

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNDE SIFIRALTI  
İŞLEM DERECESİNİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Met. ve Malz. Müh. Fatih Koray ARSLAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cuma BINDAL**  
**Ortak Danışman : Prof. Dr. Sakin ZEYTİN**

**Haziran 2010**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

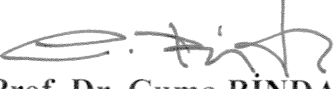
SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNDE SIFIRALTI  
İŞLEM DERESESİNİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERE ETKİSİ

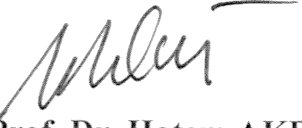
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Met. ve Malz. Müh. Fatih Koray ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Bu tez 23 /06 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Cuma BİNDAL  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr. Hatem AKBULUT  
Üye

  
Doç. Dr. Kenan GENEL  
Üye

## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında, yol gösterici ve destekleyici olan ayrıca değerli bilgi ve fikirleriyle bana büyük katkılar sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Cuma BİNDAL ve Prof. Dr. Sakin ZEYTİN' e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında her türlü olanağı ve yardımı sunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e de katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin hazırlanmasında yardımcı olarak değerli katkılarını hiç esirgemeyen başta kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Mediha İPEK ve Arş. Gör. İbrahim ALTINSOY olmak üzere Arş. Gör. F. Gözde ÇELEBİ EFE ve Arş. Gör. Tuba ÇEREZCİ YENER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numunelerinin tedarik edilmesinde ve ısıl işlemlerinin gerçekleştirilmesinde her türlü olanağı bana sağlayan ASSAB Çelik ve Isıl İşlem A.Ş firmasına ve firma çalışanlarına ayrıca firmanın satış ve pazarlama direktörü Sn. Dr. Aziz HATMAN' a, sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Deneysel çalışmalarında özverili yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen laboratuvar teknik sorumluları Sn. Ersan DEMİR, Sn. Ebubekir CEBECİ ve Sn. Uzm. Fuat KAYIŞ' a çok teşekkür ederim.

Bu tezde yapılan çalışmaları 2010-50-01-020 numaralı proje kapsamında destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Komisyonuna da teşekkür ederim.

Son olarak da beni bugünlere yetiştiren ve eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan aile büyüklerime teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TAKIM ÇELİKLERİ.....	3
2.1. Takım Çeliklerinin Tanımı ve Genel Özellikleri.....	3
2.2. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması.....	5
2.2.1. Suda sertleşen takım çelikleri.....	5
2.2.2. Şok dirençli takım çelikleri.....	6
2.2.3. Sıcak iş takım çelikleri.....	6
2.2.4. Yüksek hız takım çelikleri.....	7
2.2.5. Plastik kalıp takım çelikleri.....	8
2.2.6. Özel amaçlı takım çelikleri.....	8
2.2.7. Soğuk iş takım çelikleri.....	8

2.3. Soğuk İş Takım Çelikleri.....	9
2.3.1. Soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri.....	9
2.3.1.1. Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri.....	9
2.3.1.2. Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri.....	11
2.3.1.3. Yüksek karbon-krom soğuk iş takım çelikleri.....	12
2.3.2. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları ve seçimi.....	14
2.3.3. Soğuk iş takım çeliklerinde oluşan hasar mekanizmaları.....	18
2.3.3.1. Aşınma.....	18
2.3.3.2. Ağız dökülmesi.....	21
2.3.3.3. Sıvanma.....	22
2.3.3.4. Plastik deformasyon.....	22
2.3.3.5. Kırılma.....	23
BÖLÜM 3.	
TAKIM ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ.....	24
3.1. Geleneksel Takım Çeliği Üretimi.....	26
3.2. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Takım Çeliği Üretimi.....	29
3.3. Osprey Yöntemi ile Takım Çeliği Üretimi.....	31
BÖLÜM 4.	
TAKIM ÇELİKLERİNİN ISIL İŞLEMİ.....	34
4.1. Sertleştirme İşleminde Önce Uygulanan Isıl İşlemler.....	35
4.2. Sertleştirme Isıl İşlemi.....	37
4.2.1. Ön ısıtma.....	38
4.2.2. Ostenitleme.....	38
4.2.3. Suverme.....	41
4.2.4. Sıfırlatı ısıtma işlemi.....	44
4.2.4.1. Sıfırlatı ısıtma işleminin genel prensipleri.....	44
4.2.4.2. Sıfırlatı ısıtma işleminin mekanizmaları.....	46
4.2.4.3. Sıfırlatı ısıtma işlem uygulamalarında kullanılan soğutma metodları.....	52
4.2.5. Temperleme.....	54

## BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	57
5.1. Deneysel Çalışmanın Amacı.....	57
5.2. Deneysel Malzemeler.....	59
5.3. Isıl İşlem Prosedürlerinin Hazırlanması.....	60
5.4. Isıl İşlem Deneyleri.....	66
5.5. Mikroyapısal İncelemeler.....	67
5.6. Mikrosertlik Deneyleri.....	69
5.7. Aşınma Deneyleri.....	69

## BÖLÜM 6.

DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	72
6.1. Mikroyapısal Karakterizasyon.....	72
6.1.1. Metalografik incelemeler.....	72
6.1.2. SEM-EDS analizleri.....	76
6.1.3. X-ışını difraksiyon analizi sonuçları.....	91
6.2. Mekanik Deney Sonuçları.....	97
6.2.1. Mikrosertlik Deneyi Sonuçları .....	97
6.2.2. Aşınma Deneyi Sonuçları.....	100

## BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
7.1. Sonuçlar.....	109
7.2. Öneriler.....	110

KAYNAKLAR.....	111
----------------	-----

EKLER.....	114
------------	-----

ÖZGEÇMİŞ.....	118
---------------	-----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Å	: Anguſtron
ASTM	: Amerikan ſtandardı
AISI	: Amerikan Demir Çelik Enſtitüsü
AS	: Oſtenitleme tuzu
DIN	: Alman ſtandardı
UNS	: Birleſik Nümerik Sistem
JIS	: Japon ſtandardı
BS	: İngiliz ſtandardı
SS <sub>14</sub>	: İsveç ſtandardı
EDS	: Enerji dağılım ſpektrometresi
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
OM	: Optik Mikroskop
SEI	: İkincil elektronların oluſturduđu görüntü
BES	: Geri saçınan elektronların oluſturduđu görüntü
XRD	: X-ıſını difraksiyon analizi
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Derneği
PC	: Birincil karbür
SC	: İkincil karbür
SSC	: Küçük ikincil karbür
LSC	: Büyük ikincil karbür
TSE	: Türk Standardları Enſtitüsü
EAF	: Elektrik ark fırını
ESR	: Curuf altı yeniden ergitme
AOD	: Argon oksijen dekarbürizasyon
VOD	: Vakum oksijen dekarbürizasyon
M <sub>s</sub>	: Martensit baſlama sıcaklığı

M <sub>f</sub>	: Martensit bitiş sıcaklığı
HV	: Vickers Sertliği(Mikrosertlik)
°	: Derece
°C	: Santigrat derece
α'	: Martensit
γ	: Ostenit
M <sub>x</sub> C <sub>y</sub>	: Karbür bileşimi(M:Metal)
K	: Kelvin
θ	: Theta
GS	: Isıl işlem tuzu
dk/dak	: Dakika
HIP	: Sıcak izostatik presleme
®	: Tescilli ürün



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Takım çeliklerinin servisteki kullanım ömrünü etkileyen etmenler.....	4
Şekil 2.2. O6 soğuk iş takım çeliğine ait OM görüntüsü.....	10
Şekil 2.3. A7 soğuk iş takım çeliğine ait OM görüntüsü.....	12
Şekil 2.4. D2 soğuk iş takım çeliğinin OM ve SEM görüntüsü.....	14
Şekil 2.5. Soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri.....	14
Şekil 2.6. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre aşınma-tokluk kriterleri.....	16
Şekil 2.7. Uddeholm firmasına ait patentli soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre aşınma-tokluk kriterleri.....	17
Şekil 2.8. Soğuk iş takım çeliklerinde en çok karşılaşılan hasar mekanizmaları.....	18
Şekil 2.9. Abrasif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.10. Soğuk iş takım çeliğinde meydana gelen abrasif aşınma hasarı.....	19
Şekil 2.11. Adhezif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.12. Soğuk iş takım çeliğinde meydana gelen adhesiv aşınma hasarı.....	21
Şekil 2.13. Soğuk iş takım çeliğinin ağız kısmında meydana gelmiş plastik deformasyon hasarı.....	22
Şekil 3.1. İngot döküm yöntemiyle üretilmiş M3 tipi yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısı.....	23
Şekil 3.2. Curuf altı yeniden ergitme(ESR) işleminin şematik gösterimi	28
Şekil 3.3. ESR işlemi sonrasında uygulanan termomekanik dövme işlemi	29
Şekil 3.4. Toz metalurjisindeki atomizasyon ünitesi	30

Şekil 3.5. Vanadis 4 Extra® soğuk iş takım çeliğinin (a) geleneksel yöntemle (b) toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş mikroyapıları.....	31
Şekil 3.6. Osprey yönteminin şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.7. Yüksek hız takım çeliğinin (a) geleneksel yöntemle, (b) toz metalurjisi yöntemiyle ve osprey yöntemiyle üretilmiş mikroyapıları.....	33
Şekil 4.1. Takım çeliklerine sertleştirilme işleminden önce uygulanan ısıtma işlem kademeleri.....	35
Şekil 4.2. Tavlama ısıtma işlemi sonrası D2 soğuk iş takım çeliğine ait OM görüntüsü.....	36
Şekil 4.3. Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde uygulanan konvansiyonel ısıtma işlem basamakları .....	37
Şekil 4.4. Takım çeliklerinde bulunan karbürlerin sertlikleri.....	40
Şekil 4.5. Yüksek alaşımlı çeliklerde karbon oranına bağlı olarak Ms ve Mf sıcaklıkları.....	42
Şekil 4.6. Vanadis 4 Extra® sürekli soğuma diyagramı.....	44
Şekil 4.7. Sıfırlama ısıtma işleminin(soğuk işlem ve kriyojenik işlemin) sıcaklık-zaman döngü.....	45
Şekil 4.8. Sıfırlama ısıtma işlem basamağının sıcaklık-zaman diyagramındaki yeri.....	45
Şekil 4.9. -196°C sıvı azot ortamında uygulanan kriyojenik işlemin farklı ostenitleme sıcaklıklarında sertliğe etkisi.....	48
Şekil 4.10. Sıfırlama işlem sıcaklığının D2 soğuk iş takım çeliğinin karbür sayısına etkisi.....	48
Şekil 4.11. Sıfırlama işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin karbür sayısına etkisi.....	49
Şekil 4.12. Sıfırlama işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin sertliğine etkisi.....	49
Şekil 4.13. Sıfırlama işlem sıcaklığının D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızına etkisi.....	50

Şekil 4.14. -196°C sıvı azot ortamında uygulanan kriyojenik işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızına etkisi.....	50
Şekil 4.15. D2 soğuk iş takım çeliğinin konvansiyonel ısıtılma işlem uygulanmış, soğuk işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem uygulanmış SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.16. Doğrudan soğutma prensibi ile çalışan sıfırlı işlem ekipmanının şematik gösterimi.....	53
Şekil 4.17. Takım çeliklerine ait dört farklı temperleme grafiği.....	55
Şekil 4.18. Vanadis 4 Extra® temperleme grafiği.....	56
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada izlenen yolun şematik gösterimi.....	58
Şekil 5.2. Numunelerin kesilmesinin şematik gösterimi.....	59
Şekil 5.3. Uygulanan deneyler göre ısıtılma işlem zaman-sıcaklık diyagramları.	63
Şekil 5.4. Ball-on-flat sliding aşınma deney düzeneğinin şematik görünüşü.	70
Şekil 5.5. Aşınma deneyi sonunda numune üzerinde ki aşınma izinin şematik görünümü.....	70
Şekil 6.1. Calmax® ve Vanadis 4E®'nin "1-4-7" nolu deneylerde sıfırlı işlem süresinin etkisinin OM görüntüleri.....	73
Şekil 6.2. Calmax® ve Vanadis 4E®'nin "2-5-8" nolu deneylerde sıfırlı işlem süresinin etkisinin OM görüntüleri.....	74
Şekil 6.3. Calmax® ve Vanadis 4E®'nin "3-6-9" nolu deneylerde sıfırlı işlem süresinin etkisinin OM görüntüleri.....	75
Şekil 6.4. Calmax®'in "1-4-7" nolu deneylerinde sıfırlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	78
Şekil 6.5. Calmax®'in "2-5-8" nolu deneylerinde sıfırlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	79
Şekil 6.6. Calmax®'in "3-6-9" nolu deneylerinde sıfırlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	80
Şekil 6.7. Vanadis 4E®'nin "1-4-7" nolu deneylerinde sıfırlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	81
Şekil 6.8. Vanadis 4E®'nin "2-5-8" nolu deneylerinde sıfırlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	82

Şekil 6.9. Vanadis 4E <sup>®</sup> 'nin "3-6-9" nolu deneylerinde sıfırlatı işlem süresinin etkisinin SEM mikrografları.....	83
Şekil 6.10. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	85
Şekil 6.11. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "2-5-8" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	86
Şekil 6.12. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "3-6-9" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	87
Şekil 6.13. Vanadis 4E <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	88
Şekil 6.14. Vanadis 4E <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "2-5-8" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	89
Şekil 6.15. Vanadis 4E <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "3-6-9" nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri.....	90
Şekil 6.16. Vanadis 4E <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-3-4-7-9" nolu deneylerine ait XRD paternleri.....	92
Şekil 6.17. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-3-4-7-9" nolu deneylerine ait XRD paternleri.....	93
Şekil 6.18. Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" nolu deneylerine ait kalıntı ostenit hacim oranları.....	96
Şekil 6.19. Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-3-9" nolu deneylerine ait kalıntı ostenit hacim oranları.....	96
Şekil 6.20. Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri.....	99
Şekil 6.21. Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "2-5-8" nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri.....	99
Şekil 6.22. Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "3-6-9" nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri.....	99
Şekil 6.23. Vanadis <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" ve "3-6-9" deney gruplarına ait aşınma hızı değerleri.....	102
Şekil 6.24. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin "1-4-7" ve "2-5-8" deney gruplarına ait aşınma hızı değerleri.....	103

Şekil 6.25. Vanadis <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları.....	105
Şekil 6.26. Vanadis <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları.....	106
Şekil 6.27. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları.....	107
Şekil 6.28. Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları.....	108

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Sıfırtaltı ısıtım işlem sonrası takım ömründe elde edilen artışlar.....	2
Tablo 2.1.	Takım çeliklerinin sınıflandırılması .....	5
Tablo 2.2.	Yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri .....	10
Tablo 2.3.	Havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri.....	11
Tablo 2.4.	Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri.....	13
Tablo 2.5.	Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre seçim kriterleri.....	15
Tablo 3.1.	ESR ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş bazı standart ve standart dışı soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimleri.....	26
Tablo 4.1.	Takım çeliklerindeki karbürlerin sınıflandırılması ve özellikleri..	39
Tablo 4.2.	D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan üç farklı ısıtım işlem süreci sonucunda hesaplanan kalıntı ostenit, PC, SC ve temperlenmiş martensitin % hacimsel içerikleri.....	52
Tablo 4.3.	D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan üç farklı ısıtım işlem süreci sonucunda temperleme sonucu çökelen SC' lerinde SSC ve LSC olarak yüzde hacimsel miktarları ve ortalama küre çapları( $\mu\text{m}$ ).....	52
Tablo 5.1.	İncelenen çeliklerin kimyasal bileşimi.....	59
Tablo 5.2.	Uygulanan dokuz farklı deneydeki ısıtım işlem basamakları ve koşulları.....	61
Tablo 6.1.	X-ışını hesaplamalarında kullanılan fazlar ve ASTM kart değerleri.....	94

Tablo 6.2.	Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin “1-3-4-7-9” nolu deney numunelerinin kalıntı ostenit hacim oranları.....	95
Tablo 6.3.	Vanadis <sup>®</sup> ve Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliklerine uygulanan deney basamaklarına göre ölçülen mikrosertlik değerleri.....	98
Tablo 6.4.	Vanadis <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri.....	102
Tablo 6.5.	Calmax <sup>®</sup> soğuk iş takım çeliğinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri.....	103

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Soğuk iş takım çelikleri, sıfırlı ısı işlem, sertlik, kalıntı ostenit, aşınma

Bu tez kapsamında, endüstride kalıp üretiminde kullanılan Calmax® ve Vanadis 4 Extra® patentli soğuk iş takım çeliklerine uygulanan konvansiyonel ısı işlem basamakları baz alınmak suretiyle, ilave sıfırlı ısı işleminin uygulanması sonucu mikroyapı ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Sıfırlı işlem, -197°C sıvı azot ortamında 15 ve 60 dakika olarak iki farklı süre zarfında gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem deneyleri sonunda dokuz farklı ısı işlem deneyine ait numunelerin, mikroyapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu(SEM) ile incelenmiş ve yapıda martensite dönüşmeden kalmış hacimsel kalıntı ostenit miktarları X-Işını difraksiyon analizi ile tespit edilmiş olup ayrıca uygulanan bu farklı ısı işlem deneylerinin sertlik ve aşınma gibi mekanik özelliklere de etkileri incelenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde sıfırlı ısı işlem uygulanan bütün deney numunelerinin, hacimsel kalıntı ostenit miktarları azalarak, sertlikleri artmıştır. Aynı zamanda SEM görüntüleri de akabinde temperleme uygulanmak suretiyle sıfırlı ısı işleminin, yapıdaki küçük ikincil karbürlerin dağılımını homojenleştirerek arttırdığı ve karbürlerin etrafındaki belirgin sınırları ortadan kaldırarak karbür-matris uyumunu arttırdığı gözlenmiştir. Aşınma uygulanan temperlenmiş deney numunelerinde ise, sıfırlı ısı işleminin aşınma direncini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.



# **THE EFFECT OF SUB-ZERO TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COLD WORK TOOL STEELS**

## **SUMMARY**

Key Words: Cold work tool steels, sub-zero treatment, hardness, retained austenite, wear

In this thesis, the effects of sub-zero treatment on the microstructure and mechanical properties of patented Vanadis 4 Extra<sup>®</sup> and Calmax<sup>®</sup> cold work steels used in the production of industrial molds were investigated. Sub-zero treatment was carried out at -197°C in liquid nitrogen atmosphere for two different times as an 15 and 60 minutes. After the heat treatment experiments, microstructures of the samples exposed to nine different experimental procedures were observed using optical microscope and scanning electron microscope. Also, the amounts of volume retained austenite in the body were determined by X-Ray diffraction analysis and the effects of applied different heat treatment experiments on the mechanical properties as wear and hardness were investigated. Wear and hardness studies of the samples were carried out by using experiment respectively.

As a result, the hardness of all test samples increased, while amount of retained austenite in all samples decreased. At the same time, the amount of small secondary carbides in the structure of samples increased and distribution of them homogenized by applying sub-zero treatment with double tempering. Moreover, the certain boundaries surrounding the carbides disappeared and the compliance of carbide-matrix increased by the same process. Nevertheless, it was found that applying the sub-zero treatment resulted in enhance in the wear resistance of the tempered samples.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlar, metallerin ısıtılmasını binlerce yıldan beri uygulamışlardır. Arkeolojik kazı çalışmaları ısıtılma yöntemleri hakkında bilgi edinmemizi sağlamıştır. Çeliğe su vererek sertleştirme işlemi eski Grek ve Romalılarından beri başarı ile uygulanmıştır. Orta çağlarda ısıtılma yöntemleri çok çeşitliydi. Bunlar: değişik sıvı ortamlarda su verme; basınçlı hava ile sertleştirme; düşük, orta ve yüksek sıcaklıklarda menevişleme; karbürleme; karbonsuzlaşmaya karşı çeliğin korunması; yeniden kristalleşme tavlama idi. 1868 yılında Dmitry K. Chernov (1839-1921), Rus İmparatorluk Bilimler Akademisinin bir oturumunda, çeliğin içyapısı ve su verildiğinde neden sertleştiği hakkında bir tez sunmuştur. Bu tezinde Chernov, içinde önemli bir miktarda karbon olmadıkça ve belirli bir kritik sıcaklığın üzerine çıkmadıkça su verme yoluyla çeliğin sertleştirilemeyeceğini gösterdi. 1890-1920 yılları arasındaki 30 yıl içinde ısıtılma üzerine, bu devreden önceki yıllarda elde edilen gelişmelerden daha fazla ilerleme elde edilmiştir [1].

1965'lerde başlayıp ve günümüze kadar sürekli gelişen, bir ısıtılma yöntemi de malzemelerin sıfırlama işlemi (sub-zero treatment) dir. Sıfırlama ısıtılma işlemi, malzemenin su verme sürecini takiben oda sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa soğutulması bu ortamda malzemenin tamamında yapısal değişim meydana gelecek kadar tutulması ve daha sonra bu ortamdan çıkarılarak oda sıcaklığına ısınmasına izin verilmesi kademelerini içerir [2]. 1965'lerden beri yapılan bazı çalışmalar, bu yöntem ile yüksek aşınma ve yüksek darbeye maruz kalan bazı takım çeliklerinin performansında ciddi iyileşme elde edildiğini göstermiştir. Sıfırlama ısıtılma işlemine tabi tutulmuş; kağıt kesmede kullanılan bıçakların ömrünün 6 kat, endüstriyel basma kalıplarının ömrünün 4 kat arttığı görülmüştür. Tablo 1.1'de çeşitli uygulamalardaki takım parçaların kullanım ömründe elde edilen iyileşmeler görülmektedir [3].

Tablo 1.1. Sıfırtılı ısıt işleminin sonrası takım ömründe elde edilen artışlar [3]

Uygulamadaki takım parçaları	Takım ömründe elde edilen artış (%)
Sıcak iş zımbaları	600
Döner kesme bıçakları	600
Kağıt kesme bıçakları	600
Dilme bıçakları	400
Basma kalıpları(stamping)	400
M2 kesici takımlar	400
Şerit testereler	250

Sıfırtılı ısıt işleminin aşınma direnci ve yorulma mukavemetini geliştirmede çok etkili bir yöntem olduğu açık olmakla birlikte aşınma direncini arttırmak için uygulanan diğer yüzey işlemlerine göre sağladığı avantajlar vardır. Örneğin krom kaplama, titanyum nitrür kaplama ya da nitrasyonda sadece parçanın yüzey yapısına müdahale etmek yerine sıfırtılı ısıt işlem ile parçanın tamamına aynı özellikleri daha az bir maliyetle kazandırmak mümkündür [2].

## **BÖLÜM 2. TAKIM ÇELİKLERİ**

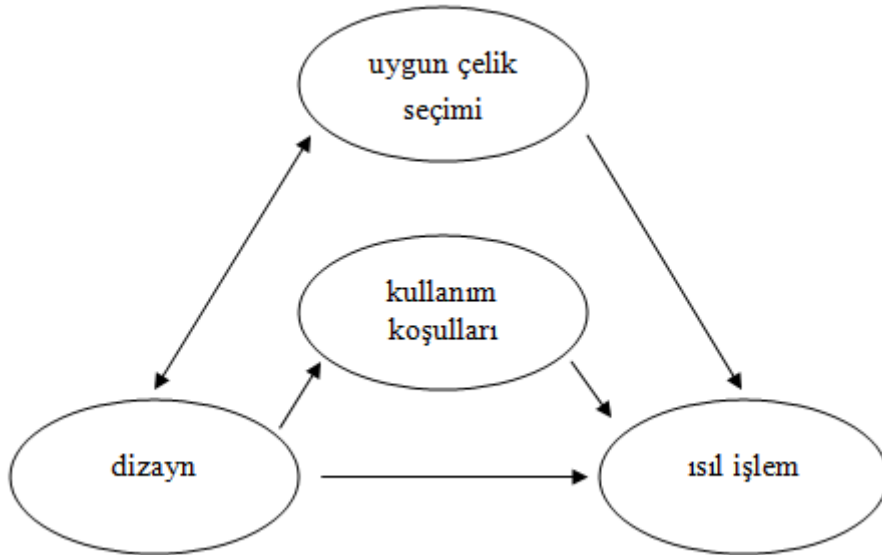
### **2.1. Takım Çeliklerinin Tanımı ve Genel Özellikleri**

Çelik genellikle belirli oranda karbon içeriğinin yer aldığı bir demir-karbon alaşımı olarak tanımlanır. Çelik söz konusu iken karbon değeri yüzde birkaç seviyelerinden başlar ve % 2 gibi seviyeye kadar ulaşabilir ancak istisna olarak % 2 den fazla karbon ihtiva eden yüksek alaşımli çelikler, yüksek orandaki alaşım elementleri nedeni ile çelik grubuna dahil edilirler. Kimyasal bileşimine göre çelikleri “alaşimsız çelikler” ve “alaşımli çelikler” olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür. Alaşımli çeliklerde, kendi içinde düşük ve yüksek alaşımli çelikler olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Alaşım elementleri düşük alaşımli çeliklerde toplamda % 5 gibi bir seviyede olmakta iken genel olarak takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi yüksek alaşımli çeliklerde bu değerin daha üzerindedir. Kompozisyona, sahip olduğu fazlara ve bileşenlere bağlı olarak çelikler çok geniş özellik yelpazesine sahiptirler [4].

Takım çelikleri, çelik sınıflandırılmasında ayrı bir grup olarak ele alınmakta ve o şekilde incelenmektedir. Bunun da nedeni diğer sınıflardaki çeliklere nazaran özellikle çalışma koşulları bakımından farklılık göstermeleridir. Takım çelikleri, toplam çelik üretiminin nispeten küçük bir yüzdesini oluşturmakla beraber diğer çelik mamüllerinin ve mühendislik malzemelerinin üretiminde kullanıldıkları için stratejik bir pozisyona sahiptirler[4,5]. Takım çelikleri sıcak ya da soğuk haldeki iş parçasını kesme, dövme, delme, eğme, bükme, form verme, ekstürüzyon ve benzeri yöntemlerle şekillendiren takım ve kalıpların yapımında kullanılan çelik grubudur. Yüksek nitelikte üretilen takım çelikleri, takım ve kalıp yapımı dışında spesifik özellik istenen makine parçalarının imalatında da kullanılmaktadır. Takım çeliklerinin arzu edilen özelliklerinden bazıları yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik, yüksek tokluk, yüksek sıcaklık mukavemeti, yüksek işlenebilirlik, yüksek sertleşebilirlik ve homojen mikroyapıdır. Diğer sınıflardaki çeliklere göre daha ağır

çalışma koşullarında kullanılan takım çeliklerinden, düşük veya yüksek sıcaklıklardaki kullanımları sırasında, yüksek hızlarda ve yüksek gerilmelerde deforme olmaksızın, kırılmaksızın ve aşınmaksızın sürekli aynı performansı göstermeleri istenir. Çalışma koşullarının gerektirdiği özellikler, karbonun yanı sıra bileşiminde bulunan alaşım elementleri ile sağlanır. Bu çeliklere üstün özellikler kazandıran başlıca alaşım elementleri; krom, molibden, vanadyum, volfram ve kobalttır. Bileşiminde mangan, nikel ve silisyumun yanı sıra alüminyum, titanyum ve zirkonyum gibi tane küçültücü elementlerde bulunabilmektedir. Empürite elementleri olan fosfor ve kükürdün en çok % 0,03 düzeyinde bulunmasına izin verilir [5].

Takım çeliklerinin bir servisteki kullanım ömrü, uygun çeliğin seçilmesi ve ısıl işleminin iyi olması kadar dizayn ve kullanım koşullarına da bağlıdır. Eğer bir takım çeliği mamullünde, tüm bu şartlar yerine getirilecek olursa takım çeliği mamullü başarıyla kullanım ömrünü tamamlar. Şekil 2.1' de takım çeliklerinin servisteki kullanım ömrünü etkileyen etmenlerin birbiriyle olan ilişkileri gösterilmektedir. Bu zincirin herhangi birinde bir bozukluk ve yanlışlık olması takım çeliği mamullünde çatlamaya ve hatta kırılmaya kadar gidebilir [6].



Şekil 2.1. Takım çeliklerinin servisteki kullanım ömrünü etkileyen etmenler [6]

## 2.2. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

Günümüzde 500 den fazla farklı bileşim ve özellikte takım çeliği mevcuttur. Amerikan Demir Çelik Enstitüsü(AISI) ve Otomotiv Mühendisleri Derneği(SAE) , sertleştirme ortamlarını ve genel kullanım alanlarını göz önüne alarak takım çeliklerini Tablo 2.1' de görüldüğü gibi farklı harflerle simgelemiş ve 7 ana gruba ayırmıştır [4].

Tablo 2.1. Takım çeliklerinin sınıflandırılması [4]

Grup	Sembol
Suda Sertleşen Takım Çelikleri	W
Şok Dirençli Takım Çelikleri	S
Soğuk İş Takım Çelikleri	
Yağda sertleşen	O
Havada sertleşen	A
Yüksek karbonlu yüksek kromlu	D
Sıcak İş Takım Çelikleri	
Kromlu	H10-H19
Volframlı	H20-H39
Molibdenli	H40-H59
Yüksek Hız Takım Çelikleri	
Volframlı	T
Molibdenli	M
Plastik Kalıp Takım Çelikleri	P
Özel Amaçlı Takım Çelikleri	L

### 2.2.1. Suda sertleşen takım çelikleri

W simgesi ile gösterilen ve isminden de anlaşılacağı üzere suda suverilerek sertleştirilen takım çelikleridir. En ucuz takım çeliği sınıfıdır ve karbon oranı % 0,60-1,40 düzeyinde olup, bu sınıfa giren bazı çeliklerin bileşiminde % 0,25-0,50 oranında krom ve vanadyum da bulunabilir [7].

Suda sertleşen takım çelikleri düşük sertleşme kabiliyetine sahiptirler. Küçük boyutlu olmayan takımlarda, suverme sonrası yüzeyde yüksek ve iç kısımlarda(göbekte)

düşük sertlik elde edilir. Diğer sınıflardaki takım çeliklerine göre talaşlı işlemeye daha uygun olan suda sertleşen takım çeliklerinin dekarbürizasyon dirençleri yüksektir. Çok geniş bir kullanım alanı olan W sınıfı takım çeliklerinin seçiminde karbon içeriği göz önüne alınmalıdır. Sertleştirme sonrası; düşük karbonlu W sınıfı takım çeliğinde yüksek tokluk, yüksek karbonlu W sınıfı takım çeliğinde ise yüksek aşınma direnci elde edilir [5,7].

### **2.2.2. Şok dirençli takım çelikleri**

S simgesi ile gösterilen şok dirençli takım çelikleri, yüksek tokluk ile tekrarlı ve darbeli yüklemeye direnç gerektiren çalışma koşulları için uygun olan takım çeliği sınıfıdır. Şok dirençli takım çelikleri % 0,40-0,65 karbon içeren çelikler olup bileşiminde alaşım elementi olarak silisyum, krom, volfram ve bazen de molibden bulunabilir [7].

Şok dirençli takım çeliklerinde çalışma koşullarının gerektirdiği sertlik değerine, darbe ve şok direncini düşürmeden ulaşmak mümkündür. Yüksek sıcaklıklarda ve aşınmaya maruz uygulamalarda kullanılmaya elverişli olmayan bu çeliklerin talaşlı işlenebilirliği de iyi değildir. Tokluğu yüksek olan S sınıfı takım çelikleri, zımba ve kesici bıçak gibi darbeli yüklemelere maruz kalan kalıp ve takımların yapımında kullanılır [5,7].

### **2.2.3. Sıcak iş takım çelikleri**

Sıcak iş takım çelikleri çoğunlukla sıcak dövme, sıcak ekstrüzyon, enjeksiyon kalıpları ve sıcak form verme gibi 200°C' nin üzerindeki sıcaklıklara çıkılan uygulamalarda kullanılmaktadır. Sıcak iş takım çelikleri % 0,30-0,60 oranında karbon ve % 2,00-12,00 oranında krom içerir.

H simgesi ile gösterilen sıcak iş takım çeliklerinin en belirgin özelliği bileşiminde bulunan krom, molibden ve volfram gibi alaşım elementleri nedeniyle sertliğini yüksek sıcaklıklarda muhafaza edebilmeleridir [7]. Sıcak iş takım çeliklerinin sahip

oldukları yüksek sıcaklıkta sertliğini koruyabilme, sıcak aşınma direnci, yüksek sıcaklık çekme mukavemeti, ısıl iletkenlik gibi özellikler artan krom, molibden, volfram içeriği ile doğru orantılı olarak artış gösterir. Ayrıca bu çeliklerin sertleşme kabiliyeti yüksektir ve havada soğutma ile sertleşebilirler [5].

Sıcak iş takım çelikleri bileşimindeki ana alaşım elementine göre kromlu(H10-H19), volframlı(H20-H39) ve molibdenli(H40-H59) sıcak iş takım çelikleri olmak üzere üç grup altında toplanmıştır.

#### **2.2.4. Yüksek hız takım çelikleri**

Yüksek hız takım çelikleri, yüksek alaşımlı çelikler olup ana alaşım elementi olarak volfram veya molibden içerirler. Bileşiminde volfram ve molibdenin yanı sıra krom, vanadyum ve kobalt da bulunabilir. Karbon içeriği genellikle %0,75-1,20 olup, bazen %1,50 düzeyine kadar da çıkabilmektedir[7].

Yüksek hız takım çelikleri yaygın olarak diğer takımların işlenme ve talaşlı imalatında kullanılırlar. Bu çelikler 400°C-600°C aralığında çalışmaya elverişlidirler. Yüksek hız takım çeliklerinin yüksek sıcaklıklarda yumuşama direnci çok yüksektir ve bu yüksek sıcaklıklardaki yumuşamaya karşı gösterdiği direnç yeteneği “kırmızı sertlik” olarak adlandırılır. Kırmızı sertlik, yüksek hız takım çeliklerinin seçimindeki önemli bir özelliktir ve kırmızı sertliği artırmak için de bileşiminde kobalt bulduran yüksek hız takım çelikleri seçilmelidir. Yüksek hız takım çeliklerinin aşınma ve şok dirençleri de yüksektir. Abrazif aşınma direncinin önemli olduğu uygulamalarda ise bileşiminde vanadyum bulduran yüksek hız takım çelikleri tercih edilmelidir[5].

Yüksek hız takım çelikleri bileşimindeki ana alaşım elementine göre volframlı(T) ve molibdenli(M) yüksek hız takım çelikleri olmak üzere iki grup altında toplanmıştır.



### **2.2.5. Plastik kalıp takım çelikleri**

P simgesi ile gösterilen ve plastik kalıbı yapımında kullanılan takım çelikleri sınıfında düşük veya orta karbonlu, krom ve nikel alaşımlı (çok az oranda vanadyum ve molibden ilaveli) bileşime sahip çelikler bulunmaktadır. Bileşimlerindeki alaşım elementlerinin toplamı %1,50-5,00 düzeyindedir. Plastik takım çelikleri korozyona karşı gösterdikleri direnç ve parlatılabilme özellikleri ile öne çıkmaktadırlar [7].

### **2.2.6. Özel amaçlı takım çelikleri**

L simgesi ile gösterilen özel amaçlı takım çelikleri sınıfına giren çeliklerin bileşimi, suda sertleşen takım çelikleri ile hemen hemen aynıdır. Ancak özel amaçlı takım çeliklerinin bileşiminde aşınma direncini ve sertleşebilirliği artırıcı olarak belirli oranlarda krom, vanadyum, molibden ve nikel bulunabilir. Genellikle yağda suverilerek sertleştirilen L serisi takım çelikleri, yüksek aşınma direncine ve tokluğa sahip olması istenen kalıp ve makine parçası yapımında kullanılmaktadır [7].

### **2.2.7. Soğuk iş takım çelikleri**

Soğuk iş takım çeliklerinde karbon miktarı %0,30 ile %2,50 arasında değişir ve hatta yüksek alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinde bu değer %3' e kadar ulaşır. Alaşım elementi olarak karbür teşekkül ettirici krom, vanadyum, molibden ve volframın yanı sıra nikel ve manganda bulundurulur. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmadıkları için bileşiminde, yüksek sıcaklık mukavemetini kararlı kılan kobalt elementi bulunmaz. Düşük alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinde alaşım elementi miktarı %5 seviyelerinde iken yüksek alaşımlılarında %10 ile %30 arasında değişmektedir [7]. Sertleşme derinliği özellikle krom, molibden ve nikel gibi elementlerle artırılabilir. Alaşımlama türü ve miktarına göre havada, yağda veya gerektiğinde sıcak banyoda su verme ile sertleştirilirler.

### 2.3. Soğuk İş Takım Çelikleri

Takım çeliklerinin önemli bir sınıfını oluşturan ve diğer takım çeliklerine göre daha geniş kullanım alanına sahip olan soğuk iş takım çelikleri genel olarak 200°C nin altındaki sıcaklıklarda bulunan iş parçalarının, talaşlı ve talaşsız şekil verme işlemlerinde(kesme, form verme, sıvama, eğme, bükme vb.) kullanılan takım çelikleridir. İçerdiği alaşım elementi ve karbon oranına bağlı olarak yüksek sertlik, yüksek aşınma dayanımı, yeterli aşınma dayanımı ile birlikte yüksek tokluk, sertleşebilirlik ve ısıl işlemde boyut kalıcılığı gibi özelliklerin kullanım amacına göre birebir sağlanması mümkündür [4].

#### 2.3.1. Soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri

Soğuk iş takım çelikleri, AISI ve SAE göre sertleşme sıcaklığı, soğutma koşulları ve bileşimleri göz önünde bulundurularak üç gruba ayrılmışlardır [4].

##### 2.3.1.1. Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri

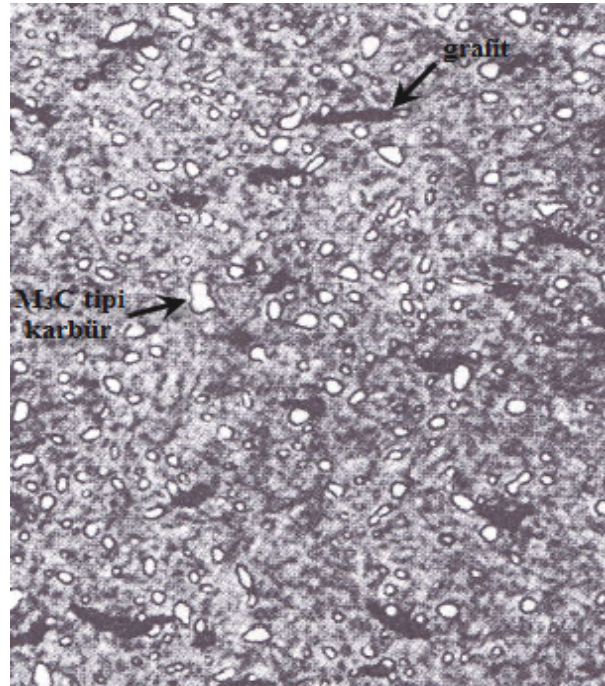
Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri, O simgesi ile gösterilen yüksek karbonlu(%0,90-1,50 C) çelikler olup, bileşimlerinde mangan ve bir miktar krom ve volfram içerir [4]. Suda sertleşen takım çeliklerinden(W) daha yüksek sertleşebilirliğe sahiptirler ve yağda su verilerek sertleşebilirler. Isıl işlemde çatlama ve distorsiyona uğrama riski W sınıfı takım çeliklerine göre daha düşüktür. Buna karşın ısıl işlem sırasında dekarburizasyon ve karburizasyona karşı korunmalıdırlar [4,5,7]. Tablo 2.2 de yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri gösterilmiştir.

En çok yaygın olarak kullanılan yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinden O6 kalite çeliği, yapısındaki karbonun bir kısmını grafit formunda bulundurduğundan talaşlı işlemeye diğerlerinden daha elverişlidir. Ayrıca yapısında ki grafit partikülleri çalışma koşullarında yağlayıcı etki yaparak takım ömrünün artmasına da sebep olur [5].

Tablo 2.2. Yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri [5]

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
O1	0,85-1,00	1,00-1,40	0,50 maks	0,40-0,60	0,30 maks	...	0,40-0,60	0,30 maks
O2	0,85-0,95	1,40-1,80	0,50 maks	0,50 maks	0,30 maks	0,30 maks	...	0,30 maks
O6	1,25-1,55	0,30-1,10	0,55-1,50	0,30 maks	0,30 maks	0,20-0,30	...	...
O7	1,10-1,30	1,00 maks	0,60 maks	0,35-0,85	0,30 maks	0,30 maks	1,00-2,00	0,40 maks

Şekil 2.2' de 815°C de ostenitlenmiş ve sonrasında yağda suverilerek sertleştirilerek(20°C) akabinde 220°C de temperlenmiş O6 soğuk iş takım çeliğine ait optik mikroskop(1000x) yapısı gösterilmiştir. Mikroyapı grafit partikülleri(koyu siyah alanlar) ,  $M_3C$  tipi karbürler (küreselleşmiş beyaz alanlar), dönüşmemiş ostenit(~%5,5) ve temperlenmiş martensitten(ana yapı) meydana gelmektedir [5].



Şekil 2.2. O6 soğuk iş takım çeliğine ait optik mikroskop görüntüsü(1000x) [5]

### 2.3.1.2. Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri

A simgesi ile gösterilen havada sertleşen soğuk iş takım çeliği sınıfında bulunan çelikler, yaklaşık olarak % 1 karbon, % 2 mangan, maks.% 5 krom ve % 1 molibden içerir. Bileşiminde mangan ve molibden gibi alaşım elementlerinin bulunması sertleşebilirliğini artırır [4,5,7]. Bu nedenle A sınıfı soğuk iş takım çeliklerinin hepsi yüksek sertleşme kabiliyetine sahip olup, havada suverme ile sertleşebilirler ve ısıl işlemlerde boyutsal kararlılık gösterirler. Yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerine kıyasla aşınma dirençleri yüksek olan A sınıfı soğuk iş takım çeliklerinin, yüksek sıcaklık dirençleri ve dekarburizasyon dirençleri iyi değildir [7]. Tablo 2.3 de havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri gösterilmiştir.

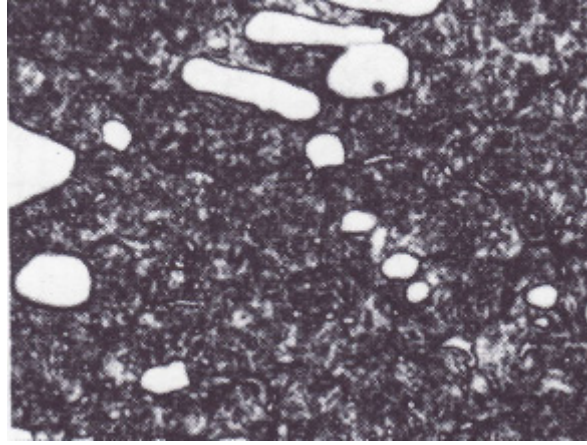
Tablo 2.3. Havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri[5]

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
A2	0,95-1,05	1,00 maks	0,50 maks	4,75-5,50	0,30 maks	0,90-1,40	...	0,15-0,50
A3	1,20-1,30	0,40-0,60	0,50 maks	4,75-5,50	0,30 maks	0,90-1,40	...	0,80-1,40
A4	0,95-1,05	1,80-2,20	0,50 maks	0,90-2,20	0,30 maks	0,90-1,40	...	...
A6	0,65-0,75	1,80-2,50	0,50 maks	0,90-1,20	0,30 maks	0,90-1,40	...	...
A7	2,00-2,85	0,80 maks	0,50 maks	5,00-5,75	0,30 maks	0,90-1,40	0,50-1,50	3,90-5,15
A8	0,50-0,60	0,50 maks	0,75-1,10	4,75-5,50	0,30 maks	1,15-1,65	1,00-1,50	...
A9	0,45-0,55	0,50 maks	0,95-1,15	4,75-5,50	1,25-1,75	1,30-1,80	...	0,80-1,40
A10	1,25-1,50	1,60-2,10	1,00-1,50	...	1,55-2,05	1,25-1,75	...	...

Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri arasında en çok kullanılanı A2 ve A7 kalite çeliğidir. A2 kalite takım çeliğinden imal edilen kalıplara yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmak amacıyla geleneksel ısıl işlemde sonra nitrürleme işlemi uygulanması gerekebilir. A8 ve A9 kalitelerinin karbon içerikleri düşük olduğundan diğer A sınıfı çeliklerine göre daha yüksek darbe direncine ve daha düşük aşınma direncine sahiptirler. Bileşiminde yüksek oranda karbon ve vanadyum içeren A7 kalite çeliği, aşınma direnci yüksek olmasına rağmen tokluğun birinci derecede

önemli olduğu çalışma koşulları için tercih edilmemelidir. A10 kalite çeliği ise O2 kalite çeliği gibi yapısında grafit bulundurur fakat O2 kalite çeliğe kıyasla daha yüksek sertleşebilirliğe sahiptir [4,5,7].

Şekil 2.3' de 955°C de ostenitlenmiş ve sonrasında havada suverilerek sertleştirilerek akabinde 315°C de temperlenmiş A7 soğuk iş takım çeliğine ait optik mikroskop(1000x) yapısı gösterilmiştir. Mikroyapıda iri birincil karbürler( $M_{23}C_6$ - $M_7C_3$ ) ve daha küçük ikincil karbürler( $MC$ - $M_6C$ ), dönüşmemiş ostenit ve temperlenmiş martensit bulunmaktadır [5].



Şekil 2.3. A7 soğuk iş takım çeliğine ait optik mikroskop görüntüsü(1000x) [5]

### 2.3.1.3. Yüksek karbonlu ve yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri

D simgesi ile gösterilen yüksek karbonlu ve yüksek kromlu soğuk iş takım çeliğinin bileşiminde yüksek oranda karbon(%1,40-2,50) ve %12,00 düzeyinde krom bulunur. Ayrıca molibden, vanadyum, volfram ve kobalt gibi alaşım elementleride içerebilirler. Bu sınıfa giren çeliklerden molibden içerenler havada soğutma ile sertleşebilirken, molibden içermeyenler yağda suverilerek sertleştirilirler. Tablo 2.4' de yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri gösterilmiştir [4,5,7].

Tablo 2.4. Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri[5]

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%) <sup>*</sup>							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Co
D2	1,40-1,60	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	...
D3	2,00-2,35	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,50	...	1,00 maks	1,00 maks	...
D4	2,05-2,40	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	...
D5	1,40-1,60	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	2,50-3,50
D7	2,15-2,50	0,60 maks	0,60 maks	11,50-13,50	0,70-1,20	...	3,80-4,40	...

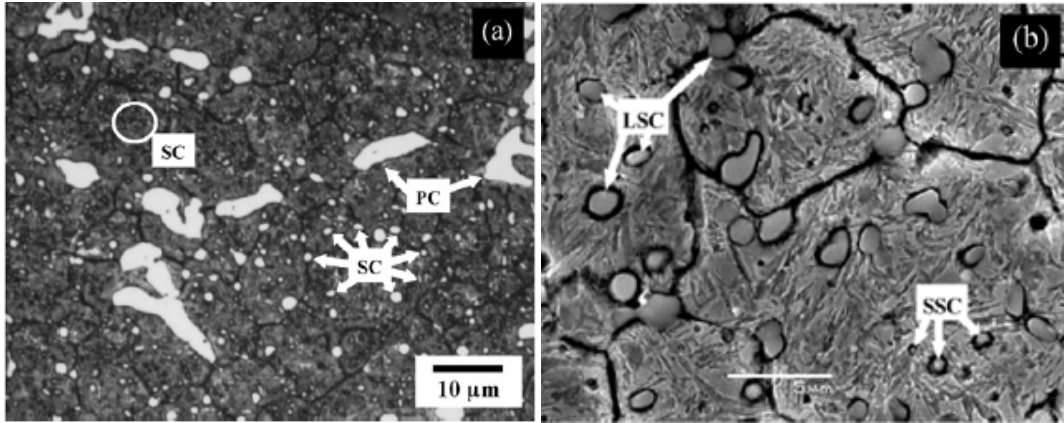
<sup>\*</sup>Ni %0,30 maks.

Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin ısıtılmasında çatlama ve distorsiyon riski düşüktür. Bu gruba giren çeliklerin abrazyon direnci, yapısındaki iri karbürlerin( $M_{23}C_6$ - $M_7C_3$ ) varlığından dolayı yüksektir. Ayrıca bileşimlerinde bulunan karbon, vanadyum ve molibden miktarlarının artması ile MC,  $M_2C$  tipi gibi yüksek sertliğe sahip karbürlerin oluşumu artacağından dolayı aşınma dirençleri artar [8].

D7 kalite soğuk iş takım çeliği, bu grubdaki çelikler arasında abrazyon aşınma direnci en yüksek, fakat işlenmesi en güç yani tokluğu en düşük olanıdır. D5 kalite soğuk iş takım çeliği ise bileşiminde kobalt içerdiğinden dolayı yüksek sıcaklıklarda (400°C'ye kadar) şekillendirme ve kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri sınıfındaki çelikler arasında en geniş kullanım alanı D2 kalite soğuk iş takım çeliğidir [7].

Şekil 2.4a,b' de 1020°C de 30 dakika ostenitlendikten sonra 540°C deki sıcak tuz banyosunda 15 dakika süreyle suverilerek sertleştirilip devamında soğuması için havaya bırakılan ve akabinde 200°C de 2 saat + 2 saat olarak çift temperleme uygulanmış D2 soğuk iş takım çeliğinin yapısı, optik mikroskop(10µm ölçekli-şekil 2.4a) ve taramalı elektron mikroskopunda(5µm ölçekli-şekil 2.4b) incelenmiştir. Boyutları 5µm dan büyük olanlar karbürler birincil karbürler(PC), 5µm dan küçük olanlar ikincil karbürler(SC) ve ikincil karbürlerinde 1 µm kadar olanları

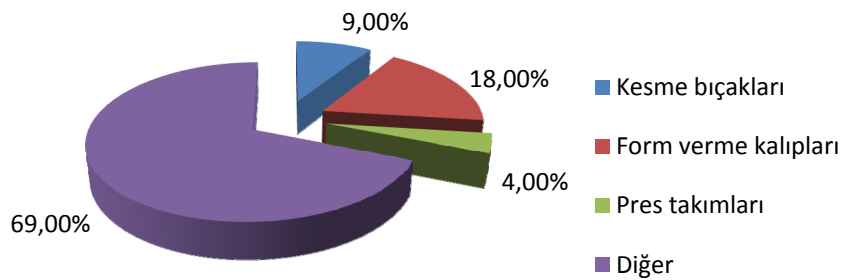
küçük ikincil karbürler(SSC), 5 ile 1  $\mu\text{m}$  arasındakilerde büyük ikincil karbürler(LSC) olarak nitelendirilmiştir. Buna göre optik mikroskop yapısında iri birincil karbürler(PC) ve daha küçük ikincil karbürler(SC) gözlenirken, yüksek büyütmeyle sahip SEM görüntülerinde ise büyük ikincil karbürler(LSC) ve küçük ikincil karbürleri(SSC) görmek mümkün olmuştur [9].



Şekil 2.4. D2 soğuk iş takım çeliğinin a-)optik mikroskop(10  $\mu\text{m}$ ) b-)taramalı elektron mikroskobu (5  $\mu\text{m}$ ) görüntüsü [9]

### 2.3.2. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları ve seçimi

Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları TS 3921 ve ASTM A681 de standartlaştırılmıştır. Bu standartlara göre kullanım alanları; kesme bıçakları, bükme kalıpları, sıvama kalıpları, soğuk form verme kalıpları, baskı makaraları, zimbalar, pres takımları, ölçme aletleri ve benzeri soğuk iş uygulamaları olarak belirlenmiştir[1,10]. Şekil 2.5' de soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri [10]

Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanlarına göre beklenen en önemli mekanik özellikleri, aşınma dayanımı ve tokluktur. Soğuk iş takım çeliklerinin kendi içlerinde kullanım alanına göre seçimleri, AISI ye göre Tablo 2.5 ve Şekil 2.6’ da ki gibi belirlenmiştir. Bu belirlemeler, aşınma direnci ve tokluk parametreleri göz önünde bulundurularak 1 den 9 kadar bir nümerik sistem yardımıyla kendi aralarında karşılaştırılmak suretiyle yapılmıştır. Burada 1 en düşük dereceyi, 9 ise en yüksek dereceyi sembolize etmektedir [5].

Tablo 2.5. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre seçim kriterleri [5]

Soğuk iş takım çeliği(AISI)	Aşınma direnci derecesi	Tokluk derecesi	Çalışma Sertliği (HRC)
<b>Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri</b>			
O1	4	3	57-62
O2	4	3	57-62
O6	3	3	58-63
O7	5	3	58-64
<b>Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri</b>			
A2	6	4	57-62
A3	7	3	58-63
A4	5	4	54-62
A6	4	5	54-60
A7	9	1	58-66
A8	4	8	48-57
A9	4	8	40-56
A10	3	3	55-62
<b>Yüksek karbonlu ve yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri</b>			
D2	8	2	58-64
D3	8	1	58-64
D4	8	1	58-64
D5	8	2	58-63
D7	9	1	58-66



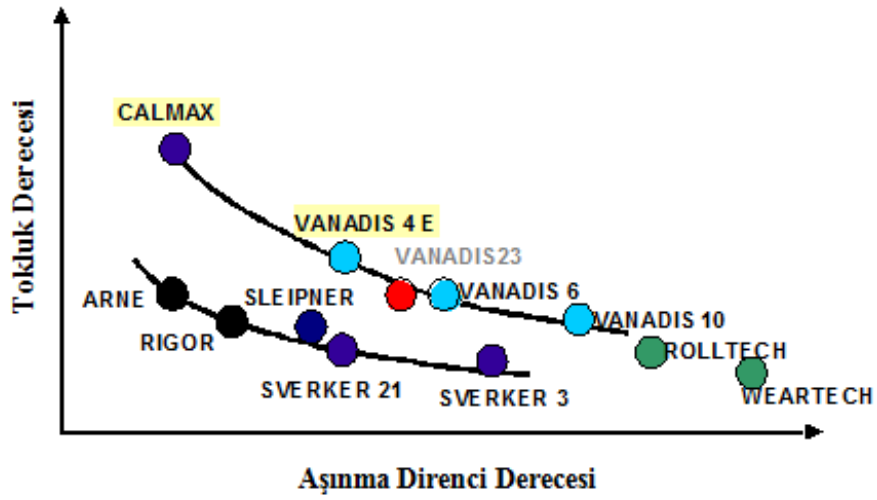
9									
8			A8 A9						
7									
6									
5			A6						
4				A4	A2				
3		O6 A10	O1 O2	O7		A3			
2							D2 D5		
1							D3 D4	A7 D7	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**Aşınma Direnci Derecesi**

Şekil 2.6. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre aşınma-tokluk kriterleri [5]

Sürekli aşınmaya maruz kalan kalıp veya takımlarda, tokluk özelliğine bakmadan yüksek aşınma dayanımını sağlayan D serisi soğuk iş takım çelikleri tercih edilmelidir. Fakat hem aşınmaya hem de darbeye maruz kalan kalıp veya takımlarda, yüksek aşınma direncinin yanı sıra tokluğuda yüksek olan A veya O serisi soğuk iş takım çelikleri tercih edilmelidir [5].

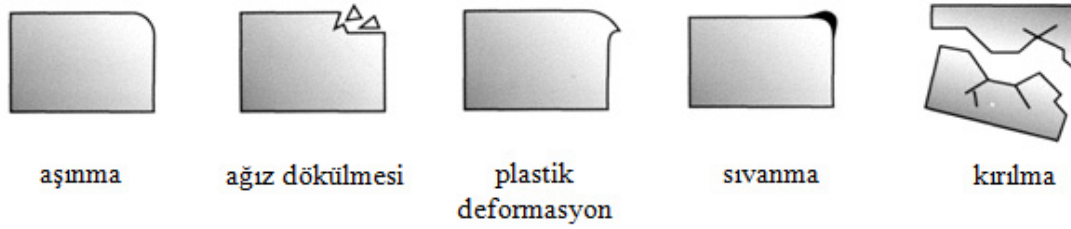
İsveçli takım çeliği üreticisi olan Uddeholm Tooling tarafından üretilen ve bu yüksek lisans tezi kapsamında da incelenen geleneksel takım çeliği yöntemiyle(ESR) üretilmiş Calmax® ve toz metalurjisi üretimi olan Vanadis 4 Extra® gibi patentli standart dışı soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanlarına göre seçimlerinde de yardımcı olmak amacıyla Şekil 2.7’ de ki grafikte aşınma dirençlerine karşı tokluğun değişimi verilmiştir. Burdan Vanadis 4E®’ nin optimum aşınma ve tokluk değerlerini verdiğini, Calmax®, in da tokluğun ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır [11].



Şekil 2.7. Uddeholm firmasına ait patentli soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanına göre aşınma-tokluk kriterleri [11]

### 2.3.3. Soğuk iş takım çeliklerinde meydana gelen hasar mekanizmaları

Soğuk iş takım çeliklerinin kullanıldığı uygulamalarda temel olarak aşınma, ağız dökülmesi, plastik deformasyon, sıvanma ve çatlak oluşumu-ilerlemesi sonucu kırılma olmak üzere [11] beş farklı hasar mekanizması vardır (Şekil 2.8).



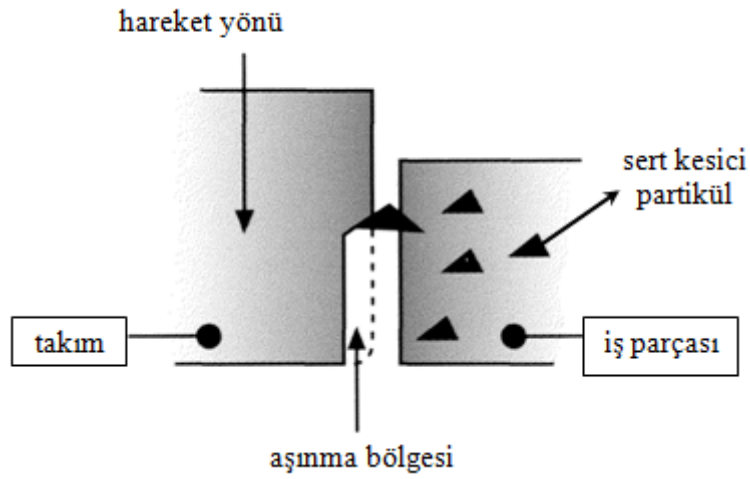
Şekil 2.8. Soğuk iş takım çeliklerinde en çok karşılaşılan hasar mekanizmaları [12]

Bu mekanizmalardan biri baskın olmak üzere bir kaç ya da tamamı aynı kalıpta veya takımında görülebilir. Önemli olan kalıbın\takımın ömrünü belirleyen mekanizmayı saptamak ve bu belirleyici mekanizmayı devre dışı bırakacak yada olumsuz etkisini azaltacak, tasarımın yapılmasını, takım çeliğinin seçilmesini, ısıl işlemin ona göre yapılmasını ve ihtiyaç duyuluyor ise bir yüzey işleminin yapılmasını sağlamaktır. Bu hasar mekanizmaları ile soğuk iş takım çeliği özelliklerinin ilişkileri ele alınarak incelenecek olursa:

#### 2.3.3.1. Aşınma

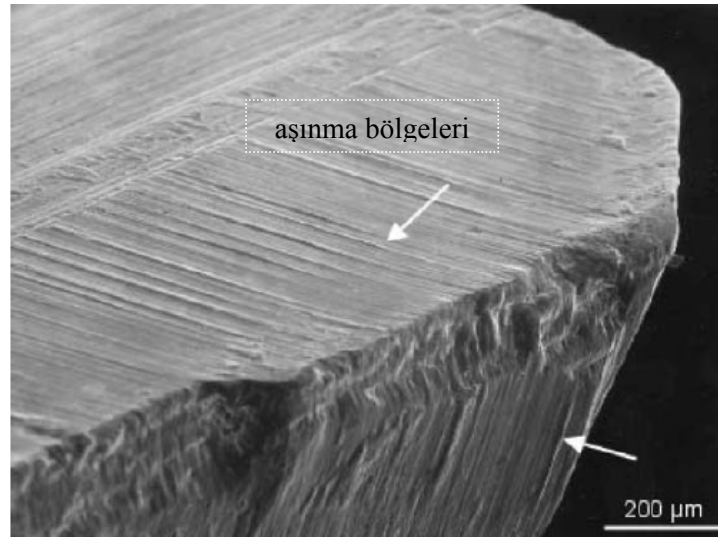
Soğuk iş takım çeliklerinde abrazyif, adhezif ve yorulma aşınması olmak üzere üç farklı aşınma mekanizması baskın olarak gözlenmektedir [11].

Abrazyif aşınma; sert olanın yumuşak olanı çizmesi biçiminde tanımlanabilecek olan abrazyif aşınma, kesilen veya form verilen iş parçasının kendi sertliği ya da içerdiği sert parçacıklar aracılığı ile takımı aşındırmasıdır [11,12] (Şekil 2.9).



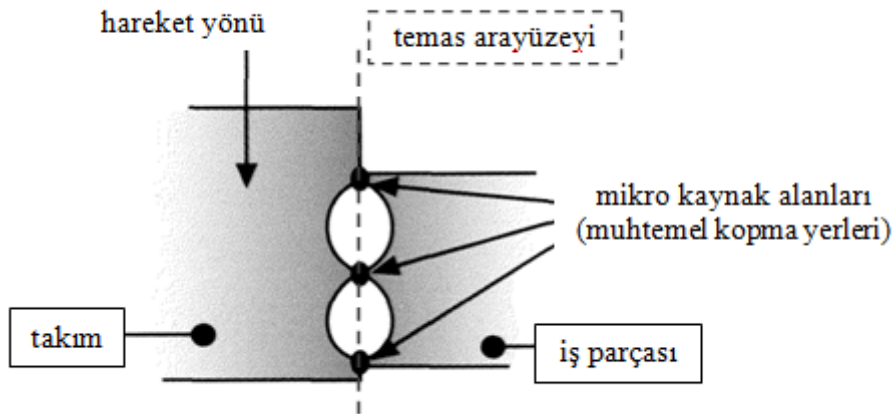
Şekil 2.9. Abrazif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [11]

Bu aşınma türüne engel olmak için takım çeliğinde aranan özellikler; yüksek sertlik ve yüksek miktarda sert ve iri karbürleri bulundurmasıdır. Örneğin soğuk haddelenmiş sacların kesiminde, kesme bıçağı olarak kullanılan D2 soğuk iş takım çeliğinde meydana gelen abrazif aşınmanın baskın olduğu hasar mekanizması Şekil 2.10' da gösterilmiştir [11].



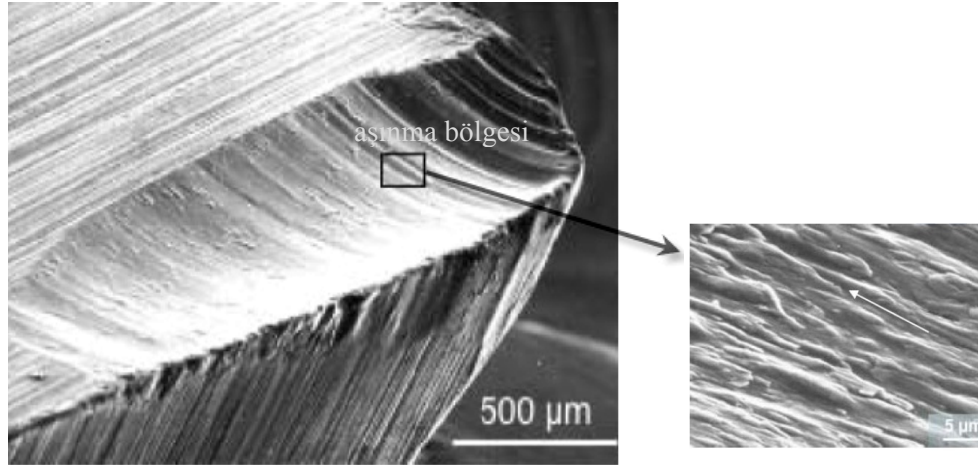
Şekil 2.10. D2 Soğuk iş takım çeliğinde meydana gelen abrazif aşınma hasarı [13]

Adhezif aşınma; kayma veya sıvanma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınmanın sebebi, temiz metal yüzeyleri birbirleri ile temas halinde iken yüzeylerdeki elektrostatik dengesizlikten dolayı adhezyona doğru doğal bir eğilimleri vardır. Bu da takım ile iş parçasının (örneğin kesilen alüminyum sacın) temas yüzeyinde son derece büyük baskı kuvvetleri ve buna bağlı olarak da sıcaklık artışı ortaya çıkarır. Temas anındaki bu koşullar takım-iş parçası temas yüzeyinde Şekil 2.11’ de görüldüğü gibi anlık mikro kaynaklar meydana getirir. Bu kaynaklar bir an sonra, uygulanan kesme kuvveti ile koparak (genel olarak aşınma ürünleri düşük sertlikteki metalden kopar eğer birbirleri ile çalışan metallerin sertlikleri aynı ise her iki yüzeyden de aşınma ürünleri kopabilir) temas arayüzeyinde ayrılır veya temas yüzeylerinden birine sıvanarak yapışır. Bu durumu engellemek için takım çeliğinden beklenen özellikler; yüksek sertlik, yüksek yüzey sertliği, düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek tokluktur [11,12].



Şekil 2.11. Adhezif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [11]

Örneğin şekil 2.12’ de düşük karbonlu bir çeliğin işlenmesinde kullanılan soğuk iş takım çeliğinde adhezif aşınma sonucu krater oluşumu gösterilmiştir. İşaretili bölgenin büyütülmüş incelemesinde ise kesme kuvvetleri sonucunda oluşan kayma kırıkları ve adhezif aşınma izleri mevcuttur [11].



Şekil 2.12. Soğuk iş takım çeliğinde meydana gelen adhezif aşınma hasarı [13]

Yorulma aşınması; soğuk iş takım çeliklerinde en sık rastlanan aşınma mekanizmasıdır. Tekrarlanan mekanik yükler, kalıp çeliğinin yüzeyinde yorulmaya neden olur. Çalışan yüzeylerde mikroçatlakların oluşmasına yol açan yorulma, bu çatlakların ilerlemesi sonucu mikro boyutta ağız dökülmesi biçiminde kendini gösterir. Yorulma aşınmasının engellenmesi yada geciktirilmesi ise, takım çeliğinin yüksek yorulma dayanımına sahip olması ve yüksek sertliği ile mümkündür [11,12].

Unutulmamalıdır ki bu mekanizmalar her zaman aynı uygulamada birlikte bulunmayabilir. Ancak birinin daha belirleyici olduğuna daha çok sık rastlanır. Kimi zaman ise, örneğin sertleştirilmiş paslanmaz çeliğin kesilmesinde, aşınmayı engellemek için her üç aşınma mekanizması için de önlem alınmalıdır.

### 2.3.3.2. Ağız Dökülmesi

Kullanım sırasında atma olarak karşımıza çıkan ve aslında düşük çevrimli yorulma olan ağız dökülmesi, kalıbın veya takımın çalışan kenarında oluşan mikro çatlakların kısa sürede büyüyerek birbirleriyle birleşmesi ve sonuç olarak kesici köşeden parça kopmasına neden olmasıdır. Ağız dökülmesinin önüne ancak tokluğu yüksek takım çeliği kullanarak geçilebilir [11].

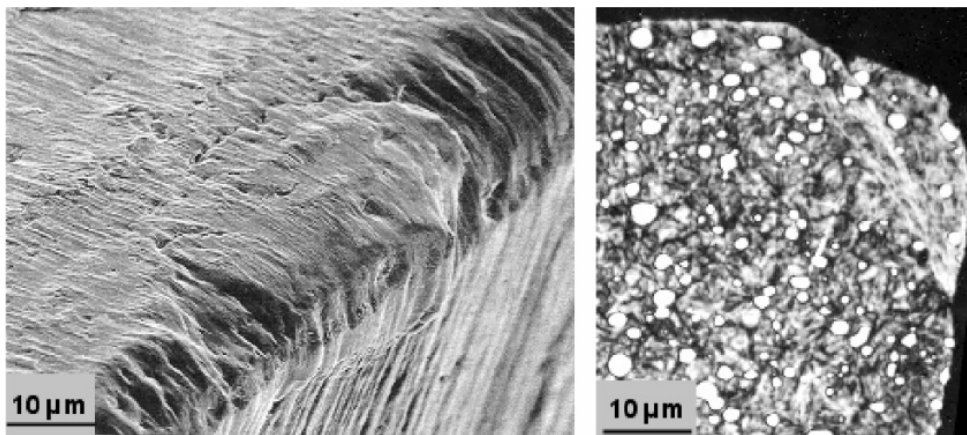
### 2.3.3.3. Sıvanma

Sıvanma, yumuşak metallere kesilmesi, haddelenmesi, derin çekilmesi gibi şekillendirilmeleri sırasında karşılaşılan yapışma problemi. Ayrıca adhezif aşınma sonucu arayüzeydeki aşınma ürünlerinin yüzeye yapışmasında sıvanma olarak nitelendirilir [11].

Kalıbın ya da takımın kesici köşesine yapışan ve burada üst üste yığılarak biriken iş parçasından parçacıklar, basınç altında ezilerek sertleşir ve kesici köşenin işlevini üstlenir, kesmeyi gerçekleştirir. Ancak, köşedeki bu yığın bir adım sonra koparak hem kesici köşeden parça koparır hem de kalıpta çizilmeye yol açar. Bunu engellemek için kalıbın; yüzey sertliğini artırmak, yüzey pürüzlülüğünü düşürmek ve tokluğunu yükseltmek gereklidir [11,12].

### 2.3.3.4. Plastik Deformasyon

Kullanım sırasında çökme, ağız dönmesi olarak karşımıza çıkan plastik deformasyon aslında, kullanılan kalıp malzemesinin bu uygulamada yeterli akma dayanımına sahip olmadığı anlamına gelmektedir. Çökmenin önüne geçmek için yüksek akma dayanımlı takım çeliği kullanılmalıdır. Şekil 2.13’ de soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş plastik enjeksiyon kalıbının ağız kısmında meydana gelmiş plastik deformasyon aynı büyütmelerde farklı bakış açılarından gösterilmiştir [11,12].



Şekil 2.13. Soğuk iş takım çeliğinin ağız kısmında meydana gelmiş plastik deformasyon hasarı [13]

### 2.3.3.5. Kırılma

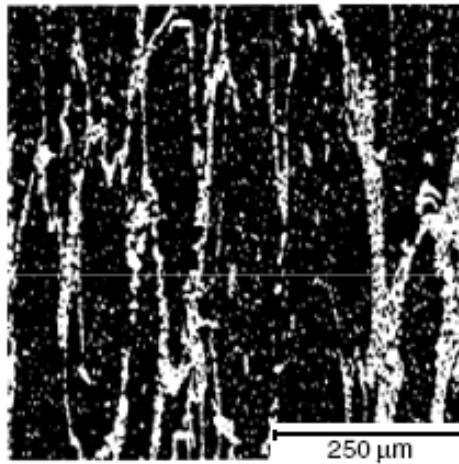
Tasarım aşamasından başlayarak kullanım ve üretim şartlarına kadar her adımda, kalıbın kırılmasına yol açabilecek nedenler oluşturmak mümkündür; keskin köşeler, kalem izi bırakılmış işlemler, taşlama hataları, ısıl işlem hataları, erozyon (EDM) hasarları, kaynak hataları, kullanımda bindirme, ayarsızlık vb. gibi. Bunun dışında, kalıpta ağız dökülmesi, plastik deformasyon hatta aşınma ortaya çıktığında gerekli önlemlerin hemen devreye alınmaması ve hasarlı kalıpların çalıştırılması da kırılmanın oluşmasına yol açabilir. Bu tür hataları tolere edebilmek ancak bir ölçüde mümkündür. Bunun için de sertliği düşük, tokluğu yüksek takım çeliği tercih sebebidir [11,12].



### BÖLÜM 3. TAKIM ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ

Dünya üzerinde bulunan birçok üretici tarafından takım çeliklerinin üretimi gerçekleştirilmekte olup temel olarak takım çeliklerinin üretiminde izlenen yol aynıdır. Takım çeliğinin kalitesi ve göstereceği performans üretim parametreleriyle doğrudan ilgili olduğundan takım çeliklerinin üretiminin anlaşılması performansı etkileyen faktörlerin belirlenmesini kolaylaştıracaktır [14].

Yüksek alaşımlı çelikte olduğu gibi takım çeliklerinde de belirgin bir sıvı katı aralığı olduğundan alaşım elementlerinin katılaşma sırasında öbeklenerek birikimi istenmeyen fakat kaçınılması zor bir olaydır. Bu alaşımlar elektrik ark fırınında(EAF) döküldükten sonra kütük halinde soğutulursa katılaşma sırasında orta eksende toplanmış ötektik karbür ağı oluşumu beklenir. İyi mekanik özelliklere ulaşmak istendiğinde bu karbür ağının dağıtılması gerekmektedir. Bu karbür ağı ise döküm aşamasından sonra ancak belli bir yere kadar ısıl işleme dağıtılabilmektedir. Şekil 3.1’ de EAF da ergitilen ve kütük halinde katılaştırılan M3 tipi yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısı gösterilmiştir [14,5].



Şekil 3.1. İngot döküm yöntemiyle üretilmiş M3 tipi yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısı [5]

Takım çeliklerinin üretimi için üç ayrı yöntem kullanılmaktadır [14]. Bunlar;

1-Geleneksel Takım Çeliği Üretimi(Electroslag Remelting-ESR)

2-Toz Metalurjisi

3- Osprey Yöntemi

Geleneksel takım çeliği üretimi(curuf altı yeniden ergitme-ESR) ile üretilen takım çeliklerinde alaşım elementlerinin birikim eğilimi azaltılsa da iri karbürlerin oluşmasına engel olunamamaktadır. Bu oluşan iri karbürler takım çeliğinin tokluğunu düşürmekte, ısıl işlem problemlerini artırmakta ve talaşlı imalatı zorlaştırmaktadır. Bu tür problemlerin çözülebilmesi nedeni ile toz metalurjisi yöntemi takım çeliği üretiminde her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin miktarı son 25 yılda düzenli olarak artmış ve günümüzde 1100 ton/yıl' a kadar ulaşmıştır. Takım çeliklerinin toz metalurjisi ile üretimi en başta homojen ve ince karbür dağılımı sağlayarak yüksek performanslı takım çeliklerinin üretilmesinde tercih sebebi olmaktadır. Fakat toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin üretimi fazla sayıda süreç adımı gerektirmekte ve bundan dolayı bitmiş ürün diğer üretim yöntemlerine göre oldukça pahalıdır. Osprey yöntemi ile takım çeliği üretimi çok yeni bir teknoloji olup üretim aşamasındaki kademeler toz metalurjisine kıyasla daha kolay ve kısadır. Osprey yöntemi, ESR yöntemine göre çok daha üstün olmakla beraber toz metalurjisi üretimine kıyasla da daha iyi mekanik özelliklere sahip takım çeliği üretimine olanak sağlar. Ayrıca toz metalurjisi yönteminin birçok avantajına sahipken onun, çok sayıda işlem basamağı ve tozların depolanması esnasında karşılaşılan güvenlik problemleri gibi bazı önemli dezavantajlarını içermez [14,15,16].

Geleneksel takım çeliği yöntemiyle(ESR) ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bazı standart ve standart dışı soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1 de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi toz metalurjik ürünlerin alaşım elementi miktarları daha fazladır bununda nedeni yukarıda da bahsedildiği gibi toz metalurjisi üretimi ile karbür dağılımını ve boyutu kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.

Tablo 3.1. ESR ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş bazı standart ve standart dışı soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimleri [16]

Çelik İsmi	Kimyasal Bileşim,%ağ.					
	C	Cr	Mo	W	V	Co
<b>Geleneksel takım çeliği yöntemi(ESR) ile üretilmiş soğuk iş takım çelikleri</b>						
AISI A2	1,00	5,00	1,00	...	0,30	...
AISI D2	1,50	12,00	1,00	...	...	...
AISI D4	2,25	12,00	1,00	...	...	...
Calmax <sup>a</sup>	0,60	4,50	0,50	...	0,20	...
Sneipner <sup>a</sup>	0,90	7,80	2,50	...	0,50	...
Sverker 3 <sup>a</sup>	2,05	12,5	...	1,00	...	...
<b>Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş soğuk iş takım çelikleri</b>						
CPM 3V <sup>b</sup>	0,80	7,50	1,00	...	2,75	...
CPM 9V <sup>b</sup>	1,80	5,25	1,30	...	9,00	...
CPM 15V <sup>b</sup>	3,50	5,25	1,30	...	14,50	...
CPM 18V <sup>b</sup>	3,90	5,25	1,30	...	17,50	...
Vanadis 4 Extra <sup>a</sup>	1,40	4,70	3,50	...	3,70	...
Vanadis 6 <sup>a</sup>	2,10	6,80	1,50	...	5,40	...
Vanadis 10 <sup>a</sup>	3,00	8,00	1,50	...	9,80	...
Vanadis 60 <sup>a</sup>	2,30	4,20	7,00	6,50	6,50	10,50

Not:(a)Uddeholm Tooling' in tescilli ürünüdür.

(b)Crucible Materials Corporation' in tescilli ürünüdür.

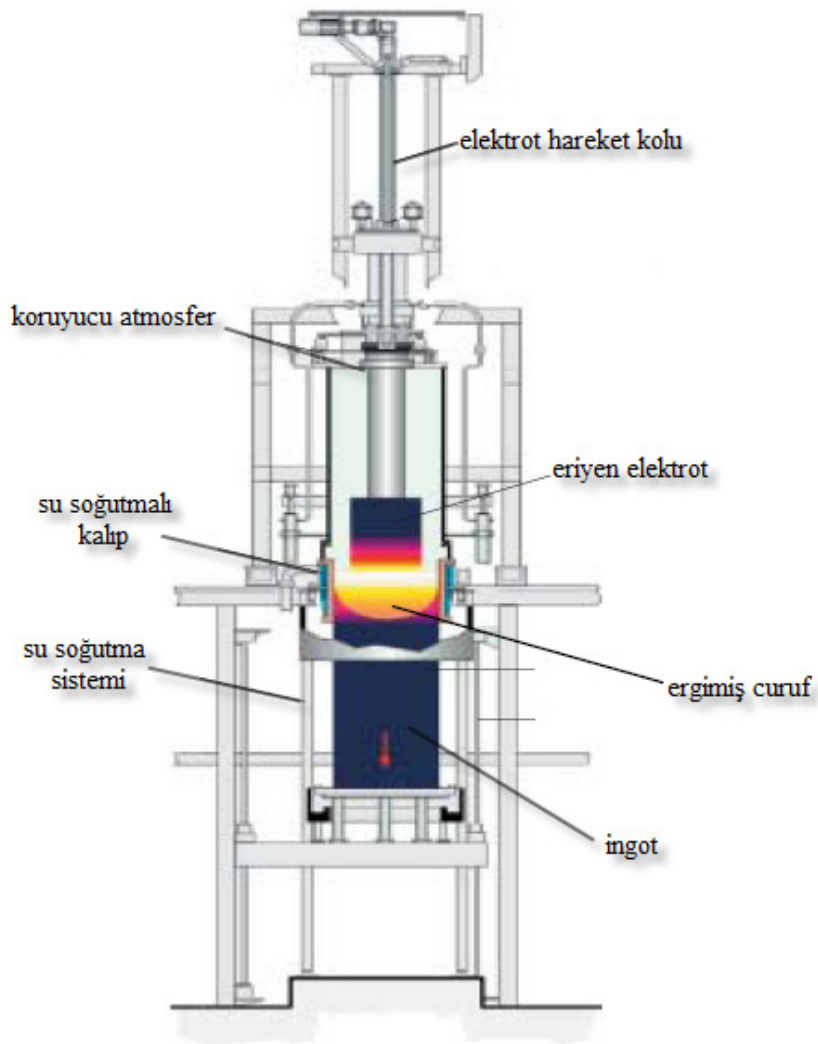
### 3.1. Geleneksel Takım Çeliği Üretimi

Elektrik ark fırınlarında yapılan ergitme işlemi takım çeliklerinin üretimindeki ilk işlemdir. Önceleri elektrik ark fırınında yapılan ergitme işlemi sonrasında doğrudan döküm işlemi gerçekleştirilirken, günümüzde yüksek safiyete sahip çeliklerin üretilebilmesi için araya bazı prosesler eklenmiştir. EAF'da gerçekleştirilen ergitme işleminin ardından eriyik daha sonraki rafinasyon işlemleri için argon oksijen dekarbürizasyon(AOD) yada vakum oksijen dekarbürizasyon(VOD) fırınına alınır. Bu fırınlarda eriyiğin içine tüyerlerden uygun oranda azot ve oksijen karışımı üflenerek çelik içindeki H, P, S, C, gibi elementlerin miktarları istenen seviyeye indirilir.

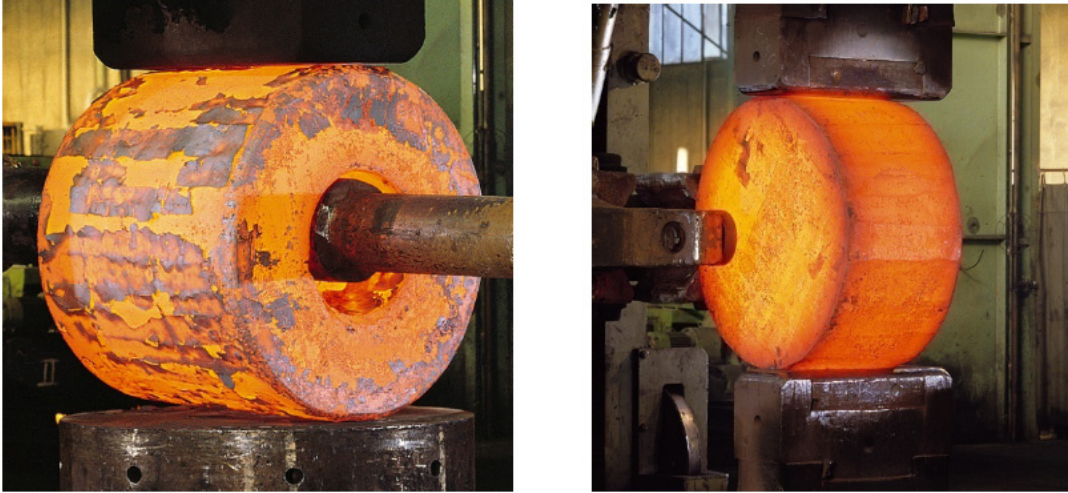
Alaşımlandırma işlemi yine AOD/VOD fırınında gerçekleştirilir ve W, Si, Mo, V, Mn gibi alaşım elemanlarının ferro alaşımları eklenerek istenen kimyasal kompozisyon elde edilir. İstenen kimyasal bileşim elde edildikten sonra eriyik pota döküm istasyonuna alınır. Buraya kadar olan kısım konvansiyonel yöntemle üretilen çeliklerde kullanılan standart işlemdir. Potadaki eriyiğe döküm işleminden önce mikroporozite ve süreksizlikleri bertaraf etme amaçlı vakum gaz giderme (vacuum degasing) işlemi uygulanır. Bu işlem ile eriyik üzerindeki atmosfer basıncı ortadan kaldırılır ve eriyik içinde hacimce büyüyen gaz boşluklarının pota yüzeyine çıkması sağlanır. Böylece takım çeliklerinin mekanik özelliklerini son derece olumsuz etkileyen mikroporozite ve süreksizlik gibi olumsuzluklar minimum seviyeye indirgenmiş olur. Pota metalürjisi işlemleri sona erdikten sonra eriyik haldeki takım çeliği elde edilmek istenen yarımamüle bağlı olarak ya sürekli dökümle ya da yeni bir yöntem olan dipten dökümle ingot olarak dökülür. Dipten döküm yönteminin soğuk iş takım çeliğinin özelliklerine bir çok olumlu etkisi vardır. Bu yöntem ile normal dökümün neden olduğu türbülans sonucunda oluşan döküm boşlukları minimum seviyede meydana gelir. İlave olarak döküm öncesinde potanın üzerinde toplanan curufun ingot içine kontrolsüz karışması engellenerek metal dışı inklüzyon miktarını kayda değer oranda azaltır [14].

Pota metalürjisi sonucu dökülen ingot katılaştıktan sonra curuf altı yeniden ergitme (ESR) olarak adlandırılan rafinasyon işlemine tabi tutulur (Bkz. Şekil 3.2). ESR işleminde daha önceden elde edilen katılaşmış ingot, su soğutmalı kalıba sahip fırında kontrollü atmosfer altın da tekrar ergitilir. Ergitme, saf harcanabilir elektrotta uygulanan elektrik akımının curufun elektrik akımına karşı gösterdiği direnç kaynaklı ısı açığa çıkmasıyla kısmi olarak başlar ve curuf sıcaklığı çeliğin sıvılaşma sıcaklığının üzerine çıktığında elektrodun ucu erir. Burdan sonra curuf ve ergimiş ingot arasındaki tepkimeler, metalik olmayan inklüzyonların ve istenmeyen elementlerin önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlar [14]. Katılaşma esnasında da ingot aşağıdan yukarıya doğru yönsel olarak katılaştırılır akabinde termomekanik dövme işlemi(üst ve yan) uygulanarak çelikte izotropik özellikler ve ince tane dağılımı elde edilir (Bkz. Şekil 3.3).

ESR işleminin takım çeliğinin özelliklerine iki önemli etkisi söz konusudur. Birincil olarak ESR işlemleri ile potansiyel metalurjisi ile giderilemeyen metalik olmayan inklüzyonlar ve istenmeyen elementlerin (P, S) seviyesi daha da aşağılara çekilerek çeliğin tokluk ve yorulma direnci artırılır. ESR işleminin diğer önemli avantajı ise normal ingot katılaşmasından farklı olarak ingotun aşağıdan yukarıya doğru yönel olarak katılaşması alaşım elemanı segregasyonu ve tane irileşmesi minimum seviyeye çekilir [14,15].



Şekil 3.2. Curuf altı yeniden ergitme(ESR) işleminin şematik gösterimi [14]

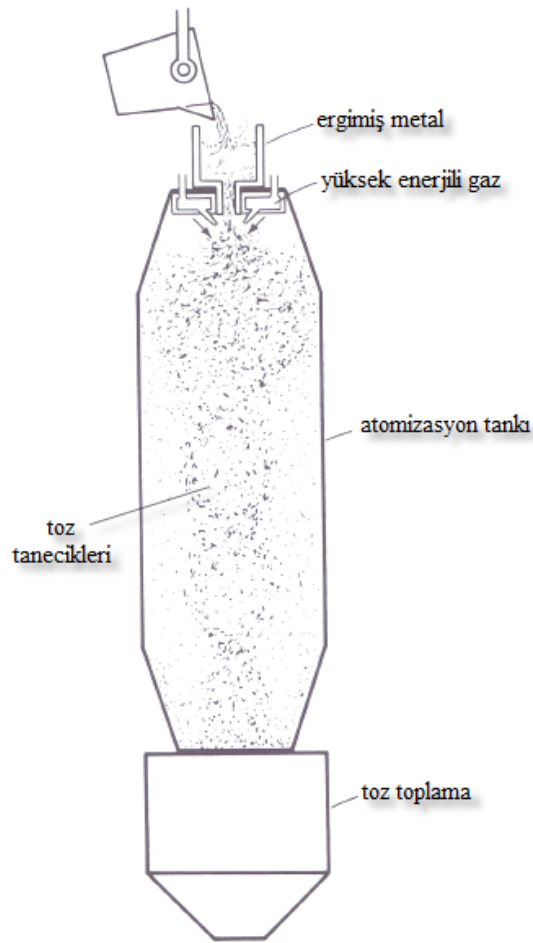


Şekil 3.3. ESR işlemi sonrasında uygulanan termomekanik dövme işlemi [17]

### 3.2. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Takım Çeliği Üretimi

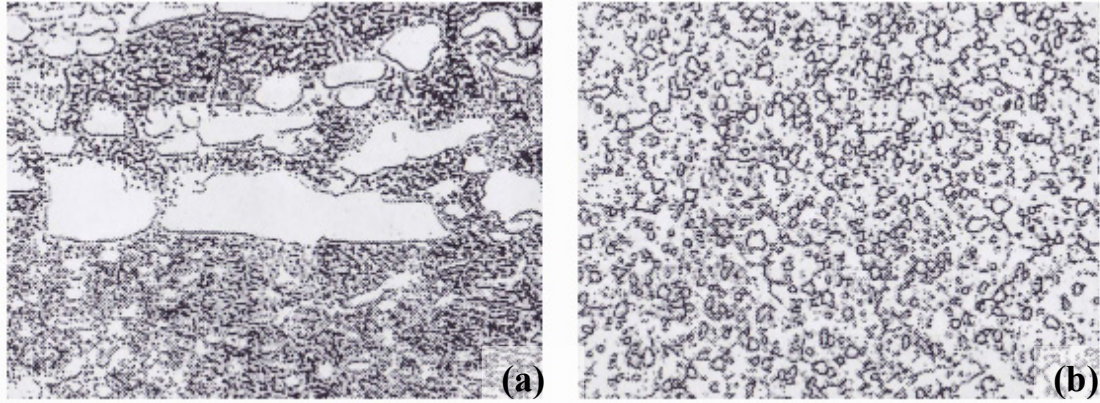
Potada konvansiyonel yöntemle üretilmiş eriyik haldeki takım çeliği alaşımı, alt tarafında bulunan küçük bir delik yardımıyla aşağı sızdırılarak nozülünden argon/azot gazı püskürtülme sureti ile küçük damlacıklara parçalanır, atomizasyon, ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeylerle temasa geçmeden hızlıca soğutulur(Şekil 3.4). Böylece hemen hemen aynı kimyasal bileşime sahip toz taneciklerinin elde edilmesi sağlanır ve ayrıca ergimiş alaşımı yüksek enerjili gaz çarpmasına maruz bırakarak geleneksel ingot dökümlerinde kaçınılmaz olarak karşımıza çıkan alaşım elementlerinin birikimi engellenmiş olur. Nozülün tasarımı ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi parametreler değiştirilerek toz boyutu dağılımı kontrol edilebilir [15].

Atomizasyondan sonra tozlar atomizasyon tankının altındaki haznede biriktirilir ve daha sonra buradan vakum sistemine sahip kutuya alınır. Daha sonra, kutu içinde atmosferden izole edilmiş tozlar belirli sıcaklık ve basınç altında sıcak preslenirler(hot isostatic pressing-HIP). Sıcak presleme ile iç yapının irileşmesine imkan verilmeden, gözeneklerden arınmış ingot halini alırlar. Daha sonra elde edilen ingot istenilen boyutlara indirilmek üzere sıcak deforme edilebilir [15].



Şekil 3.4. Toz metalurjisindeki atomizasyon ünitesi [5]

Toz metalurjisiyle üretilen soğuk iş takım çelikleri, üstün homojen mikroyapıları ve ince karbür dağılımları sayesinde ısıtma sırasında daha az çarpılma ve sonrasında da daha kolay işlenebilirlik gösterirler. Toz metalurjisiyle ve geleneksel takım çeliği(ESR) yöntemiyle üretilmiş soğuk iş takım çeliklerinin mikroyapıları arasındaki fark Şekil 3.5a-b' de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Vanadis 4 Extra® soğuk iş takım çeliğinin (a) geleneksel yöntemle ve (b) toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş mikroyapıları (x1000) [15]

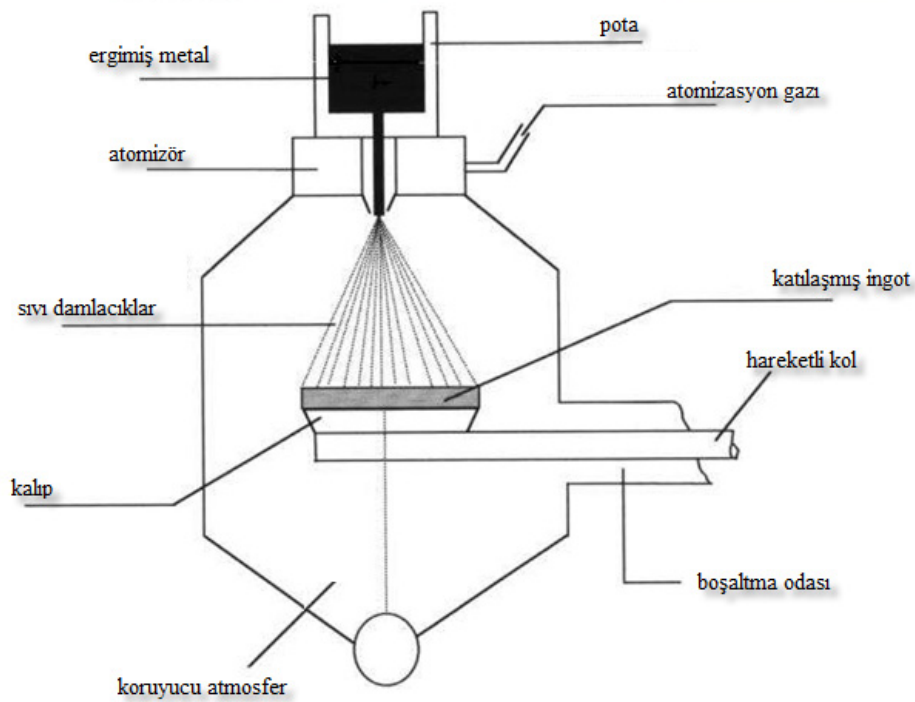
### 3.3. Osprey Yöntemi ile Takım Çeliği Üretimi

Koruyucu atmosfer altında hızlı katılaşma yoluyla direk olarak eriyikten, alaşım veya kompozit malzemelerin üretildiği prosese osprey yöntemi(püskürtme biriktirme yöntemi) denir. Bu yöntemde, ergimiş metalin atomizasyonu ile üretilen aşırı soğumuş sıvı damlacıkların bir kolektör(toplayıcı) üzerinde toplanması sağlanır. Kolektör üzerinde ki damlacıkların katılaşması sonucu üretilen nihai ürün, daha sonra istenirse dövme veya haddeleme ile de şekillendirilebilir [16].

Takım çeliği üretiminde de konvansiyonel yöntemle üretilmiş eriyik haldeki takım çeliği alaşımı argon/azot gazı atomizasyonu ile aşırı soğumuş sıvı damlacıkları halinde parçalanarak hareket ettirilebilen su soğutmalı bakır kalıp üzerine biriktirilirler. Burada üst üste biriken aşırı soğumuş sıvı damlacıklar alttan ısı kaybı nedeni ile birikir birikmez neredeyse porozitesiz olarak katılaşırlar. Daha sonra elde edilen ingot istenilen boyutlara indirilmek üzere sıcak deforme edilebilir. Bu sürekli proses mikroişlemcilerle sahip kontrol sistemi tarafından sürekli olarak izlenerek kontrol altında tutulmaktadır [16] (Bkz. Şekil 3.6).



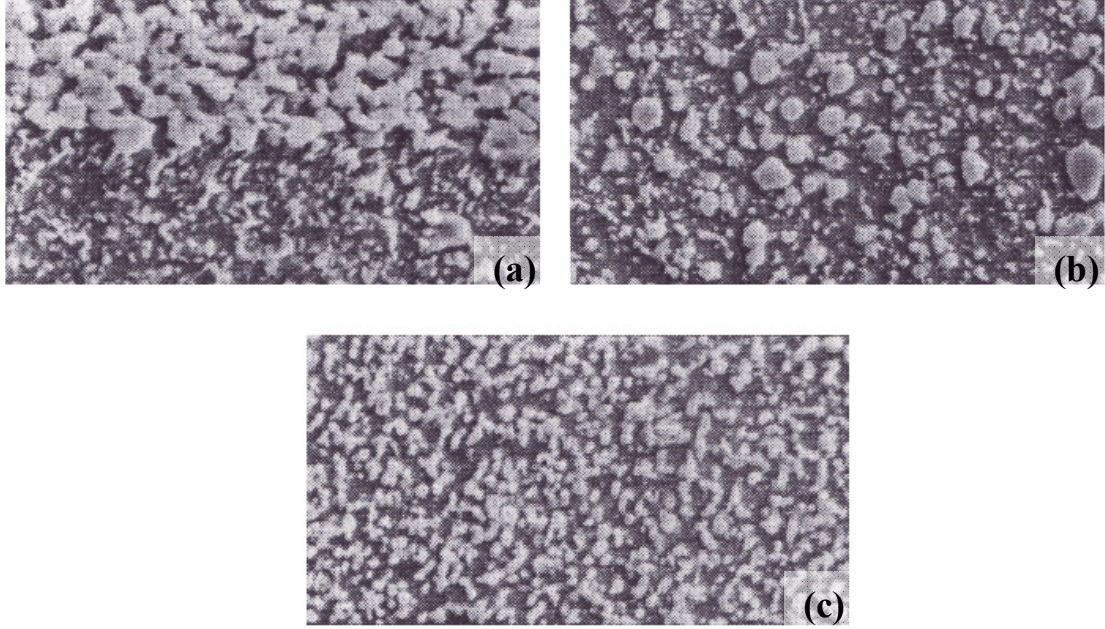
Takım çeliği üretiminde osprey yönteminin en önemli iki avantajı vardır. Bunlardan ilki, tek bir adımla eriyik haldeki takım çeliği alaşımından direk olarak net şekillendirilmiş ingot elde etmek mümkündür. İkinci önemli avantajı ise osprey yöntemi ile ince taneli, alaşım elementlerinin segregasyonundan arındırılmış ve düşük poroziteli bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Böylece daha ekonomik ve üstün mekanik özelliklere sahip bir takım çeliği üretimi daha az süreçle mümkün olmaktadır [16].



Şekil 3.6. Osprey yönteminin şematik gösterimi [18]

İngiltere’de Spray Forming Development Ltd. ve Danimarka da ki Dansteel Dan Spray firmaları endüstriyel olarak ticari ölçekte osprey yöntemi ile takım çeliği üreten öncü firmalardır.

Şekil 3.7a-b-c' de üç farklı yöntemle üretilmiş yüksek hız takım çeliğinin mikroyapıları gösterilmiştir [16].



Şekil 3.7. Yüksek hız takım çeliğinin (a) geleneksel yöntemle, (b) toz metalurjisi yöntemiyle, (c) osprey yöntemiyle üretilmiş mikroyapıları (x2000) [16]

## **BÖLÜM 4. TAKIM ÇELİKLERİNİN ISIL İŞLEMİ**

Katılaştırılma sonrasında takım çelikleri üzerine bir takım ısıl işlemler uygulanarak mekanik özellikleri geliştirilir. Takım çeliklerinde beklenen performansı sadece kaliteli çelik kullanarak elde etmek mümkün değildir. Çelik kalitesi kadar ısıl işlemin ve ısıl işlem sonrasında elde edilen mikroyapıların takım çeliğinin mekanik özelliklere etkisi son derece büyüktür. Aşınma direnci, tokluk ve yorulma direnci gibi mekanik özellikleri ostenitleme, soğutma ve temperleme işlemleri ile olumlu yada olumsuz olarak değiştirmek mümkündür [19].

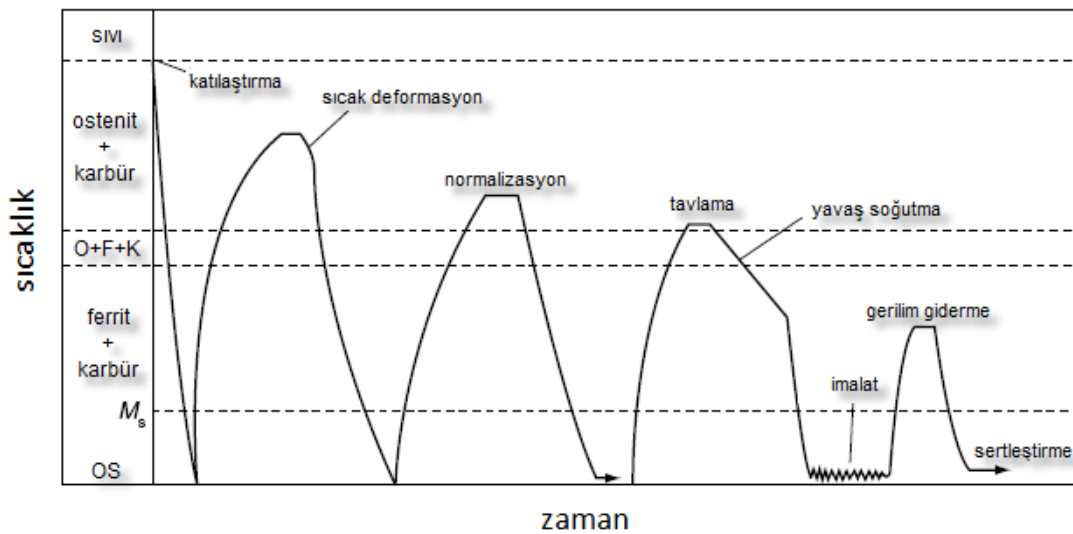
Birçok endüstriyel uygulamada ısıl işlem sonrasında elde edilen mekanik özelliklerin belirlenmesinde kontrol edilen tek parametre takım sertliği ile sınırlı kalmaktadır ancak günümüz yüksek performanslı takımlarında sadece sertlik ölçümü yeterli gelmemektedir. Aynı sertlik değerini birbirinden çok farklı mikroyapılarla ve ısıl işlem parametreleriyle elde etmek mümkündür.

Soğuk iş takım çelikleri diğer takım çelikleri ile kıyaslandığında en zor ortamlarda çalışan takım çeliği grubu olup yanlış uygulanan ısıl işlem takım performansına son derece olumsuz etkide bulunarak kısa sürede hasarlara neden olur. Servis sırasında maruz kaldıkları aşınma, darbe, yorulma ve yüklemeler soğuk iş takım çeliklerinin ısıl işleminde aynı anda elde edilmesi zor olan birçok özelliğin kazandırılmasını gerekli kılar. Örnek olarak otomotiv endüstrisinde form verme kalıbı olarak kullanılacak bir soğuk iş takım çeliğinin hem maksimum aşınma direncine sahip olması hem de maksimum darbe direnci göstermesi istemesi birbiri ile çelişen parametrelerdir. Böyle bir uygulamada yüksek tokluk için sertliğin düşük olması, aşınma direnci için ise tam tersine sertliğin yüksek olması gerekir ve dolayısı ile burada ısıl işlemcinin bilgi ve tecrübesinin yanı sıra kullanılan ısıl işlem basamakları da ön plana çıkmaktadır [11,19].

Bu bölümde takım çeliklerine uygulanan ısı işlem basamakları incelenmiş ve özellikle sıfırlı ısı işlemin aşınma ve kalıntı ostenite etkileri üzerinde durulmuştur.

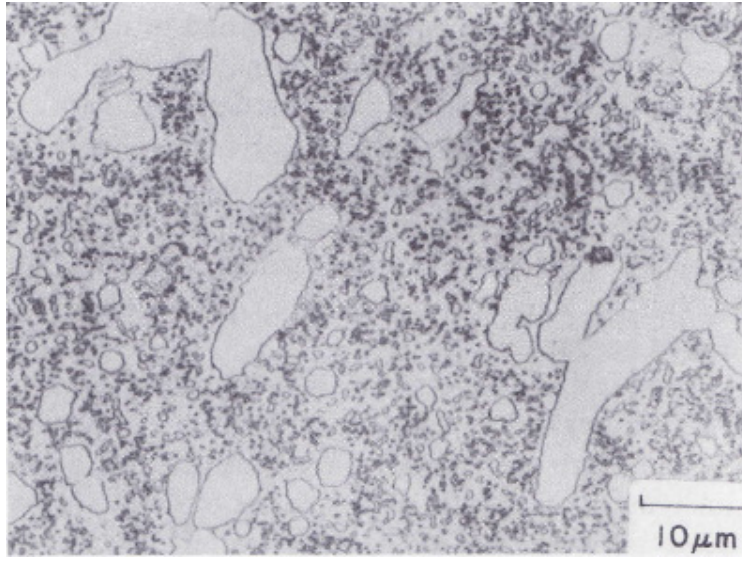
#### 4.1. Sertleştirme İşleminde Önce Uygulanan Isıl İşlemler

Takım çeliklerine sertleştirilme işleminden önce uygulanan işlem kademelerine bakacak olursak(Şekil 4.1); bir önceki bölümde de bahsedilen takım çeliği üretim yöntemlerinden biriyle üretilerek katılaştırılan ingot akabinde istenilen boyut ve şekillere, ostenitleme sıcaklığından çok daha yüksek sıcaklıklarda, sıcak dövme veya sıcak haddeleme uygulanarak getirilir. Oda sıcaklığına soğutulan takım çeliği sıcak deformasyondan sonra ostenitleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta normalizasyon tavlaması uygulanarak yüksek sıcaklıktan dolayı kabalaşan tanelerin inceltilmesi sağlanır. Fakat yüksek alaşımlı takım çeliklerine normalizasyon tavlaması uygulanmaz bunun nedeni havada soğutma yani hızlı soğutma ile yapı yüksek sertlik ve karbür ağını bir arada bulunduracağından hasar mekanizmasının oluşması kaçınılmazdır. Normalizasyon sıcaklığından oda sıcaklığına kadar havada soğutulan takım çeliğine akabinde tavlama işlemi uygulanarak mümkün mertebede yapının eşeksenli tanelere ve küresel karbür formlarına sahip olması sağlanır [5,19]. Böylece takım çeliği mümkün olduğu kadar yumuşatılarak talaşlı imalat işlemine hazırlanmış olur.



Şekil 4.1. Takım çeliklerine sertleştirilme işleminden önce uygulanan ısı işlem kademeleri [5]

Şekil 4.2' de tavlama ısıl işlemi sonrası D2 soğuk iş takım çeliğine ait mikroyapı gösterilmiştir. Tavlama ısıl işlemi sonrası tavlama sıcaklığından oda sıcaklığına kadar ortalama 20°C/saat soğutma hızıyla fırında soğutulan takım çeliği daha sonra talaşlı imalat yöntemleri(tornalama, frezeleme, planyalama, vargelleme, taşlama, honlama vb.) kullanılmak suretiyle kesme bıçağı, basınçlı döküm kalıbı, form verme kalıbı, eğme kalıbı vb. gibi kullanım amacına göre nihai şeklini alır [5,19].



Şekil 4.2. Tavlama ısıl işlemi sonrası D2 soğuk iş takım çeliğine ait optik mikroskop görüntüsü [20]

Kullanım amacına göre şekillenen takım çeliğine sertleştirme öncesinde gerilim giderme ısıl işlemi uygulanır burada amaç daha sonraki sertleştirme ısıl işlem kademeleri sırasında meydana gelebilecek çarpılmayı azaltmaktır[19,20]. Sertleştirme işlemi sırasında meydana gelen şekil değişikliği sadece termal ve faz dönüşümü gerilimlerine bağlı değildir. Örneğin sertleştirme ısıl işlemi öncesinde soğuk iş takım çelikleri, talaşlı imalat ile bünyelerinde oluşan son derece büyük gerilimler barındırırlar. Talaşlı imalat sonrası gerilim giderme işlemi yapılmadan sertleştirme işlemi yapıldığında ise çeliğin ferritik fazda barındırdığı bu gerilimler ostenitik faza geçişle beraber yumuşayan malzemenin şekil değiştirmesine neden olur [20].

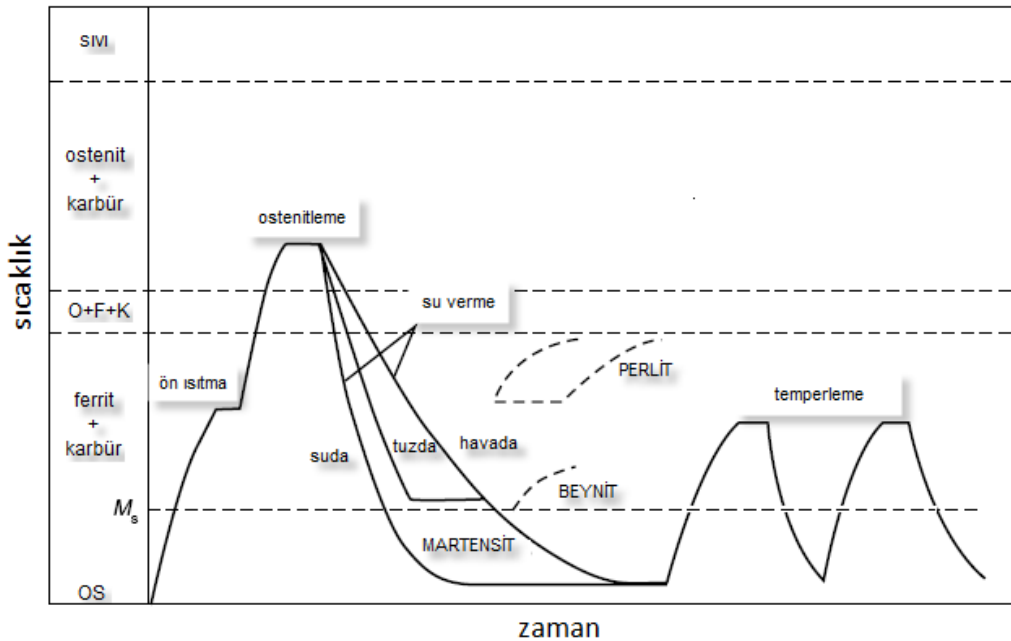
Gerilim giderme ısıl işlemi, 550-650°C sıcaklıkları arasında en az 2 saat yada inç başına 1 saat beklemek suretiyle gerçekleştirilir ve parçanın fırın içinde soğutulmasından sonrada yeniden sertleştirme öncesi paylı ölçülerine işlenerek sertleştirme işlemine geçilebilir[5].

#### 4.2. Sertleştirme Isıl İşlemi

Takım çeliklerinin sahip oldukları kimyasal kompozisyon her ne kadar sabit bir değer olarak görünse de uygulanan ısıl işlem prosedürüne bağlı olarak matris kompozisyonu değişim gösterir.

Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde aşağıdaki ısıl işlem basamakları izlenmektedir [5,19-22] (Şekil 4.3).

- 1-ön ısıtma
- 2-ostenitleme
- 3-su verme
- 4-sıfırlama işlemi(opsiyonel)
- 5-temperleme



Şekil 4.3. Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde uygulanan konvansiyonel ısıl işlem basamakları [5]

### 4.2.1. Ön ısıtma

Ön ısıtma işlemi, takım çeliklerinde ulaşılması gereken nihai sıcaklık olan ostenitleme sıcaklığına çıkışı mümkün olduğunca az termal gerilme oluşturarak gerçekleştirmek için uygulanan ısıtma basamaklandırmasıdır. Parça ebatlarına göre bir, iki veya üç ön ısıtma kademesi uygulanabilmektedir [5,19-21].

Örneğin büyük ebatlı bir kalıbı direk olarak ostenitleme sıcaklığına çıkardığımızı düşünürsek çekirdek ile yüzey arasında oldukça fazla sıcaklık farkı meydana gelecektir. Bu sıcaklık farkı malzemenin hızlı ısınan bölgelerindeki spesifik hacmin artışına iç kesimlerde ise daha küçük spesifik hacme neden olacak ve bu nedenle malzeme içinde büyük miktarda kalıcı iç gerilmelere yol açacaktır. Bu termal gerilmeler kalıpta ısıtma işlemi sonrasında distorsiyonu artıracak gibi kalıbın tokluğunu da olumsuz etkileyecektir.

### 4.1.3. Ostenitleme

Ostenitleme işlemi çözme tavlama olup takım çeliklerinin aşınma dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen işlemlerden biri olup son derece önem arz eden bir basamaktır.

Ostenitleme işlemi takım çeliklerinde önceki ön ısıtma basamaklarının ardından uygulanır ve işlem süresince tüm kesit boyunca ferrit ostenit ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) dönüşümünün yanı sıra yeterli karbür çözünmesinin sağlanması gerekmektedir [5,21].

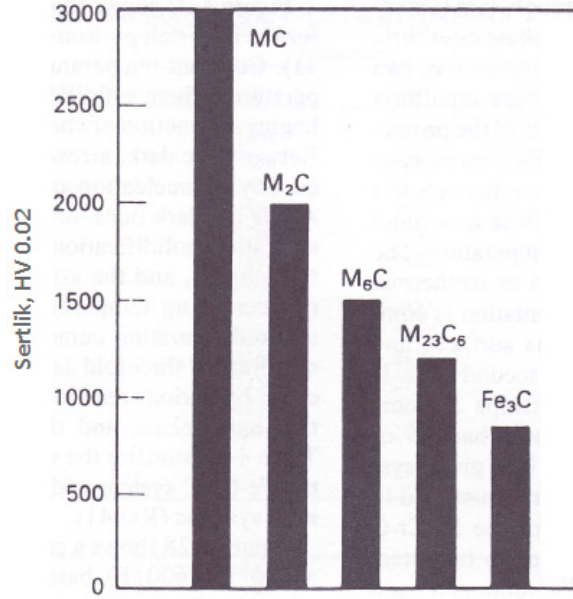
Takım çeliklerindeki alaşım elementlerinin oluşturdukları karbürler Tablo 4.2' de ve bu karbürlerin sertlikleri de Şekil 4.4' de ki grafikte gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Takım çeliklerindeki karbürlerin sınıflandırılması ve özellikleri [5]

Karbür Tipi	Latis Tipi	Özel Adı	Örnekler	Açıklamalar
$M_3C$	Orthorombik	$\epsilon$ -karbür	$(Fe,Mn,Cr)_3C$	Sementit tipi karbüdür.
$M_7C_3$	Hekzagonal	$\lambda$ -karbür	$(Cr,Fe,Mo,W)_7C_3$	Genellikle Cr alaşımlı takım çeliklerinde bulunur. Yüksek sıcaklıklarda çözülmeye ve abrazif aşınmaya karşı dirençleri yüksektir.
$M_{23}C_6$	YMK	$\gamma$ -karbür	$(Cr,Fe,Mo,W)_{23}C_6$	Tüm yüksek Cr'lu takım çelikleri ve yüksek hız takım çeliklerinde bulunur.
$M_6C$	YMK	$\eta$ -karbür	$(W,Mo,Cr,V,Co)_6C$	W veya Mo zengin karbürlerdir. Tüm yüksek hız takım çeliklerinde bulunur. Aşınma dirençleri yüksektir.
$M_2C$	Hekzagonal		$W_2C;Mo_2C$	W ve Mo zengin karbürlerdir. Temperleme sonrası oluşur.
MC	YMK		$VC;NbC;ZrC;TiC$	Çözülmeye karşı dirençlidirler. Küçük boyutları ile ikincil sertleşmeye neden olurlar.

Not: Karbür oluşturan alaşım elementlerinin sıralaması karbon(C) afinitesine göre yapılmıştır.





Şekil 4.4. Takım çeliklerinde bulunan karbürlerin sertlikleri [5]

Soğuk iş takım çeliklerinin karakteristik alaşım elemanları ferriti kararlı kılan Cr, Mo, W ve V olup, soğuk iş takım çeliğinin türüne göre (yani kimyasal bileşimlerine göre) bu alaşım elementleri tavllanmış durumda ferritik takım çeliği matrisinde M<sub>3</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>6</sub>C ve MC formunda kararlı küresel birincil karbürler olarak bulunurlar. Ostenitleme işlemi sırasında  $\alpha \rightarrow \gamma$  dönüşümünün tamamlanmasını takiben birincil karbürler sahip oldukları karbonu serbest bırakarak çözünmeye başlar ve karbonla birlikte diğer alaşım elementleri de çelik matrisine elementel olarak geçerler. İlk karbür çözünmesi daha az stabil olan M<sub>3</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ve M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> tipi karbürlerin çözünmesiyle başlar ardından daha stabil olan M<sub>6</sub>C ve MC tipi karbürlerin çözünmesini takip ederek gerçekleşir [23].

Karbür çözünmesi endotermik bir reaksiyon olduğundan artan ostenitleme sıcaklığı ile daha fazla oranda alaşım karbürü çözündürmek mümkün olur fakat buna bağlı olarak takım çeliğinin sahip olduğu matrisin kimyasal kompozisyonu da değişir. Artan ostenitleme sıcaklığı ile takım çeliği matrisinde daha fazla oranda karbon ve diğer alaşım elementleri bulunması çeliğin sahip olduğu Ms sıcaklığını düşürerek suverme sonrasında martensite dönüşmeden kalmış ostenit miktarını artırır. Ancak burada artan ostenitleme sıcaklığı ile artacak olan kalıntı ostenit problemi elimine edilebilirse; artan ostenitleme sıcaklığı ile matrise daha fazla oranda geçecek karbon ve diğer alaşım elementleri, menevişleme esnasında daha yüksek oranda ikincil

karbür çökmesine yol açacağından takım çeliğinin başta sertlik ve aşınma direnci olmak üzere mekanik özellikleri pozitif yönde etkiler. Ayrıca artan ostenitleme sıcaklığının diğer bir dezavantajı da artan yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen tane kabalaşmasıdır. Buda beraberinde takım çeliğinin tokluğunun düşmesine neden olur. Yalnız MC tipi yani VC, NbC gibi karbürler içeren takım çeliklerinde tane büyümesinin sınırlandırılması, yüksek ostenitleme sıcaklıklarında bile homojen dağılmış bu karbür tipinin çözünmeden kalmasıyla sağlanmaktadır [23].

Ostenitleme sıcaklığında tutma süresi, matris içine alınması istenen karbür miktarına bağlıdır. Alaşım elementi miktarı yani karbür miktarı çeşitli takım çelikleri için farklı olacağından tutma süresi de takım çeliği tipine bağlı olarak değişmektedir. D tipi soğuk iş takım çeliklerinde optimum tutma süresi kesit kalınlığının her bir mm için 0,5-0,8 dakikadır. Eğer ostenitleme sıcaklığında tutma süresi optimum belirlenen süreden daha kısa olursa yetersiz miktarda karbür çözünmesi olacağından düşük sertlik, çok uzun tutma süresi de fazla miktarda kalıntı ostenitin mevcudiyetine ve buna bağlı olarak düşük sertliğe neden olur [23].

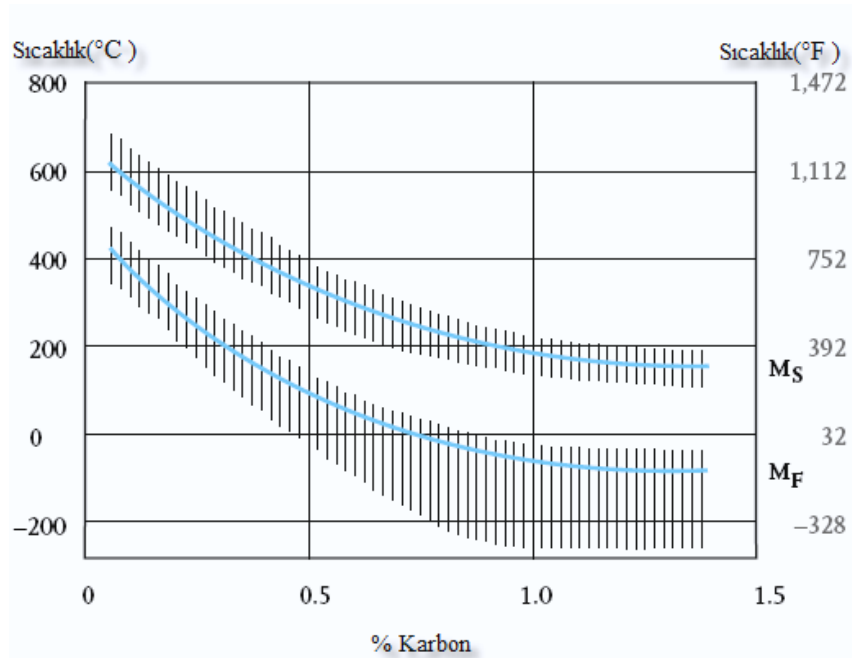
#### 4.2.3. Suverme(soğutma)

Ostenitleme işleminin ardından gerçekleştirilen suverme işlemi (quenching), çelikte sertleştirme sonrası elde edilmesi istenen martenzitik yapının oluşmasını sağlar. Martensit yapısı, sabit bir sıcaklık yerine  $M_s$  ve  $M_f$  (martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları) olarak tanımlanan bir sıcaklık aralığında oluştuğu için, çeliğin soğutulmasıyla daha çok ostenitin martensite dönüşümünün sağlanması mümkündür. Martensit dönüşümü, martensit bitiş sıcaklığına ( $M_f$ ) erişilene kadar devam eder. Suverme esnasında ostenitten martensit oluşmaya başlama sıcaklığı ( $M_s$ ) çeliğin kimyasal kompozisyonunun bir fonksiyonudur.  $M_s$  sıcaklığı çeşitli ampirik bağıntılardan elde edilmektedir. Yüksek alaşımlı çelikler için önerilen ve aşağıdaki bağıntı ile verilen Stuhlmann formülüdür [20,22].

$$M_s(^{\circ}C) = 550 - 350C - 40Mn - 20Cr - 10Mo - 17Ni - 8W - 35V - 10Cu - 15Co + 30Al$$

Burada element miktarları % ağırlık olarak verilmiştir. Bu ampirik bağıntıdan yola çıkılarak karbon oranına bağlı martensit başlama ve bitiş sıcaklıklarının ( $M_s$  ve  $M_f$ ) değişimi Şekil 4.5’ de ki grafikte gösterilmektedir. Grafikteki dikey çubuklar karbon dışındaki alaşım elementlerinin  $M_s$  ve  $M_f$  üzerindeki etkisini göstermektedir.

Örneğin Şekil 4.5 den yola çıkarak % 1,00 C içeren bir alaşımlı çeliğin  $M_f$  sıcaklığının  $0^\circ\text{C}$ ’nin altına düştüğü görülmektedir. Çoğu ısıl işlem tesisinin ortam sıcaklığının bu sıcaklıktan yüksek olduğu düşünülürse yüksek alaşımlı çeliklerde suverme ile ostenitin tamamının martensite dönüşmesinin imkansız olduğu kolaylıkla görülebilir. Çeliğin yapısında yumuşak olan kalıntı ostenit ile sert martensitin bir arada bulunması kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Çünkü yapıdaki kalıntı ostenit, çeliğin başta sertliği olmak üzere tüm mekanik özelliklerini negatif yönde etkiler. Bu nedenle kalıntı ostenitin martensite dönüşümü gereklidir. Bu dönüşüm, neredeyse kalıntı ostenitin tamamına yakının martensite dönüştüğü sıfırlı işlem ile veya daha düşük oranlarda martensit dönüşümünün sağlandığı menevişleme ile gerçekleştirilebilir [3].



Şekil 4.5. Yüksek alaşımlı çeliklerde karbon oranına bağlı olarak martensit başlama( $M_s$ ) ve bitiş sıcaklıkları( $M_f$ ) [3]

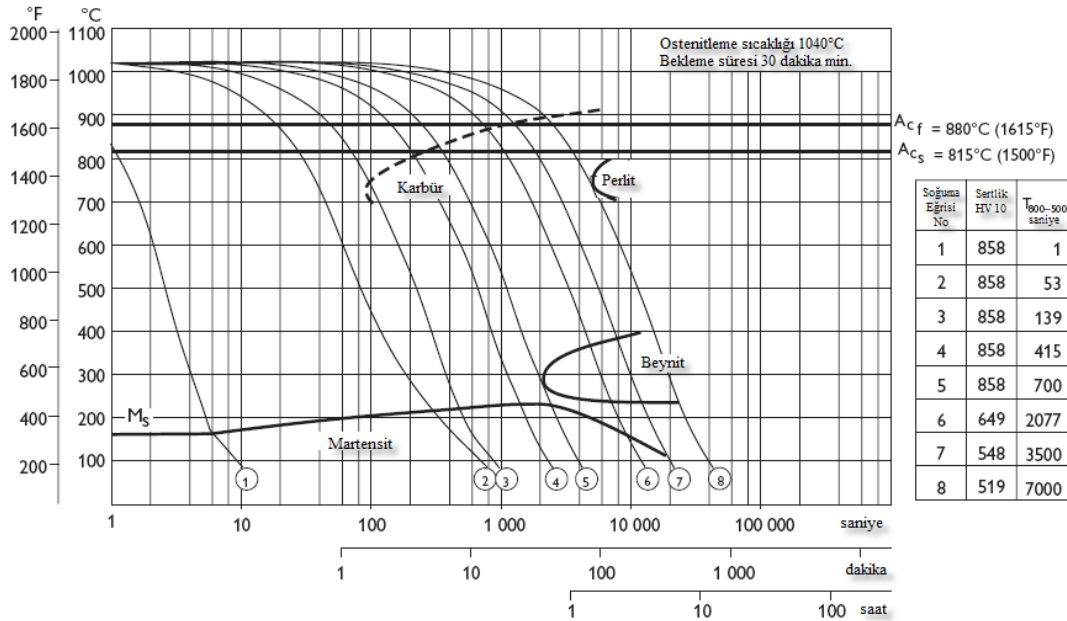
Soğuk iş takım çeliklerine uygulanan suverme işleminde dikkat edilmesi gereken iki önemli nokta mevcuttur. Birincisi soğutma hızının, kritik soğuma hızının üzerinde olup çelik bünyesinde difüzyona bağlı olarak gerçekleşen perlitik ve beynitik dönüşümlere izin vermeden martenzitik yapının elde edilmesidir. İkinci olarak ostenitleme işlemi sırasında çözülen karbürlerin, soğutma esnasında çeliğin bünyesindeki yüksek enerjili bölgelerde (tane sınırı, dislokasyon bölgeleri, kayma bantları gibi) ön-ötektoid karbürler (pro-eutectoid seconder carbide) halinde çökelmelerinin engellenmesidir. Çelik bünyesinde ki tane sınırları, en yüksek enerjili bölgeler olup ön-ötektoid karbür çökeltilerinin tercih bölgeleridirler [24].

Ostentileme sıcaklığında çelik matrisinde çözünmüş karbürlerin, soğutma işleminin başlamasıyla düşen sıcaklığa bağlı olarak matristeki çözünürlükleri azalır ve Şekil 4.6' da ki sürekli zaman sıcaklık dönüşüm diyagramında kesikli çizgiyle gösterilen çökelme bandında bekleme süresine bağlı olarak tane sınırlarında ön-ötektoid karbürler halinde çökeltirler. Soğutma sırasında tane sınırlarında oluşan ön-ötektoid karbür çökeltmesi soğuk iş takım çeliklerinin yorulma dayanımını ve tokluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Tane sınırı ön-ötektoid karbür çökeltmesinin sebep olduğu bir diğer olumsuzluk ise tane sınırlarına yakın bölgelerde azalan alaşım elemanı konsantrasyonuna bağlı olarak ostenitik fazın stabilliği azalmakta ve bu bölgelerde karbon difüzyona bağlı olarak beynitik yapının oluşmasına neden olmaktadır. Buda çeliğin sertliğini ve aşınma direncini olumsuz yönde etkilemektedir [24].

Dolayısı ile soğuk iş takım çelikleri ne kadar hızlı soğutulursa, en azından sürekli zaman sıcaklık dönüşüm diyagramındaki karbür çökelme hattını kesmeyecek bir soğutma hızında, soğutma yapılırsa elde edilen mikroyapı çeliğin performansını olumlu yönde etkileyecektir ancak unutulmamalıdır ki bununda beraberinde getirdiği iki dezavantaj vardır. İlki, endüstriyel uygulamalarda kullanılan ısı işlem fırınlarının sınırlı soğutma kapasiteleridir. İkinci dezavantaj, ön-ötektoid karbür çökeltmesinin engellenmesi ile (Bkz. Şekil 4.6 da ki 2 numaralı soğuma eğrisinin izlenmesi ile gerçekleşir) martensit içinde kalan alaşım elementleri temperleme sırasında ikincil sertleşme ile çeliğin sertliğini bir miktar yükseltse de metastabil ostenit içinde kalan bu alaşım elementleri devam eden soğuma koşullarında hala

yerlerini koruyor olmaları Ms sıcaklığının düşmesine sebep olacaktır. Ms sıcaklığının düşmeside beraberinde kalıntı ostenit miktarının artmasına neden olacak ve artan soğutma hızı nedeniyle yükselen kalıntı ostenitin neredeyse tamamına yakınının martensite dönüştürülmesi suverme sonrası uygulanacak harici bir soğutma işlemi olmadan mümkün değildir [23,24].

Sürekli Soğuma Diyagramı(SZSD)

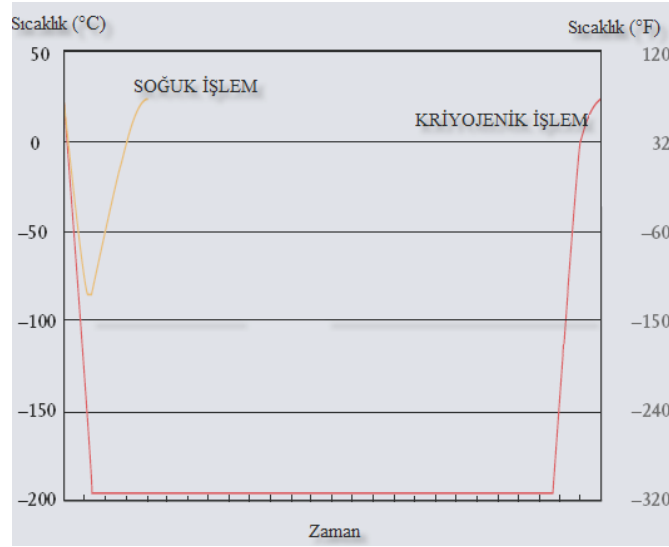


Şekil 4.6. Vanadis 4 Extra® sürekli soğuma diyagramı [25]

#### 4.2.4. Sıfırtılma ısıl işlemi

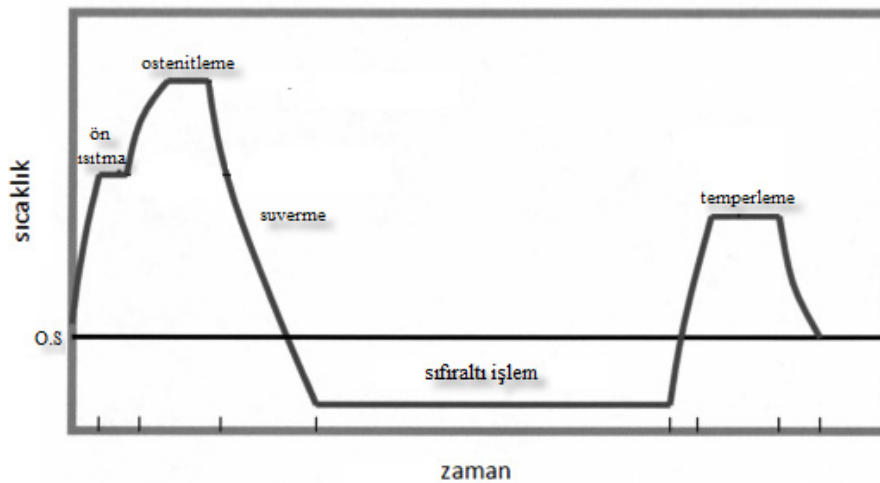
##### 4.2.4.1. Sıfırtılma ısıl işlemin genel prensipleri

Sıfırtılma ısıl işlemi malzemenin suverme sürecini takiben oda sıcaklığı ile  $-273^{\circ}\text{C}$  (0 K) sıcaklık aralığında soğutularak bu ortamda malzemenin tamamında yapısal değişim meydana gelecek kadar tutulması ve daha sonra bu ortamdan çıkarılarak oda sıcaklığına ısınmasına izin verilmesi kademelerini içerir (Bkz. Şekil 4.8). Sıfırtılma işlem kendi içinde işlemin uygulandığı sıcaklık aralığına göre ikiye ayrılır. Oda sıcaklığından  $-80^{\circ}\text{C}$  kadar olan sıcaklık aralığındaki işleme soğuk işlem,  $-80^{\circ}\text{C}$  den daha düşük sıcaklıklarda uygulanan işlemler de kriyojenik işlem olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.7 de sıfırtılma işlemin sıcaklık-zaman döngü grafiği gösterilmiştir [3].



Şekil 4.7. Sıfırlatma ısıl işleminin (azot ortamındaki) sıcaklık-zaman döngüsü [3]

Sıfırlatma işlem sıcaklığına 2.5 – 5 °C/dakika gibi bir soğutma hızıyla inilmelidir. Yüksek kesitli parçalarda da soğutma sırasında termal hasar oluşumunu engellemek için sıcaklığın belli bir ara değere düşürülerek orada parça sıcaklığının homojen olmasını beklemek ve soğutmaya bundan sonra devam etmek gerekmektedir. Akabinde malzemeden istenen özelliklerine göre belirlenen bekleme süresi ve işlem sıcaklığında sıfırlatma işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra sıfırlatma işlem sıcaklığından oda sıcaklığına ısıtma 1°C/dakika olmak üzere hava sirkülasyonu ile gerçekleştirilir ve akabinde malzemeye en az bir defa olmak şartıyla temperleme uygulanmalıdır [3]. Şekil 4.8 de opsiyonel olarak uygulanan sıfırlatma ısıl işleminin konvansiyonel ısıl işlem döngüsüne ilave olarak uygulandığı yer gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Sıfırlatma ısıl işlem basamağının sıcaklık-zaman diyagramındaki yeri [27]

#### 4.2.4.2. Sıfırtaltı ısıt işlemin mekanizmaları

Sıfırtaltı ısıt işlemin amacını anlayabilmek ve yorumlayabilmek için, öncelikle konvansiyonel ısıt işlem ile olan ilişkisinin iyi kurulması gerekir. Ostenitin martensite dönüşümünün süreden bağımsız olarak tamamen sıcaklığa bağı bir proses olduğundan bahsetmiştik işte bu noktadan yola çıkarak sıfırtaltı işlem ile parçalar suverme sürecini takiben Mf sıcaklığının altına kadar soğutulabilmektedir. Bu sayede kalıntı ostenitin neredeyse tamamı martensite dönüştürülebilmektedir [2]. Örneğin sıfırtaltı işlem uygulaması ile %0,83 C içeren bir alaşımlı çelikte kalıntı ostenit oranı % 42' den % 0,90' a kadar düşürülebilmektedir. Yapıdaki kalıntı ostenit yaklaşık bir saat içinde kararlı hale geçmeye başlayacağı ve buda dönüşümünü zorlaştıracacağı için suverme işleminin hemen akabinde sıfırtaltı işlem gerçekleştirilmelidir [2,20].

Sıfırtaltı işlem ile yapının tamamının martensite dönüştürülmesi sağlanırken, özellikle kriyojenik işlem uygulamalarında, buna ilaveten kalıntı ostenitin martensite dönüşümü esnasındaki hacim artışı nedeniyle martensit kafesinin deformasyonu da gerçekleşmektedir. Bu deformasyonla ilişkili olarak yapıda oluşan dislokasyonlar, sıfırtaltı işlem sonrası uygulanan temperleme ile çökecek nano boyuttaki ince karbürler için çekirdeklenme sahaları oluşturur. Aynı zamanda sıfırtaltı işlemin yapıda oluşturduğu bu hacimsel genişleme, karbür-matris arayüzeyinde basma kuvveti oluşturmaktadır. Sıfırtaltı işlem sonrası uygulanacak temperleme ile de oluşan bu arayüzeydeki basma kuvveti matris-karbür arasındaki delaminasyonu (tabaklanmayı) engellemekte buda sertlikten feragat etmeden tokluğu artırmakta ve karbürün aşınma esnasındaki matrise tutunmasını kolaylaştırmaktadır [26,27].

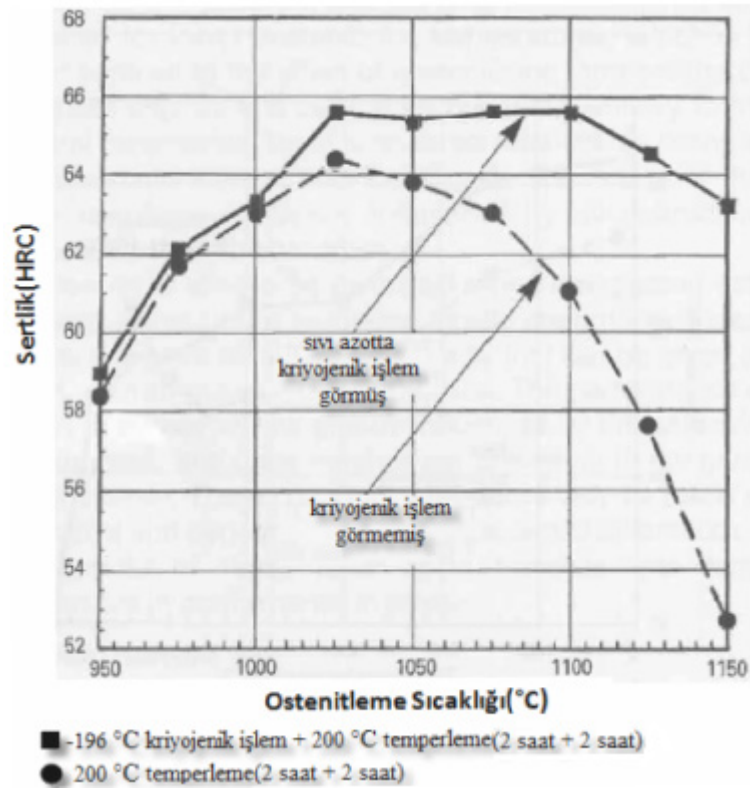
Sıfırtaltı işlem takım çeliklerinde, kalıntı osteniti gidermek için kullanılabilceği gibi özellikle kriyojenik soğutma ile takım çeliğinin aşınma direnci ve tokluğu arttırılabilmektedir [3,5,28].

Deneysel çalışmalar sıfırtaltı ısıt işlemin etkilerini ve altında yatan olayları göstermekle birlikte bu olayın, malzemelerin tüm mekanik özelliklerinde meydana getirdiği etkiyi ortaya çıkarmak için çok kapsamlı ve sistematik çalışmaların devam edeceği anlaşılmaktadır.

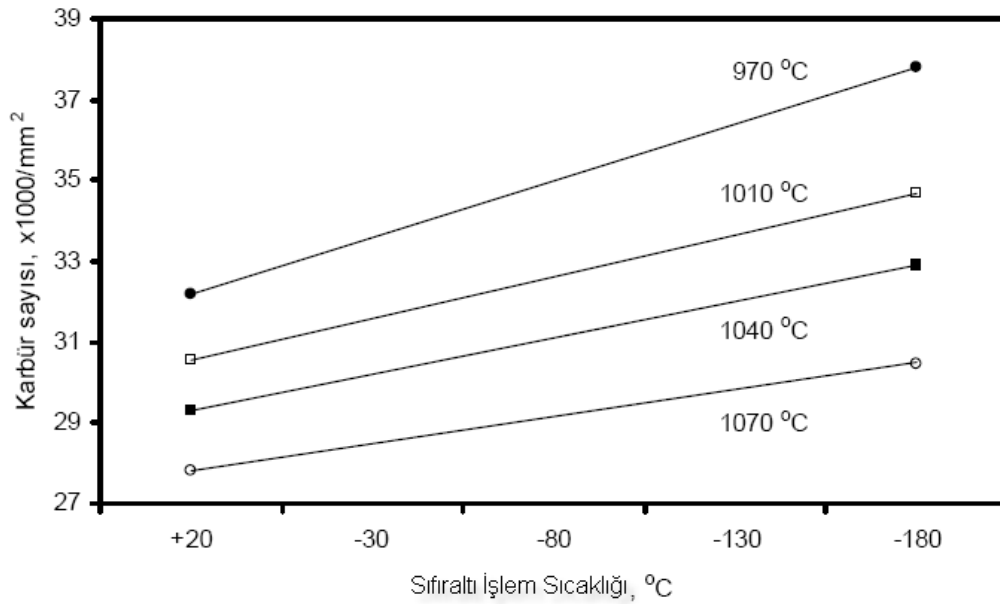
Collins ve Dormer sıfırlı işleminin takım çelikleri üzerine etkisini kapsamlı olarak araştırmışlar ve “kalıntı ostenitin martensite dönüşmesine bağlı olarak ortaya çıkan sertlik artışının yanı sıra sıfırlı ısıl işlemin başkaca etkileri de olduğunu; metalde kristallografik ve mikroyapısal değişimlere sebep olarak yeniden ısıtma ile birlikte temperlenmiş yapıda ince dağılmış karbürlerin çökmesi ve buna bağlı olarak da tokluk ve aşınma mukavemetinin birlikte yükselmesine neden olduğunu” belirtmişlerdir [29].

D2 soğuk iş takım çeliklerinde yapılan çalışmalara göre Şekil 4.8’ de  $-196^{\circ}\text{C}$  sıvı azot ortamında uygulanan kriyojenik işlemin farklı ostenitleme sıcaklıklarında ki sertliğe etkisi gösterilmiştir. Burada tüm farklı ostenitleme sıcaklıklarında kriyojenik işlem sonucu sertliğin arttığı gözlenmektedir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi sıfırlı işlem sıcaklığının düşmesiyle birlikte oluşan karbür sayısı doğrusal bir şekilde artmaktadır. Ancak çeliğin ostenitleme sıcaklığının artması, aynı sıfır altı işlem sıcaklığında elde edilen karbür sayısını azaltmaktadır. Şekil 4.10 da benzer şekilde sıfırlı işlem sıcaklığında tutma süresi arttıkça, karbür sayısı artmakta, ostenitleme sıcaklığının artmasıyla ise aynı sıfır altı işlem süresinde elde edilen karbür sayısı azalmaktadır. Diğer yandan, ostenitleme sıcaklığının artması ve belirli bir sıfırlı işlem sıcaklığında tutma süresi arttıkça, çeliğin sertliği artmaktadır. İşlem süresinin 24 saati aşmasıyla sertlik değeri daha da yükselmektedir (Bkz. Şekil 4.11). Sıfırlı işleminin aynı takım çeliği üzerinde aşınma direncine etkisi Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 de görüldüğü gibidir. Sıfırlı işlem sıcaklığının azalması, aşınma hızını önemli ölçüde düşürmektedir. Ancak ostenitleme sıcaklığının artması, azalan karbür miktarıyla orantılı olarak aşınma hızını arttırmakta ve aşınma direncinin düşmesine neden olmaktadır [3,29].

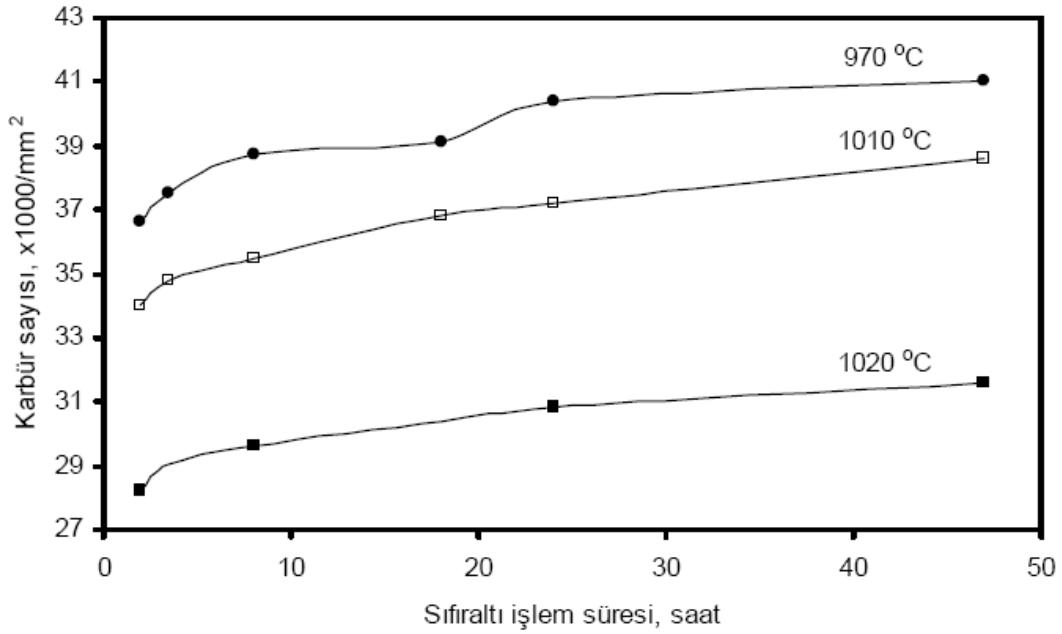




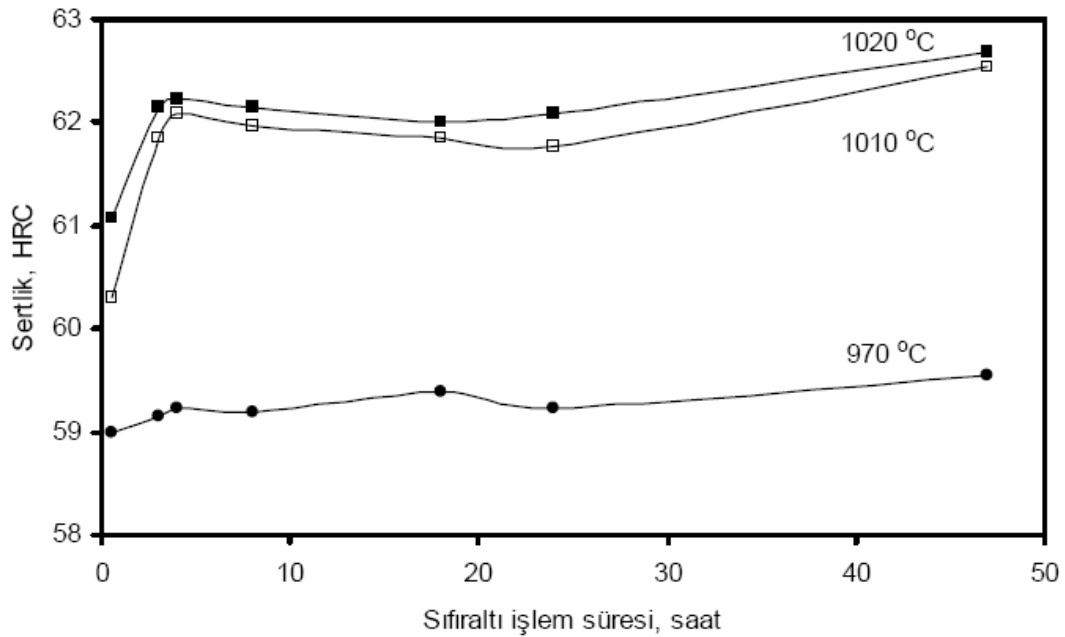
Şekil 4.9. -196°C sıvı azot ortamında uygulanan kriyojenik işlemin farklı ostentleme sıcaklıklarında sertliğe etkisi [29]



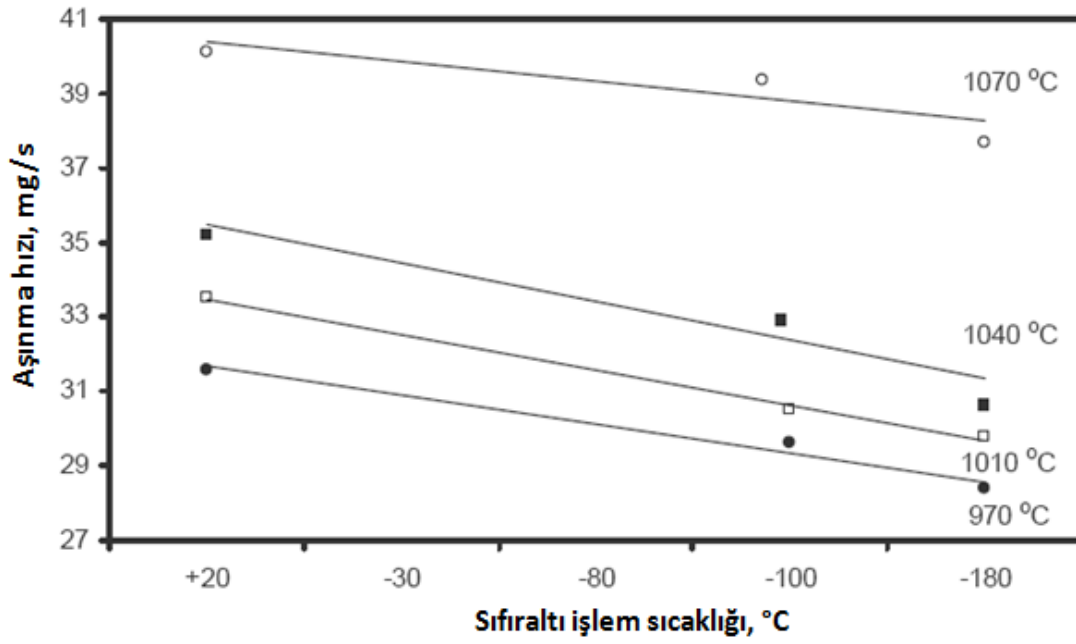
Şekil 4.10. Sıfırlı işlem sıcaklığının D2 soğuk iş takım çeliğinin karbür sayısına etkisi (Ostentleme sıcaklıkları 970, 1010, 1040 ve 1070°C; sıfırlı işlem sonrası çift temperleme 200°C de 2 saat + 2saat olarak uygulanmıştır) [29]



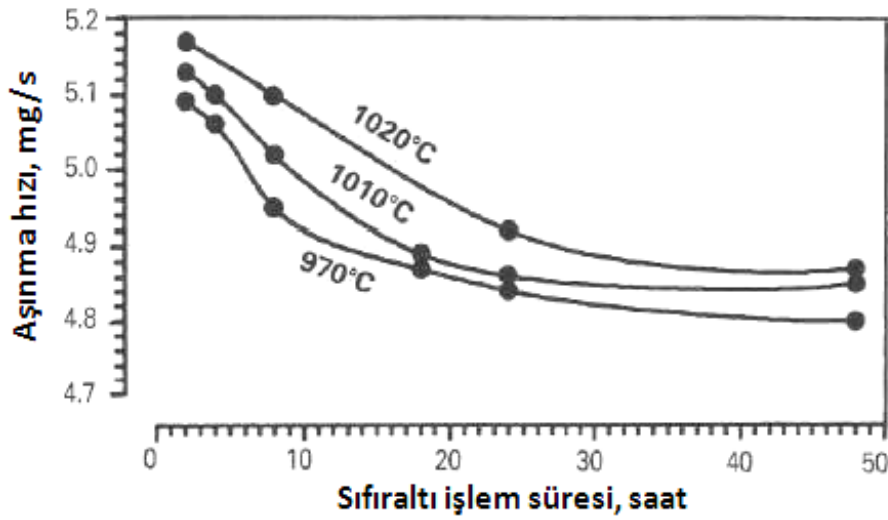
Şekil 4.11. Sıfırlı işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin karbür sayısına etkisi. (Ostenitleme sıcaklıkları 970, 1010 ve 1020°C; sıfırlı işlem sonrası çift temperleme 200°C de 2 saat + 2saat olarak uygulanmıştır) [29]



Şekil 4.12. Sıfırlı işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin sertliğine etkisi (Ostenitleme sıcaklıkları 970, 1010 ve 1020°C ; sıfırlı işlem sonrası çift temperleme 200°C de 2 saat + 2saat olarak uygulanmıştır) [29]

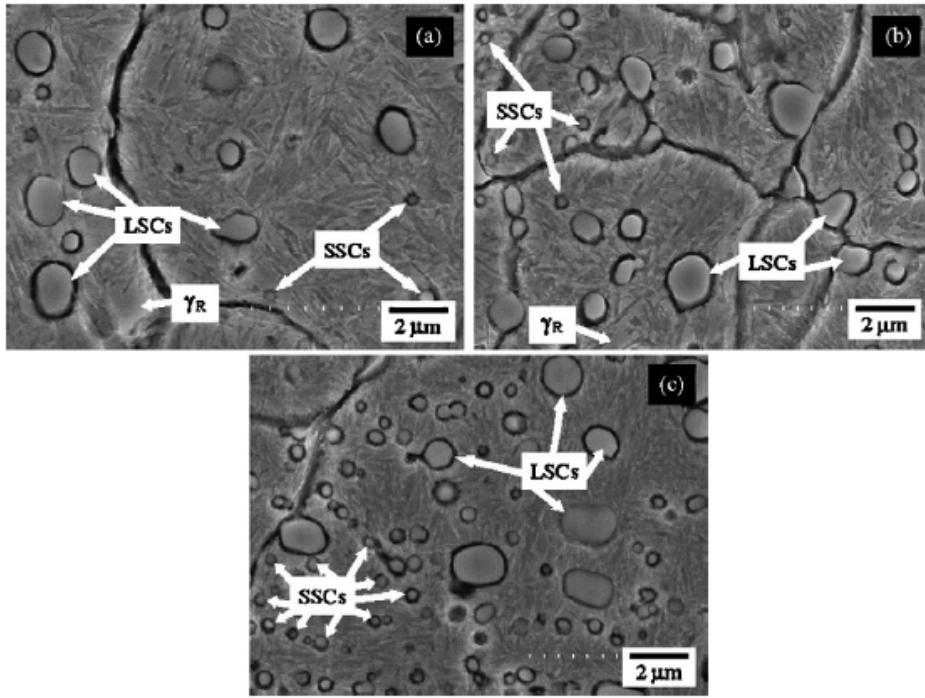


Şekil 4.13. Sıfırlı işlem sıcaklığının D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızına etkisi(Ostenitleme sıcaklıkları 970, 1010, 1040 ve 1070°C; sıfırlı işlem sonrası çift temperleme 200°C de 2 saat + 2saat olarak uygulanmıştır) [29]



Şekil 4.14. -196°C sıvı azot ortamında uygulanan kriyojenik işlem süresinin D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızına etkisi(Ostenitleme sıcaklıkları 970, 1010 ve 1020°C; sıfırlı işlem sonrası çift temperleme 200°C de 2 saat + 2saat olarak uygulanmıştır) [29]

D2 soğuk iş takım çeliği üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise sıfırlatı işlem ve akabinde uygulanan temperleme ile konvansiyonel ısıtıl işlemde daha az çökelen küçük ikincil karbürlerin(SSC) bu sayede yapıda daha çok çökeldiği ve ayrıca konvansiyonel ısıtıl işlem ve soğuk işlem sonucu açık beyaz alan ile gösterilen muhtemel kalıntı ostenit bölgeleri( $\gamma_R$ ) kriyojenik işlem sonucunda gözlenmemiştir (Bkz. Şekil 4.14) [9].



Şekil 4.15. D2 soğuk iş takım çeliğinin (a)konvansiyonel ısıtıl işlem uygulanmış, (b)soğuk işlem uygulanmış (c) kriyojenik işlem uygulanmış SEM görüntüsü (konvansiyonel ısıtıl işlem şartları için bkz. Şekil 2.4; soğuk işlem  $-75^{\circ}\text{C}$  de kriyojenik işlem  $-196,5^{\circ}\text{C}$  sıvı azotda olmak üzere her iki işlem süreleride eşit olarak sıfırlatı işlem uygulanmış ve devamında  $200^{\circ}\text{C}$  de 2 saat + 2 saat olarak çift temperleme yapılmıştır.) [9]

D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan bu üç farklı ısıtıl işlem süreci sonucunda hesaplanan kalıntı ostenit, PC, SC ve temperlenmiş martensitin % hacimsel içerikleri Tablo 4.2 de olmak üzere ayrıca Tablo 4.3' de de temperleme sonucu çökelen SC' lerinde SSC ve LSC olarak yüzde hacimsel miktarları ve ortalama küresel çapları( $\mu\text{m}$ ) verilmiştir [9].

Tablo 4.2. Kalıntı ostenit, PC, SC ve temperlenmiş martensitin % hacimsel içerikleri [9]

İŞLEM	İÇERİK (hacim %)			
	Kalıntı Ostenit( $\gamma_R$ )	Birincil Karbür(PC)	İkincil Karbür(SC)	Temperlenmiş Martensit
Konvansiyonel Isıl İşlem	9,80 ± 0,7	6,99 ± 0,3	6,57 ± 0,3	76,64
Soğuk İşlem	4,60 ± 0,5	7,10 ± 0,4	7,02 ± 0,5	81,28
Kriyojenik İşlem	ihmal edilebilir	6,99 ± 0,5	10,06 ± 0,3	82,95

Tablo 4.3. İkincil karbürlerin SSC ve LSC olarak miktar-boyut karakterizasyonu [9]

İŞLEM	İKİNCİL KARBÜR(SC)			
	Miktar (hacim %)		Ortalama küresel çapları( $\mu\text{m}$ )	
	SSC	LSC	SSC	LSC
Konvansiyonel Isıl İşlem	3,52 ± 0,2	3,05 ± 0,7	0,49 ± 0,01	2,24 ± 0,05
Soğuk İşlem	3,82 ± 0,3	3,20 ± 0,6	0,42 ± 0,01	1,98 ± 0,06
Kriyojenik İşlem	5,62 ± 0,3	4,44 ± 0,2	0,36 ± 0,01	1,66 ± 0,03

Not:SSC;küçük ikincil karbür LSS;büyük ikincil karbür

#### 4.2.4.3. Sıfırlatı ısı işlem uygulamalarında kullanılan soğutma metodları

Sıfırlatı işlemde gerekli sıcaklıklara inebilmek ve hızlı soğuma elde edebilmek için sıvı azotu son derece verimli kullanabilen dondurucular geliştirilmiştir. Sıfırlatı işlemlerinde kullanılan ekipmanların hepsi, doğrudan ve dolaylı soğutma olarak iki ana grupta incelenebilir[3].

#### Doğrudan soğutma

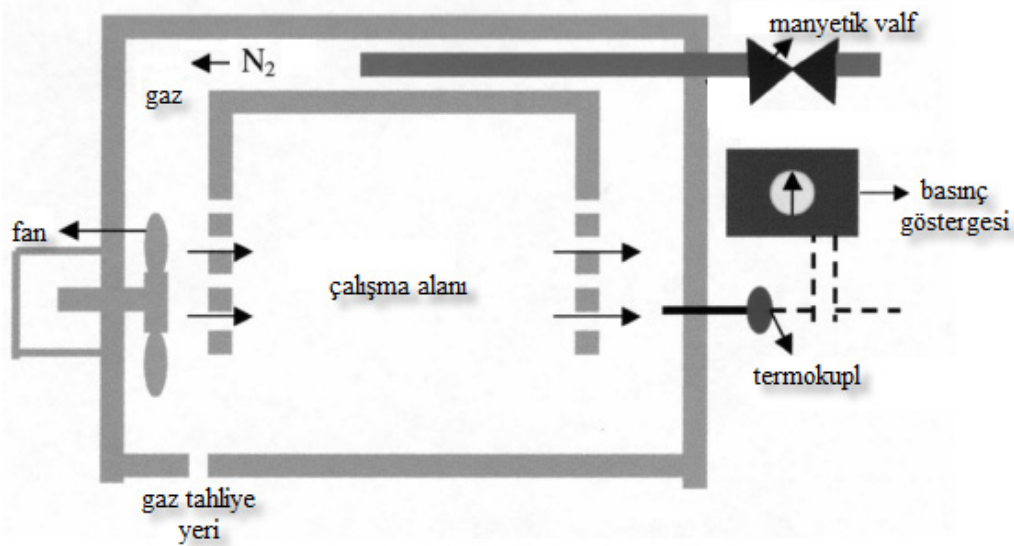
Bu grupta yer alan ekipmanlar hızlı soğutma için sıvı azotu etkin bir biçimde kullanır. En yaygın kullanılan yöntem olup sprey püskürtme sistemi kullanarak azotun atomize edilmesi ve çok soğuk gaza dönüşerek buharlaşması esnasında parçanın soğutulması şeklinde bir işleyişi vardır. Noktasal martensit oluşumunu engellemek için sıvı azotun direkt olarak parçayla teması engellenmekte ve sadece soğuk azot gazının parçayı soğutması sağlanmaktadır. Azot debisi kontrol edilerek

sıcaklığı ayarlamak mümkün kılınmış ve akış kontrolü sayesinde de soğutma hızının kontrolü sağlanmıştır [3].

### Dolaylı soğutma

Azot ile bir alkol tankının dışarıdan soğutulması ve parçaların sıfıraltı işlem için bu alkole daldırılması şeklinde uygulanılmaktadır. Bu yöntemde ulaşılabilecek en düşük sıcaklık  $-120^{\circ}\text{C}$  dir [3].

Sıfıraltı ekipmanlarında kullanılan sıvı azot, uygun depolama tanklarında muhafaza edilmelidir. Sıvı azot tanklarının iki cidarı bulunmaktadır ve iç cidar sıfıraltı sıcaklıklara dayanıklı paslanmaz çelikten, dış cidar ise karbon çeliğinden imal edilmektedir. Bu iki cidar arasında ısı iletimini engellemek üzere özel izolasyon maddesi konulur ve vakum ortamı sağlanır. Tankın içerisindeki basıncın, sıvı azotu dışarı itmesiyle kullanımını sağlanmaktadır ve sıvı azot iletiminde kullanılan borular için yalnızca bakır ya da paslanmaz çelik malzemeden imal edilir [3].



Şekil 4.16. Doğrudan soğutma prensipi ile çalışan sıfıraltı işlem ekipmanının şematik gösterimi [27]

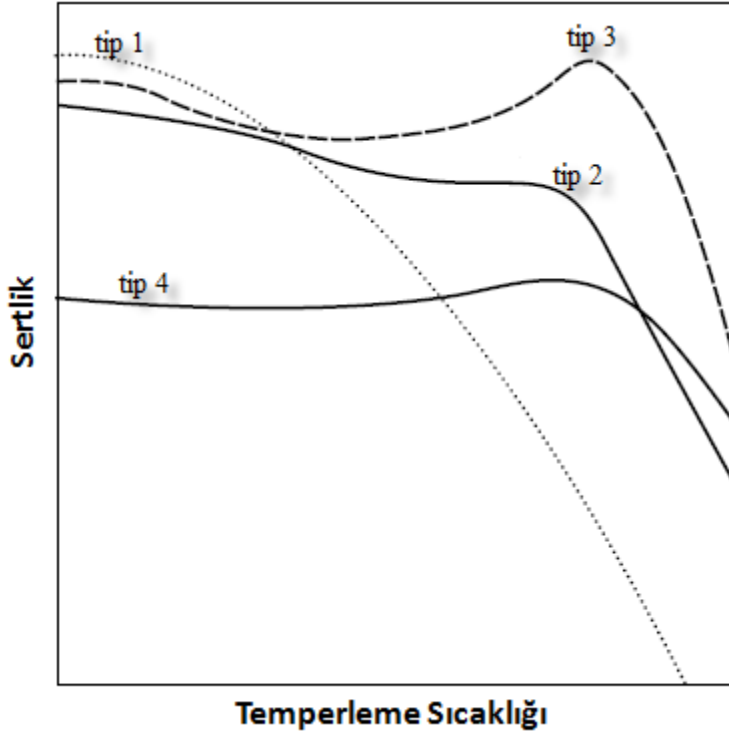
#### 4.2.5 Temperleme(Menevişleme)

Takım çeliklerinde, suverme veya sıfırlı işlem ardından elde edilen martensitik yapı son derece sert, kırılğan, kararsız ve gerilimli bir faz olup kullanılabilir bir yapı değildir. Martensitik faz bizim için bir geçiş fazı olup daha sonra ulaşmak istediğimiz temperlenmiş martensitik faz için bir durak niteliğindedir [5].

Menevişleme difüzyon kontrollü bir işlemdir. Menevişlemenin birinci amacı martensitin, temperlenmiş martensite dönüştürülmesi yani martensitin tetragonalitesinin bozulmasıdır ki bu sayede menevişleme ile nihai anayapı belirlenir. İkinci amacı ise muhtemel oluşabilecek karbür çökmesini belirlemektir. Buda, menevişlemede sıcaklığının artması ile birlikte tetragonal martensit yapısı bozulur ve böylece tetragonal martensit yapısındaki karbon atomları bulunduğu kafesten çıkarak uygun latis boşluklarında karbonca zengin bölgeler oluşturur. Oluşan bu karbonca zengin bölgelerde de heterojen çekirdeklenme ile muhtelif oluşabilecek karbürler çökler. Fakat dikkat edilmelidir ki burada menevişleme sıcaklığı-süresi, suverme sonrası martensit içinde hapsolan alaşım elementlerinin miktarı ve uygun latis boşlukları karbür çökmesini kontrol eder. Menevişlemenin üçüncü amacında karbür çökmesi mekanizmasıyla paralel ilerleyen, suverme sonrası yapıda dönüşmeden kalan ostenitin yüksek sıcaklık ve soğuma sonucunda martensite (kalıntı  $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) dönüşmesini sağlamaktır. Takım çeliklerinde nihai temperleme işlemi sonucunda kalıntı ostenitin %5' in altında olması istenir. Menevişleme sonucunda elde edilen yapının , sertliği istenen değerlerde olmakla beraber aynı zamanda sünekliği ve tokluğu iyileştirilmiş olur [26-28].

Takım çeliklerinde dört farklı tipte temperleme grafiği vardır(Bkz. Şekil 4.14). 1. tip temperleme grafiği düşük alaşımlı takım çeliklerine aittir. 2.tip temperleme grafiği orta ve yüksek alaşımlı takım çeliklerine aittir. 3. ve 4. tip temperleme grafiği ise ikincil sertleşme gösteren yüksek alaşımlı takım çeliklerine aittir. Özellikle 3. tip temperleme grafiği yüksek hız çeliklerine özgü iken 4. tip temperleme grafiği de sıcak iş takım çelikleri ve yüksek kromlu yüksek karbonlu soğuk iş takım çeliklerine aittir. Volfram, vanadyum, krom ve molibden içeren takım çeliklerinin yüksek sıcaklık temperlemesinde  $M_6C$ ,  $M_2C$  ve  $MC$  formundaki ince karbürlerin çökmesi

sonucu ikincil sertleşme yani burun sertleşmesi meydana gelir. İkinci sertleşme sonucu oluşan çok sert ince karbürler takım çeliğinin sertliğini ve aynı zamanda aşınma direncini artırır [5,19-22].

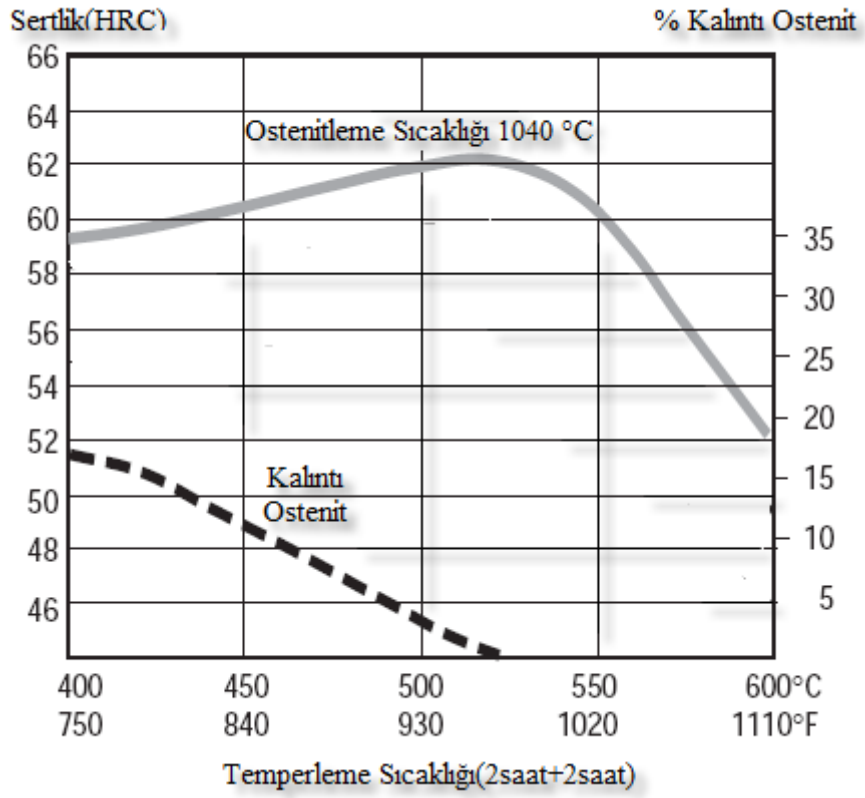


Şekil 4.17. Takım çeliklerine ait dört farklı temperleme grafiği [19]

Soğuk iş takım çeliklerinde sertleştirme sonrası sıfırlatma işlemi uygulanmazsa en az iki defa, uygulanırsa da en az bir kere menevişleme işlemi uygulanır. Menevişlemenin ilk basamağında martensitin menevişlenmesinin yanı sıra meneviş sıcaklığında bekleme ve ardından uygulanan soğutma sırasında kalıntı ostenitin bir kısmının martensite dönüşmesi sağlanır. İkinci meneviş basamağı çeliği kullanım sertliğine getirme ve ilk meneviş basamağında kalıntı ostenitten dönüşen martensitin temperlenmesi amacıyla uygulanır [5,19].

Şekil 4.15'de Vanadis 4 Extra® soğuk iş takım çeliğine su verme akabinde uygulanan menevişleme işlemi ile sıcaklığa bağlı olarak sertlik ve kalıntı ostenit miktarındaki değişimler gösterilmiştir.





Şekil 4.18. Vanadis 4 Extra® temperleme grafiği [25]

## **BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

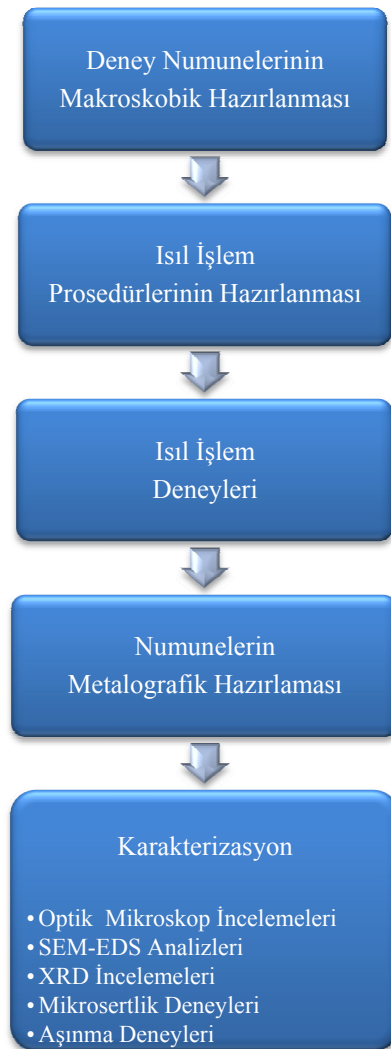
### **5.1. Deneysel Çalışmanın Amacı**

Özellikle otomotiv sektöründe kaporta ve şasi parçalarının üretiminde kullanılan kesme ve form verme kalıplarının imal edildiği soğuk iş takım çelikleri son yirmi otuz yıl içerisinde belirli bir yönde değişmekte ve gelişmektedir. Otomotiv endüstrisi, başta yolcu güvenliğini arttırmak ve yakıt tüketimini azaltmak olmak üzere daha bir çok etken nedeniyle ürünlerinde ultra yüksek ve yüksek mukavemetli çelik sacları kullanmaya başlamışlardır. Bu eğilim göstermiştir ki; bu sacların şekillendirilmesinde kullanılan, soğuk iş takım çeliği kesme ve form verme kalıplarının da performansları geliştirilmeye muhtaçtır. Çünkü otomotiv endüstrisinde hali hazırda kullanılan geleneksel soğuk iş takım çelikleri(AISI O1, A2, D2, D3) bu yüksek mukavemetli sacları şekillendirmede en başta mekanik özellikler olmak üzere takım ömrü, zaman ve maliyet verimliliği gibi parametrelerde yetersiz kalmaktadır.

Bu yüzden yönelim, yüksek oranda C ve Cr içeren soğuk iş takım çeliklerinden (D2, D3 gibi) artan V ve Mo içeriğinin azalan C ve Cr' un yerine ikamet ettiği yeni nesil soğuk iş takım çeliklerine doğru gerçekleşmektedir. Bu değişimin ana fikri yumuşak krom karbürler yerine vanadyum ve molibden zengin küçük ve sert MC-M<sub>2</sub>C-M<sub>6</sub>C tipi karbürleri yapıda ikamet ettirmektir. Böylece sertlikle beraber aşınma direnci, tokluk ve yorulma mukavemeti gibi mekanik özelliklerde ciddi artışlar gözlenmektedir.

Bu çalışmanın amacı; farklı kimyasal kompozisyon ve farklı üretim yöntemine sahip iki çeşit yeni nesil soğuk iş takım çeliğine uygulanan, konvansiyonel ısıtma işlemiyle kıyasla farklı sıfırlı ısıtma işlem parametrelerinin çeliklerin yapısında ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği etkiyi incelemektir.

Bu amaçla bu yüksek lisans tezi kapsamında geleneksel yöntemle üretilmiş Calmax<sup>®</sup> ve toz metalurjisi üretimi Vanadis 4 Extra<sup>®</sup> yeni nesil soğuk iş takım çeliklerine uygulanan farklı ısıtım işlem basamaklarının, çeliklerin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu(SEM) ile incelenmiş hacimsel kalıntı ostenit oranları X- Işımı Difraksiyon Analizi(XRD) ile tespit edilmiş olup ayrıca uygulanan bu farklı ısıtım işlemlerin sertlik ve aşınma gibi mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Şekil 5.1' de deneysel çalışmada izlenen aşamalar adım adım gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada izlenen yolun şematik gösterimi

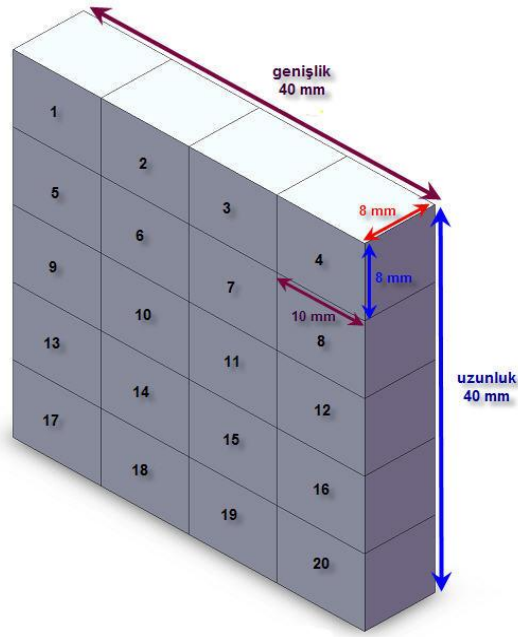
## 5.2. Deneysel Malzemeler

Deneysel çalışmada kullanılan Calmax<sup>®</sup> ve Vanadis 4Extra<sup>®</sup> soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimi Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1. İncelenen çeliklerin kimyasal bileşimi (ağ.%)

Çelik	Kimyasal Bileşim(ağ.%)					
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si
Calmax <sup>®</sup>	0,60	4,50	0,50	0,20	0,80	0,35
Vanadis 4 Extra <sup>®</sup>	1,40	4,70	3,50	3,70	0,40	0,40

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, her iki çelik grubundan “8mm x 10 mm x 8 mm” (UxGxK) boyutlarında tel erozyonda kesilmek suretiyle 20 adet numune hazırlandı (Şekil 5.2). Akabinde ısıl işlemler sırasında yüzeyde oluşabilecek çentik etkisi hasarını ortadan kaldırmak amacıyla tüm yüzeyleri sırasıyla 120→320→400→600 kademeleri ile zımparalanarak makroskobik olarak ısıl işleme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.2. Numunelerin kesilmesinin şematik gösterimi

### 5.3. Isıl İşlem Prosedürlerinin Hazırlanması

Isıl işlem deneylerinden önce Calmax® ve Vanadis 4Extra® soğuk iş takım çeliklerinin TTT diyagramları kullanılarak ve 8mm olan numune kesit kalınlıkları göz önünde bulundurularak, ostenitleme sıcaklıkları sırasıyla 960°C ve 1040°C de 30 dakika olarak; suverme sıcaklıkları ise her iki çelik grubu içinde Ms sıcaklığının hemen altı 170°C olarak belirlendi.

Çelik grubuna bağlı kalmaksızın sıfırtaltı işlem süresinin etkisini ortaya çıkarmak amacıyla da -197°C de sıvı azot ortamında 15 dakika ve 60 dakika olacak şekilde iki farklı işlem süresinde karar kılındı. Temperleme kademesinde ise çeliklerin kataloglarındaki referans temperleme grafikleri göz önüne alınarak iki farklı sıcaklık-zaman kombinasyonu belirlendi. Böylece temperleme koşulları da 200°C de 60 dakika + 60 dakika olmak üzere çift temper ve 525°C de 30 dakika + 30 dakika olarak çift temperleme olarak uygulanmasına karar verildi.

Her iki çelik grubu içinde ısıl işlemin ilk safasında tüm numunelere belirlenen şartlarda ön ısıtma, ostenitleme ve suverme işlemleri uygulanacağı belirlendi. Daha sonra suverilen numunelerden bir kısmına yalnız temperleme ve yalnız sıfırtaltı işlem bir kısmında sıfırtaltı işlem ve hemen devamında temperleme işlemi uygulanmasıyla ısıl işlem deneylerinin tamamlanması öngörülmüştür.

Belirli ısıl işlem basamaklarından sonra iki numune ayrılmak suretiyle Tablo5.2 de gösterilen dokuz farklı ısıl işlem kombinasyonuna sahip deney prosedürü oluşturulmuştur. Ayrıca Tablo 5.2 de dokuz deneyde uygulanacak olan ısıl işlem basamaklarının sıcaklık ve zamanları verilmiştir.

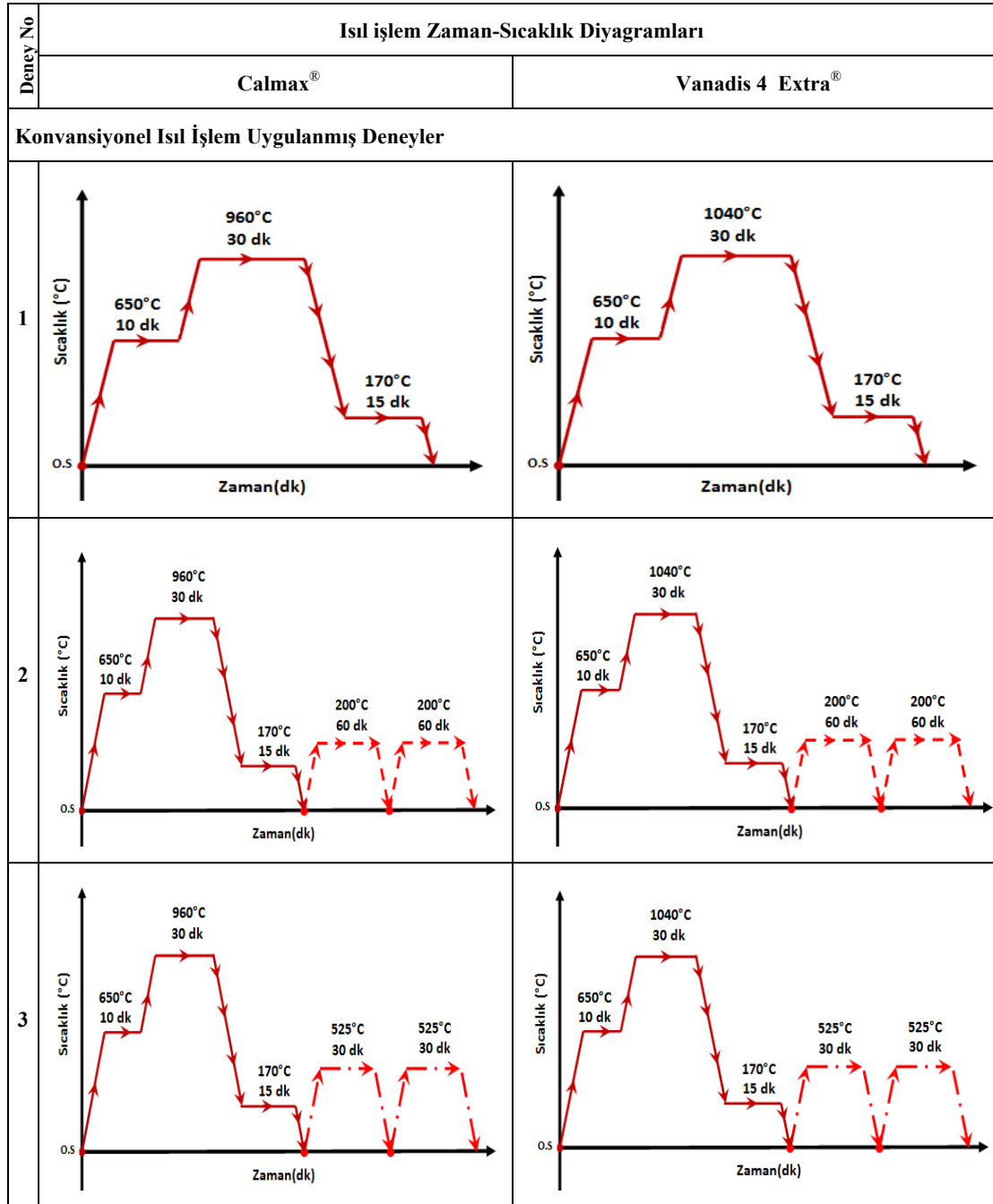
Tablo 5.2. Uygulanan dokuz farklı deneydeki ısı işlem basamakları ve koşulları

Deney No	Uygulanan İşlem Basamakları	Calmax®		Vanadis 4 Extra®	
		Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)	Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)
<b>Konvansiyonel Isıl İşlem Uygulanmış Deneyler</b>					
1	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
2	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Temperleme(çift)	200	60 / 60	200	60 / 60
3	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Temperleme(çift)	525	30 / 30	525	30 / 30
<b>15 dakika Sıfırlı Isıl İşlemi Uygulanmış Deneyler</b>					
4	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	15	-197	15
5	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	15	-197	15
	Temperleme(çift)	200	60 / 60	200	60 / 60
6	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	15	-197	15
	Temperleme(çift)	525	30 / 30	525	30 / 30

Tablo 5.2. Devam

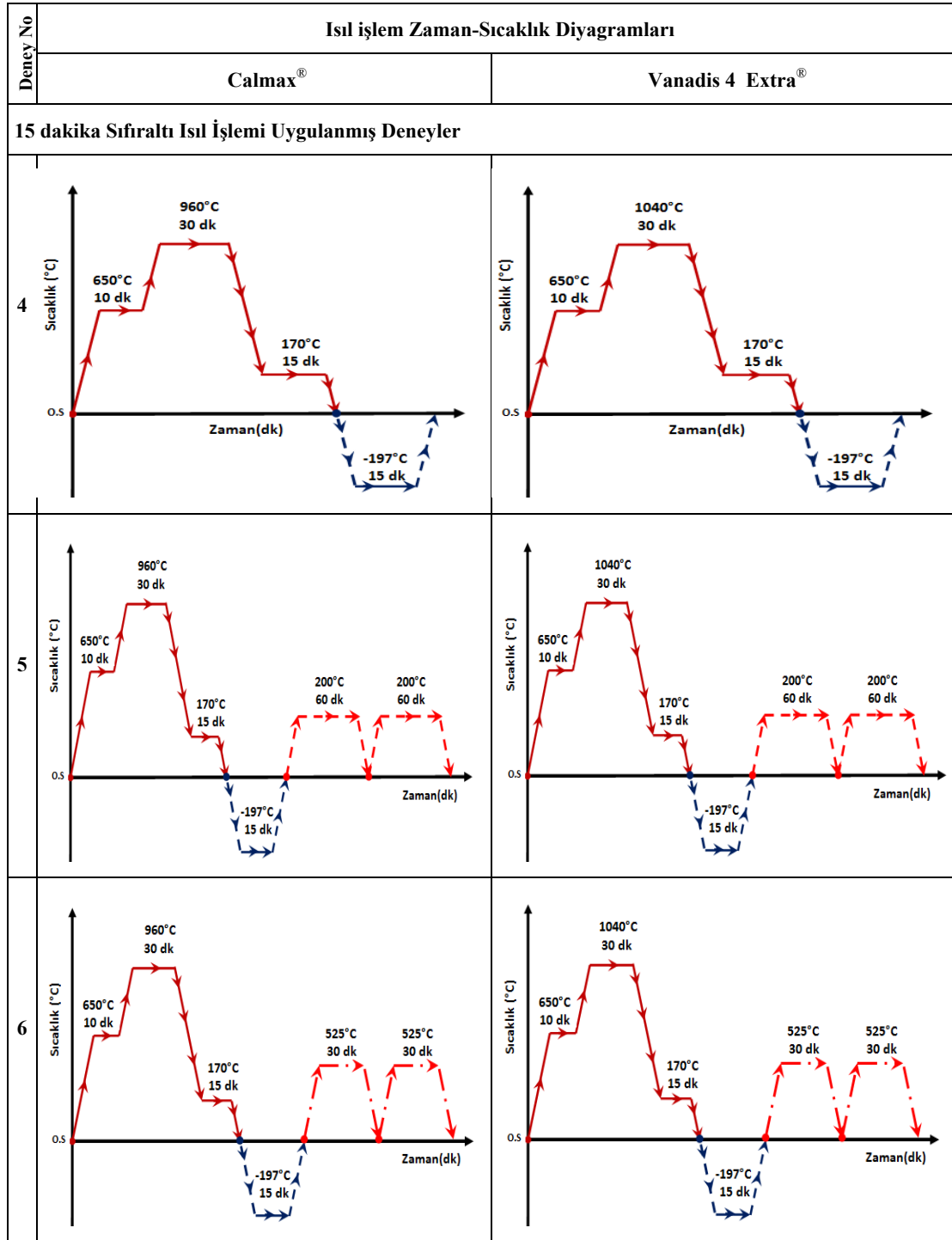
Deneý No	Uygulanan İşlem Basamakları	Calmax®		Vanadis 4 Extra®	
		Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)	Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)
<b>60 dakika Sıfırlı ısı İşlemi Uygulanmış Deneýler</b>					
7	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	60	-197	60
8	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	60	-197	60
	Temperleme(çift)	200	60 / 60	200	60 / 60
9	Ön ısıtma	650	10	650	10
	Ostenitleme	960	30	1040	30
	Suverme	170	15	170	15
	Sıfırlı işlem(kriyojenik)	-197	60	-197	60
	Temperleme(çift)	525	30 / 30	525	30 / 30

Şekil 5.3' de belirlenen ısı İşlem koşulları kullanılarak dokuz deneýe ait ısı çevrim(zaman-sıcaklık) diyagramları çizilmiştir.

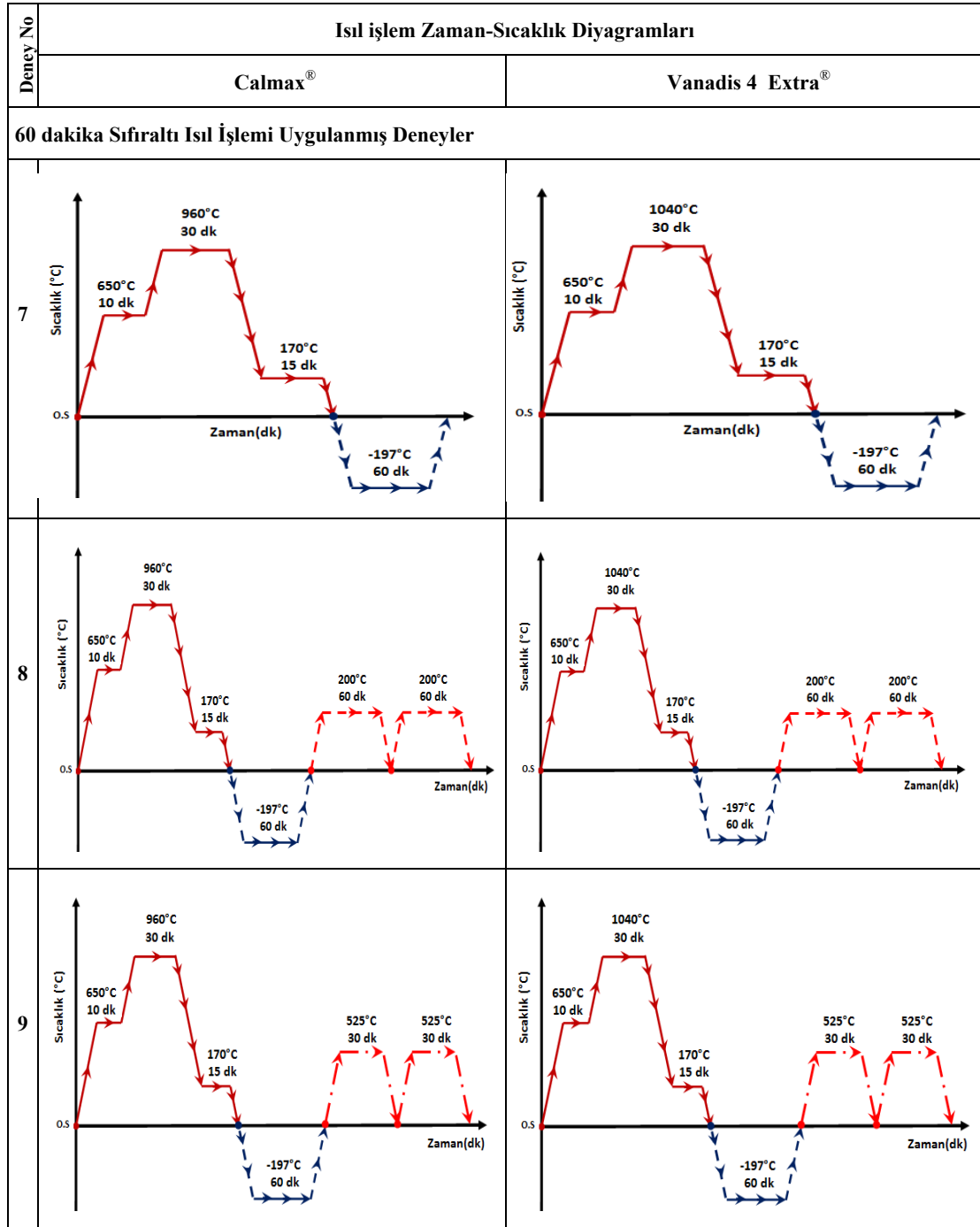


şekil 5.3. Uygulanan deneçler göre ısıl işlem zaman-sıcaklık diyagramları





Şekil 5.3. Devam



Şekil 5.3. Devam

#### 5.4. Isıl İşlem Deneyleri

Hazırlanan deney prosedürlerine göre Assab Çelik ve Isıl İşlem A.Ş'de ısıl işlem deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ısıl işlem deneylerini özetlemek gerekirse; Calmax<sup>®</sup> ve Vanadis 4E<sup>®</sup> deney numunelerinin tamamı ayrı ayrı iki numune sepetine yerleştirildi ve ostenitleme öncesinde 650°C de 10 dk GS540 (glühen salz) tuzunun kullanıldığı tuz banyosunda ön ısıtmaya tabi tutuldu. Ön ısıtmanın hemen akabinde Calmax<sup>®</sup> 960°C de 30 dakika GS850 tuzunun kullanıldığı tuz banyosunda, Vanadis 4E<sup>®</sup> de 1040°C de 30 dakika GS1050 tuzunun kullanıldığı tuz banyosunda ostenitlendi. Calmax<sup>®</sup> ve Vanadis 4E<sup>®</sup> numuneleri ostenitlemenin ardından 170°C deki AS140(austenite salz) tuzunun kullanılmış olduğu türbülanslı tuz banyosunda 15 dakika suverme işlemine tabi tutuldular. Suverme sonunda tuz banyosunda homojen soğutma ile numunelerin bütün kesiti boyunca 170 °C olarak sıcaklık sağlandıktan sonra numune sepetleri hava ortamında kurutmaya alındı. 30 dakikanın sonunda da oda sıcaklığına ulaşan numunelere kostik asitte temizleme ve yıkama işlemi uygulandı.

Temizlenen numuneler, kalıntı ostenitin kararlı hale geçmemesi için en fazla 1 saat içinde hazırlanan deney prosedürüne göre bir kısmı 15 dakika bir kısımda 60 dakika olmak üzere -197°C de 4 bar sıvı azot basıncı ve dakikada 4000 devir fan hızı sabit kalmak üzere Linda Cryogenics Box soğutma fırınında sıfırlı ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Sıfırlı işlem uygulanan numuneler oda sıcaklığına gelene kadar beklemeye alındı ve daha sonra bir kısım sıfırlı işlem uygulanmış bir kısımda yalnız suverilmiş numunelere deney prosedüründeki gibi 200°C de kuru ortam menevişi veya 525°C de GS540 tuzunun kullanıldığı tuz banyosunda menevişleme işlemi uygulanmıştır.

## 5.5. Mikroyapısal İncelemeler

Mikroyapısal incelemeler için numuneler, ısıl işlem deneyleri sonrasında sırasıyla 600→800→1000→1200 kademelerinde zımparalanıp akabinde yaklaşık 2 dakika 6µm elmas ile parlatıldıktan sonra “%58 HCl- %11 HNO<sub>3</sub> - % 31 doymuş CuSO<sub>4</sub> çözeltisi” bileşimine sahip dağlayıcıyla dağlanarak Nikon Eclipse L150/150A marka optik mikroskopta incelenmiştir.

“Ayrırım/çözünürlük gücü” açısından taramalı elektron mikroskobu(SEM) 25 Å seviyelerinde iken optik mikroskoplarda 2000 Å düzeyindedir diğer bir yandan taramalı elektron mikroskobunda odaklama derinliği optik mikroskoplara göre 300-600, alan derinliği ise 30 kat daha iyidir. Bu nedenle daha ayrıntılı yüksek büyütme(x1000-x2500-x5000-x10000) için de JEOL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak geri saçınımlı elektronlar (BES) ve ikincil elektronların (SEI) oluşturduğu SEM mikrografları alınmıştır.

Ayrıca geri saçınan elektronlar(BES), numuneden yansıyan elektronlar, atom numarasına göre farklı yansımalara sahiptir. Atom numarası yüksek olan atomlar daha fazla elektron yansıtır ve daha açık renkli görülürler. Taramalı elektron mikroskobundan aldığımız BES fotoğraflarıyla da IXRF systems Inc. 500 marka EDS cihazında elementsel analiz yapılmıştır.

Uygulanan ısıl işlemler sonucu, malzemelerin hasar mekanizmasını tetikleyen faktörlerden biri olan martensite dönüşmeden yapıda kalan, kalıntı ostenit hacim oranı X-ışınları yöntemiyle belirlenmiştir. X-ışınları yöntemindeki prensip difraksiyon paternlerinde elde edilen fazların pik alanları veya şiddetleri, fazların malzeme içindeki miktarlarıyla doğru orantılı olduğuna dayanmaktadır. Bu amaçla CuK $\alpha$  ( $\lambda= 1.541874 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanarak monokromatize X-ışını elde edilmesini sağlayan Philips PW-1830 marka X-ışını difraksiyon cihazı kullanılmıştır. Numuneler, 40 kV gerilim ve 28,5 mA akım şiddeti değerlerinde ve 30-90° arasındaki 2 $\theta$ (2 theta) açılarında 0,5 derece/dakika hızında taranarak X-ışını difraksiyon paternleri elde edilmiştir.

Elde edilen difraksiyon paternlerinde beklenildiği gibi martenzit( $\alpha'$ -Fe), kalıntı ostenit( $\gamma$ -Fe) ve farklı karbür bileşiklerine ait pikler belirlenmiştir. Ancak ASTM E 975-03[31] standardına göre kalıntı ostenit hacim oranının hesaplanmasında sadece martensit/ferrit ve ostenit piklerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. ASTM E975-03 standardından yola çıkarak aşağıdaki eşitlik (5.1) kullanılması suretiyle kalıntı ostenit hesaplamaları yapılmaktadır. X-ışını difraksiyonunda martensit ile ferrit fazlarının şiddetleri aynı olduğundan dolayı, aşağıda ferrit ve ostenit fazları için verilen eşitlikler martensit ve ostenit fazı içinde geçerlidir [31].

$V_\alpha + V_\gamma = 1$  kabul edilmek üzere

$$\left. \begin{aligned} I_\alpha^{hkl} &= \frac{KR_\alpha^{hkl}V_\alpha}{2\mu} \\ I_\gamma^{hkl} &= \frac{KR_\gamma^{hkl}V_\gamma}{2\mu} \end{aligned} \right\} \frac{I_\alpha^{hkl}}{I_\gamma^{hkl}} = \frac{R_\alpha^{hkl}V_\alpha}{R_\gamma^{hkl}V_\gamma} \xrightarrow{V_\alpha=1-V_\gamma} V_\gamma = \left[ \frac{\frac{I_\gamma}{R_\gamma}}{\left(\frac{I_\alpha}{R_\alpha}\right) + \left(\frac{I_\gamma}{R_\gamma}\right)} \right]$$

$$V_\gamma = \left\{ \left( \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right) / \left[ \left( \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{I_{\alpha i}}{R_{\alpha i}} \right) + \left( \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right) \right] \right\} \quad (5.1)$$

Burada;

$V \rightarrow$  piklerin hacim oranı,

$R \rightarrow$  standartta belirtilen teorik şiddet,

$I \rightarrow$  belirli hkl düzlemlerindeki difraksiyon veren fazların pik şiddetleri,

$K \rightarrow$  ışın demetinin büyüklüğü ve dalga boyu gibi deney koşullarının sabitleri,

$\mu \rightarrow$  malzemenin soğurma katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (5.1) ile kalıntı ostenit hacim oranı hesaplanırken; pik şiddetlerinin belirlenmesi gibi ölçümler ve hesaplamalarda kullanılacak fazların kristal yapısı ile ilgili pek çok sabit, cihazın kalıntı ostenit hesaplama yazılımı tarafından belirlenmiş ve kalıntı ostenit hacim oranı yine yazılım tarafından hesaplanmıştır.

### 5.6. Mikrosertlik Deneyleri

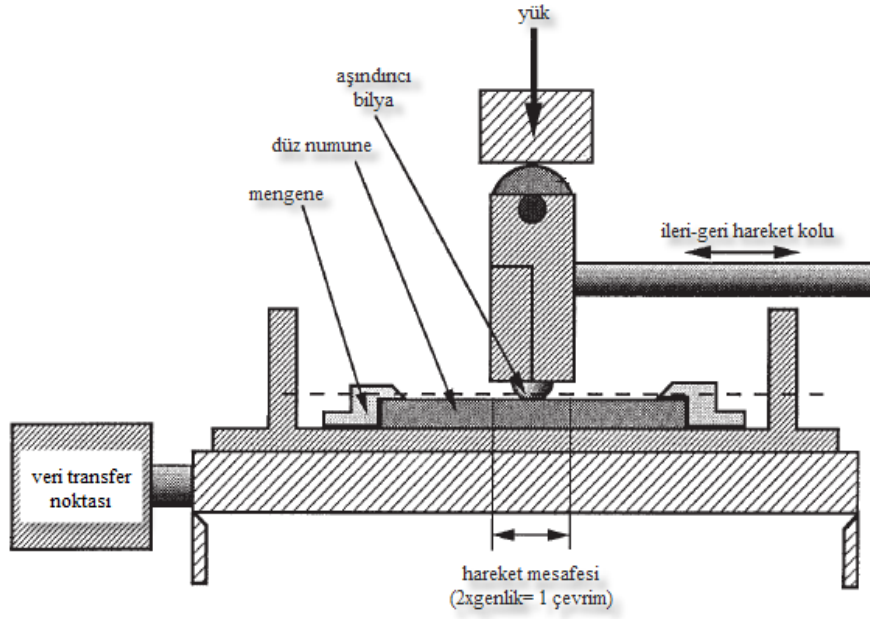
Numunelerin sertliği, Future-tech FM-700 marka mikrosertlik cihazı ile Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Bu amaçla, elmas piramit uçla 100g yük 10 saniye süresince tatbik edilerek sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik deneylerinde, deney sonucu en az 5 sertlik ölçümünün ortalamasını yansıtmaktadır.

### 5.7. Aşınma Deneyleri

Isıl işlem uygulanmış numunelerin aşınma deneyleri ASTM G133-02[32] standartlarına göre dizayn edilmiş ball-on-flat sliding(kaymalı) aşınma deney düzeneğine sahip CSM Instruments Tribometer markalı aşınma cihazında yapılmıştır. Deneyler karşıt hareketli liner olarak ileri-geri hareket(reciprocal) eden aşınma yöntemi uygulanılarak, kuru ortamda ve oda sıcaklığında yapılmıştır (Bkz. Şekil 5.3).

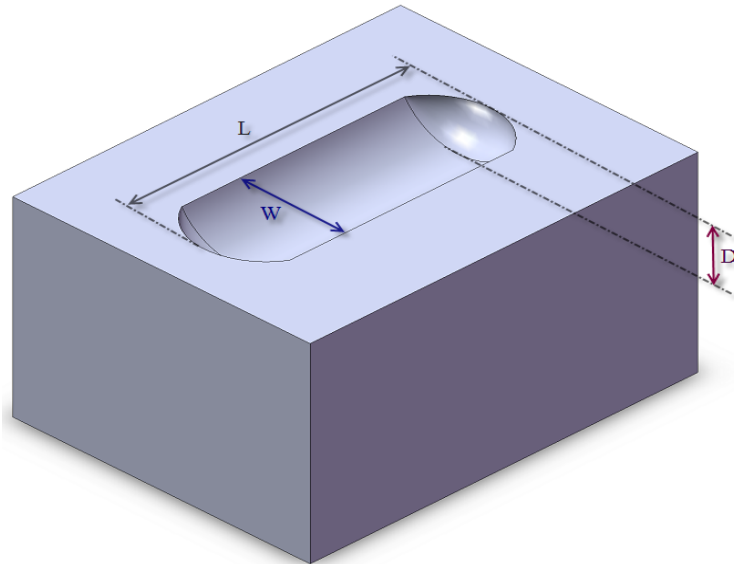
Aşınma deneyinden önce numune ve kullanılacak bilya alkolle temizlenmiştir. Aşındırıcı olarak 10 mm çaplı alümina bilyanın kullanıldığı deneylerde karşıt hareket genliği 6 mm olarak, toplam kayma mesafesinde 100 m olacak şekilde uygulanmıştır. Deney esnasında uygulanan hız 0,02 m/s; yükte 5N olarak tek yük seçilmiştir. Deney esnasında yük uygulama kolunun çelik yüzeyine temasında hassas davranılmış yüzeyden doğru veriler alınması sağlanmıştır. Uygulanan deney esnasında elde edilen veriler yine CSM firmasına ait bilgisayar programına aktarılmış ve tüm deneyler tamamlandıktan sonra OM ve SEM çalışmaları yapılmıştır.

Aşınma deneyleri sonunda, aşınma izleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda farklı büyütmelelerde incelenmiş ve SEM skalasından aşınma izlerinin genişliği yüksek hassasiyetle ölçülmüştür. Ayrıca CSM aşınma cihazının bilgisayar yazılımından mesafeye karşı sürtünme katsayısı ve iz derinliği grafikleri alınmıştır.



Şekil 5.4. Ball-on-flat sliding aşınma deney düzeneğinin şematik görünüşü [32]

Şematik olarak Şekil 5.4’de gösterilen aşınma izi profilinde yukarıda bahsedildiği gibi elde edilen deney sonuçlarının eşitlik (5.2) de kullanılmasıyla muhtemel aşınma izi hacimleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.5. Aşınma deneyi sonunda numune üzerinde ki aşınma izinin şematik görünümü

$$V = \frac{\pi \cdot W \cdot D}{4} \times L \quad (5.2)$$

Denklem 5.2' de;

$V \rightarrow$  Aşınma İzi Hacmi( $\text{mm}^3$ ),

$W \rightarrow$  Aşınma İzinin Genişliği(mm),

$D \rightarrow$  Aşınma İzinin Derinliği(mm),

$L \rightarrow$  Aşınma İzinin Uzunluğu – Genlik(mm) olarak tanımlanmıştır.

Her numunenin aşınma deneyi sonunda eşitlik (5.2) ile muhtemel aşınma izi hacimleri hesaplanmış ve elde edilen bu hacim değerlerinin de eşitlik (5.3)' de gősterildiđi gibi uygulanan yők çarpı toplam mesafe değerine bėlėnmesiyle de őzgöl aşınma hızlarına(specific wear rates) ulaşılmıştır.

$$SWR = \frac{V}{P \cdot S} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3' de;

$SWR \rightarrow$  őzgöl Aşınma Hızı( $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ),

$V \rightarrow$  Aşınma İzinin Hacmi( $\text{mm}^3$ ),

$P \rightarrow$  Uygulunan Yők(N),

$S \rightarrow$  Toplam kayma mesafesi(m) olarak tanımlanmıştır.



## **BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME**

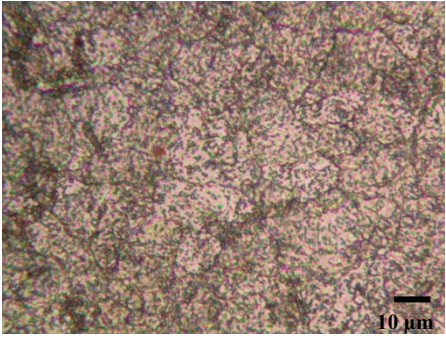
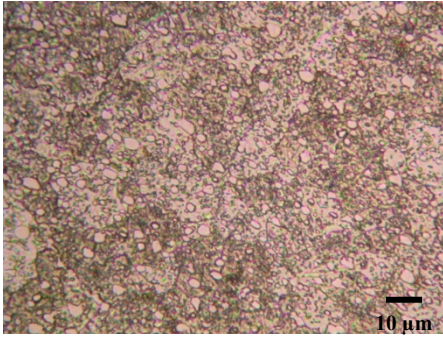
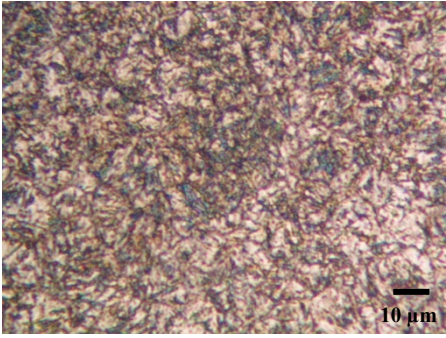
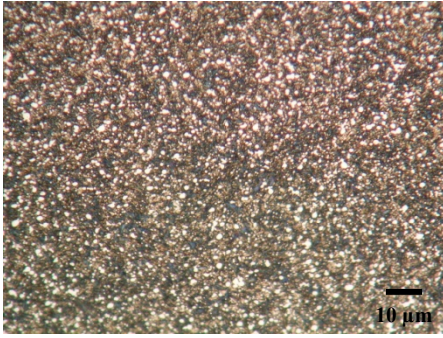

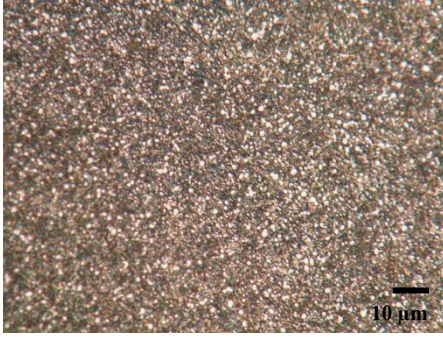
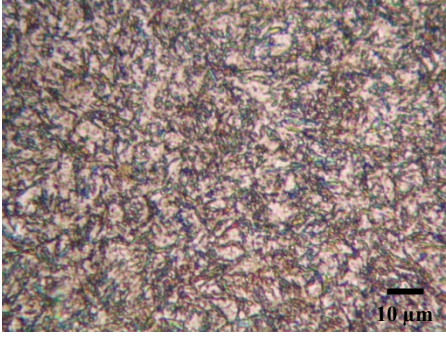
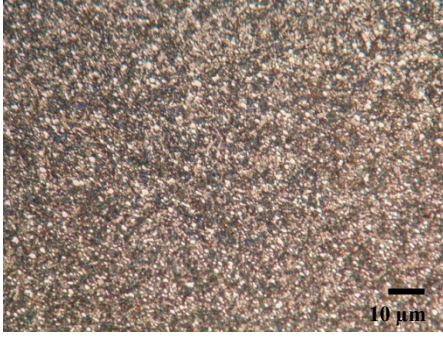
Calmax® ve Vanadis® soğuk iş takım çeliklerine uygulanan dokuz farklı ısıl işlem deneyinin, deney numaralarına göre “1-4-7”, “2-5-8”, “3-6-9” olarak 3 grup halinde gruplandırılması sonucunda deney sonuçlarının yorumlanması yapılmıştır. Deney gruplarının oluşturulmasında değişken parametresinin sıfırlı ısıl işlem olması amaçlanmış ve böylece sıfırlı ısıl işleminin, her iki çelik grubu üzerine etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

### **6.1. Mikroyapısal Karakterizasyon**

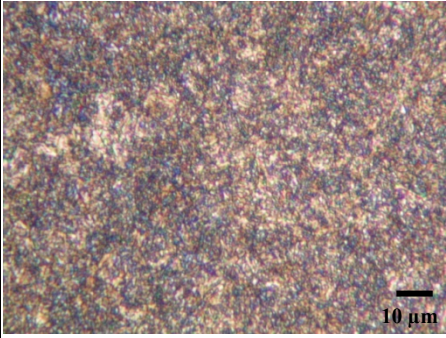
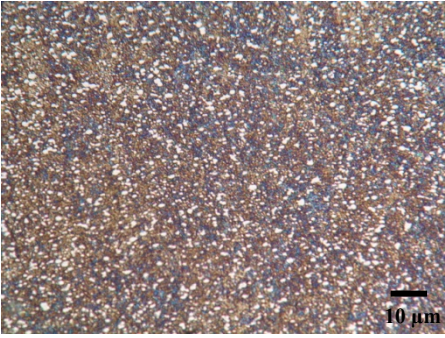
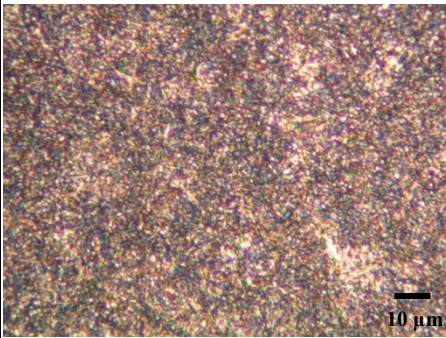
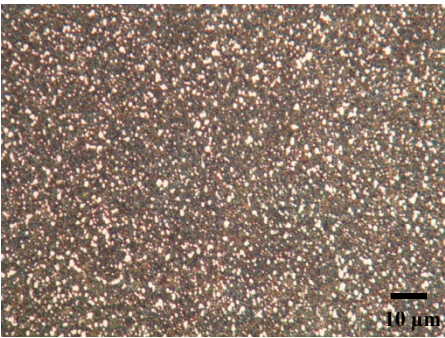
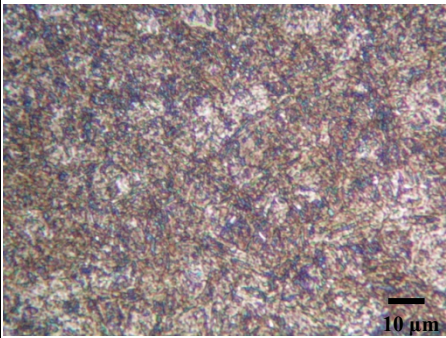
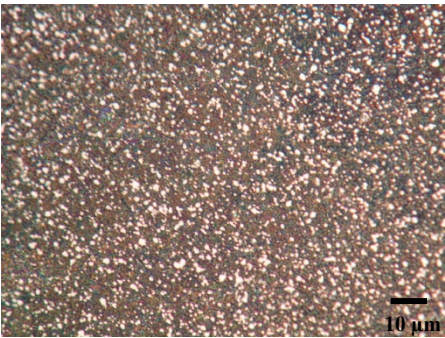
#### **6.1.1. Metalografik incelemeler**

Metalografik olarak incelenen her iki grup soğuk iş takım çeliğinin ısıl işlem uygulanmamış durumundaki ve tüm deney kademelerine ait optik mikroyapıları Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 de gösterilmiştir.

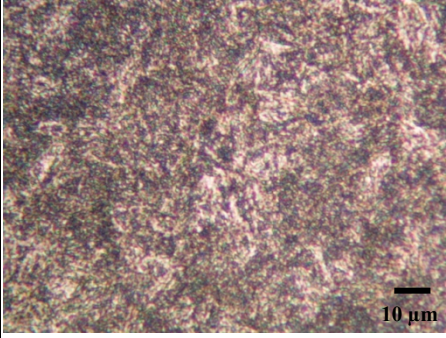

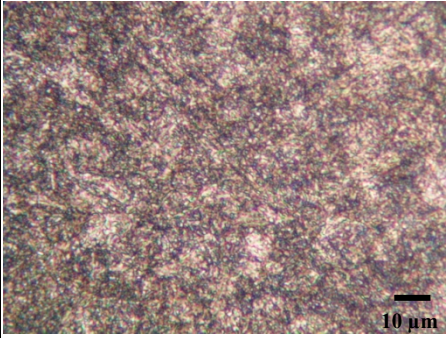

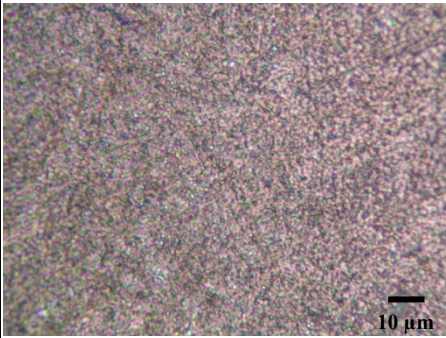
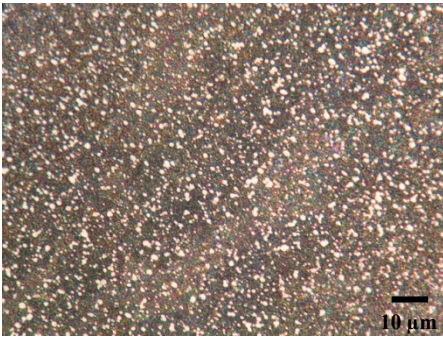
Optik mikroyapılarda görüldüğü gibi, suverme sonrası her iki çeliğinde mikroyapısı martensit ve alaşım karbürleri içermektedir. Şekil 6.1’ de suverme sonrası sıfırlı işlem süresinin artmasıyla beraber Calmax soğuk iş takım çeliğinin mikroyapısındaki martensit plakalarının(levhalarının) incelendiği gözlemlenmektedir. Buna karşın Vanadis soğuk iş takım çeliğinin optik mikroyapılarında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Öte yandan sıfırlı ısıl işlemiyle, kalıntı ostenitin martensite dönüşmesi beklenmekte ancak bu dönüşümün beklenildiği gibi optik mikroskop fotoğraflarından ayırtılamamıştır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’ de her iki çelik grubunun mikroyapısında temperlenmiş martensit ve karbürler görülmektedir. Özellikle Calmax soğuk iş takım çeliğindeki temperlenmiş martensit yapısının da, sıfırlı işlem süresinin artmasıyla daha incemsi bir görünüm aldığı gözlenmiştir.

Deneý No	Uyg. İştem	ÇELİKLER	
		Calmax®	Vanadis 4 Extra®
Referans	İştem görmemiş		
1	Suverme		
4	Suverme + Sıfırtaltı iştem(15 dk.)		
7	Suverme + Sıfırtaltı iştem(60 dk.)		

Şekil 6.1. Calmax® ve Vanadis 4E® nin “1-4-7” nolu deneylerde sıfırtaltı iştem süresinin etkisinin OM görüntüleri

Deneý No	Uyg. İştem	ÇELİKLER	
		Calmax®	Vanadis 4 Extra®
2	Suverme + Temperleme(200°C)		
5	Suverme + Sıfıraltı iştem(15 dk.) + Temperleme (200°C)		
8	Suverme + Sıfıraltı iştem(60 dk.) + Temperleme (200°C)		

Şekil 6.2. Calmax® ve Vanadis 4E®, nin “2-5-8” nolu deneylerde sıfıraltı iştem süresinin etkisinin OM görüntüleri

Deney No	Uyg. İşlem	ÇELİKLER	
		Calmax®	Vanadis 4 Extra®
3	Suverme + Temperleme(525°C)		
6	Suverme + Sıfırlı işlem(15 dk.) + Temperleme (525°C)		
9	Suverme + Sıfırlı işlem(60 dk.) + Temperleme (525°C)		

Şekil 6.3. Calmax® ve Vanadis 4E®'nin "3-6-9" nolu deneylerde sıfırlı işlem süresinin etkisinin OM görüntüleri

### 6.1.2. SEM-EDS analizleri

Taramalı elektron mikroskopunda incelenen her iki grup çeliğin ısı işlem uygulanmamış durumundaki ve tüm deney kademelerine ait SEM mikrografları 2500x, 5000x ve 10000x büyütmelerinde Calmax soğuk iş takım çeliği için Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' da, Vanadis soğuk iş takım çeliği için de Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9' da gösterilmiştir. Ayrıca aynı deney sıralaması ile numunelerden alınan SEM-noktasal EDS analizleri de Şekil 6.10-Şekil 6.15' de gösterilmiştir.

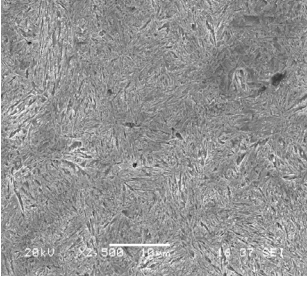
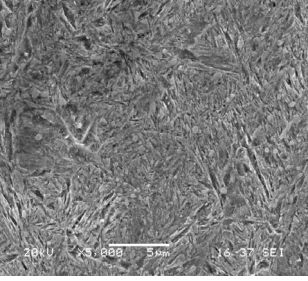
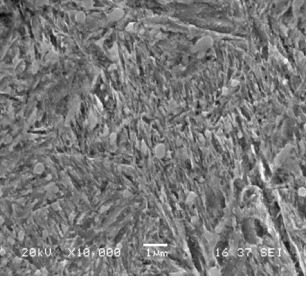
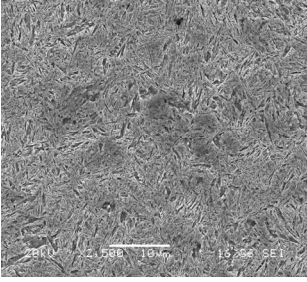
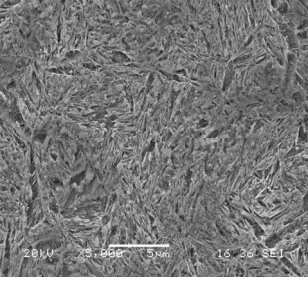
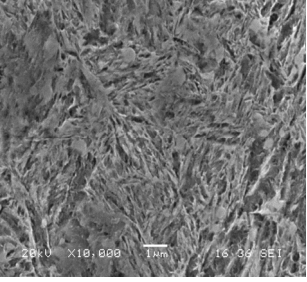
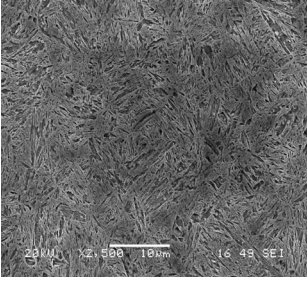
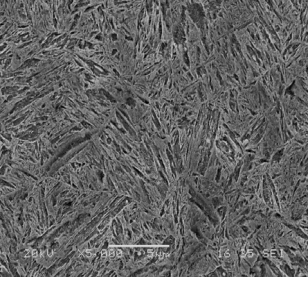
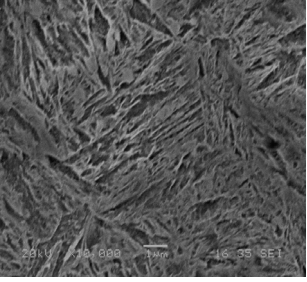
Calmax soğuk iş takım çeliği için Şekil 6.4' de görüldüğü gibi özellikle 10000x büyütmede sıfırlı işleminin etkisiyle suverme sonrası oluşan beyaz alanların sıfırlı işlem süresinin artması sonucu azaldığı gözlemlenmiştir. Optik mikroskop incelemelerinde gözlenemeyen bu açık beyaz alanların kalıntı ostenit olduğu öngörülmüştür. Ayrıca burada optik mikroskopta da gözlenen martensit plakalarının sıfırlı işlem süresinin artmasıyla daha da incelmiş daha açık bir şekilde görülmüştür ki buda mikrosertlik deney sonuçlarındaki sertlik artışıyla da desteklenmektedir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' da temperleme işlemi sonucu elde edilen mikroyapılarda temperlenmiş martensit, temperleme öncesindeki birincil karbürler ve temperleme sonucu çökelen ikincil karbürler görülmektedir. Deney no "5-8" ve nispeten daha belirgin olarak "6-9" da temperleme uygulaması sonucu sıfırlı ısı işleminin etkisiyle karbür-matris arayüzeyinin ortadan kalktığı yani karbürlerin etrafındaki belirgin tabakanın dağıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.5' de özellikle 60 dakika sıfırlı işlem ve sonrasında 525°C' de temperleme uygulanan deney no 9 da sıfırlı işlemin etkisiyle, daha küçük ikincil karbürlerin(<1µm) çökeldiği görülmektedir.

Vanadis soğuk iş takım çeliğine ait Şekil 6.7 deki mikrograflarda suverme sonrası oluşan beyaz alanların burada da dönüşmeden yapıda kalan ostenit olduğu öngörülmüştür. Sıfırlı işlemin etkisinin artmasıyla deney no 4 ve 7' de bu beyaz alanların azaldığı ve bununla beraber kalıntı ostenitin martensite dönüşümünden dolayı yapıdaki karbürlerin belirginleştiği kanısına varılmıştır. Beraberinde temperleme uygulanmaksızın sıfırlı işlem ile kesinlikle karbür çökmesinden bahsedilemeyeceği gibi deney no 4 ve 7' ye ait SEM mikrograflarındaki karbürlerin

artışı, kalıntı ostenitin martensite dönüşümünden dolayı olduğu öngörülmüştür. Şekil 6.9 da elde edilen mikrograflarda temperlenmiş martensit ve birincil-ikincil karbürler görülmektedir. Burada da temperleme uygulaması sonucu sıfırlı işlemin etkisiyle daha küçük ikincil karbür( $<1\mu\text{m}$ ) çökelmelerinin arttığı ve karbür-matris arayüzeyindeki tabakanın kaybolduğu görülmektedir. İkincil karbür çökelmelerindeki artışı, karbür tiplerini renk kontrastına göre ayırt edebildiğimiz SEM-noktasal EDS sonuçları da destekler niteliktedir.

Deneý No	Uyg. İşlem	Calmax® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
Referans	İşlem görmemiş			
1	Suverme			
4	Suverme + Sıfırlatı(15dk.)			
7	Suverme + Sıfırlatı(60 dk.)			

Şekil 6.4. Calmax®'ın “1-4-7” nolu deneylerinde sıfırlatı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

Deneý No	Uyg. işlem	Calmax® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
2	Suverme + Temp. (200°C)			
5	Suverme + Sıfırtlı(15 dk.) Temp. (200°C)			
8	Suverme + Sıfırtlı(60 dk.) Temp. (200°C)			

şekil 6.5. Calmax®'ın “2-5-8” nolu deneylerinde sıfırtlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

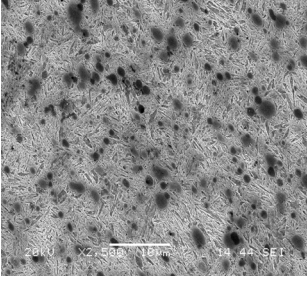
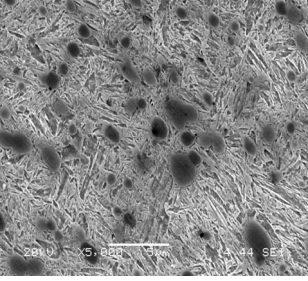
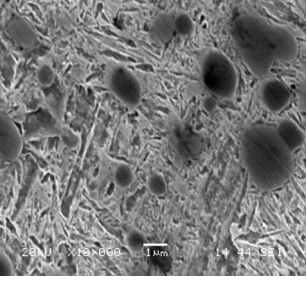
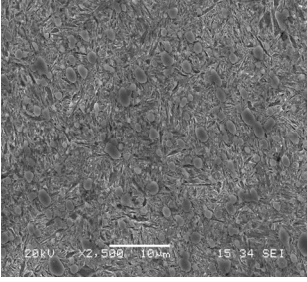
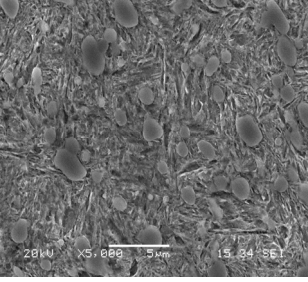
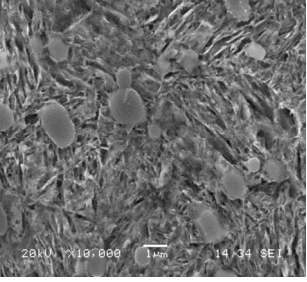
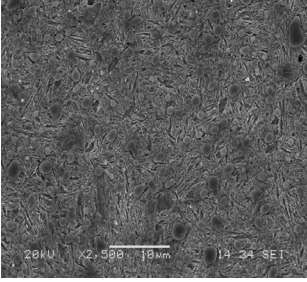
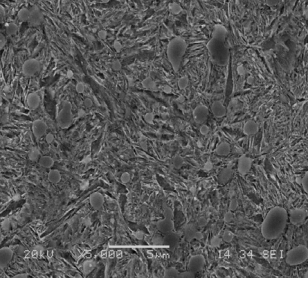
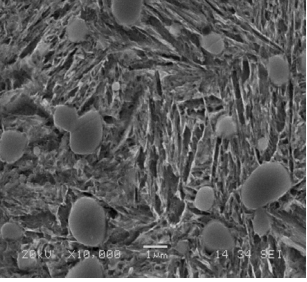


Deneý No	Uyg. işlem	Calmax® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
3	Suverme + Temp. (525°C)			
6	Suverme + Sıfırtlı(15 dk.) Temp. (525°C)			
9	Suverme + Sıfırtlı(60 dk.) Temp. (525°C)			

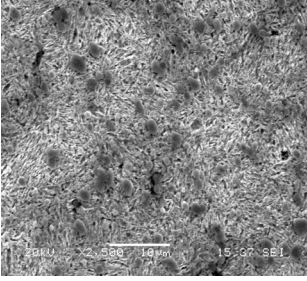
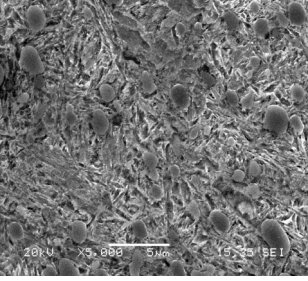
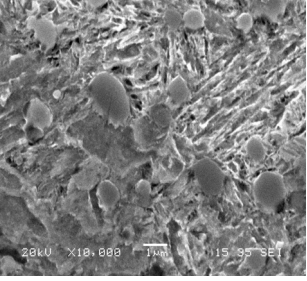
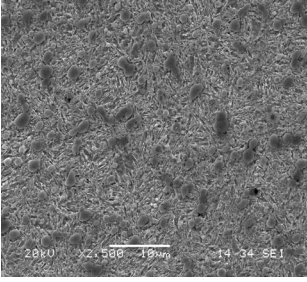
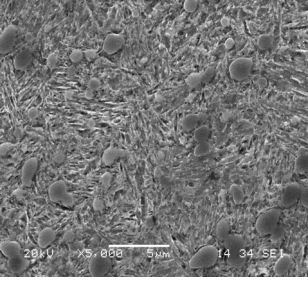
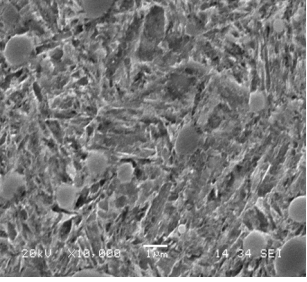
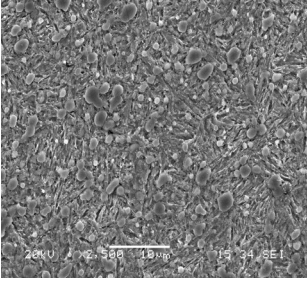
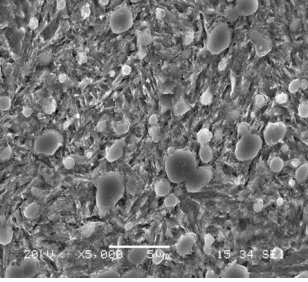
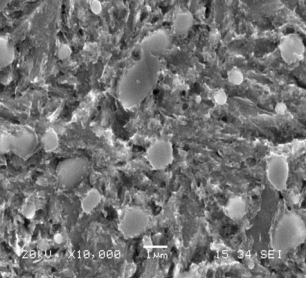
şekil 6.6. Calmax®'ın “3-6-9” nolu deneylerinde sıfırtlı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

Deneý No	Uyg. İşlem	Vanadis 4 Extra® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
Referans	İşlem görmemiş			
1	Suverme			
4	Suverme + Sıfıraltı(15 dk.)			
7	Suverme + Sıfıraltı(60 dk.)			

Şekil 6.7. Vanadis 4E®'nin "1-4-7" nolu deneylerinde sıfıraltı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

Deneý No	Uyg. işlem	Vanadis 4 Extra® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
2	Suverme + Temp. (200°C)			
5	Suverme + Sıfırlatı(15 dk.) Temp. (200°C)			
8	Suverme + Sıfırlatı(60 dk.) Temp. (200°C)			

şekil 6.8. Vanadis 4E®'nin “2-5-8” nolu deneylerinde sıfırlatı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

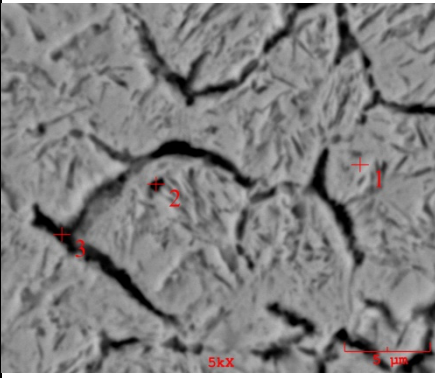
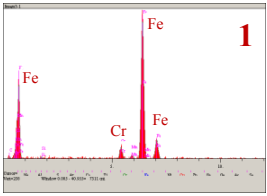
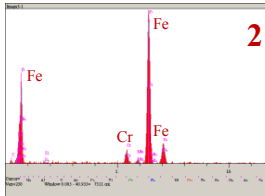
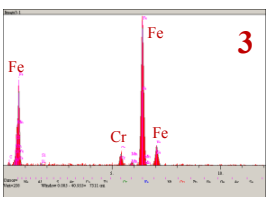
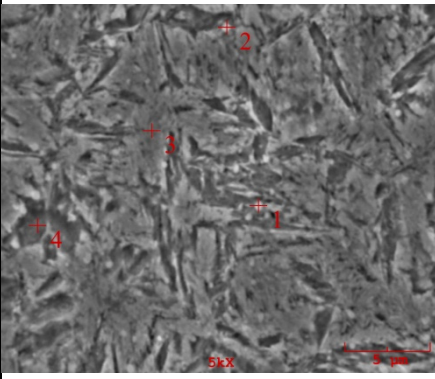
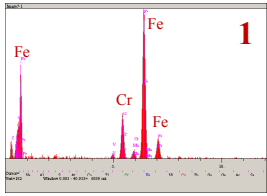
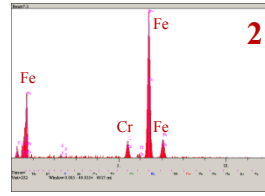
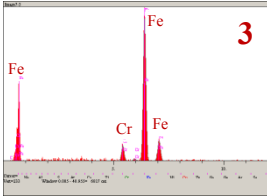
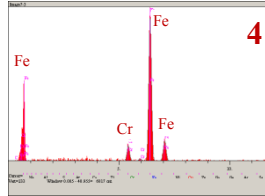
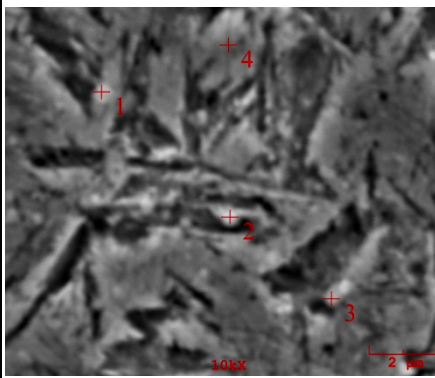
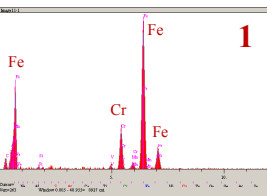
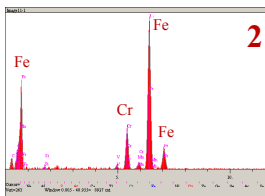
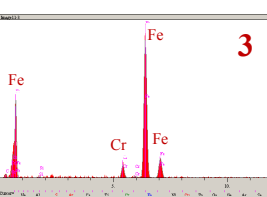
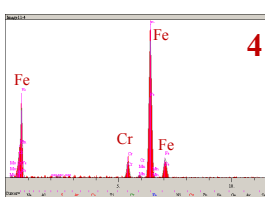
Deneý No	Uyg. işlem	Vanadis 4 Extra® SEM Mikrografları		
		SEI, 2500X	SEI, 5000X	SEI,10000X
3	Suverme + Temp. (525°C)			
6	Suverme + Sıfıraltı(15 dk.) Temp. (525°C)			
9	Suverme + Sıfıraltı(60 dk.) Temp. (525°C)			

şekil 6.9. Vanadis 4E®'nin “3-6-9” nolu deneylerinde sıfıraltı işlem süresinin etkisinin SEM mikrograflarıyla incelenmesi

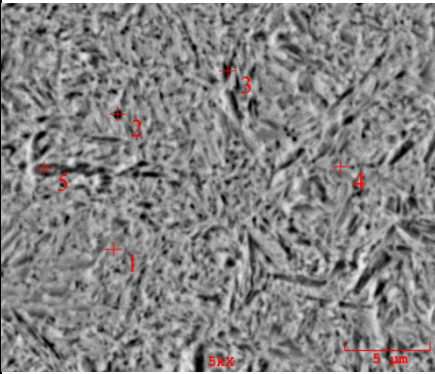
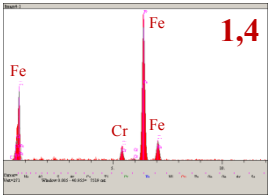
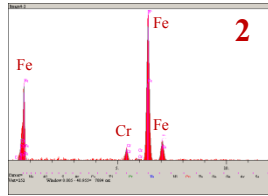
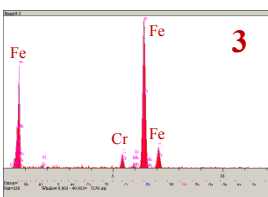
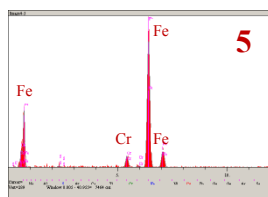
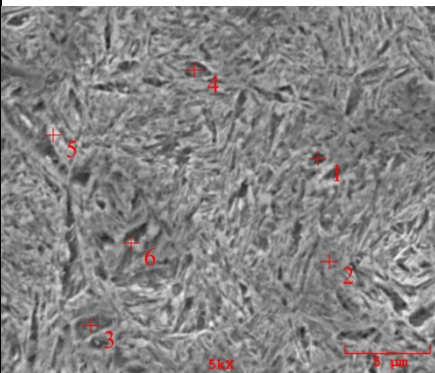
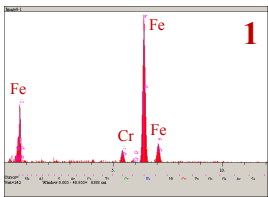
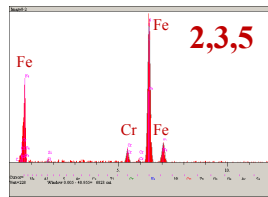
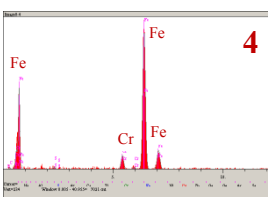
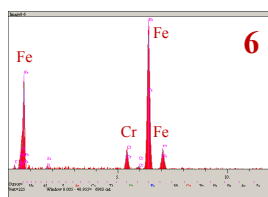
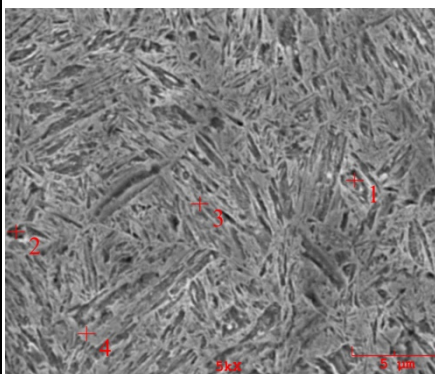
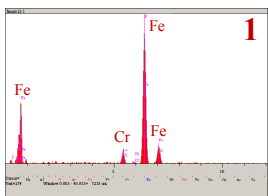
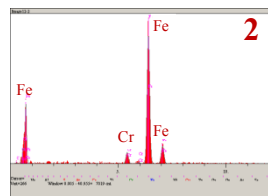
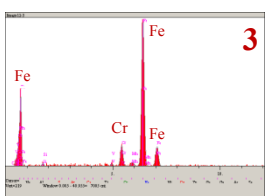
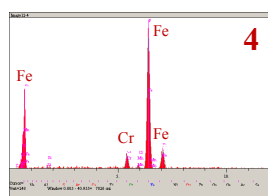
Şekil 6.10-6.12' de Calmax soğuk iş takım çeliğinin SEM(BES)-noktasal EDS analizlerinden matrisin Fe ağırlıklı olduğu ve özellikle temperleme sonucu daha net şekilde belirginleşen açık beyaz küresel alanlarında Cr ağırlıklı kompleks karbürlerden ibaret olduğu tespit edilmiştir.

Vanadis soğuk iş takım çeliğine ait SEM(BES)-noktasal EDS analizlerinden de (Şekil 6.13-6.15) matrisin Fe ağırlıklı olduğu ve yüksek alaşım elementi içeriğinden dolayı suverme sonrası dahi belirgin olarak mikroyapıdaki koyu küresel alanların V ağırlıklı karbürler, daha açık küresel alanlarında Cr ağırlıklı karbürler olduğu tespit edilmiştir.

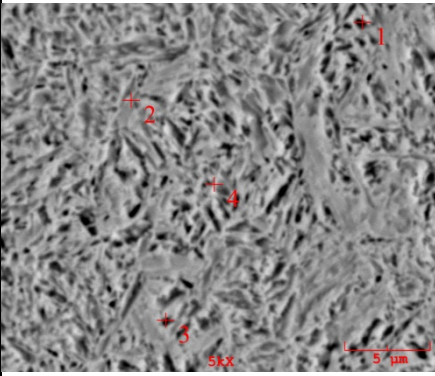
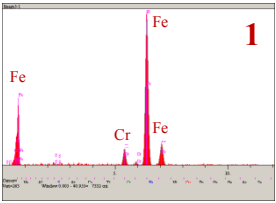
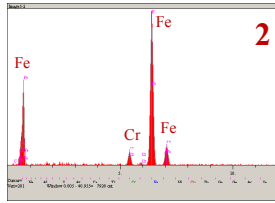
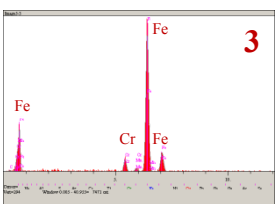
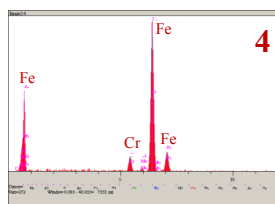
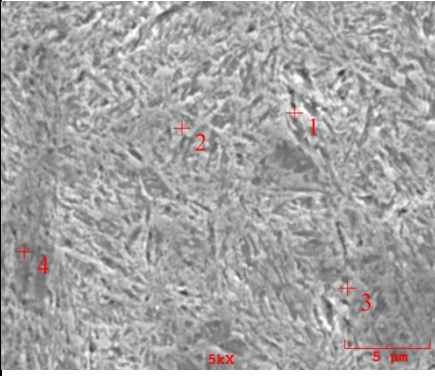
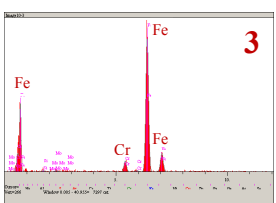
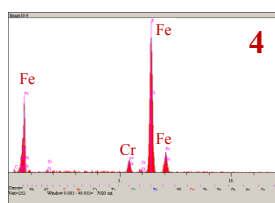
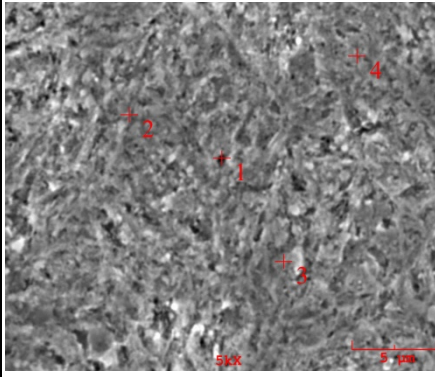
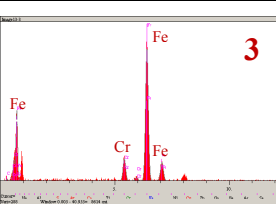
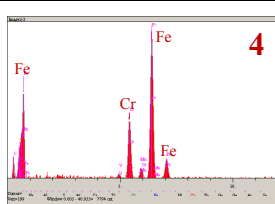
Her iki grup soğuk iş takım çeliğinin noktasal EDS analizlerinde temperleme sonucu matris içindeki karbür oluşturuçu alaşım elementlerinin ağırlıkça yüzdelerinin düştüğü görülmektedir. Bununda çökelen ikincil karbürlerden dolayı olduğu kuvvetle muhtemeldir.

Deneç No	Calmax® noktasal EDS analizleri		
	BES,5000X	EDS Analizleri	
<b>Suverme</b>			
1			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 15 dakika)</b>			
4			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 60 dakika)</b>			
7			
			

şekil 6.10. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

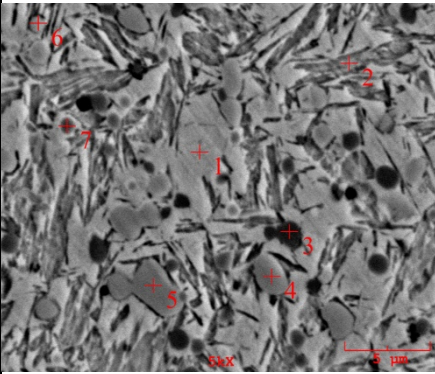
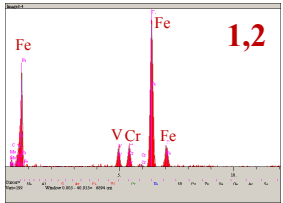
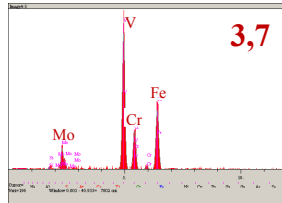
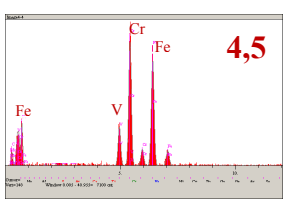
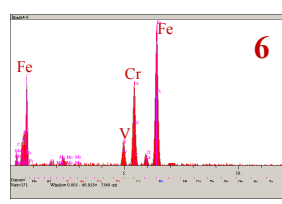
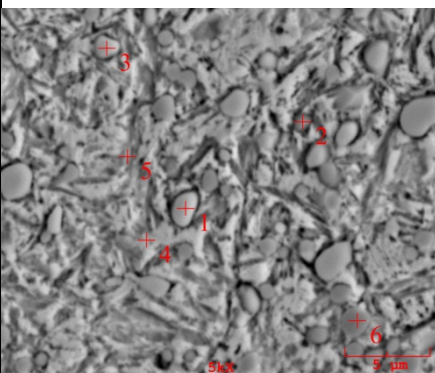
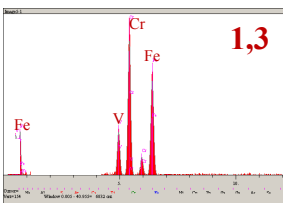
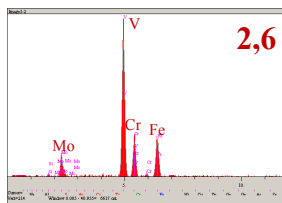
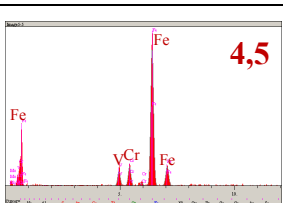
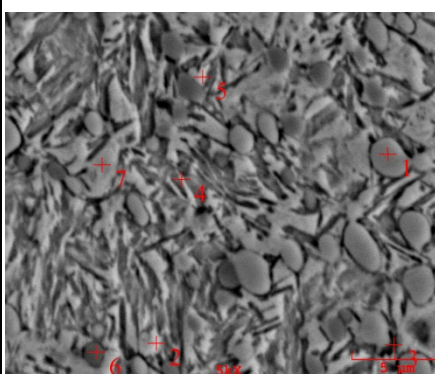
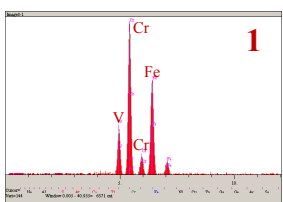
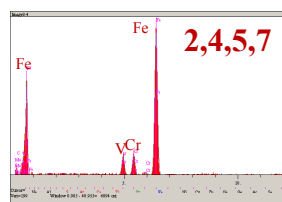
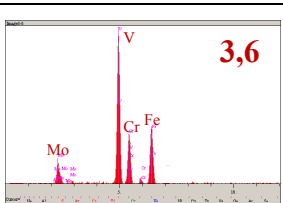
Deneç No	Calmax® noktasal EDS analizleri	
	BES,5000X	EDS Analizleri
<b>Suverme + Çift Temperleme(200°C)</b>		
2		   
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 15 dakika) + Çift Temperleme(200°C)</b>		
5		   
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 60 dakika) + Çift Temperleme(200°C)</b>		
8		   

Şekil 6.11. Calmax® soğuk iş takım çelığının “2-5-8” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

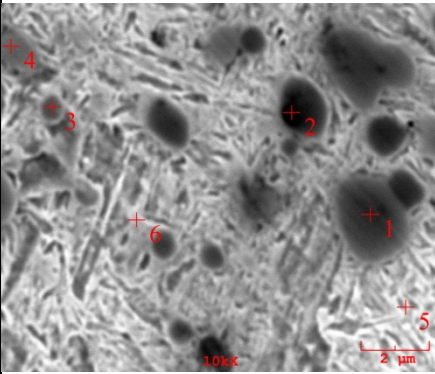
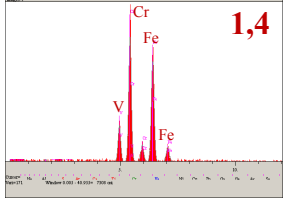
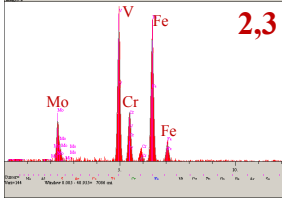
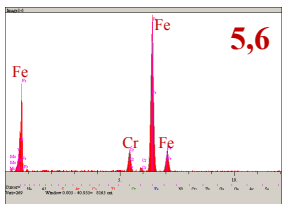
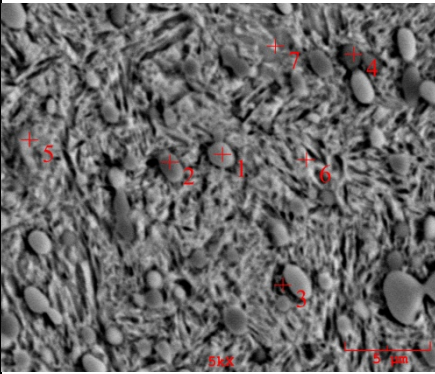
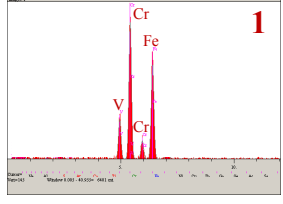
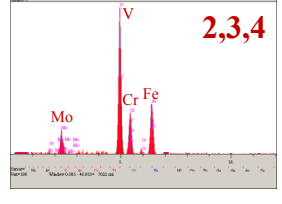
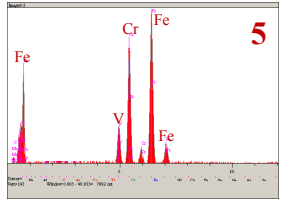
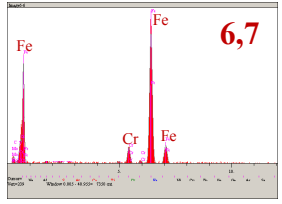
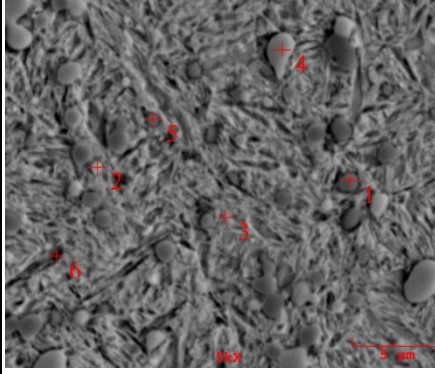
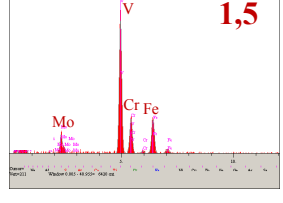
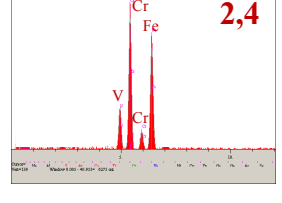
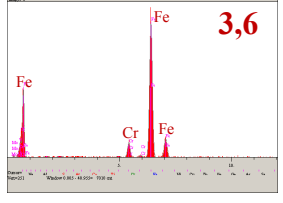
Deneç No	Calmax® noktasal EDS analizleri		
	BES,5000X	EDS Analizleri	
<b>Suverme + Çift Temperleme(525°C)</b>			
3			
			
		<b>Suverme + Sıfırlatı İşlem(-197°C / 15 dakika) + Çift Temperleme(525°C)</b>	
		6	
			
<b>Suverme + Sıfırlatı İşlem(-197°C / 60 dakika) + Çift Temperleme(525°C)</b>			
9			
			

Şekil 6.12. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “3-6-9” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

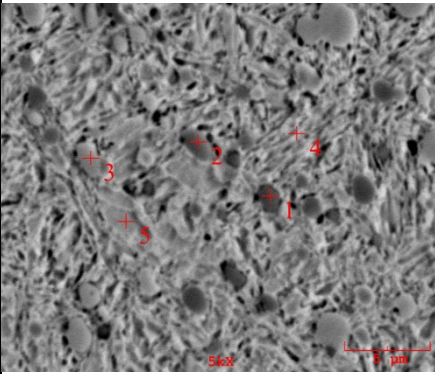
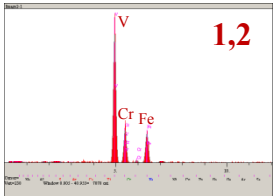
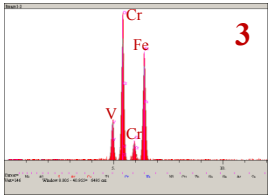
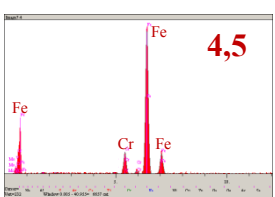
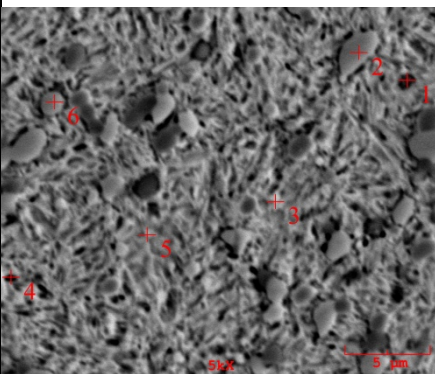
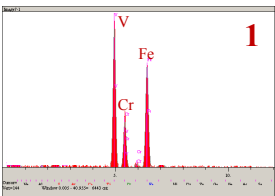
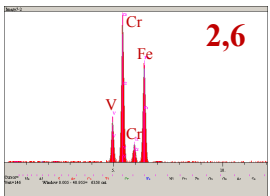
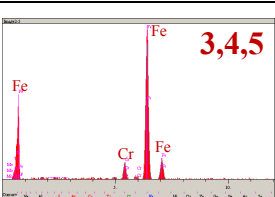
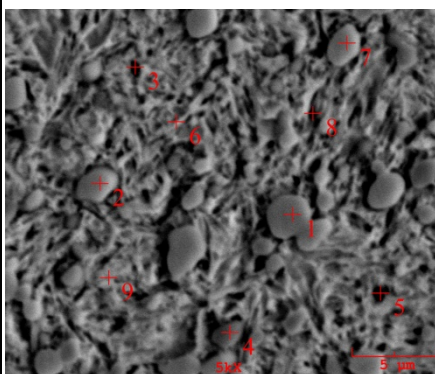
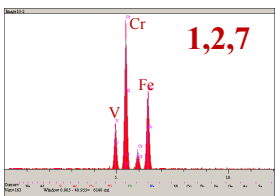
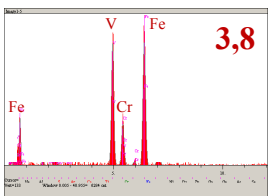
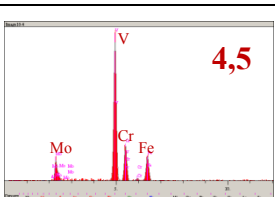
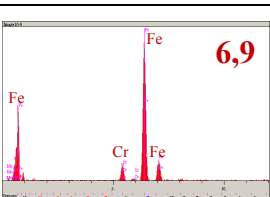


Deneç No	Vanadis 4 Extra® noktasal EDS analizleri		
	BES,5000X	EDS Analizleri	
<b>Suverme</b>			
<b>1</b>			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 15 dakika)</b>			
<b>4</b>			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 60 dakika)</b>			
<b>7</b>			
			

Şekil 6.13. Vanadis 4E® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

Deneç No	Vanadis 4 Extra® noktasal EDS analizleri		
	BES,5000X	EDS Analizleri	
<b>Suverme + Çift Temperleme(200°C)</b>			
2			
			
<b>Suverme + Sıfıraltı İşlem(-197°C / 15 dakika) + Çift Temperleme(200°C)</b>			
5			
			
<b>Suverme + Sıfıraltı İşlem(-197°C / 60 dakika) + Çift Temperleme(200°C)</b>			
8			
			

Şekil 6.14. Vanadis 4E® soğuk iş takım çeliğinin “2-5-8” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

Deneç No	Vanadis 4 Extra® noktasal EDS analizleri		
	BES,5000X	EDS Analizleri	
<b>Suverme + Çift Temperleme(525°C)</b>			
3			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 15 dakika) + Çift Temperleme(525°C)</b>			
6			
			
<b>Suverme + Sıfırlı İşlem(-197°C / 60 dakika) + Çift Temperleme(525°C)</b>			
9			
			

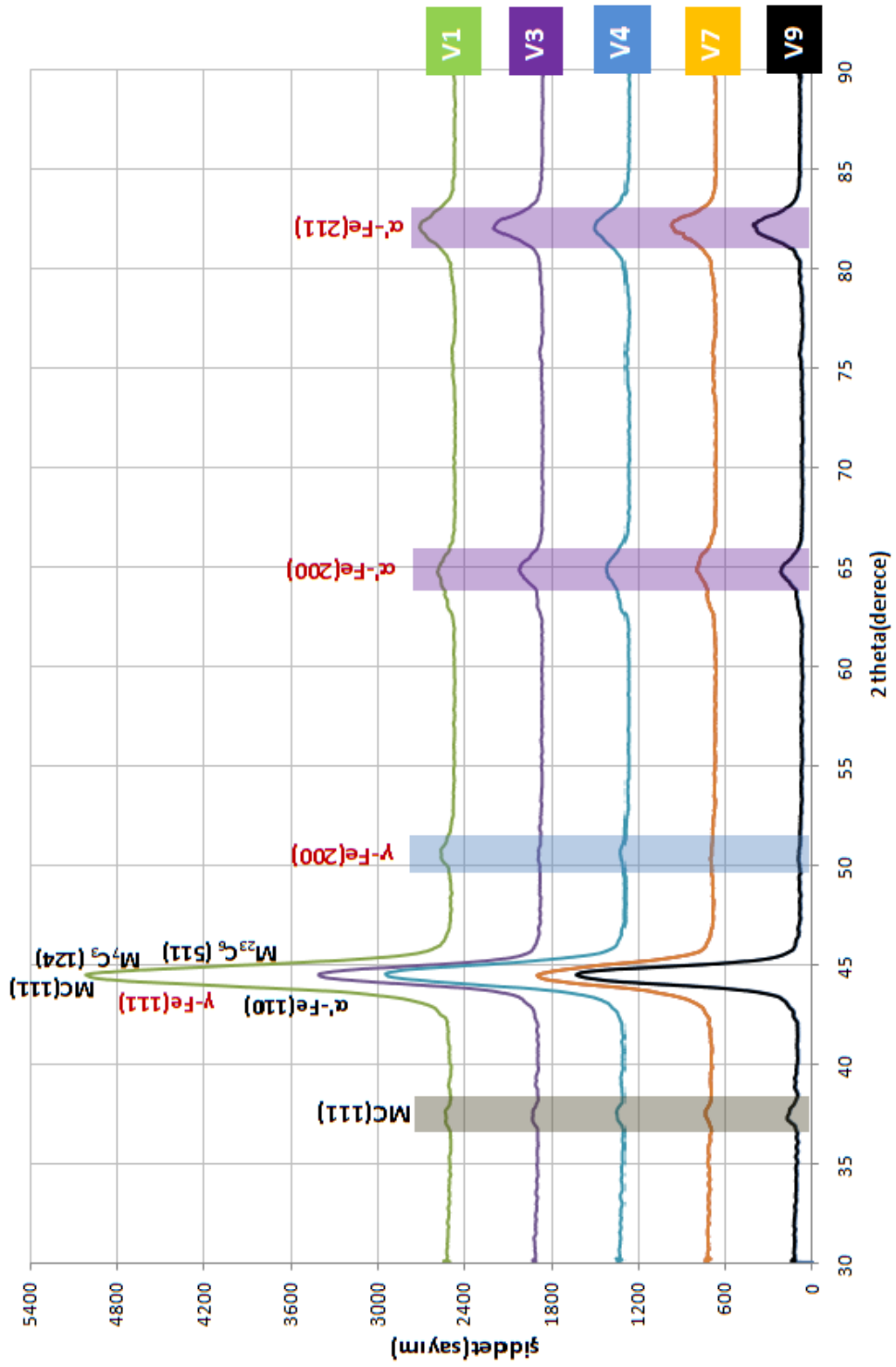
Şekil 6.15. Vanadis 4E® soğuk iş takım çeliğinin “3-6-9” nolu deneylerindeki SEM-noktasal EDS analizleri

### 6.1.3. X-ışını difraksiyon analizi sonuçları

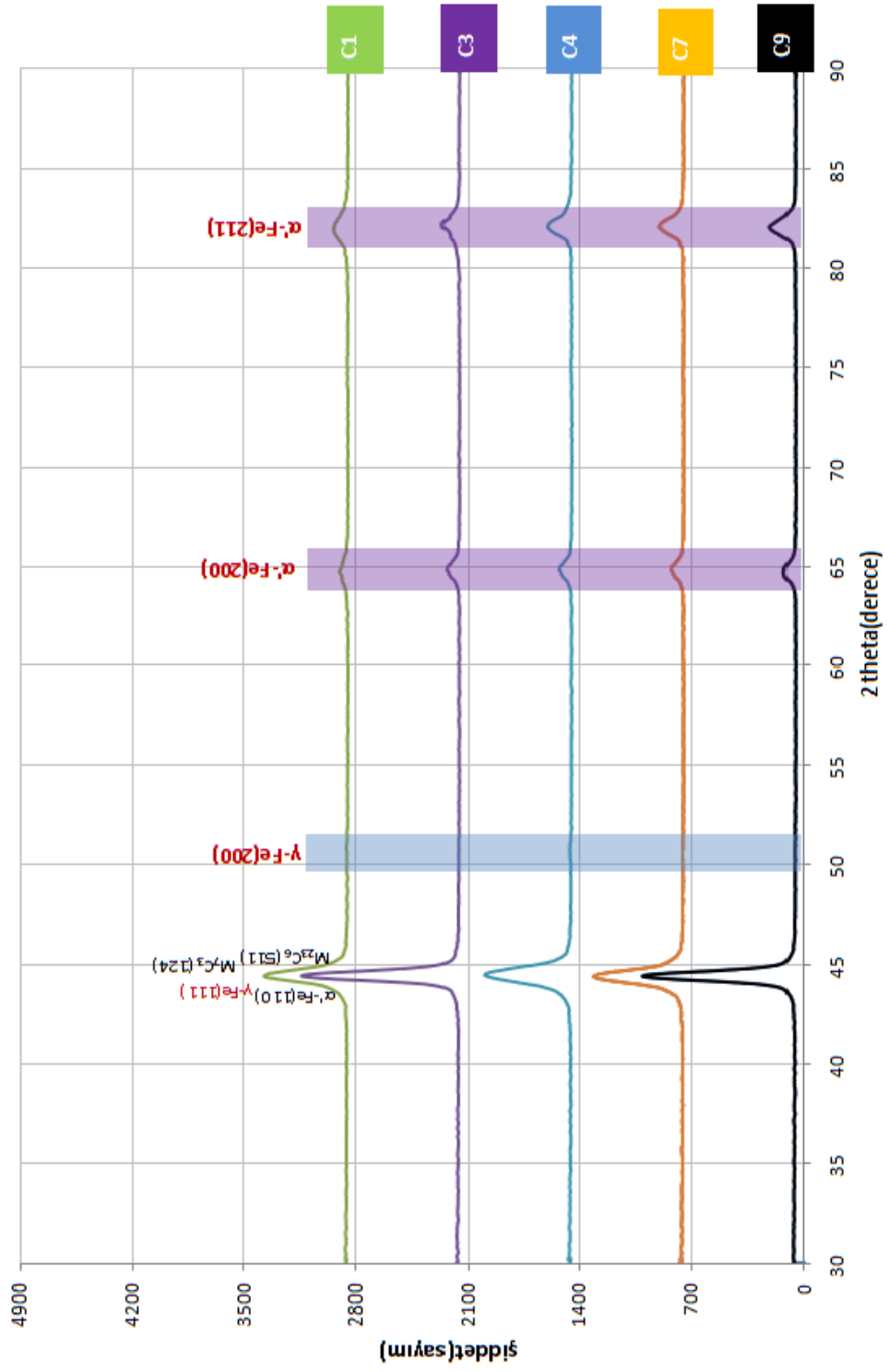
Her iki soğuk iş takım çeliği grubuna da uygulanan farklı ısı işlem basamaklarına sahip deney numaraları “1-3-4-7-9” ait numunelerdeki kalıntı osteniti tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen XRD çalışmalarının difraksiyon paternleri Vanadis soğuk iş takım çeliği için Şekil 6.17’ de, Calmax soğuk iş takım çeliği içinde Şekil 6.18’ de verilmiştir.

Şekil 6.16 de verilen Vanadis soğuk iş takım çeliğine ait karşılaştırmalı difraksiyon paternlerinde martensit( $\alpha'$ -Fe), kalıntı ostenit( $\gamma$ -Fe) ve  $M_7C_3$ - $M_{23}C_6$  karbür bileşiklerine ait pikler kırınım düzlemleriyle birlikte belirlenmiştir. Burada “1-4-7” nolu deney grubunun XRD paternlerinde uygulanan sıfırlı ısı işlemin sonucu yalnız ostenit pikini içeren 2 theta  $50,788^\circ$  deki pikinin şiddetinin azalarak;  $64,028^\circ$  ve  $82,341^\circ$  deki martensit piklerinin şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca temperleme sonucu karbür çökmesine bağlı olarak “3-9” nolu deneylerde karbür bileşiklerine ait piklerin şiddetlerinin arttığı aynı zamanda “3” nolu deneyde konvansiyonel ısı işlem ile de kalıntı ostenitin martensite dönüştüğünü ostenit ve martensit piklerinin değişimi göstermektedir.

Şekil 6.17 de verilen Calmax soğuk iş takım çeliğine ait karşılaştırmalı difraksiyon paternlerinde martensit( $\alpha'$ -Fe), kalıntı ostenit( $\gamma$ -Fe) ve  $M_7C_3$ - $M_{23}C_6$  karbürlerine ait pikler kırınım düzlemleriyle birlikte gösterilmiştir. Burada beklenildiği gibi suverilme sonrası yapıda martensite dönüşmeden kalacak ostenit miktarının az olması nedeniyle “1-4-7” nolu deneylerde sıfırlı ısı işleminin etkisi yalnız kalıntı ostenit pikini içeren  $50,788^\circ$  deki pik şiddetinde yok denilebilecek kadar az bir değişikliğe neden olmuştur. Temperleme sonucu karbür çökmesinin beklenildiği deney no “3-9” da ise  $M_7C_3$ - $M_{23}C_6$  karbür birleşiklerine ait piklerin şiddetlerinde artış gerçekleşmiştir.



Şekil 6.16. Vanadis 4E® soğuk iş takım çeliğinin “1-3-4-7-9” nolu deneylerine ait XRD paternleri



Şekil 6.17. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-3-4-7-9” nolu deneylerine ait XRD paternleri

Tezin literatür kısmında da bahsedildiği gibi ASTM E975-03 standardına göre kalıntı ostenit hacim oranının belirlenmesinde sadece martensit/ferrit ve ostenit piklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Kalıntı ostenit hacim oranının belirlenmesi amacıyla martensit (200) ve (211) düzlemlerindeki, ostenit içinde (111) ve (200) düzlemlerindeki pikler kullanılmıştır. Bu fazların belirlenmesinde kullanılan ASTM kart numaraları ve ayrıca kalıntı ostenit hesaplamalarında kullanılan piklerin difraksiyon açıları( $2\theta$ ), difraksiyon düzlemleri(hkl), düzlemler arası mesafe(d) değerleri Tablo 6.1’ de verilmiştir.

Tablo 6.1. X-ışını hesaplamalarında kullanılan fazlar ve ASTM kart değerleri

Pik	Kart No	$2\theta(^{\circ})$	(hkl)	d(Å)
$\alpha'$ -Fe	01-087-0721	64,028	(200)	1,4331
		82,341	(211)	1,1701
$\gamma$ -Fe	00-052-0513	43,759	(111)	2,1130
		50,788	(200)	1,8299

Soğuk iş takım çeliklerinin farklı ısıl işlem basamakları içeren “1-3-4-7-9” nolu deney numunelerinin kalıntı ostenit hacim oranı değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.2’ de verilmiştir. Beklenildiği gibi suverme işlemi sonucunda en yüksek kalıntı ostenit hacim oranı elde edilmiştir. İçerdiği yüksek karbon ve diğer alaşım elementlerinin etkisiyle beklenildiği gibi suverme sonucunda Vanadis’ in, Calmax’a göre daha yüksek oranda kalıntı ostenit hacim oranına sahip olduğu görülmüştür. Konvansiyonel ısıl işlem(deney no 3) ile kalıntı ostenit hacim oranı % 5’ in altına düşmektedir. Her iki soğuk iş takım çeliği grubunda da suverme sonrası uygulanan 60 dakika sıfırlı işlem kalıntı ostenit değerlerini, konvansiyonel ısıl işleme kıyasla daha da düşürmüştür. Calmax soğuk iş takım çeliğine 15 ve 60 dakika uygulanan sıfırlı işlemin kalıntı ostenit değerine etkisi yalnız temperleme uygulanmasıyla(deney no 3) elde edilen değerinin çok daha altında olduğu görülmüştür. Vanadis soğuk iş takım çeliğinde bu durumun gözlenememesinin nedeni, Vanadis’ in teorik Mf sıcaklığının Calmax’ dan daha düşük olmasına bağlanmıştır.

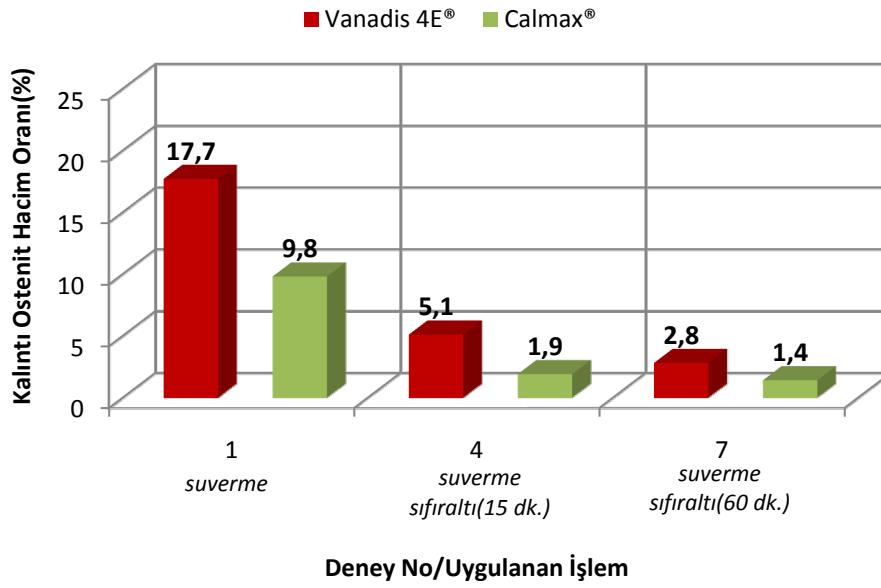
Her iki soğuk iş takım çeliğinin de “9” nolu deneyinde kalıntı ostenitin ihmal edilebilecek kadar az seviyelere düştüğü gözlenmiştir. Sıfırlı işlemin kalıntı ostenit değerlerini; konvansiyonel ısıtma işlemiyle kıyasla daha fazla düşürdüğü açık olmakla beraber sıfırlı işlem süresinin artmasıyla, kalıntı ostenitin daha da azaldığı görülmüştür (Bkz. Şekil 6.18-6.19).

Tablo 6.2. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-3-4-7-9” nolu deney numunelerinin kalıntı ostenit hacim oranları

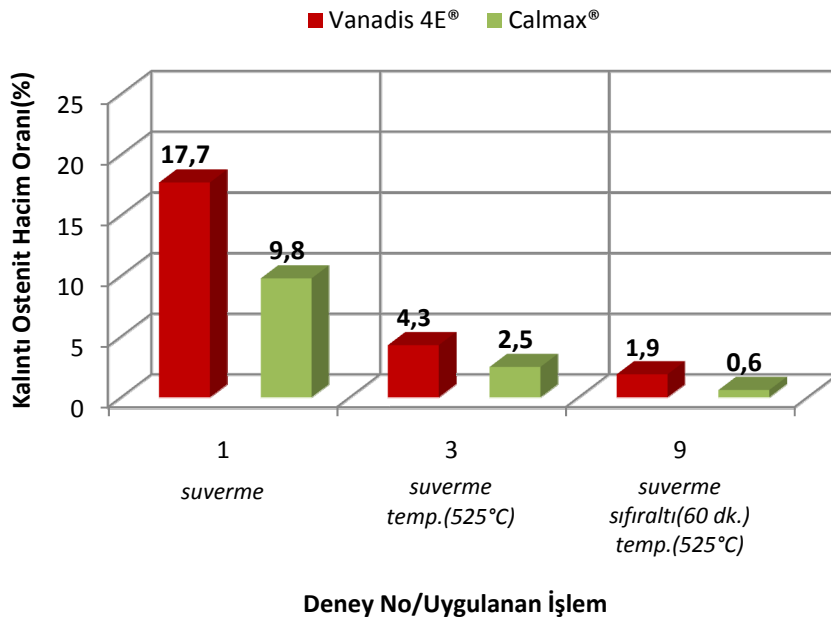
Deney No	Uygulanan İşlem	Kalıntı Ostenit Hacim Oranı,%	
		Vanadis 4 Extra®	Calmax®
1	Suverme	17,7	9,8
3	Suverme Temperleme (525°C)	4,3	2,5
4	Suverme Sıfırlı İşlem(15 dk.)	5,1	1,9
7	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.)	2,8	1,4
9	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.) Temperleme(525°C)	1,9	0,6

Not:Hesaplamalardaki hata payı ±0,5 dir.





Şekil 6.18. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” nolu deneylerine ait kalıntı ostenit hacim oranları



Şekil 6.19. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-3-9” nolu deneylerine ait kalıntı ostenit hacim oranları

## 6.2. Mekanik Deney Sonuçları

### 6.2.1. Mikrosertlik deneyi sonuçları

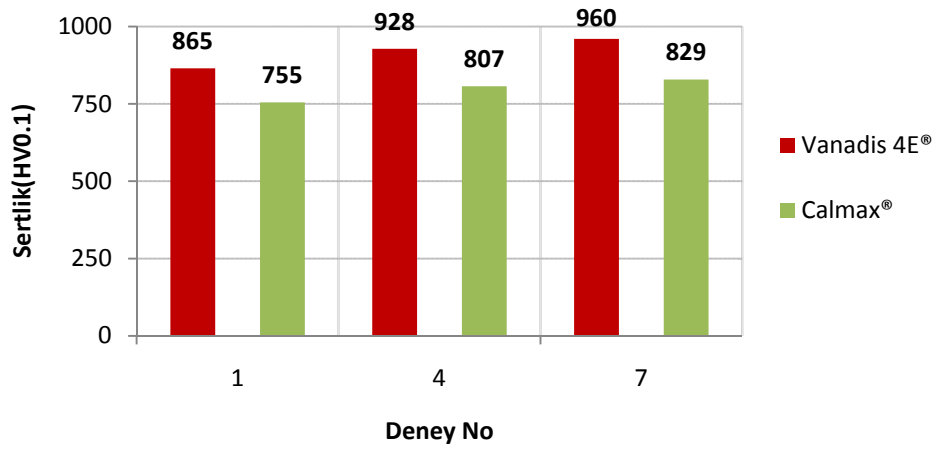
Vanadis ve Calmax soğuk iş takım çeliklerine uygulanan deney basamaklarına göre ölçülen mikrosertlik değerleri Tablo 6.3' de verilmiştir. Sıfırlı işlemin sertlik üzerine pozitif etkisi her iki grup çelik içinde "1-4-7", "2-5-8", "3-6-9" deney gruplandırılması yapılmak suretiyle Şekil 6.20-6.22' de gösterilmiştir.

Her iki grup soğuk iş takım çeliğinin de suverilmiş haldeki sertliği, literatür değerleriyle uyumludur. Şekil 6.20' de grafikte görülebildiği gibi sıfırlı işlemlerle, kalıntı ostenitin martensite dönüşmesi sonucu sertlik artmıştır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22' de ki grafiklerde görülebildiği üzere de sıfırlı işlem ile sertlikteki artış, hem kalıntı ostenitin martensite dönüşümünden hem de temperleme uygulanması sonucu sıfırlı işlemin etkisiyle çökelen küçük ikincil karbürlerden kaynaklandığı muhtemeldir.

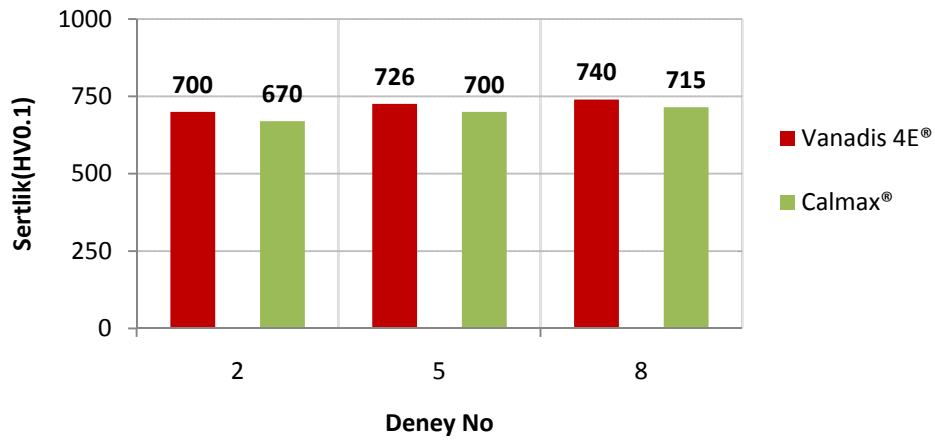
Her iki grup soğuk iş takım çeliğine uygulanan deneyleri "1-2-3", "4-5-6", "7-8-9" şeklinde bir deney gruplandırılması yaparak incelediğimizde ise temperlenmiş martensit yapısının sertliği düşürücü etkisinin, kalıntı ostenitin martensite dönüşmesi ve karbür çökmesi sonucu kazanılan sertlik artışından daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 6.3. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliklerine uygulanan deney basamaklarına göre ölçülen mikrosertlik değerleri

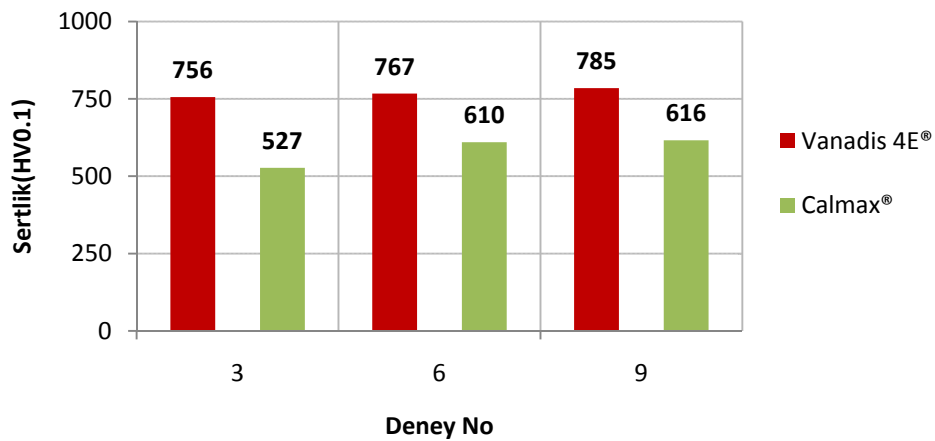
Deney No	Uygulanan İşlem	Sertlik(HV0.1)	
		Vanadis 4 Extra®	Calmax®
Ref.	İşlem görmemiş	245	210
1	Suverme	865	755
2	Suverme Temperleme (200°C)	700	670
3	Suverme Temperleme (525°C)	756	527
4	Suverme Sıfırtı İşlem(15 dk.)	928	807
5	Suverme Sıfırtı İşlem(15 dk.) Temperleme(200°C)	726	700
6	Suverme Sıfırtı İşlem(15 dk.) Temperleme(525°C)	767	610
7	Suverme Sıfırtı İşlem(60 dk.)	960	829
8	Suverme Sıfırtı İşlem(60 dk.) Temperleme(200°C)	740	715
9	Suverme Sıfırtı İşlem(60 dk.) Temperleme(525°C)	785	616



Şekil 6.20. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri



Şekil 6.21. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “2-5-8” nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri



Şekil 6.22. Vanadis® ve Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “3-6-9” nolu deneylerine ait mikrosertlik değerleri

### 6.2.2. Aşınma deneyi sonuçları

Aşınma deneyi sonrası sıfırlı ısıtma işleminin etkisi görebilmek amacıyla diğer karakterizasyon deneylerindeki gibi gruplandırdığımız ısıtma işlem deney basamaklarının, sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızı değerleri Vanadis soğuk iş takım çeliği için Tablo 6.4’ de, Calmax soğuk iş takım çeliği için de Tablo 6.5’ de gerekli hesaplamaların yapılması sonucunda verilmiştir.

Vanadis takım çeliği için Tablo 6.4’ de görülebildiği gibi sürtünme katsayısındaki değerlerle aşınma hızı değerleri doğru orantılı olarak değişmektedir. Şekil 6.23 de oluşturulan aşınma hızı grafiğine baktığımızda deney gruplarından “1-4-7” de sıfırlı işleminin etkisiyle martensite dönüşen kalıntı ostenit, yapıyı daha da gevreklettiği için yapıda bulunan özellikle ufak karbürlerin matristen koparak arayüzeyde aşınma ürünleri şeklinde bulunması aşınma hızı değerlerini arttırmıştır. Şekil 6.25’ deki aşınma izinin SEM mikrograflarında bu olguyu destekler niteliktedir. Buna karşın 525°C de temperleme uygulanmış deney grubu “3-6-9” da sıfırlı işlemin etkisiyle aşınma hızlarının düştüğü görülmüştür. Burada aşınma hızını düşüren muhtemel mekanizmasında temperleme sonucu sıfırlı işlemin etkisiyle nispeten irilere kıyasla ufak karbürlerin matrisle tutunmasının arttığı ve bunun sonucu olarak aşınma arayüzeyinde karbürlerin serbest halde bulunmaması düşük aşınma hızı değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu esnada çökelen matrisle tam uyum içindeki küçük sert ikincil karbürlerinde (<1µm) aşınma hızı değerlerini düşürdüğü kuvvetle muhtemeldir. Özellikle bu öngörülerini deney no 9’ un Şekil 6.9’ daki SEM mikrografları ve Şekil 6.26 daki aşınma izi fotoğrafları destekler niteliktedir.

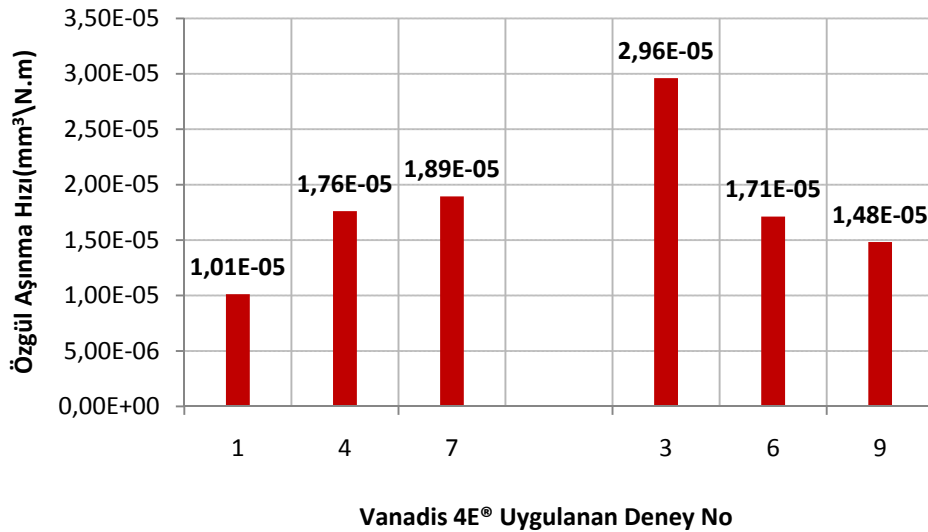
Calmax takım çeliği için verilen Tablo 6.5’ de ki aşınma hızı değerleri incelendiğinde; deney gruplarından “1-4-7” de sıfırlı işleminin etkisiyle martensite dönüşen kalıntı ostenitten dolayı yapı daha da sertleşmekte ve gevrekleşmektedir. Vanadis soğuk iş takım çeliğinde olduğu gibi burada da abrazif aşınmanın baskın(Bkz. Şekil 6.27) olmasından dolayı karbürlerin aşınma arayüzeyinde matristen koparak buldukları muhtemeldir. Fakat aşınma hızı değerlerinin, sıfırlı işlemin etkisiyle düşmesinde yapıdaki bulunan muhtelif az karbürlerin belirgin olmadığı ve bunun yerine aşınma hızı değerlerinin düşmesinde martensitin sertliğinin

rol oynadığı öngörülmüştür. Yani sıfırlatma işleminin etkisine bağlı olarak artan sertlikle beraber aşınma hızı değerleri düşmüştür. Deney grubu “2-5-8” de ise temperleme uygulanması sonucu sıfırlatma işleminin etkisiyle aşınma hızı değerleri azalmaktadır. Temperlemenin sertliği düşürücü etkisinin sıfırlatma işlemi ile bir miktar tolere edilmesi, burada sıfırlatma işleminin etkisiyle artan matris sertliğinin ve çökelen matrisle uyumlu sert ikincil karbürlerin aşınma direncini artırmada rol oynadığı kuvvetle muhtemeldir. Şekil 6.28’deki OM aşınma izi görüntüleri abrazyonun baskın olduğunu göstermekte ve SEM mikrografları temperleme uygulanması suretiyle sıfırlatma işlem süresinin artmasının, yapıdaki az miktarda bulunan karbürlerin matrise tutunurluğunun arttırdığını göstermiştir (Şekil 6.28).

Hem temperleme uygulanmış hemde uygulanmamış deneylerde; yüksek alaşımlı Vanadis soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızı değerlerini, büyük oranda yapıdaki fazla miktarda bulunan küçük alaşım karbürlerinin belirlediği gözlemlenmiştir. Buna karşın daha şiddetli abrazyon aşınma mekanizmasına sahip kısmen düşük alaşımlı Calmax soğuk iş takım çeliğinde, aşınma hızı değerlerinin matrisin sertliği ile belirginleştiği görülmüştür. Calmax soğuk iş takım çeliğinin yapısında az miktarda bulunan hakim iri karbür morfolojisi aşınma esnasında karbürlerin aşınma arayüzeyinde bulunma ihtimalini düşürmekte, bundan dolayı da aşınma hızı değerlerinin matrisin sertliği ile belirginleştiği öngörüsü hakimdir. Fakat yine de aşınma esnasında matristen koparak arayüzeyde bulunan az miktardaki iri karbürler, şiddetli abrazyon aşınma mekanizmasının baskın olmasına neden olmuştur.

Tablo 6.4. Vanadis® soğuk iş takım çeliğinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri

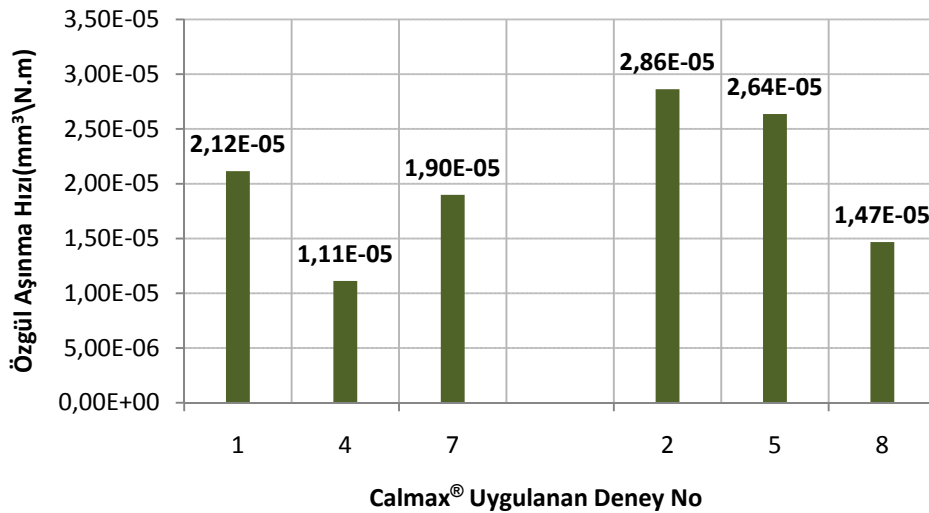
Deney No	Uygulanan İşlem	Vanadis 4 Extra®	
		Sürtünme Katsayısı	Özgül Aşınma Hızı(mm <sup>3</sup> /N.m)
<b>Temperlenme uygulanmamış deneylerdeki sıfırlı ısı işlemin etkisi</b>			
1	Suverme	0,323	1,012E-05
4	Suverme Sıfırlı İşlem(15 dk.)	0,352	1,761E-05
7	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.)	0,362	1,894E-05
<b>Temperleme uygulanmış deneylerdeki sıfırlı ısı işlemin etkisi</b>			
3	Suverme Temperleme (525°C)	0,503	2,961E-05
6	Suverme Sıfırlı İşlem(15 dk.) Temperleme(525°C)	0,339	1,712E-05
9	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.) Temperleme(525°C)	0,169	1,483E-05



Şekil 6.23. Vanadis® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” ve “3-6-9” deney gruplarına ait aşınma hızı değerleri

Tablo 6.5. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri

Deney No	Uygulanan İşlem	Calmax®	
		Sürtünme Katsayısı	Özgül Aşınma Hızı(mm <sup>3</sup> /N.m)
<b>Temperlenme uygulanmamış deneylerdeki sıfırlı ısı işlemin etkisi</b>			
1	Suverme	0,140	2,115E-05
4	Suverme Sıfırlı İşlem(15 dk.)	0,092	1,112E-05
7	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.)	0,119	1,899E-05
<b>Temperleme uygulanmış deneylerdeki sıfırlı ısı işlemin etkisi</b>			
2	Suverme Temperleme (200°C)	0,156	2,863E-05
5	Suverme Sıfırlı İşlem(15 dk.) Temperleme(200°C)	0,149	2,636E-05
8	Suverme Sıfırlı İşlem(60 dk.) Temperleme(200°C)	0,111	1,467E-05

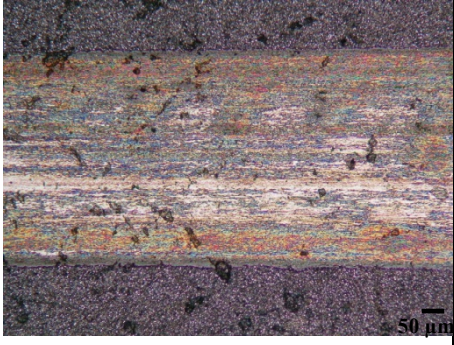
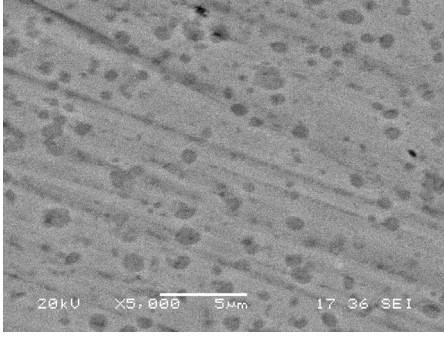
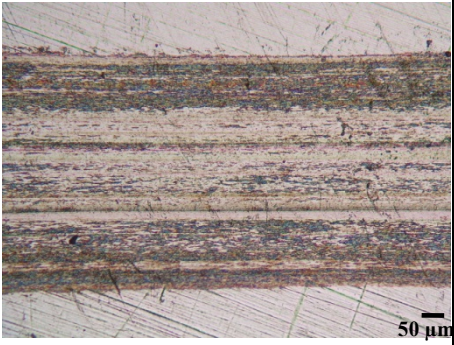
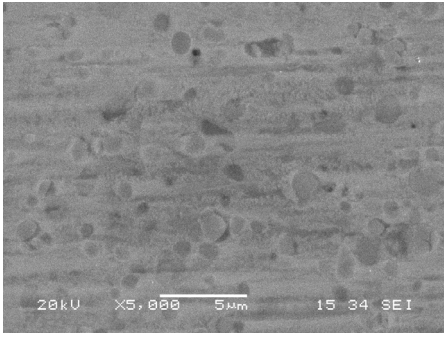
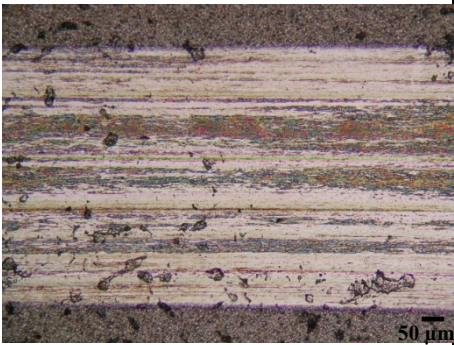
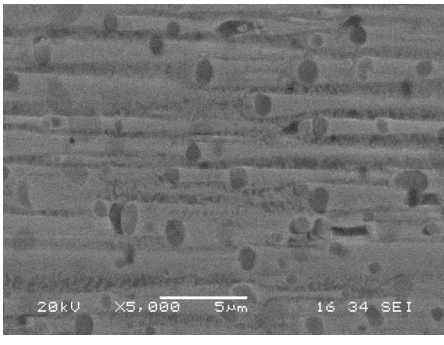


Şekil 6.24. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin “1-4-7” ve “2-5-8” deney gruplarına ait aşınma hızı değerleri

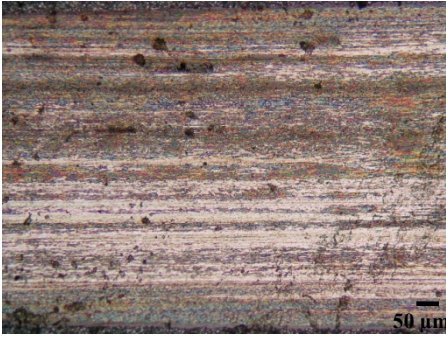
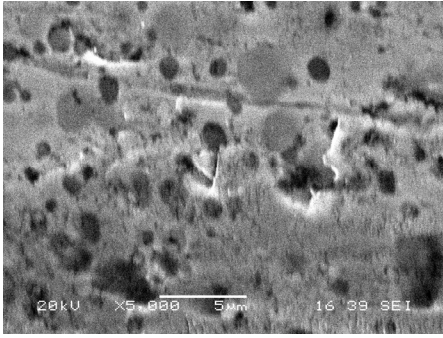
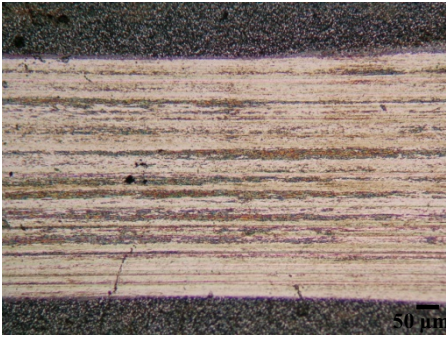
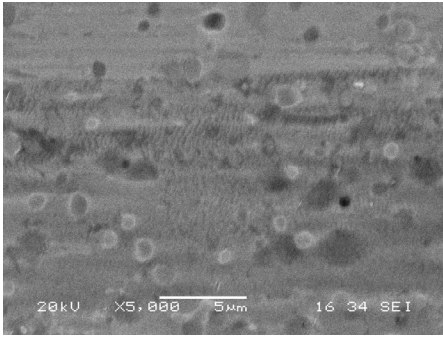
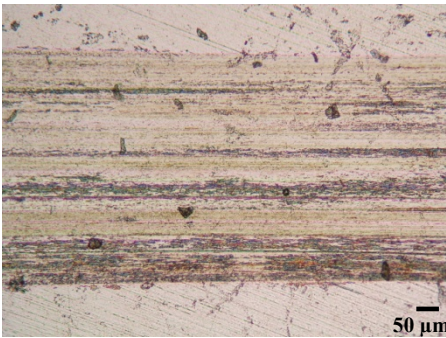
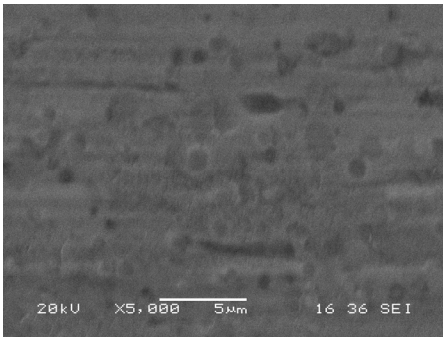


Vanadis soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemeleri Şekil 6.25-6.26 da verilmiştir. Deney gruplarının tamamına ait OM ve SEM mikrograflarından görüldüğü üzere baskın abrazif aşınma sonucu pulluklama ile oluşan yivler ve özellikle ufak karbürlerin matristen koptuğu gözlenmektedir. Temperlenmiş deney grubuna ait “3-6-9” nolu deneylerde aşınma izlerinde sıfırlı işlem süresinin artmasıyla yüzeyden kopan karbürlerin azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar aşınma hızı değerleriyle de bağdaşmaktadır.

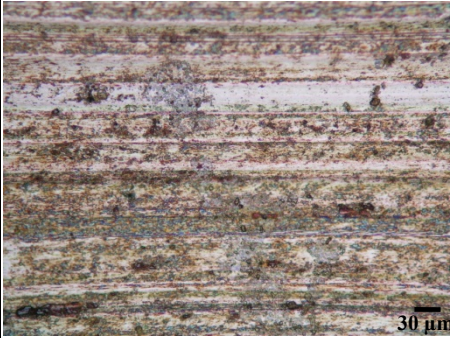
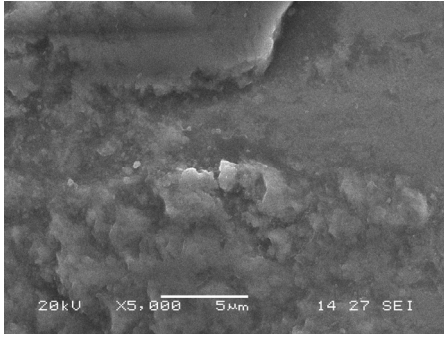
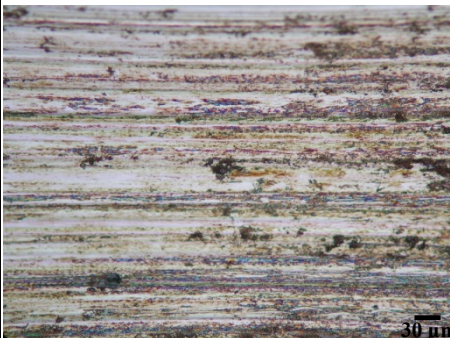
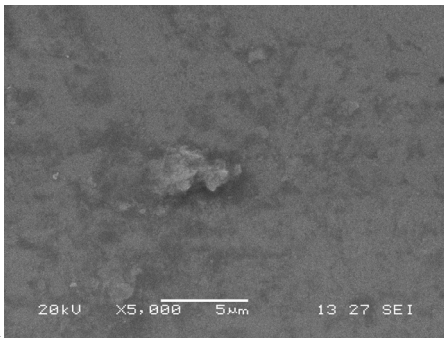
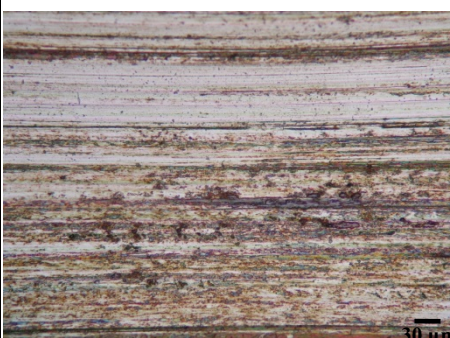
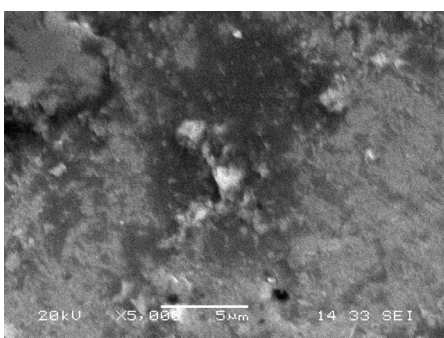
Calmax soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemeleri Şekil 6.27-6.28 de verilmiştir. Deney gruplarının tamamına ait OM ve SEM mikrograflarından görüldüğü üzere muhtemelen iri karbürlerden kaynaklı, şiddetli abrazif aşınma ve pulluklama ile oluşan yivler görülmektedir.

Deneç No	Uyg. İştem	Vanadis 4 Extra®	
		OM	SEI, 5000X
1	Suverme		
4	Suverme + Sıfıraltı iştem (15 dk.)		
7	Suverme + Sıfıraltı iştem (60 dk.)		

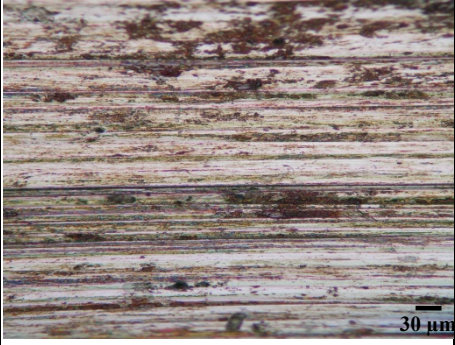
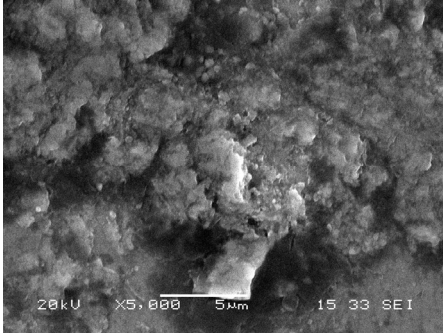
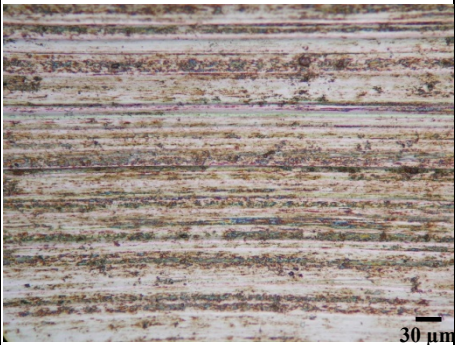
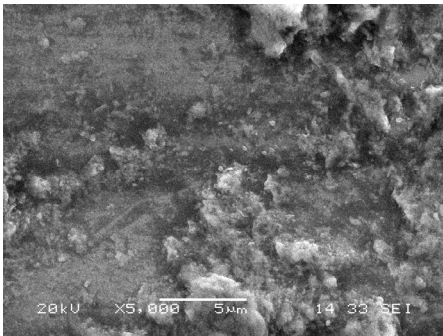

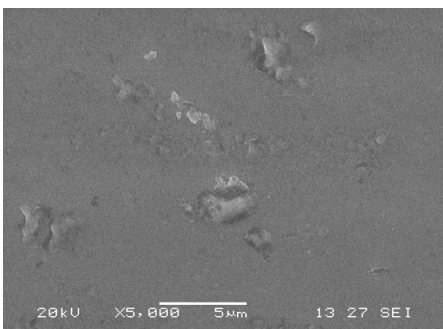
Şekil 6.25. Vanadis® soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları

Deneç No	Uyg. İştem	Vanadis 4 Extra®	
		OM	SEI, 5000X
3	Suverme + Temperleme(525°C)		
6	Suverme + Sıfıraltı iştem(15 dk.) + Temperleme (525°C)		
9	Suverme + Sıfıraltı iştem(60 dk.) + Temperleme (525°C)		

Şekil 6.26. Vanadis® soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları

Deneý No	Uyg. İştem	Calmax®	
		OM	SEI, 5000X
1	Suverme		
4	Suverme + Sıfıraltı işlem(15 dk.)		
7	Suverme + Sıfıraltı işlem(60 dk.)		

Şekil 6.27. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları

Deneç No	Uyg. İştem	Calmax®	
		OM	SEI, 5000X
2	Suverme + Temperleme(200°C)		
5	Suverme + Sıfıraltı iştem(15 dk.) + Temperleme (200°C)		
8	Suverme + Sıfıraltı iştem(60 dk.) + Temperleme (200°C)		

Şekil 6.28. Calmax® soğuk iş takım çeliğinin aşınma izlerinin OM ve SEM incelemelerine ait mikrografları

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

İncelenen soğuk iş takım çeliklerinde yalnız sıfırlı işlem uygulaması ile kalıntı ostenitin büyük oranda martensite dönüştüğü görülmüştür. Ayrıca sıfırlı işlem süresinin artmasıyla beraber kalıntı ostenitin daha da azaldığı tespit edilmiştir. Sıfırlı işlem ve devamında uygulanacak temperleme ile de kalıntı ostenitin neredeyse tamamının elimine edilebildiği görülmüştür.

İncelenen soğuk iş takım çeliklerinin sertlik değerlerinin sıfırlı işlem süresinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Buda, kalıntı ostenitin martensite dönüşümü ve akabinde temperleme uygulanması sonucu ilave çökelen ikincil karbürlere bağlanmıştır.

SEM görüntüleri de akabinde temperleme uygulanmak suretiyle sıfırlı ısıl işleminin etkisiyle, yapıdaki küçük ikincil karbürlerin dağılımının homojenleşerek arttığını göstermektedir. Ayrıca burada karbürlerin etrafındaki belirgin sınırların(tabakanın) ortadan kalkarak karbür-matris uyumunun arttığı gözlemlenmiştir. Buda aşınma esnasında karbürlerin matrise tutunmasını maksimize etmektedir. Böylece; temperleme uygulanmış deneylerde aşınma direncindeki artışında sıfırlı işlem süresinin artmasıyla, arttığı görülmüştür.

Karakterizasyon deneyleri sonucunda her iki çelik grubu içinde sertlik-kalıntı ostenit-aşınma arasında uyumlu bir bağ kurulabilmiş ve metalografik incelemelerde bunu desteklemiştir. Nihayetinde özellikle yüksek alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinin ısıl işleminde; sıfırlı işleminin, endüstride sıklıkla uygulanan konvansiyonel ısıl işleme ilave edilemesi , mikroyapı ve mekanik özellikler açısından pozitif sonuçlar ortaya çıkaracağı gözlemlenmeler sonucunda öngörülmektedir.

## 7.2. Öneriler

Bu çalışmada yapılan deneylere ilave olarak;

-Uygulanan sıfırtı işlem süresinin çeşitlendirilmesinin(120-240-360 dakika vb.) optik ve mekanik özelliklerde nasıl bir değişikliğe sebep olacağı ve bunun sonucunda optimum sıfırtı işlem süresinin belirlenmesi incelenebilir.

-Uygulanan sıfırtı işlemin meydana getirdiği boyutsal değişimin(distorsiyonun) minimum şekilde nasıl elimine edilebileceği de araştırılabilir.

-Sıfırtı işleminin gerçekleştirildiği azot dışındaki diğer ortam koşullarının(helyum, hidrojen vb.) çeliklerin optik ve mekanik özelliklerinde azot ortamına kıyasla sağladığı avantajlar ve dezavantajlar araştırılabilir.

-Deney numunelerine, farklı yüklerde ve daha uzun mesafelerde aşınma deneyi yapılması aşınma mekanizmasını açıklamakta daha da destekleyici ve açıklayıcı olabilir.

-Darbe deneyi yapılması, sıfırtı işleminin tokluk üzerine etkisini belirlemede yardımcı olabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] TOPBAŞ, M.A, Çelik ve Isıl İşlem, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] STRATTON, P., UĞURTAN, M., Malzemelerin Sıfırlatı İşlemi, BOC Industrial Gases, The Linde Group, İngiltere.
- [3] Sub-zero Treatment of Steels, Linda Gas, Special Edition,2010.
- [4] ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, Desk Edition, Ohio, 2002.
- [5] ROBERTS, G., KRAUSS, G., KENNEDY R., Tool Steels, 5th ed., ASM International, Materials Park, OH, 1998.
- [6] ERDOĞAN, T., “Failure Analysis of and A Case Study of a Failed Die Casting Die”, International Conferance on Tool Steels for Dies and Moulds, ODTÜ, 2000.
- [7] ÇİMENOĞLU, H., Takım Çelikleri, Bölüm 5, İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 1997.
- [8] BROECKMANN C., Microstructure and Mechanical Properties of Tool Steels, Proceedings of the 5th International Conferance on Tooling, 29 Sept.-1st Oct. 1999, Leoben.
- [9] DAS, D., DUTTA, A.K., RAY K.K, Sub-Zero Treatments of AISI D2 Steel: Part I. Microstructure and Hardness Part II. Wear behavior , Materials Science and Engineering A 527 (2010).
- [10] EBNER R., LEITNER H., JEGLITSCH F. ve ÇALIŞKANOĞLU D., Methods of Property Oriented Tool Steel Design, Proceedings of the 5th International Conferance on Tooling, 29 Sept.-1st Oct. 1999, Leoben.
- [11] Tooling Solutions For Tool Steels Selection Guidelines, Uddeholm & ASSAB.
- [12] JOHANSSON, B., HATMAN, A., AHSS Şekillendirilmesinde Takım Çeliklerinde Beklenen Özellikler, Uddeholm Tooling AB, İsveç.
- [13] STACHOWIAK, G.W, BATCHELOR, A.W, Engineering Tribology, University of Western Australia, Australia.



- [14] SANDBERG, A., Tool Steel Production-Processing Routes for Premium Tool Steels, International Conference on Tool Steels for Dies and Moulds, ODTÜ, 2000.
- [15] KALKANLI, A., Powder Metallurgical Techniques for Tool Steels, International Conference on Tool Steels for Dies and Moulds, ODTÜ, 2000.
- [16] ÖGEL, B., Trends In The Development of Powder Metallurgy Tool Steels and Their Applications, International Conference on Tool Steels for Dies and Moulds, ODTÜ, 2000.
- [17] <http://www.asilcelik.com.tr>, 2 Şubat 2010.
- [18] [http://users.ox.ac.uk/~pgrant/Sf\\_schematic.jpg](http://users.ox.ac.uk/~pgrant/Sf_schematic.jpg) , 16 Mart 2010.
- [19] TOTTEN, G.E, Steel Heat Treatment Handbook, Second Edition, Portland State University Portland, Oregon.
- [20] THELNING K.E, Çelik ve Isıl İşlem, A.Tekin(Çev.), Hakan Ofset, İTÜ.
- [21] Becherer, B.A, Witheford T.J, Introduction To Heat Treating Of Tool Steels, Volume 4, ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.
- [22] ASM Handbook Volume 4, Heat Treating, Desk Edition, Ohio, 2002.
- [23] PÖCKL G., Heat Treat of High Chromium Cold Work Tool Steels and High Speed Steels, 4<sup>th</sup> ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conf., Europe, 1998.
- [24] HATMAN, A., ÜLKER, S., YURCİ, M.E, Yeni Nesil %8 Cr' lu Soğuk İş Takım Çeliklerinin Isıl İşlem Karakterizasyonunun Aşınma Davranışına Etkisi, 3<sup>th</sup> Isıl İşlem Sempozyumu, Y.T.Ü, 2009.
- [25] Uddholm Vanadis 4 Extra<sup>®</sup> Ürün Katoloğu.
- [26] GERSON, A., CAVALLARO G., XU, N., Microstructure of Cryogenically Treated High Performance Tool Steels, Materials Australia, 2007.
- [27] ZURECKI, Z., Cryogenic Quenching of Steel Revisited, Pennsylvania, USA.
- [28] STRATTON P., GRAF M., The Effect of Deep Cold Induced Nano-Carbides On The Wear of Case Hardened Components, Cryogenic V49, 2009, 346–349.
- [29] COLLINS, D.N., DORMER, J., Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold Work Tool Steel, National Heat Treatment Centre, Ireland, 1997.
- [30] Uddholm Calmax<sup>®</sup> Ürün Katoloğu.

- [31] ASTM E975-03, Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation, ASTM International, Pennsylvania, 1997.
- [32] ASTM G133-02, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM International, Pennsylvania, 1997.

## ÖZGEÇMİŞ

Fatih Koray ARSLAN, 06.12.1984 de Kırşehir' de doğdu. Ortaokul ve lise eğitimini Kırşehir H.F.E Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra 2004 yılında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde eğitimine başladı ve 2008 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. Aynı yılda Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.