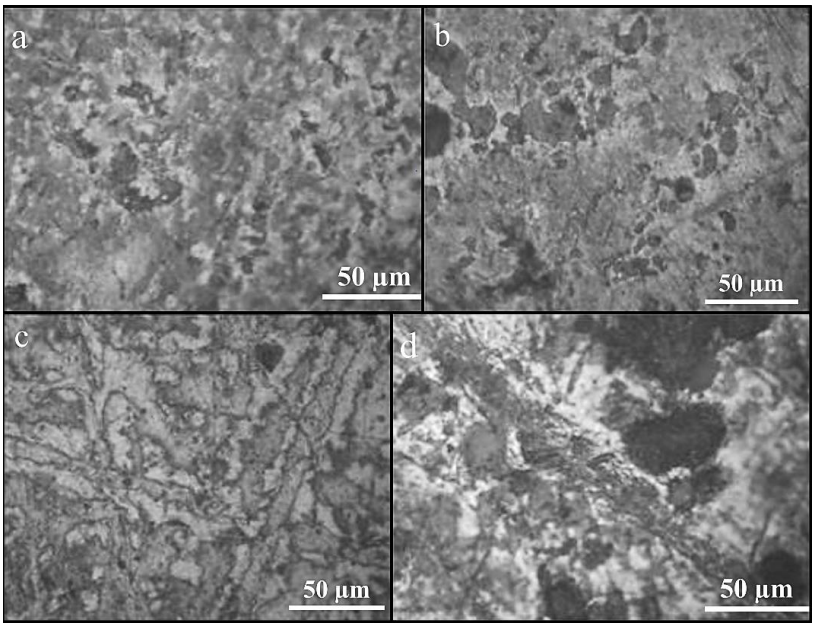
Çelikler sahip oldukları avantajları sayesinde kendisine geniş bir kullanım alanı bulmasına rağmen var olan özelliklerini iyileştirmek adına çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulmaktadır. Çeliklerin sertliklerini azaltarak işlenebilirliğini ve sünekliğini arttırmak için tercih edilen en önemli ısıl işlem küreselleştirmedir. Küreselleştirme ısıl işlemleri, ötektoid altı ve ötektoid üstü çelikler için kritik sıcaklıklarda tutma sürelerine göre ayrılmaktadır. Gerçekleştirilen literatür çalışmaları sırasında genellikle kritik sıcaklık altı uzun tutma süresindeki ısıl işlemler tercih edilmekteyken çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemleri için de çeşitli sıcaklıklarda çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında düşük alaşımlı çeliklerin küreselleştirme ısıl işlemi neticesinde çok fazla yumuşayacakları için genellikle orta ve yüksek karbonlu çelikler tercih edilmektedir.

O'Brien ve Hosford [35] gerçekleştirdiği çalışmada AISI 4037 kalite çeliğe uygulanan kritik altı ve kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işlemleri neticesinde mikroyapı değişimlerini gözlemlemiştir. Kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işlemi 760 °C'de 2 saat, 715 °C'de 20 saate kadar tutma ile yapılmıştır. Kritik altı küreselleştirme ısıl işleminde ise çelik 715°C'de 20 saate kadar bekletilmiştir. İki ısıl işlemde de 12 saatin ardından yapının tamamen küreleştiğini gözlemlemiştir ancak kritik sıcaklık arası küreselleştirme ısıl işleminde karbürlerin daha fazla kabalaştığı gözlenmiştir. Böylece kritik altı küreselleştirme ısıl işleminde, zaman, maliyet ve enerji kaybının daha düşük olduğu tespit edilmiş olup mikroyapıların SEM görüntüleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



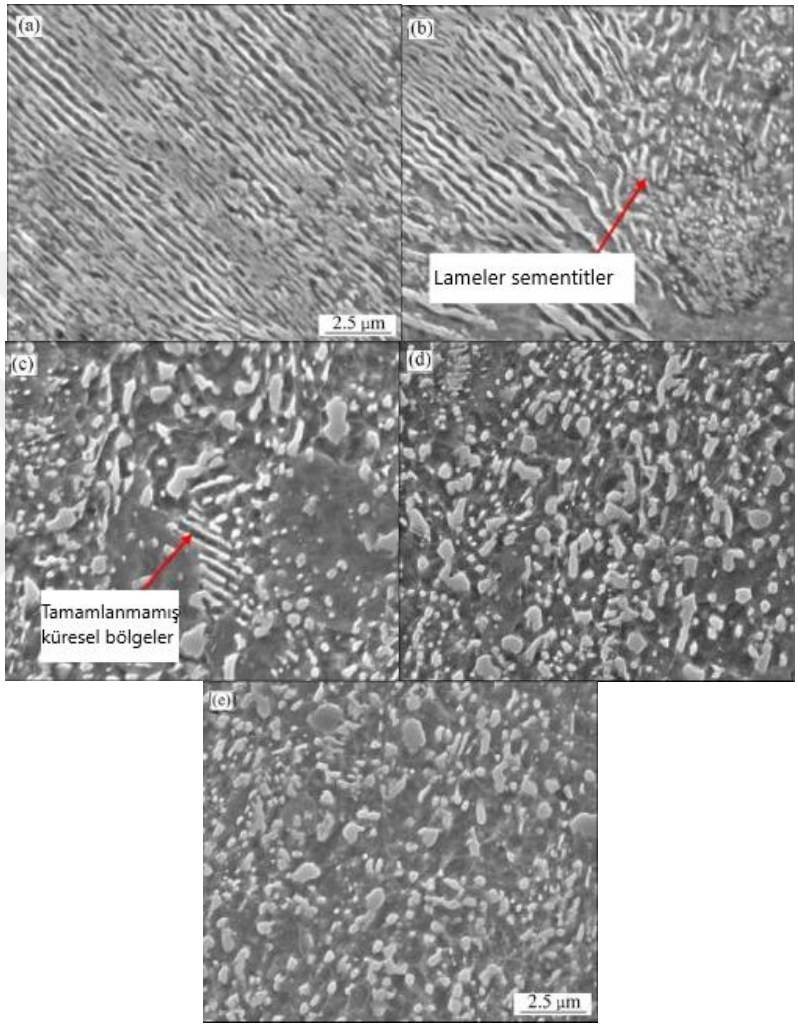
Şekil 4.1 : AISI 4037 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemleri (a) 4 saat kritik sıcaklık arası (b) 12 saat kritik sıcaklık arası, (c) 4 saat kritik altı, (d) 12 saat kritik altı [35].

Harisha vd. [72] AISI 4147 kalite çeliğe uyguladıkları küreselleştirme ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. 750 °C'de 3, 6 ve 9 saatlik farklı tutma sürelerinde kritik altı küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



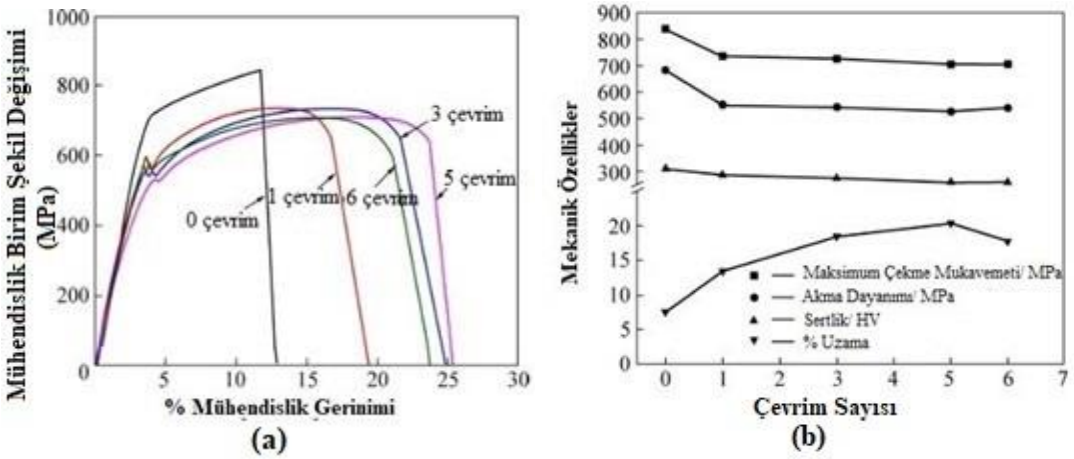
Şekil 4.2 : AISI 4147 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi (a) Isıl işlem öncesi, (b) 3 saat, (c) 6 saat, (d) 9 saat [72].

Li vd. [40], AISI 6150 kalite çeliğe benzer kimyasal bileşime sahip AISI 6145 kalite çelikte, küreselleştirme ısıl işlemi ile çevrim sayılarındaki değişimin mikroyapıya etkisini incelemiştir. Bu çalışmada çelik, 840 °C'de 200 dakika tutulmasının ardından 700 °C sıcaklıkta 100 saniye tutulmuştur. Belirlenen ısıl işlem koşulları altında 1, 3, 5 ve 6 çevrim yapılan küreselleştirme sonucunda elde edilen mikroyapılar Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



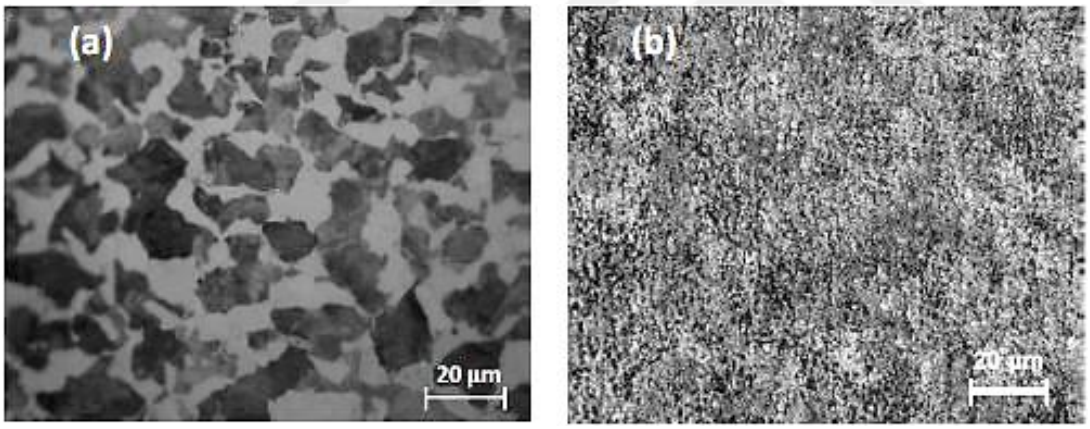
Şekil 4.3 : AISI 6145 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi (a) Isıl işlem öncesi, (b) 1 çevrim, (c) 3 çevrim, (d) 5 çevrim, (e) 6 çevrim [40].

Isıl işlemler neticesinde malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. Çevrim sayısının artmasıyla küreselleşme oranının ve partikül boyutunun arttığı görülmüş olup 5 çevrim sonucunda yapının tamamının küresel olduğu ilerleyen çevrimlerde mekanik özelliklerin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.4).



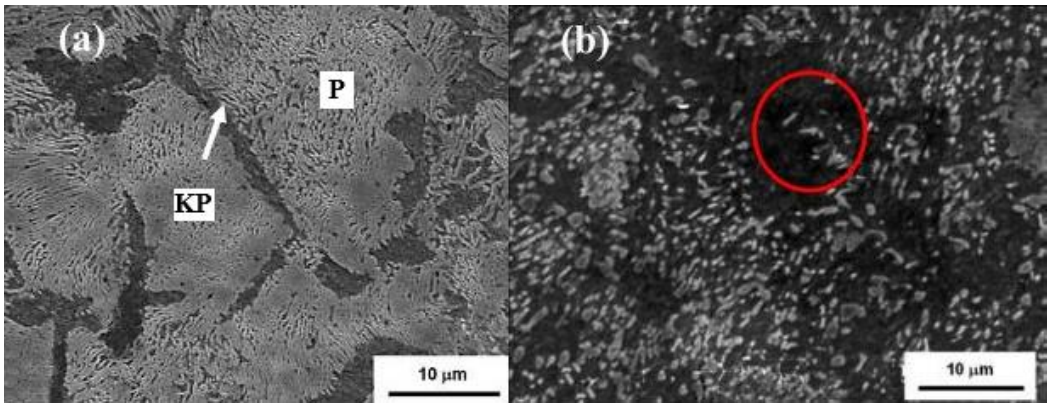
Şekil 4.4 : Çevrim sayısının etkisi (a) Mühendislik şekil değişimi, (b) Mekanik özellikler [40].

Alza vd. [16], AISI 1045 çelik kalitesine benzer kimyasal bileşime sahip AISI 1040 kalite çeliğe 700 °C'de 24 saat süreyle kritik altı küreselleştirme ısıl işlemi uygulamıştır. İşlem sonunda elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



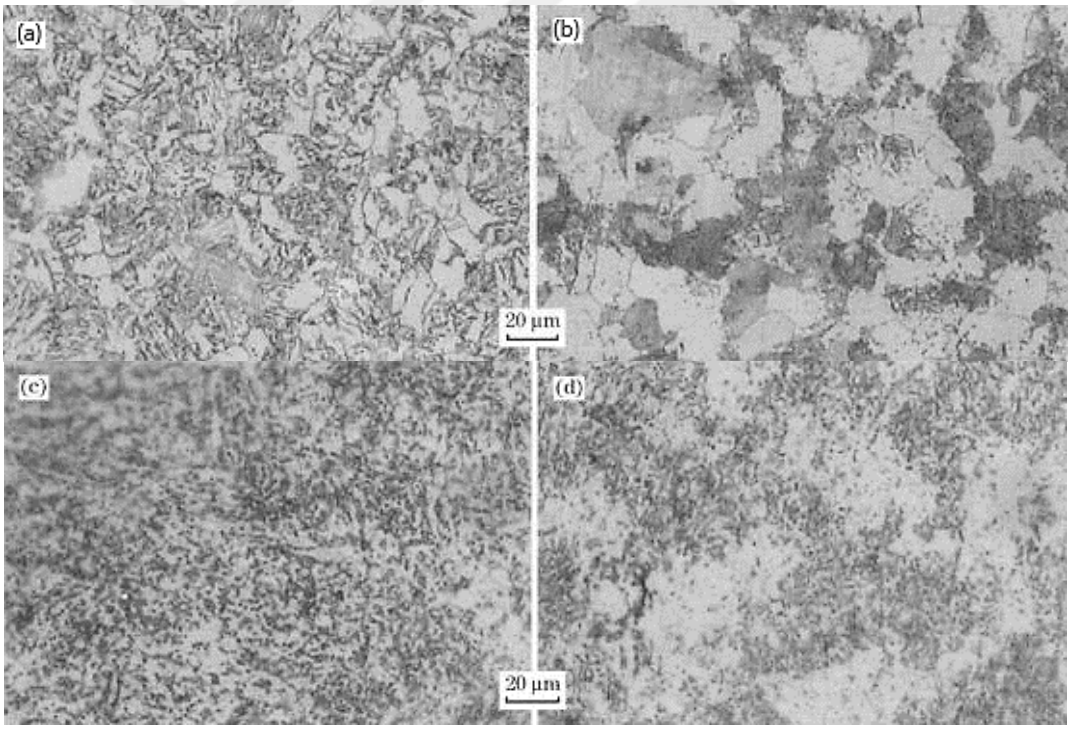
Şekil 4.5 : AISI 1040 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi (b) Sonrası [16].

Baday vd. [73], AISI 1050 kalite çeliğe 700 °C'de 12 saat süreyle uyguladıkları kritik altı küreselleştirme ısıl işlemi neticesinde mikroyapıda küreselleşmemiş perlit bölgelerinin varlığını tespit etmişlerdir. Mikroyapıdaki değişim Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Isıl işlem öncesi mikroyapıda kaba perlit ve perlit fazları gözlenirken ısıl işlem neticesinde küreselleştirilememiş karbür bölgesi kırmızı ile daire içine alınmıştır.



Şekil 4.6 : AISI 1050 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi (b) Sonrası [73].

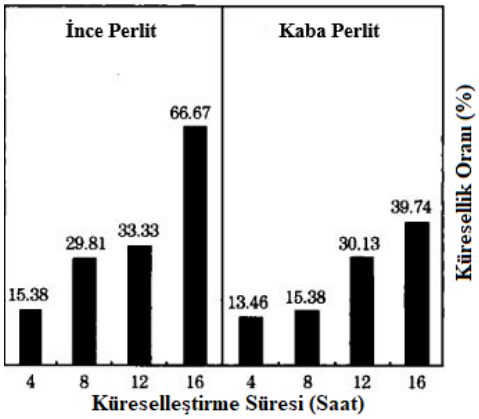
Kamyabi-Gol vd. [30] AISI 1060 çelik kalitesinin ince ve kaba perlit halindeki mikroyapılarına 700 °C sıcaklıkta 16 saat tutularak uygulanan kritik altı küreselleştirme ısıl işlemi uygulamıştır. Küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : AISI 1060 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme (a) Isıl işlem öncesi başlangıç yapısı ince perlit (b) Isıl işlem öncesi başlangıç yapısı kaba perlit, (c) Isıl işlem sonrası başlangıç yapısı ince perlit, (d) Isıl işlem sonrası başlangıç yapısı kaba perlit [30].

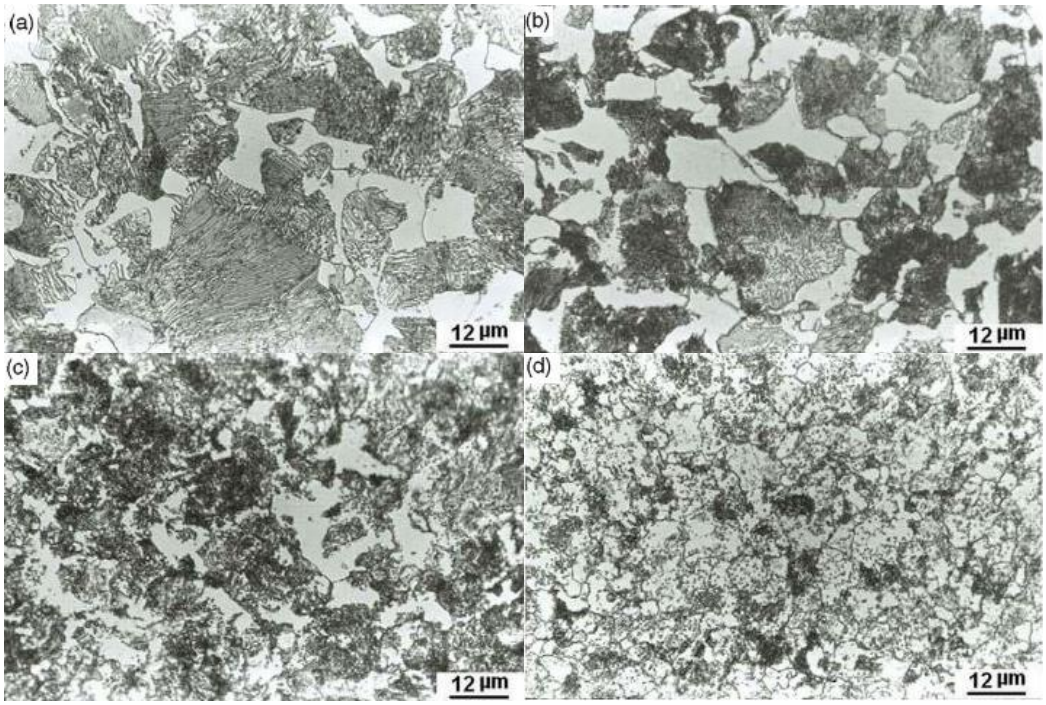
İnce ve kaba perlit mikroyapılarına aynı koşullar altında uygulanan kritik altı küreselleştirme ısıl işlemi neticesinde ince perlit ilk yapılı numunenin küresellik

oranının daha yüksek olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen farklı sıcaklıklardaki küresellik oranları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



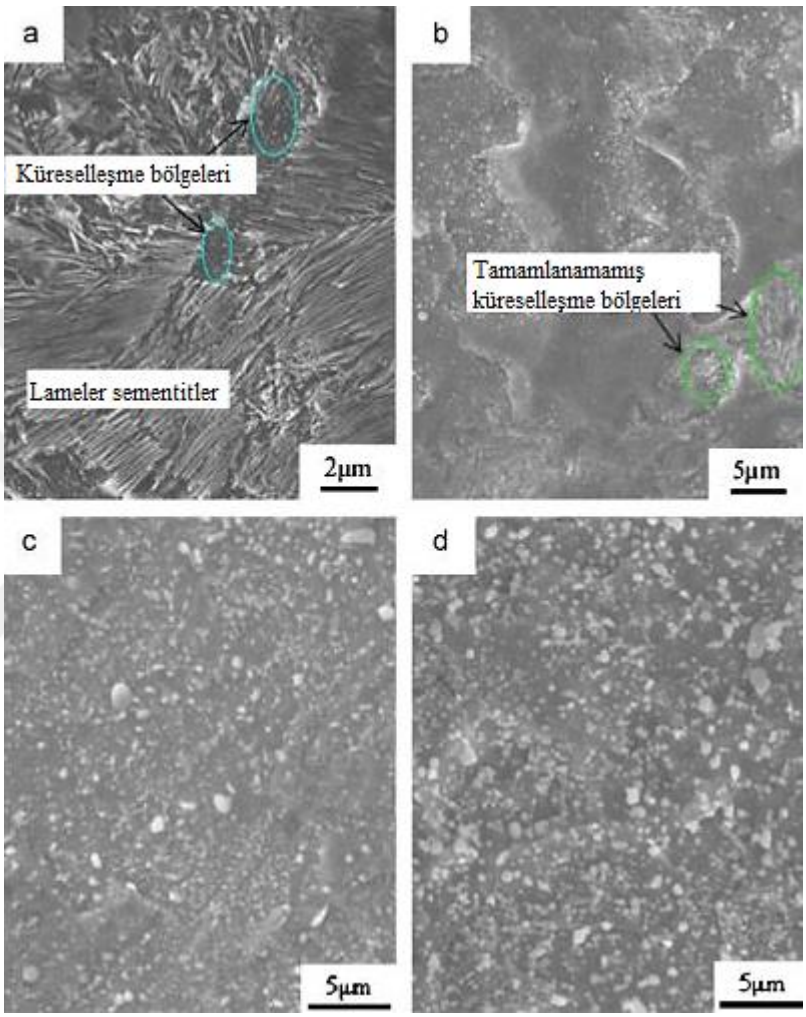
Şekil 4.8 : AISI 1060 kalite çelikte farklı küreselleştirme sürelerindeki küresellik oranının değişimi [30].

Saha vd. [74] % 0,6 C içeren bir çeliğe uyguladıkları çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi ile mikroyapıdaki değişimleri ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Isıl işlem sırasında çelik her döngüde 810 °C sıcaklıkta 6 dakika tutulmasının ardından tuzlu su – buz çözeltisinde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Bu şekilde 1, 5 ve 8 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi neticesinde elde edilen mikroyapılar Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



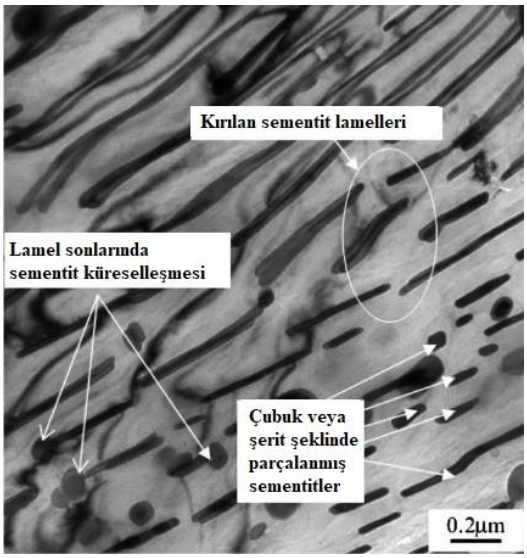
Şekil 4.9 : % 0,6 C içeren çeliğin mikroyapıdaki değişim (a) Isıl işlemsiz, (b) 1 çevrim, (c) 5 çevrim, (d) 8 çevrim [74].

Lv vd. [36] % 0,8 C içeren bir çeliğe 770 °C üst sıcaklıkta 5 dakika, 680 °C'de 3 dakika tutulmasıyla çevrim sayısının mekanik özelliklere ve kırılma yüzeylerine etkisini incelemişlerdir. Belirlenen koşullar altında 1, 3, 5 ve 7 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemleri neticesinde elde edilen mikroyapıların SEM görüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



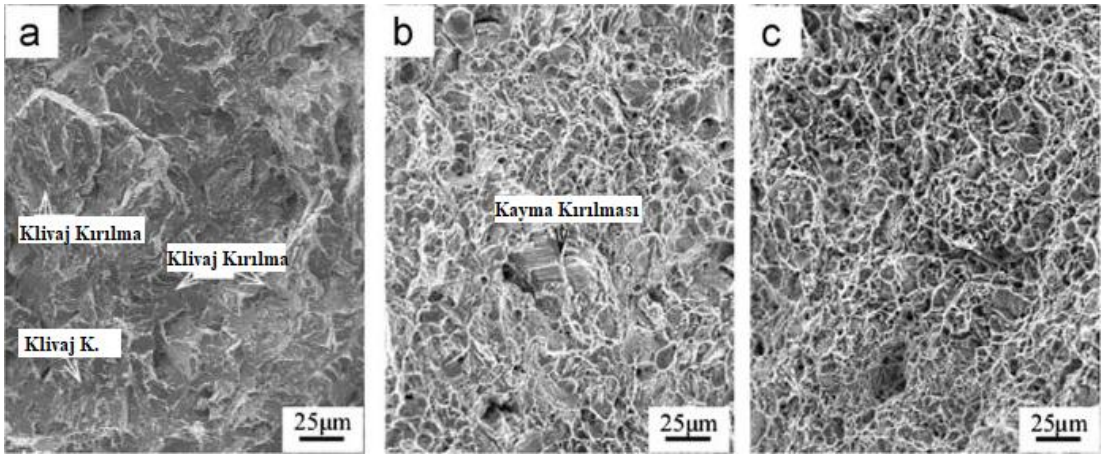
Şekil 4.10 : Farklı çevrim sayılarına göre mikroyapıların SEM görüntüleri (a) 1 çevrim, (b) 3 çevrim, (c) 5 çevrim, (d) 7 çevrim [36].

Küreselleştirme ısıl işleminin ilk çevrimi sonucunda lamellerin parçalanarak küresel hale dönüşleri başlamış olup Şekil 4.11'de dönüşümün TEM görüntüsü bulunmaktadır. Ancak mikroyapı 5 çevrimin ardından tamamen küresel hale çevrilebilmiştir ve ortalama partikül çapı yaklaşık olarak 0,49 µm ölçülmüştür. Numunelere uygulanan çekme deneyleri neticesinde Li vd. [40] tarafından gerçekleştirilen ve Şekil 4.4'de gösterilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Mekanik özellikler 5 çevrimin ardından düşmeye başlamıştır.



Şekil 4.11 : Sementit küreselleşmesi [36].

Çekme deneyleri sonucunda deney numunelerinin kırılma yüzeyleri incelenerek kırılma morfolojileri incelenmiştir. Yapının küreselleşmesiyle birlikte kırılma yüzeylerinde küçük gamzeler görülmeye başlamıştır. Bu yapılar malzemenin sünekliğinin artmasını göstermektedir. 3 çevrimin ardından yapıda klivaj kırılmanın azalarak lifi görünümlü kayma kırılmaları gözlenmiştir. 5 çevrimde yapının tamamında gamze şeklindeki çukurlar oluşmuştur. Kırılma yüzeyleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Kırılma yüzeyi morfolojisi (a) Isıl işlemsiz, (b) 3 çevrim (c) 5 çevrim [36].

Yapılan araştırmalar neticesinde çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemleri sırasında farklı sıcaklıklardaki değişimin atomların uyarılmasına neden olan aktivasyon enerjisini azaltan temel parametre olduğu tespit edilmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada özellikle otomobil endüstrisinde kullanılan 4 farklı alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliğin küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda hassas kesme kalitesinin arttırılması amaçlanmıştır. Deney kapsamında AISI 4140, AISI 6150, AISI 1045 ve AISI 1070 kalitesindeki sıcak haddelenmiş çelikler çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda mikroyapılarının homojen bir şekilde küresel hale getirilmesine çalışılmıştır. Aşağıda deneysel çalışmaların detaylarına yer verilmiştir.

5.1 Deneylerde Kullanılan Çelik Kaliteleri

Bu tez çalışmasında kullanılan çelikler MGE Metal A.Ş. firmasından sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş olarak temin edilmiştir. Çeliklerin üretiminde, sıcak haddeleme, asitle temizleme ve tavlama işlemleri uygulanmış olup, gerek sıcak gerekse soğuk haddelenmiş çeliklerin mikroyapıları kısmen küreselleşmiş durumda temin edilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan çeliklerin firma tarafından sağlanmış kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan çelik sacların (AISI 1070, AISI 1045, AISI 4140, AISI 6150) sıcak haddeleme sonrası kalınlıkları, sırasıyla 3,30 mm, 3,05 mm, 2,55 mm ve 2,50 mm, soğuk haddeleme sonrası kalınlıkları ise sırasıyla 2,60 mm, 2,45 mm, 2,00 mm ve 2,00 mm'dir.

Çizelge 5.1: Çelik kalitelerinin kimyasal bileşimi (% ağ.).

Çelik Kalitesi (AISI)	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Cu	Al	V	Fe
4140	0,38	0,17	0,75	<0,001	0,20	0,017	0,054	0,006	0,002	Kalan
6150	0,51	0,23	0,94	<0,001	0,99	0,160	0,013	0,032	0,004	Kalan
1045	0,42	0,23	0,70	<0,001	0,20	0,017	0,054	0,006	0,111	Kalan
1070	0,692	0,211	0,638	0,004	0,14	<0,00	0,007	0,030	0,003	Kalan

5.2 Numune Hazırlama İşlemleri

Sac şeklinde temin edilen çeliklerin ısıl işlemlerde kullanılacak fırınlara yerleştirilmesi amacıyla numune kesme cihazında 40 mm x 60 mm ölçülerinde kesilmiştir.

5.3 Isıl İşlem Çalışmaları

Çevrimsel küreselleştirme işlemine tabi tutulacak numuneler için Protherm PLF – 120/5 ve Kerr 999/515 model elektrikli fırınlar kullanılmıştır. Gerçekleştirilecek küreselleştirme ısıl işlemi sırasında çeliklerin atmosfer ile temasının kesilmesi ve sıcaklığın numunelerin bütün yüzeylerinde eşit şekilde dağılımının sağlanması amacıyla grafit pota dökme demir talaşı ile doldurulmuştur. Uygulanacak ısıl işlem sıcaklık aralıklarının belirlenmesi amacıyla demir- karbon faz diyagramında bulunan $C_{eş}$, A_{c1} ve A_{c3} değerlerinin hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple Eşitlik 5.1-5.3'de gösterilen eşitlikler kullanılarak malzemelerin karbon eşdeğeri ile A_{c1} ve A_{c3} sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Isıl işlemlere yüksek sıcaklıkta Protherm marka fırında başlanmış ve fırın içerisinin hedef sıcaklığa çıkmasının ardından hedef tutma süresi kadar bekletilip Kerr marka fırına geçişi sağlanmıştır. Çevrim sayılarının tamamlanmasının ardından fırın içerisinde 650 °C'ye kadar soğuması beklenmiş ve işlem sonucunda fırından çıkartılan pota içerisindeki numuneler oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur.

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \tag{5.1}$$

$$A_{c1} = 723 - 20{,}7(\%Mn) - 16{,}9(\%Ni) + 29{,}1(\%Si) - 16{,}9(\%Cr) \pm 11{,}5°C \tag{5.2}$$

$$A_{C3} = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15{,}2(\%Ni) + 44{,}7(\%Si) + 104(\%V) + 31{,}5(\%Mo) \pm 16{,}7°C \tag{5.3}$$

5.4 Metalografik İşlemler

Isıl işlem uygulanmış numunelerin hadde yönüne dik kesitleri kalıba alınıp (sıcak bakalit) sırasıyla 120, 240, 320, 480, 600, 800, 1000, 1200, 2500 grit SiC partikül içeren zımpara kağıtları ile kademeli olarak zımparalanmıştır. Ardından zımparalanan numunelerin yüzeyindeki çiziklerinin giderilmesi amacıyla % 0,05 µm kolloidal silika

kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Optik mikroskop altında tane sınırlarının gözlenebilmesi amacıyla % 4 Nital çözeltisi ile dağlanan numunelerin yüzeyleri istenmeyen kalıntıların giderilmesi amacıyla alkol ile temizlenmiştir.

Metalografik işlemlerin tamamlanmasının ardından numuneler Nikon LV150L marka optik mikroskop ve HITACHI - TM 1000 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş ve mikroyapıları oluşturan bileşenler belirlenmiştir. SEM incelemelerinin yapılması amacıyla bakalit numuneler 90 saniye altınla kaplanmıştır.

5.5 Görüntü Analiz Yazılımı ile Yapılan Çalışmalar

Mikroyapı görüntülerinin incelenmesinin ardından, birim alan başına düşen küresel karbür oranı, en/boy oranları ve ortalama çaplarının analiz edilmesi amacıyla Clemex Proffessional® analiz programı kullanılmıştır.

5.6 Sertlik Deneyleri

Küresel mikroyapının malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişimlerine olan etkisinin kıyaslanması amacıyla Rockwell B (HRB) skalasına göre (100 kgf yük ve 1/16” çapında çelik bilya batıcı uç) sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde, Zwick/Roell Indentec ZHR marka sertlik cihazı kullanılmıştır.

5.7 Erichsen Test Cihazı ile Yapılan Kesme İşlemleri

Isıl işlem öncesi ve sonrası kırılma yüzeylerinin incelenmesi amacıyla numuneler Erichsen cihazında taslak çıkarma modunda kesilerek kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

5.8 Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

Erichsen test cihazı ya da endüstriyel ortamda yapılan hassas kesme işleminin ardından kırılma yüzeyleri Leica DFC-480 marka stereo mikroskop kullanılarak kırılma mekanizması incelenmiştir. Bu sayede ısıl işlem sonucunda elde edilen küresel mikroyapının hassas kesme işlemine olan etkisi kıyaslanarak kopma ve kesme bölgelerinin değişimleri gözlenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu altında da incelenerek kesme ve kopma bölgeleri yüksek büyütme altında incelenmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Çalışmanın bu bölümünde sıcak ve soğuk haddelenmiş 4 farklı çelik kalitesine uygulanan küreselleştirme ısıl işlemini etkileyen parametrelerinin numune mikroyapılarında getirdiği değişiklikleri, bu değişikliklerin sonucunda sertlik ve kırılma mekanizmasına olan etkileri incelenmiştir. Bu bölümde her bir malzeme için yapılan çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

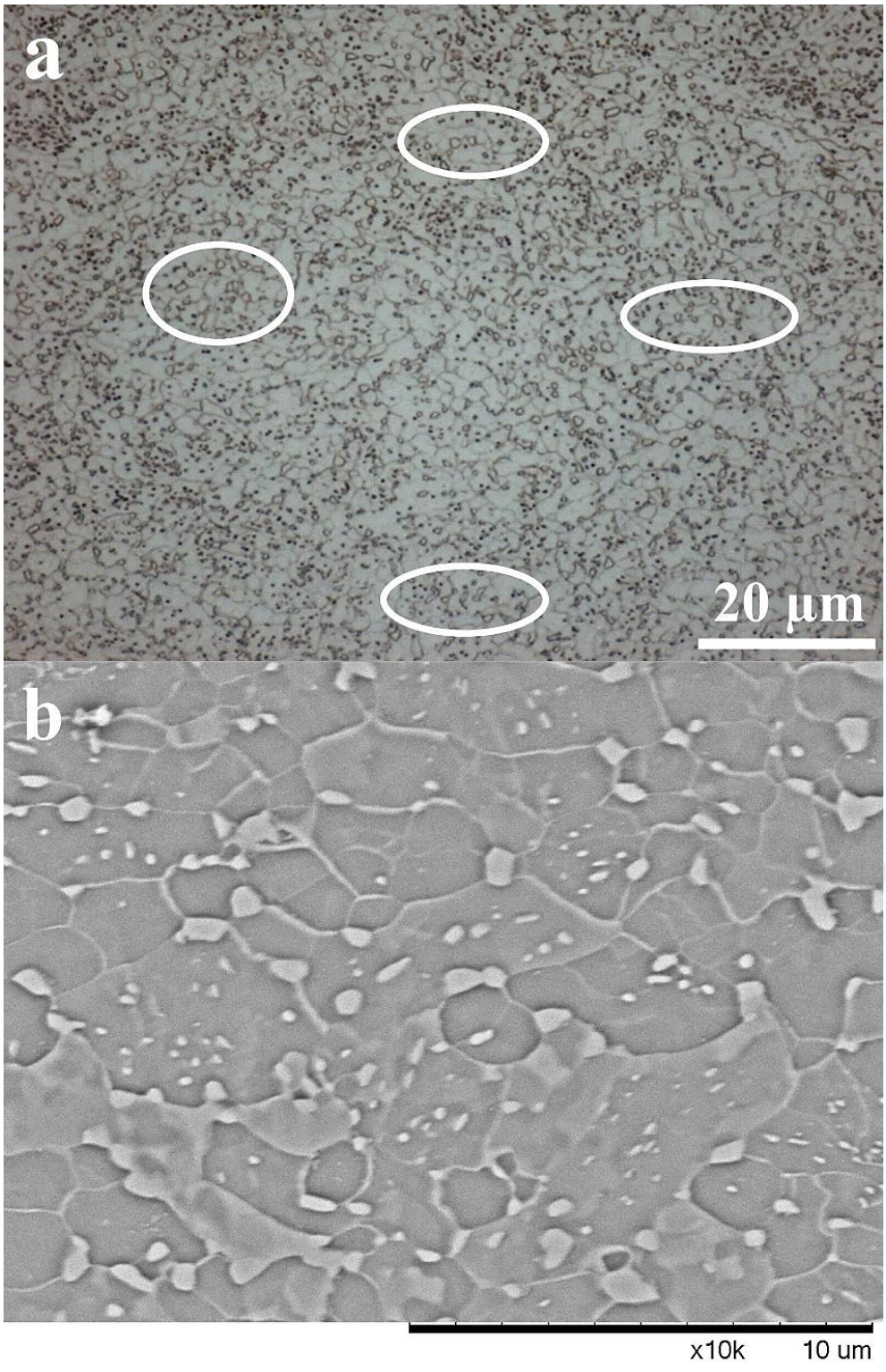
6.1 AISI 4140 Kalite Çelik

6.1.1 Mikroyapıların incelenmesi

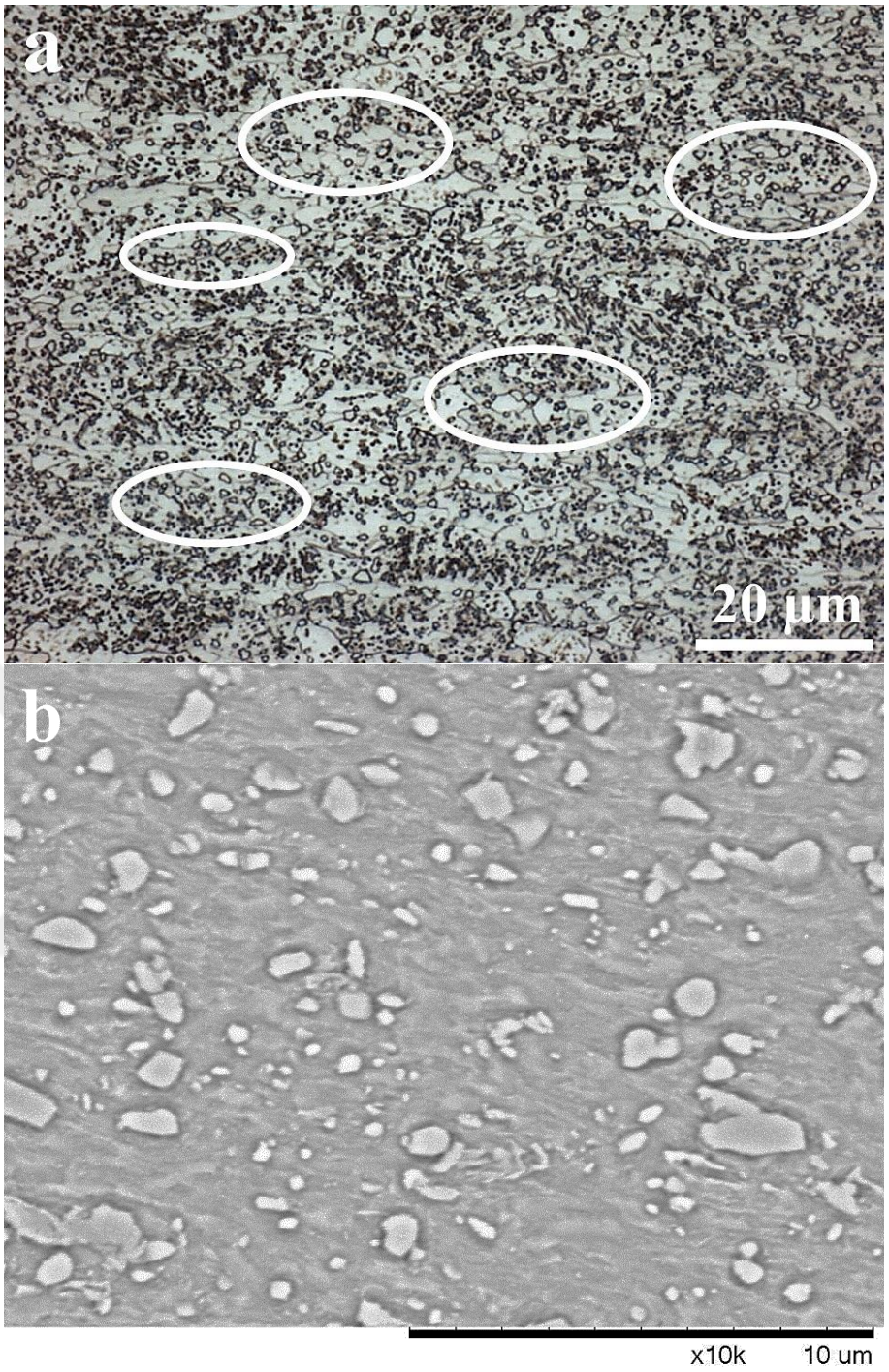
Sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Numunelerin işlem uygulanmamış hallerinin incelenmesi sonucunda, lameler perlit yapısının bozulduğu ve kısmi küreselleşmelerin bulunduğu gözlenmiştir. (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de daire içerisinde gösterilmiştir). Dolayısıyla numuneler temin edildiği halde kısmi küresel bir mikroyapıya sahiptir.

Deney numunelerinin ısıl işlem koşullarının belirlenmesi için $C_{eş}$, A_{c1} ve A_{c3} değerleri hesap edilmiştir. Bu kapsamda Eşitlik 5.1 - 5.3'de belirtilen formüller kullanılarak Çizelge 6.1'deki değerler belirlenmiştir.

Çevrimsel küreselleştirme ısıl işleminin uygulanması sırasında çeliğin önce östenit bölgesinde sonra A_{c1} sıcaklığı altında tutulması gerekmektedir. Bu sayede lameler sementitin küresel hale getirilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle ilk olarak sıcak haddelenmiş çelik kalitelerinin 740 - 680 °C sıcaklıklarda ardışık olarak 5'er dakika tutulmasına ve bu işlemin 5 çevrim yapılmasına karar verilmiştir [31].



Şekil 6.1 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

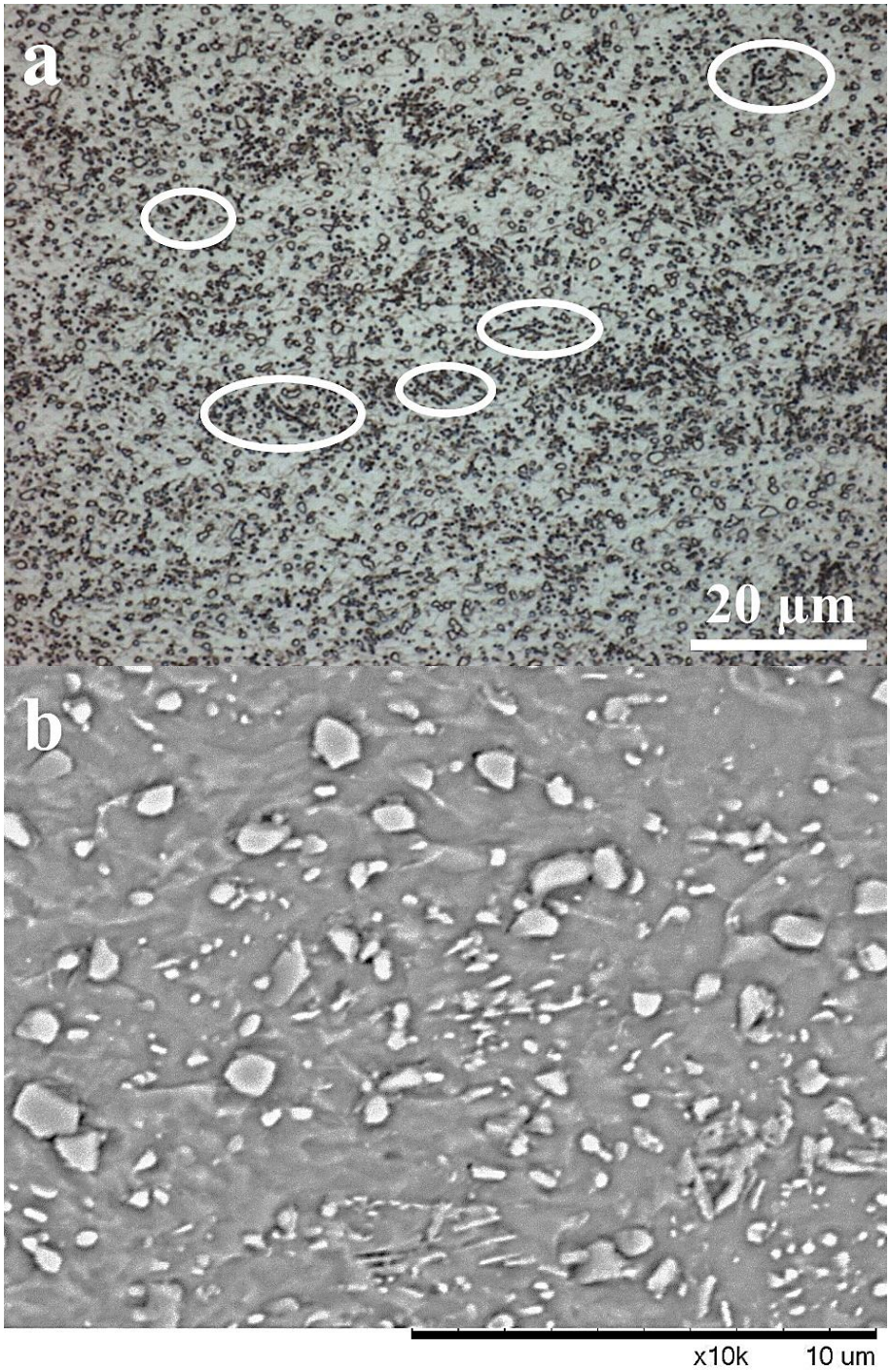


Şekil 6.2 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

Çizelge 6.1: AISI 4140 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları.

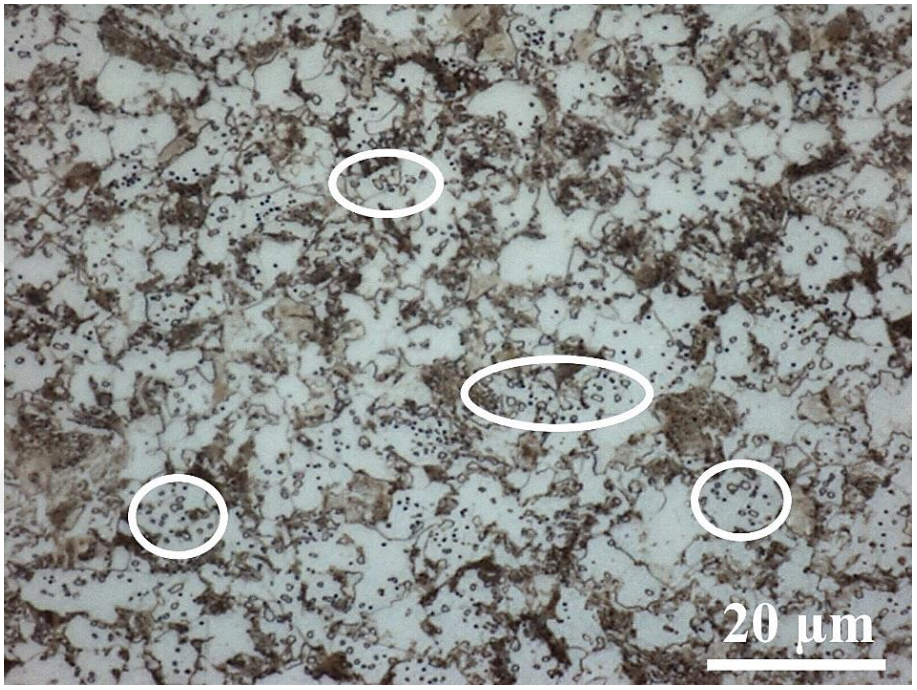
$C_{eş}$ (%)	**A_{c1} (±11,5˚C)**	**A_{c3} (±16,7˚C)**
0,73	695	797

AISI 4140 kalite çeliğe 740 - 680°C sıcaklık aralığında 5 çevrim ve her bir sıcaklıkta 5'er dakika tutularak uygulanan çevrimsel küreleştirme işlemi sonrası çeliğin mikroyapısının optik mikroskop ve SEM fotoğrafları Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Belirlenen koşullarda gerçekleştirilen ısıl işlem sonucunda optik mikroskop ve SEM ile incelenen numunelerde lameler yapıların varlığı tespit edilmiş olup ısıl işlemin hedeflendiği oranda küreselleşmeye etkisi olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle AISI 4140 çelik kalitesinin orijinal yapısı olan homojen lameler perlitik mikroyapının yeniden oluşturularak küreselleşme kabiliyetine etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çelik 900 °C'de 15 dakika tutularak mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiş (Şekil 6.4) ve normalizasyon ısıl işlemi sonucunda incelenen mikroyapılarda küresel karbür sayılarının azaldığı belirlenmiştir.

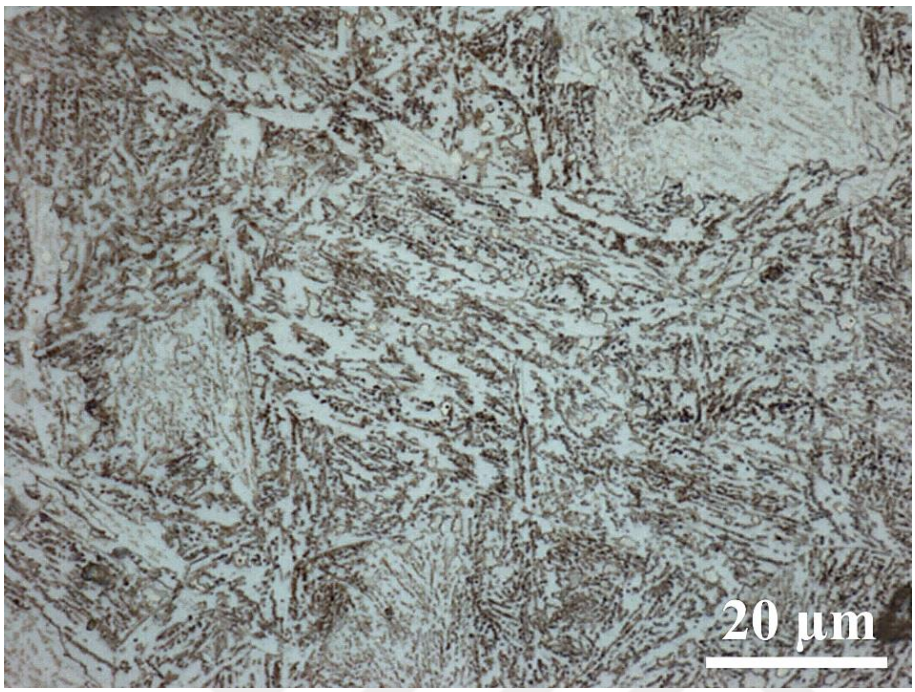


Şekil 6.4 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

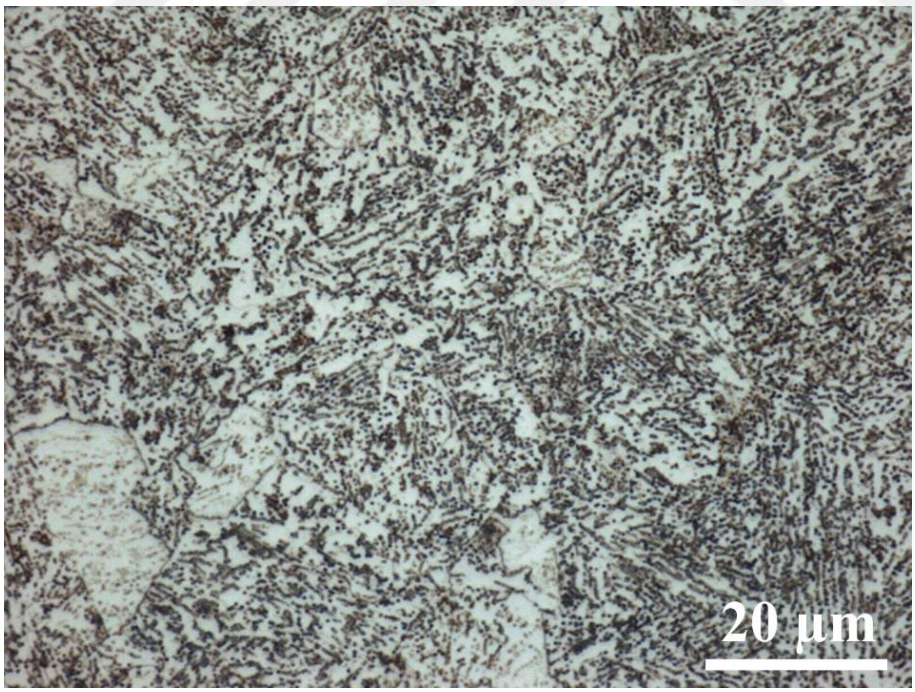
Mikroyapı incelemesini takiben mikroyapıda hala küresel karbürlerin gözlenmesi ve perlitik yapının gözlenmemesi dolayısıyla ısıl işlem koşullarının değiştirilmesine karar verilmiştir. Bu sebeple yeni normalizasyon koşulu 950 °C'de 30 dakika olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın ve sürenin artmasıyla karbürlerin yeniden lameler yapıda olacak şekilde şekillenmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen koşullarda yapılan ısıl işlem sonucunda Şekil 6.5'de verilen mikroyapı elde edilmiştir. Söz konusu normalizasyon sonrası beklenen perlitik yapıya ulaşılmıştır.

Homojen bir yapının elde edilmesinin ardından, önceden belirlenen küreselleştirme ısıl işlem koşulları lameler morfolojideki mikroyapı üzerinde test edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen mikroyapı Şekil 6.6'da gösterilmiş olup perlitik mikroyapının

çok kararlı bir yapı olması nedeniyle lamellerin parçalanarak küresel hale gelmediği belirlenmiştir.

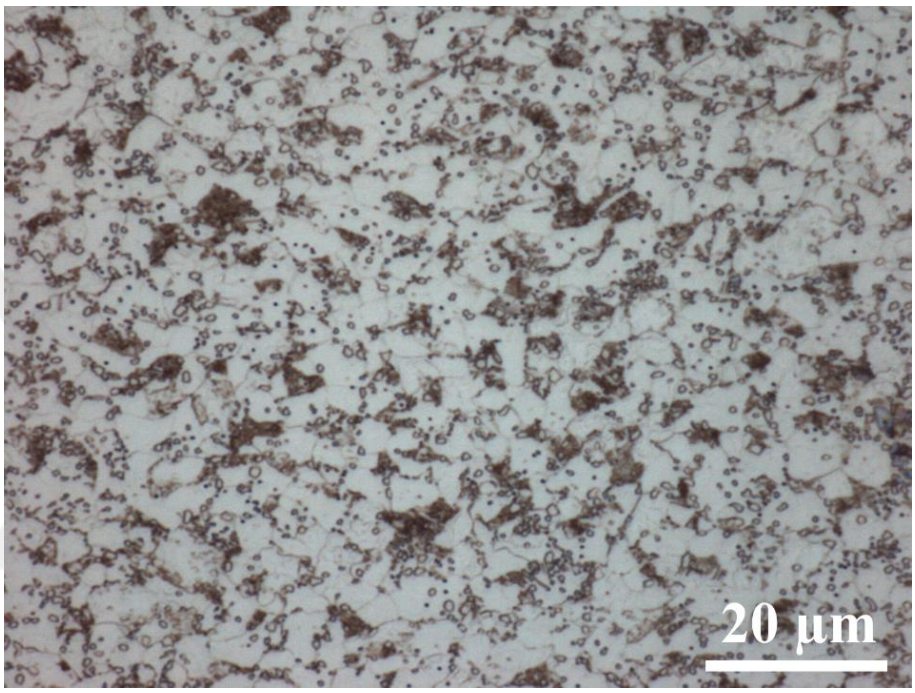


Şekil 6.5 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.



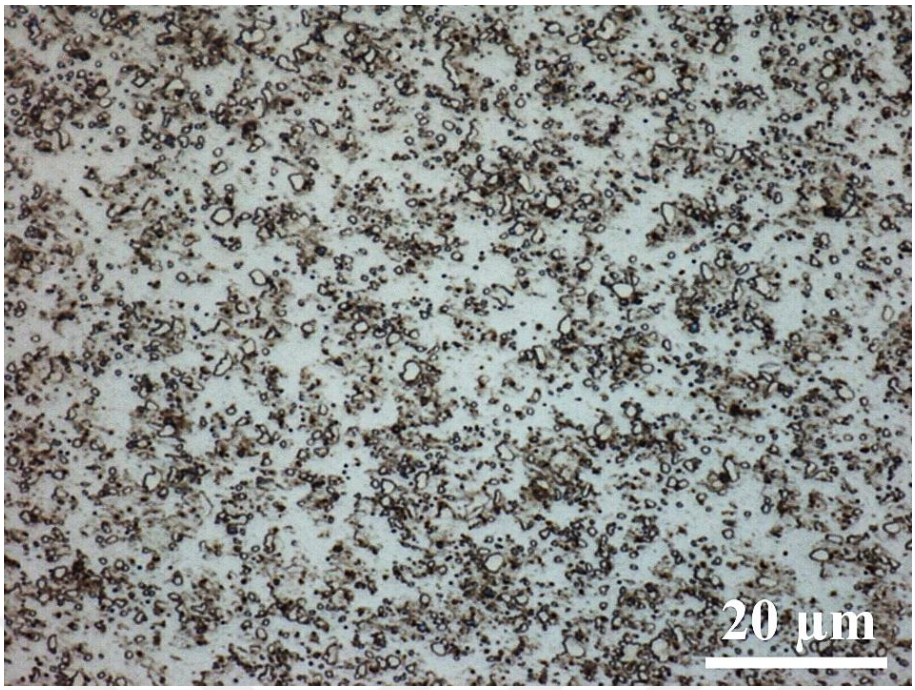
Şekil 6.6 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrasında öngörülen küreselliğin oluşturulamaması sebebiyle deney parametrelerinin değiştirilmesine karar verilmiş olup küreselleşmeyi etkileyen parametrelerden olan sıcaklık değişkeni değiştirilmiştir. Bu sebeple normalizasyon yapılmış numunelere yapılacak küreselleştirme işleminin üst sıcaklığının arttırılarak 800 - 680 °C sıcaklık aralıklarında küreselleştirme ısıl işlemi yapılmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışma neticesinde elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.7 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Uygulanan çevrimsel küreleştirme işlemiyle lameler morfolojideki perlitik yapı tümüyle küresel mikroyapıya dönüştürülememiştir. Yapılan literatür taramalarında da, en kararlı yapı olarak lameler perlit mikroyapısı olduğu görülmüş, bu sebeple normalizasyon ısıl işlemi yapılmasının küreselleşmeye negatif etkisi gözlenmiştir [31,75]. Küreselleşme oranını, sayısını ve dağılımını etkileyen parametreler olan sıcaklık, süre ve çevrim sayısının değiştirilerek hedeflenen küresellik oranının arttırılması amaçlanmıştır. Bu sebeple çevrimsel küreselleştirme işlemi, 800 - 680 °C sıcaklıklarında, 10'ar dakika tutularak ve 10 çevrim yapılmıştır. Belirlenen yeni koşullar altında yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapı Şekil 6.8'de görülmektedir.



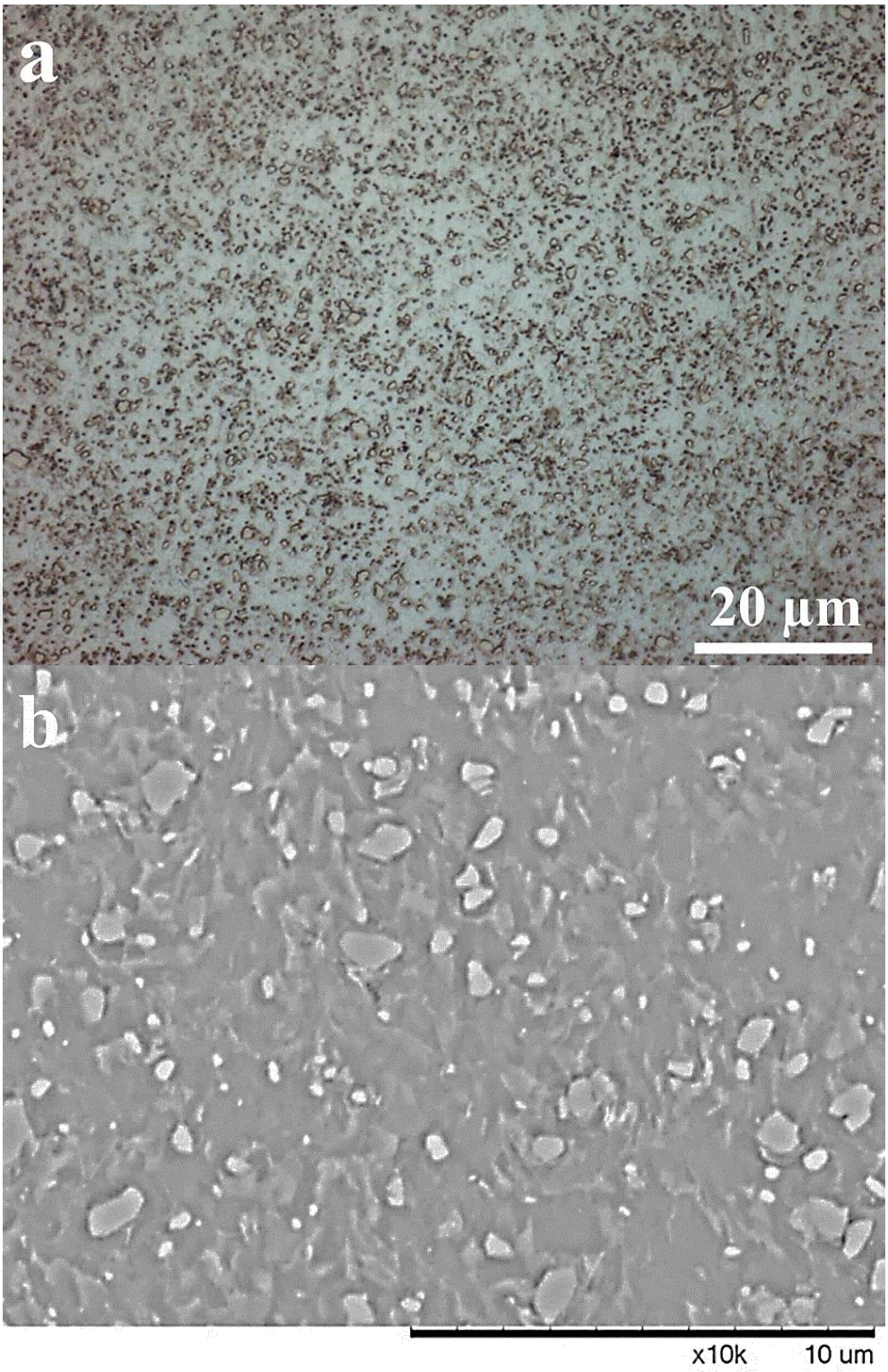
Şekil 6.8 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Elde edilen mikroyapıların değerlendirilmesi sonucunda küre sayısını ve boyutunu belirleyen koşul olarak ikinci kademe sıcaklık olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle çevrimsel küreselleştirme işleminin ikinci kademe sıcaklığı 670 °C, bu sıcaklıkta tutma süresi ise 30 dakika olarak belirlenmiştir. Belirlenen koşullarda 1, 5 ve 10 çevrim yapılarak küreselleştirme ısıl işleminde çevrim sayısının etkisi incelenmiştir.

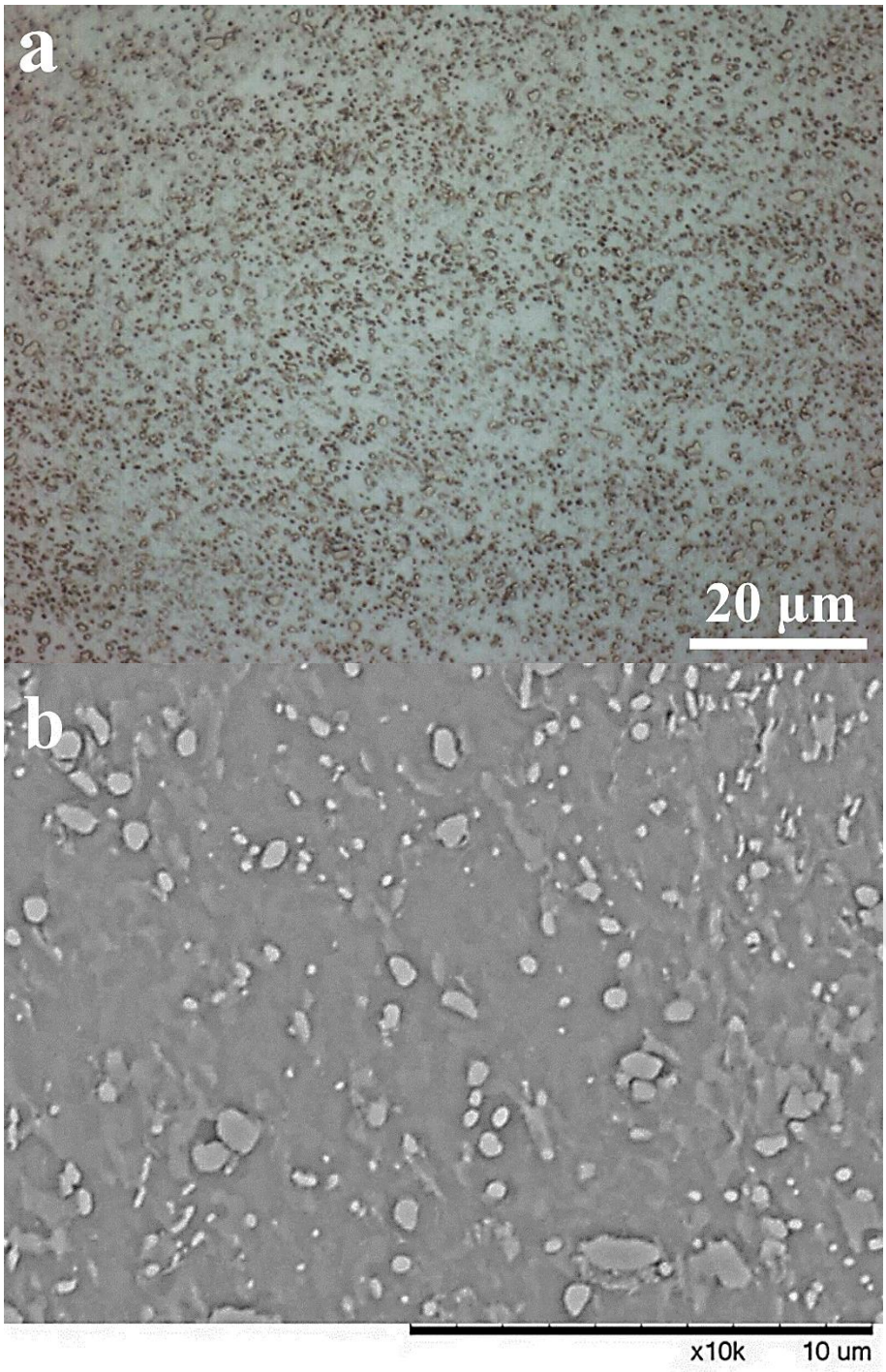
Çizelge 6.2: AISI 4140 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları.

Çelik Kalitesi (AISI)	Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)
4140	800	10	670	30	1-5-10

Belirlenen ısıl işlem parametreleri altında 1 çevrim olarak gerçekleştirilen küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda sıcak haddelenmiş numunenin mikroyapısı Şekil 6.9'da soğuk haddelenmiş numunenin mikroyapısı ise Şekil 6.10'da görülmektedir.



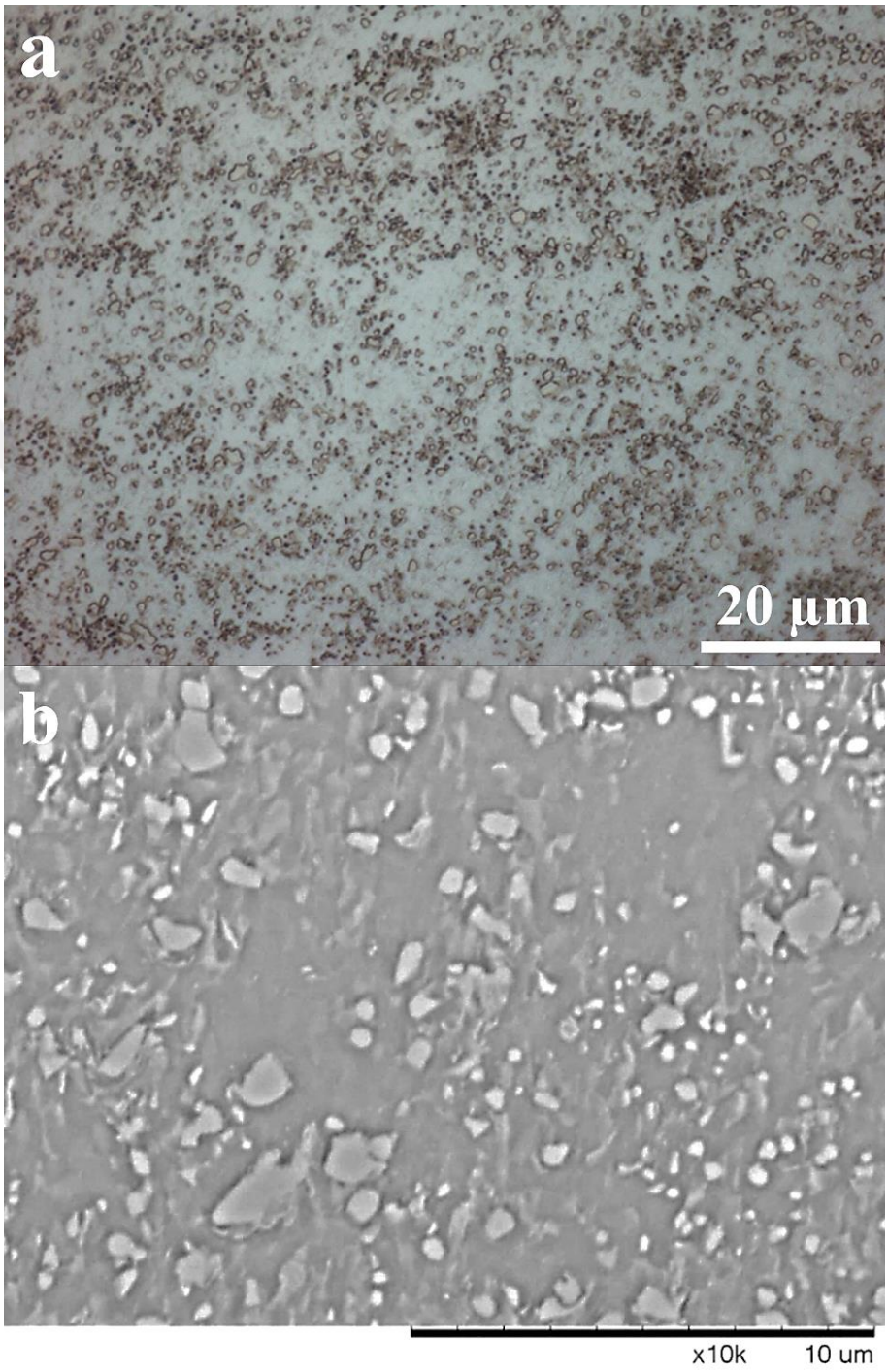
Şekil 6.9 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



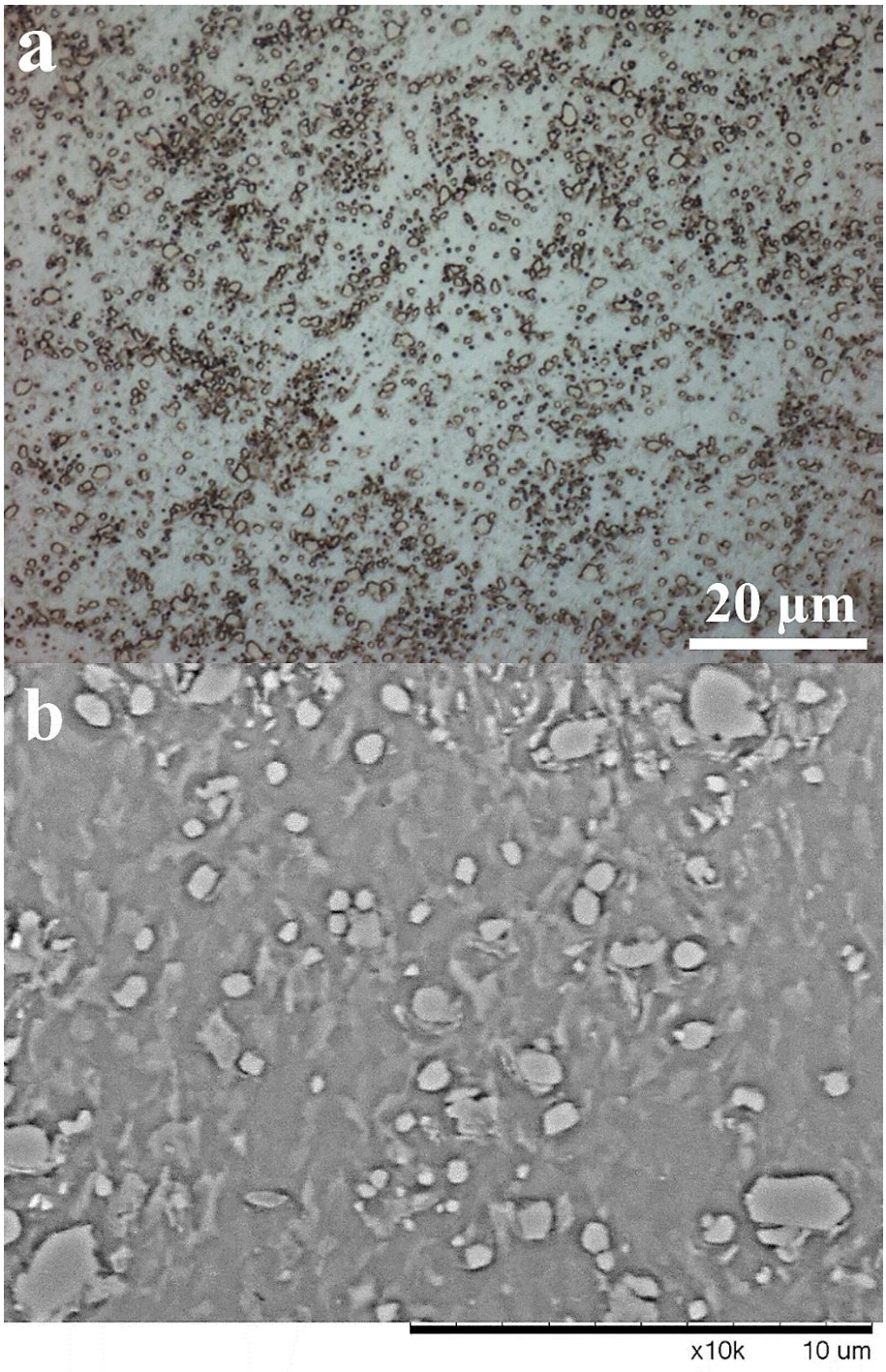
Şekil 6.10 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Yapılan değerlendirme sonucunda mikroyapılarda kısmi olarak lamellerin bulunduğu tespit edilmiş olup istenen küreselliğin oluşmadığı gözlenmiştir. Isıl işlem süresinin yetersizliğinden dolayı yapıda küreselleşemeyen karbürlerin varlığının giderilmesi ve hedeflenen küreselliğe erişebilmesi için 1 çevrimin yeterli olmadığı ve çevrim sayısının arttırılması gerektiğine karar verilmiştir.

Lamellerin küresel hale gelmesi için gereken enerjinin sağlanması için küreselleştirme ısıl işlemi 5 çevrim yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Isıl işlem sonucunda sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de görülmektedir.



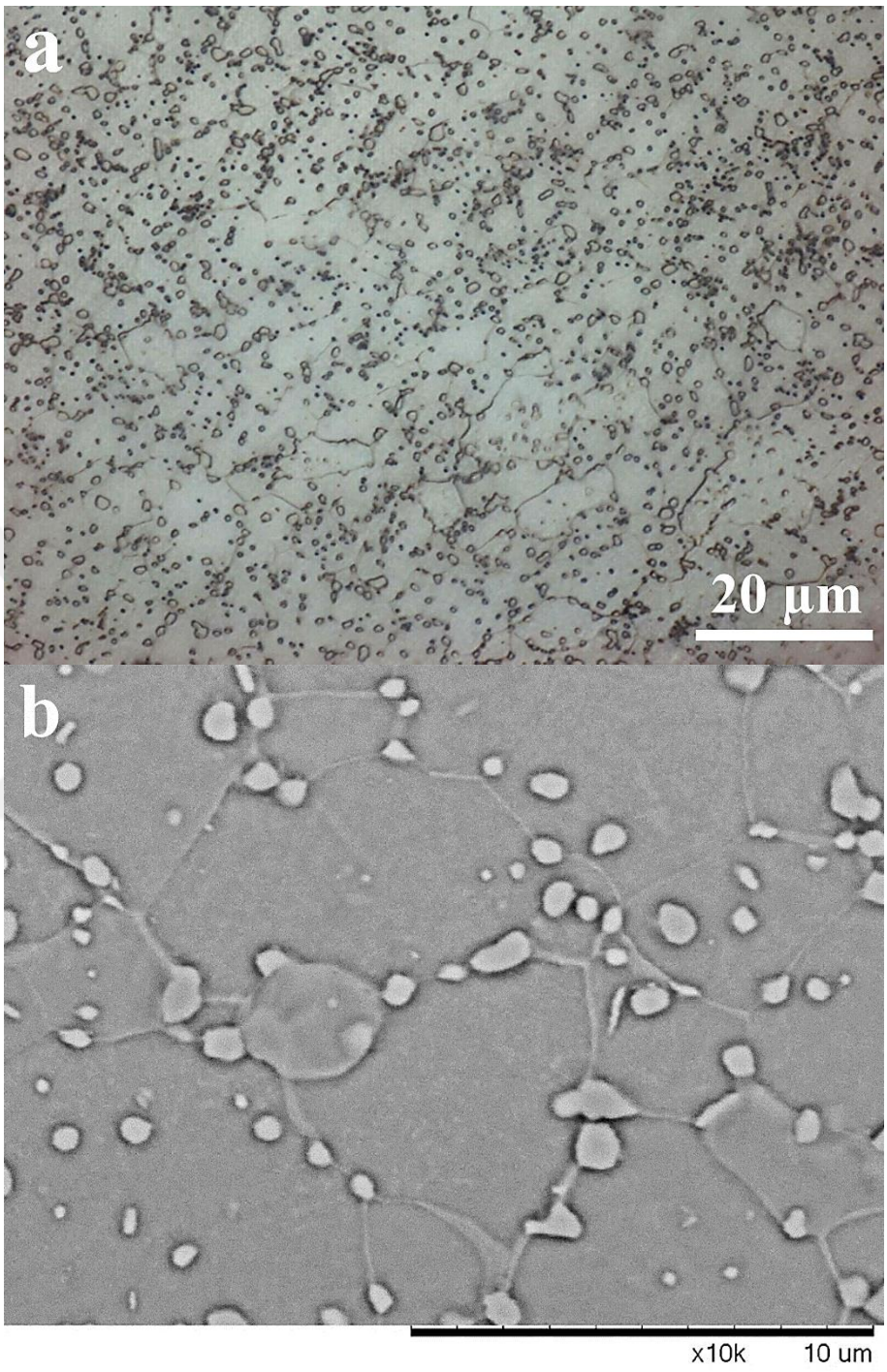
Şekil 6.11 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



Şekil 6.12 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

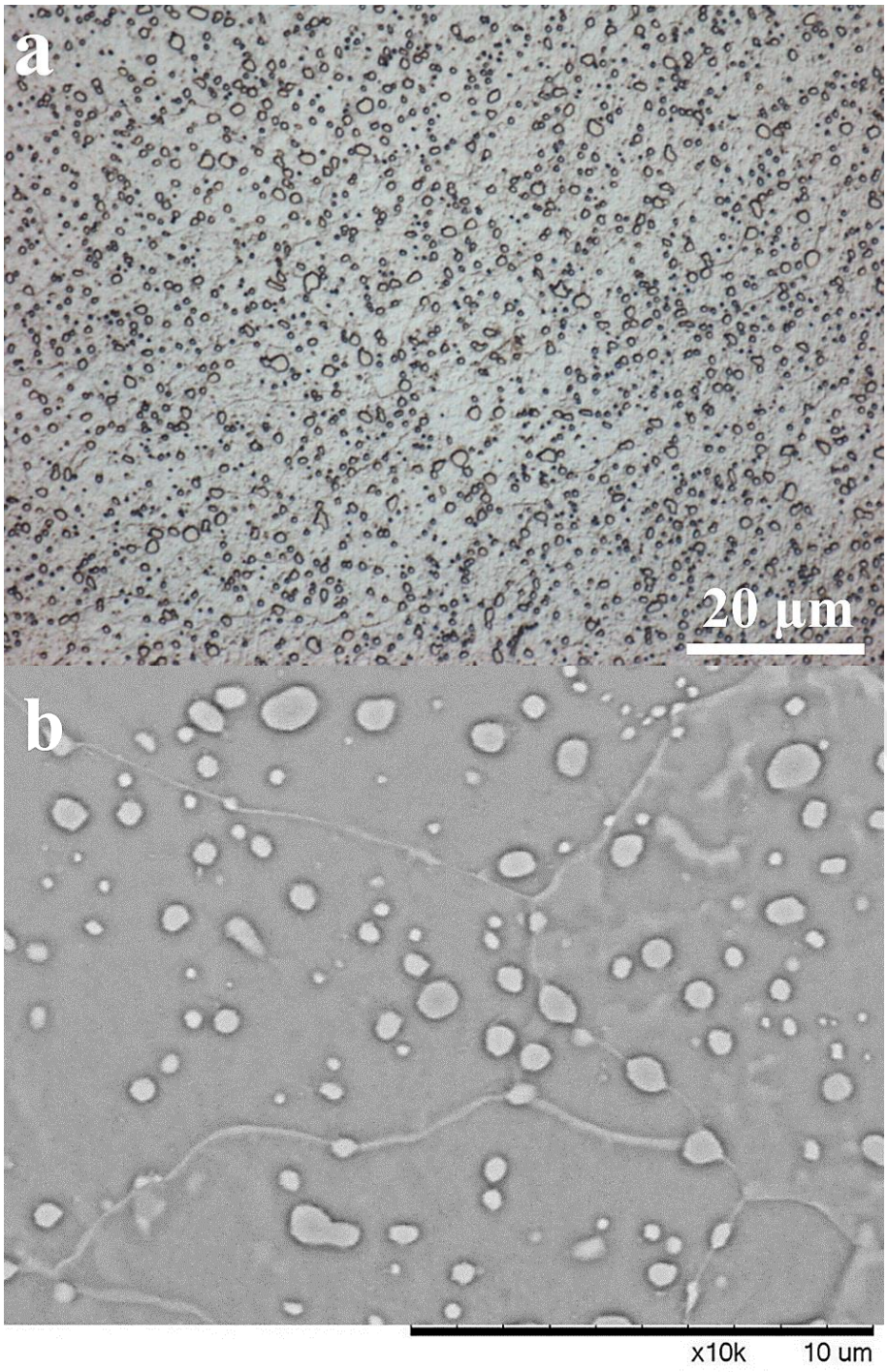
Gerçekleştirilen 5 çevrimli küreselleştirme ısıl işleminin ardından mikroyapı analizi yapılması sonucunda yapıda küreselliklerin homojen bir şekilde dağılımı tespit edilmiştir. Ancak kürelerin boyutlarının arttırılarak boyut dağılımlarının da homojen olması hedeflenmiştir. Bu sebeple 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi gerçekleştirilmiştir. 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlem sonucunda sıcak ve

soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de görülmektedir.



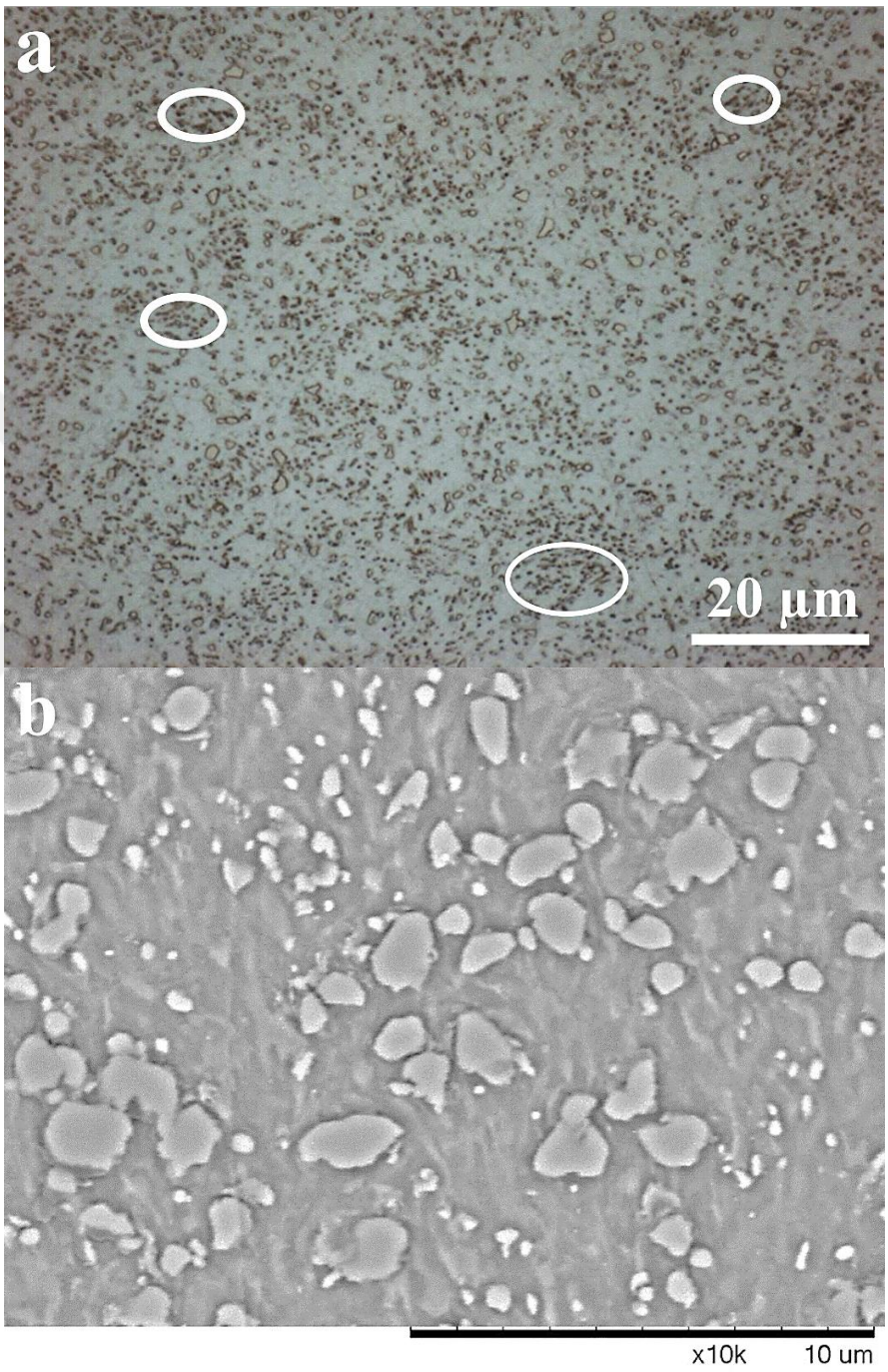
Şekil 6.13 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Yapılan 10 çevrimli küreselleştirme ısıl işleminin ardından optik ve taramalı mikroskoplar kullanılarak incelenen mikroyapılarda küresel mikroyapının sağlandığı yakalandığı belirlenmiştir.



Şekil 6.14 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800°C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Küreselleştirme ısıl işleminin, kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemi ile de karşılaştırılması amacıyla yaklaşık olarak aynı sürelere denk gelecek şekilde 680 °C'de 10 saatlik bir ısıl işlem planlanmıştır. Sıcak haddelenmiş ürünler arasında yapılacak kıyaslama kapsamında kritik sıcaklık altı ısıl işlem de yapılmış ve elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.15 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Yapılan incelemeler sonucunda kritik sıcaklık altı işlem sonucunda küreselliğin homojen bir şekilde dağılmadığı gözlenmiş olup kısmi lameler yapıların varlığı tespit edilmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen çevrimsel küreselleştirme işleminin, kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işleme göre daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

6.1.2 Sertlik analizleri

Farklı küreselleştirme işlemleri uygulanan sıcak ve soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin sertliği, sırasıyla Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de verilmiştir. Her bir sertlik değeri 10 ölçümün ortalamasıdır.

Çizelge 6.3: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin sertlik değerleri.

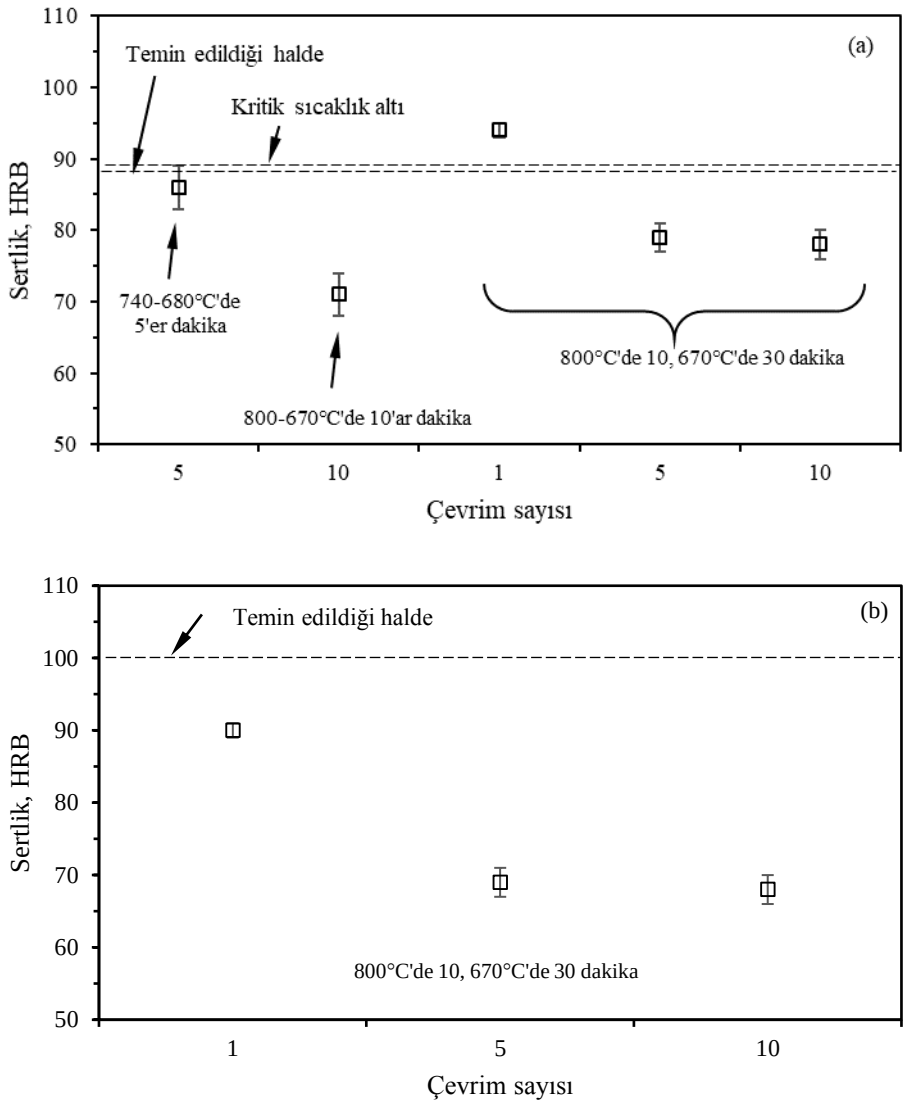
Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	88±2
740	5	680	5	5	86±3
800	10	670	10	10	71±3
800	10	670	30	1	94±1
800	10	670	30	5	79±2
800	10	670	30	10	78±2
-	-	680	600	-	89±2

Çizelge 6.4: Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin sertlik değerleri.

Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	100±1
800	10	670	30	1	90±2
800	10	670	30	5	69±2
800	10	670	30	10	68±3

HRB cinsinden yapılan bu ölçümlerde ısıl işlem sonucunda malzemelerin orijinal hallerine göre sertliğinin azaldığı tespit edilmiş olup, küresel mikroyapının malzeme sertliğini azalttığı gözlenmiştir. Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de belirtilen sertlik değerleri, grafik olarak ayrıca Şekil 6.16'da verilmiştir. Buna göre, çevrimsel

küreselleştirme işleminde üst sıcaklığın artmasıyla ve alt sıcaklığın azalmasıyla sertliğin arttığı, çevrim sayısı arttıkça sertliğin düştüğü görülmüştür.

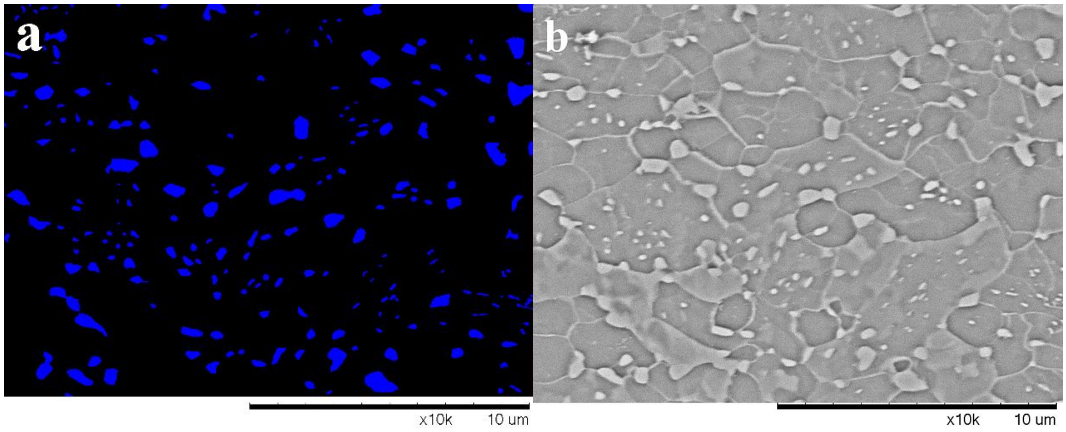


Şekil 6.16 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi.

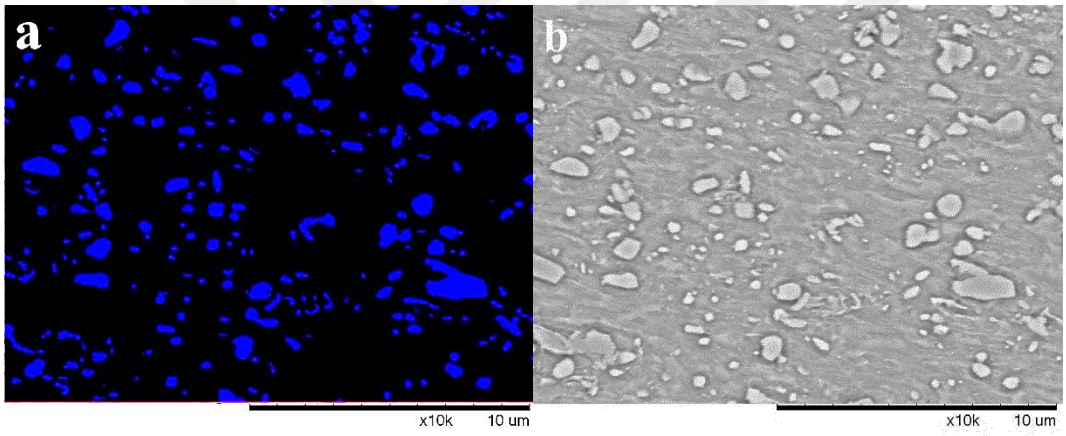
6.1.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler

Mikroyapıların incelenmesinin ardından yapıda bulunan tanelerin küresellik oranlarının, sementit/ferrit oranının, ortalama küre çaplarının ve en/boy oranlarının analiz edilerek ısıl işlem sonucundaki değişimler hesaplanmıştır. Öncelikle ısıl işlem uygulanmamış numuneler incelenmiştir. AISI 4140 kalite çeliğin sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerinin Clemex görüntü analiz yazılımı ile yapılan karbür

analizlerine ait sonuçlar, sırasıyla, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiş, ayrıca görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5'de belirtilmiştir.



Şekil 6.17 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



Şekil 6.18 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

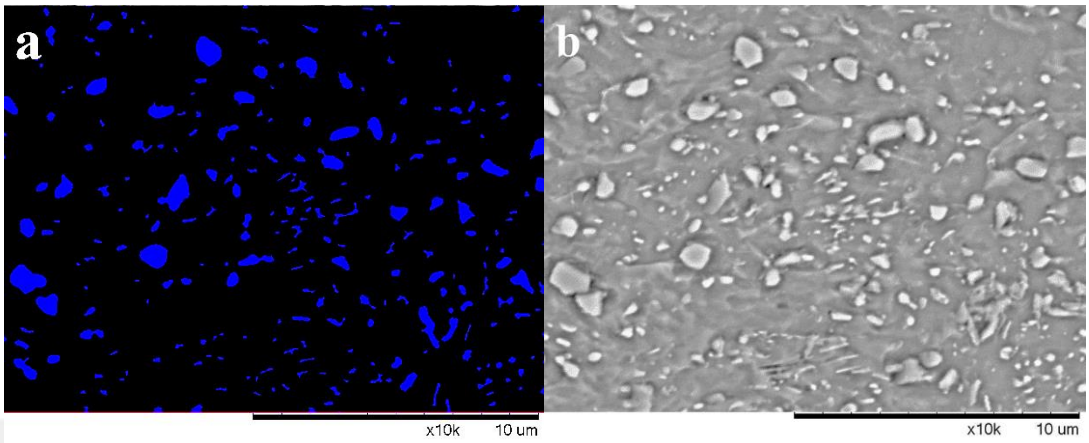
Çizelge 6.5: AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı*	En/Boy Oranı
Sıcak	0,36±0,22	6,15	0,75±0,17	2,02±0,77
Soğuk	0,23±0,14	8,31	0,65±0,23	2,09±0,79

*Küresellik oranının 1 olması karbürün tam küresel olduğunu belirtmektedir.

Gerçekleştirilen analiz sonucunda AISI 4140 kalitesindeki çelik numunesinin mikroyapısında perlitik yapıların varlığı nedeniyle küresellik oranı, sıcak ve soğuk haddelenmiş çeliklerde sırasıyla 0,75 ve 0,65 düzeyindedir.

Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740- 680 °C sıcaklıklarda 5'er dakika ve 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası yapılan Clemex görüntü analizine ait fotoğraflar, Şekil 6.19'da, sonuçlar ise Çizelge 6.6'da verilmiştir.

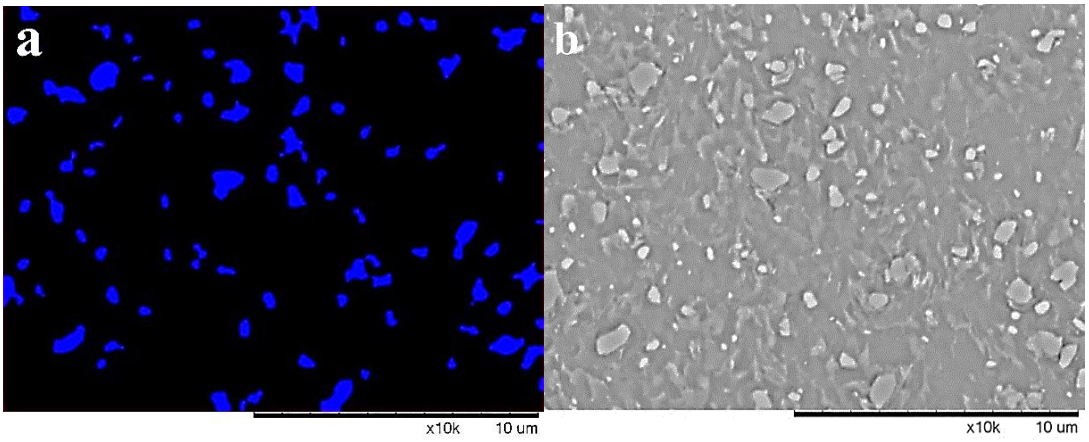


Şekil 6.19 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680°C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

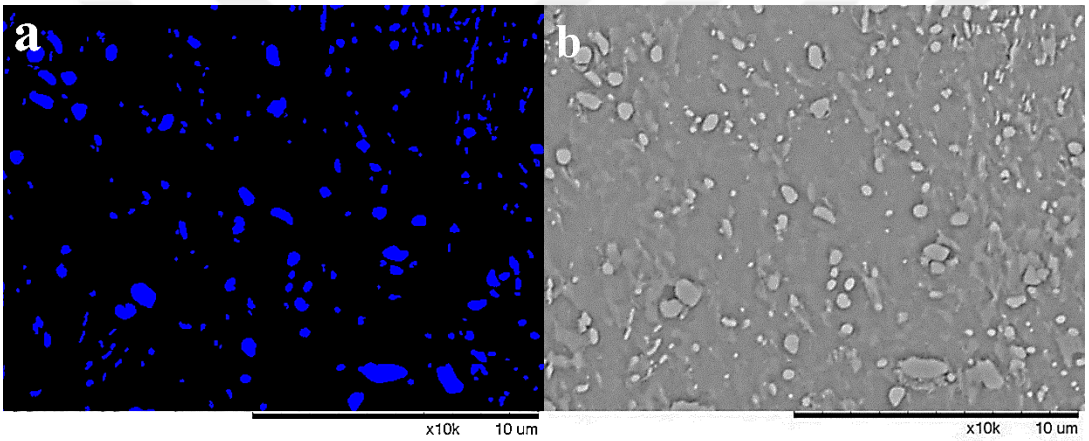
Çizelge 6.6: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680°C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,14±0,10	6,74	0,81±0,23	2,15±0,95

AISI 4140 kalite çelikte 740 - 680°C'de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası küresellik ve en/boy oranının arttığı gözlenmiştir. Ancak bunun yanı sıra ortalama çap ve % alan değerleri azalmıştır. Nihai küreselleştirme parametrelerinin belirlenmesinin ardından, 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 1 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi sonucu elde edilen görüntü analiz yazılımı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de verilmiştir. Söz konusu analizlerin sonuçları ise Çizelge 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.20 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



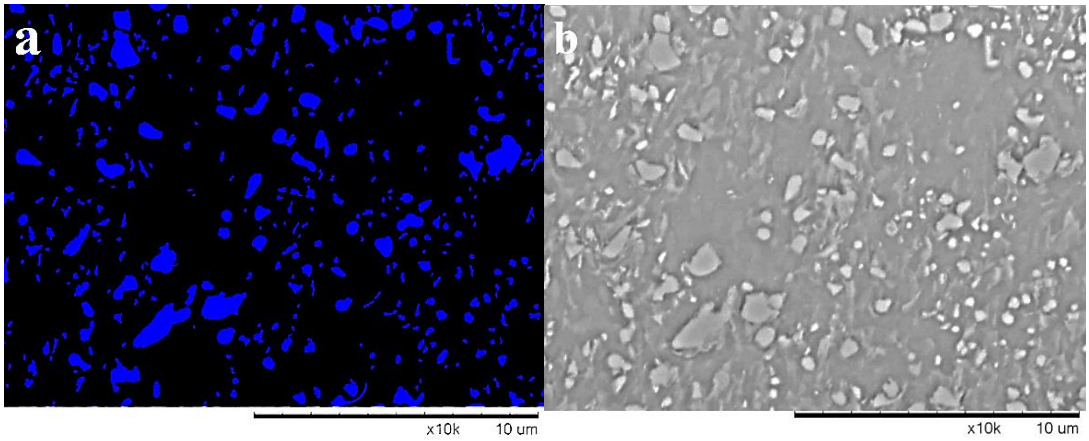
Şekil 6.21 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.7: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670°C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

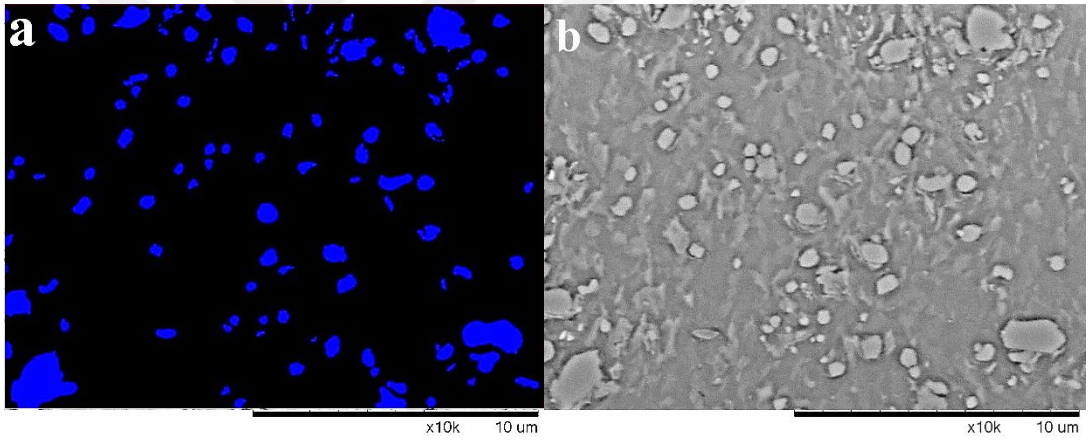
Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,21±0,11	5,97	0,71±0,26	2,12±1,63
Soğuk	0,12±0,08	6,34	0,90±0,18	2,58±7,37

800°C'de 10 dakika ve 670°C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası küresellik oranında artış gözlenmiş olmasına rağmen ortalama çapta azalma gözlenmiştir. Bu nedenle küreselleştirme ısıl işlemi için 1 çevrimin yeterli olmadığı görülmüştür. Aynı sıcaklık ve süre değerlerinde 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için,

sırasıyla Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'de verilmiştir. Söz konusu analizlerin sonuçları ise Çizelge 6.8'de görülmektedir.



Şekil 6.22 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



Şekil 6.23 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

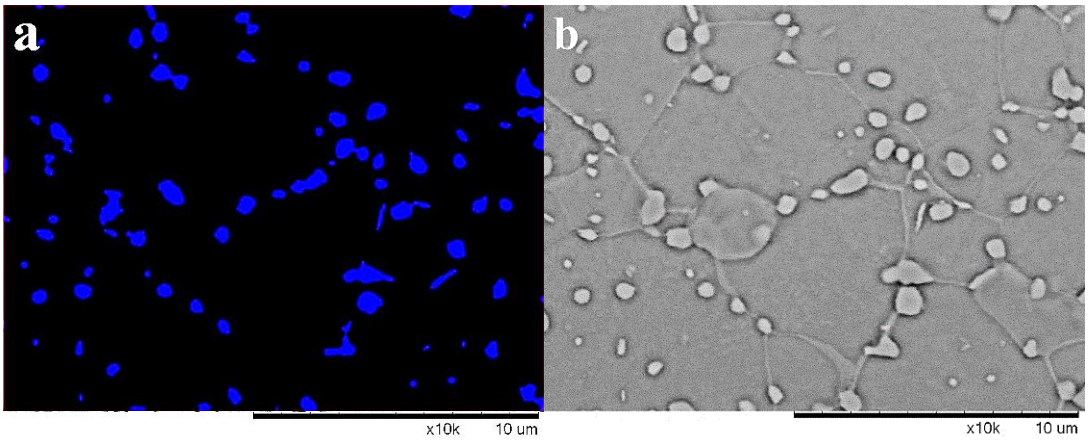
Çizelge 6.8: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,14±0,10	11,48	0,84±0,21	2,09±2,31
Soğuk	0,52±0,31	7,26	0,57±0,18	1,78±0,58

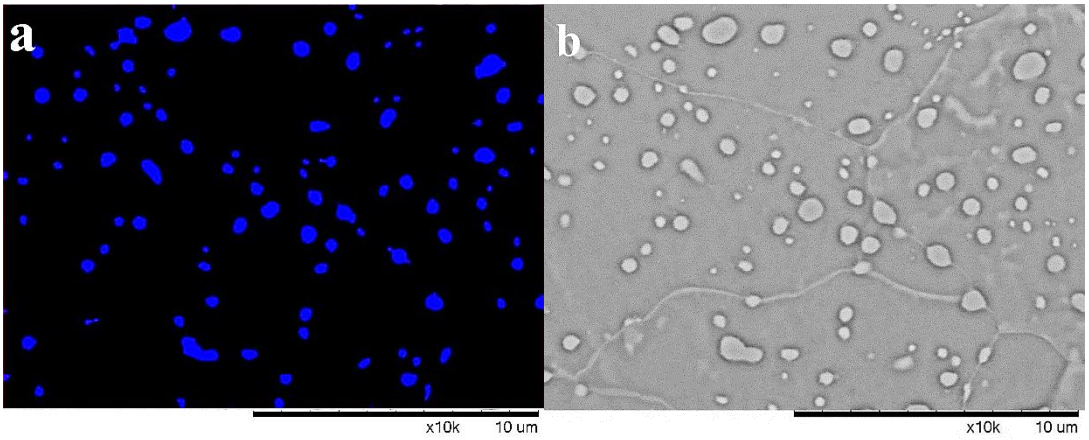
800°C'de 10 dakika ve 670°C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası, 1 çevrim yapılan işleme göre karbür hacim oranı artmıştır. Küresellik oranı, sıcak haddelenmiş numunelerde artarken, soğuk haddelenmiş numunelerde azalmıştır.

Ayrıca soğuk haddelenmiş numunelerde ortalama çap değerlerinin de arttığı görülmektedir.

Aynı sıcaklık ve sürede 10 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi sonucu elde edilen görüntü analiz yazılımı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'de verilmiştir. Söz konusu analizlerin sonuçları ise Çizelge 6.9'da görülmektedir.



Şekil 6.24 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

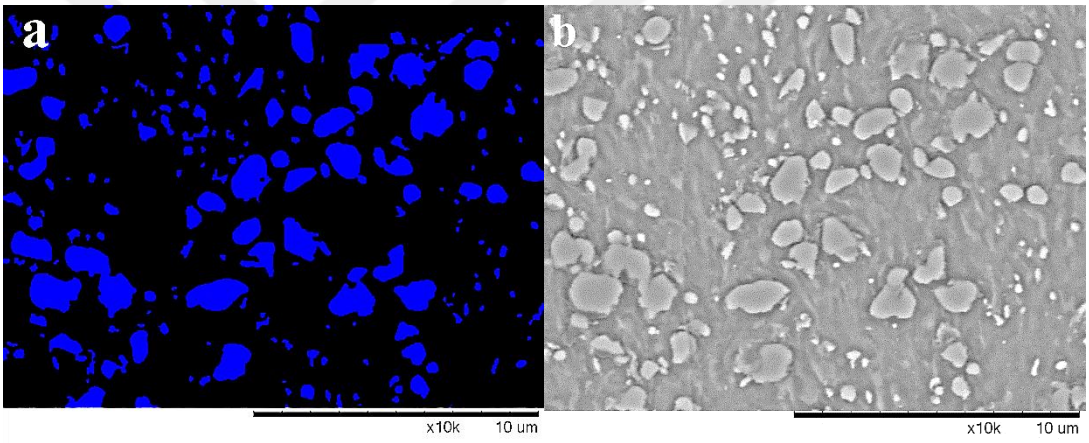


Şekil 6.25 : Soğuk haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.9: AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,22±0,11	5,21	0,71±0,29	3,81±5,50
Soğuk	0,21±0,11	4,97	0,91±0,21	2,79±10,80

Çizelge 6.9'dan görüldüğü gibi, 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemiyle karbürlerin homojen bir boyutta dağılımları elde edilmiş olup, karbür hacim oranı ise azalmıştır. Birim alan başına düşen karbür sayısı ve ortalama çap düşmüştür. Çevrimsel küreselleştirmenin yanı sıra 680 °C'de 10 saat tutularak sıcak haddelenmiş numunelerde gerçekleştirilen kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemine ait Clemex görüntü analiz fotoğrafı Şekil 6.26'da, analiz sonuçları ise Çizelge 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.26 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

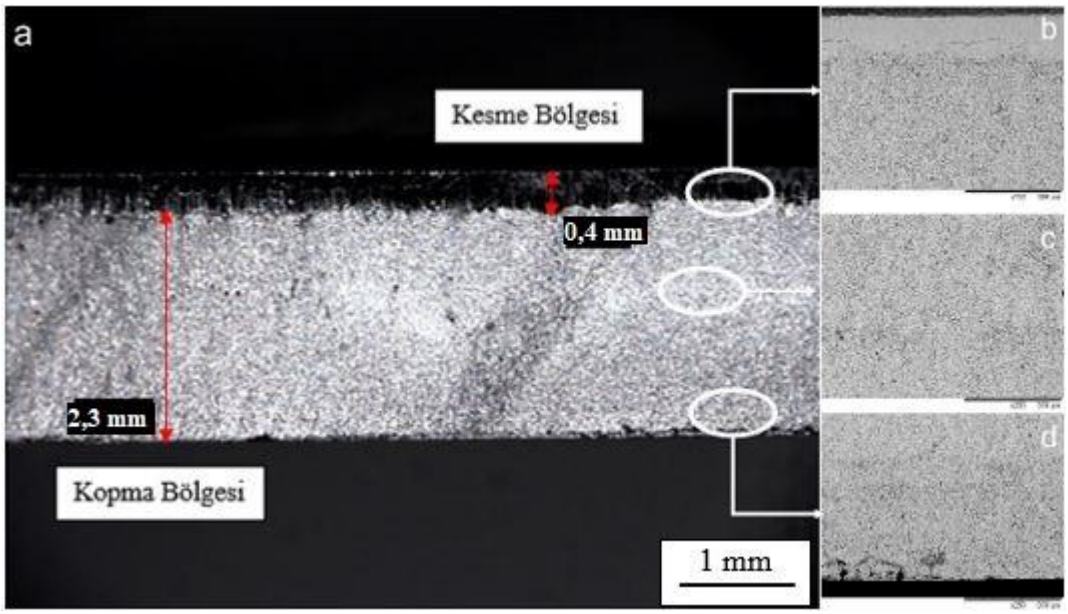
Çizelge 6.10: Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,21±0,18	17,31	0,85±0,23	1,86±1,45

Kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemiyle küresellik oranı daha yüksek elde edilmiş olmakla birlikte, karbür boyut dağılımının heterojen olduğu görülmüş, bu nedenle 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işleminin daha homojen bir mikroyapı sağladığı sonucuna varılmıştır.

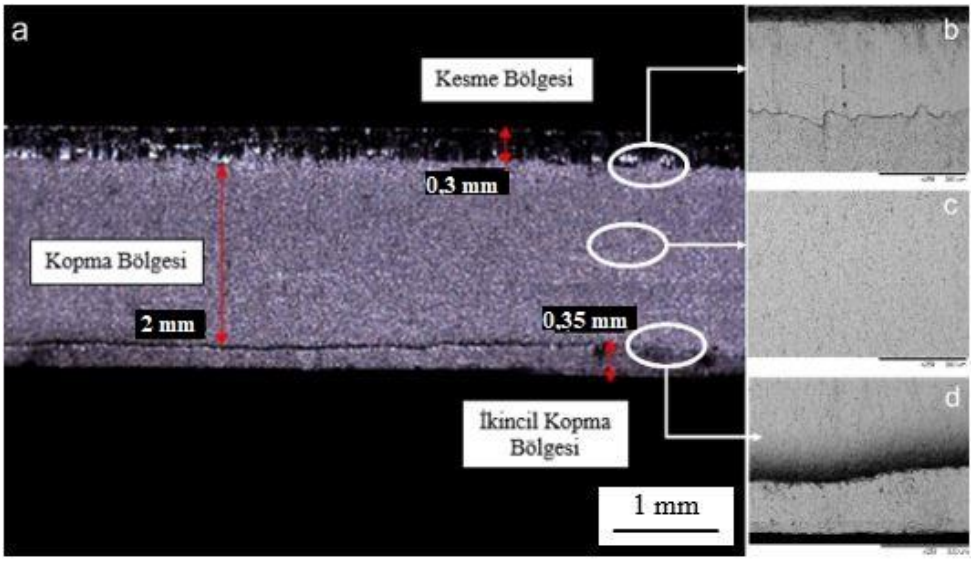
6.1.4 Kırılma yüzeyinin incelenmesi

Küreselleştirme işlemleri sonrasında Erichsen cihazının derin çekme işlemi için taslak çıkarma modunda numuneler kesilmiş ve kırılma yüzeyleri stereo mikroskop ve SEM ile incelenmiştir. Temin edildiği haldeki numunelerin kesme işlemi sonrası kırılma yüzeyleri Şekil 6.27'de verilmiş olup, kopma kırılmasının kesme kırılmasına göre daha geniş bir alanı kapladığı görülmüştür. Yapılan değerlendirme sonucunda 0,4 mm kesme bölgesi, 2,3 mm kopma bölgesi hesap edilmiştir.



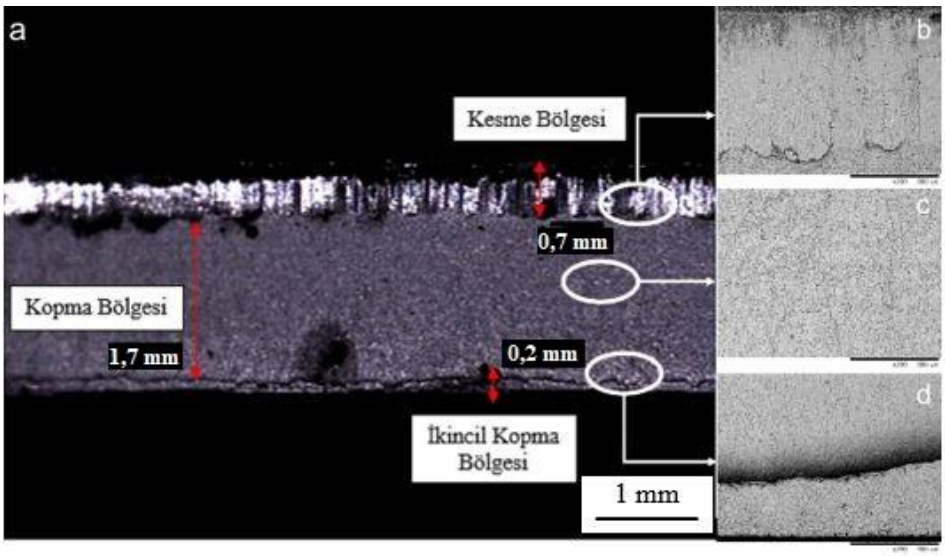
Şekil 6.27 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin temin edildiği halde Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı.

Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika, 670 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonucunda elde edilen numunenin Erichsen testi sonucunda gözlenen kırılma yüzeyi Şekil 6.28'de verilmiştir. Bu numunenin kesme yüzeyinin, temin edildiği halde test edilen numuneyle benzer karakteristiklere sahip olduğu, dolayısıyla 1 çevrim yapılan küreselleştirme işleminin kesme kırılmasına belirgin bir katkısı olmadığı değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda 0,3 mm kesme bölgesi, 2 mm kopma bölgesi hesap edilmiştir. Ayrıca numunenin alt tarafında 0,35 mm kalınlığında ikincil kopma yüzeyi gözlenmiştir.



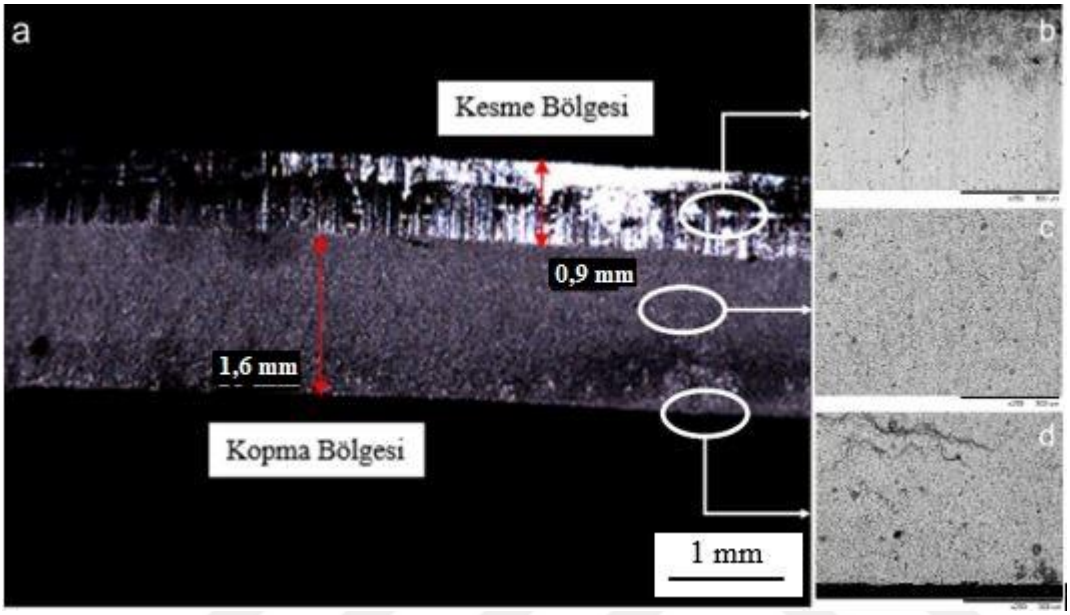
Şekil 6.28 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 1 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı.

800 °C'de 10 dakika, 670 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi uygulanan numunenin Erichsen testi sonucu gözlenen kırılma yüzeyi Şekil 6.29'da verilmiştir. Yapılan değerlendirmede 0,7 mm kesme, 1,7 mm kopma bölgesi hesap edilmiştir. Ayrıca numunenin alt tarafında 0,2 mm kalınlığında ikincil kopma yüzeyi gözlenmiştir. Yapılan kırılma işlemi sonrasında, temin edildiği halde ya da 1 çevrim küreselleştirme uygulanan numuneye göre kesme yüzeyinde artış gözlenmiştir.



Şekil 6.29 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı.

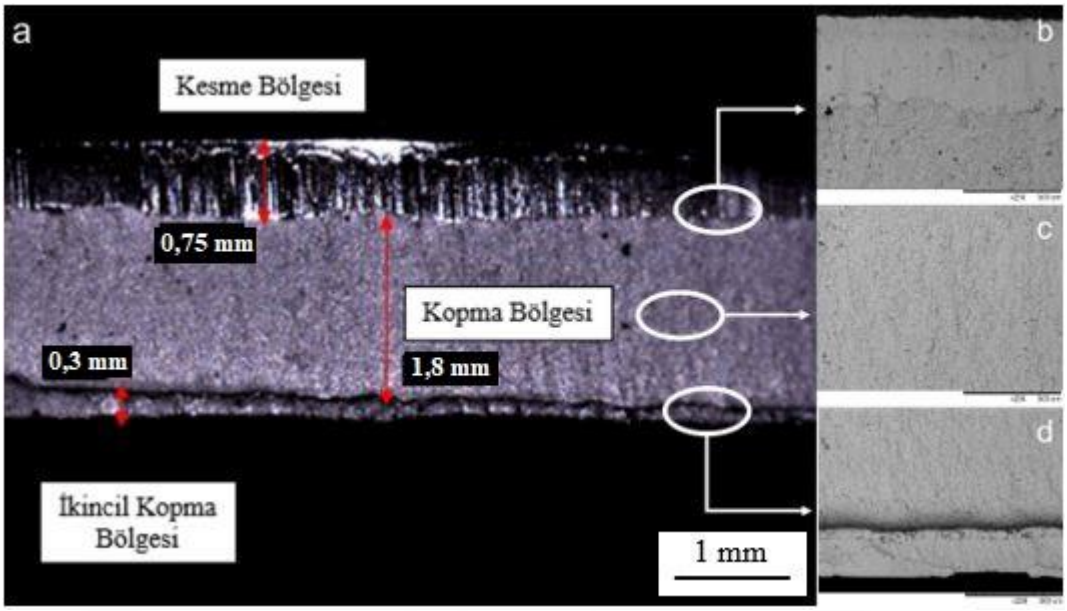
800 °C'de 10 dakika, 670 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim küreselleştirme işlemi sonrası yapılan Erichsen testi sonucunda gözlenen kırılma yüzeyi Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda 0,9 mm kesme bölgesi, 1,6 mm kopma bölgesi hesap edilmiştir. Belirlenen ısıl işlem parametreleri altında 10 çevrim uygulanan deney sonucunda kesit görüntüsünde kesme bölgesinin arttığı görülmüştür.



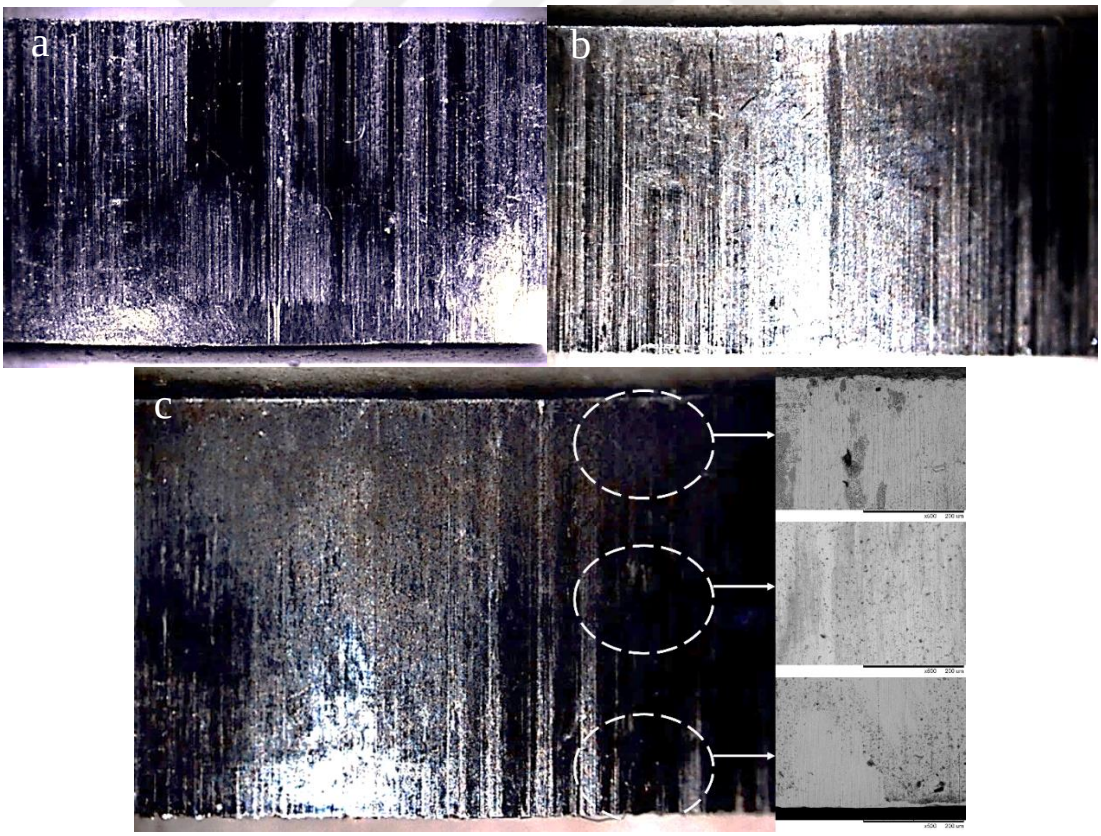
Şekil 6.30 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı.

Çevrimsel küreselleştirme yapılan numunelerden sonra, 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı ısıl işlem uygulanan numunenin Erichsen cihazında kesme sonrası kırılma yüzeyi Şekil 6.31'de verilmiştir. Yapılan değerlendirmede 0,7 mm kesme, 1,7 mm kopma bölgesi hesap edilmiştir. Ayrıca numunenin alt tarafında 0,2 mm kalınlığında ikincil kopma yüzeyi gözlenmiştir. Bu numunenin kayma kırılması bölgesinin genişliğinin, 10 çevrim küreselleştirme uygulanan numune ile karşılaştırılabilir olduğu belirlenmiş, ancak numunenin alt kısmında ayrıca ikincil bir kopma bölgesi de gözlenmiştir.

Temin edildiği halde bulunan ve küreselleştirme işlemlerine tabi tutulan numunelerin endüstriyel hassas kesme işlemi sonrasındaki kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları Şekil 6.32'de verilmiş olup, tüm numunelerde %100 kesme kırılması yüzeyi elde edilmiştir.



Şekil 6.31 : Sıcak haddelenmiş AISI 4140 kalite çeliğin 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı ısıl işlem uygulandıktan sonra Erichsen cihazında kesilmesi sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin (a) Stereo Mikroskop fotoğrafı ile (b) Üst, (c) Merkez ve (d) Alt bölgelerinin SEM fotoğrafı.

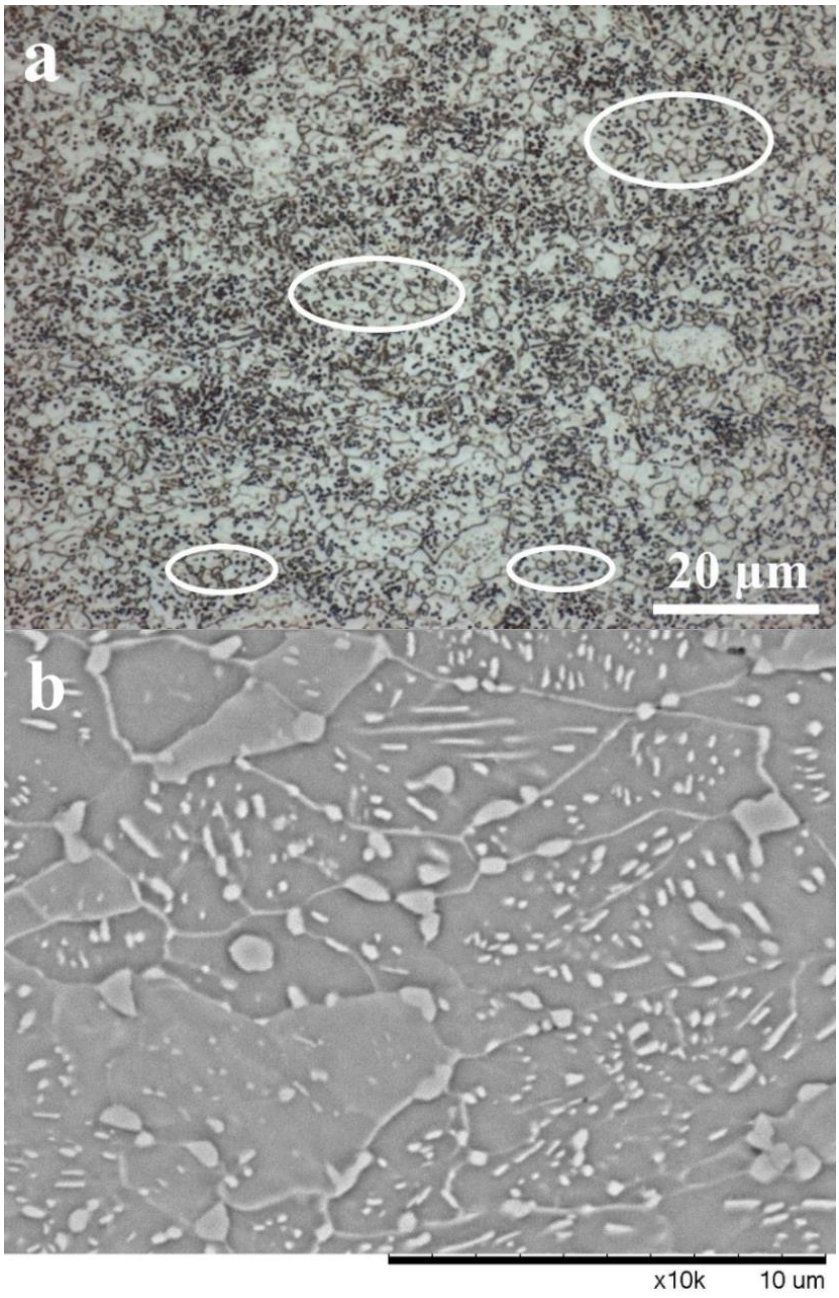


Şekil 6.32 : Endüstriyel hassas kesme işlemine tabi tutulan (a) Temin edildiği haldeki, (b) 800 °C'de 10 dakika ve 670 °C'de 30 dakika süreyle 10 çevrim küreselleştirme işlemi uygulanan ve (c) 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı küreselleştirme uygulanan numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları.

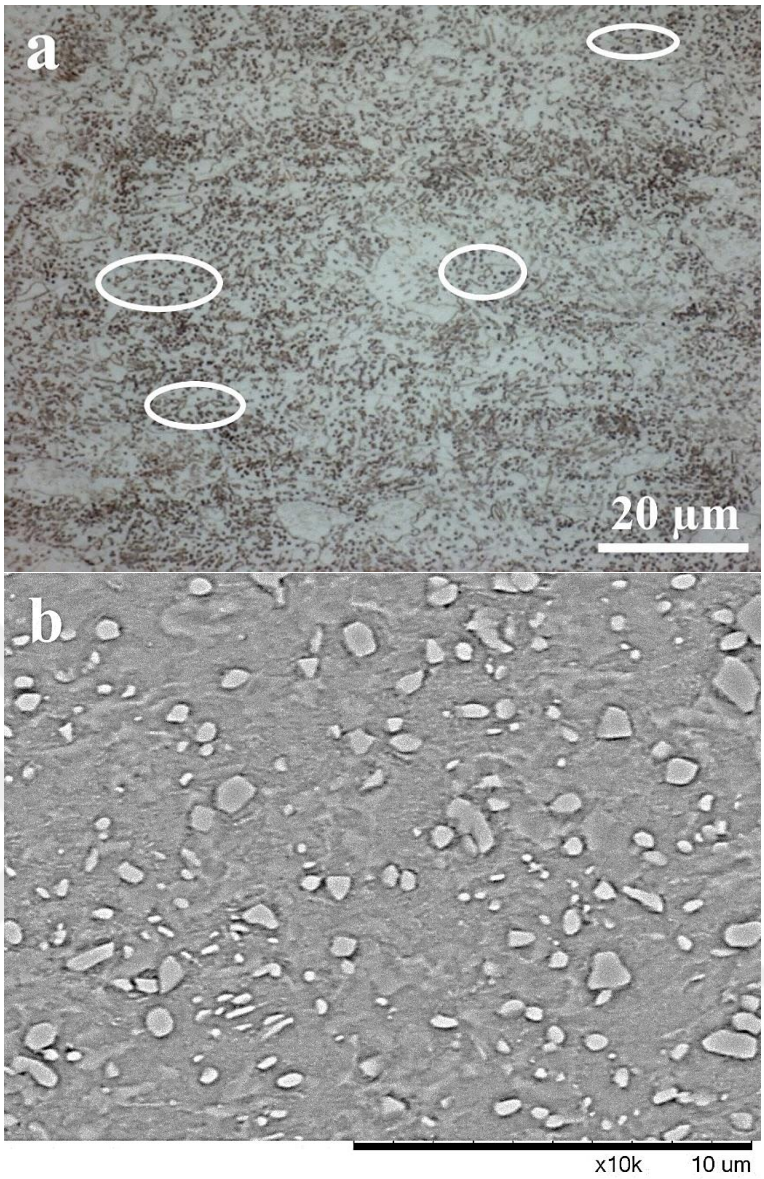
6.2 AISI 6150 Kalite Çelik

6.2.1 Mikroyapıların incelenmesi

Sıcak ve soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki optik mikroskop ve SEM fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'de görülmektedir. Bu çeliğin temin dildiği halde kısmen küresel bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.33 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.



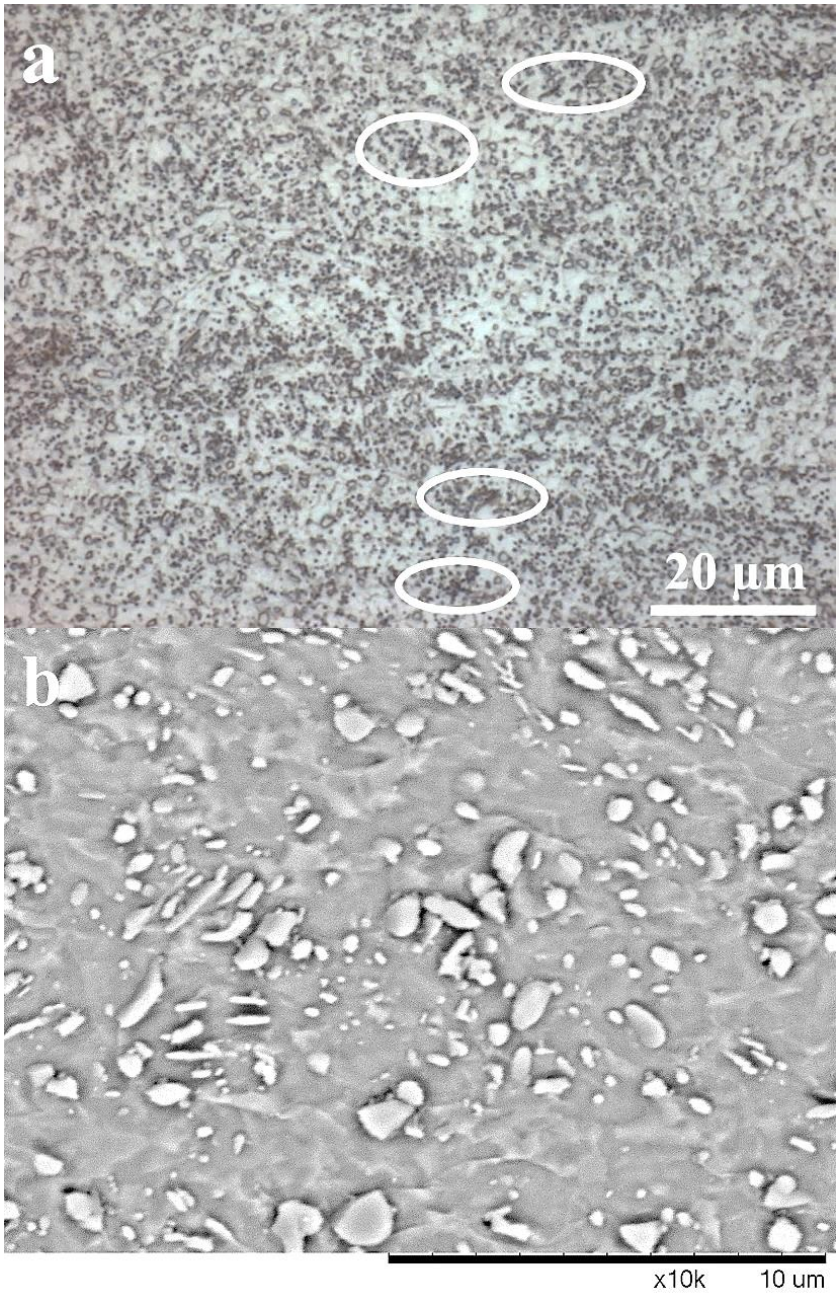
Şekil 6.34 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

AISI 6150 kalite çelikte karbürlerin kısmen küresel olduğu görülmüş ve uygulanacak küreselleştirme işlemleriyle karbürlerin küreselliğinin arttırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikle çevrimsel küreselleştirme işlemi yapılmasına karar verilmiştir. AISI 6150 kalite çeliğin Eşitlik 5.1-5.3 ile hesaplanan karbon eşdeğeri ile A_{c1} ve A_{c3} sıcaklıkları Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11: AISI 6150 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları.

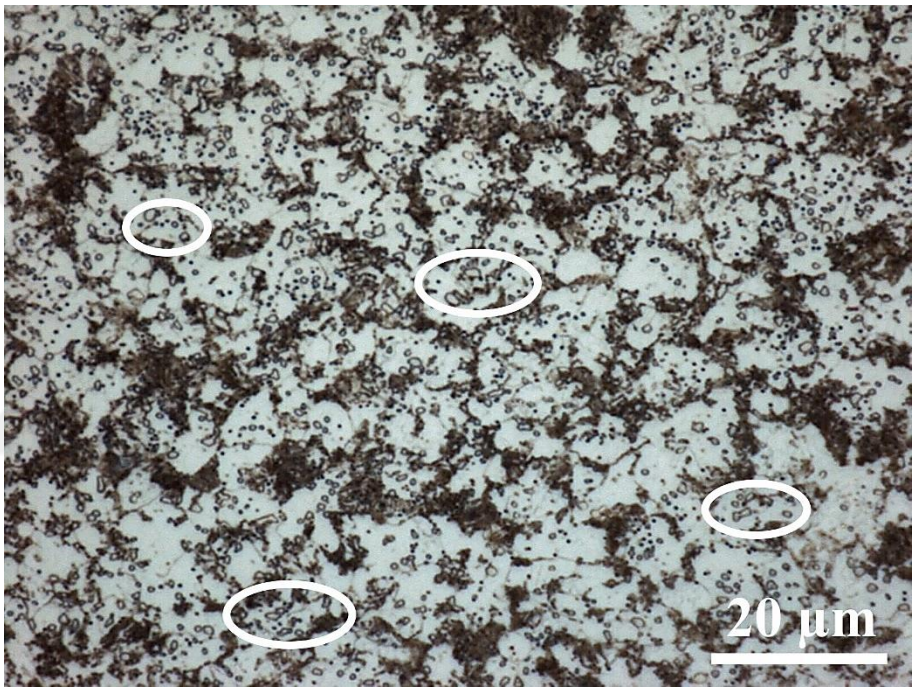
$C_{eş}$ (%)	**A_{c1} (±11,5˚C)**	**A_{c3} (±16,7˚C)**
0,88	694	787

Çevrimsel küreselleştirme ısıl işleminin uygulanması sırasında östenit ve sementit bölgesine çıkılarak küreselleştirmenin hızlandırılması sağlanacaktır. Ancak, öncelikle numuneye 740 - 680 °C sıcaklıklarında 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme uygulanarak AISI 4140 çelik kalitesiyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Belirtilen koşullarda sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğe uygulanan küreselleştirme işlemi sonrası oluşan mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.35'de verilmiştir.



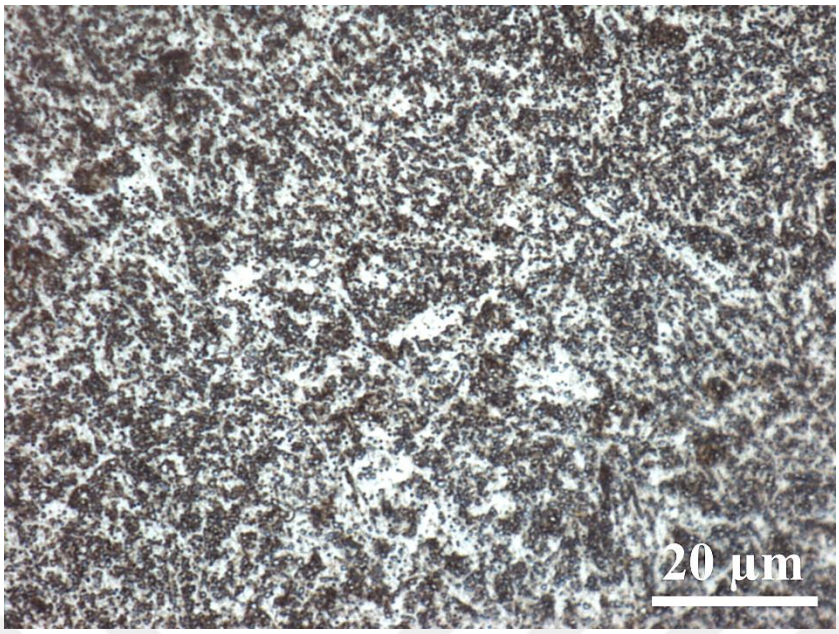
Şekil 6.35 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Şekil 6.35'de görülen mikroyapı fotoğraflarından, küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda karbürlerin küreselleşme oranlarının arttığı ancak lameler morfolojideki tanelerin de hala varlığı koruduğu gözlenmiştir. Daha sonra tamamen lameler karbürlerden oluşan başlangıç mikroyapısının küreselleşmeye etkisini görmek amacıyla numunelere normalizasyon uygulanmıştır. Normalizasyon 900 °C'de 15 dakika süreyle uygulanmış ve elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.36'da verilmiştir. Bu işlem sonunda, küresel karbür sayısı azalmış, lameler morfoloji oluşmuş, ancak tamamen lameler bir mikroyapı elde edilememiştir. Bu nedenle östenitleme sıcaklığının ve süresi 950°C ve 30 dakika olarak uygulanmıştır.



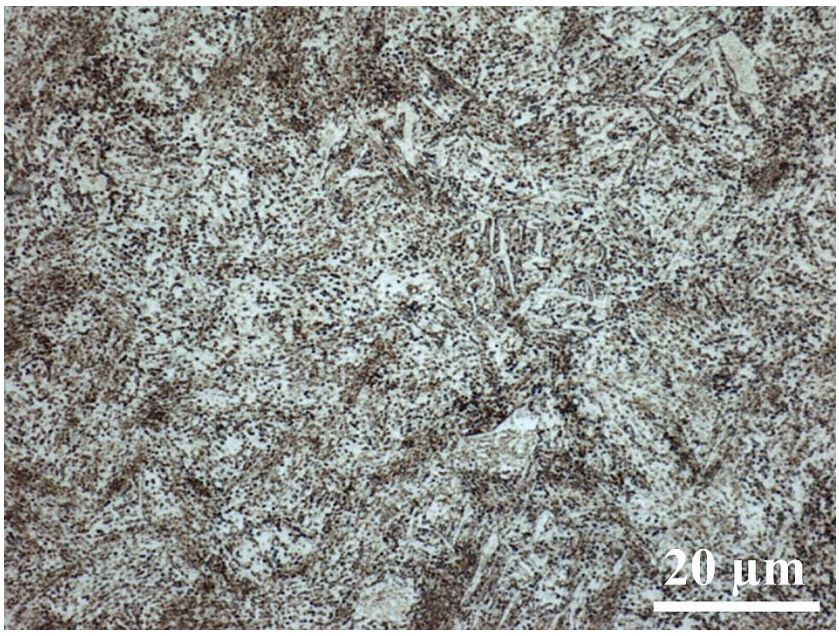
Şekil 6.36 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Şekil 6.37'de 950°C'de 30 dakika süreyle östenitlendikten sonra havada soğutularak normalize edilen numunenin mikroyapı fotoğrafı görülmektedir.



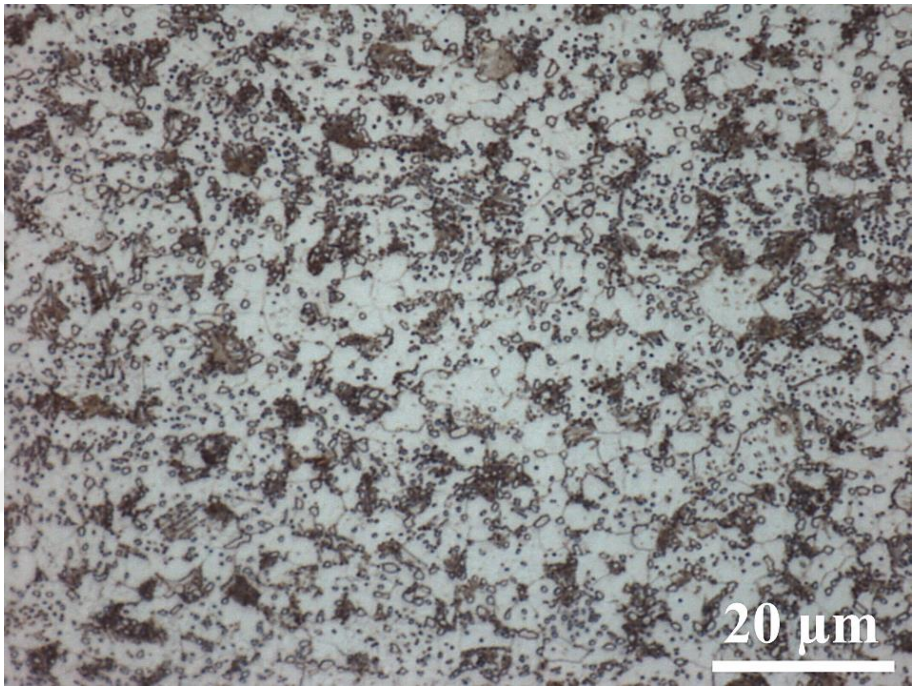
Şekil 6.37 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Yapılan normalizasyon ısıl işlemi sonucunda mikroyapıdaki küresel karbürlerin sayısının büyük ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Normalizasyon uygulanmış numuneler, 740 - 680 °C'de 5'er dakika tutularak 5 çevrim küreselleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Küreselleştirme uygulanan numunelerin mikroyapısının optik mikroskop fotoğrafı Şekil 6.38'de verilmiştir.



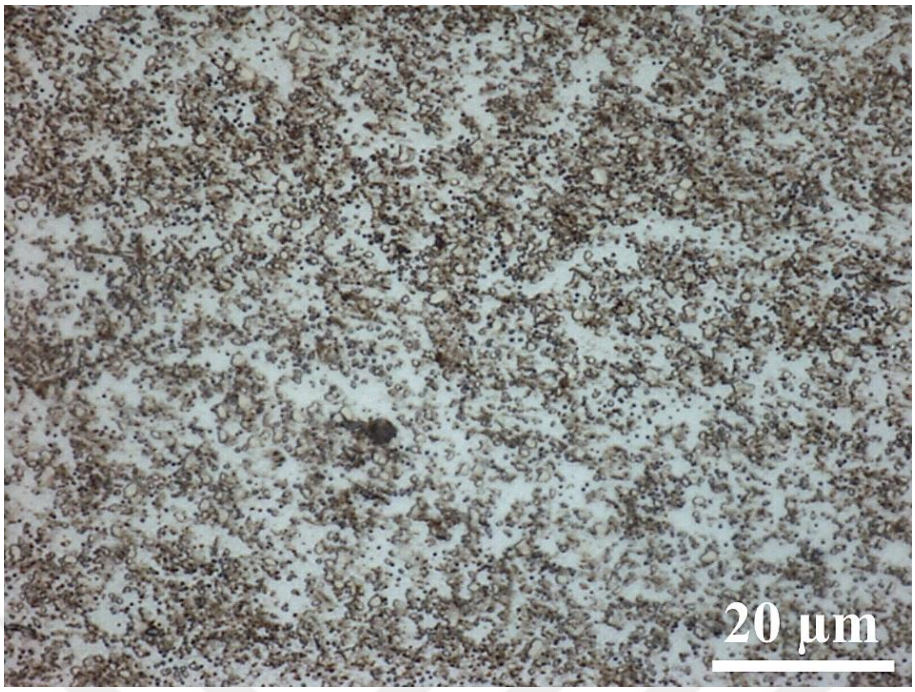
Şekil 6.38 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası mikroyapıda, lameler karbürlerin bulunduğu görülmüş ve yüksek oranda küresellik sağlanamamıştır. Bu nedenle, küresel karbür oranını arttırmak amacıyla küreselleştirme işlem koşulları değiştirilerek işlemler tekrarlanmıştır. Bu kapsamda normalizasyon koşulları değiştirilmeden küreselleştirme işleminin üst sıcaklığının arttırılarak 800 - 680 °C sıcaklık aralıklarında 5'er dakika 5 çevrim yapılmasına karar verilmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.39'da gösterilmiştir.



Şekil 6.39 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Çevrimsel küreselleştirmenin üst sıcaklığı 60°C arttırıldığında dahi, mikroyapıdaki karbürlerin tamamen küresel morfolojiye dönüşmediği belirlenmiştir. Dolayısıyla uygulanan küreselleştirme parametrelerinin, lameler morfolojide karbürlerin küresel morfolojiye dönüştürülmesi için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle küreselleştirme işleminin 800 - 680 °C sıcaklıklarında 10'ar dakika ve 10 çevrim olarak yapılmasına karar verilmiştir. Böylece üst sıcaklığın ve tutma süresinin etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Belirlenen küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapının optik mikroskop fotoğrafı Şekil 6.40'da gösterilmiştir.



Şekil 6.40 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

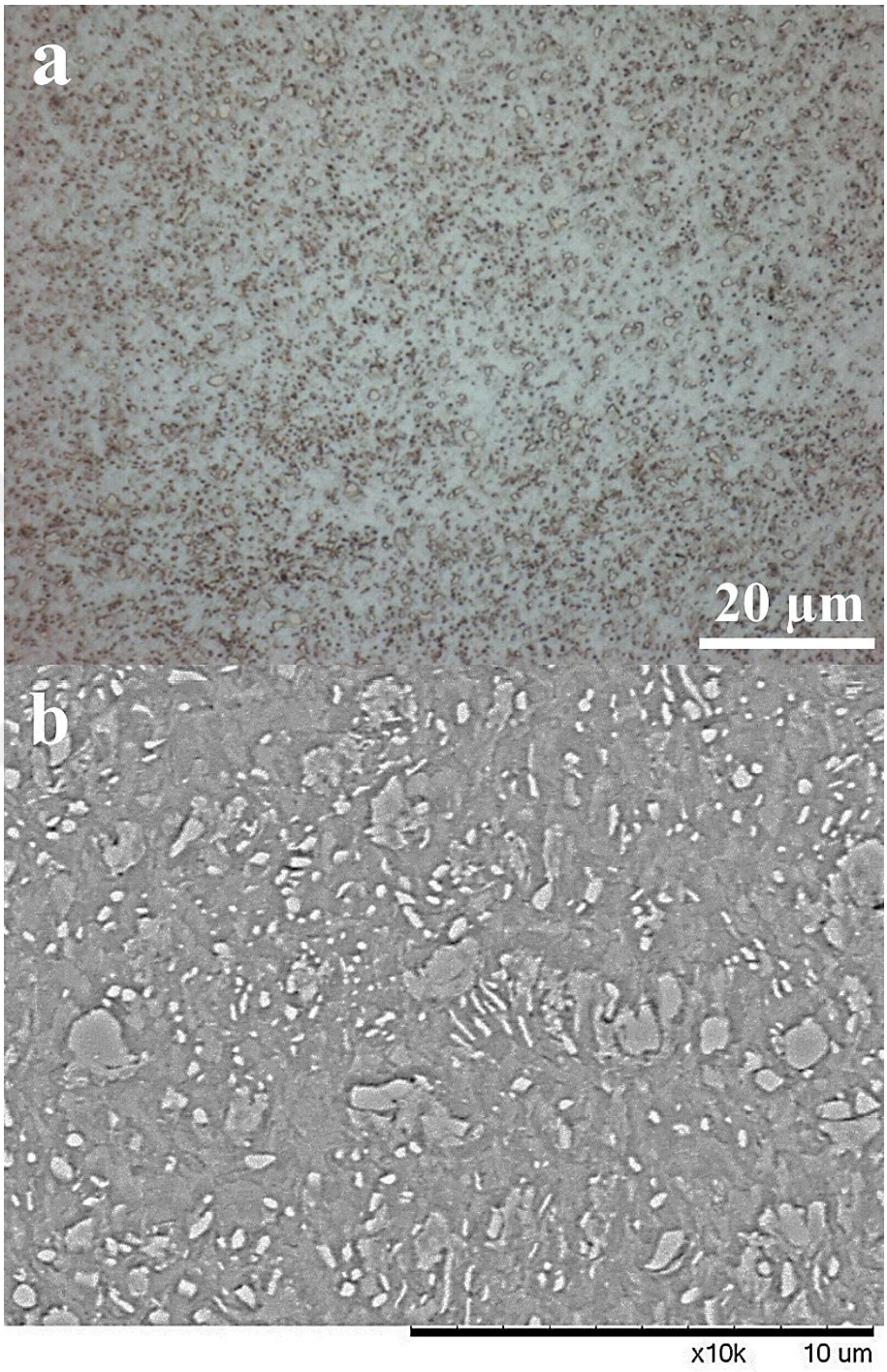
Küreselleştirme işleminde çevrim sayısının arttırılmasının, küresel karbür oranında sonucunda artışa neden olduğu görülmüştür. Ancak küresel karbürlerin mikroyapıda homojen bir dağılım göstermediği değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda küre sayısını, boyutunu ve dağılımını etkileyen koşul olarak görülen ikinci kademe sıcaklık değiştirilmiş ve küreselleştirme işlem koşulu AISI 6150 kalite çelik için yeniden belirlenmiştir. Oluşan küre sayısının arttırılması için üst sıcaklığın 740 °C'de 10 dakika alt sıcaklığın ise 680 °C'de 30 dakika olarak uygulanmasına ve çevrim sayısının 1, 5 ve 10 olarak uygulanmasına karar verilmiştir. Belirlenen parametreler Çizelge 6.12' de verilmiştir.

Çizelge 6.12: AISI 6150 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları.

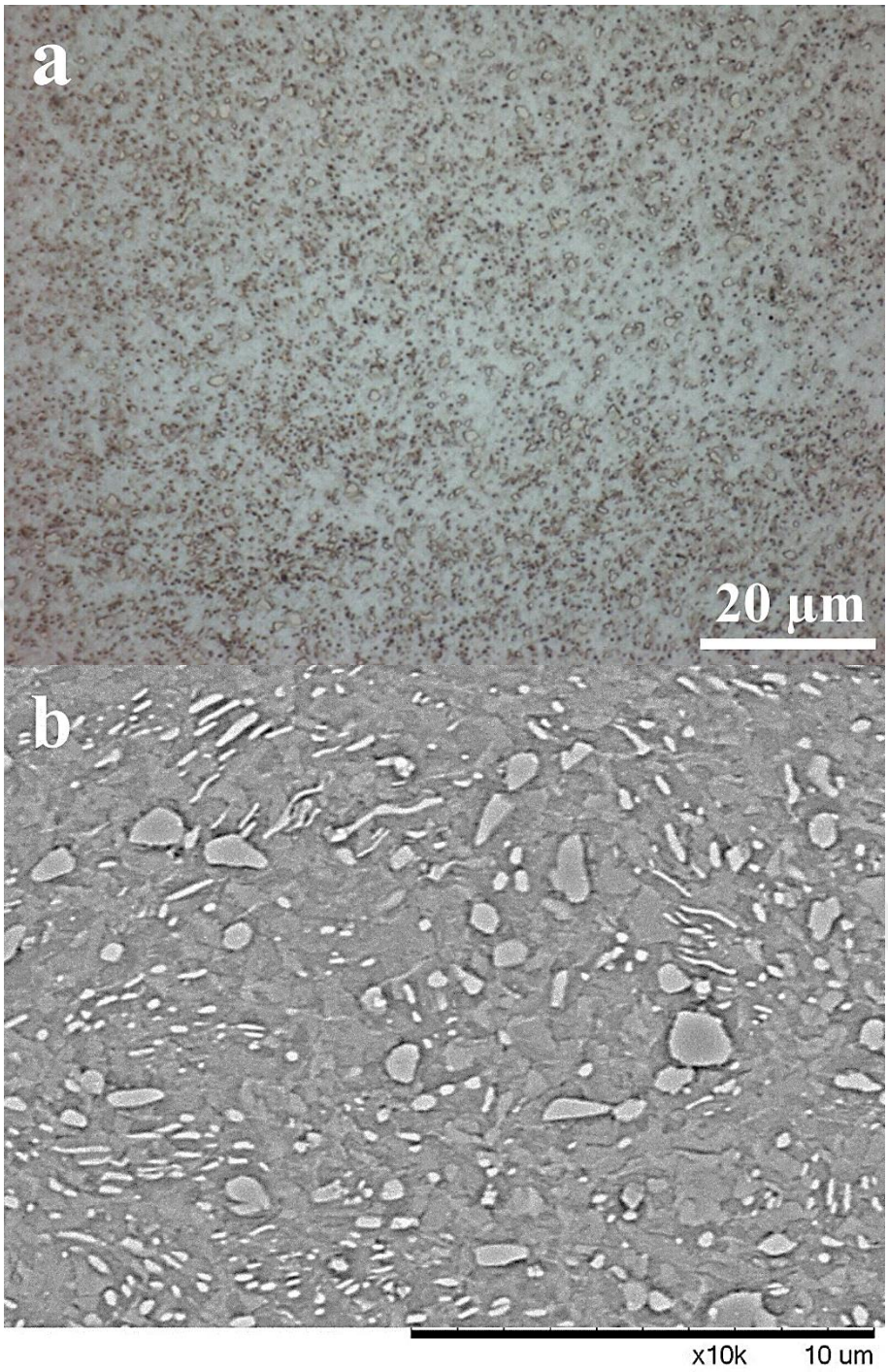
Çelik Kalitesi (AISI)	Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)
6150	740	10	680	30	1-5-10

Belirlenen parametrelerde öncelikle 1 çevrim gerçekleştirilen küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan sıcak ve soğuk haddelenmiş çeliklerin mikroyapı fotoğrafları sırasıyla, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42'de görülmektedir. Küreselleştirme işleminin 1 çevrim olarak uygulanmasıyla gerek sıcak gerekse soğuk haddelenmiş numunelerde

küresel karbürler elde edilmiş olmakla birlikte, bazı lameler karbürler de görülmüştür. Bu nedenle 1 çevrim yapılan küreselleştirme işleminin yeterli olmadığı değerlendirilmiştir.



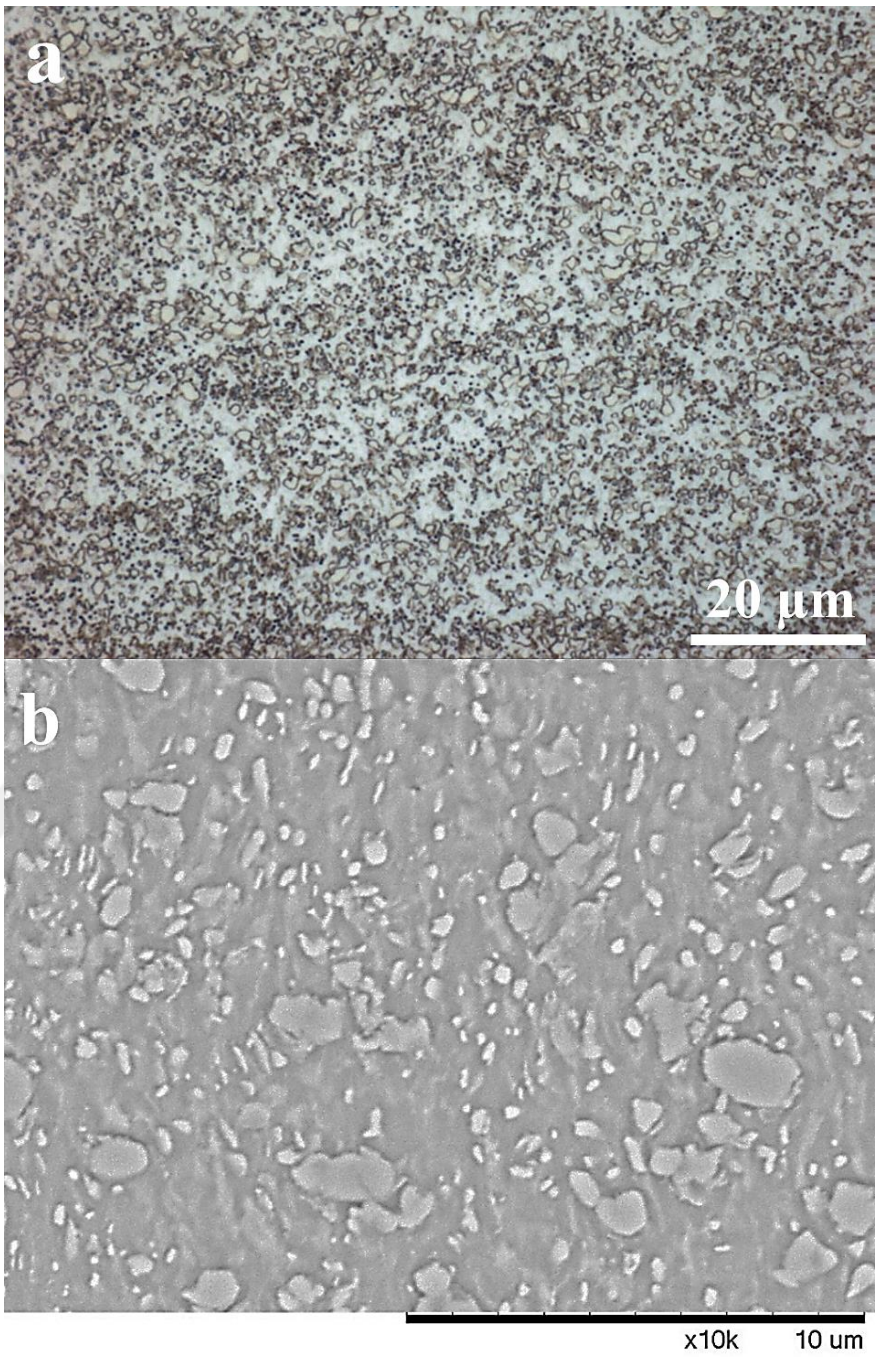
Şekil 6.41 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



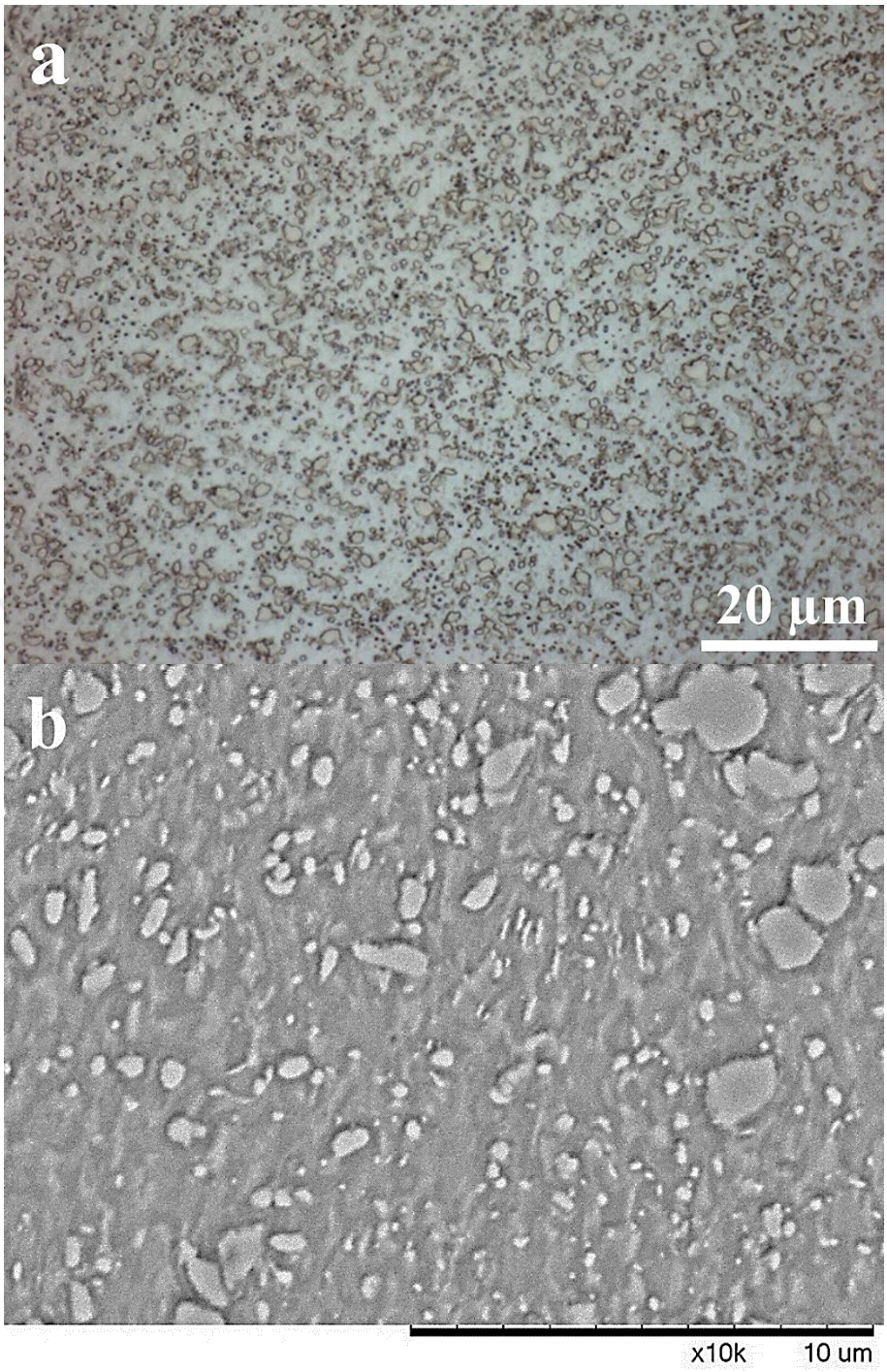
Şekil 6.42 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Aynı sıcaklık ve süre kullanılarak 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonucunda sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 6.43 ve Şekil 6.44'de verilmiştir. Sıcak haddelenmiş örneklerin mikroyapısında küre sayısı ve boyutu artmış olmasına rağmen hala lameler yapıların varlığı görünmektedir. Öte

yandan, soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapılarında daha büyük boyutlu karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir.

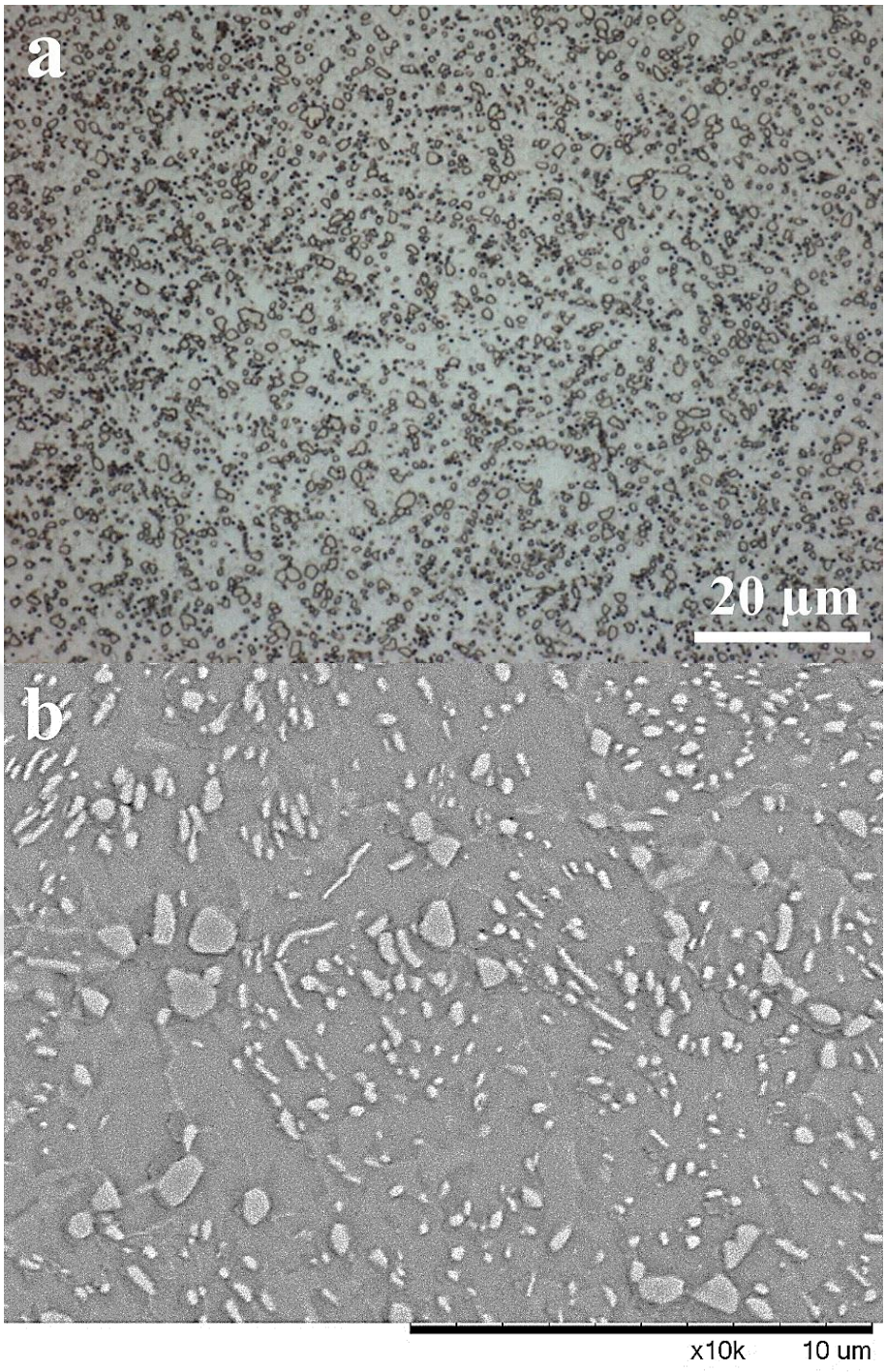


Şekil 6.43 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



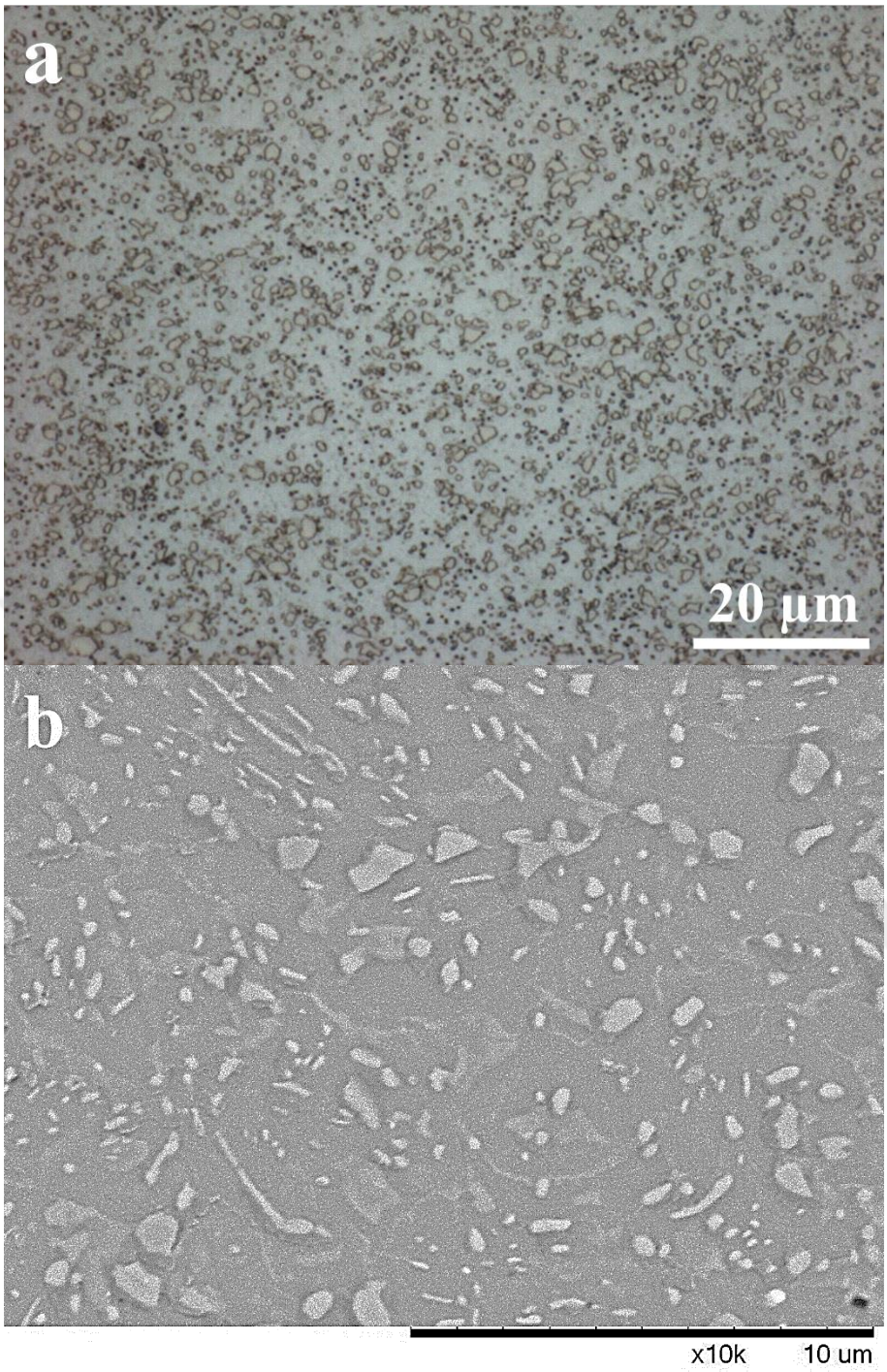
Şekil 6.44 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

AISI 6150 kalite çeliklere 740°C'de 10 dakika ve 680°C'de 30 dakika ve 10 çevrim olarak uygulanan çevrimsel küreselleştirme işlemi sonrası mikroyapı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'da gösterilmiştir.



Şekil 6.45 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

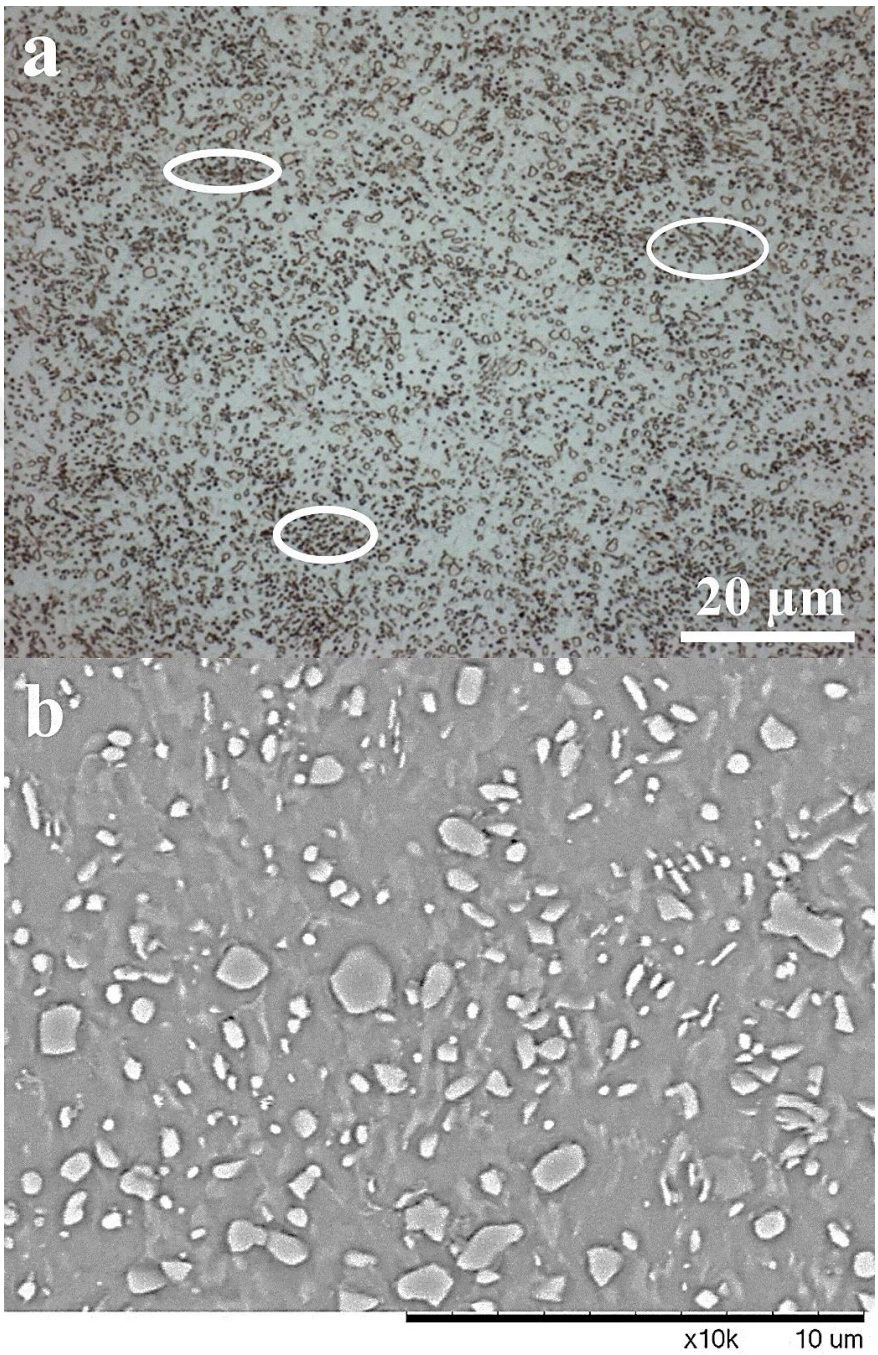
Gerçekleştirilen 10 çevrimli küreselleştirme ısıl işleminin ardından, çeliğin temin edildiği haline göre daha yüksek oranda küresellik gözlenmiştir. Ayrıca 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemiyle sıcak haddelenmiş numunelerin karbür sayısı azalmış, ancak soğuk haddelenmiş numunelerde belirgin bir fark gözlenmemiştir.



Şekil 6.46 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Şekil 6.47'de 680 °C'de 10 saat yapılan kritik sıcaklık altı ısıl işlemde elde edilen mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemi sonucu elde edilen yapıların çevrimsel ısıl işlem sonucu elde edilen yapılara kıyasla daha fazla lameler bölgeler içererek daha küçük yarıçaplı küresel taneler oluştuğu görülmüştür.

Yapılan incelemeler sonucunda AISI 4140 çelik kalitesinde olduğu gibi kritik sıcaklık altı işlem sonucunda küreselliğin homojen bir şekilde dağılmadığı gözlenmiş olup kısmi lameler yapıların varlığı tespit edilmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen çevrimsel küreselleştirme işleminin, kritik sıcaklık altı ısıl işleme göre daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.47 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

6.2.2 Sertlik analizleri

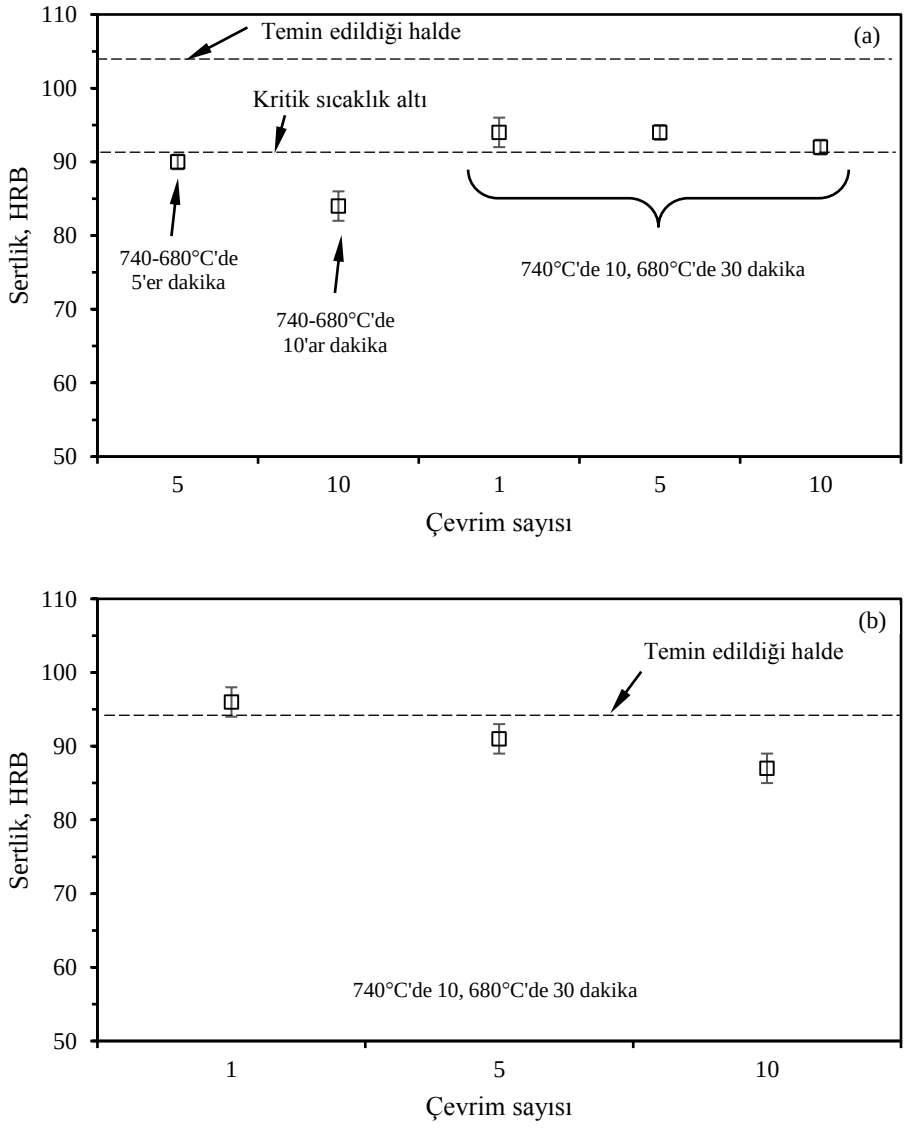
AISI 6150 kalite çeliğe uygulanan farklı işlemler sonucu sertlik değerleri sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Çizelge 6.13 ve Çizelge 6.14'de verilmiş olup, ayrıca Şekil 6.48'de de grafik olarak gösterilmiştir. Uygulanan küreselleştirme işlemleri sonucu numunelerin temin edildiği durumdaki sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 6.13: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin sertlik değerleri.

Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	104±1
740	5	680	5	5	90±1
740	10	680	10	10	84±2
740	10	680	30	1	94±2
740	10	680	30	5	94±1
740	10	680	30	10	92±1
-	-	680	600	-	91±3

Çizelge 6.14: Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin sertlik değerleri.

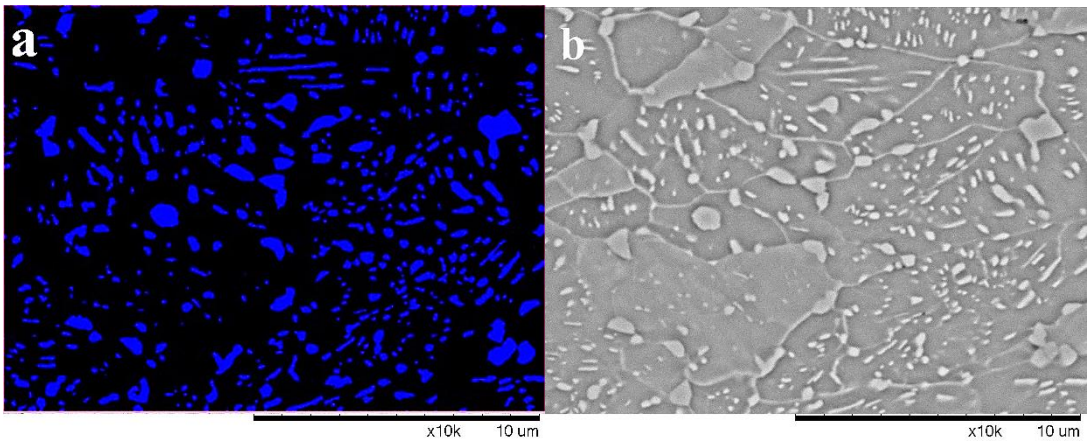
Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	94±1
740	10	680	30	1	96±2
740	10	680	30	5	91±2
740	10	680	30	10	87±2



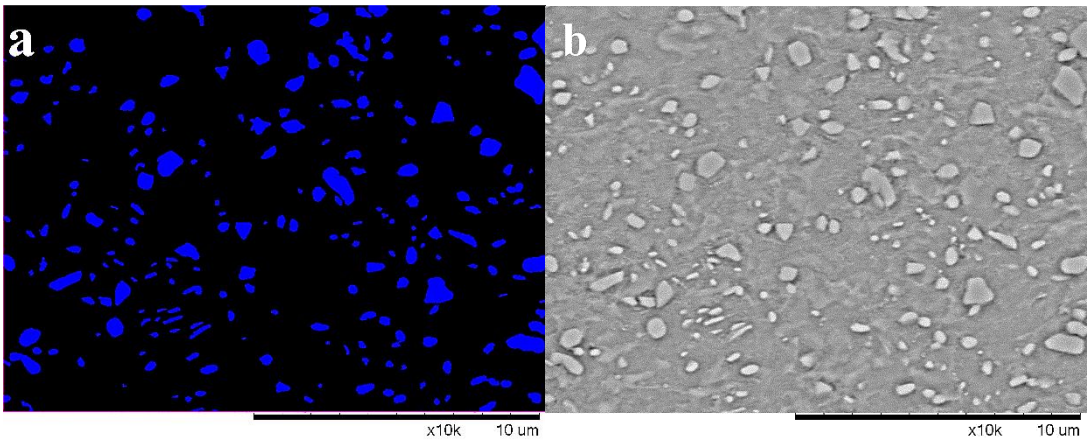
Şekil 6.48 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi.

6.2.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler

AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısında bulunan karbürlerin küresellik oranı, birim alan başına düşen karbür sayısı, ortalama küre çapı ve en/boy oranları belirlenmiştir. AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapı analizine ait fotoğraflar, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla, Şekil 6.49 ve Şekil 6.50'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.49 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



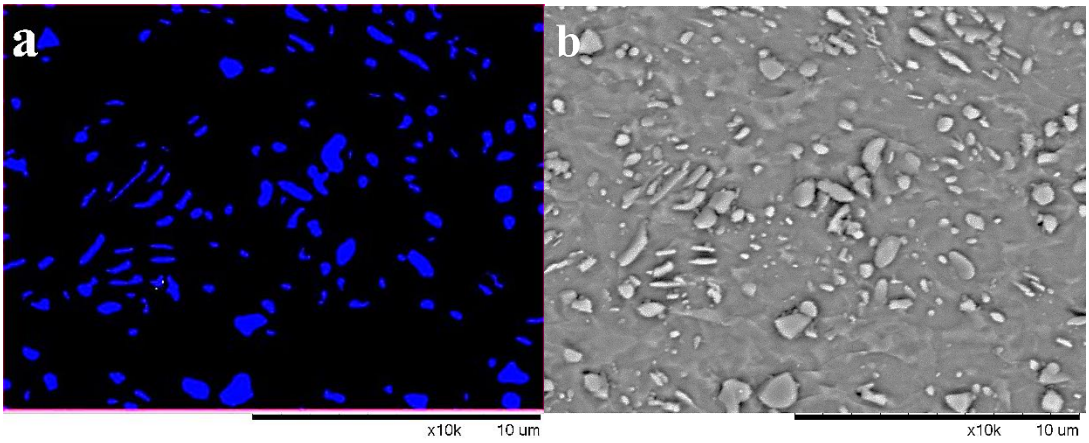
Şekil 6.50 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.15: AISI 6150 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,32±0,20	11,34	0,60±0,20	2,20±1,71
Soğuk	0,23±0,13	8,73	0,81±0,17	1,84±0,69

Gerçekleştirilen analiz sonucunda AISI 6150 kalitesindeki çelik numunesinin mikroyapısında lameler yapıların varlığı nedeniyle küresellik oranı 0,60 seviyelerinde elde edilmiştir. Soğuk haddelenmiş örneklerde ise bu oran daha yüksektir (0,81). Öte yandan ortalama karbür çapı, sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerde sırasıyla 0,32 µm ve 0,23 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.51'de 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapının görüntü analiz

yazılımı ile yapılan incelemelerine ait fotoğrafları, Çizelge 6.16'da ise analiz sonuçları verilmiştir.

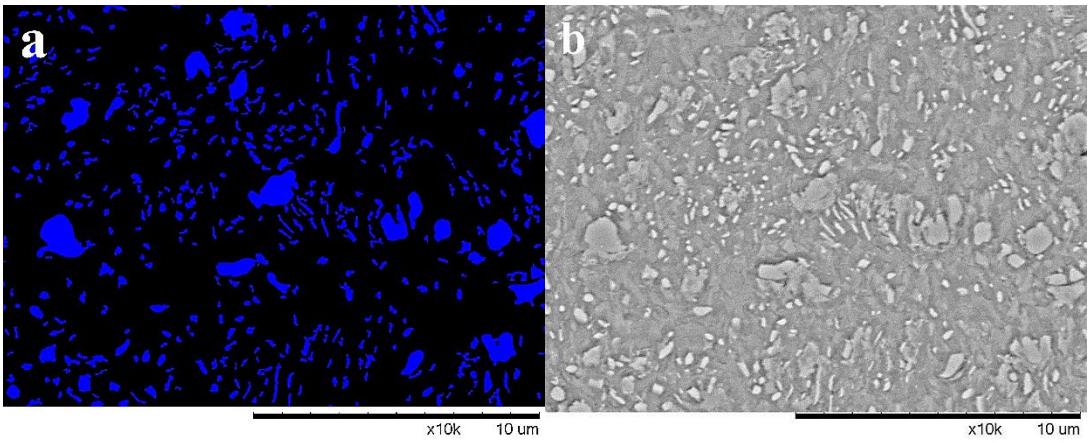


Şekil 6.51 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

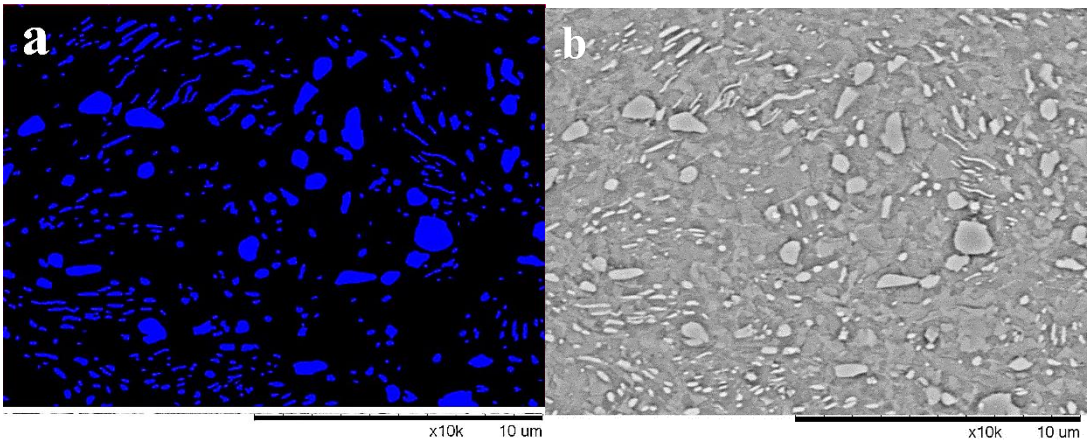
Çizelge 6.16: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,19±0,12	6,69	0,67±0,26	3,97±9,98

740°C ve 680°C'de 5'er dakika ve 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme işlemiyle, sıcak haddelenmiş örneklerde küresellik oranı artmış ve ortalama çap azalmıştır. Ayrıca en/boy oranında ve karbürlerin küresellik oranlarında artış olduğu görülmüştür. Daha sonra, çevrimsel küreselleştirme işleminde üst ve alt sıcaklıklar sabit tutulmuş, ancak her bir sıcaklıkta bekleme süresi değiştirilmiştir (740 °C'de 10 dakika, 680 °C'de 30 dakika). Bu koşullarda 1 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası elde edilen Clemex görüntü analiz fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla, Şekil 6.52 ve Şekil 6.53'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.52 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



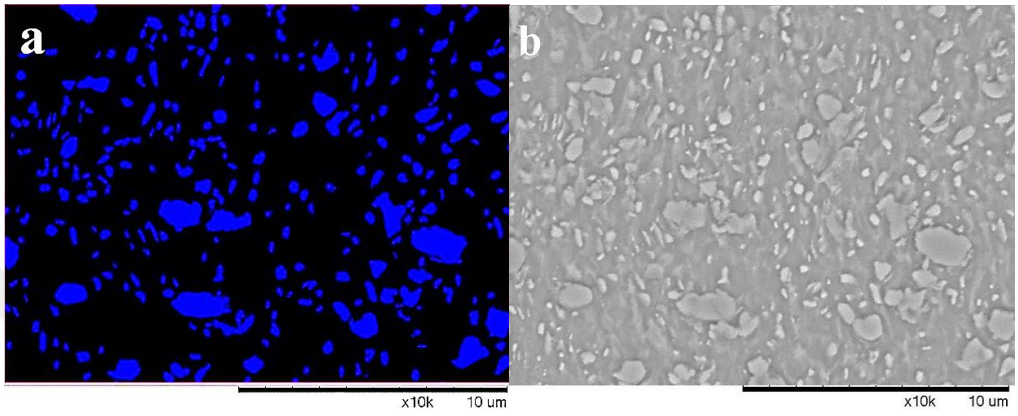
Şekil 6.53 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.17: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

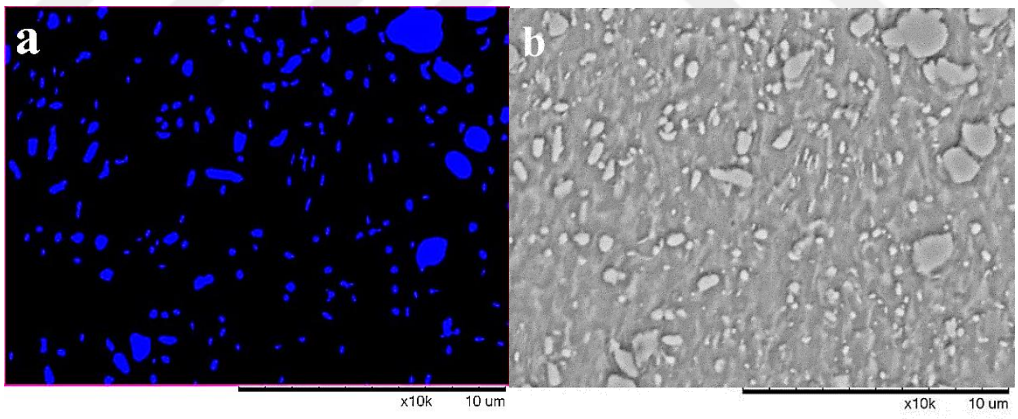
Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,14±0,09	11,48	0,72±0,24	2,15±0,76
Soğuk	0,13±0,09	9,83	0,81±0,24	2,40±1,19

Çizelge 6.17'ye göre üst ve alt sıcaklıkta bekleme süresinin arttırılmasıyla, ortalama çap değeri düşerken, küresellik oranının arttığı gözlenmiştir. Ancak karbürlerin boyut dağılımlarının homojen olmadığı tespit edilmiş, ayrıca mikroyapıda lameler karbürlerin varlığı tespit edilmiştir. Lameler karbür morfolojisinin varlığı nedeniyle, 1 çevrim küreselleştirme ısıl işleminin yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemine ait Clemex görüntü analiz fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'de, analiz sonuçları Çizelge 6.18'de verilmiştir. 5 çevrim küreselleştirme işlemiyle, mikroyapıdaki lameler morfolojideki karbürlerin küresel hale dönüştüğü, ortalama karbür çapının arttığı belirlenmiştir.



Şekil 6.54 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

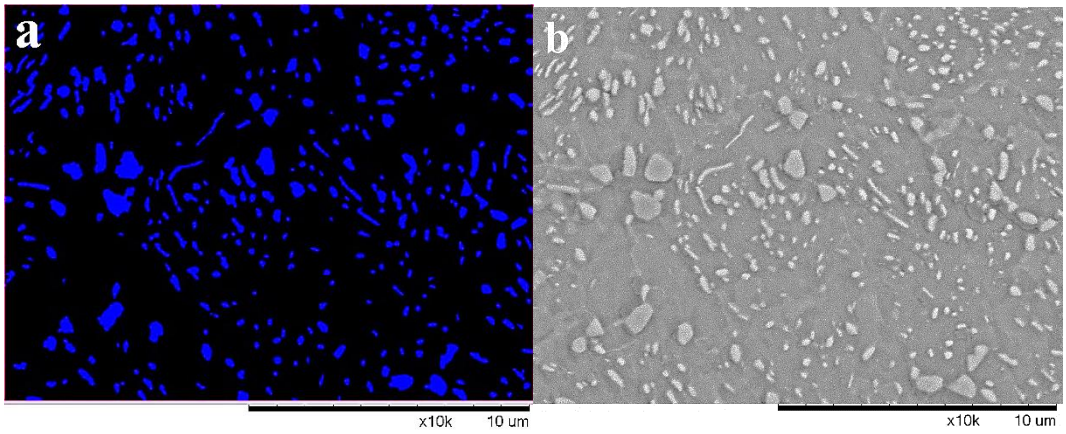


Şekil 6.55 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

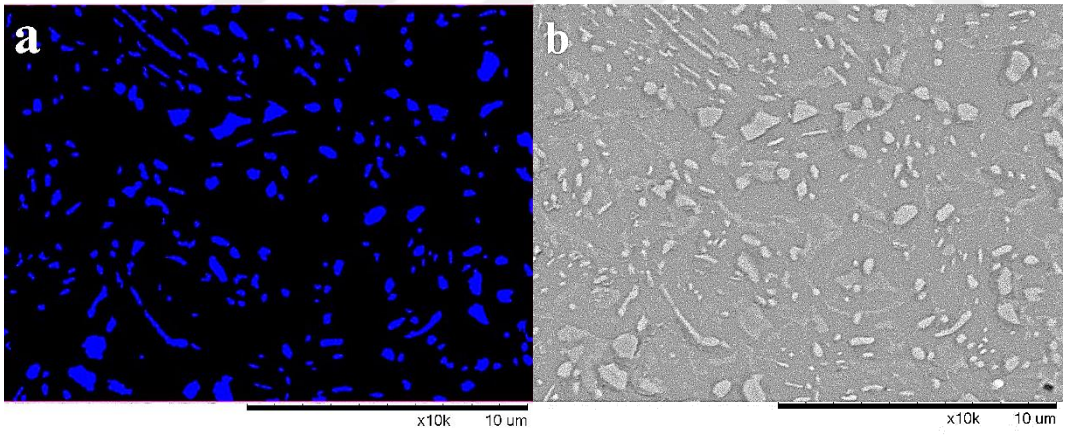
Çizelge 6.18: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,39±0,24	11,84	0,56±0,19	2,03±0,69
Soğuk	0,16±0,11	7,28	0,78±0,25	3,00±5,70

740°C'de 10 dakika ve 680°C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemine ait Clemex görüntü analiz fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.56 ve Şekil 6.57'de, analiz sonuçları Çizelge 6.19'da verilmiştir. 10 çevrim uygulanan numunelerin küresellik oranlarının düştüğü gözlenmekte olup lameler karbür dağılımının yoğunluğu dikkat çekmiştir.



Şekil 6.56 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

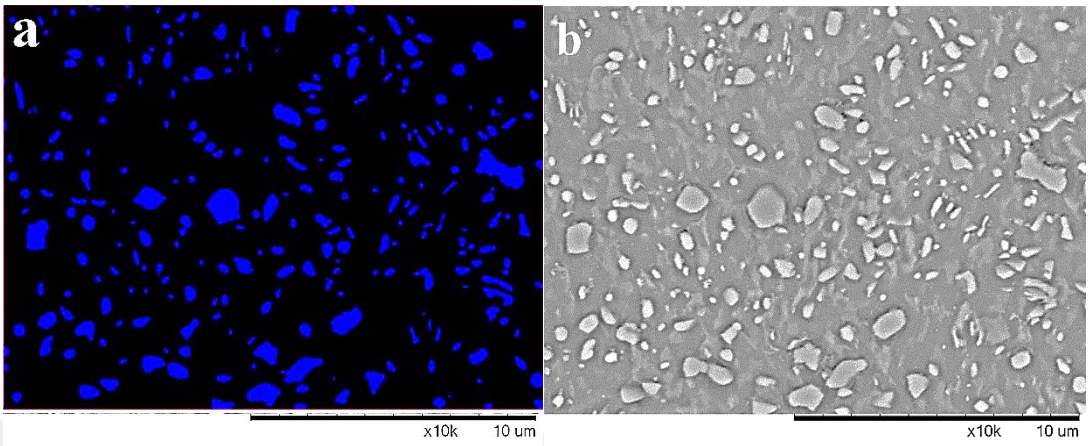


Şekil 6.57 : Soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.19: AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,30±0,16	7,82	0,63±0,19	2,09±0,87
Soğuk	0,34±0,16	7,32	0,56±0,19	2,21±1,01

Çevrimsel küreselleştirme işlemlerinin dışında, numunelere uygulanan kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi uygulanan sıcak haddelenmiş numunelerin Clemex görüntü analizine ait fotoğraflar Şekil 6.58'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.58 : Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.20: Sıcak haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

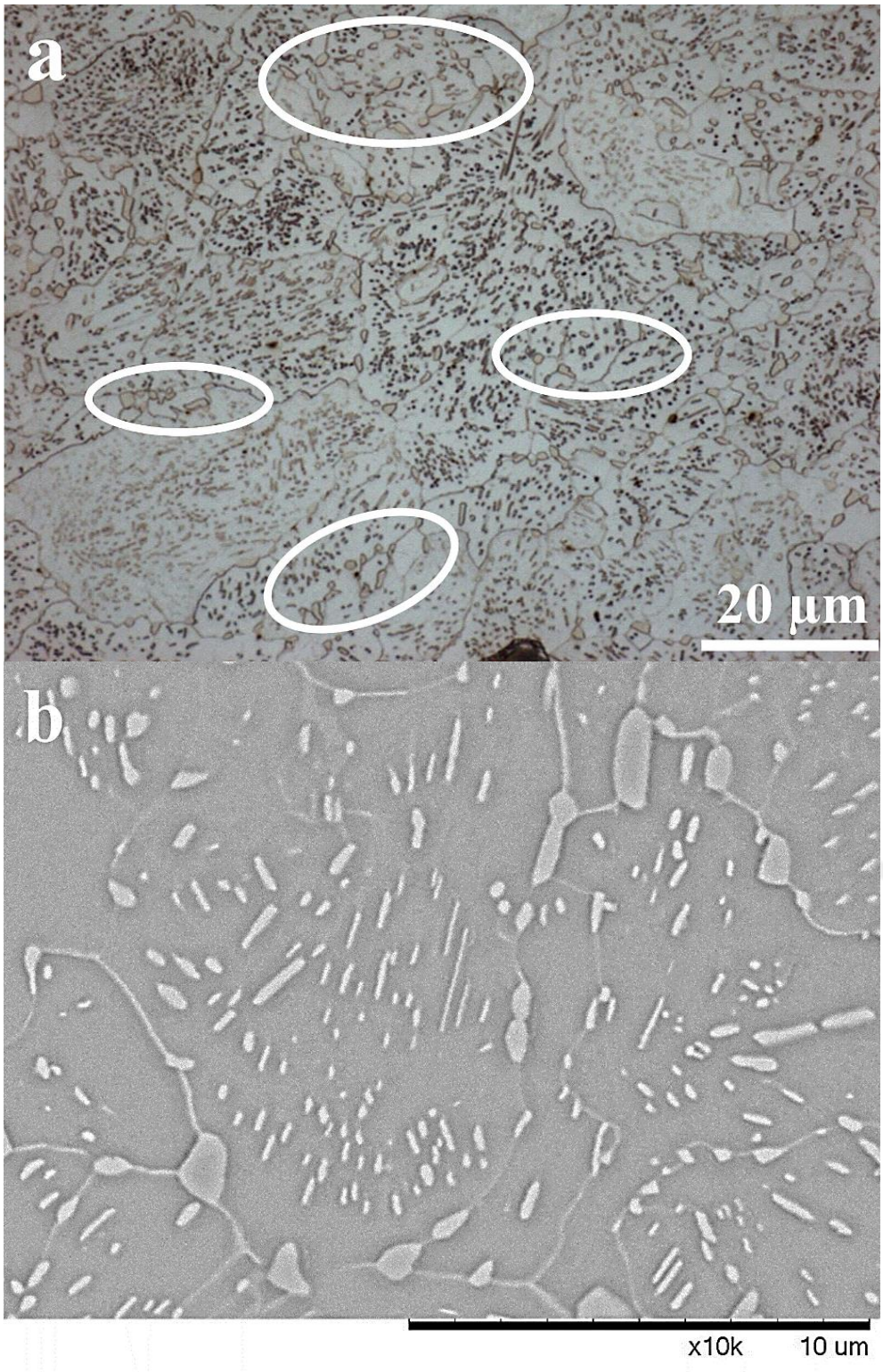
Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,36±0,20	8,46	0,71±0,17	1,95 ±0,77

Kritik sıcaklık altı küreselleştirme uygulanan numunelerin küresellik oranı ve ortalama karbür çapı değerleri diğer işlemlerle elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olarak belirlenmiştir.

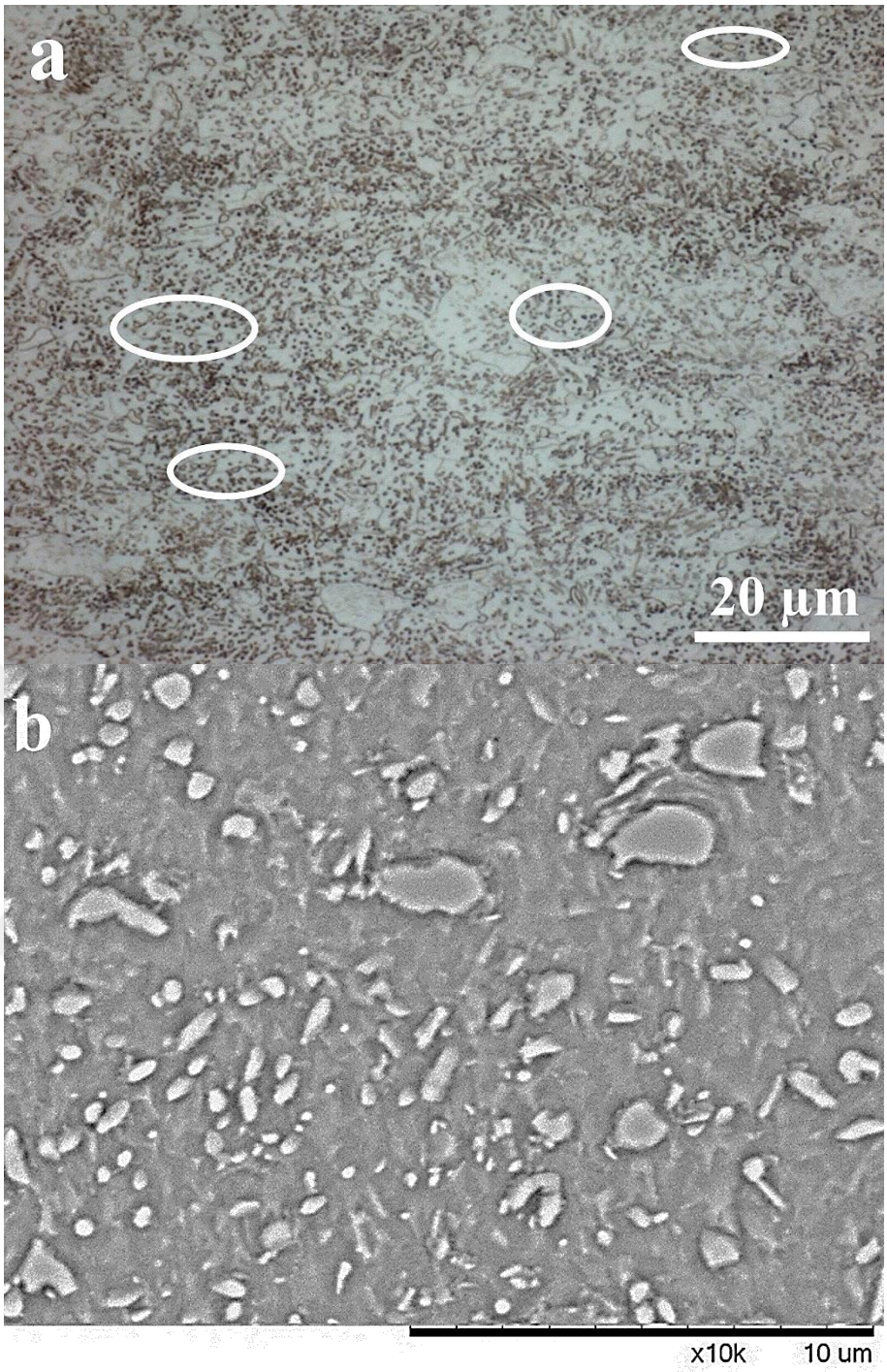
6.3 AISI 1045 Kalite Çelik

6.3.1 Mikroyapıların incelenmesi

Sıcak ve soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği durumdaki mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.59 ve Şekil 6.60'da görülmektedir. Numunelerin temin edildiği durumdaki mikroyapılarında, lameler morfolojide karbürler gözlenmiş olup, kısmi küresellikler şekiller üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapısında (Şekil 6.60) daha yüksek oranda küresellik olduğu görülmüştür.



Şekil 6.59 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

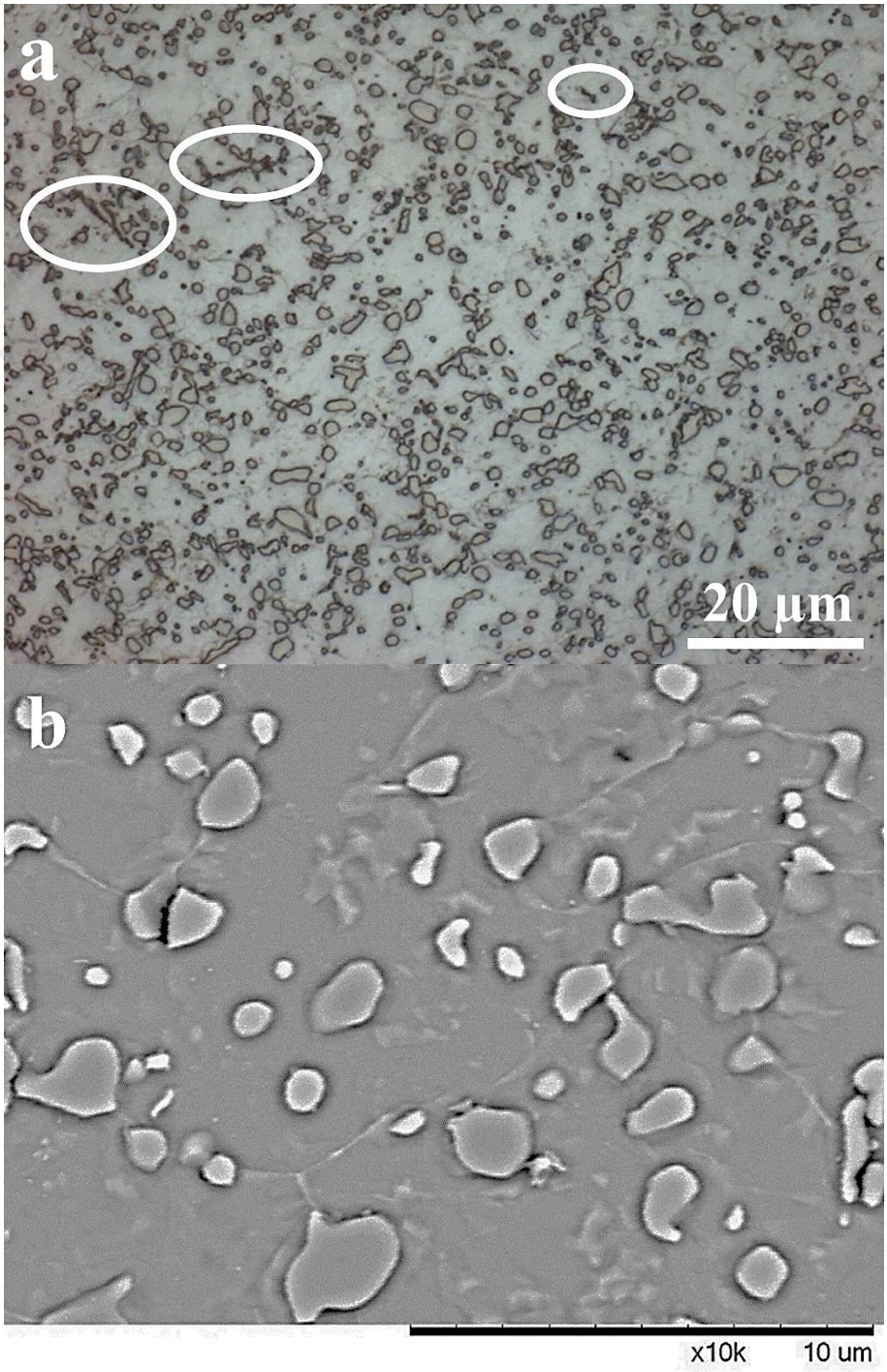


Şekil 6.60 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 6150 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

AISI 1045 kalite çelik için karbon eşdeğeri ile A_{c1} ve A_{c3} sıcaklıkları Eşitlik 5.1 - 5.3'de belirtilen formüller kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 6.21'deki değerler bulunmuştur.

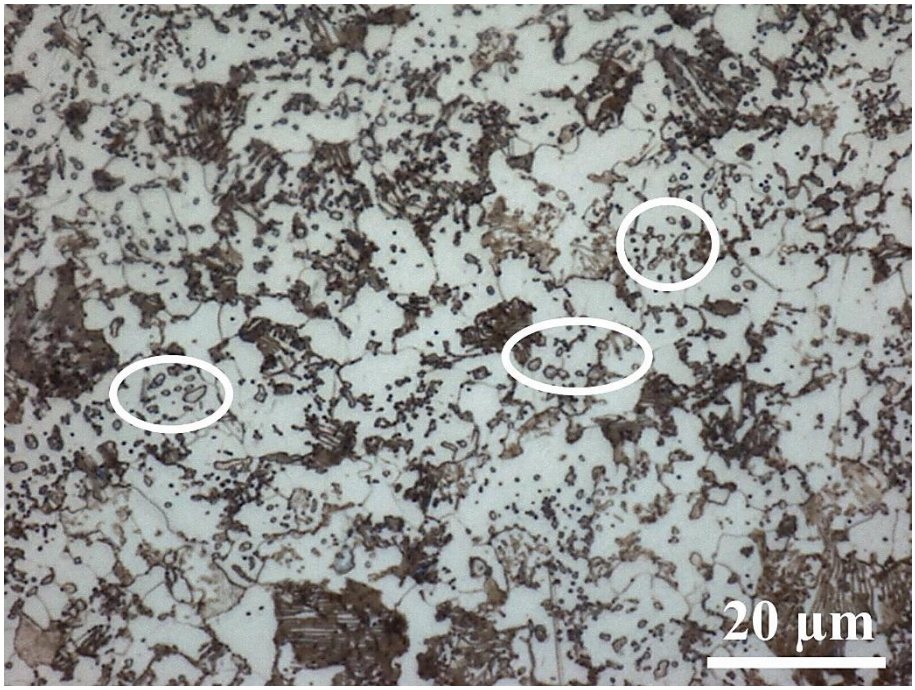
Çizelge 6.21: AISI 1045 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları.

$C_{eş}$ (%)	A_{c1} (±11,5˚C)	A_{c3} (±16,7˚C)
0,58	710	788



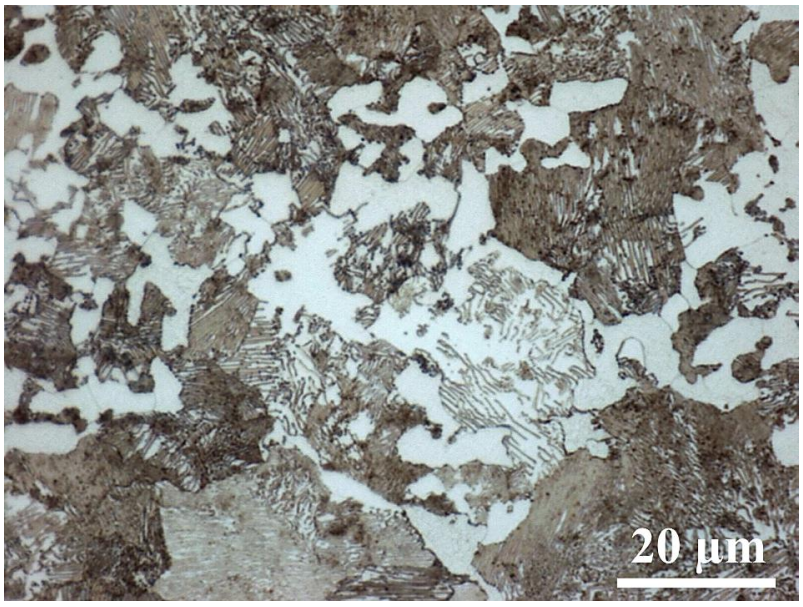
Şekil 6.61 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

AISI 1045 çelik kalitesi için çevrimsel küreselleştirme işlemi için 740°C ve 680°C sıcaklıkları seçilmiş, her bir sıcaklıkta numuneler 5 dakika tutulmuş ve işlem toplamda ardışık olarak 5 çevrim uygulanmıştır [31]. Söz konusu çevrimsel küreselleştirme işlemi sonrası oluşan mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.61'de verilmiştir. Çalışmada en optimum sonuç veren koşulların belirlenmesine kadar soğuk hadde uygulanan numunelere ısıl işlem uygulanmamıştır. Belirlenen koşullarda gerçekleştirilen küreselleştirme işlemiyle, henüz tam olarak küreselleşmemiş karbürler gözlenerek şekil üzerinde gösterilmiştir.



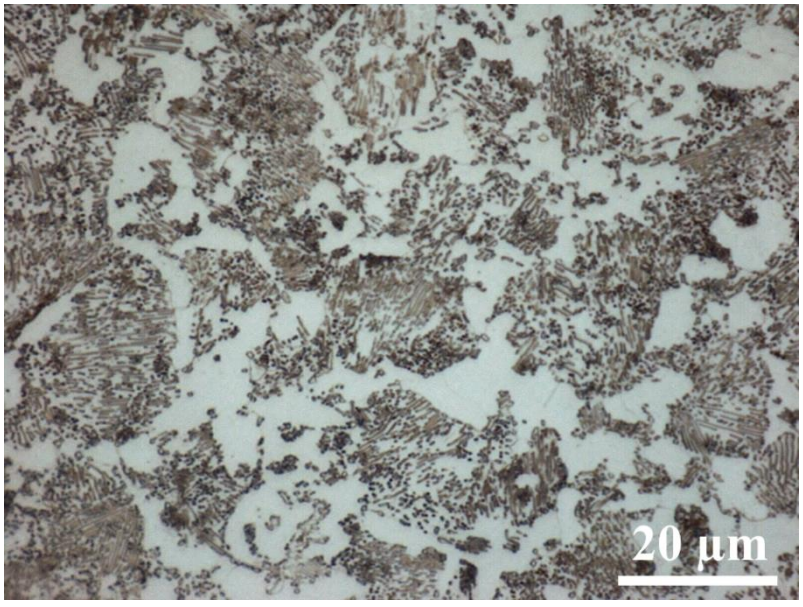
Şekil 6.62 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Normalizasyon işlemi sonunda mikroyapının tümüyle lameler morfolojiye dönüşmediği ve kısmen küresel karbürlerin de bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle normalizasyon işleminin 950 °C'de 30 dakika süreyle yapılmasına karar verilmiştir. Belirlenen yeni koşullarda yapılan normalizasyon ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.63'de görülmektedir.



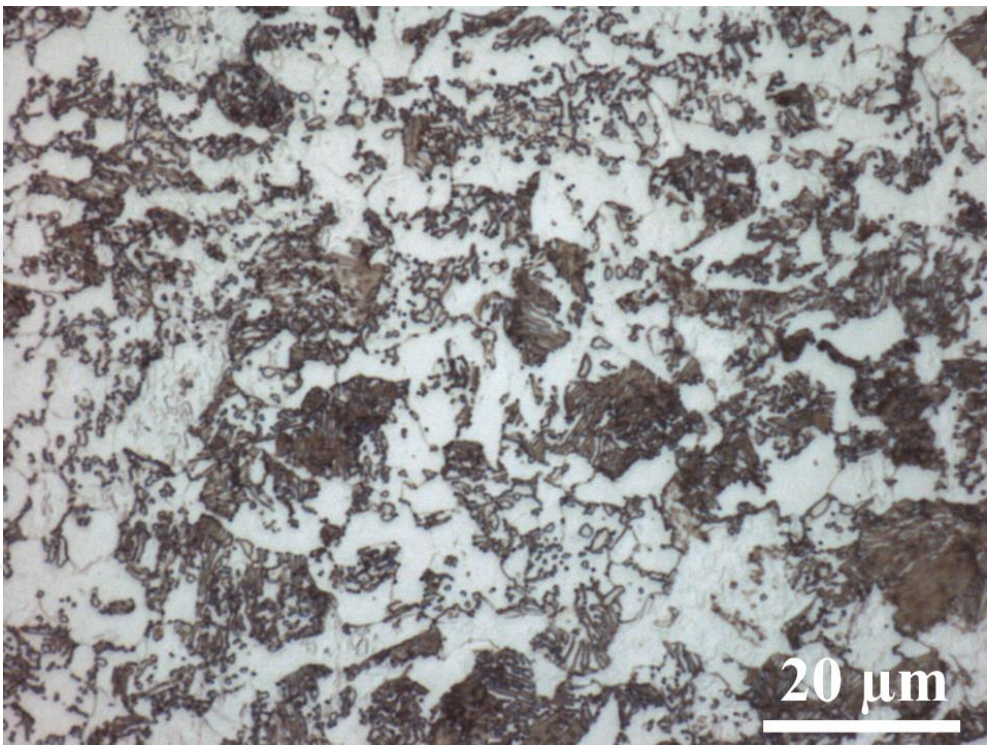
Şekil 6.63 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

950 °C'de 30 dakika yapılan normalizasyon işlemiyle lameler morfolojide perlitik mikroyapı elde edilmiştir. Perlitik mikroyapının elde edilmesinin ardından, 740 – 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim olarak uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.64'de gösterilmiş olup, perlitik mikroyapının bozulmaya başladığı, ancak küreselleşen karbür sayısının ihmal edilebilecek seviyede olduğu, dolayısıyla küreselleşmenin elde edilemediği belirlenmiştir.



Şekil 6.64 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

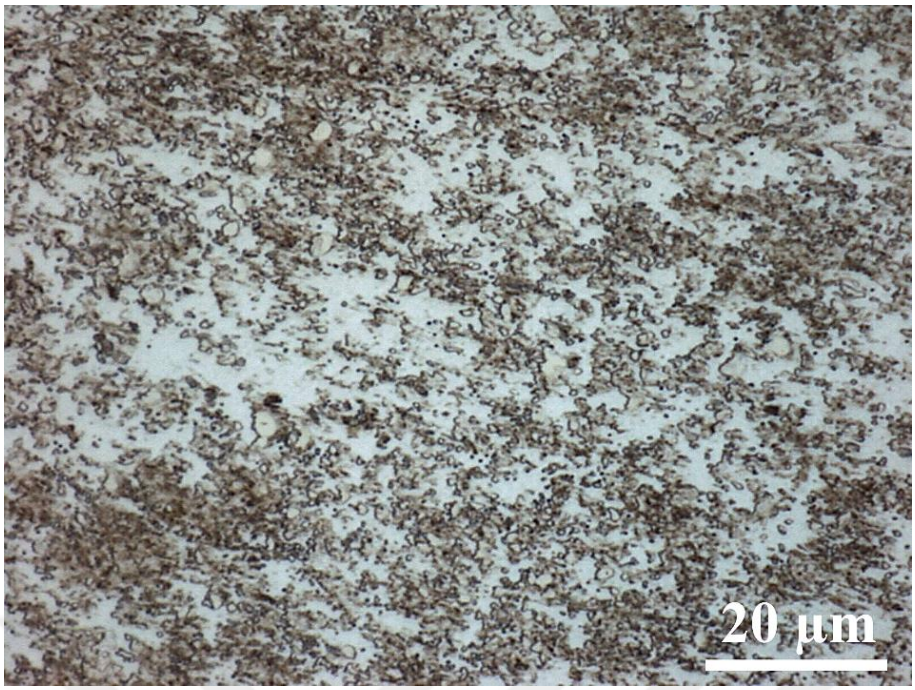
Yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonucunda hedeflenen küreselliğin oluşturulamaması sebebiyle küreselleştirme işlem koşullarının değiştirilmesine karar verilmiştir. Bu doğrultuda normalizasyon koşulları aynı kalmak koşuluyla küreselleştirme ısıl işleminin üst sıcaklığı arttırılmıştır. Bu kapsamda normalizasyon ısıl işlemi uygulanan numunelere 800 - 680 °C sıcaklık aralıklarında küreselleştirme işlemi yapılmasına karar verilmiştir. Bu işlem sonunda elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.65'de görülmektedir.



Şekil 6.65 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda, küreselleşen karbür sayısında artış gözlenmekle birlikte mikroyapının büyük ölçüde lameler olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle temin edilen çeliklerin normalize edilmeden küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmasına karar verilmiştir.

Çevrimsel küreselleştirme işlemi, numune 800 - 680 °C sıcaklıklarında 10'ar dakika tutularak ve 10 çevrim halinde uygulanmış ve elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.66'da gösterilmiştir.



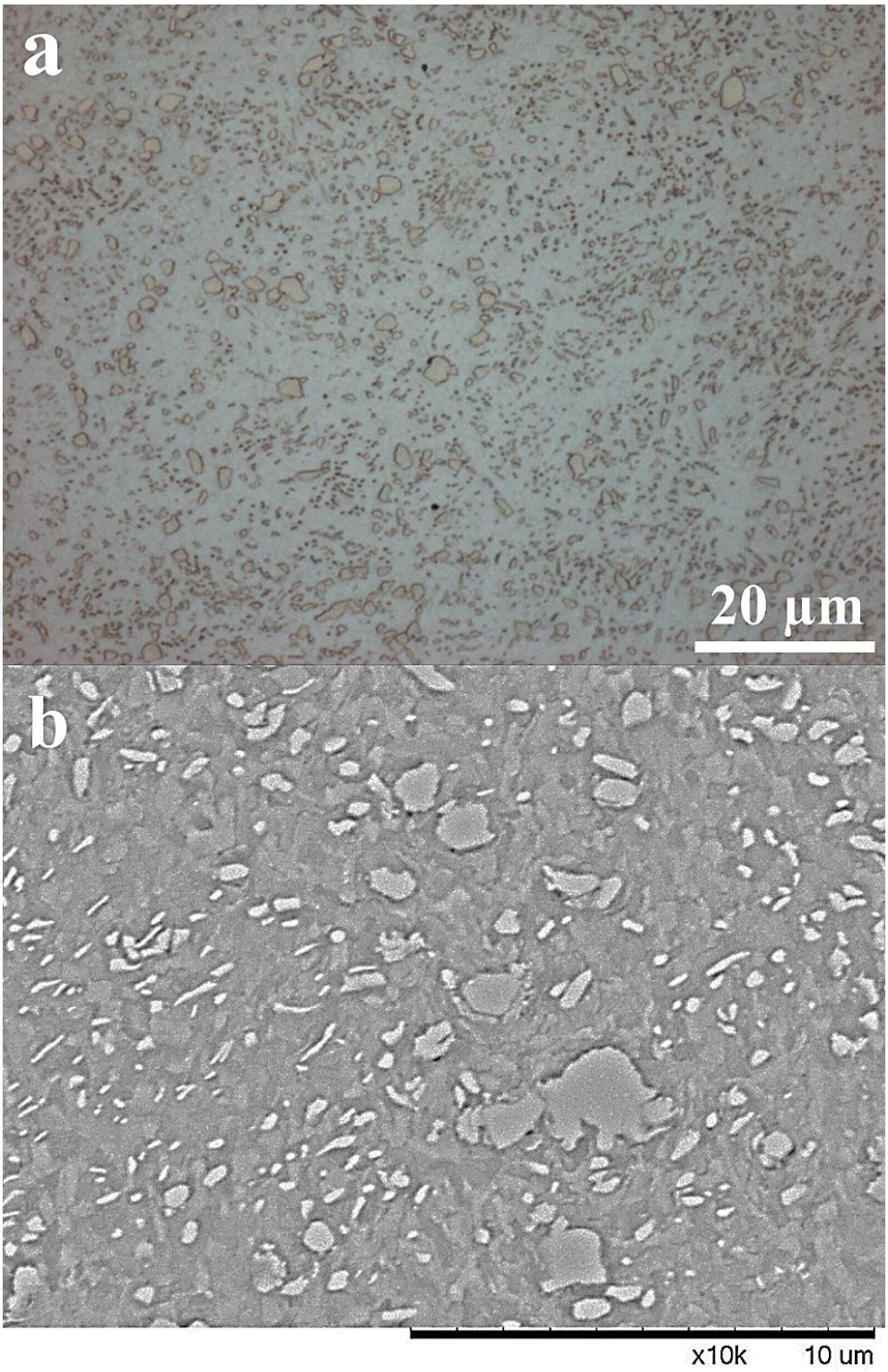
Şekil 6.66 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Söz konusu koşullarda yapılan küreselleştirme işlemiyle, AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısına göre küresel karbür sayısı açısından bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu nedenle, küreselleştirme koşulları revize edilerek (Çizelge 6.22), işlemin 1, 5 ve 10 çevrim yapılmasına karar verilmiştir.

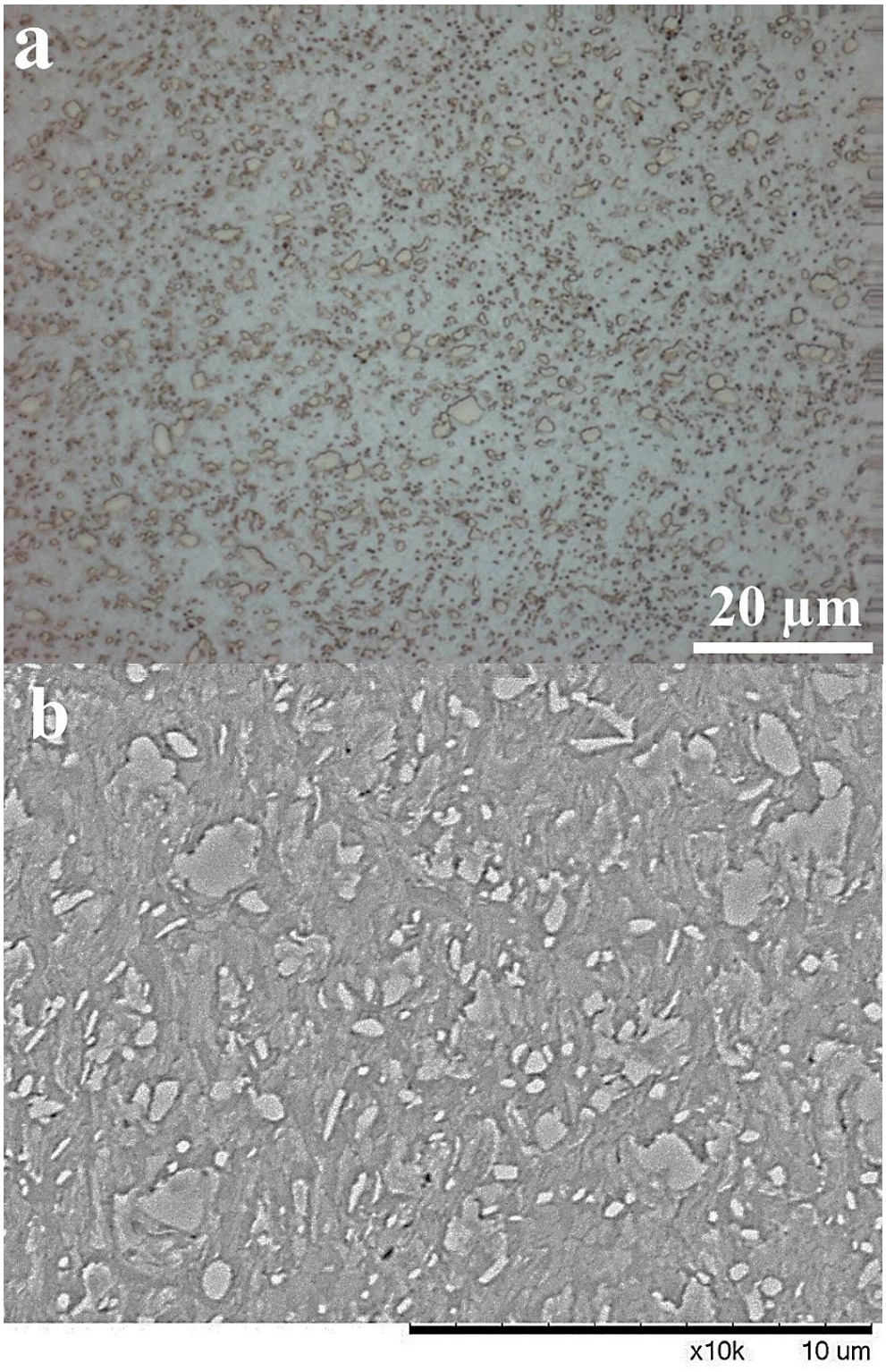
Çizelge 6.22: AISI 1045 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları.

Çelik Kalitesi (AISI)	Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)
1045	740	10	680	30	1-5-10

740 °C'de 10 dakika, 680 °C'de 30 dakika tutularak yapılan 1 çevrim küreselleştirme işlemi sonrasında, sıcak ve soğuk haddelenmiş çeliklerin mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.67 ve Şekil 6.68'de gösterilmiştir. Belirlenen koşullarda 1 çevrim gerçekleştirilen işlem sonucunda elde edilen mikroyapılarda, ancak kısmi küreselleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca sıcak haddelenmiş çelikte, karbür boyutunun homojen olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla çevrim sayısı arttırılarak aynı sıcaklık ve süre koşularında küreselleştirme işlemi 5 çevrim olarak uygulanmıştır.

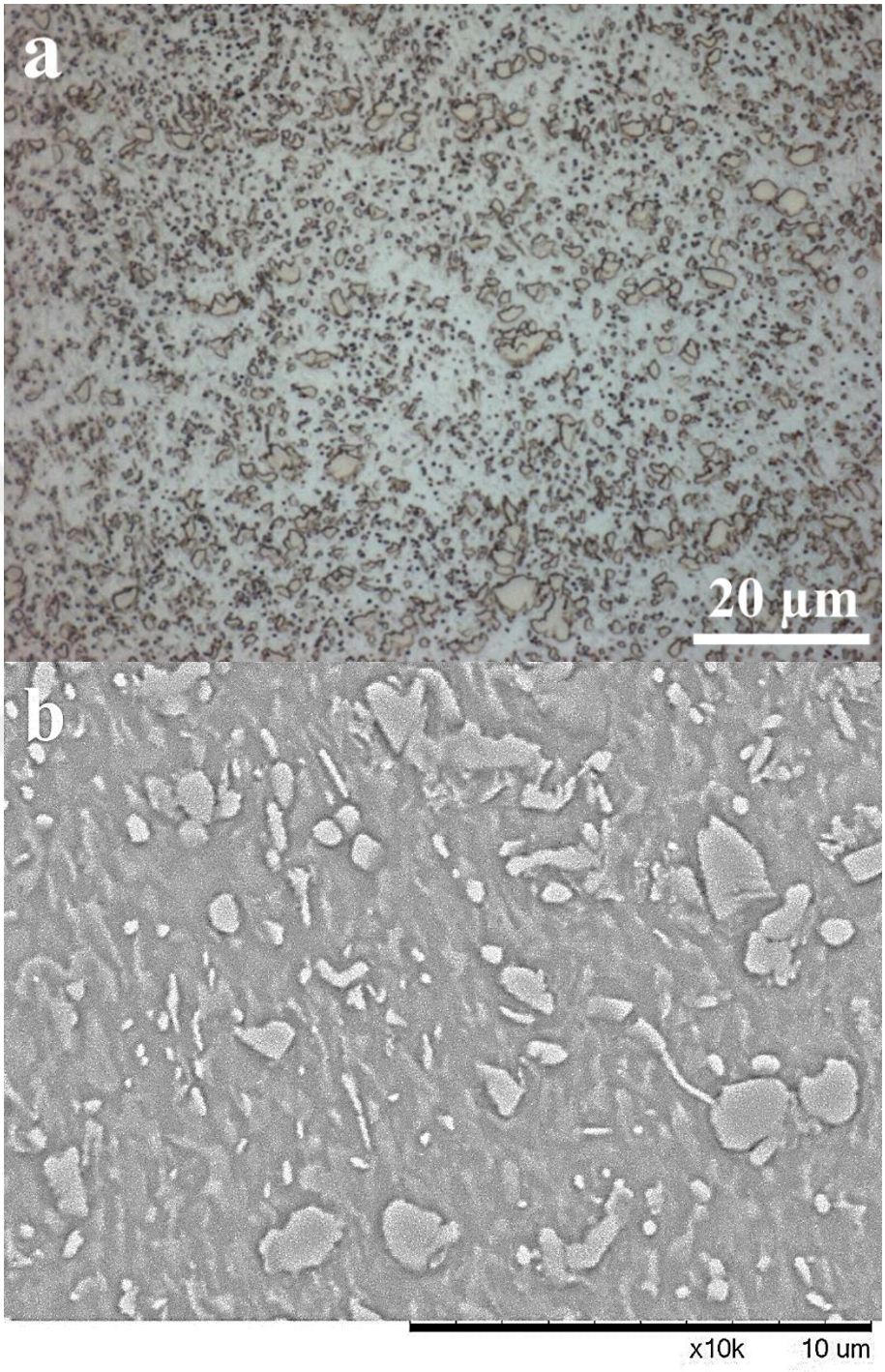


Şekil 6.67 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

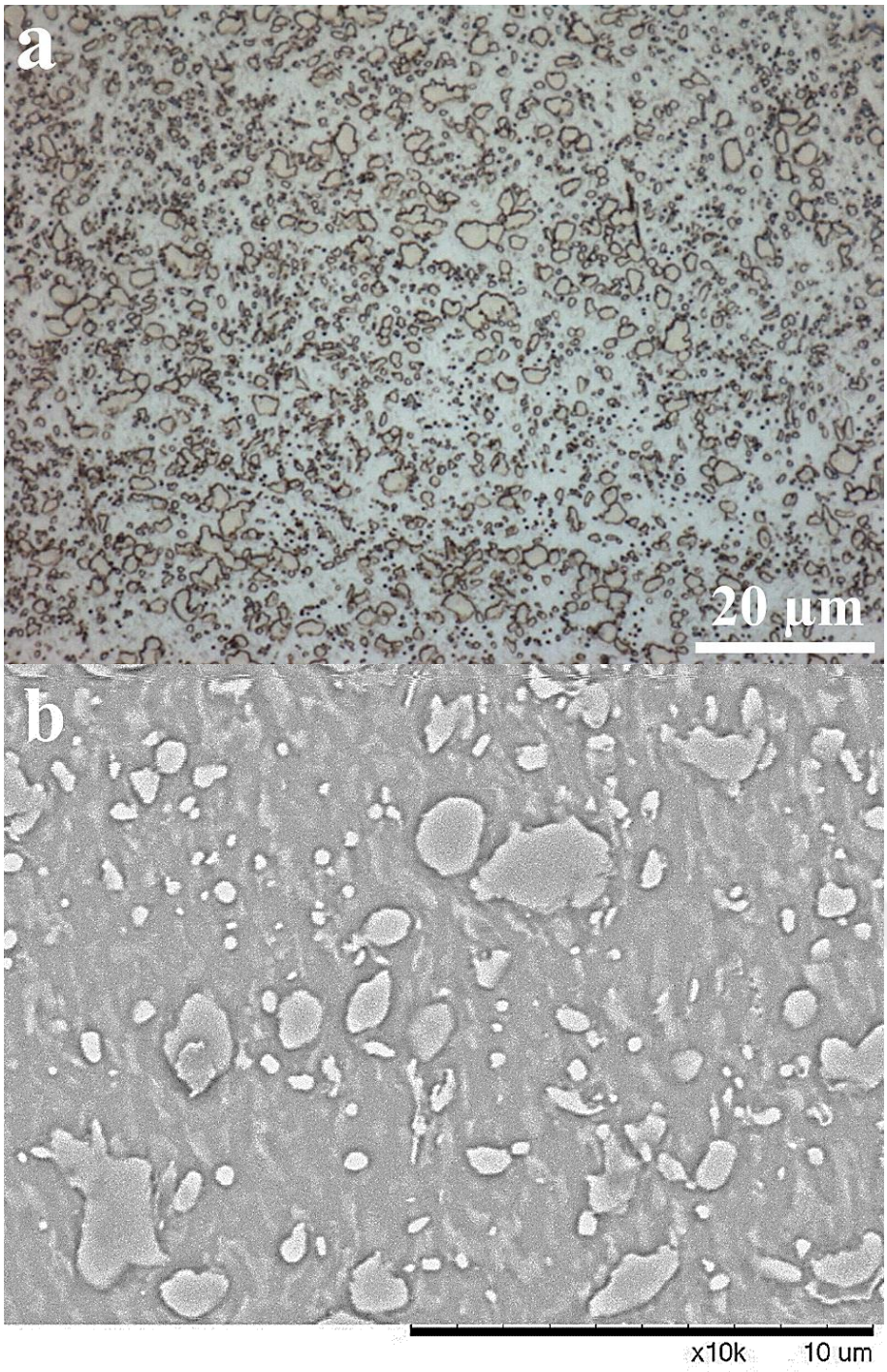


Şekil 6.68 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Sıcak ve soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çelikte, 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak ve 5 çevrim yapılan küreselleştirme işlemin sonrası elde edilen mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 6.69 ve Şekil 6.70'de verilmiştir.



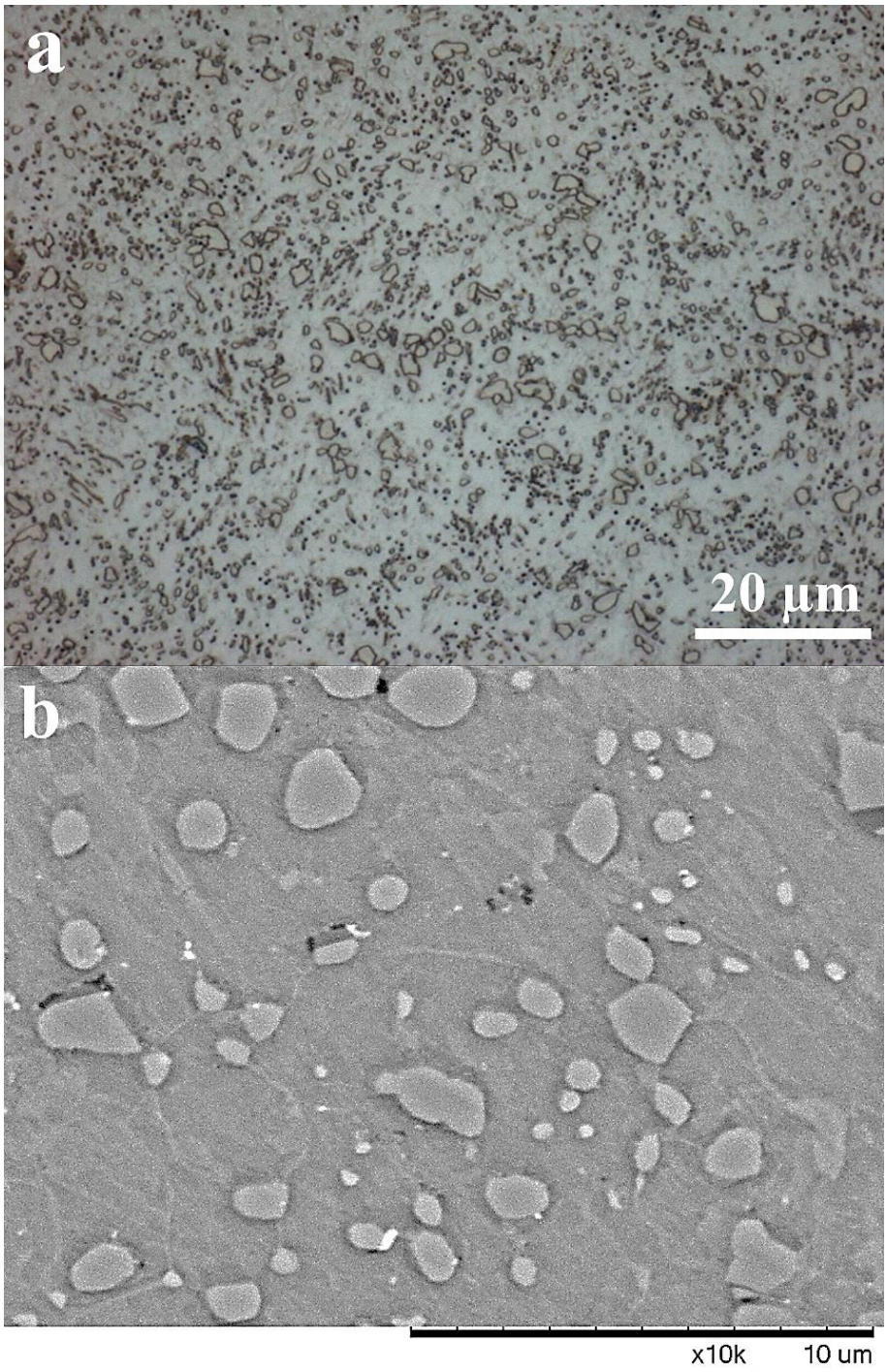
Şekil 6.69 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



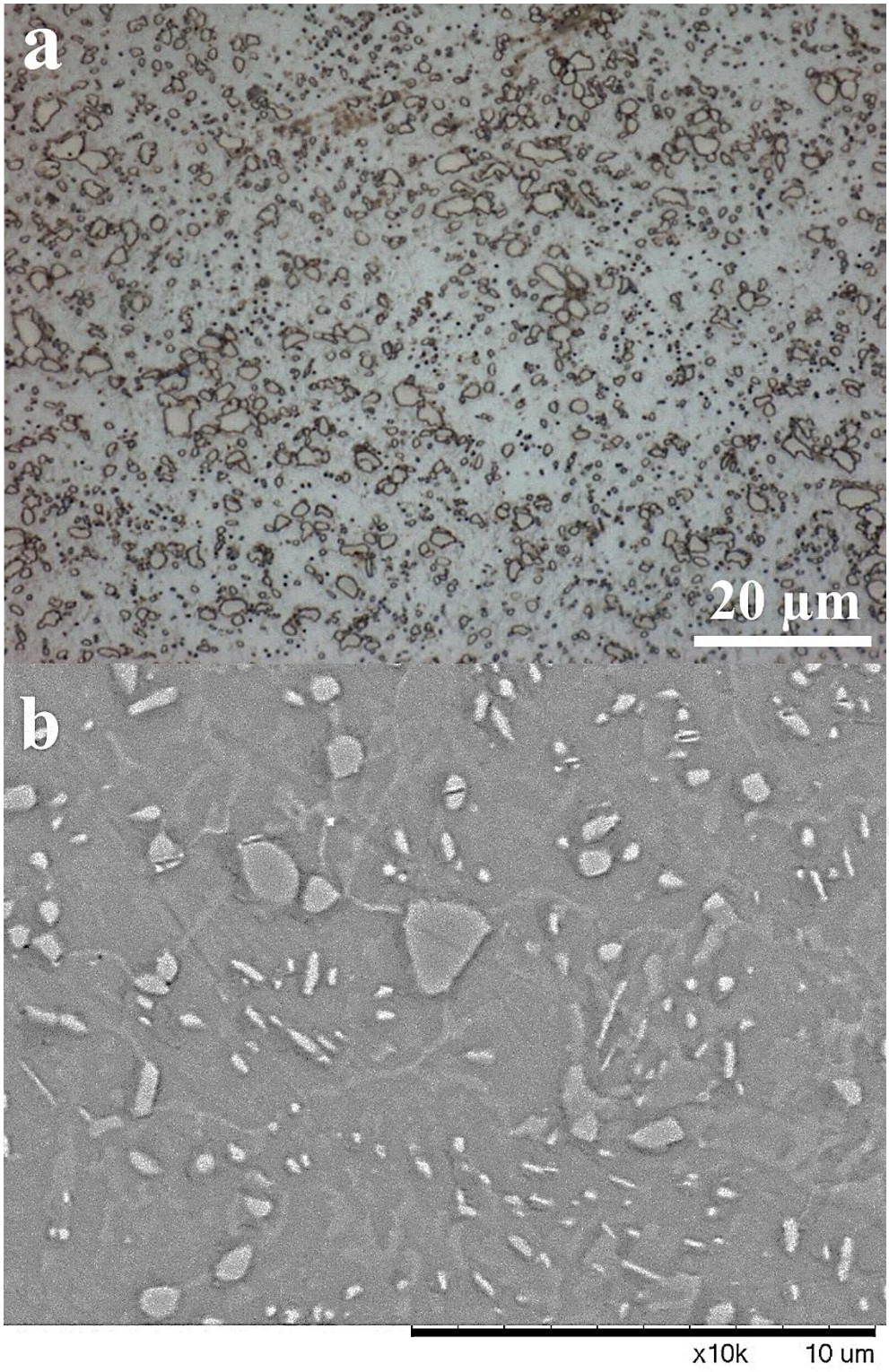
Şekil 6.70 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Gerçekleştirilen 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrasında küresel karbür sayısının arttığı gözlenmiştir. Ancak sıcak ve soğuk haddelenmiş çeliklerde karbür boyut dağılımının homojen olmadığı görülmüştür. Bu nedenle küreselleştirme işlemi 10 çevrim olarak uygulanmıştır.

740°C'de 10 dakika ve 680°C'de 30 dakika ve 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemi sonunda elde edilen mikroyapı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla Şekil 6.71 ve Şekil 6.72'de verilmiştir. Gerçekleştirilen 10 çevrim ısıl işlemiyle karbür boyutu azalmış ve daha homojen bir mikroyapı elde edilmiştir.



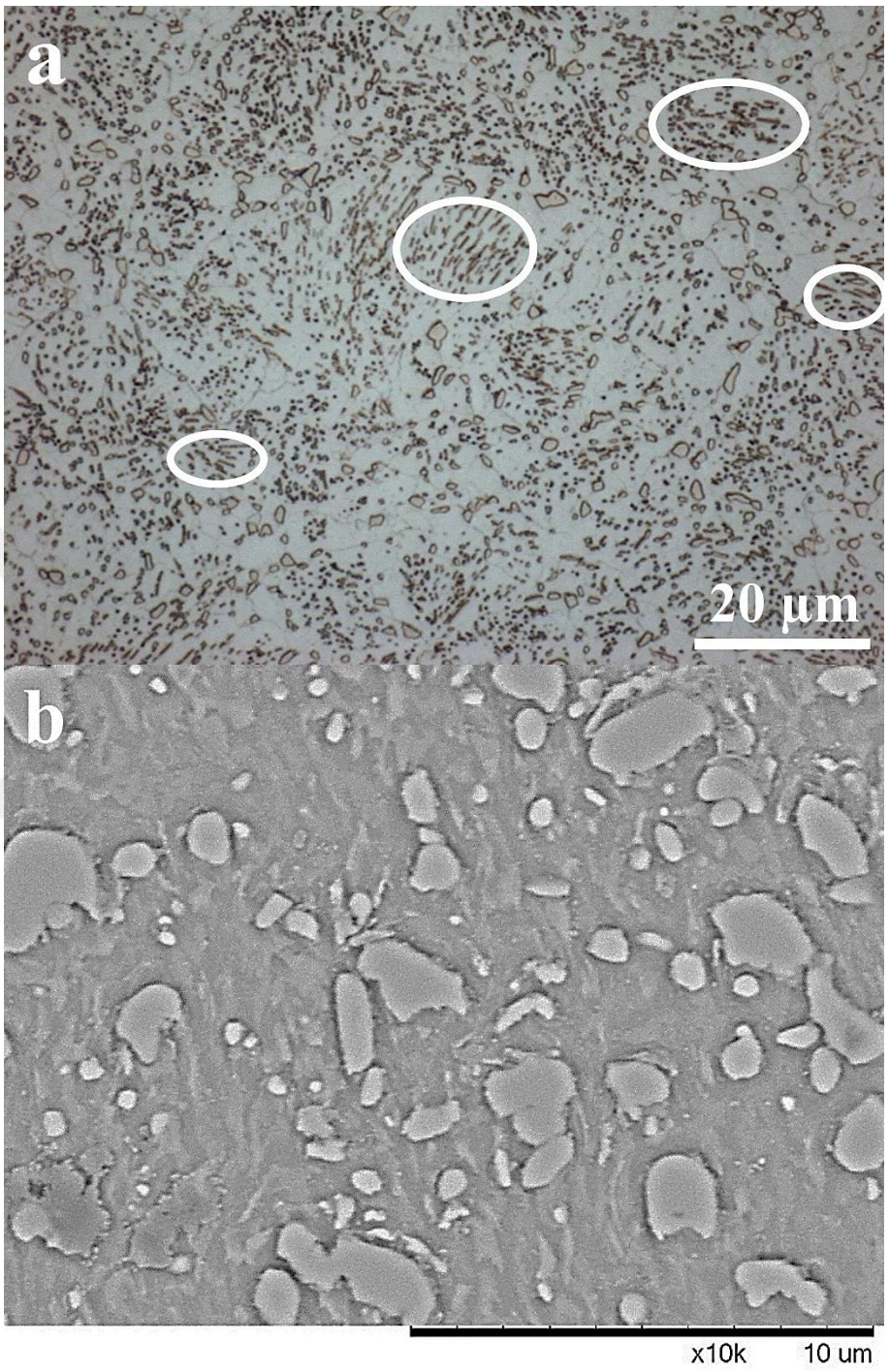
Şekil 6.71 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



Şekil 6.72 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemi ile kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işleminin kıyaslanması amacıyla sıcak haddelenmiş numunelere 680 °C'de 10 saatlik

kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrasında oluşan mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.73'de gösterilmiştir.



Şekil 6.73 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi sonucu, mikroyapıda lameler tanelerin varlığı görülmüş ve küreselleşen karbür sayısının çevrimsel küreselleşmeye nazaran

daha az sayıda olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, AISI 1045 kalite çelikte belirtilen koşullarda yapılan işlemler sonucu, çevrimsel küreselleştirme işlemiyle daha yüksek küresel karbür sayısı elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

6.3.2 Sertlik analizleri

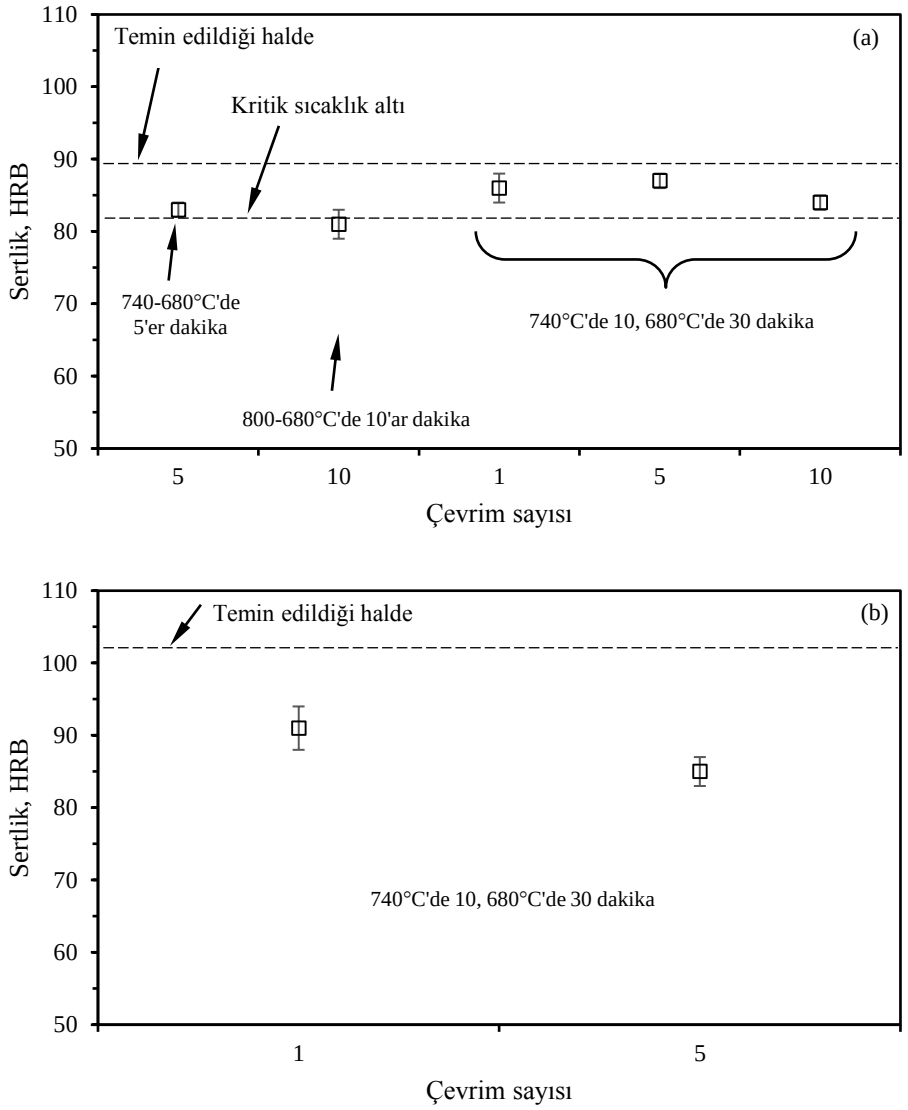
AISI 1045 kalite çeliğe uygulanan farklı işlemler sonucu elde edilen sertlik değerleri, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Çizelge 6.23 ve Çizelge 6.24'de verilmiş, ayrıca Şekil 6.74'de grafik olarak gösterilmiştir. Buna göre, sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerde, aynı koşullarda yapılan çevrimsel küreselleştirme işleminde artan çevrim sayısının sertliği düşürdüğü, küreselleştirme işlemi uygulanan tüm numunelerin sertliğinin çeliğin temin edildiği haldeki sertliğine göre daha düşük olduğu ve en düşük sertlik değerinin 800 °C üst sıcaklık ve 680 °C alt sıcaklık değerinde 10 çevrim küreselleştirme işlemine tabi tutulan numunede elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 6.23: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin sertlik değerleri.

Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	89±1
740	5	680	5	5	83±1
800	10	680	10	10	81±2
740	10	680	30	1	86±2
740	10	680	30	5	87±1
740	10	680	30	10	84±1
-	-	680	600	-	82±2

Çizelge 6.24: Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin sertlik değerleri.

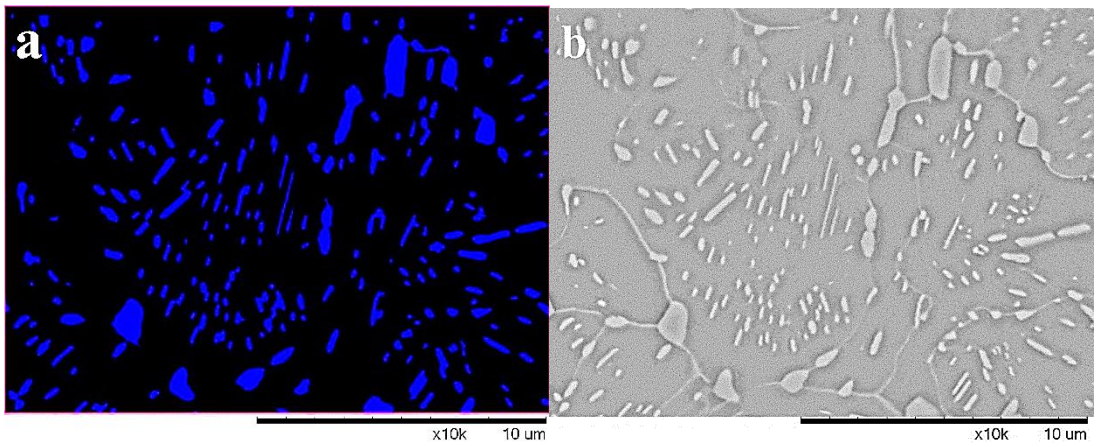
Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	102±0,1
740	10	680	30	1	91±3
740	10	680	30	5	85±2
740	10	680	30	10	79±1



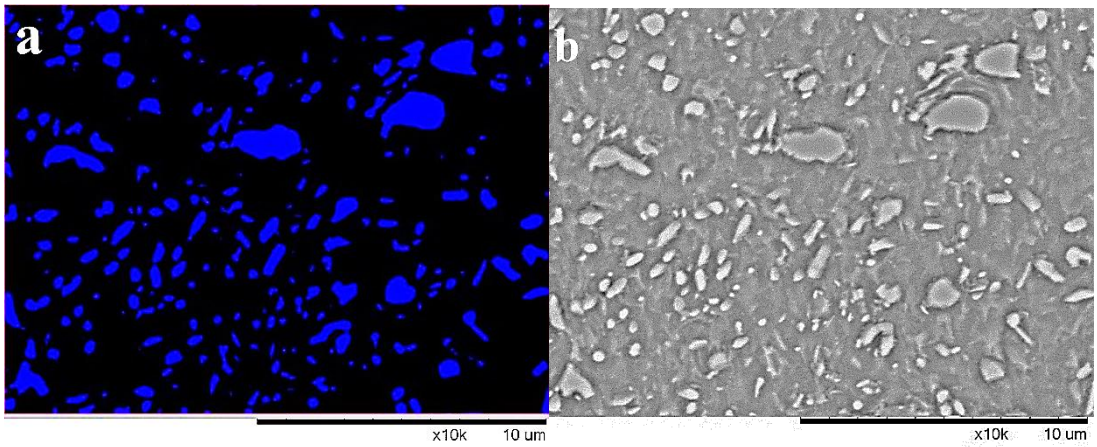
Şekil 6.74 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi.

6.3.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler

AISI 1045 kalite çeliklerin temin edildiği durumdaki ve küreselleştirme işlemleri uygulanmış mikroyapılardaki karbürlerin şekil, boyut ve dağılımlarının incelenmesi amacıyla Clemex görüntü analiz yazılımı kullanılmıştır. Temin edildiği halde sıcak ve soğuk haddelenmiş çeliklerin Clemex görüntü analizine ait fotoğraflar, sırasıyla Şekil 6.75 ve Şekil 6.76'da görülmekte olup, analiz sonuçları ise Çizelge 6.25'de verilmiştir.



Şekil 6.75 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



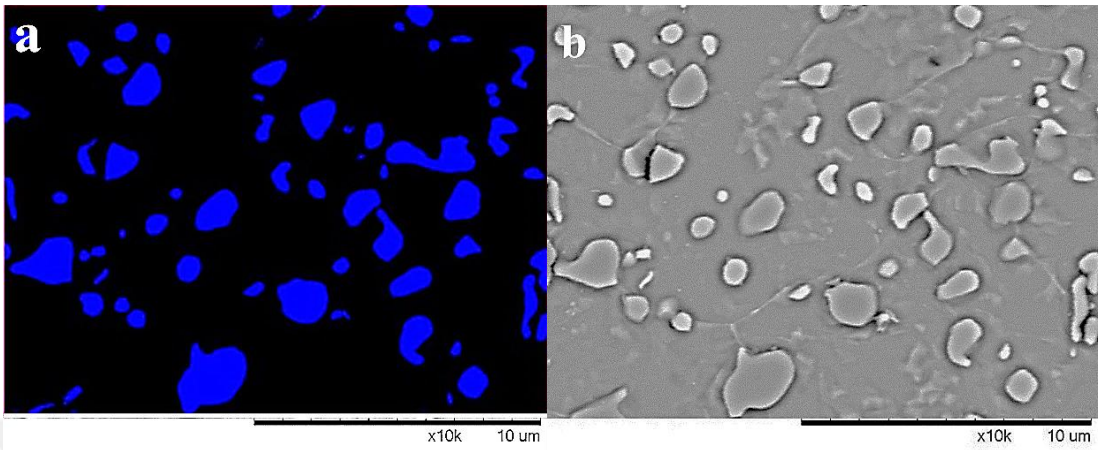
Şekil 6.76 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.25: AISI 1045 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,25±0,14	8,11	0,64±0,23	2,74±1,76
Soğuk	0,38±0,27	10,71	0,64±0,21	2,12±1,35

Görüntü analizi sonucunda, özellikle sıcak haddelenmiş numunede yoğun lameler karbürler tespit edilmiştir. Soğuk haddelenmiş numunede ise karbürlerin daha küresel olduğu, ancak karbür boyutunun homojen olmadığı tespit edilmiştir. Mikroyapı fotoğraflarında sıcak haddelenmiş numunede daha fazla sayıda lameler karbür gözlenmesine rağmen, analiz sonuçlarında karbür küreselliği aynıdır. Bu durum analiz sonuçlarına ilaveten mikroyapının görsel olarak da değerlendirilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.77'de 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme uygulanan numunenin mikroyapısının görüntü analiz fotoğrafları, Çizelge 6.26'da ise analiz sonuçları verilmiştir.

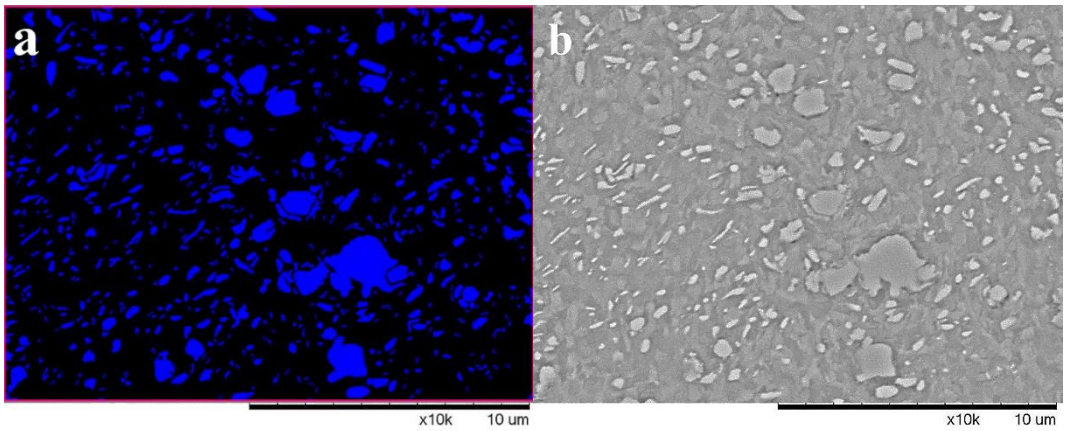


Şekil 6.77 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

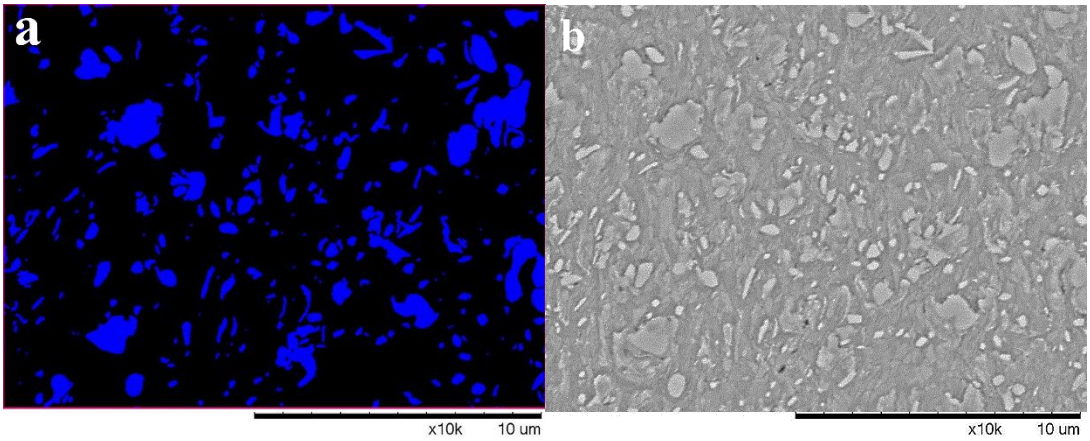
Çizelge 6.26: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,62±0,51	11,88	0,78 ±0,24	2,08±1,07

Şekil 6.77 ve Çizelge 6.25'e göre, çevrimsel küreselleştirme işlemiyle, lameler morfolojinin kaybolduğu, küreselleşme oranının ve küre çapının da arttığı görülmektedir. 740°C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutulan numunelere, 1 çevrim uygulanan küreselleştirme sonrası mikroyapının görüntü analiz fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.78 ve Şekil 6.79'da, analiz sonuçları ise Çizelge 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.78 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



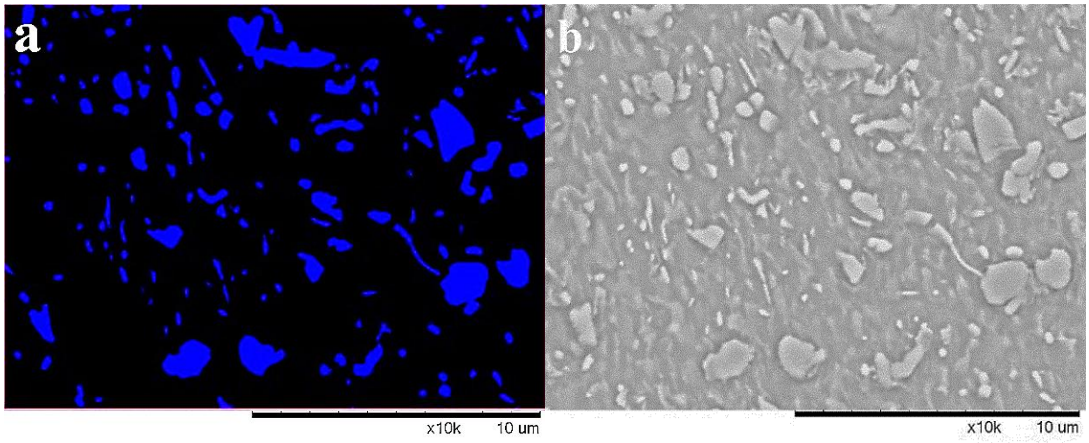
Şekil 6.79 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.27: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

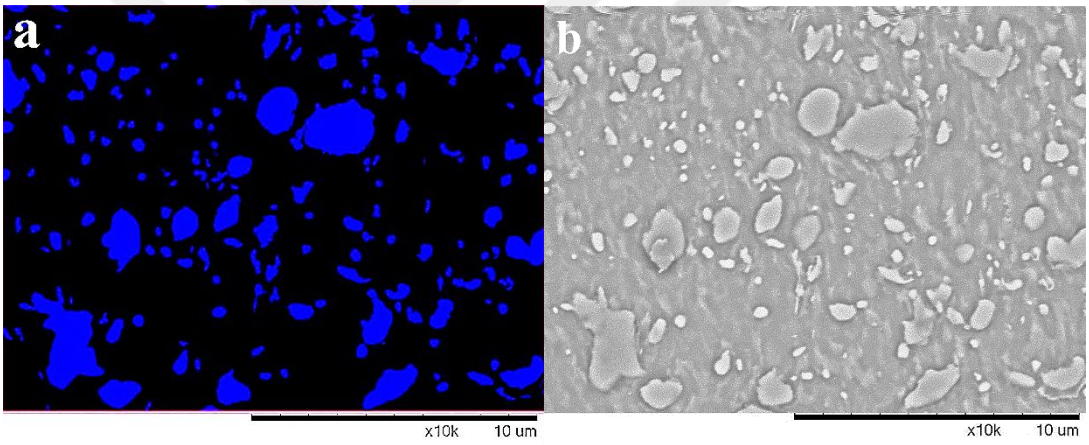
Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,13±0,10	16,26	0,74±0,24	2,01±0,66
Soğuk	0,17±0,15	14,49	0,85±0,22	1,85±0,73

AISI 1045 kalite çeliğe 1 çevrim uygulanan küreselleştirme işlemi sonucu, özellikle küresel karbür oranının arttığı ve küresel morfolojideki karbürlerinin çapının azaldığı görülmekle birlikte, karbür boyut dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. Üst ve alt sıcaklık ve süre aynı kalacak şekilde AISI 1045 kalite çeliğe 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonucu oluşan mikroyapının görüntü analizine ait

fotoğraflar, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla Şekil 6.80 ve Şekil 6.81'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.28'de verilmiştir.



Şekil 6.80 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.



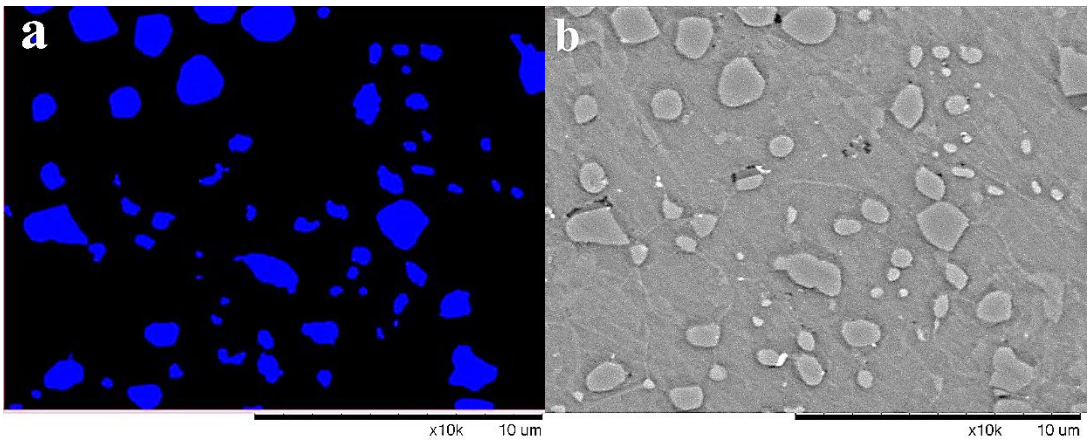
Şekil 6.81 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.28: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

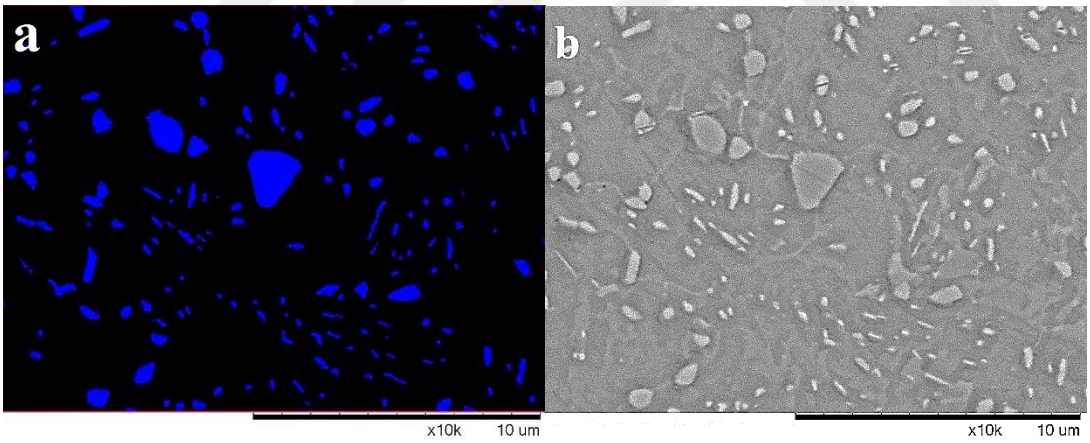
Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,40±0,32	8,69	0,64±0,22	2,30±1,14
Soğuk	0,48±0,40	13,88	0,55±0,21	1,95±0,81

Çevrimsel küreselleştirmenin 5 çevrim uygulanmasıyla, ortalama karbür çapında artış gözlenmiş ancak boyut dağılımında homojenlik elde edilememiştir. Özellikle soğuk

haddelenmiş numunedeki karbür kabalaşmasının, sıcak haddelenmiş numuneye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı koşullar altında 10 çevrim uygulanan çevrimsel küreselleştirme soncu elde edilen analiz fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.82 ve Şekil 6.83'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.29'da görülmektedir.



Şekil 6.82 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

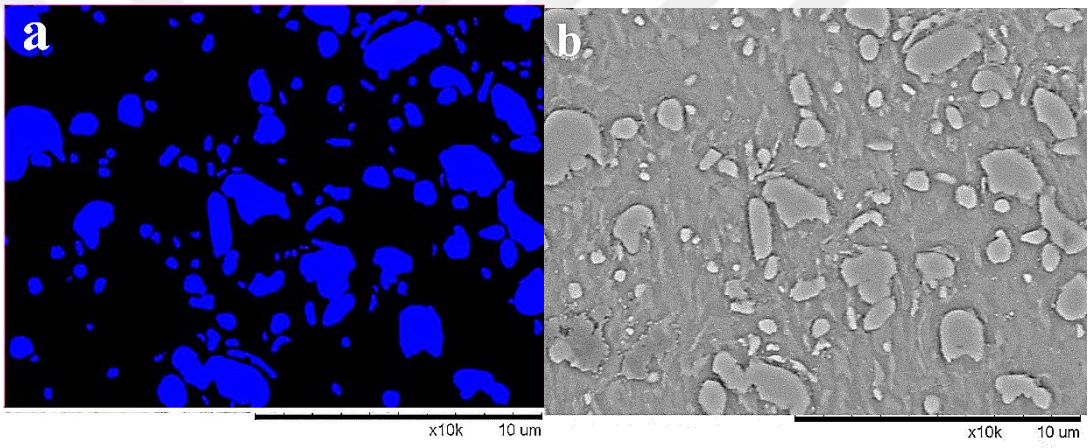


Şekil 6.83 : Soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.29: AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,80±0,50	11,54	0,71±0,14	1,71±0,54
Soğuk	0,39±0,25	7,42	0,64±0,18	2,08±0,92

740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim gerçekleştirilen çevrimsel küreselleştirme işlemiyle, sıcak haddelenmiş numunede küreselliğin arttığı görülmüş, ancak soğuk haddelenmiş numunede kısmen lameler karbürlerin var olduğu görülmüştür. Çevrimsel küreselleştirme işlemiyle karşılaştırma yapabilmek için uygulanan kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi sonucu oluşan mikroyapının görüntü analiz fotoğrafı Şekil 6.84'de analiz sonucu ise Çizelge 6.30'da verilmiştir. Kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemiyle özellikle karbür oranı artmış ve 0,7 düzeyinde bir küresellik elde edilmiştir. Bunun yanı sıra karbür boyutu homojen olmadığı için mikroyapıdaki küçük boyutlu karbürler nedeniyle, ortalama karbür çapının azaldığı görülmüştür. AISI 1045 kalite çelik için en yüksek karbür oranı, kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemiyle elde edilmiştir.



Şekil 6.84 : Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.30: Sıcak haddelenmiş AISI 1045 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

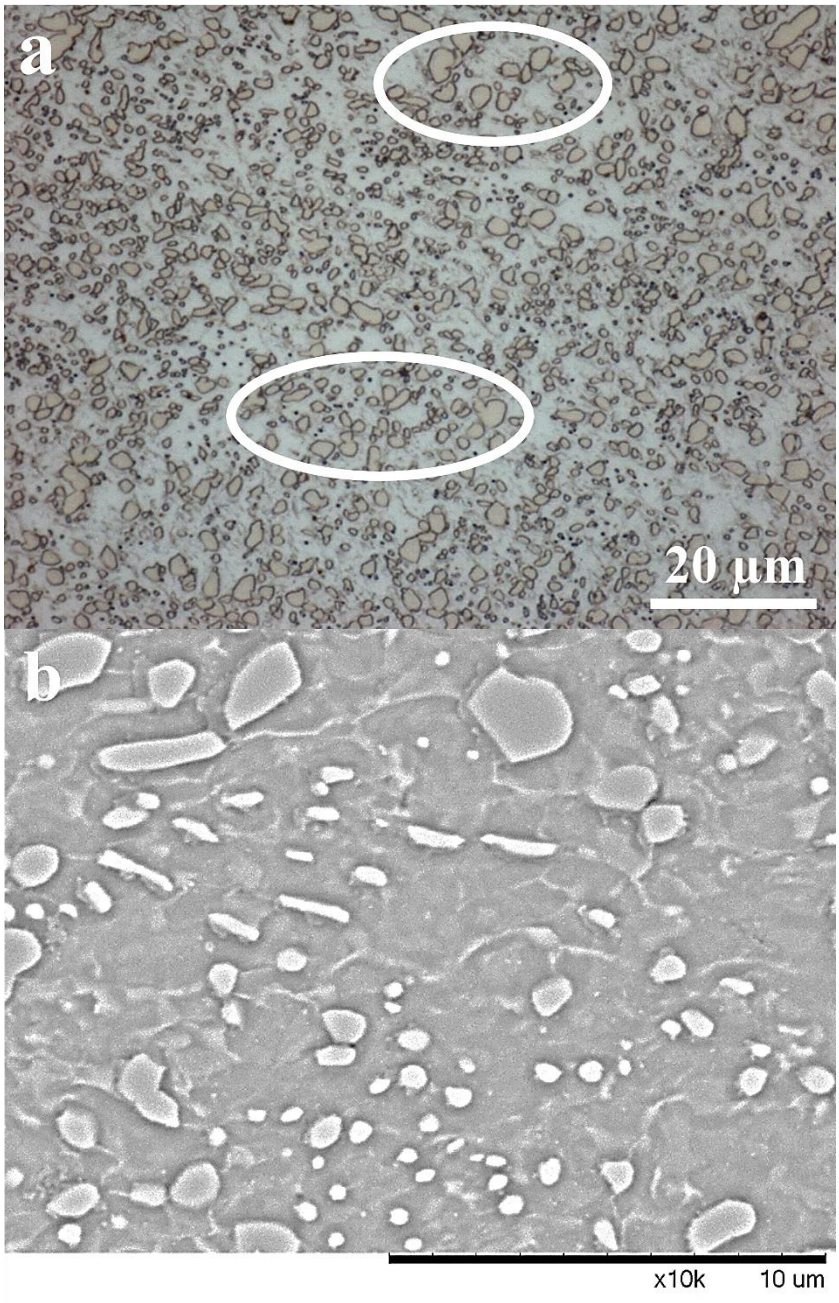
Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,68±0,59	20,74	0,70±0,20	1,81±0,63

6.4 AISI 1070 Kalite Çelik

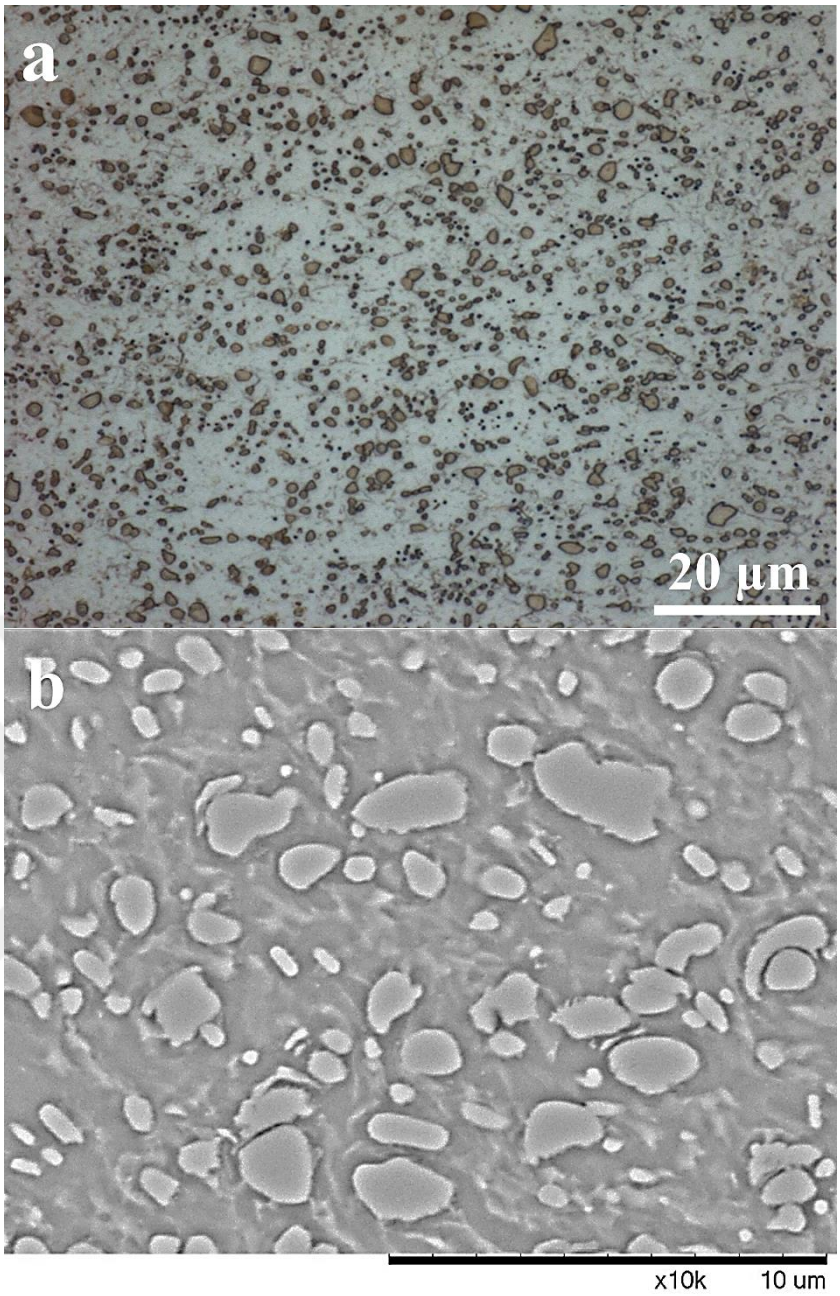
6.4.1 Mikroyapıların incelenmesi

AISI 1070 kalite çeliğin sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerinin temin edildiği haldeki mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.85 ve Şekil 6.86'da verilmiştir. Sıcak

haddelenmiş numunede bölgesel olarak lameler morfolojide karbürler gözlense de, mikroyapının büyük ölçüde küresel karbürlerden (mikroyapı fotoğraflarında elips ile gösterilmiştir) oluştuğu gözlenmiştir. Soğuk haddelenmiş numunede de küresel karbür sayısının yüksek olduğu gözlenmiştir. Öte yandan soğuk haddelenmiş numunede karbür boyutunun sıcak haddelenmiş numuneye göre daha küçük olduğu ve karbür boyutunun daha homojen olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.85 : Temin edildiği halde sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.



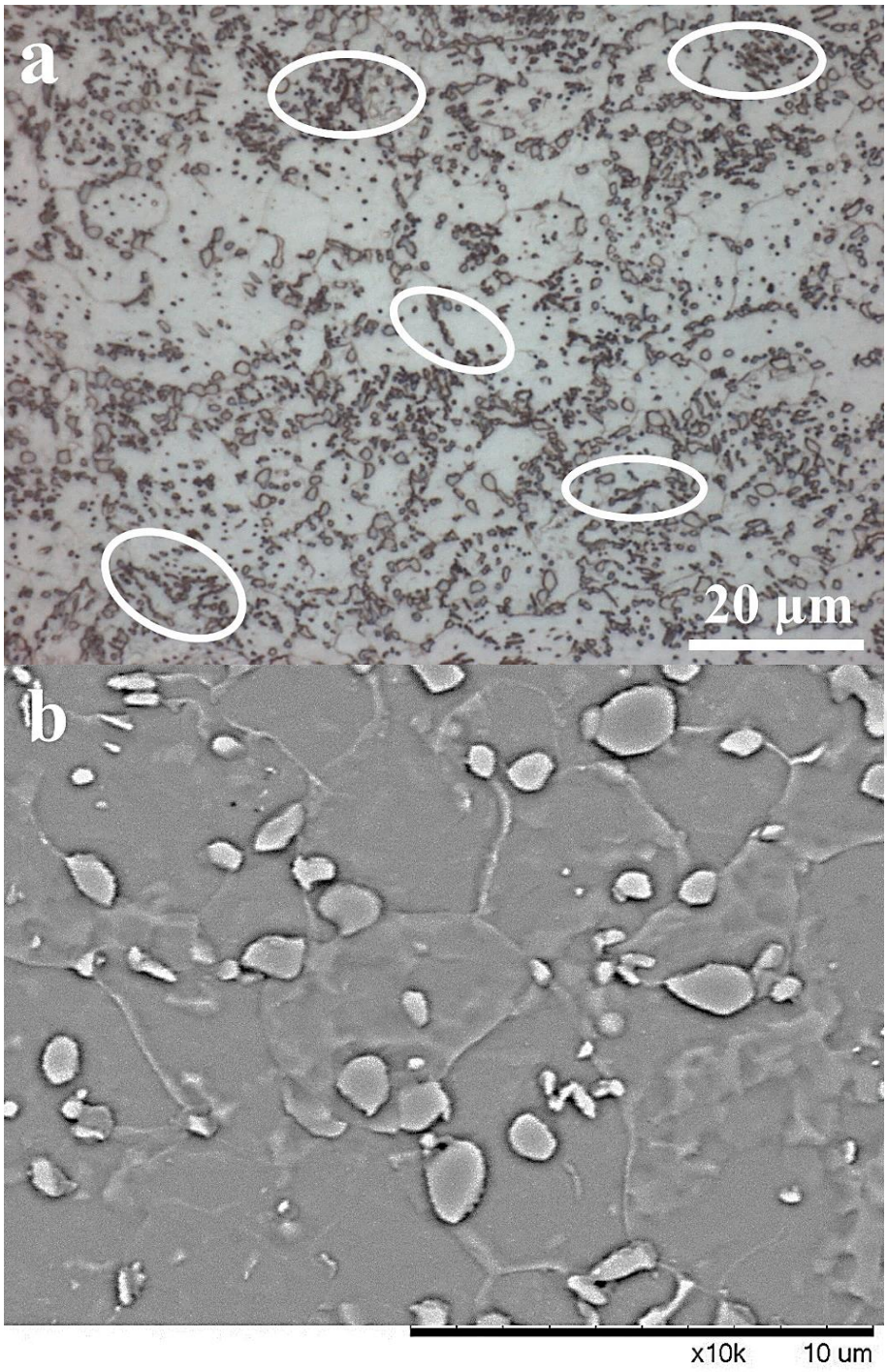
Şekil 6.86 : Temin edildiği halde soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafları.

AISI 1070 kalite çelikte, karbon eşdeğeri A_{c1} ve A_{c3} sıcaklıkları, Eşitlik 5.1 - 5.3 ile hesaplanmış ve Çizelge 6.31'de belirtilmiştir.

Çizelge 6.31: AISI 1070 kalite çelik için belirlenen $C_{eş}$ değeri ile A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıkları.

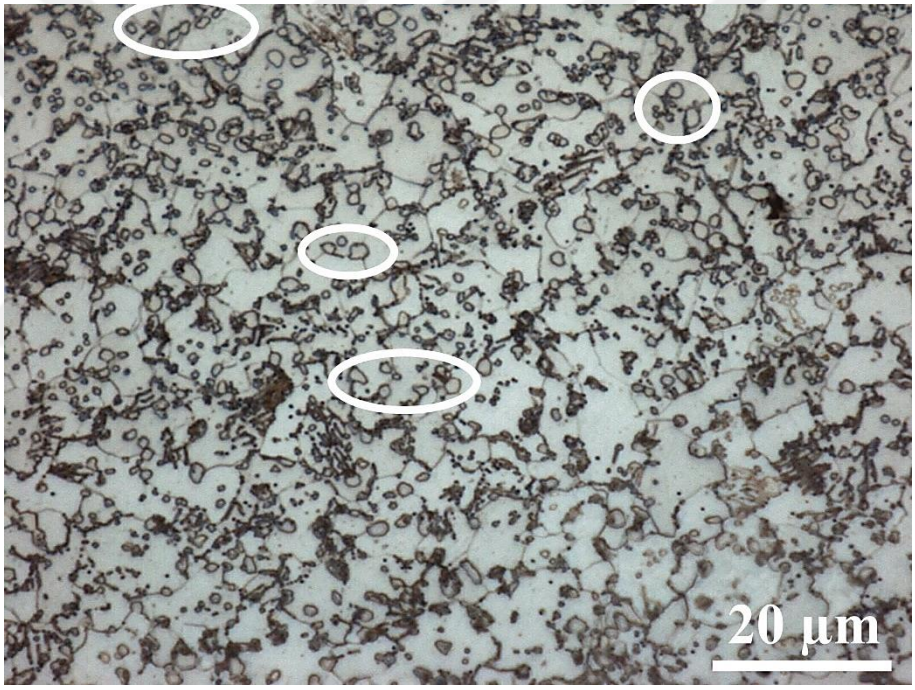
$C_{eş}$ (%)	**A_{c1} (±11,5˚C)**	**A_{c3} (±16,7˚C)**
0,82	713	751

Çevrimsel küreselleştirme işlemi sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğe, 740 - 680 °C sıcaklıklarında, her bir sıcaklıkta 5'er dakika tutularak ve 5 çevrim olarak uygulanmıştır. İşlem sonunda oluşan mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.87'da verilmiştir.



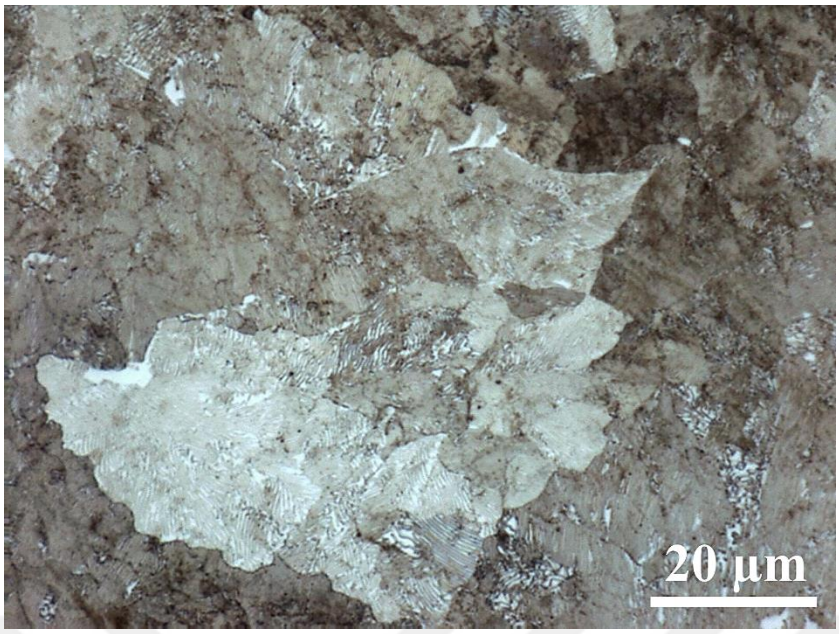
Şekil 6.87 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 - 680 °C'de 5'er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Sıcak haddelenmiş numuneye uygulanan ısıl işlem sonucunda malzeme mikroyapısındaki küreselliğin ve homojenliğin azaldığı görülmüştür. Ayrıca mikroyapıda gözlenen birbiriyle bağlantılı karbürler Şekil 6.87a'da elips ile işaretlenmiştir. İncelenen AISI 1070 kalite çeliğin başlangıç mikroyapısında küresel karbürler bulunduğu için, başlangıç mikroyapısının lameler olması durumunda küreselleştirme işleminin etkisini görmek amacıyla çeliğe normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Şekil 6.88'de 900 °C'de 15 dakika tutularak normalizasyon ısıl işlemi uygulanan çeliğin mikroyapı fotoğrafı görülmekte olup, belirtilen koşullarda yapılan normalizasyon işlemi sonrası küresel karbür sayısının azaldığı, ancak lameler mikroyapının elde edilemediği belirlenmiştir. Bunun üzerine normalizasyon işlemi 950 °C'de 30 dakika süreyle tekrarlanmıştır.



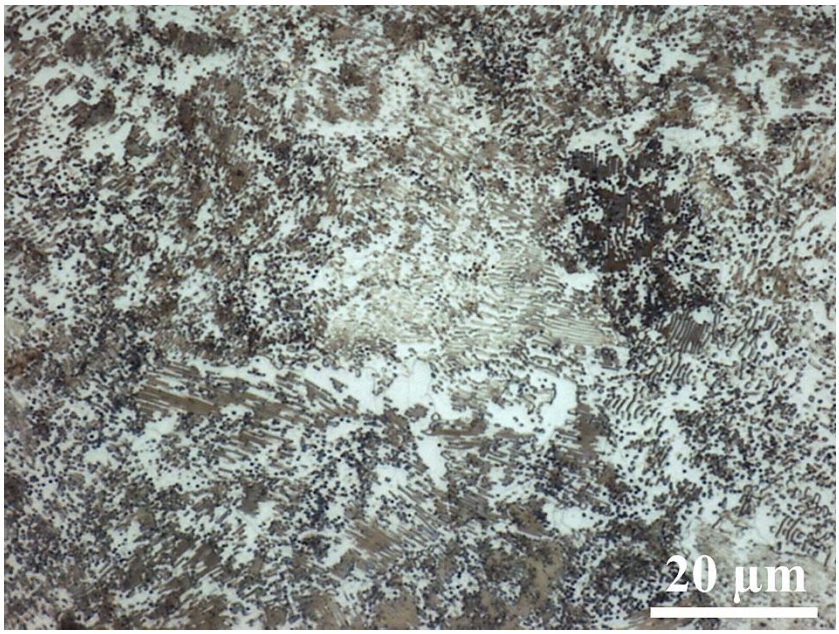
Şekil 6.88 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 900 °C'de 15 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

AISI 1070 kalite çeliğe 950 °C'de 30 dakika süreyle yapılan normalizasyon sonrası oluşan mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.89'da verilmiş olup, mikroyapının tamamen lameler morfolojide perlitten oluştuğu görülmüştür.



Şekil 6.89 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

950 °C'de 30 dakika süreyle normalizasyon uygulanan çeliğe, çevrimsel küreselleştirmenin etkisini görmek amacıyla normalize edilmiş numunelere 680 - 740 °C'de 5'er dakika 5 çevrim olarak küreselleştirme işlemi uygulanmıştır. Ancak bu işlem sonunda küreselleşmenin ancak kısmen sağlandığı, mikroyapıda lameler karbürlerin mevcudiyetinin devam ettiği görülmüştür.



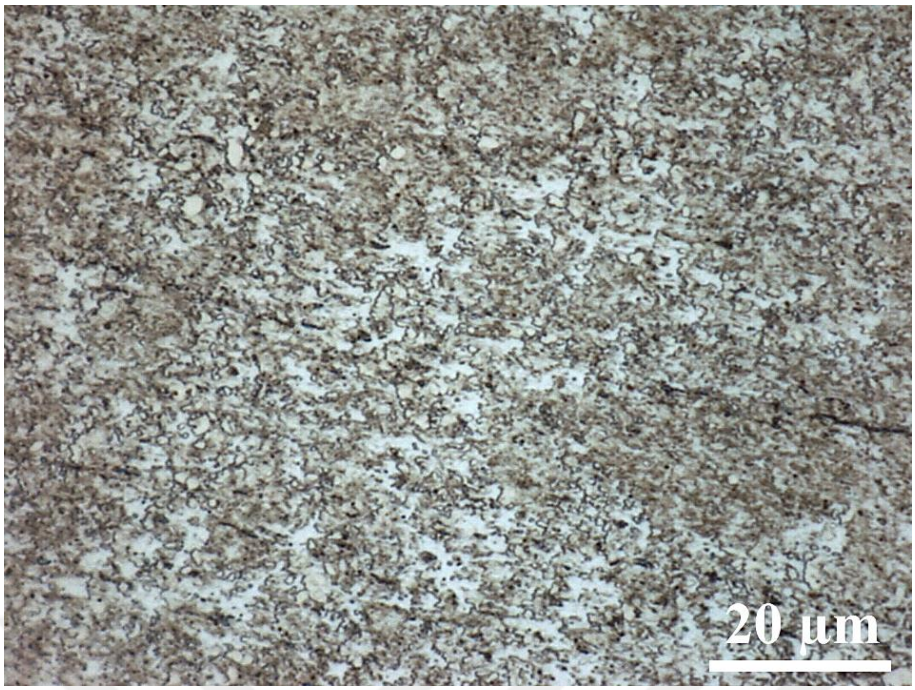
Şekil 6.90 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 740 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Normalize edilmiş numunede çevrimsel küreselleştirme 800 - 680 °C sıcaklıkları için her bir sıcaklıkta 5'er dakika ve 5 çevrim olarak yapılmıştır. Elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.91'de verilmiş olup, küresel karbürler oluşmasına rağmen (elips içinde gösterilmiştir), lameler perlit morfolojisinin kararlı olmasından dolayı mikroyapıda bütünüyle bir küreselleştirme sağlanamamıştır [31,75].



Şekil 6.91 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 950 °C'de 30 dakika normalizasyon ve 800 - 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Üst ve alt sıcaklık değerleri aynı olacak şekilde her bir sıcaklıkta bekleme süresi ve çevrim sayısı arttırılarak uygulanan küreselleştirme işlemi sonunda, mikroyapıda lameler morfolojinin büyük ölçüde bozulduğu görülmüş, ancak homojen bir küresel karbür dağılımı elde edilememiştir. Normalizasyon sonrasında uygulanan ve her bir sıcaklıkta 10 dakika tutularak 10 çevrim yapılan numunenin mikroyapısı Şekil 6.92'de verilmiştir.



Şekil 6.92 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 800 - 680 °C'de 10'ar dakika ve 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

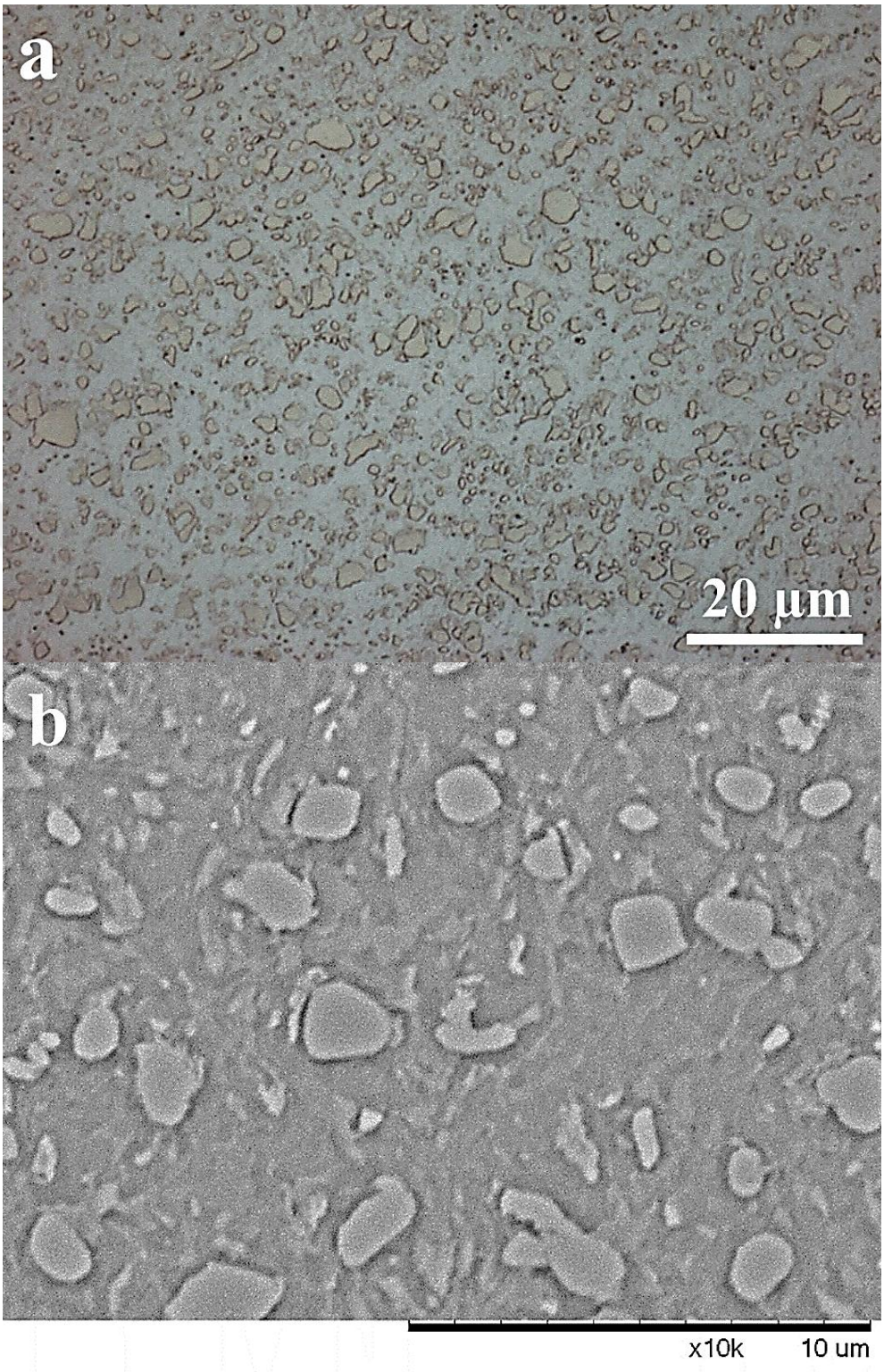
AISI 1070 kalite çeliğe uygulanan çevrimsel küreselleştirme işlemiyle yüksek oranda küresellik elde edilememesi üzerine üst sıcaklık aynı kalacak şekilde, alt sıcaklık ve alt sıcaklıkta tutma süresi arttırılmıştır (690 °C'de 30 dakika). Söz konusu çevrimsel küreselleştirme koşulları Çizelge 6.32'de belirtilmiş olup bu koşullarda 1, 5 ve 10 çevrim küreselleştirme yapılmıştır.

Çizelge 6.32: AISI 1070 kalite çelik için çevrimsel küreselleştirme koşulları.

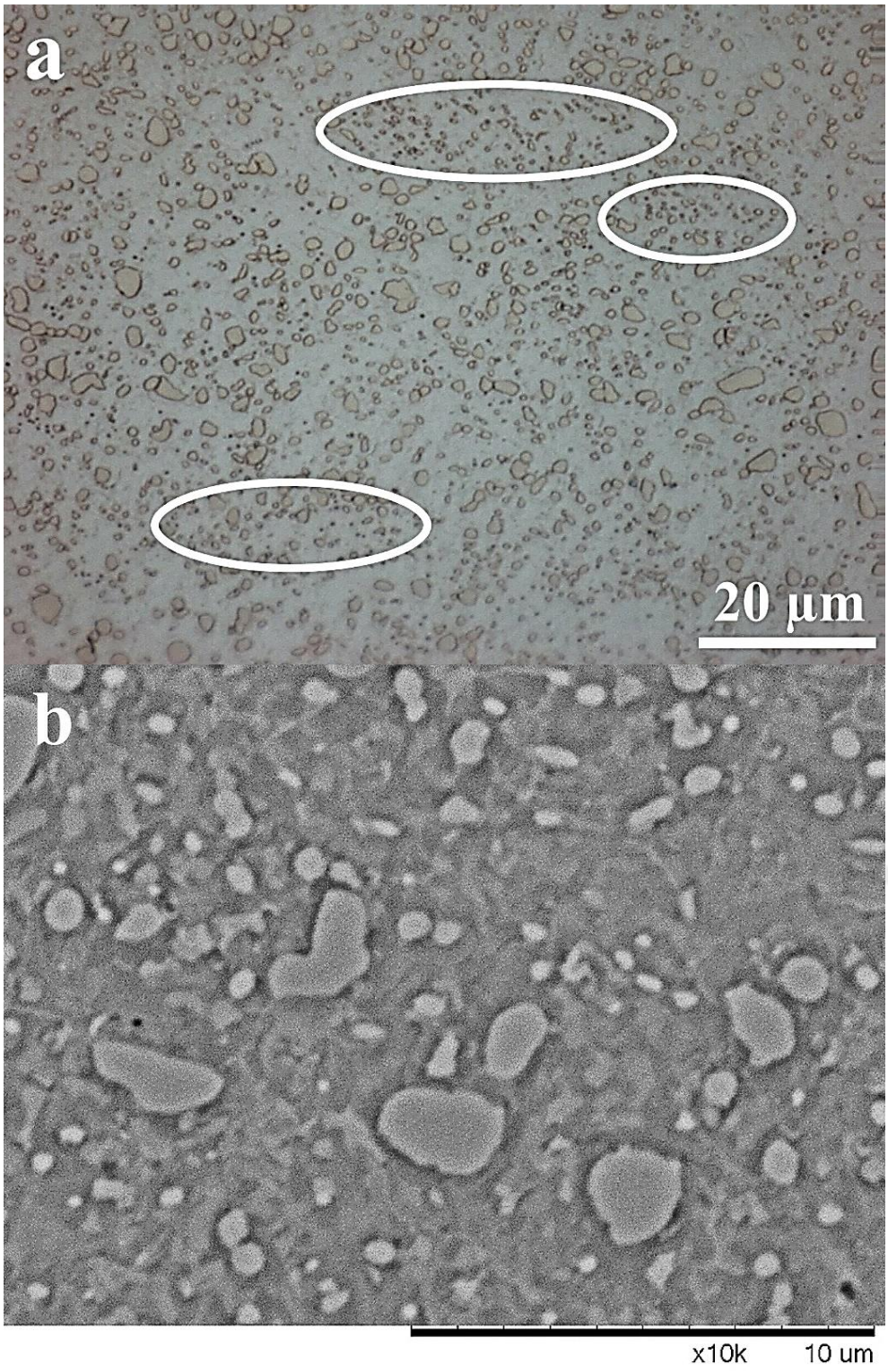
Çelik Kalitesi (AISI)	Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (dk)	Çevrim Sayısı (Tekrar)
1070	740	10	690	30	1-5-10

Çizelge 6.31'de belirtilen koşullarda 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası sıcak ve soğuk haddelenmiş örneklerin mikroyapı fotoğrafları, sırasıyla Şekil 6.93 ve Şekil 6.94'de görülmektedir.

Sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerde, mikroyapıdaki karbürlerin büyük ölçüde küresel olduğu, ancak karbür boyut dağılımının homojen olmadığı, özellikle soğuk haddelenmiş numunede bölgesel olarak küçük boyutlu karbürlerin bulunduğu Şekil 6.94a'da elips içinde gösterilmiştir).

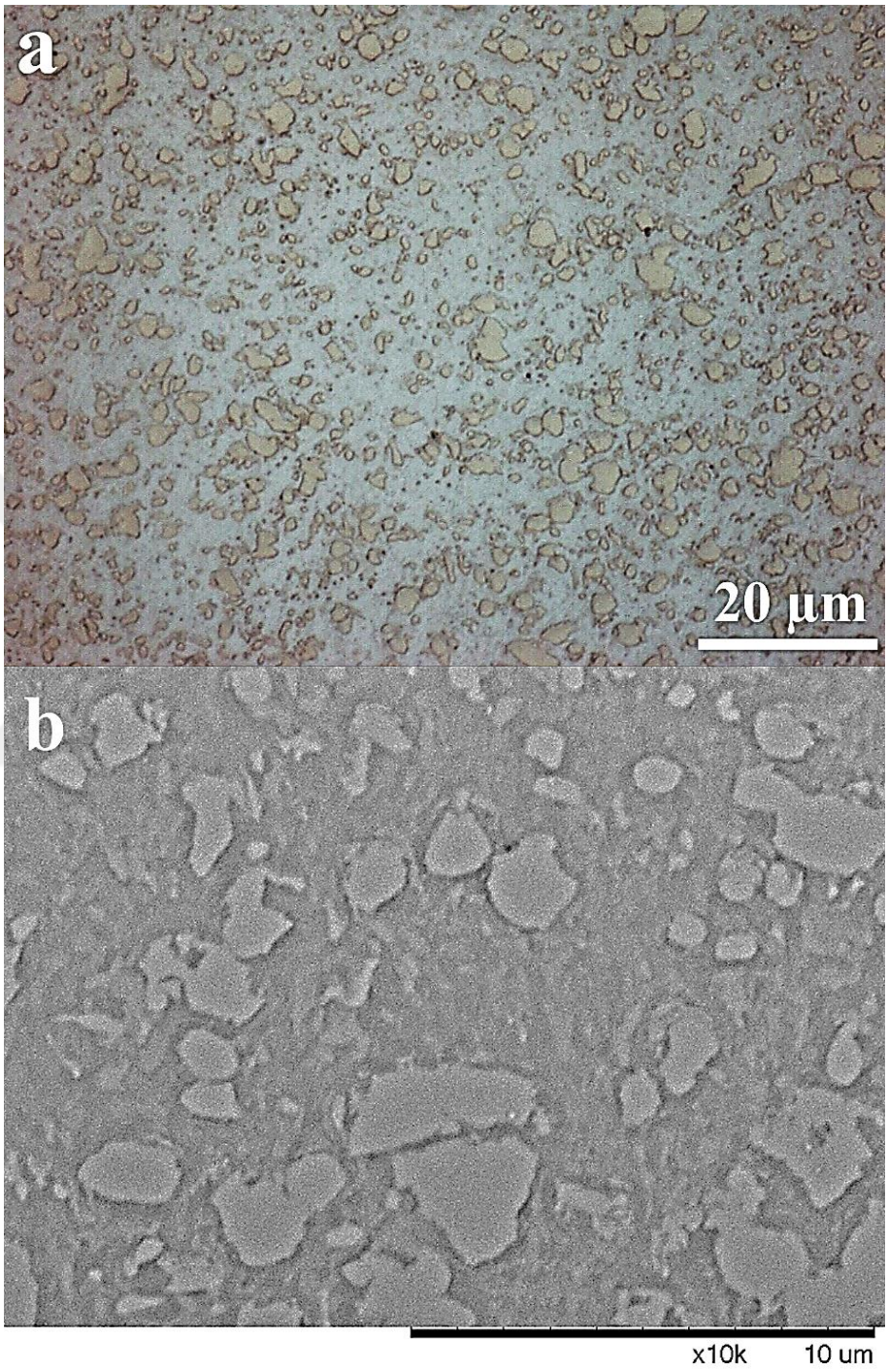


Şekil 6.93 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

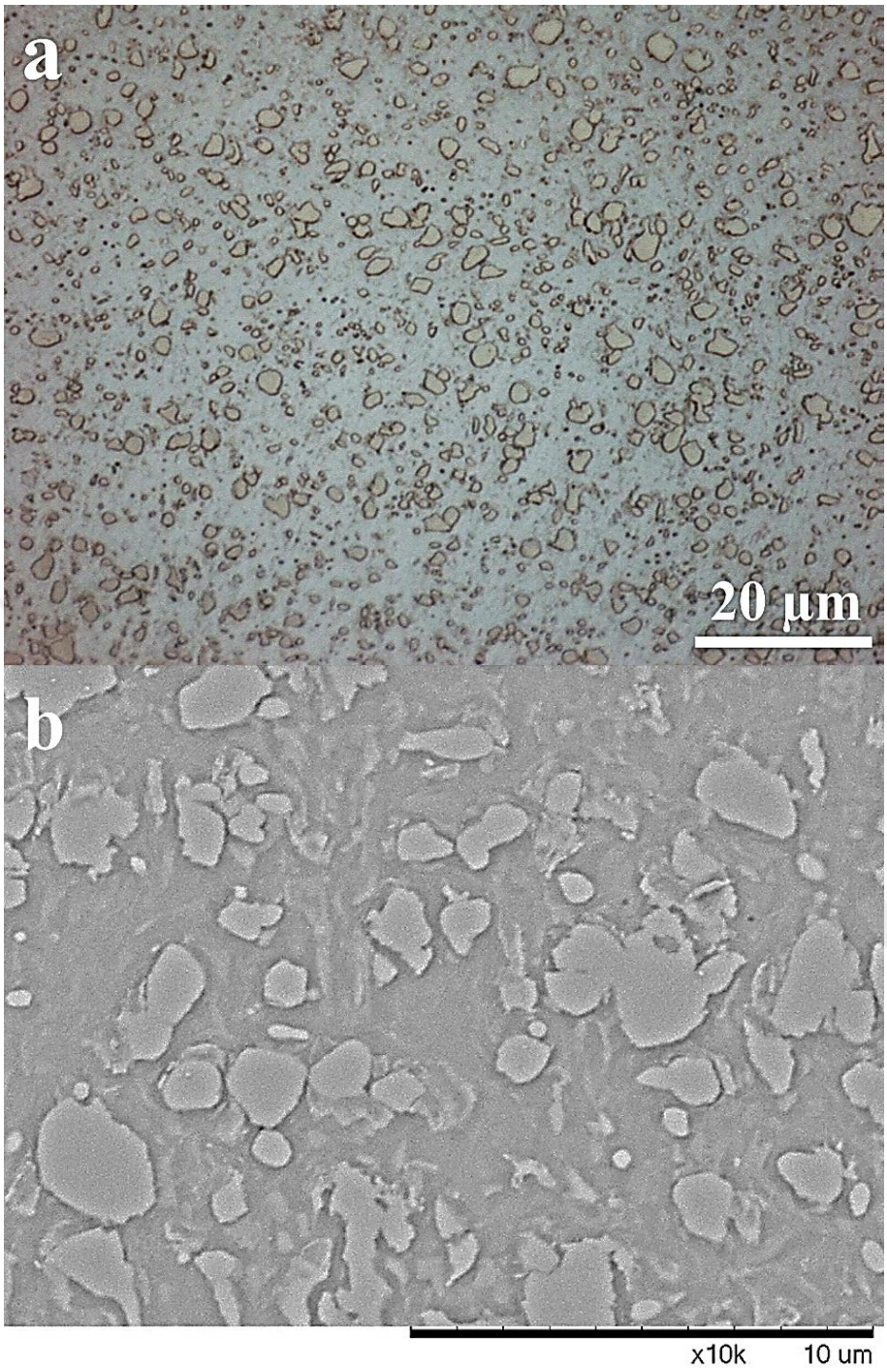


Şekil 6.94 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Söz konusu çelikte çevrim sayısı 5'e çıkarılarak yapılan küreselleştirme işlemi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş çelikler için sırasıyla, Şekil 6.95 ve Şekil 6.96'da verilmiştir.



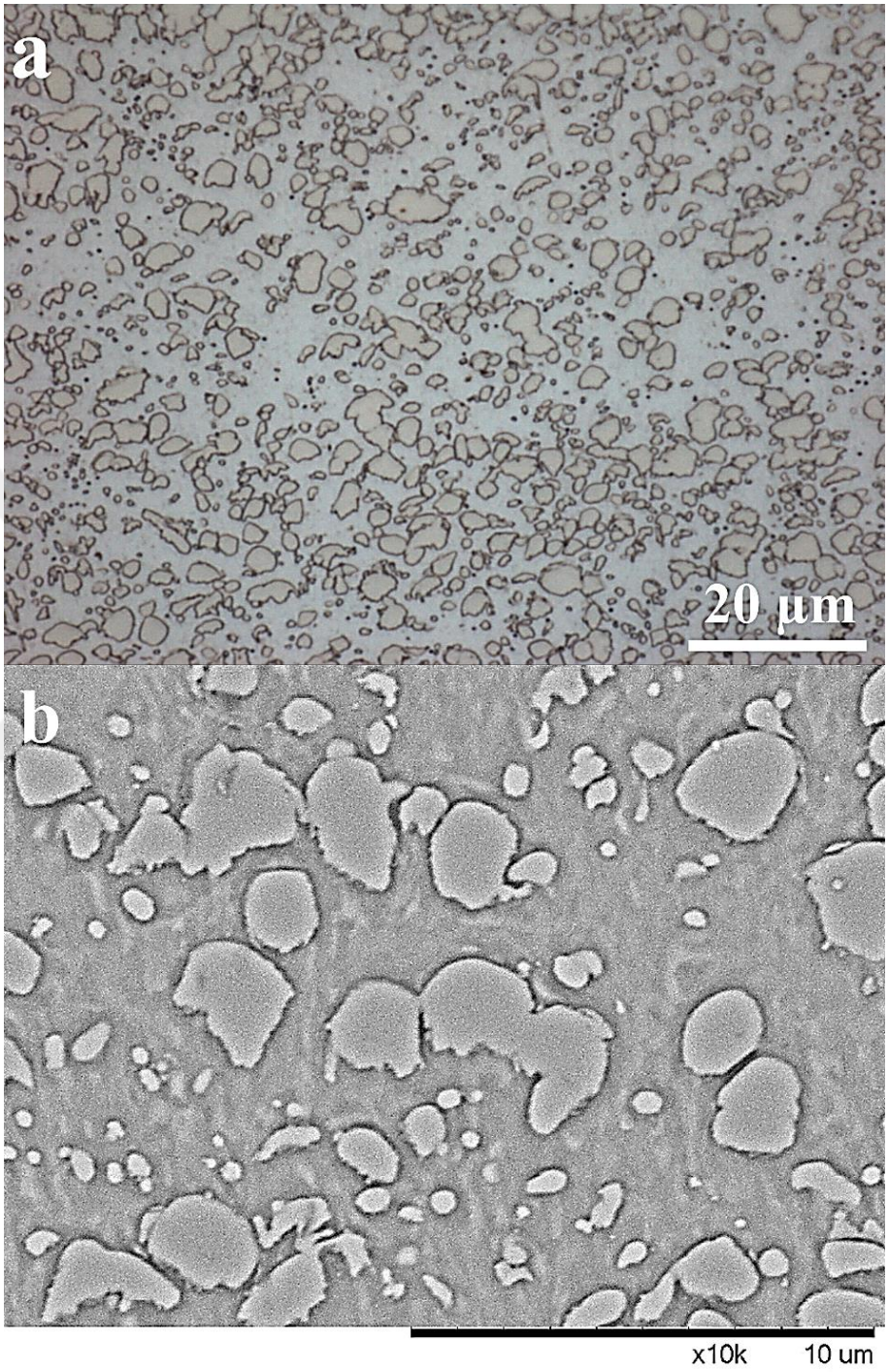
Şekil 6.95 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



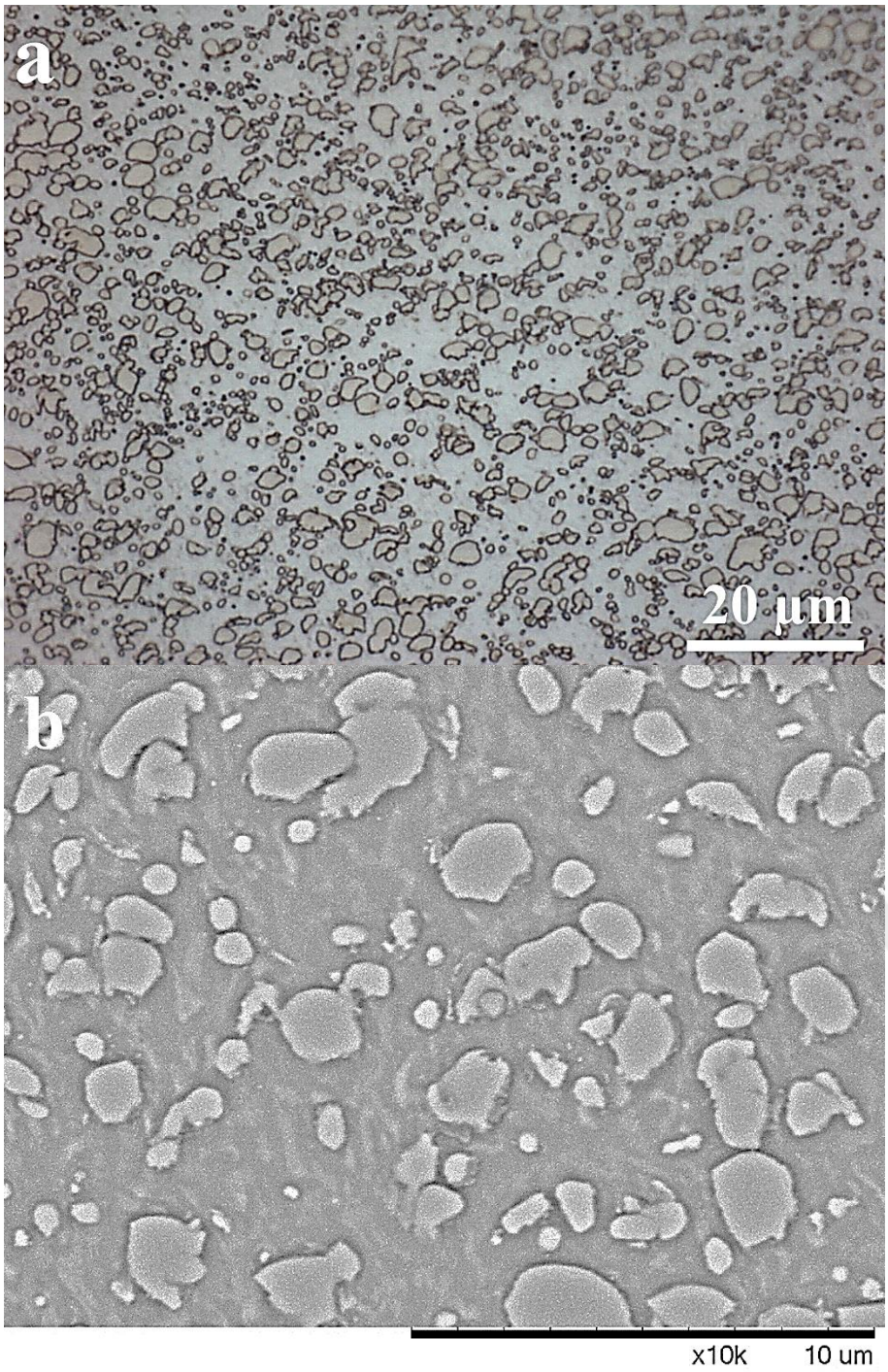
Şekil 6.96 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

Gerçekleştirilen 5 çevrim küreselleştirme işleminin ardından mikroyapıdaki küresel karbür dağılımının daha homojen olduğu ve karbür boyutunun arttığı görülmüştür. Ancak 5 çevrim sonunda da mikroyapıda küçük boyutlu çok sayıda karbür görüldüğü için çevrimsel küreleştirme işlemi 10 çevrim olarak yapılmıştır.

AISI 1070 kalite çelik için 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemine ait mikroyapı fotoğrafları, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.97 ve Şekil 6.98'de gösterilmiştir.



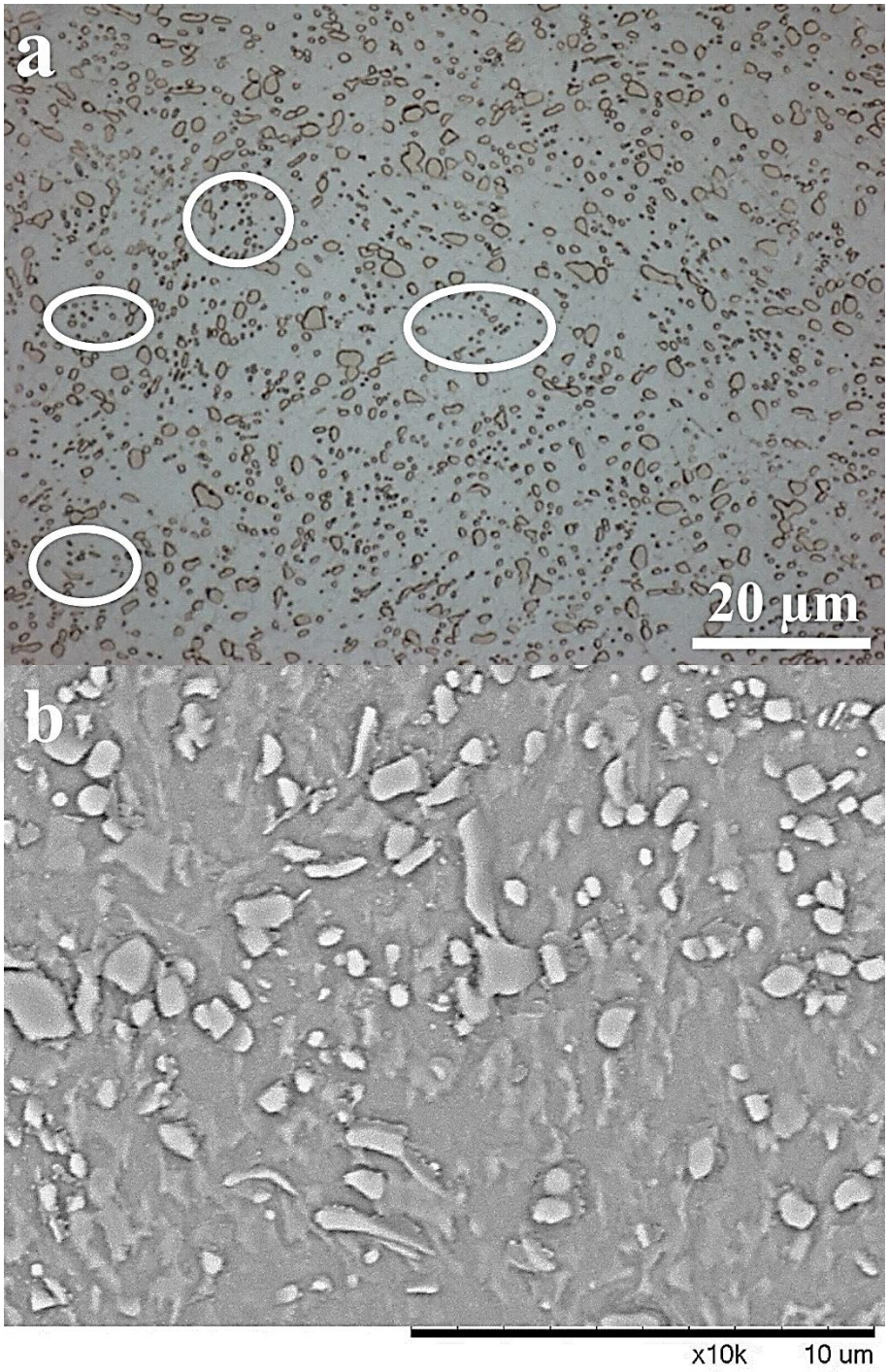
Şekil 6.97 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.



Şekil 6.98 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740°C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (b) SEM fotoğrafı.

AISI 1070 kalite çeliğe 10 çevrim uygulanan küreselleştirme işleminin, mikroyapıda daha homojen bir küresel karbür dağılımı oluşturduğu görülmüştür. Öte yandan, soğuk haddelenmiş numunenin karbür boyutu genel olarak sıcak haddelenmiş numuneye göre daha küçük olarak tespit edilmiştir.

AISI 1070 kalite çeliğe ayrıca 680 °C'de 10 saat süreyle kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemi uygulanmış ve elde edilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.99'da verilmiştir.



Şekil 6.99 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat tutularak yapılan küreselleştirme ısıl işlemi sonrası (a) Optik mikroskop ve (SEM) fotoğrafı.

Söz konusu kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemiyle genel olarak karbür boyutlarının azaldığı ve sayılarının arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, AISI 1070 kalite çelikte çevrimsel küreselleştirme işleminin kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemine göre daha büyük boyutlu karbürler oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

6.4.2 Sertlik analizleri

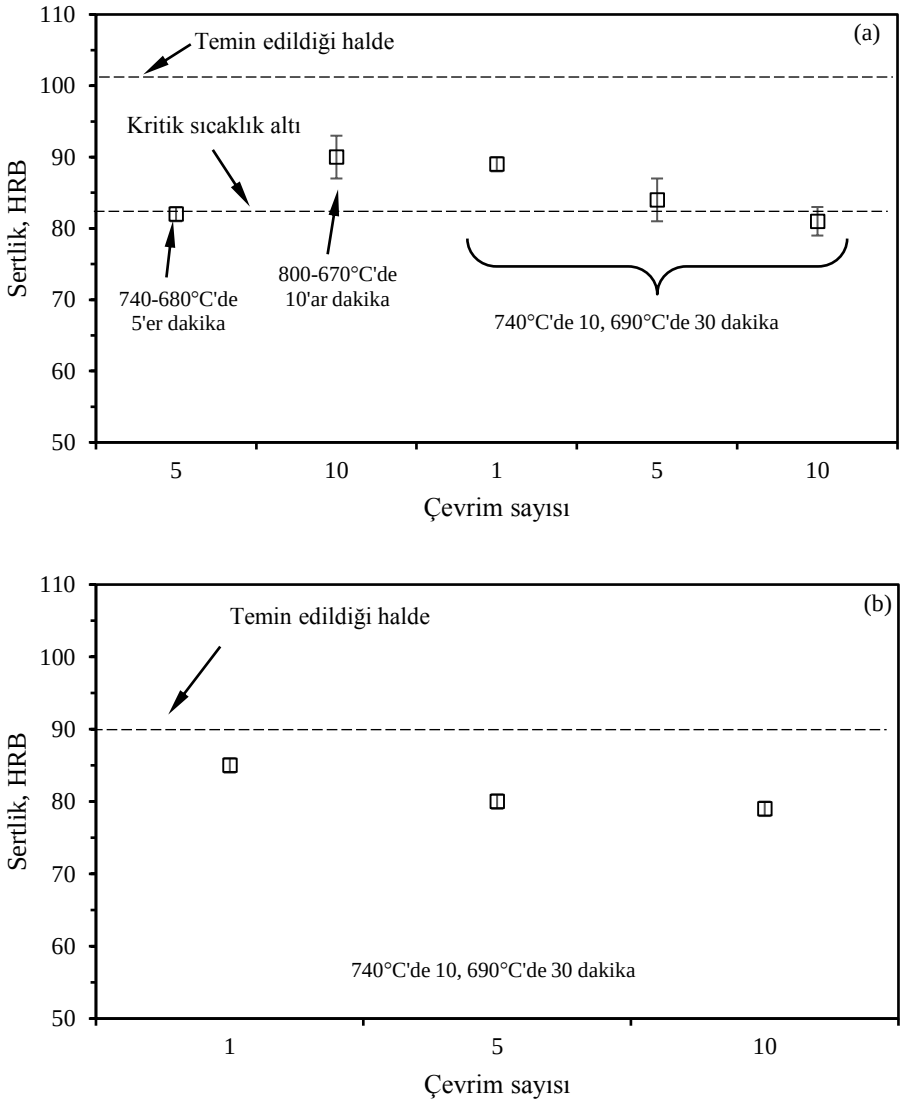
AISI 1070 kalite çeliğin farklı işlemler sonrası sertlik değerleri, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla, Çizelge 6.33 ve Çizelge 6.34'de belirtilmiş, ayrıca Şekil 6.100'de grafik olarak gösterilmiştir. Çevrimsel ve kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemleri, numunelerin temin edildiği durumuna göre daha düşük sertlikle sonuçlanmıştır. Aynı koşullarda yapılan çevrimsel küreselleştirme işleminde, artan çevrim sayısına bağlı olarak sertlik değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.33: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin sertlik değerleri.

Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (Dakika)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (Dakika)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	101±1
740	5	680	5	5	82±1
800	10	670	10	10	90±3
740	10	690	30	1	89±1
740	10	690	30	5	84±3
740	10	690	30	10	81±2
-	-	680	600	-	82±2

Çizelge 6.34: Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin sertlik değerleri.

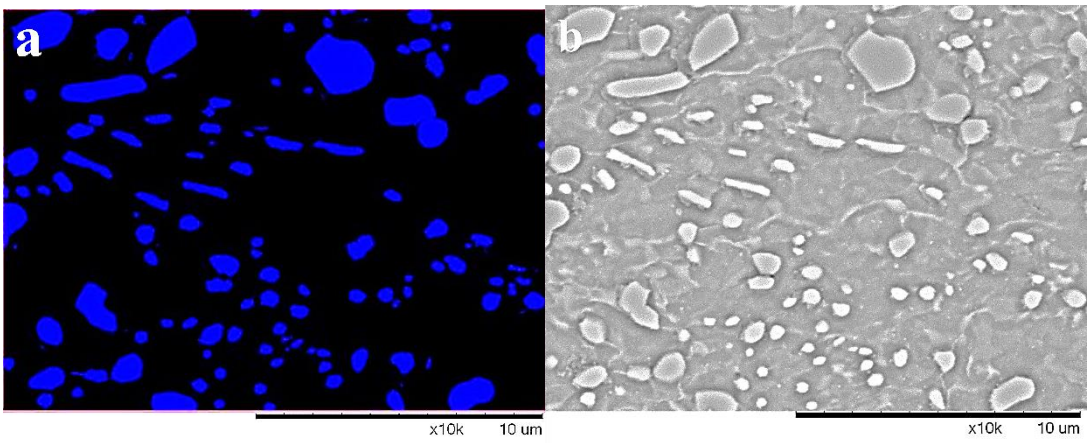
Üst Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (Dakika)	Alt Sıcaklık (°C)	Tutma Süresi (Dakika)	Çevrim Sayısı (Tekrar)	Sertlik (HRB)
-	-	-	-	-	90±2
740	10	690	30	1	85±1
740	10	690	30	5	80±1
740	10	690	30	10	79±1



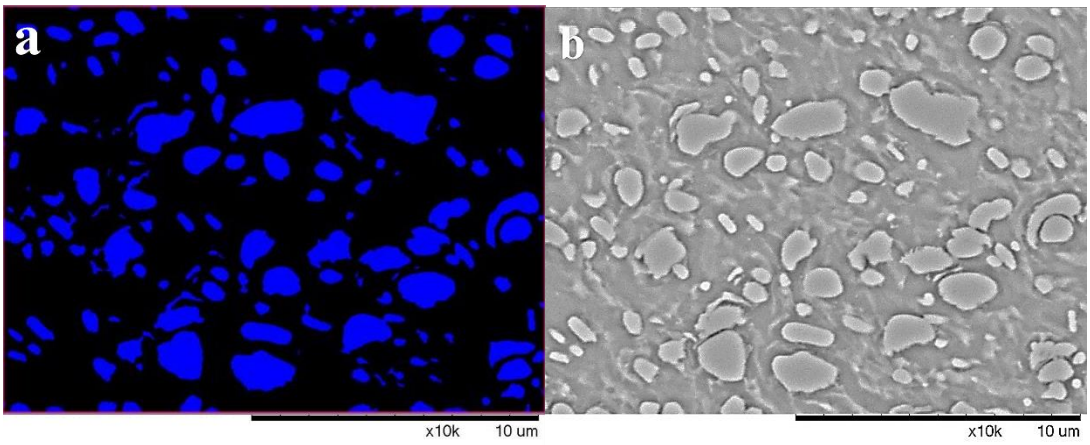
Şekil 6.100 : (a) Sıcak ve (b) Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliklerin sertliğinin küreselleştirme işlem koşullarına bağlı olarak değişimi.

6.4.3 Görüntü analiz yazılımı ile yapılan incelemeler

AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısı ile farklı koşullarda yapılan küreselleştirme sonrası elde edilen mikroyapıları Clemex görüntü analiz yazılımı ile de incelenmiş, gözle incelemede tespit edilen mikroyapı farklılıklarının sayısal hale getirilmesine çalışılmıştır. Bu kapsamda, AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının görüntü analizine ait fotoğraflar, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.101 ve Şekil 6.102'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.35'de verilmiştir.



Şekil 6.101 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

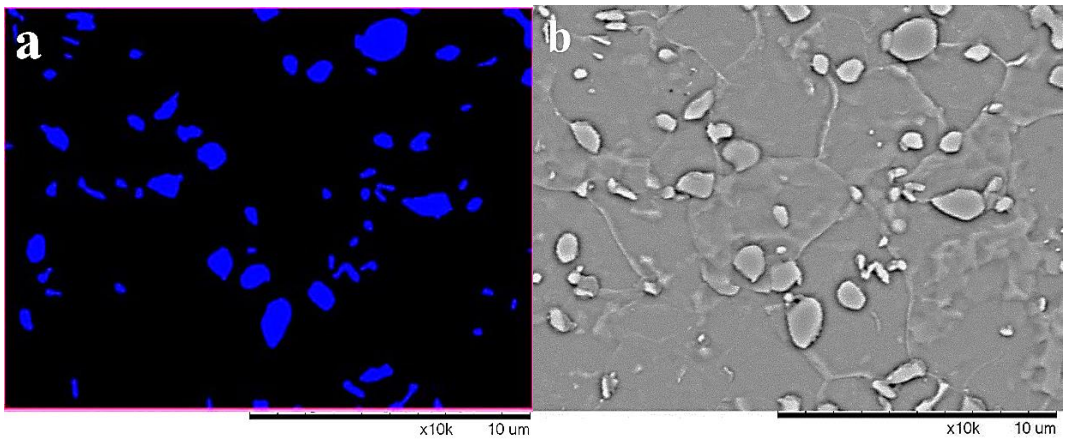


Şekil 6.102 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.35: AISI 1070 kalite çeliğin temin edildiği haldeki mikroyapısının Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,57±0,43	13,14	0,47±0,16	1,94±0,87
Soğuk	0,42±0,31	21,50	0,69±0,20	2,06±1,61

Gerçekleştirilen analiz sonucunda özellikle sıcak haddelenmiş numunede kısmi lameler yapılardan dolayı küresellik oranının düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca soğuk haddelenmiş numunede daha yüksek olmak üzere, her iki numunede de küresel karbür oranının yüksek olduğu belirlenmiştir. AISI 1070 kalite çeliğe 740 – 680 °C' de 5'er dakika ve 5 çevrim uygulanan çevrimsel küreselleştirme sonrası yapılan görüntü analiz fotoğrafları Şekil 6.103'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.36'da verilmiştir.

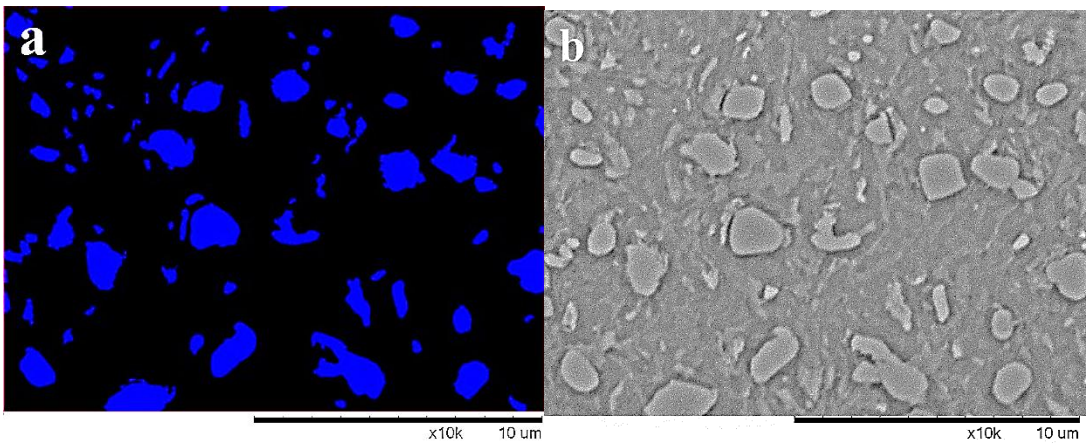


Şekil 6.103 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

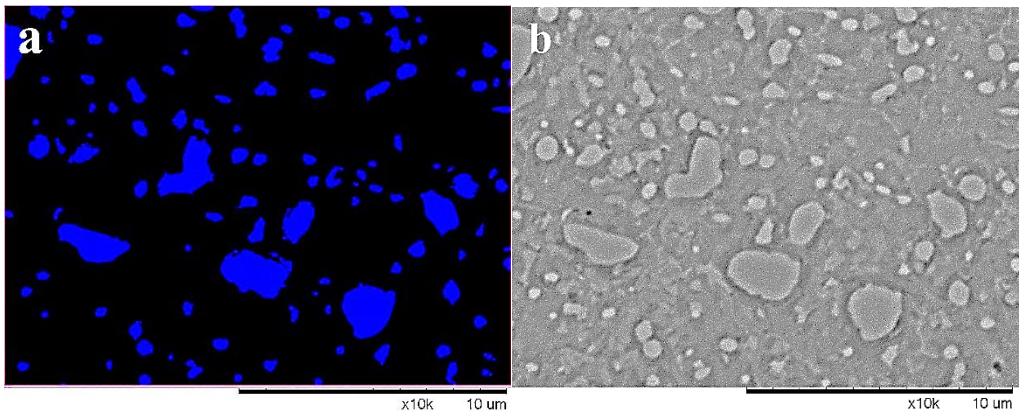
Çizelge 6.36: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 – 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim yapılan çevrimsel küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,25±0,15	6,10	0,70±0,25	2,91±4,35

Çevrimsel küreselleştirme işlemiyle küresellik oranının temin edildiği duruma göre arttığı, ancak ortalama karbür çapının azaldığı tespit edilmiştir. Çevrimsel küreselleştirme sıcaklık ve süresinin revize edilmesiyle yapılan 1 çevrim küreselleştirme işlemi sonunda yapılan görüntü analiz fotoğrafları sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla, Şekil 6.104 ve Şekil 6.105'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.37'de verilmiştir.



Şekil 6.104 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

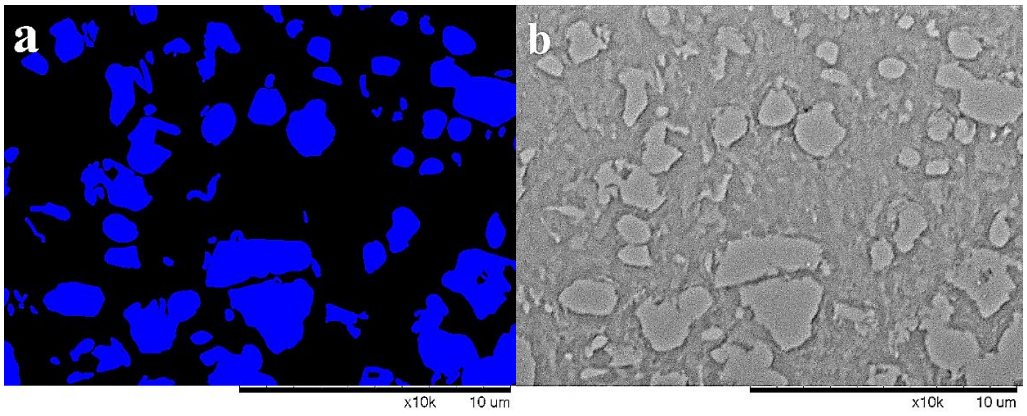


Şekil 6.105 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

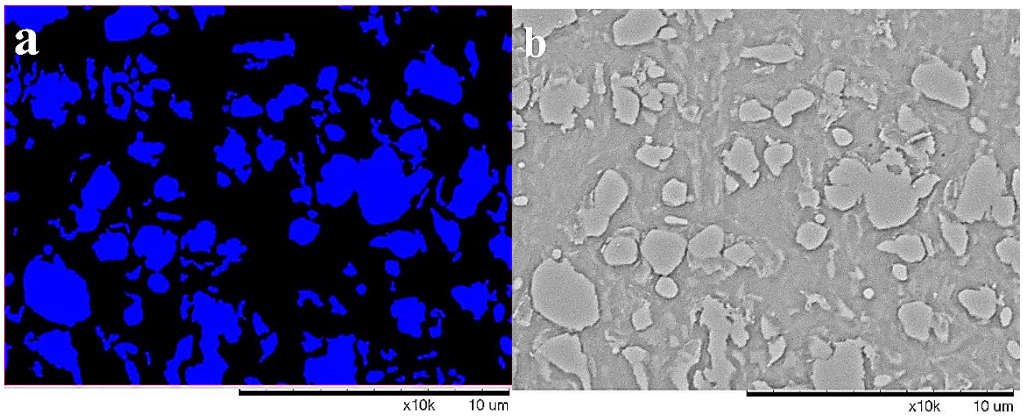
Çizelge 6.37: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 1 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,65±0,49	11,60	0,50±0,17	1,97±0,67
Soğuk	0,55±0,40	10,19	0,55±0,15	1,65±0,47

Belirlenen koşullarda yapılan 1 çevrim küreselleştirme işlemiyle ortalama karbür çapında artma, küresellik oranında ise azalma gözlenmiş, sıcak ve soğuk haddelenmiş örneklerin sonuçları arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Aynı koşullarda 5 çevrim olarak yapılan küreselleştirme işlemi sonrası mikroyapının görüntü analizine ait fotoğraflar, sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler için sırasıyla Şekil 6.106 ve 6.107'de, analiz sonuçları ise Çizelge 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.106 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

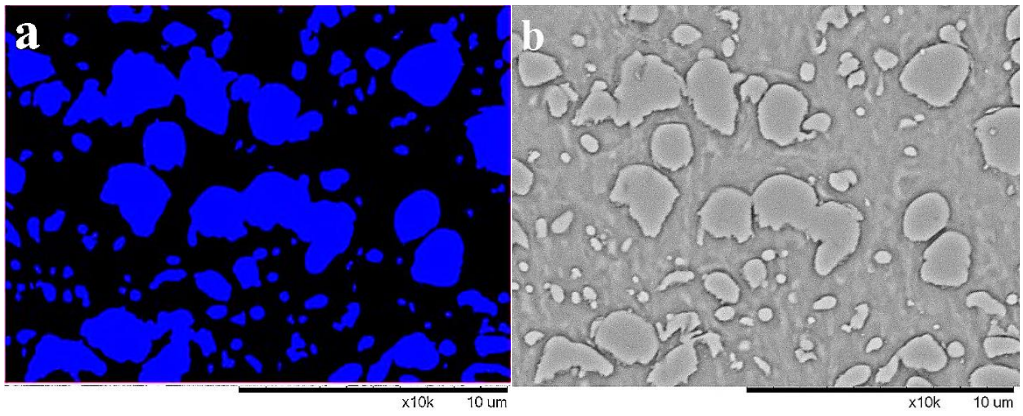


Şekil 6.107 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

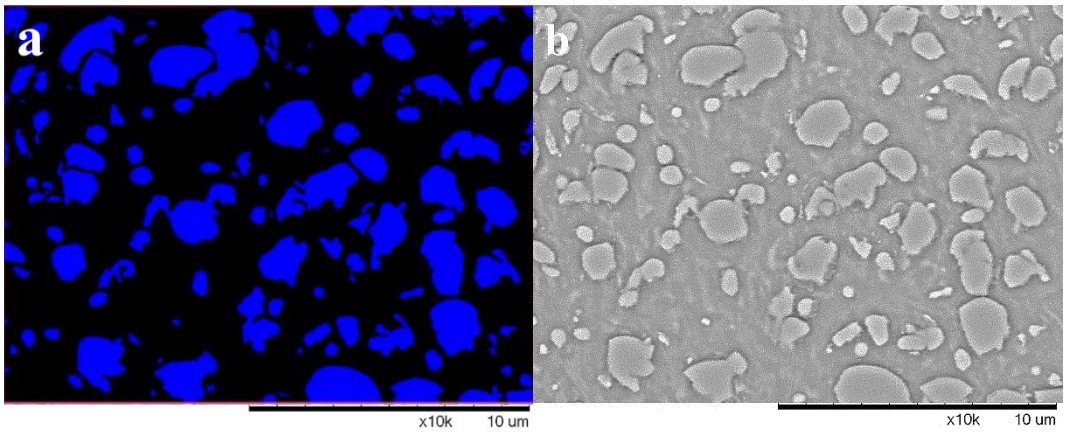
Çizelge 6.38: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 5 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,73±0,23	27,22	0,53±0,38	1,78±0,65
Soğuk	0,84±0,66	26,78	0,46±0,20	1,97±0,75

Çevrim sayısının 5'e çıkarılmasıyla karbür oranının ve boyutunun arttığı, ancak karbürlerin küresellik oranında belirgin bir artma gözlenmemiştir. Çevrimsel küreselleştirmenin sıcaklık ve süresi aynı kalacak şekilde bu kez 10 çevrim küreselleştirme uygulanmıştır. Sıcak ve soğuk haddelenmiş örneklerin mikroyapısının görüntü analizine ait fotoğraflar, sırasıyla Şekil 6.108 ve Şekil 6.109'da, analiz sonuçları ise Çizelge 6.39'da gösterilmiştir.



Şekil 6.108 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

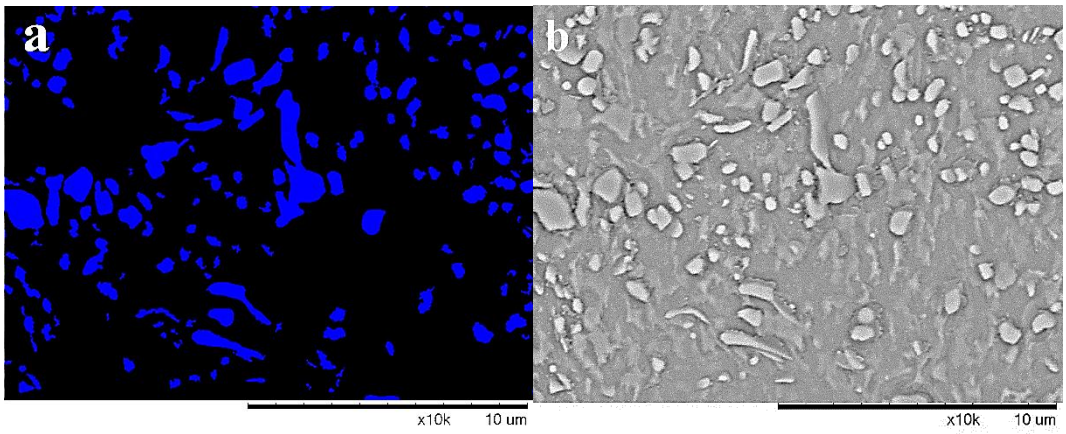


Şekil 6.109 : Soğuk haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.39: AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 740 °C'de 10 dakika ve 690°C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim yapılan küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Haddeleme koşulu	Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
Sıcak	0,75±0,88	31,34	0,62±0,21	1,84±0,57
Soğuk	0,91±0,64	27,93	0,63±0,21	1,75±0,64

Belirlenen koşullarda 10 çevrim yapılan küreselleştirme işlemiyle, karbür oranı, boyutu ve küreselliğinin arttığı görülmüştür. Sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerin arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Şekil 6.110'da 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme işlemine ait görüntü analiz fotoğrafları, Çizelge 6.40'da ise bu analizin sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.110 : Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası (a) Clemex görüntü analiz yazılımı ve (b) SEM fotoğrafı.

Çizelge 6.40: Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çeliğin mikroyapısının 680 °C'de 10 saat süreyle yapılan kritik sıcaklık altı küreselleştirme sonrası Clemex görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçları.

Ort. Çap (µm)	% Alan	Küresellik Oranı	En/Boy Oranı
0,51±0,31	12,75	0,56±0,20	1,91±0,74

AISI 1070 kalite çeliğe 680 °C'de 10 saat süreyle uygulanan kritik sıcaklık altı küreselleştirme ısıl işlemi neticesinde karbür alanı, ortalama karbür çapı ve küresellik oranının çevrimsel küreselleştirme ısıl işlemine göre azaldığı görülmüştür.

6.5 Optimize Edilen Isıl İşlem Koşulları

Bu tez çalışmasında yapılan küreselleştirme işlemlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinin ardından, belirlenen optimum koşullar her bir çelik kalitesinin sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş numunelerine göre belirlenmiştir. Belirlenen küreselleştirme koşulları Çizelge 6.41'de belirtilmiştir. Optimum koşulların belirlenmesi sırasında numune mikroyapılarının görsel olarak değerlendirilmesiyle lameler formda veya aglomere olmuş karbürlerin yapıda tespit edilmemesi kriter olarak göz önünde bulundurulmuştur. Ancak görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçlar, çok küçük bir bölgeden elde edildiği için, tüm mikroyapı karakteristiklerini belirlemek için uygun bulunmamıştır. Bu nedenle görüntü analiz yazılımı ile elde edilen sonuçlar, optimize sonuçların belirlenmesinde göz önüne alınmamıştır.

Çizelge 6.41: Optimum küreselleştirme ısıl işlem koşulları.

Çelik Kalitesi	Haddeleme Koşulu	
	Sıcak Haddelenmiş	Soğuk haddelenmiş
AISI 4140	800 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika 10 çevrim	800 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika 10 çevrim
AISI 6150	740 °C'de 10'ar dakika ve 680 °C'de 30'ar dakika 10 çevrim	740 °C'de 10'ar dakika ve 680 °C'de 30'ar dakika 10 çevrim
AISI 1045	740- 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim	740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika
AISI 1070	740°C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika 1 çevrim	740°C'de 10 dakika ve 690 °C'de 30 dakika 5 çevrim

7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş AISI 4140, AISI 6150, AISI 1045 ve AISI 1070 kalite çeliklerin çelik kalitelerinin mikroyapılarının küresel hale getirilmesiyle hassas kesme prosesindeki yüzey kalitesindeki artışın sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikle her bir çelik kalitesi için küreselleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş olup, işlemlerin mikroyapıya etkileri incelenmiştir. Bu işlemler sonucunda aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Temin edilen malzemelerin sıcak haddelenmiş, asitlenmiş ve tavlanmış şekilde üretilmiş olmalarından dolayı mikroyapıları kısmen küresel karbür içermektedir.
2. 740 °C ve 680 °C'de 5'er dakika 5 çevrim yapılarak gerçekleştirilen ısıl işlemler sonucunda 5'er dakika tutma süresinin sonunda mikroyapıda küreselleşmemiş lameler morfolojide karbürler görülmüştür. Dolayısıyla küreselleştirme için söz konusu parametrelerin yeterli olmadığı tespit edilmiştir.
3. Lameler başlangıç mikroyapısının küresel mikroyapıya etkisini belirlemek amacıyla çeliklere normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen 900 °C sıcaklıkta 15 dakika tutma süresinin her bir malzeme için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Kısmi küreselliğin giderilmesi için 950 °C sıcaklıkta 30 dakika tutma süresinin yeterli olduğu görülmüştür.
4. Normalize edilmiş numunelere sırasıyla 740 °C ve 680 °C' de 5'er dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi ile 800 °C ve 680 °C' de 10'ar dakika 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Burada üst sıcaklık, tutma süresi ve çevrim sayısı arttırılmasına rağmen perlitik yapının sahip olduğu kararlı yapıdan dolayı küreselleştirme için yeterli olmadığı görülmüştür.
5. Küreselleştirme ısıl işlemi sırasında üst sıcaklığın ve tutma süresinin artmasıyla beraber malzeme sertliğinde düşüş gözlenmiştir. Burada üst sıcaklığın artması, sertliği daha hızlı düşürmektedir.

6. Küreselleştirme ısıl işlemi sırasında oluşan kürelerin boyutunu ve sayısını etkileyen parametrenin düşük sıcaklık parametresi olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle her bir çelik kalitesi için düşük sıcaklık süresi uzun tutularak küreselleştirme ısıl işlemleri gerçekleştirilmiştir.

7. Soğuk hadde uygulanan numunelerin sıcak haddelenmiş numunelere göre daha yüksek sertlikte oldukları görülmüştür. Deneysel çalışmalar neticesinde soğuk haddelenmiş numunelerde küresel karbür sayısının daha yüksek olduğu ve sertliklerinin sıcak haddelenmiş numunelere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

8. Aynı koşullar altında gerçekleştirilen 1, 5 ve 10 çevrim ısıl işlemler neticesinde genel olarak çevrim sayısının artmasıyla malzemenin sertliğinin daha fazla düştüğü görülmüştür. AISI 4140 kalite çelikte gerçekleştirilen Erichsen deneyleri neticesinde 10 çevrim uygulanan deney numunesinin kenar morfolojisinde daha yüksek kesme yüzeyine sahip olduğu belirlenmiştir.

9. AISI 4140 kalite çeliğe uygulanan endüstriyel hassas kesme prosesi sonucunda temin edildiği halde, 800 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika tutularak 10 çevrim küreselleştirme uygulanan ve 680 °C'de 10 saat kritik sıcaklık altı küreselleştirme uygulanan numunelerin %100 kesme yüzeyine sahip olduğu görülmüştür.

10. İncelenen çeliklerin karbür boyutu küçük olduğu için, Clemex görüntü analiz yazılımıyla ancak yüksek büyütmeli fotoğraflar üzerinden bir görüntü analiz gerçekleştirilebilmiştir. Bu durumda analiz edilen bölge çok küçük olmaktadır ve mikroyapının tamamını temsil etmemektedir. Bu nedenle, uygulanan farklı işlemlerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılırken ve optimum koşullar belirlenirken, mikroyapının daha düşük büyütmeli optik mikroskop fotoğrafları kullanılmış ve bu fotoğraflarda, lameler formda ya da aglomere olmuş karbür bulunmaması kriter olarak alınmıştır. Buna göre, AISI 4140 kalite çelik için 800 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi optimum küreselleştirme koşulu olarak seçilmiştir. Benzer kriterler esas alınarak AISI 6150 kalitesi için seçilen optimum küreselleştirme parametresi 740 °C'de 10 dakika ve 680 °C'de 30 dakika ve 10 çevrimdir. Sıcak haddelenmiş AISI 1045 çelik kalitesi için 740 - 680 °C'de

5’er dakika ve 5 çevrim küreselleştirme, soğuk haddelenmiş AISI 1045 kalite çelik için 740 °C’de 10 dakika ve 680 °C’de 30 dakika 10 çevrim küreselleştirme ısıl işlemi seçilmiştir. Ancak soğuk haddelenmiş numunelerde mikroyapıda kısmi lameler karbürlerin varlığı nedeniyle çevrim sayısının veya tutma süresinin arttırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

11. Sıcak haddelenmiş AISI 1070 kalite çelik için 740°C’de 10 dakika ve 690 °C’de 30 dakika 1 çevrim, soğuk haddelenmiş numuneler için ise 740°C’de 10 dakika ve 690 °C’de 30 dakika 5 çevrim küreselleştirme ısıl işlemini seçilmiştir. Mikroyapıda hedeflenen küresellik sağlanmış ve artan çevrim sayısıyla malzemenin sertliğinin azaldığı görülmüştür.
12. İleride yapılacak çalışmalarda küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış çeliklerin sünekliğinin arttırılması sonucunda geri yaylanma etkisinin azaltılması öngörülerek şekillendirilebilirliğin arttırılmasına yönelik çalışılmaların yapılabileceği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Laxmi B., Sharma S., Jayashree P. K. & Hegde A.** (2021). Quenchant oil viscosity and tempering temperature effect on mechanical properties of 42CrMo4 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 581–587.

[2] **Chen R. C., Wang Z. G., Zhu F. S., Zhao H., Qin J. & Zhong L.** (2020). Effects of rare earth micro alloying on microstructures, carbides, and internal friction of 51CrV4 steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 824, 1–13.

[3] **Dlouhy J., Hauserova D. & Motycka P.** (2017) Bainite austenitization in 51CrV4 spring steel: Accelerated cementite spheroidisation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 179.

[4] **Puneeth K. N. &. Srikantappa A. S.** (2021). A study on effect of sulphur and phosphorous on the mechanical characteristics of C45 steel. *Materials Today Proceedings*.

[5] **W. Hong**. (2011). Cam Fine Blanking Technology and Die Design. *Procedia Engineering*, 15, 137–141.

[6] **Liu Y., Hua L., Mao H. & Feng W.** (2014). Finite Element Simulation of Effect of Part Shape on Forming Quality in Fine-blanking Process. *Procedia Engineering*, 81, 1108–1113.

[7] **Url-1** <*https://www.machinemfg.com*>, erişim tarihi 24.10.2021.

[8] **Swift K. G. & Booker J. D.** (2013). Forming Processes. *Manufacturing Process Selection Handbook.* Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080993607000045 (Original work published 2013)

[9] **Rustamov F.** (2009). *Hassas kesmeyi etkileyen konstrüksiyon parametreleri* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[10] **Woodward R. G., Toumpis A. & Galloway A.** (2022). The influence of cementite spheroidizing duration on the microstructure and sliding wear response of grey cast iron against AISI 4330. *Wear*, 489-489.

[11] **Wang Y. T., Adachi Y., Nakajima K. & Sugimoto Y.** (2010). Quantitative three-dimensional characterization of pearlite spheroidization. *Acta Materialia*, 58(14), 4849-4858.

[12] **Lai Y. & Kraft R. W.** (1987). Mechanisms of Pearlite Spheroidization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 18, 1403-1414.

[13] **Maity J., Saha A., Mondal D. K. & Biswas K.** (2013). Mechanism of accelerated spheroidization of steel during cyclic heat treatment around the upper critical temperature. *Philosophical Magazine Letters,* 93(4), 231-237.

[14] **Werner E.** (1989). The spheroidization of thin plates. *Acta Materialia,* 37(7), 2047-2053.

[15] **Yang J., Yao C., Wei S., Ji W., Chang R., Lu Z., Xiao S., Chen Y. & Zhou H.** (2022). Spheroidization behavior of (TiB+TiC+Y2O3)/α-Ti alloy during annealing. *Journal of Alloys and Compounds, 893*, 162312. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162312.

[16] **Alza V. A.** (2021). Spheroidizing in Steels: Processes, Mechanisms, Kinetic and Microstructure - A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering,* 18(3), 63-81.

[17] **Cline H. E.** (1971). Shape instabilities of eutectic composites at elevated temperatures. *Acta Metallurgica,* 19(6), 481-490.

[18] **Arruabarrena J., López B. & Rodriguez-Ibabe J. M.** (2014). Influence of prior warm deformation on cementite spheroidization process in a low-alloy medium carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science,* 45(3), 1470-1484.

[19] **Baldan A.** (2002). Progress in ostwald ripening theories and their applications to the γ′-precipitates in nickel-base superalloys Part II: Nickel-base superalloys. *Journal of Materials Science,* 37, 2379-2405.

[20] **Ratke L. & Voorhees P. W.** (2002). *Growth and Coarsening: Ripening Material Processing,* Berlin, Springer.

[21] **Atasoy O. E. & S. Özbilen S.** (1989). Pearlite spheroidization. *Journal of Materials Science,* 24(1), 281-287.

[22] **Chattopadhyay S. & Sellars C. M.** (1982). Kinetics of pearlite spheroidisation during static annealing and during hot deformation. *Acta Metallurgica,* 30(1), 157-170.

[23] **Li Z. X., Li C. S., Zhang J., Qiao B. & Li Z. Z.** (2015). Effects of Annealing on Carbides Size and Distribution and Cold Formability of 1.0C-1.5Cr Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science,* 46(7), 3220-3231.

[24] **Amos P. G. K., Bhattacharya A., Nestler B. & Ankit K.** (2018). Mechanisms of pearlite spheroidization: Insights from 3D phase-field simulations. *Acta Materialia,* 161, 400-411.

[25] **Demir H., Çiftçi İ., Türkmen M. & Gündüz S.** (2011). Orta Karbonlu Alaşımlı ve Alaşımsız Çeliklerde Isıl İşlem Şartlarının ve Sertliğin İşlenebilirliğe Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium,* (pp. 94-97). Türkiye, Mayıs 16-18

[26] **Baday Ş., Başak H. & Sönmez F.** (2017). Isıl işlem uygulanmış orta karbonlu çelikte mikroyapı değişiminin bulanık mantık ile tahmin edilmesi. *Technological Applied Sciences,* 12(4), 153-162.

[27] **Banerjee M. K.** (2017). Fundamentals of Heat Treating Metals and Alloys. *Comprehensive Materials Finishing, (Vol.* 2, pp. 1-49). Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818091852

[28] **Lee Y. W., Son Y. Il & Lee S. J.** (2013). Microstructure and mechanical properties of spheroidized D6AC steel. *Materials Science and Engineering: A,* 585, 94-99.

[29] **Kim M., Shin J. H., Choi Y. & Lee S. J.** (2016). Improvement of Mechanical Properties of Spheroidized 1045 Steel by Induction Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A,* 47(4), 1761-1769.

[30] **A. Kamyabi-Gol A. & Sheikh-Amiri M.** (2010). Spheroidizing Kinetics and Optimization of Heat Treatment Parameters in CK60 Steel Using Taguchi Robust Design. *Journal of Iron and Steel Research, International,* 17(4), 45-52.

[31] **Karaaslan A.** (2010). *Mühendislik Alaşımları İçin Faz Diyagramları,* 594, 182-183, İstanbul, Literatür Yayınları.

[32] **Totten G. E.** (2006). Steel Heat Treatment. In Bozidar Lišćić (Eds.). *Steel Heat Treatment Handbook* (2nd ed., Vol. 2, pp.278-413), Portland, Taylor & Francis Yayınları

[33] **Harisha S. R., Sharma S., Kini U. A., & Gowri Shankar M. C.** (2018). Study on Spheroidization and Related Heat Treatments of Medium Carbon Alloy Steels. *MATEC Web of Conferences*, 144(6), 02008.

[34] **O'Brien J. M. & Hosford W. F.** (2002). Spheroidization cycles for medium carbon steels. *Metallurgical and Materials Transactions A,* 33(4), 1255-1261.

[35] **O'Brien J. M. & Hosford W. F.** (1997). Spheroidization of medium carbon steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 6(1), 69-72.

[36] **Lv Z. Q., Wang B., Wang Z. H., Sun S. H., & Fu W. T.** (2013). Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel. *Materials Science and Engineering: A,* 574, 143-148.

[37] **Kampe J. C. M. & Courtney T. H.** (1986). Elevated temperature microstructural stability of heavily cold-worked in situ composites. *Scripta Metallurgica*, 20(2), 285-289.

[38] **Mishra S., Mishra A., Show B. K. & Maity J.** (2016). Simultaneous enhancement of ductility and strength in AISI 1080 steel through a typical cyclic heat treatment. *Materials Science & Engineering A*, 688, 262-271.

[39] **Saha A., Mondal D. K. & Maity J.** (2011). An alternate approach to accelerated spheroidization in steel by cyclic annealing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(1), 114-119.

[40] **Li H., Han M., Li D., Li J. & Xu D.** (2015). Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of 50CrV4 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(2), 409-415.

[41] **Singh S., Rajeshkannan A., Feroz S. & Jeevanantham A. K.** (2020). Effect of Normalizing on the Tensile Strength, Shrinkage and Surface Roughness of PLA Plastic. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1174–1182.

[42] **Lahiri A. K.** (2017). Heat Treatment. *Applied Metallurgy and Corrosion Control*, 54(8), 117-140.

[43] **Srivastava A., Jain A., Rajput S., Singh H. O., Kandpal B. C., Yadav M., Varshney S. & Johri N.** (2021). Structural and FEM analysis of heat treatment effects on mild steel. *Materials Today: Proceedings, 46(20),* 11064–11071. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.204.

[44] **Jahangiri M. & Bayani H.** (2020). Adding chemical composition variable to traditional time–temperature-transformation (TTT) diagrams with an experimental cost-effective method. *Materials Letters*, 277, 128397.

[45] **Vander Voort G. F.** (1991). *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels,* ASM International.

[46] **Skrna-Jakl I. C. & Rammerstorfe F. G.** (2020). Macromechanics of Laminates. In H. Altenbach, A. Öchsner (Eds.), *Encyclopedia of Continuum Mechanics*, 1497-1506.

[47] **Groover M. P.** (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4th ed.). John Wiley & Sons Yayıncılık.

[48] **Özdemir A. O., Şirin H. & Karataş Ç.** (2017). Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik saclardaki alaşım elementlerinin şekillendirmeye etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*, 5(4), 109–119.

[49] **Klocke F.** (2013). Sheet Metal Separation. *Manufacturing Processes 4: Forming*, 407-456, Springer, Berlin, Heidelberg.

[50] **Gide A.** (1998). *Metal Forming Handbook*, 1, 568 Springer, Berlin, Heidelberg: Springer.

[51] **Mohamed S., Roizard, X., Guillaume C., Mohamed A., Luc C., Pierre-Henri C., Giampiccolo, S. & Barbe, J.P.** (2020). Modelling and numerical simulation of steel sheet fine blanking process. *Procedia Manufacturing, 50,* 395–400. doi: 10.1016/j.promfg.2020.08.072.

[52] **Aravind U., Uday C. & Venugopal P.** (2019). Modified fine blanking of cam shaped profile using a double action hydraulic press. *Materials and Manufacturing Processes, 34(6),* 670–680.

[53] **Shaikh P. R. S., Gaonkar R. R., Shaikh A., Shaikh M. & Shaikh S.** (2015). A Review on Factors Affecting the Sheet Metal Blanking Process. International *Journal of Modern Engineering Research, 5(3),* 71–76.

[54] **Zheng Q., Zhuang X. & Zhao Z.** (2019). State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering, 13(1),* 61–70.

[55] **Zhuang X., Ma S. & Zhao Z.** (2017). A microstructure-based macro-micro multi-scale fine-blanking simulation of ferrite-cementite steels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 128-129, 414–427.

[56] **Chen Z. H., Chan L. C., Lee T. C. & Tang C. Y.** (2003). An investigation on the formation and propagation of shear band in fine-blanking process. *Journal of Materials Processing Technology,* 138, 610–614.

[57] **Maymon G.** (2018). Stochastic Crack Propagation. *Stochastic Crack Propagation,* 1–7. Academic Press Yayıncılık.

[58] **Chen J. H. & Cao R.** (2015). Microphysical Processes of Cleavage Fracture of Steels. *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals,* 1, 81–140. Butterworth-Heinemann Yayıncılık.

[59] **Lotfolahpour A. and Zaeem M. A.** (2021). Effects of cleavage plane and material strength on fracture of polycrystalline brittle materials: A phase-field modeling study. *Computational Materials Science,* 197, 110642.

[60] **Chen J. H. & Cao R.** (2015). Introduction. *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals,* 1, 1–54. Butterworth-Heinemann Yayıncılık.

[61] **Aravind U., Chakkingal U. & Venugopal P.** (2021). A Review of Fine Blanking: Influence of Die Design and Process Parameters on Edge Quality. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 30(1), 1-32.

[62] **Lind L.** (2014). *Wear of PVD Coatings on Fineblanking Punches Faculty of Mechanical Engineering* (Doktora tezi). Tallinn University of Technology, Departent of Materials Engineering, Tallin.

[63] **Ghiotti A., Bruschi S., & Regazzo P.** (2014). Shear surface control in blanking by adaptronic systems. *Procedia Engineering,* 81, 2512-2517.

[64] **Lee C. K. & Kim Y. C.** (2015). A study of the die roll height of SHP-1 and SCP-1 materials in the fine blanking process. *Archives of Metallurgy and Materials,* 60(2), 1397-1402.

[65] **Djavanroodi F., Pirgholi A. & Derakhshani E.** (2010). FEM and ANN analysis in fine-blanking process. *Materials and Manufacturing Processes,* 25(8), 864–872.

[66] **Taşdemir V.** (2018). Hassas Kesme İşlemine Malzeme Kalınlığı ve Kalıp Boşluğunun Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi,* 10(2), 127-134.

[67] **Chen J. H. & R. Cao R.** (2015). Effects of Material Microstructure on Cleavage Fracture. *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals,* 1, 241–270. Butterworth-Heinemann Yayıncılık.

[68] **Zhou S., Li Z., Yang C., Xie S. & Yong Q.** (2019). Cleavage fracture and microstructural effects on the toughness of a medium carbon pearlitic steel for high-speed railway wheel. *Materials Science & Engineering A,* 761, 138036.

[69] **Rosenfield A. R., Hahn G. T. & Embury J. D.** (1972). Fracture of steels containing pearlite. *Metallurgical and Materials Transactions,* 3(11), 2797-2804.

[70] **Caruso M. & S. Godet S.** (2010). Microstructural evolution during spheroidization annealing of eutectoid steel: Effect of interlamellar spacing and cold working. *Advanced Materials Research*, 89-91, 79-84.

[71] **Bubphachot B.** (2009). Microstructure affecting cutting quality in fine blanking process. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(4), 665–668.

[72] **Harisha S. R., Sharma S. S., Kini A., Nayak S. & Saikia A.** (2015). Effect of Spheroidizing Heat Treatment on Mechanical properties of EN47 Steel. *Emerging Trends in Mechanical Engineering.* India.

[73] **Baday Ş., Başak H. & Güral A.** (2016). Analysis of spheroidized AISI 1050 steel in terms of cutting forces and surface quality. *Kovove materialy*, 54, 315-320.

[74] **Saha A., Mondal D. & Maity J.** (2010). Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of 0.6wt% carbon steel. *Materials Science and Engineering A*, 527(16-17), 4001-4007.

[75] **Dossett J. & Totten G. E.** (2013). *ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*. ASM International.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Akın KÜTMEN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2018, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
- **Yüksek lisans** **:** 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Mart 2020- Halen: İstanbul Proje Destekleme Merkezi, Proje Mühendisi.