

HATİCE VURAL

Yüksek Lisans Tezi

KÜ 2008

T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fe-%25 Ni-%3 V ALAŞIMINDA TERMAL
ETKİLİ MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMÜN İNCELENMESİ

HATİCE VURAL

OCAK 2008

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fe-%25 Ni-%3 V ALAŞIMINDA TERMAL
ETKİLİ MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMÜN İNCELENMESİ

HATİCE VURAL

OCAK 2008

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

.../.../.....

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Fizik Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Yrd.Doç.Dr.Nermin KAHVECİ
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Sedat AĞAN

Yrd.Doç.Dr. Nermin KAHVECİ

Yrd.Doç.Dr.Talip KIRINDI

ÖZET

Fe-%25 Ni-%3 V ALAŞIMINDA TERMAL ETKİLİ MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMÜN İNCELENMESİ

VURAL, Hatice

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nermin KAHVECİ

Ocak 2008, 48 sayfa

Bu tez çalışmasında, Fe-%25 Ni-%3 V alaşımında hızlı soğutma ve yavaş soğutma sonucunda oluşan Martensitik dönüşümleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (S.E.M) kullanarak incelenmiştir. Soğutma şeklinin değiştirilmesi sonucunda alaşımımızın tane boyutunda değişimler gözlenmiştir. SEM incelemeleri sonucunda hızlı soğutma ile elde edilen tane boyutunun, yavaş soğutma sonucunda elde edilen tane boyutundan daha küçük olduğu gözlenmiştir.

Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (D.S.C) ölçümleri sonucunda Martensite dönüşüm sıcaklığı (M_s) -64°C olarak belirlendi ve dönüşüm sıcaklığına soğutma hızının etkisi araştırıldı.

Anahtar Kelimeler: Fe-Ni-V alaşımı, Martensitik Faz Dönüşümü,
Tane boyutu, Martensite Dönüşüm Sıcaklığı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE THERMAL INDUCED MARTENSITIC TRANSFORMATION IN Fe-%25Ni-%3 V ALLOY

VURAL, Hatice

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Nermin KAHVECİ

January 2008, 48 pages

In this thesis study, Martensitic Phase Transformation resulting from cooling rate in Fe-%25Ni-%3V alloys investigated by using Scanning Electron Microscope (S.E.M). At the end of changing cooling rate grain size are observed grain size in this alloy. At the result of SEM investigation it is observed that the grain size getting from rapid cooling is less than the grain size getting from slow cooling.

It is found that martensitic transformation temperature is (M_s) -64 °C and the effect of cooling rate on the transformation temperature was investigated by DSC.

Key Words: Fe-Ni-V Alloy, Martensitic Phase Transformations, Grain Size, Martensite Transformation Temperature.

TEŐEKKÖRLER

Yüksek lisans öğrenimim süresince değerli bilgi, öneri ve eleştirileri ile çalışmamı yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Nermin KAHVECİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. Talip KIRINDI' ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Her zaman çalışmalarımı destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen hocam Doç. Dr. Metin ORBAY' a teşekkür ederim. Desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Figen DURKAYA' ya teşekkür ederim.

Destekleri ile her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürler...

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜRLER.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
1.1 AUSTENİTE-MARTENSİTE FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN ÖZELLİKLERİ. 3	
1.1.1 Giriş.....	3
1.1.2 Katılarda Faz Dönüşümü.....	7
1.1.3 Austenite-Martensite Faz Dönüşümleri.....	8
1.1.4 Martensitik Dönüşümlerin Kinetik Özellikleri.....	11
1.1.4.1 Atermal Özellik.....	11
1.1.4.2 İzotermal Özellik.....	13
1.1.5 Martensitik Dönüşümlerin Kristalografik Özellikleri.....	15
1.1.6 Austenite - Martensite Faz Dönüşümlerine Etkiler.....	18
1.1.6.1 Uygulanan Dış Zorun Etkisi.....	18
1.1.6.2 Isı ve Sıcaklık Değişiminin Etkisi.....	18
1.1.7. Termal Analiz Yöntemleri.....	20
1.1.7.1 Differansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC).....	20
1.1.8 Alaşımda Kullanılan Elementlerin Özellikleri.....	22

1.1.8.1 Demir (Fe).....	22
1.1.8.2 Nikel (Ni).....	22
1.1.8.3 Vanadyum (V).....	22
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
2.1 Numunenin Hazırlanması.....	24
2.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Gözlemleri İçin Numunenin Hazırlanması.....	24
2.3 Differansiyel Tarama Kalorimetresi İçin Numunenin Hazırlanması.....	25
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	26
3.1. Termal Etkili Martensitik Dönüşümler.....	26
3.1.1 Termal Etkili Martensitik Dönüşümlerin Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) ile İncelenmesi.....	26
3.1.2 Termal Etkili Martensitik Dönüşümlerin Dönüşüm Sıcaklığına Etkisinin İncelenmesi	30
4.SONUÇ.....	32
KAYNAKLAR.....	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

1.2.1 Numuneye uygulanan ısı işlemler.....	26
--	----

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

1.1. Austenite ve martensite fazların serbest enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	6
1.2.a) Fe-%30Ni alaşımında elektriksel direncin sıcaklığa göre değişimi.....	12
b) Cu-Zn alaşımları için martensitik dönüşümlerde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi.....	12
1.3. Fe bazlı alaşımlarda izotermal martensitik dönüşümler için C eğrisi.....	14
1.4. Martensitik dönüşümün difüzyonsuz doğasına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim ve yerleşim düzlemi.....	16
3.1. 1100 °C sıcaklıkta 1 hafta homojenleştirilen ve yavaş soğutulan numunenin yüzey görünümü.....	27
3.2. A grubu numunenin yüzey görünümü.....	28
3.3. B grubu numunenin yüzey görünümü.....	29
3.4. a,b) Numunenin DSC ölçüm sonuçları.....	31

SİMGELER DİZİNİ

SİMGE

A_s	Martensite-austenite dönüşümünün başlama sıcaklığı
E	Sistemin potansiyel ve kinetik enerjileri toplamı
ΔG^{A-M}	Kimyasal serbest enerji değişimi
G^A	Ana fazın kimyasal serbest enerjisi
G^M	Ürün fazın kimyasal serbest enerjisi
M_s	Austenite-martensite faz dönüşümünün başlama sıcaklığı
M_f	Austenite-martensite faz dönüşümünün bitiş sıcaklığı
T_0	Austenite-martensite fazların dengede bulunduğu sıcaklık
T	Mutlak sıcaklık
S	Entropi

KISALTMALAR

b.c.c	Hacim merkezli kübik yapı
f.c.c	Yüz merkezli kübik yapı
DSC	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1.GİRİŞ

Günümüzde üretilen malzemelerin büyük bir kısmını metaller ve metal alaşımları oluşturmaktadır. İhtiyaç duyulan her alanda rahatlıkla kullanıldığı için yeni araştırmalara ve gelişmelere olanak sağlamaktadır. Uygulanan bir elektrik alanının etkisi altında elektriği iyi ileten katıya "metal"⁽⁰¹⁾, en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla elementten oluşan ve metal özelliği gösteren maddeye ise "alaşım" denir⁽⁰²⁾. Metallerin özelliklerini iyileştirmek ve istenilen özellikte malzemeler elde etmek amacıyla alaşımlar geliştirilmiştir. Alaşımlar aynı zamanda saf maddelerden daha iyi teknik özellikler gösterirler. Alaşım oluşturmanın diğer bir amacı malzemeye istenilen bir özellik sağlamak için en az bir başka elementin kasıtlı olarak eklenmesi ile elde edilebilir. Örneğin; çelik metal olmayan bir element içeren alaşımdır. Fe-C alaşımından meydana gelen çeliklerin geçmişten günümüze kullanım alanları oldukça geniştir. Fe bazlı alaşımların üzerinde yapılan ısı işlemler sonucunda alaşımın hangi özelliklerini değiştirebileceğini, alaşımı oluşturan metallerin faz dönüşümünü nasıl etkilediğini bulabilmek amacıyla çeşitli deneyler yapılmaktadır.

Bu çalışmamızda Fe-%25Ni-%3V alaşımında soğutma etkisiyle oluşan austenite–martensite faz dönüşümünü ve bu dönüşümün karakteristik özellikleri yani morfolojisini, kinetiğini, termal özelliklerini inceledik. Morfolojik ve kinetik özelliklerini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'nu kullandık. Dönüşüm sıcaklıklarını ise Differansiyel Tarama Kalorimetre (DSC) ölçümleri ile belirlendi.

Fe-bazlı alaşımlarda yapılan çalışmalara örnek olarak; Golovchiner ve Tyapkin⁽³⁵⁾, Fe-%27 Ni alaşımı ile tersinir dönüşümler üzerinde yaptıkları çalışmada M_s sıcaklığını $-30\text{ }^\circ\text{C}$, aynı alaşıma %1.5 Ti ekleyerek yaptıkları çalışmada M_s sıcaklığını $-60\text{ }^\circ\text{C}$ bulmuşlardır.

Durlu⁽¹¹⁾, Fe-%21.3Ni-%0.13C alaşımı için M_s sıcaklığını $-40\text{ }^\circ\text{C}$, Fe-%40.2Ni-%0.36C alaşımı için $-55\text{ }^\circ\text{C}$ bulmuştur. Güler⁽³⁴⁾, Fe-%29Ni-%2Mn alaşımı için M_s sıcaklığını $-128\text{ }^\circ\text{C}$ olarak bulmuştur.

1.1 AUSTENİTE–MARTENSİTE FAZ DÖNÜŞÜMLERİ VE ÖZELLİKLERİ

1.1.1 Giriş

Maddeler doğada katı, sıvı, gaz olarak belli bir faz yapısındadırlar. Bir cisim, denge kuvvetlerinin etkisi altında en düşük enerjili denge konumunda bulunan atom grubundan oluşur. Homojen olarak dizilmiş atomlar, kararlı denge durumunda belirli bir faz meydana getirirler. Genel olarak **faz**; sürekli bir madde içinde, kristal özellikleri ve atomların düzenlenişi kendi içinde homojen olan ve fiziksel olarak maddenin diğer kısımlarından ayrılan bir bölge olarak tanımlanır⁽⁰³⁾. Maddenin içinde bulunduğu çevre koşulları değişirse mevcut enerji dengesi bozulur ve atomlar buldukları konumdan daha düşük bir enerji gerektiren başka bir konuma geçmeye zorlanırlar. Kütle halinde atomsal hareket sonucu iç yapı değişir ve yeni bir denge yapısı elde edilir. Bir başka deyimle bir faz bir başka faza dönüşmüş olur. Belirli fazlardan oluşan bir denge yapısının değişik fazlardan oluşan diğer bir denge yapısına geçişi şeklinde oluşan bu olaya **faz dönüşümü** denir⁽⁰⁴⁾.

Faz dönüşümü, sağlanması sıcaklık değişimi ile veya dışardan bir mekanik zor uygulandığında gerçekleşir. Sıcaklığı hızlıca düşürdüğümüzde veya yükselttiğimizde faz dönüşümü olur. Faz dönüşümünden sonra maddenin sadece kristal yapısı değişir. Kimyasal yapıda değişme gözlenmez.

Cisimlerin iç yapı oluşumunda ana etken enerjidir. Enerjisi azalan bir sistemin kararlılığı artar. Sistemler daima sahip oldukları enerjiyi azaltan

konumlara yönelerek daha kararlı hale gelme eğilimi gösterirler. Sistemin çevre şartları değiştiğinde atomların enerjisi, dolayısıyla hareket yeteneği değişir ve imkan verildiği zaman genellikle düşük enerjili kararlı denge yapısı oluştururlar⁽⁰³⁾.

Fazların oluşumu ve dönüşümlerinde sıcaklık, basınç ve bileşim olmak üzere üç temel etken vardır. Bu etkilerle hangi tür fazın oluştuğu ve bunların özelliklerinin bilinmesi uygulama yönünden çok önemlidir. Bir fazdan diğer bir faza dönüşüm olabilmesi için sistemin son faza göre kararsız olması gerekir. Sabit sıcaklık ve basınçta sistemin kararlılığı;

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

Şeklinde tanımlanan Gibbs Serbest Enerjisi'nin en küçük değeriyle belirlenir. Burada H entalpi, T mutlak sıcaklık, S ise sistemin entropisidir. Entalpi sistemin ısı miktarının bir ölçüsüdür ve

$$H = E + PV \quad (1.2)$$

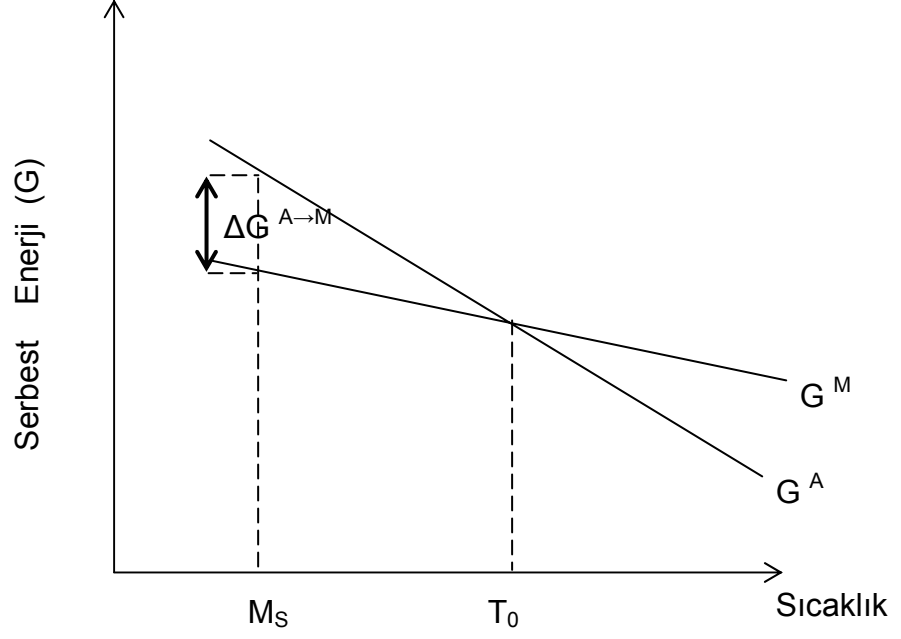
şeklinde verilir. Bu eşitlikte E sistemin iç enerjisi, P basıncı, V hacmi ifade eder. İç enerji, bir sistemdeki atomların kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamından oluşur. Kinetik enerji, katıda atomların titreşimlerinden doğarken potansiyel enerji sistemdeki atomlar arası bağlar ve etkileşmelerden kaynaklanır. Sistemin iç enerjisindeki değişime bağlı olarak ısı miktarı değiştiğinde faz dönüşümü meydana gelir. Öte yandan ısı miktarı, sabit basınç altında sistemin hacmindeki değişime de bağlıdır. Ancak katılarda, PV terimi E ile kıyaslandığında ihmal edilebilir ve $H \approx E$ alınabilir⁽⁰³⁾.

Fazlar arasındaki serbest enerji değişimi ise;

$$\Delta G^{A \rightarrow M} = G^A - G^M \quad (1.3)$$

şeklinde verilebilir. Burada G^A ana fazın serbest enerjisi, G^M ürün fazın serbest enerjisidir.

Sistemin Gibbs serbest enerjisinde etkili olan bir diğer etken ise sistemin girilebilir durumların bir ölçüsü olan entropidir. Düşük sıcaklık katı fazları, güçlü atomik bağlanmaya ve böylece en düşük iç enerjiye (entalpiye) sahip olduğu için en kararlı fazları meydana getirir. Sistem üzerindeki şartların, değişmesi, sistemin en düşük iç enerjili atomik konfigürasyonu tercih etmesine neden olur⁽⁰³⁾. Bir materyal için serbest enerjinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 1.1 'deki gibidir.



Şekil 1.1 Serbest enerjinin sıcaklığa bağlı değişimi

Denge sıcaklığı olarak tanımlanan T_0 sıcaklığında iki fazın serbest enerjileri eşit ve farkları sıfırdır. T_0 denge sıcaklığının altında fark sıfırdan büyüktür ve ürün faz serbest enerjisi daha küçük olduğu için daha kararlıdır. T_0 'ın üstündeki sıcaklıklar da ise fark sıfırdan küçüktür ve ana faz daha kararlıdır. Minimum serbest enerji kuralına göre bir sistem bir çok değişik durumlara izin verirse sistemin bu durumlardan en düşük serbest enerjili olanı seçmesi beklenir. Serbest enerji, faz farkı dönüşümü için gerekli olan sürücü kuvvet olarak adlandırılır⁽⁰³⁾.

1.1.2 Katılarda Faz Dönüşümü

Katı yapıdaki faz dönüşümleri sırasında atomlar yeni faz yapısını oluştururken yer değiştirirler. Bu yer değiştirmelerde atomların komşuluklarını korudukları dönüşümler katıhal fiziğinde önemlidir^(05,06). Faz dönüşümü, olay sırasında atomların komşuluklarının değişip değişmemesine göre iki gruba ayrılır. Atomların komşuluklarını değiştirecek şekilde meydana gelen faz dönüşümlerine yayımlı (difüzyonlu) faz dönüşümleri, atomların komşuluklarını değiştirmeden meydana gelen faz dönüşümlerine de yayımsız (difüzyonsuz) faz dönüşümleri denir.

Metalik sistemlerdeki faz dönüşümleri *çekirdeklenme ve büyüme dönüşümleri* ve *martensitik dönüşümler* olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Çekirdeklenme ve büyüme dönüşümlerinde termal uyarma ve yayılma çok önemlidir ve bunlar sabit bir sıcaklıkta meydana geldikleri için izotermal özellik gösterirler⁽⁰⁷⁾.

Metal ve metal alaşımları, atomların yayımlı bir oluşumla yer değiştiremeyecekleri kadar hızlı soğutulduklarında (veya ısıtıldıklarında) yayımsız faz dönüşümü gösterir ve bu tür bir dönüşüm de martensitik dönüşüm olarak adlandırılır. Büyüklüğü materyalin kristalografik özelliklerine göre değişen belirli fiziksel etkiler, materyale uygulanırsa faz dönüşümü meydana gelir. Dışardan uygulanan fiziksel etkiler *austenite* (anafaz) ve *martensite* (ürünfaz) fazlar arasındaki serbest enerji farkını ortaya çıkarır. Ana faz ve ürün faz arasındaki bu enerji farkı ise martensitik dönüşümün meydana gelmesine sebep olur^(06,07).

Martensitik dönüşümler yayılmasız dönüşümlerdir ve yalnız katı fazdaki maddelerde gözlenir. Martensitik faz dönüşümlerinde aktivasyon enerjisi uygulanabilir değildir. Çünkü aktivasyon enerjisi yalnız yayılmalı faz dönüşümü olan çekirdeklenme ve büyüme için gerekli olan enerjidir⁽⁰⁷⁾.

1.1.3 Austenite – Martensite Faz Dönüşümleri

Martensite, belirli elementlerin yapısında meydana gelen ilginç değişimlerdir. Öyle ki element yüksek sıcaklıkta yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdayken düşük sıcaklıkta hacim merkezli kübik (bcc) yapıya geçebiliyor. Atomlar arası bağlar kopmadan bir kristal yapıdan diğerine geçebilmektedir.

Martensitik dönüşümler hakkında pek çok tanım yapılmıştır. Bunlardan bazıları: Kaufman ve Cohen⁽⁰⁸⁾ termodinamiğe göre faz dönüşümünü; “faz değişimi yada dönüşüm zorlanmasına maruz kalmış bir bölgeden atomların topluca hareket ettikleri, yer değiştirme içeren bir reaksiyondur” diye tanımlar. Christian⁽⁰⁷⁾ ise; “basit oluşum mekanizması nedeni ile atomik difüzyonun gerekmediği, serbest enerjinin net bir azalımı ile hızlı bir yeni oluşum” olarak tanımlar. Durlu⁽⁰⁵⁾; “matensitik dönüşüm bir atom takımının şekil değişimi ortaya çıkaracak şekilde, bir ara yüz boyunca toplu hareketi ile oluşan bir faz geçiştir” demektedir.

Martensitik dönüşümler üzerinde ilk çalışmalar teknolojinin gelişmesine bağlı olarak 19.yy sonlarından itibaren başlamıştır. Bu olay ilk olarak Alman bilim adamı A.Martens tarafından bulunduğu için bu bilim adamının adıyla anılır.

Austenite ana kristal yapının martensite ürün faza difüzyonsuz olarak dönüşmesi şeklinde gerçekleşen martensitik dönüşümler başlangıçta çeliğin su vererek sertleştirilmesi sonucu ortaya çıkan bir olay iken, daha sonra yapısal, kristalografik, termodinamik, kinetik ve mekanik özellikleri nedeniyle akademik açıdan ilgi çekici bir araştırma konusu haline gelmiştir^(05,09).

Austenite – martensite dönüşümü, sıcaklık değişimi ve dışarıdan uygulanan mekanik zorun etkisiyle gerçekleşebilir. Aynı zamanda bu iki etkinin birlikte uygulanması da dönüşümü gerçekleştirebilir. Ayrıca austenite – martensite dönüşümünde ana kristal yapının tamamı ürün kristale dönüşmeyebilir. Martensite kristaller austenite yapı içinde dağılmış olarak bulunabilir. Bunun nedeni de dönüşümü sağlayan etkinin büyüklüğüdür.

Termal etkili bir martensitik dönüşümün gerçekleşebilmesi için austenite kristalin sıcaklığı, her iki fazın kararlı halde bulunduğu denge sıcaklığının (T_0) altına düşürülmelidir. Ana faz T_0 sıcaklığında termodinamik dengededir. Materyal bu sıcaklıktan atomların difüzyonlu bir oluşumla yer değiştiremeyecekleri bir hızla soğutulduğunda kritik bir M_s sıcaklığından sonra ana faz içerisinde ürün faz oluşmaya başlar.

Dönüşümün başladığı bu sıcaklığa martensite başlama sıcaklığı (M_s) denir. Bu sıcaklıkta $T_0 - M_s$ sıcaklık farkı, fazlar arasında kimyasal serbest enerjiyi oluşturur. Bu enerji de dönüşümün başlaması için gerekli sürücü kuvveti doğurur(Şekil 1.1). Sürücü kuvvet sistemin sıcaklığına ve uygulanan zora bağlıdır⁽¹⁰⁾. Martensitenin bitiş sıcaklığı M_f sıcaklığıdır. M_f ve M_s sıcaklıkları ise DSC ile tespit edilmektedir.

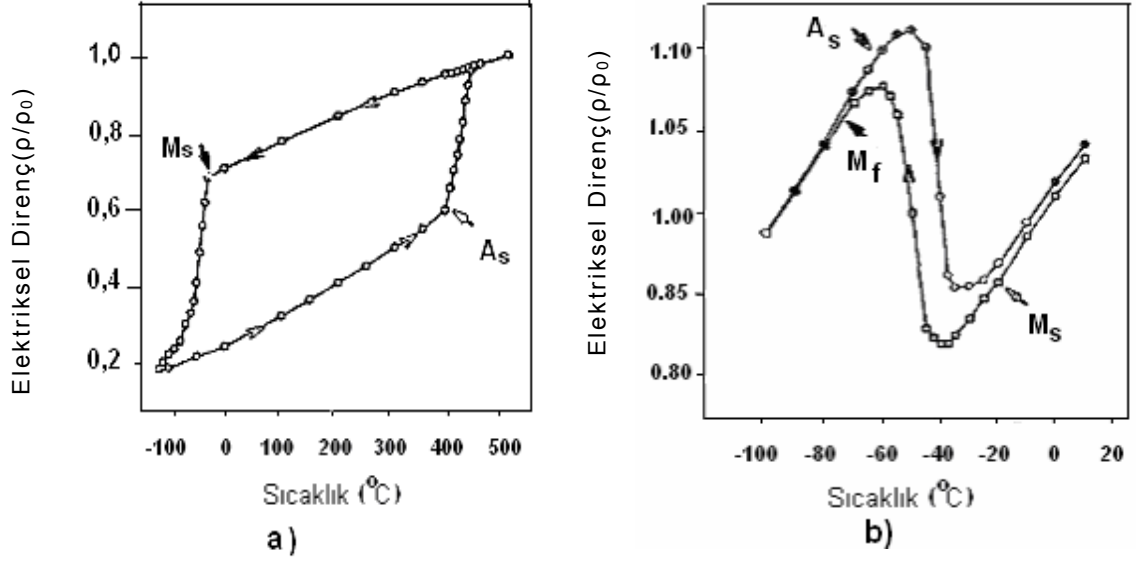
1.1.4 Martensitik Dönüşümlerin Kinetik Özellikleri

Martensitik dönüşüm kinetik olarak atermal ve izotermal özellikli olmak üzere iki grupta incelenebilir. Reaksiyonun oluşumu sadece sıcaklık değişimine bağlı ise atermal martensite olarak adlandırılır. Zamana ve sıcaklık değişimine bağlı olan martensitik dönüşüm ise izotermal martensite olarak adlandırılır.

Martensitik dönüşümlerin atermal ya da izotermal olması birinci derecede materyalin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Bununla beraber aynı alaşımda ısıl davranışa bağlı olarak hem atermal hem de izotermal dönüşüm gözlenebilir. Bunun nedeni, farklı ısıl etki sonucu austenite yapının grain boyutlarının değişmesidir. Öte yandan kimyasal kompozisyon bağımlılığında dolayı meydana gelen bu iki tür dönüşüm için; dönüşüm sıcaklıkları, dönüşüm miktarı ve dönüşüm sonrası ürün faz yapıları ve morfolojileri farklıdır⁽⁰⁹⁾.

1.1.4.1 Atermal Özellik

Atermal özellik gösteren martensite faz dönüşümleri, çok kısa zaman aralığında ve austenite yapısı içinde patlama şeklinde meydana gelir.



Şekil1.2.a) Fe-%30Ni alaşımında elektriksel direncin sıcaklığa göre değişimi, **b)** Cu–Zn alaşımları için, martensitik dönüşümlerde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi

Termal etkiyle oluşan martensitik dönüşümlerde M_s daha düşük sıcaklıklarda yeni patlamalar olabilir ama bir kez oluşan martensite yapı düşük sıcaklıklarda büyüme göstermez⁽⁰⁷⁾. Şekil1.2.a' da Fe-Ni alaşımında soğutmayla birbirini izleyen yeni faz oluşumu gösterilmektedir. Büyüyen tabakanın boyutu ve çekirdeklenme oranı sıcaklığın bir fonksiyonudur ve sıcaklığın değişimi dönüşümün yönünü belirlemektedir.

Atermal özellik gösteren dönüşümlerin kinetik özellikleri:

- Dönüşüm miktarı zamandan bağımsızdır.
- Dönüşüm miktarı sıcaklığın fonksiyonudur.
- Dönüşüm hızı sıcaklığa bağlı değildir.

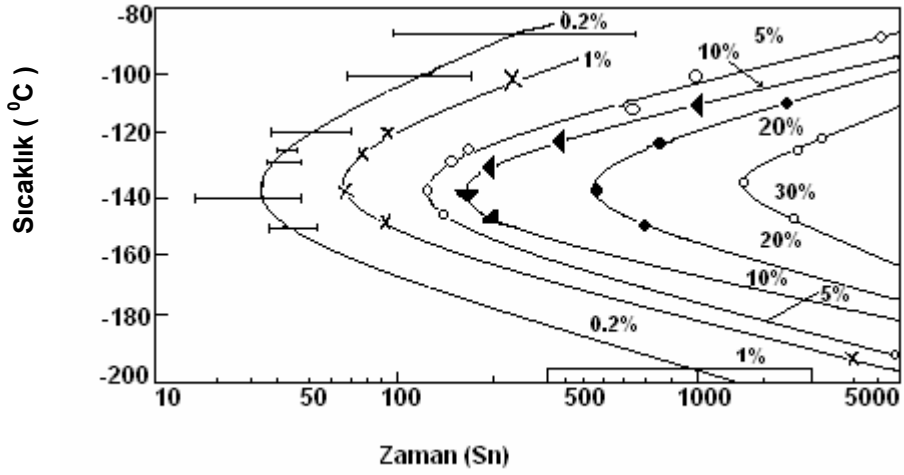
-Soğutmayla elde edilen ürün faz daha yüksek sıcaklıkta tekrar ana faza dönüşebilir.

-Plastik zorlanma atermal dönüşümü etkileyebilir^(11,12).

Bunshah ve Mehl⁽¹³⁾ tarafından, Fe ve Fe alaşımlarında ısıl etki ile oluşan atermal özellikli martensite kristallerinin 10^{-7} sn gibi bir zamanda ortaya çıktığı ölçülmüştür. Literatürde Fe, Cu, Au ... gibi metaller baz alınarak hazırlanan alaşımlarda atermal özellik gösteren martensitik dönüşümler meydana gelmektedir⁽⁰⁸⁾.

1.1.4.2. İzotermal Özellik

İzotermal martensitik dönüşümlerde çekirdeklenme zamana bağlıdır yani oluşan çekirdeklenme sabit bir sıcaklıkta zamanla devam eder (Şekil 1.3). İzotermal martensitik dönüşümlerde; M_s sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda yeni martensite kristalleri oluşabileceği gibi daha önce oluşanlarda hacimce büyüme gösterebilirler. İzotermal reaksiyonlarda kritik adım çekirdeklenme olarak gösterilir⁽⁰⁹⁾.



Şekil1.3. Fe bazlı alaşımlarda izotermal martensitik dönüşümler için C eğrisi

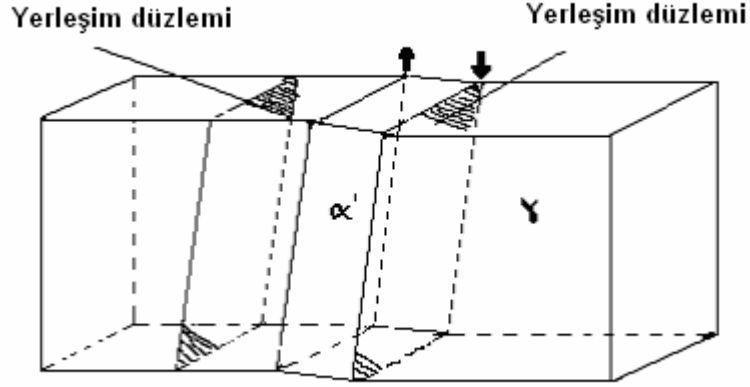
İzotermal martensitik reaksiyonlarla oluşmuş tabakalar küçüktür ve austenite fazdaki dislokasyon duvarları sebebi ile martensite tabakalardaki büyüme durur. Böylece austenite yapı büyük bir tabaka halinde görünür. Olson ve Cohen⁽¹⁴⁾ tarafından martensite oluşumu ile ilgili çekirdeklenme ve dönüşüm modelleri, martensite kristal çekirdeklerinin austenite yapı bozuklukları olduğu kabul edilmiş ve bu yapı bozuklukları elektron mikroskop çalışmalarında gözlenmiştir⁽¹⁵⁾. İzotermal reaksiyonlar Fe-C-Mg, Fe-Ni-Mn gibi alaşımlarda gözlenmiştir^(16,17).

1.1.5 Martensitik Dönüşümlerin Kristalografik Özellikleri

Martensitik dönüşümler difüzyonsuz olması sebebi ile dönüşümden sonra kristalografik olarak bir çok değişik oluşum meydana gelir^(05,18,19).

Austenite–martensite faz dönüşümünde atomlar, komşuluklarını koruyarak yer değiştirirken, kristalografik olarak tüm yapı, bir yapıdan başka bir yapıya geçer. Yapının değişmesi ile austenite–martensite yapılar arasında kristalografik *dönme bağıntısı* (orientation relationship) ortaya çıkar. Martensitik faz dönüşümlerinin kristalografik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda iki kristalografik yapı arasında sınır özelliği taşıyan, bozulmamış ve dönmemiş olan düzlem *alışım düzlemi* (habit plane) olarak isimlendirilir (Şekil 1.4).

Dönüşümden sonra meydana gelen makroskobik değişme kristalin dış yüzeyinden de kolayca gözlenebilir^(09,18,19). Atomların birlikte hareketlerinin bir sonucu olarak kristalde gözlenen şekil bozulması plastik deformasyonunun varlığını kanıtlar ve bu deformasyonun büyüklüğü dönüşüm kristalografisine göre değişir.



Şekil 1.4. Martensitik dönüşümün difüzyonsuz doğasına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim ve yerleşim düzlemi

Dönüşüm sırasında meydana gelen örgü zorlanması (şekil zorlanması) esnasında oluşumu çevreleyen austenite kristal örgüsü, dönüşüme uğrayan bölge üzerinde zıt yönlü (dönüşümü engelleyici) tepki zorları uygular ve bu zorlar şekil değişimini sınırlar. Elastik zorlanmaların bu zıt yönlü zorları karşılayacak büyüklükte olmaması nedeniyle dönüşüme uğrayan bölgenin önemli miktarda plastik deformasyon geçirmesi gerekir. Plastik deformasyon sonucu zor ile zorlanma arasında mekanik bir denge kurulur ve böylece dönüşüm tamamlanır. Bu tamamlayıcı deformasyon, dislokasyonların hareketi ile oluşturulabilir. Bu durumda tam dislokasyonların hareketi, kayma türü yapısal bozukluklar ortaya çıkarken kısmi dislokasyonların hareketi sonucu yığılma kusurları veya içsel ikizlenme türü yapı kusurları (martensite) oluşur. Bu tip kusurlar, örgü zorlanmasıyla oluşan austenite fazın şekil deformasyonunu büyük ölçüde azalttıkları için örgüyü değiştirmeyen zorlama

olarak tanımlanırlar⁽⁰⁹⁾.

Bir kristalografik yapıdan diğetine dönüşme şeklinde gerçekleşen martensite faz dönüşümleri, genelde yüzey merkezli kübik (f.c.c.) yapıdan hacim merkezli (b.c.c. veya b.c.t.) veya sıkı paketlenmiş hekzagonal (h.c.p.) yapıya ya da bcc yapıdan hcp yapıya dönüşme şeklindedir. Bu dönüşümlerden en çok bilinen genelde Fe bazlı alaşımlarda görülen fcc yapıdan bcc yapıya dönüşme şeklinde olup, bu tür bir dönüşme kristalografik olarak kesme mekanizmasıyla gerçekleşir. Yani dönüşme sonucunda ana ve ürün kristal yapıların bazı düzlem ve doğrultuları arasında belirli açılar gözlenir ve bu ilişki kristalografik dönme bağıntısının ortaya çıkmasına sebep olur^(09,14,20,21).

1.1.6. Austenite – Martensite Faz Dönüşümlerine Etkiler

1.1.6.1 Uygulanan Dış Zorun Etkisi

Uygulanan mekanik zor ile austenite-martensite dönüşümü etkilenecektir. Dışarıdan uygulanan mekanik zorlar ana fazı homojen olarak bozacağı için martensite oluşumu ile mekanik zor arasında fiziksel bir ilişkinin varlığı düşünülebilir^(08,15,22). Uygulanan zor, martensite kristalinin oluşumunu kristalografik açıdan kolaylaştırıcı doğrultuda ise dönüşüm için daha az bir sürücü kuvvet gerekir ve M_s sıcaklığı yükselir. Böylelikle ($M_s - A_s$) aralığı daralacaktır. Şayet dışarıdan uygulanan zor martensite plakanın oluşumunu engelleyici yönde ise bu durumda dönüşüm için daha büyük bir sürücü kuvvet gerekeceğinden M_s sıcaklığı düşer.

Yapılan deneysel çalışmalar ısı değişimi olmadan yalnızca zor etkisi ile martensite faz dönüşümünün olabileceğini göstermiştir^(08,22,23).

1.1.6.2 Isı ve Sıcaklık Değişiminin Etkisi

Isı ve sıcaklık gibi termodinamik etkenlerle oluşan martensitik dönüşümlerde dönüşüm sıcaklıkları M_s ve M_f soğutma hızından bağımsızdır ve alaşımın ısısal ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Demir bazlı alaşımlarda alaşım içerisindeki elementlerin (nikel, vanadyum, manganez gibi) oranları arttıkça, M_s ve M_f sıcaklıklarının neredeyse doğrusala yakın bir değişimle azaldığı deneysel gözlemlerle kanıtlanmıştır⁽²⁴⁾.

Malzemenin homojen olması aynı zamanda ısısal özelliklerini de etkilemektedir. Malzeme içerisindeki safsızlık atomları arttıkça dönüşüm

sıcaklığı yükselmektedir. Safsızlık atomları martensitik dönüşümü kolaylaştıracak ve böylece dönüşüm sıcaklığı artacaktır⁽²⁴⁾.

1.1.7 Termal Analiz Yöntemleri

1.1.7.1 Differansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC)

Farka bağılı tarama tekniği olarak bilinen diferansiyel taramalı kalorimetresi (DSC); numune ve referans sıcaklığı arasındaki farkı sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçebilen bir termoanalitik tekniktir. Numune ısıtılırken, soğutulurken ya da sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan ya da salıverilen enerji miktarını ölçer.

Bu teknikte referans ve numuneden gelen ısı farkı sıcaklığın ya da zamanın fonksiyonu olarak gösterilir. DSC 'de numune ve referans aynı sıcaklıkta tutulması gerekir. Eğer numune ve referans arasında sıcaklık farkı oluşursa sıcaklığı aynı tutmak için numuneye verilen enerji miktarı değişir. Bu teknikle numunedeki faz değişimi sırasındaki ısı miktarını belirleyebiliriz. Ayrıca DSC özgül ısı, erime sıcaklığı, değişim entalpileri, faz diyagramları, kristalleşme sıcaklıkları, reaksiyon kinetiğini belirlemede kullanılabilir.

DSC deneysel sonucu ısıtma veya soğutma eğrisini oluşturur. Bu eğri de entalpi geçişini hesaplamada kullanılabilir. Entalpi geçişleri pikler halinde gözlenir. Entalpi geçişini hesaplamak istersek;

$$\Delta H = K.A \quad (1.4)$$

denklemini kullanabiliriz. Burada ΔH entalpi geçişi, K kalorimetrik sabit, A ise eğri üzerindeki alandır. K kalorimetrik sabit; ölçümden ölçüme değişmeyen numuneye özgü karakteristik bir değerdir.

DSC ile polimer analizleri, besin analizleri yapılmakta ve eczacılıkta da kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda üretilen ve daha sonraları oldukça geliştirilen yöntem auzenite-martensite faz dönüşümlerinde de geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Özellikle martensite başlama sıcaklığı olan M_s sıcaklığının belirlenmesinde kullanılan DSC oldukça hassas ölçümler yapabilmektedir^(25,26,27,28,37).

1.1.8 Alaşımda Kullanılan Elementlerin Özellikleri

1.1.8.1 Demir (Fe)

Demir, tüm metaller içinde en çok kullanılanıdır ve tüm dünyada üretilen metallerin ağırlıkça %95'ini oluşturur. Doğada 4. yaygın bulunan bir metaldir⁽³⁹⁾.

Düşük fiyatı ve yüksek mukavemet özellikleri demiri, otomotiv, gemi gövdesi yapımı ve binaların yapısal bileşeni olarak kullanılmasını sağlıyor. Demir metali, demir cevherlerinden elde edilir ve doğada nadiren element halde bulunur. En çok bilinen demir alaşımı çelik olmakla beraber bir çok çeşitte kullanım alanına sahiptir. Bunlar pik demir, dökme demir, karbon çeliği, dövülebilir dökme demir, alaşımlı çeliklerdir⁽⁴⁵⁾.

1.1.8.2 Nikel (Ni)

Nikelin birçok metal içindeki çözünürlüğü fazla olduğundan çok çeşitli ticari alaşımlar elde edilebilir. Nikelin büyük bir çoğunluğu alaşım üretiminde kullanılmaktadır. Isıl direncinin yüksek, sertliğinin ve dayanımının iyi olması sebebiyle çok tercih edilmektedir^(40,41,42). Nikel aynı zamanda tane küçültme etkisine sahiptir. Malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırır⁽⁴⁴⁾.

1.1.8.2 Vanadyum (V)

Nikel gibi vanadyumunda tane küçültme etkisi vardır. Vanadyumun %0.1 oranında kullanılması bile tane irileşmesini önemli ölçüde azaltır⁽⁴³⁾.

Malzemenin sertlik ve sıcaklık dayanımını arttırır. Böylece vanadyumlu çelikler yüksek sıcaklıklarda ısı işlemlere tabi tutulabilirler.

Vanadyumun karbür yapıcı özelliği de vardır. Çelikte karbon miktarı artarsa vurma ve darbelere karşı daha dayanıklı olur. Bu özelliğiyle de vanadyum dayanıklı çelik üretiminde çok avantajlı bir malzemedir. İçerisinde % 0,15-0,5 oranında vanadyum bulunan çelikler yüksek dayanıma sahiptir ve kolay işlenebilecek özelliktedirler⁽⁴⁴⁾.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Numunenin Hazırlanması

Tez çalışmamıza konu olan Fe-25%Ni-3%V alaşımı % 99.9 saflıkta Fe, Ni, V alaşımları kullanılarak Tübitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'de özel olarak üretilmiştir. Alaşımımız deneysel incelemede kolaylık olması amacıyla uygun boyutlara elmas kesiciler yardımıyla kesildi. Termal etkili martensitik dönüşümleri incelemek için numunelerimizi gruplandırdık. Birinci gruba yavaş soğutma şekli, ikinci gruba ise hızlı soğutma şekli uygulandı. Yavaş soğutma; 1100 °C ' de bir hafta tavlanan numune fırın soğutmaya bırakıldı ve numune çıkarıldıktan sonra sıvı azota (-196 °C) atıldı. Hızlı soğutma; 1100 °C 'de bir hafta tavlanan numune sıvı azota atıldı. Bu işlemler sonucunda tablo 1.2.1 oluşturuldu.

2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Gözlemleri İçin Numunelerin Hazırlanması

Numunelerimiz üzerinde yapılacak yüzey incelemeleri için öncelikle yüzeyleri temizlendi. Değişik kalınlıktaki su zımparalarından geçirilen numuneler elmas paste ile parlatılarak yüzeyindeki çizgilerden ve pürüzlerden arındırıldı. Parlatma işleminden sonra uygun olan asit çözeltisine atıldı. Asit çözeltisi olarak %5'lik Nital (%5 Nitrik Asit + %95 Metanol) kullanıldı. Asit çözeltisine atılan numuneler oda sıcaklığında 60 saniye bekletildi. Jeol 5600 yüzey taramalı elektron mikroskobu yardımıyla oluşan

mikro yapılar incelendi.

2.3. Differansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri İçin Numune Hazırlanması

Numuneler su zımparaları yardımı ile 80 µm kalınlığına kadar inceltildi. Kesilerek 3 mm çapında diskler elde edildi. Termal etkili martensitik dönüşümleri incelemek amacıyla DSC ölçümleri ve ısı akışı - sıcaklık eğrileri çizildi.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

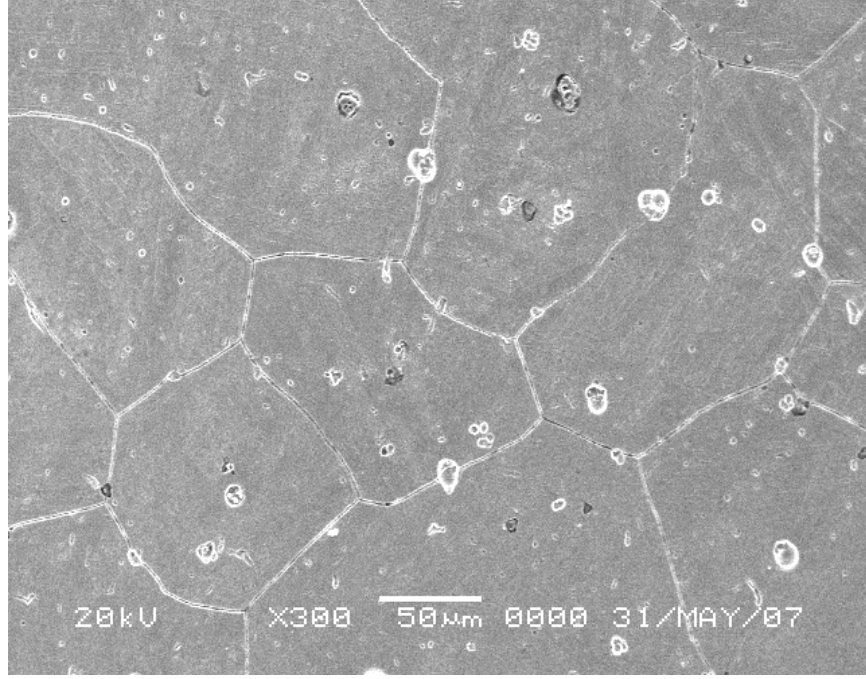
3.1 Termal Etkili Martensitik Dönüşümler

3.1.1. Termal Etkili Martensitik Dönüşümün Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İle İncelenmesi

Numunemizde oluşan termal etkili austenite – martensite fazın yüzey incelemesi SEM yardımıyla yapıldı. İlk işlem olarak 1100 °C 'de homojenleştirilen numunede fırın soğutma yapılarak oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra austenite tanelerin oluşmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 3.1). Oluşan bu tanelerin farklı boyutlarda olduğu ve farklı yönelimlere sahip olduğu görüldü. Austenite faza ait olan tanelerin boyutları homojenleştirme süresine, sıcaklığa ve soğutma şekline bağlı olarak değişir ^(30,31).

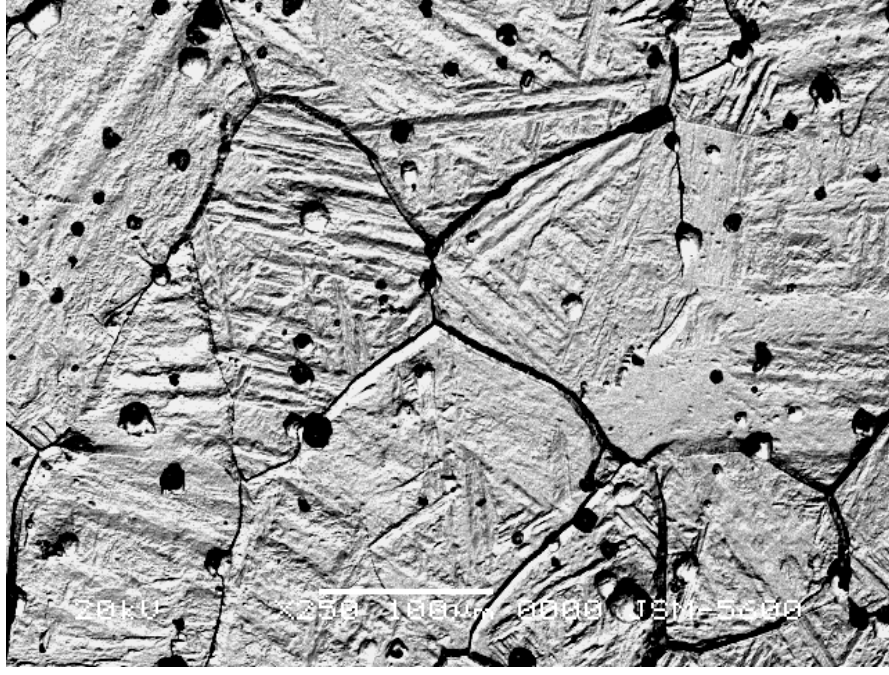
Tablo 1.2.1 Numuneye uygulanan ısıl işlemler

Grup	Tavlama Sıcaklığı	Tavlama Süresi	Soğutma Şekli
A	1100 °C	1 Hafta	Yavaş Fırında soğutulup sıvı azota atıldı.
B	1100 °C	1 Hafta	Hızlı Sıvı azota atıldı.



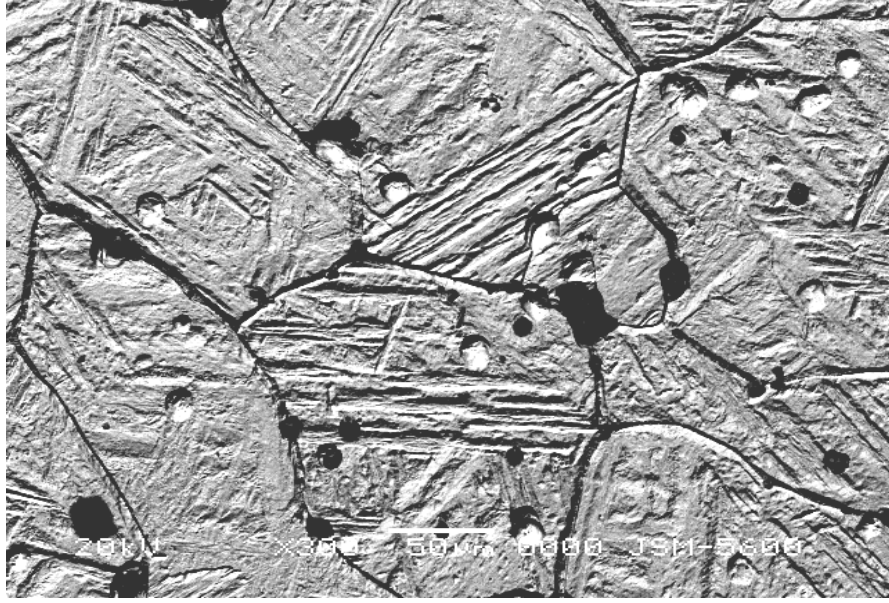
Şekil 3.1 1100 °C sıcaklıkta 1 hafta homojenleştirilen ve yavaş soğutulan numunenin yüzey görünümü

1100 °C sıcaklıkta 1 hafta homojenleştirdiğimiz A grubu numune fırın soğutma yapıldıktan sonra sıvı azota atarak yavaş soğutma şekli uygulandı. Numune yüzeyinde austenite taneler içerisinde martensitelerin oluştuğu gözlemlendi. Oluşan martensitik tabakaların tane sınırlarında başlayıp yine tane sınırlarında bittiği ve farklı yönelimlere sahip olduğu görülmektedir. Askeland⁽²⁹⁾, yavaş soğutma sonucu gözlenen bu tanelerin içindeki atom dizilimlerinin özdeş olduğunu ve oluşan bu tanelerin her birinde atomların dizilme yönelimlerinin farklı olduğunu belirtmiştir.



Şekil 3.2. A grubu numunenin yüzey görünümü

Yavaş soğutma şekli uyguladığımız Tablo 1.2.1 'deki A grubundaki numunemizde Şekil 3.2 de görüldüğü gibi martensite fazın oluştuğu gözlemlendi.



Şekil 3.3. B grubu numunenin yüzey görünümü

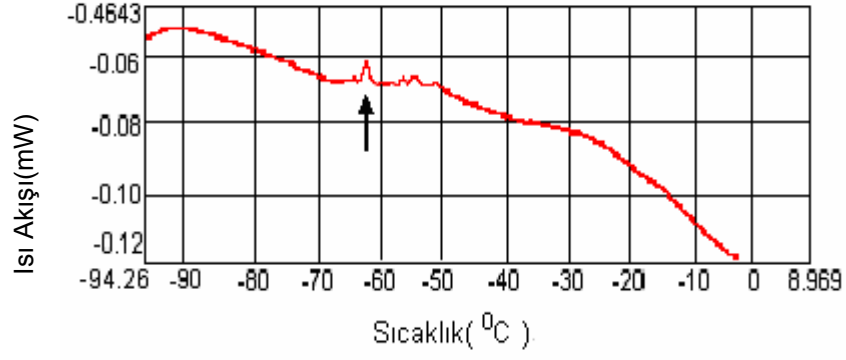
Hızlı soğutma şekli uyguladığımız Tablo 1.2.1 'deki B grubu numunemiz ise 1100 °C sıcaklıkta 1 hafta tavlandıktan sonra numune sıvı azota atıldı. Isıl işlem şeklinin değiştirilmesi martensitik dönüşümü arttırdığı ve martensitelerin sayısında artış olduğu görüldü. Ayrıca soğutma şeklinin değişimiyle tane boyutlarının değiştiği gözlenmiştir. Yani yavaş soğutma ile elde ettiğimiz tanelerin boyutlarının hızlı soğutma sonucunda küçüldüğü görüldü. Kırındı⁽³⁸⁾, Fe-%12,5Mn-%5,5Si-%9Cr-%3,5Ni alaşımı üzerinde yaptığı çalışmalarda aynı süre ve sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulan numunelerden, yavaş soğutulan numunede tane boyutunun hızlı soğutulan numuneye göre daha büyük olduğunu belirtmiştir. Fe bazlı alaşımlarda hızlı soğutma ile elde edilen tanelerin boyutunun yavaş soğutmayla elde edilen tane boyutundan daha küçüktür^(09,32,33). Tane sınırlarına yakın yerlerde martensite miktarında artış

gözlendi. Bu da tane sınırlarına yakın yerlerdeki kusurların martensite miktarını artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Tane sınırları genelde safsızlık atomları, atomlar arası boşluklar ve dislokasyonlar gibi kusurlar içerdiği için tane içlerinde olduğu gibi özdeş atom dizilimlerinden söz edilemez⁽⁰⁹⁾.

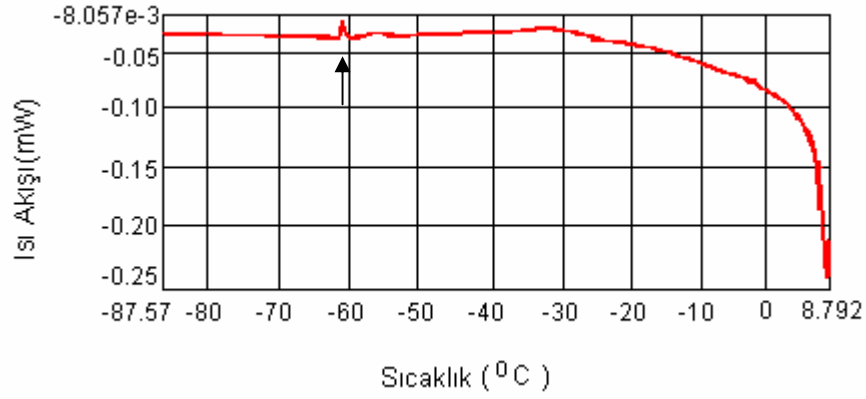
3.1.2 Termal Etkili Martensitik Dönüşümün Dönüşüm Sıcaklığına Etkisi

Termal etkili martensitik dönüşüm incelemelerimiz sonucunda, yavaş soğutma şekli uyguladığımız A grubu numunemizde -50°C 'lerde hareketlilik gözlenmeye başlandı. -64°C 'de tam pikini verdi ve böylece M_s sıcaklığı -64°C olarak belirlendi(Şekil 3.4.a). Safsızlık atomlarının artması martensitik dönüşümü kolaylaştırmış ve dönüşüm sıcaklığını aşağıya çekmiştir. Fe bazlı alaşımlarda alaşım içerisindeki elementlerin (nikel,kobalt,vanadyum gibi) oranı arttıkça M_s ve M_f sıcaklıklarının nerede ise doğrusala yakın bir değişimle azaldığı deneysel gözlemlerle kanıtlanmıştır⁽²⁴⁾.

Golovchiner ve Tyapkin⁽³⁵⁾, Fe-%27 Ni alaşımı ile tersinir dönüşümler üzerinde yaptıkları çalışmada M_s sıcaklığını -30°C , aynı alaşıma %1.5 Ti ekleyerek yaptıkları çalışmada M_s sıcaklığını -60°C bulmuşlardır. Buna göre alaşım içerisine eklenen diğer bir element M_s sıcaklığını düşürebilir.



a)



b)

Şekil 3.4 a) A grubu numunenin DSC ölçüm sonucu, **b)** B grubu numunenin DSC ölçüm sonucu

Hızlı soğutma şekli uygulanan B grubu numunenin DSC ölçüm sonucunda A grubunda $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenen martensite dönüşüm sıcaklığı $-61\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlendi(Şekil 3.4.b). Soğutma şeklinin değiştirilmesi tane boyutlarını küçültmüş ve bunun sonucunda M_s sıcaklığı artmıştır. Ayrıca B grubu numunelerdeki martensite miktarının artması numunenin dönüşümü kolaylaştırmış ve böylece dönüşüm sıcaklığını arttırmıştır. Ni-Ti alaşımlarında tane boyutunun küçülmesi ile M_s sıcaklığının arttığı bulunmuştur⁽³⁶⁾.

4. SONUÇ

Bu çalışmamızda Fe-%25Ni-%3V alaşımında meydana gelen martensitik faz dönüşümlerinin termodinamik özellikleri araştırıldı. Soğutma şeklinin değiştirilmesi sonucunda oluşan termal etkili martensitik dönüşümler incelendi. Oluşan yapıların Taramalı Elektron Mikroskobu'nda fotoğrafları çekildi.

Fe-%25Ni-%3V alaşımı oda sıcaklığına kadar yavaş soğutulup, sıvı azota atılarak austenite yapı içerisinde martensite yapılar SEM incelemeleri ile ortaya kondu. Martensite yapıların tane içerisinde farklı yönelimlerde olduğu gözlemlendi. Yine fırından çıkarıp sıvı azota atılarak oluşturulan hızlı soğutulmuş austenite yapı yüzey gözlemlerinde martensite miktarının yavaş soğutmaya göre fazla olduğu ve tane boyutunun yavaş soğutmaya göre küçüldüğü gözlemlendi. Hızlı soğutma sonucu tanelerin küçülmesi ve martensite miktarının artması literatür ile uyum içerisindedir.

Her iki soğutma şeklinde de atermal özellik gösteren martensitik dönüşüm olmuştur. Hızlı ve yavaş soğutma şekline bağlı olarak meydana gelen ani sıcaklık farkları martensitik dönüşümün olması için gerekli olan sürücü kuvveti meydana getirmiştir. Fe-%25Ni-%3V alaşımımızın termal etkili martensitik dönüşümün SEM incelemeleri sonucunda oluşan ürün fazın normal martensite olduğu ve bu martensitik yapının tane sınırlarında başlayıp yine tane sınırlarında bittiği gözlemlendi.

Yapılan DSC ölçümleri sonucunda martensite başlama sıcaklığı olan M_s sıcaklığını yavaş soğutma şekli uyguladığımız A grubu numunemizde -64°C olarak, hızlı soğutma şekli uyguladığımız B grubu numunemizde ise M_s sıcaklığını -61°C olarak ölçüldü. Soğutma şeklinin değiştirilmesi dönüşüm sıcaklığını değiştirmiştir. Hızlı soğutma ile küçük taneler meydana geldiği için dönüşümü kolaylaştıran kusurların tane sınırlarında fazla olması sebebiyle dönüşüm daha kolay olmuştur.

KAYNAKLAR

1. M. Dikici, Katıhal Fiziğine Giriş, Ondokuzmayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 1993.
2. T. Savaşkan, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitapevi, Trabzon, 1999.
3. D. A. Porter, K. E. Easterling, Phase Transformation in Metal and Alloys, Chapman and Hall, London, 1981.
4. D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, Chapman and Hall, London, 1990.
5. T. N. Durlu, F. Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, **13**(1), 1(2001).
6. M. Dikici, Fe Alaşımlarının Austenite–Martensite Dönüşümlerinde Çekirdeklenme Olayı, Yüksek Lisans Tezi, F. Ü. Fen Bil. Enst. Elazığ, 1980.
7. J. W. Christian, The Theory of Transformation in Metal and Alloys, Pergamon Pres, London, 1975.
8. L. Kaufman and M. Cohen, Prog. Metal Phys., **7** , 165(1958).
9. Z. Nishiyama, Martensitic Transformation, Academic Pres, London, 1978.
10. J. Ortin and A. Planes, Acta Metal, **37** ,1433(1989).
11. T. N. Durlu, J. Mater. Sci., **36**, 5665(2001).
12. J. F. Breedis and L. Kaufman, Metal. Trans., **2** , 2359(1971).
13. R .F. Bunshah and R.F. Melh, Journal of Metals, **5**, 1251(1953).
14. G. B. Olson, M. Cohen, Metall. Trans. A, **7A** , 1897(1976).
15. T. N. Durlu and J. W. Christian, Metal Sci., **8**, 1(1974).
16. S. R. Pati and M. Cohen, Acta Metal, **19**, 1327(1971).
17. S. Kajiwara, Mater. Trans., JIM, **33**, 415(1992).

18. C. M. Wayman, Introduction to The Crystallography of Martensitic Transformation, The Macmillan Company, New York, 1964.
19. A. G. Khachaturyan, Theory of Structural Transformations in Solids, John Wiley, New York, 1983.
20. G. B. Olson and M. Cohen, Metall. Trans.A, **7A** , 1905(1976).
21. G. B. Olson and M. Cohen, Metall. Trans.A, **7A**, 1915(1976).
22. J. W. Christian, Metall. Trans. A, **14A** , 1237(1983).
23. T. Kikuchi, S. Kajiwara and Y. Tomota, Mater. Trans., JIM ,**36**, 719(1995).
24. E. R. Petty, Martensite Fundamentals and Technology, London , 1970.
25. X. M. Zhang, T. R. Hu, X. M. Meng, Y. Y. Li, E. Gautier and J. S. Zhang, J.Phys. III, **5**, 317(1995).
26. I. Kozelkova, C. Dagbert, P. Gregoire, J. Galland and L. Hyspecka, J. Phys. III, **5**, 323(1995).
27. T. Wada, T. Tagayawa, M. Taya, Scripta Mater., **48**, 207(2003).
28. A.S.M.A. Haseeb, Y. Hayashi, M. Masuda and M. Arita, Metall. Mater. Trans. B, **33B**, 921(2002).
29. D .R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, I.cilt (Çeviri: Dr. M. Erdoğın), Nobel yayınları, Ankara, 1998.
30. T. Shiming, L. Jinhai and Y.Shiwei, Scripta Metall. Mater., **25** , 2613 (1995).
31. B. H. Jiang, L.Sun,R.Li, and T.Y.Hsu, Scripta Metall. Mater., **33**,63(1995).
32. H. Li, D. Dunne and N. Kennon, Mater. Sci. Eng., **A273-275** , 517(1999).
33. G. J. Arruda, V. T. L. Buono and M .S. Andrade, Mater. Sci. Eng., **A273 - 275**,528(1999).
34. E.Güler, Fe-%29Ni-%2Mn Alaşımında Farklı Etkilerle Oluşan Martensitenin Bazı Fiziksel Özellikleri, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2005.

35. Y. M. Golovchiner and Y. D. Tyapkin, Problem of Metallography and Physics of Metals, Fourth Symposium, Moscow, 141(1955).
36. B. H. Jiang, L. Sun, R. Li, and T. Y. Hsu, Scripta Metall. Mater., **33**, 63 (1995).
37. B. C. Maji, M. Krishnan, and V. V. Raman Rao, Metall. Mater. Trans. A, **34A**, 1029(2003).
38. T. Kırındı, Fe-%12,5Mn-%5,5Si-%9Cr-%3,5Ni Alaşımında Martensitik Dönüşümler Üzerine Termal ve Zor Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2004.
39. H. Ün, Malzeme Bilgisi Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2007.
40. F. Hasabi, Handbook of Extractive Metallurgy, Vol.2, WILEY-VCH, Germany, 1997.
41. Metals Handbook "Properties and Selection" Non Ferrous Alloys and Pure Metals, 9th Edition, Vol.2, 239-248, 1978.
42. "Nickel", <http://www.portfolio.mum.ed.ac.uk/studentwebs/session2/group29/nicktox.html>.
43. www.koumakina2001.8m.com
44. www.cellotin.com/forum/makine/celikte_ alasim_elementleri-t1342.0.html.
45. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Demir>.