

1.GİRİŞ

1.1. Metal Nedir?

Metal fiziğinin fiziksel prensipleri, metalik hali oluşturan özellikler açıklanarak tanımlanır. Metal, yüksek parlaklığa sahip, iyi elektrik ve ısı iletimi olan, ergime ile döküme uygun hale getirilme özellikleri ile bilinir. Pek çok metal bu özelliklere sahiptir ancak metal olmayan bazı katılarda da bu özellikleri gözlemek mümkündür ⁽⁰¹⁾.

1.2. İdeal Kristal Yapı

Katı metaller kristal yapıda oldukları için “Metal nedir?” sorusunu cevaplamadan önce ideal kristalin tanımını vermek gerekir. Bir kristalin tanımı ile ilgili ilk bilgiler dış şeklini inceleyerek elde edildi. Ancak gelişmiş düşünce bu işi yaparken atomik sıralanışı dikkate aldı. Bu yüzden kristalin makroskopik yapısına iç düzenlenme şeklinden yola çıkılarak varılabilir. Kristali makroskopik anlamda incelerken, belirli sayıda atomdan oluşmuş bir hacminin fiziksel özelliklerini dikkate alırız ve bu özelliklerin ötelemelere göre değişmez ancak bir dönmeye göre değişir olduklarını göz önünde tutarız ⁽⁰¹⁾.

Kristalografide başlangıçta tüm çalışmalar tek kristal üzerinde yapıldı. Bilindiği gibi tek kristallerde, düzlem yüzeylerinde birbirini takip eden atomların üç boyut içindeki dağılımlarının da düzenli olduğu kabul edilir. Ancak birçok madde vardır ki bunlar ya asla tek kristal halde bulunmazlar veya tek kristallerinin elde edilmesi çok zordur. Örneğin pirinç ve çelik gibi bazı metaller değişik şekil ve hacimde keyfi yönelmiş kristallerdir. Kil mineralleri gibi bazı minerallerde yalnız polikristal (toz) şeklinde kalırlar ve bunların tek kristalini yapmak mümkün değildir⁽⁰¹⁾.

Bazı maddeler kristalli yapıda da değildir. Örneğin cam gibi. Böyle kristalli yapıda bulunmayan maddelere *amorf* diyoruz. Amorf durumda atomlar ve moleküller tümüyle düzensizdir. Amorf maddeler sıvılar gibi birçok lokalize bölgelerde yüzlerce hatta binlerce atom kendi içinde bir düzenlilik gösterebilir. Fakat bu düzenliliğin başka bir lokalize hacimde bulunanları ile hiçbir bağı bulunamaz⁽⁰¹⁾.

Öyle bazı maddelerde vardır ki bir boyutta veya iki boyutta periyodiklik gösterirler. Örneğin kil mineralleri iki boyutta periyodiktir. Bu durumdaki maddeler kristalli yapılar içinde özel yapılar olarak değerlendirilirler⁽⁰¹⁾. Kristalli katı genellikle atomların üç boyutta bir düzen içerisinde bulunduğu haldir. Bir başka deyişle, kristal yapı belirli bir düzen içerisinde bir araya gelen atomların bu düzenlerini üç boyutta periyodik olarak devam ettirmeleri ile oluşur⁽⁰²⁾.

Metal kristallerinde, pozitif iyonlar ile negatif elektron bulutu arasında elektrostatik çekme kuvvetleri ve eş yüklü iyonlar arasında da itme kuvvetleri bulunur. Artan atomlar arası uzaklık ile her iki etki de azalır ve belirli bir X_0 uzaklığında anılan kuvvetler tam dengededir. X_0 uzaklığı dengedeki iki atom arasında mümkün olabilecek en küçük uzaklık olup her metal için karakteristik bir büyüklüktür. Üç boyutlu (3D) bir düzene göre dizilen ve denge konumunda bulunan atomların merkezlerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkan görünüme kristal örgüsü veya hacim örgüsü denir⁽⁰³⁾.

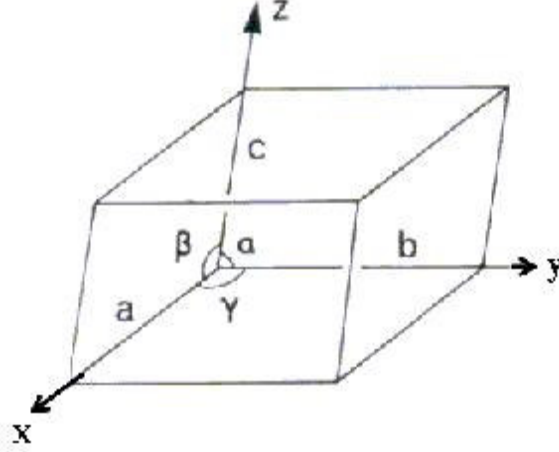
Kristalli yapının anlaşılabilmesi ancak 1912 de Max von Laue'nin X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğradığını bulmasından sonra mümkün olmuştur. Daha sonra Sir Laurence Bragg ilk kez X-ışınlarından yararlanarak kaya tuzu kristalinin yapısını analiz etmiş ve kristalin atomik yapısı ile ilgili önemli bir adımı atmıştır. Böylece araştırmacılar kristali oluşturan en küçük birim olan “Birim Hücre” yi ve bunun uzayda yayılarak ne şekilde kristali oluşturduğunu anlayabilmişlerdir⁽⁰²⁾.

Kristal örgüsü atomik boyutlarda yan yana gelerek kendisini oluşturacak bir birim hücre olarak adlandırılan basit geometrik şekiller yardımıyla tanımlanabilir. Birim hücre bir eksen takımında x, y ve z eksenleri üzerinde a, b, c atom uzaklıkları ve bu eksenler arasındaki α , β , γ açıları ile belirlenir. a, b ve c uzaklıkları örgü parametreleri olarak tanımlanır⁽⁰³⁾.

1.3. Metallerde Atomların Yerleşimi

Metalik elementlerin iyonları çok küçüktür ve birkaç angström boyutundadır.

Bu yüzden bir cm^3 metalik hacim içerisinde aşağı yukarı 10^{23} atom vardır. Metalik



Şekil 1.1. Kristal örgüde eksenler ve açılar

bağın incelenmesi sırasında iyonların gelişi güzel dağılmadığı ve oldukça düzenli bir şekilde yerleştikleri hemen görülebilir. Bu yerleşim öyle ortaya çıkar ki iyonlar bir araya geldiklerinde en küçük hacim oluşturacak şekilde yerleşirler. Sonuçta, belirli bir desen ile ortaya çıkan bu yerleşim, metal kristalini açığa çıkarır. Eğer iyonların oluşturdukları özdeş birim hücreli kristali ele alırsak; eşit büyüklükte hücrelerin bir araya gelerek en küçük hacim içerisine girmelerinin yalnızca iki yolu olduğunu görürüz. Bu iki yerleşim düzeninden birincisi yüz merkezli kübik (f.c.c.), diğeri de sıkı paketlenmiş hegzagonal (h.c.p.) şekillerdir⁽⁰¹⁾. Birim hücrelerin biçimine ve sahip oldukları simetri özelliklerine göre yedi temel kristal sistemi bulunmaktadır.

Bunlardan kübik, tetragonal ve hekzagonal sistemler, Fe-bazlı kristal yapılar bakımından en önemlileridir⁽⁰³⁾.

Kübik sistem \longrightarrow $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Tetragonal Sistem \longrightarrow $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Hekzagonal Sistem \longrightarrow $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$

Kristalin bazı özellikleri, kristalin birim hücreleri yardımıyla yorumlanabilir. Örneğin yüzey merkezli kübik örgüde farklı eğilimlere sahip sıkı düzenli düzlemler mevcuttur ve bu durum metalin şekil değiştirmesi bakımından önemlidir⁽⁰⁴⁾.

1.4. Kristal Yapı Kusurları

Atomları belirli uzay koordinatlarında bulunan bir birim yapının üç boyutta tekrarı ile oluşan bir hacim olarak *ideal kristal* düşünülebilir. Gerçek kristal ise kusurlu kristaldir. Kristal kusurları, bozulmaya uğramış bölgelerin sıfır, bir, iki veya üç boyutta oluşmasına göre noktasal, çizgisel, düzlemsel ve hacimsel yapı kusurları olarak sınıflandırılabilir. Bir kristal yalnız noktasal kusurları içeriyorsa, bu kristalin atomları ile ideal referans kristalin atomları arasında bire bir çakışma olur. Böyle bir çakışma çizgisel kusurların bulunduğu kristaller için geçerli değildir⁽⁰³⁾.

1.4.1. Noktasal Kusurlar

Bir kristaldeki düzgün periyodik örgüden veya yapıdan herhangi bir sapma eksiklik olarak tanımlanır. Bazı nedenlerle gerçek kristallerde her zaman bir eksiklik meydana gelebilir. Katıların birçok önemli özellikleri temel kristal yapıdaki bozulmalarla irdelenebilir⁽⁰²⁾.

Bir katı içinde atomların difüzyonu, eksiklik veya kirlilikle çok büyük miktarda hızlandırılabilir ve katıların mekanik ve plastik özellikleri de çoğunlukla kontrol edilmektedir. Kristal içindeki bir iyon veya bir atomun kaybolması ya da atomların bulunmaları gereken yerlerde bulunmamaları ile kristal örgüsünde meydana gelen noktasal kusura *Schottky kusuru* denir. Kristal yapıda kurala uymayan bir durumun bulunması entropide bir artış meydana getirir. Bir maddenin sonlu bir sıcaklıktaki denge durum şartları minimum serbest enerji durumu ile belirlenir⁽⁰²⁾.

Kristal örgü içinde bulunan bir atomun yerini boşaltarak örgü noktalarının arasındaki bir ara yere, normalde atomların bulunamayacağı bir yere geçerek yerleşmesiyle oluşan kusura (atomların bulunmamaları gereken yerlerde bulunmaları) ise *Frenkel kusuru* denir⁽⁰²⁾.

Bir kristalde Schottky kusurunun meydana gelmesi kristalin yoğunluğunu azaltmaktadır, çünkü hacim büyümekte buna karşın kütlede hiçbir artış görülmemektedir. Frenkel kusurlarının oluşumunda ise yoğunlukta ve hacimde hiçbir değişiklik görülmemektedir⁽⁰⁵⁾.

1.4.2. Çizgisel Yapı Kusurları (Dislokasyonlar)

Bir kristal örgüdeki çizgisel kusurlara *dislokasyon* denilmektedir. Dislokasyon yoğunlukları ve hareketlilikleri metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir faktördür⁽⁰²⁾.

Vida ve kenar yapı bozuklukları olmak üzere iki tip dislokasyon vardır. Vida dislokasyonu, örgü düzlemi kendisine dik olan dislokasyon çizgisi etrafında spiral şeklini alır. Kristalin eğildiği her doğrultuda, bir atom aralıklı eşitlikte hareket ettiği eksen etrafında bir tur dönülerek kristalografik düzlem takip edilirse, başlangıç noktasından bir atom aralığı aşağıda bitebilir⁽⁰²⁾.

Kenar dislokasyonu ise, hatasız kristali yarısına kadar dilimleyerek, kristali ikiye ayırarak ve kesimi fazla bir atom düzlemi ile kısmen doldurularak gösterilebilir. Araya sokulan bu düzlemin alt kenarı kenar dislokasyonunu temsil eder. Ayrıca Burgers vektörü kenar dislokasyonuna diktir⁽⁰⁶⁾.

1.4.3. Kristal Yapılarda İki Boyutlu Kusurlar

Bir atomun her taraftan kuvvet etkisine maruz kaldığı kristal iç bölgeleri için geçerlidir. Kristal yüzeyinde ise dışa doğru kuvvet mevcut değildir, dolayısıyla yüzeydeki atomlar farklı denge uzaklığına sahip olacaklardır. Yani kristal yüzeyi daha yüksek bir enerji seviyesindedir⁽⁰²⁾.

Eriyikten katılaşma veya yeniden kristalleşme sırasında genellikle çok sayıda kristal tanesi aynı zamanda büyür. Bunlardan komşu olanların örgü düzlemleri arasında çoğunlukla büyük aırlar ve süreksizlik görülür. Böylece tane sınırları ortaya çıkar. Sıkı düzenli örgü düzlemlerinin üst üste diziliş sırasının bozulmasından kaynaklanan iki boyutlu kusura da *yığılım kusuru (staging fault)* denir⁽⁰⁷⁾.

1.4.4. Hacimsel Yapı Kusurları

Hacimsel yapı kusurları, ikizlenmeler (*twinning*) veya kaymalar (*slip*) türü bozukluklardır ve üç boyutta ortaya çıkarlar. Kayma türü yapı bozuklukları, kristali oluşturan atomik düzen bozulmaksızın, kristalin iki bölümünün kayma düzlemi olarak bilinen bir düzlem üzerinde atomik uzaklıklar düzeyinde birbirlerine göre kaymaları şeklinde ortaya çıkarlar. Kayma oluşumu sırasında ortaya çıkan atomik yer değiştirmede, yer değiştirme uzunlukları atomlar arası uzaklığın tam katlarıdır. Hacimsel yapı bozukluğunun diğer bir türü ise ikizlenmelerdir. İvizlenmelerde yine kristalin bir bölümü diğer bir bölüme göre hacimsel olarak yer değiştirmiş olmakla birlikte, atomik yer değiştirme atomlar arası uzaklığın tam katları değildir. Her kristal yapı için ortaya çıkacak kayma ve ikizlenme türü yapı bozukluklarının üzerinde oluşturdukları düzlem ve oluş doğrultuları belirlidir⁽⁰²⁾.

1.5. Kristal Bağ Enerjisi

Bağ enerjisi iki atomun $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta birbirinden ayırmak için gerekli olan işe eşittir. $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda bağ enerjisi ile atomların ısı titreşimlerinin kinetik enerjisi, sistemin iç enerjisini oluştururlar. Serbest enerji aşağıdaki gibi bulunur⁽⁰⁴⁾.

$$F = U - T S \quad (1.1)$$

Burada F serbest enerji, U iç enerji, T sıcaklık ve S entropidir. Belirli bir T sıcaklığında bir atom mümkün olan en düşük enerji seviyesinde bulunuyorsa termodinamik denge olarak adlandırılır. Serbest enerji her durum ve reaksiyonda bir minimuma ulaşmaya çalışacağından ek bir enerji verilmesi halinde atom bu konumu terk edebilir. Böylece kristal yapıdaki kusurların çevresinde belirli sayıda atom yarı kararlı denge konumundadır⁽⁰⁴⁾.

Kristal yapı kusurları birkaç özel durum dışında, belirli kusurların istenerek oluşturulmasıyla alaşım veya yarı iletkenlerin özelliklerini iyileştirebilmektedir⁽⁰⁴⁾.

1.6. Faz Dönüşümleri

Faz kavramı fizikte ve malzeme biliminde önemli bir yere sahiptir. Faz, maddenin homojen bir hali olarak tanımlanmıştır. Basit bir sistem düşünelim: tek bir metalik element örneğin bakır bir bileşenli sistem olarak isimlendirilir. Katı bakır faz

tanımına uyuyor. İster sıvı ister gaz halinde olsun bu doğrudur. Bununla beraber katı, sıvı ve gaz oldukça farklı özelliklere sahiptir ve erime noktasında (veya buharlaşma noktasında) sıvı ve katı (veya sıvı ve gaz) birlikte bulunur. Birden farklı iki homojen madde tipi mevcuttur. Bundan bakırın katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı faz halinde bulunduğu sonucu çıkarılır⁽⁰⁸⁾.

Belirli metaller – örneğin demir ve kalay- alotropiktirler. Her biri farklı sıcaklık aralığında kararlı birkaç yapıda kristalleşirler. Burada her kristal yapı ayrı bir fazdır. Dolayısıyla alotropik metaller birden fazla katı fazında olurlar. Demirde, alfa (α), gamma (γ) ve delta (δ) ile gösterilen üç ayrı katı fazı vardır. Gerçekte, body-centered cubic (bcc) (hacim merkezli kübik) yapısına sahip olan α ve δ fazları birbirinin aynı olduğundan, demirde iki farklı katı fazı vardır⁽⁰⁸⁾.

Bir zamanlar demirin üçüncü bir katı (β) fazına sahip olduğuna inanılmıştı. Çünkü ısıtma ve soğutma eğrileri 500-791°C sıcaklık aralığında faz dönüşümü gösterdi. Isıtma esnasında, bu sıcaklık aralığında demirin ferromanyetik durumundan paramanyetik duruma geçtiği gözlemlendi. Manyetik dönüşüm bölgesinde kristal yapı bcc kaldığından, β fazı ayrı bir faz olarak kabul edilmedi. Başka bir deyişle, manyetik dönüşümün α fazında olduğu düşünüldü⁽⁰⁸⁾.

Metal ve alaşımlarının çeşitli denge hallerindeki iç yapıları, termodinamik kanunların kontrolü altında olup kullanılan maddenin atomları ve molekülleri gibi küçük elemanlarının toplamı termodinamik sistemi meydana getirir. Böyle bir sistem

çevreden yalıtılmış olarak kendi iç şartları içinde yeteri kadar bekletilirse kararlı hale gelir ki, bu duruma denge hali denir. Denge haline gelmiş herhangi iki sistem, kendi içlerinde homojen olmakla birlikte ikisi bir arada bulunduğu zaman heterojendir. Bu şekilde heterojen bir sistem homojen kısımlarına ayrılabilirse, böyle gruplara sistemin fazları denir⁽⁰⁸⁾.

İkili alaşımlar, iki bileşenli sistemlerdir. Yani iki metalik element karıştırılıyor. Üçlü alaşımlar üç bileşenli sistemlerdir. Yani üç metalik elementin karışımıdır. Şimdiye kadar kullanılan iki terimi açıklayalım *sistem* ve *bileşen* kelimeleri. Termodinamik ve fiziko-kimya'da kullanılan anlamda *sistem*, maddenin ayrılmış bir parçasıdır. Bileşenler sistemi meydana getiren metalik elementlerdir. Saf bakır veya saf nikel bir bileşenli sistemlerdir. İki elementin karışımlarından oluşan alaşımlar ise iki bileşenli sistemlerdir⁽⁰⁸⁾.

Malzemeleri oluşturan bileşen tipleri sadece metalik elementler değildir. Sistemlerin saf kimyasal bileşiklerden oluşması mümkündür. Bileşen olarak düşünülen başka bir bileşik çelikte oluşur. Genel olarak çelik, demir (element) ve demir karbür (Fe_3C , bir bileşik) den oluşan iki bileşenli sistem olarak düşünülür⁽⁰⁸⁾.

Alaşımlar, seçilmiş metal bileşenlerin karışımıyla teşkil edildiklerinde, genellikle gaz halinde pek önemi yoktur. Gaz halinde sadece tek bir faz vardır ve bütün gazlar muntazam çözeltiler teşkil edecek şekilde karışırlar. Bazen sıvı halinde, kalayın demire ilavesiyle oluşan alaşımlarda olduğu gibi, sıvı bileşenler birbiri içinde

çözünmezler. Bu yüzden birkaç sıvı fazı elde etmek mümkündür. Bununla beraber, endüstride önemli olan birçok alaşımlarda, sıvı bileşenler tek bir sıvı çözelti teşkil edecek şekilde birbiri içine çözünürler⁽⁰⁸⁾.

Şimdi alaşımlarda oluşan katı fazları gözden geçirelim. Genellikle, alaşım sistemlerindeki katı fazlar, iki temel tip katı çözültiden birisidir. Birincisi, bileşenlerin kristal yapıları üzerine kurulmuş faz diyagramının iki ucundaki katı çözültilerdir. İkincisi, bazı ikili alaşımlarda her iki bileşeninkinden farklı kristal yapılar, her iki bileşenin belirli oranlarında teşekkül edebilirler. Bunlara ara fazlar denir. Bunlar belirli bir konsantrasyonda ve belli bir konsantrasyon aralığında olmalarına rağmen, bunların çoğu kelimenin tam anlamıyla katı çözültilerdir⁽⁰⁸⁾.

Kararlı Sıcaklık Aralığı (°C)	Maddenin Hali	Faz	Fazın Kimlik Sembolü
2740 dan yukarısı	Gaz hali	Gaz	Gaz
1539 dan 2740 a sıvı	Sıvı	Sıvı	Sıvı
1400 den 1539 a	Katı	bcc	(delta)
910 dan 1400 e	Katı	fcc	(gama)
910 dan aşağısı	Katı	bcc	(alfa)

Çizelge 1: Saf Demirin Fazları

Metal alaşım kristalleri, farklı fiziksel Őartlar altında farklı fazlarda bulunabilirler. Fiziksel Őartların değişmesi sonucu bir fazdan bir başka faza geğme işlemine de faz dđnüşümü denir. Faz dđnüşümü, sıcaklığın aniden dđřürölmesi veya yükseltilmesi sonucunda veya dđřarıdan mekaniksel zorun etkisi altında meydana gelir. Bu dđnüşüm esnasında dđnüşmüş ve dđnüşmemiř bölgelerin sadece kristal yapıları değişir⁽⁰²⁾.

Faz dđnüşümü sırasında kristali oluşturan atomların birbirlerine göre konumları veya komşulukları değişmeden meydana gelen faz dđnüşümlerine *difüzyonsuz faz dđnüşümü* denir. Austenite kristal yapının, martensite kristal yapıya dđnüşmesi Şeklinde geręekleřen dđnüşüm sonunda atomlar dđnüşümden önceki komşuluklarını korudukları ve yalnızca atomlar arası uzaklıktan çok olmayan uzaklıklara yer değiştirdiklerinden dolayı austenite-martensite faz dđnüşümü, *difüzyonsuz faz dđnüşümü* olarak bilinir. Difüzyonsuz faz dđnüşümünde kristal yapı bir bütün olarak taşınmaktadır. Fe-bazlı alaşımlarda ortaya çıkan austenite-martensite faz dđnüşümleri (fcc → bcc, fcc → bct, fcc → hcp) difüzyonsuz oluşabilme özelliklerinden dolayı katıhal fiziğinde önemli bir yere sahiptir⁽⁰²⁾.

Austenite kristal yapı, martensite kristal yapıya dđnüşünce ana kristal yapı tümü ile ürün kristale dđnüşmez. Martensite kristalleri düzgün olmayan bir dağılımla, austenite içerisinde serpilmiş olarak ağığa çıkar. Austenite içerisinde martensite'in kaplayacağı hacim, dđnüşümü oluşturan etkenin büyüklüğüne bağlıdır.

Ortaya çıkan martensitik kristalleri ana yapı içinde değişik şekillerde rastgele bir dağılım gösterir. Oluşan tanecikler, daha çok uçlara doğru incelen plakalar şeklinde veya düşük karbon çeliğinde olduğu gibi belirli düzlemler üzerinde iğnecik şeklinde ya da başka metallerde olduğu gibi çatal, mızrak ya da kama şekillerinde görünebilir⁽⁰⁴⁾.

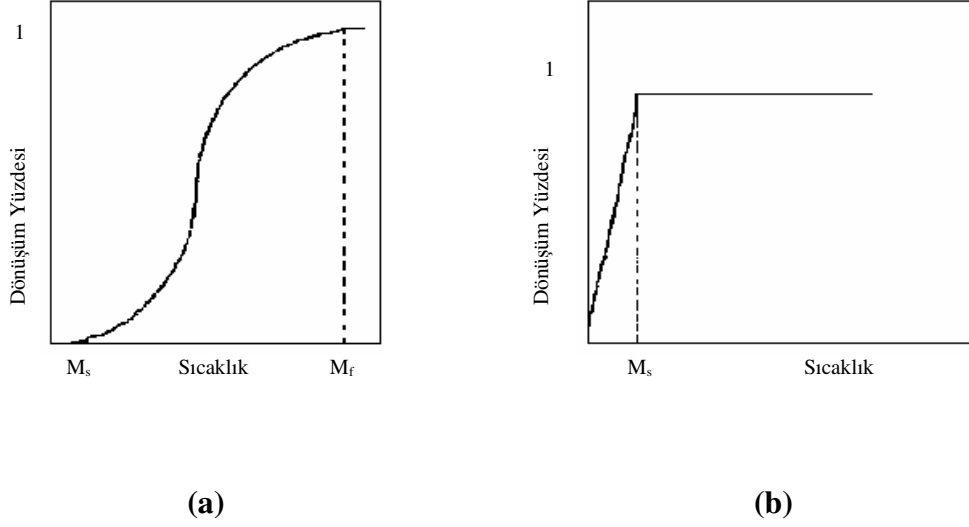
Austenite martensite faz dönüşümlerinde soğutma ile oluşturulan martensite'lerin oluşmaya başlaması dönüşüm sıcaklığı olarak bilinen M_s sıcaklığında, dönüşümün tamamlanması da M_f sıcaklığın da gerçekleşir⁽⁰⁹⁾.

Austenite-martensite faz dönüşümleri genellikle, çok kısa bir zaman aralığı içinde patlama şeklinde veya atermal olarak meydana gelir⁽¹⁰⁾.

Martensite'nin oluşmaya başladığı sıcaklıktan daha aşağı sıcaklıklarda patlama şeklinde yeni martensite'ler oluşabilir, ancak bir kez oluşan martensite'ler düşük sıcaklıklarda hacimce bir büyüme göstermez. Bunshah ve Mehl (1953), Fe-bazlı alaşımlarda ısısal etki ile oluşan atermal özellikli martensite kristallerinin 10^{-7} s gibi kısa bir zamanda ortaya çıktığını ölçmüşlerdir⁽¹¹⁾.

Az sayıda bazı alaşımlarda da martensite'lerin oluşumu izotermal ve gözle izlenecek kadar yavaş olabilir. Bu tür dönüşümlerde, M_s sıcaklığından aşağı sıcaklıklarda yeni martensite kristalleri de hacimce bir büyüme gösterebilir. Şekil

1.2.a.' da izotermal ve Şekil 1.2.b'de atermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimleri verilmiştir⁽¹²⁾.



Şekil 1.2. a. İzotermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi

b. Atermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi

1.6.1. Austenite-Martensite Faz Dönüşümlerinin Yapısal Özellikleri

Austenite faza uygulanan fiziksel etkenleri üç grupta toplayabiliriz. Birinci grupta, soğutma ile oluşturulan martensite dönüşümlerinin oluşumu, ikinci grupta M_s sıcaklığının altında uygulanan ve elastik sınırı aşmayan zorla etkilendirilerek soğutma ile meydana gelen martensite dönüşümleri, üçüncü grupta ise M_s sıcaklığının üzerinde zorlama ile meydana gelen martensite dönüşümleridir⁽¹³⁾. Martensitik faz dönüşümü; ana yapıdan (Austenite), ürün yapıya (Martensite),

atomların komşuluklarını değiştirmeksizin gerekleşen bir faz donüşümü olup, donüşüm sonucunda ana faz, ürün faza tümü ile donüşmez⁽⁰⁹⁾.

Martensitik faz donüşümünün gerçekleşebilmesi için ürün fazın serbest enerjisinin ana fazın serbest enerjisinden daha düşük olması gerekmektedir. Daha önce bahsettiğimiz martensitik faz donüşümünü oluşturacak olan fiziksel etkenin büyüklüğü ve cinsi donüşümde kullanılacak olan alaşımın kompozisyonu ve içerisinde bulunan elementlerle yakından ilgilidir⁽⁰³⁾.

Austenite fazda bulunan alaşım, ana ve ürün fazların aynı serbest enerjiye sahip oldukları bir T_0 sıcaklığı altında soğutulduğunda M_s sıcaklığında martensite faza donüşür. Kristal yüksek sıcaklıklardaki kararlı durumdan, daha alçak sıcaklıklardaki kararlı duruma geçer ve austenite fazdan martensite faza donüşüm gerçekleşir⁽²⁵⁾. Bu şekilde oluşan martensite kristallerine soğutma ile oluşturulmuş martensite kristalleri denir. Ortaya çıkan martensite kristalleri hacim içerisinde mercimeğe benzer plakalar şeklinde, düzlem kesitte iç (acicular) biçiminde gözlenir⁽⁰⁴⁾.

Martensite donüşüm sıcaklığı M_s 'in hemen altında uygulanan ve elastik sınırı geçmeyen zorlar, austenite yapıda deformasyona sebep olmaksızın martensite donüşümüne yardımcı olurlar. Bu şekilde oluşan martensite kristallerine zor ile meydana getirilmiş (stres-induced) martensite kristalleri denir. Otte (1957) yapmış olduğu deneyler sonucunda, yalnız zorlama etkisi ile de martensitik donüşümlerin

oluşabileceğini söylemiştir. Kristalografik bakımdan normal plaka martensite kristalleri ile aynı yapıdadırlar. Fakat zorun artması ile oluşan martensite plakaları daha ince ve uzun bir şekil alırlar. Bu şekillenme, artan deformasyon miktarı ile austenite içerisindeki bir takım çizgisel kristal yapı bozukluklarının (dislokasyon) oluşması ve martensite kristalin yerleşme düzlemi üzerinde bulabildiği boş yerlere yerleştiği, kalınlaşmak yerine uzamayı tercih ettiği sonucunu vermektedir. Zor ile oluşturulan martensite kristalleri soğutma ile oluşan martensite kristallerinden daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir. M_d , zor ile etkilendirilmiş martensite dönüşüm sıcaklığı, yaklaşık olarak ($M_s+50^\circ\text{C}$) $^\circ\text{C}$ civarında bulunmuştur⁽¹²⁾.

Durlu (1974) Fe-Ni-C alaşımı ile hazırladığı numuneleri yüksek gerilim geçirme elektron mikroskopunda inceleyerek şu sonuca varmıştır; zorlanma ile oluşan martensite dönüşümünün, soğutma ile meydana gelen martensite dönüşümü gibi hızlı bir dönüşüm olduğunu ve daha önce bant yapısında olduğu söylenen yapının çok ince iğnecik gruplarından meydana geldiğini ve yüksek çözme güçlerinde, bu iğneciklerin dislokasyon yığınlarından oluşmuş olup, normal plaka martensite'leri ve zor ile etkilendirilmiş martensite'ler içerisinde gözlenen ikizlenmelerin bu iğnecikler içinde yer aldığını belirlemiştir⁽¹⁵⁾.

Martensitik oluşumu sırasında ortaya çıkan gerilmeler dönüşümün itici kuvvetine karşı etki ederek çok sayıda yeni kristal kusuru (ikizlenmeler, dislokasyonlar, yığın hataları) oluştururlar. Başka bir ifadeyle, mikroplastik şekil

değişimleri meydana gelir. Bu durumda sertliğin artmasına yardımcı olur. Oluşan martensite miktarı soğuma hızına değil, aşırı soğumanın büyüklüğüne bağlıdır⁽⁰⁴⁾.

1.6.2. Bainitik Dönüşümler

İlk olarak, Bain ve Davinport tarafından özel bir yapı olarak tanımlanan, perlit (demir-karbon sisteminde gelişen b.c.c. ve sementitin-Fe₃C lamelli yapısı) kademesi ve martensite kademesi arasındaki alana *ara kademe dönüşümü* veya *bainite* adı verilir. Ayrıca bainite, ferrit (Fe'in b.c.c. yapısı) sementitin (Fe₃C) yeni düzenlemesi olarak da bilinir⁽⁰⁶⁾. Bainitik yapı pratikte daha çok austenite kristalin izotermal koşullarda dönüştürülmesi ile elde edilir. Ancak sürekli soğutmada da perlit-martensite dönüşüm yaptıran soğuma hızlarından elde edilen yapılara da yaygın olarak bainitik yapı denilmektedir⁽¹⁶⁾.

Bainite yapının görünümü, yapısında bulunan karbürlerin formunun ve düzeninin, perlit yapıdaki gibi normal ışık mikroskopunda incelenemediğinden dolayı, daha çok elektron mikroskopunda incelenmektedir. Bainitik yapı mikroskobik olarak, iğnesel ve taneli olmak üzere iki ana gruba ayrılır. İğnesel bainite, izotermal ve sürekli dönüşümlerde, taneli bainite ise, yalnızca sürekli soğutmada görülür ve birlikte bulunduğu diğer yapılardan ayırt edilmesi oldukça zordur⁽⁰⁴⁾. Bainitik dönüşümün endüstriyel olarak en fazla önemi, kalıp imalatında kullanılan takım çeliklerinin mekanik özelliklerinde kullanılır. Martensite yapıya

nazaran daha düşük mekanik özellik elde edilmesine karşın, gerilmesi az ve çatlama riski olmayan mekanik özellik gösterir⁽¹⁷⁾.

1.6.2.1. Bainitik Dönüşümün Genel Özellikleri

Bainitik yapı, etki ettiği sıcaklık alanına göre farklılık gösterir ve bainitik dönüşümün, perlit'e yakın bölgelerinde oluşan bainitik yapıya üst bainitik yapı ve bainitik yapının martensit dönüşümüne yakın sıcaklık alanındakine ise alt bainitik yapı ve iğnesel yapı veya iğnesel bainitik yapı olarak adlandırılır⁽¹⁸⁾.

Alt bainitik yapı, martensite ile büyük benzerliğe sahiptir. Bainite kristalleri martensitik yapıdan, aslen yapılarında karbürlerin bulunmasıyla ayrılır. Karbürlerin formu ve dağılımı, büyük ölçüde çeliğin karbon miktarına bağlıdır. Alt bainite kademesi için tipik olan çubuk formundaki karbürlerin sıralı düzenlenmeleri de, bainite iğneleri ana eksenine ile aralarında 50° ile 60° açı meydana gelir. Ayrıca alaşımlı çeliklerde alt bainite yapısında, sementit türü olmayan karbürlerde görülür⁽¹⁹⁾.

Üst bainite yapı da perlite benzer, daha az kurala uygun düzen vardır. Bu yapıda, paralel ve yatık uzanmış karbürler, ferrit plakaları ile birlikte bulunur⁽⁰⁴⁾.

Taneli bainitik yapı, hemen yalnızca sürekli soğutmada görülür ve bainite dönüşüm sahasının üst bölgesinde yer alır. Yapının görünüm formu çok değişik

olabilir ve oluşum mekanizmalarından anlaşılabilir. Taneli bainitik yapıda, austenite kristalin karbonca zenginleşmesiyle, önce ferrit (b.c.c demir kristalleri) meydana gelir. Zenginleşen austenite sahası, ferrit dönüşümü devamında kilitlenir ve devam eden soğumasına bağlı olarak, ya karbür ve ferrit'in kurlsız dönüşümü olur ya da kararlı kalıntı austenite (stable residual austenite) olarak değişmeden kalır⁽²⁰⁾.

Bainitik yapıda her bir plaka hem uzunlamasına hem de kalınlık olarak büyür. Üst bainite dönüşümünde çoğu zaman demet formunda kristaller gelişir. Üst ve alt bainite gelişme hızları oldukça farklıdır ve hız üst bainite yapıda oldukça yüksektir. Dönüşüm hem tane içlerinde hem de tane sınırlarında başlayabilir. Austenite tanesi içerisinde bulunan yabancı parçacıklar çekirdek oluşumuna katkı sağlarlar. İğneler, dönüşüm sıcaklığına bağlı olan hıza uygun gelişir ve büyüme tane sınırı, yabancı atom veya diğer iğnelere kadar devam eder. İğneler, tane sınırı üzerinden gelişimini sürdüremez, fakat çoğu zaman tane sınırlarına temas ettiklerinde, aynı tane içerisinde diğer bir doğrultuda yeni iğneler meydana getirir. Bu koşullarda ve üst bainite sahasında, austenite tane sınırlarında tercihli çekirdek oluşumu, martensit yapının oluşum şekline farklıdır. Ayrıca, uzunluk artışında gelişme hızı, zamana bağlı değildir, fakat kalınlık artması zamanla azalır⁽¹⁹⁾.

Dönüşüm bainite başlangıç zamanında, B_s başlar ve bainite bitiş zamanında, B_f sona erer⁽⁰⁶⁾.

Çeliğin austenitik yapıdan soğutulmasıyla meydana gelebilecek yapılar; zaman-sıcaklık-dönüşüm (T.T.T.) ve sürekli-soğutma-dönüşümü (C.C.T.) diyagramları ile kolaylıkla açıklanabilir⁽⁰⁴⁾.

T.T.T. diyagramları ile dönüşümün başlama ve bitiş çizgilerini, azalan sıcaklıkla martensite dönüşümünü, austenite sıcaklığını ve çeliğin kompozisyonunu bulmamızı sağlar. Aynı çelik, farklı sıcaklıklarda farklı kompozisyonlarda bulunabileceğinden farklı diyagramlara sahip olur. Bütün karbürler çözünene kadar, artan sıcaklıkla austenite kompozisyonu değişeceğinden farklı austenite sıcaklıkları da diyagramın değişmesine sebep olur. Ayrıca bütün karbürler çözüldükten sonra artan sıcaklık austenite tane boyutlarının artmasına sebep olur ve bu dönüşüm diyagramı için çok etkilidir. T.T.T. diyagramları, ısıtma süresince bir çeliğin davranışlarını yalnızca genel bir yöntem olarak verir⁽⁰⁴⁾.

C.C.T. diyagramları, ısıtma işleminden geçen malzemenin mikroyapı haritasını oluşturmak için faydalıdır. C.C.T. diyagramları sürekli soğutmada zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramı olup, eğrileri farklı sıcaklıklardaki soğutma koşullarını gösterir. T.T.T. diyagramları, özellikle mekaniksel özelliklerinde soğutma koşullarına bağlı olarak, yapının ne olacağını detaylı bir şekilde vermesinden dolayı oldukça önemlidir⁽²⁰⁾.

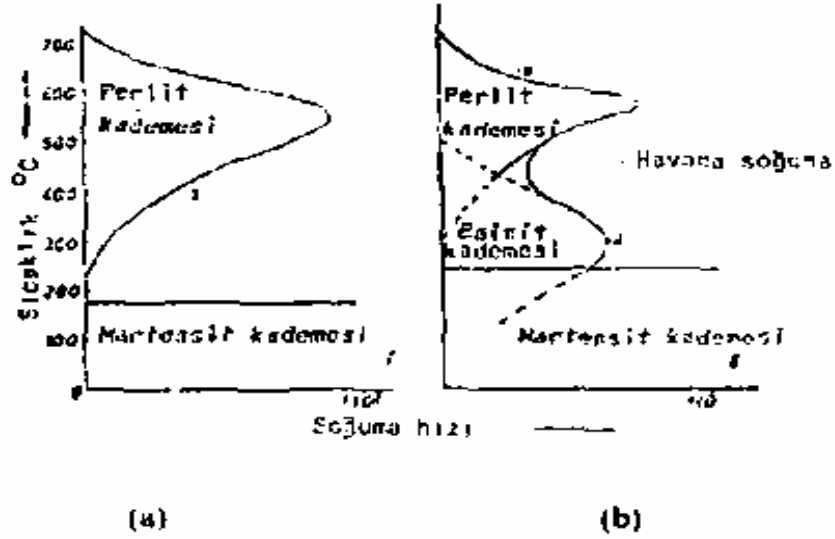
Bainite dönüşümünün temelini, bir zaman-dönüşüm-sıcaklık (T.T.T.) diyagramı üzerindeki dönüşüm oranlarının kendine ait bir sürekli-soğutma-dönüşüm

eğrisi tanımlar. Mo ve Cr gibi karbür içerikli elementlerin güçlü karbit oluşumları ile orantılı özel çelikler içinde genellikle bainitik yapı görüldüğünü iddia etmişler⁽²¹⁾.

1.6.2.2. Bainitik Dönüşümün Yapısal Özellikleri

Alaşımli çeliklerde dönüşüm hızlarının sıcaklığa göre değişimini Şekil 1.3. de incelersek, perlit dönüşüm hızı aşıldıktan sonra, düşen sıcaklıkla birlikte perlit oluşumu güçleşir. Fakat perlit kademesinin altındaki sıcaklıklarda dönüşüm hızı artmaktadır. Oldukça yüksek sıcaklıklarda görülen bu dönüşüm, bainite yapısına aittir. Bainite dönüşümü, sıcaklığın düşmesiyle artar, A noktasında en büyük değerine ulaşır. Bainite yapısı, perlit ve martensit kademeleri ile sınırlanmaktadır⁽⁰⁴⁾.

Alaşımli çeliklerin dönüşüm hızı, alaşımsız çeliklere göre daha düşüktür. Alaşım elementlerinin ilavesiyle yukarıdaki eğriye benzer dönüşüm hızı meydana gelir. Yavaş soğutma yani oda koşullarında soğutmada perlit dönüşümü engellenerek yüksek oranda bainitik yapı oluşturulabilir. Bu da sıcaklığın düşmesiyle büyük ölçüde bainitik yapı oluştuğunu gösterir. Bainitik yapı yanında martensitik yapı gözlenemediği gibi, bainite dönüşümü engellenirse yalnızca martensitik yapı görülebilir ve yapıda bainite görülmeyebilir. Bunun sebebi, bainite yapısındaki difüzyon olayından dolayı belirli bir süreye ihtiyaç duyulmasıdır. Bainite yapı bölgesinin hızlı geçilmesinden dolayı da bainitik yapı gözlenmeyebilir⁽⁰⁴⁾.



Şekil 1.3.a. Alaşımsız çeliklerde dönüşüm hızının sıcaklığa bağlı değişimi

b. Alaşımlı çeliklerde dönüşüm hızının sıcaklığa bağlı değişimi

Düşük karbonlu bainite yapının yapısal özellikleri açıklanabilmiştir, fakat yüksek karbonlu bainite yapının yapısal özellikleri pek anlaşılır değildir. Alt ve üst bainite yapının ikisi de austenite yapıdan bir mekanizma kırılmasıyla oluşan ferritin küçük bir plaka veya iğne ile çekirdeklenmesi olarak görülür⁽⁰⁴⁾.

Bainite tabakaların bütünü alt tabakalardan oluşmuş tek bir tabaka şeklindedir. Tabakalar içinde verilen demet kalıntı fazlar tarafından bir başka demetten tamamiyle izole edilmeyebilir. Demet içinde alt tabakalardan oluşan yapıların tümü ortak bir kristalografik yönelmede olmalıdır. Ayrıca alt tabakalar sınırlı boyutta büyürler⁽¹⁹⁾. Bir demetin büyümesi diğer kısımlarından daha çok bulunan alt tabakaların uçları yanında sık çekirdeklenmeyle yeni alt tabakalar oluşturmasıdır⁽⁰⁴⁾.

Bir demetin bütün şekilleri üç boyutlu makroskobik ölçekte kama (wedge) şekilli tabaka gibi gözlenmiştir⁽¹⁸⁾. Mikroskobik alt tabakalar bir demet içinde, mercimek şekilli (lenticular) tabakaya veya düzlemsel tabakaya (lath) sahiptir, oluşumu en çok kenara yakın çıkıntılarda ve demetin uçlarında en az etkilidir. Bir demetin ucu yanındaki bir alt tabakaların genişliği, demetin orijinal çekirdek kısmının yanındakiyle aynıdır⁽⁰⁴⁾.

Bainite ve martensite kristallerin yapısal özellikleri ve kristalografisi hemen hemen aynıdır, ayrıntılı kristalografisi farklıdır⁽²⁰⁾.

1.6.2.3. Bainitik Dönüşümün Kristalografik Özellikleri

Bainitik yapı oluşumu kübik bir yapıya sahip olmasıyla birlikte tamamiyle aşırı doymuş ferrittir. Kritik sıcaklığın üstünde bir oluşum sıcaklığına sahip değilse tetragonal yapıda gözlenebilir⁽⁰⁴⁾.

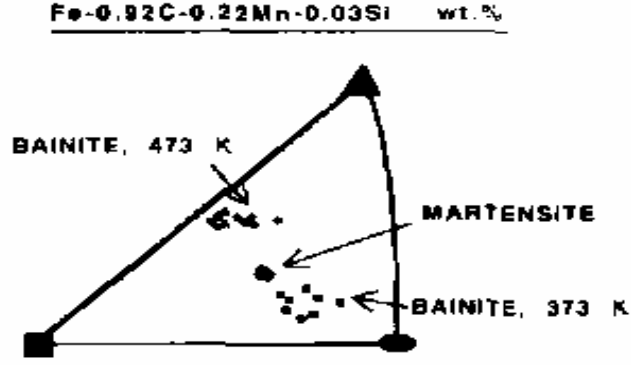
Bainite ve martensite kristallerinin yapıları birbirine oldukça benzerdir. Özellikle alt bainite yapı ile yüksek karbonlu martensite kristal yapı birbirine çok benzerken, üst bainite yapı 400 °C'de ısı işlem gördükten sonra oluşan düşük karbonlu martensite kristal yapıya benzemez. Bainite ve martensite kristallerinin ayrıntılı kristalografisi farklıdır. Bunlardan biri de habit düzlemidir. Greninger ve Troiano (1940) yaptıkları çalışmada Fe-%0.92C-%0.22Mn-%0.03Si alaşımının

bainite ve martensite yapılarının habit düzlemleri ile dönüşüm sıcaklıklarını incelemişlerdir (Şekil 1.4.). Bainite yapının yüksek sıcaklıklarda austenite kristalin yaklaşık oktahedral düzlemine, düşük sıcaklıklarda ise ilk ötektoid sementite benzediğini gözlemlemişlerdir⁽²²⁾.

1.6.2.4. Bainitik Dönüşümün Kinetik Özellikleri

Martensite ve bainite karışımı içeren birçok ticari çeliklerin ısı işleminden sonra mikro yapıları bulunabilir. İlk bainite oluşur ve austenite yapının bir kısmı martensitik dönüşümde kalabilir. Karbonla zenginleştirilmiş austenite yapının martensitik dönüşüm kinetiği hesaplanabilir. İlk bainitik reaksiyonla tanımlanan sapma ve zor dönüşümleri tarafından martensitik dönüşüme ayrıca etkili olabilir. Tam bir başlama noktası olmasına rağmen, olayın tamamıyla austenite yapının martensitik dönüşümün tanımlanmayabilirdir⁽⁰⁴⁾.

Dönüşümün kinetik değerleri, hem çekirdeklenme hem de büyüme olmalıdır. Bir başka deyişle, martensite çok hızlı büyür ve çarpma ile sadece boyutlar sınırlanır. Her bir çekirdek, fazın V sabit bir hacmiyle dönüşecektir⁽⁰⁴⁾.



Şekil 1.4. Habit düzlemin dönüşüm sıcaklığıyla değişimi ve martensite habit düzlemi ile farkı

Austenite içinde atermal martensitik dönüşümün ilerlemesi, belli bir zaman içinde olur. Difüzyonsuz dönüşüm için sıcaklık M_s 'in altında ve $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}$ sürücü kuvvet içindeki değişimle doğru orantılıdır ve $\Delta G^{\gamma \alpha}$ martensite kristalin birim hacminin Gibbs serbest enerji ile austenite kristalin Gibbs serbest enerjisinin farkıdır ($\Delta G^{\gamma \alpha} = G^{\alpha} - G^{\gamma}$)⁽²⁰⁾.

1.6.3. Bainitik Dönüşümün Mekanik Özellikleri

Irvine ve Pickering (1957), karbon yoğunluğu azalırken bainitik çeliklerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Karbon yoğunluğunu % 0,1 kadar azaltılması, boron ve molibden ilavesiyle bainitik dönüşümde iyi bir mekaniksel özellik sağlamışlardır⁽²³⁾.

%0.01- 0.03 karbon yoğunluğuna sahip bainitik çeliklere ultra düşük karbonlu bainitik elikler (UDKB) adı verilir. Düşük karbon yoğunluğu mikro yapının çalışılan bütün sıcaklıklar için tamamıyla bainitik olmasını sağlar⁽⁰⁴⁾.

Bainitik yapının mekanik özelliği karbon yoğunluğuyla lineer olarak artar. Karbon, bir ara yer elementidir. Bütün karbürler yüksek miktarda znmemişse, austenite sıcaklığı mekanik özelliği etkilemez. Bainitik yapı oldukça karışıktır ve mekanik özelliği, dönüşüm sıcaklığına ve kompozisyonunu bağlıdır. Yüksek karbonlu alaşımların mekanik özellikleri ilk dönüşüm sıcaklığuyla azalır, bainite yapının hacim oranı bozulmuş perlit ve martensite gibi kalıntı fazların azalmasıyla artar. Ayrıca bainite yapının mekanik özelliğinin soğutma oranları ile arttığı bulunmuştur⁽⁰⁴⁾. Bainitik yapının dayanıklılığı için önde gelen sebepler şunlardır;

1.6.3.1. Tane Boyutu

Dönüşüm sıcaklığı azaldığında bainitik yapının tane boyutu küçülür. Bu da yapının dayanıklılığını artırmakla doğrudan ilişkilidir. Dönüşüm sıcaklığının azalmasıyla tane boyutu daha da küçülür. Dönüşüm sıcaklığının azalmasıyla karbon daha yavaş difüzyona uğrayacağından dolayı ara yüzeyde karbonca zenginleştirilmiş bir tabakanın daha hızlı bir gelişimi vardır. Yüksek karbonlu bainitik çeliklerin tane boyutlarını ölçmek oldukça zordur. Yeterli yönelime karşı dislokasyon hareketini engelleyici hareket vardır⁽⁰⁴⁾.

1.6.3.2. Karbit Dağılımı

Dönüşüm sıcaklığı azaldığında karbon parçacıkları daha ince, daha nümerik ve daha pürüzsüz yayılır. Bu daha büyük bir mekaniksel etki oluşturur. Bainitik yapı dayanıklılığı karbon sayısı ile doğru orantılıdır⁽⁰⁴⁾.

1.6.3.3. İç Zor

Dönüşüm sıcaklığı, dönüşümün artması süresince oluşan genişlemeyi azaltır ve bu bainitik yapı içinde daha büyük bir iç zora neden olur. İç zor dayanıklılığın artmasına katkıda bulunur. Kanıtlanmış zor gerilim oranı, dönüşüm sıcaklığının azalmasıyla azalır ve yalnızca iç zorlar kalkıp, temperlenerek yenilenebilir⁽⁰⁴⁾.

1.6.3.4. Dislokasyon Yoğunluğu

Bütün bainite yapılar yüksek sıcaklıklarda oluşmasına rağmen ferritten daha büyük bir dislokasyon yoğunluğuna sahiptir. Bu ayrıca yapının dayanıklılığına katkıda bulunur. Bu dislokasyonlar kesilen dönüşümle zorların birleştirilmesi ile meydana gelir. Zorlar ayrıca bitişik austenite kristalin deforme olmasına sebep olur ve böylece austenite kristalden daha yüksek dislokasyon yoğunluğu içerir. Karbonlar ayrıca yüksek bir dislokasyon yoğunluğunu meydana getirmesine yardımcı olurlar. Yüksek karbonlu bainitik yapıların daha yüksek dayanıklılığa sahip olması karbonun sebep olduğu yüksek dislokasyon yoğunluğu olabilir⁽⁰⁴⁾.

1.6.3.5. Bainite Yapıda Karbit Çözünmesi

Bainitik yapı içinde dönüşüm sıcaklığının azalmasıyla daha çok karbit çözünerek ayrılır. Bu katı-çözünmüş dayanıklılığı üretir ve ferritteki dislokasyonlar ve ara yer karbon atomlarını birleştirmesini mümkün kılar⁽²⁴⁾. Sonuçta bainite yapının dayanıklılığının yapıdaki karbon miktarına ve dönüşüm sıcaklığına bağlı olduğunu söyleyebiliriz⁽⁰⁴⁾.

1.6.4. Bainite Yapı İle Martensite Yapının Karşılaştırılması

Bainite ve martensite yapılar arasındaki benzerlikler ve bazı farklılıklar aşağıda verilmiştir:

1. Alt bainite yapı ile yüksek karbonlu martensite kristal yapı birbirine oldukça benzerdir fakat ayrıntılı kristalografleri farklıdır⁽²⁰⁾.
2. Martensitik ve bainitik yapının dönüşüm başlama ve bitiş sıcaklıkları, dönüşüm miktarları, austenite sıcaklıkları, değişen sıcaklıklarla malzemenin kompozisyonları, soğutma koşullarına bağlı olarak mekanik özellikleri birbirinden oldukça farklıdır⁽²⁰⁾.
3. Zorlama enerjisi martensite yapıda olmasına rağmen bainite yapıda yoktur⁽²⁰⁾.

4. Bainite ile martensite yapının habit düzlemleri birbirinden farklıdır. Ayrıca bainite dönüşüm sıcaklığı ile habit düzlemi arasında kesin bir değer bulunamamıştır⁽²⁰⁾.
5. Bainitik yapı oluşumu difüzyonlu bir faz dönüşümü olabilirken, martensite yapı difüzyonsuz bir faz dönüşümüdür⁽²⁰⁾.
6. Bainite ile martensite yapıdaki karbon miktarının azalması ($\%1C \rightarrow \%0C$) ile B_s ve M_s sıcaklıkları birbirinden farklı azalır⁽²⁰⁾.
7. Karbon oranı $\% 0,1$ ' e azaltarak boron ve molibden ilavesiyle bainitik dönüşüme iyi bir mekaniksel özellik kazandırır⁽²⁰⁾.
8. Bainitik yapının dönüşüm sıcaklığı azaltıldığında da tane boyutu küçülür, bu da Bainitik yapının mekaniksel özelliğini artırır⁽²⁰⁾. Martensitik yapının da dönüşüm sıcaklığı ne kadar düşürülürse, tane boyutu o kadar küçülür ve dislokasyon yoğunluğu da o kadar yüksek olur. Dislokasyon yoğunluğunun yüksek olması ise iki yapının da mekanik özelliklerinin yüksek olmasını sağlar⁽²⁰⁾.
9. Bainitik yapı, martensitik yapıya göre daha düşük bir mekanik özelliğe sahiptir⁽²⁰⁾.
10. Bainitik yapı oluşumu engellendiği zaman martensitik yapı gözlemlenebilir⁽²⁰⁾.

11. Bainite dönüşüm başlama ve bitiş sıcaklıkları, martensite dönüşüm başlama ve bitiş sıcaklıklarından oldukça yüksektir⁽²⁰⁾.
12. Kalıntı austenite yapıdaki zenginleştirilmiş karbon sebebiyle bainite dönüşümü arttıkça, martensite dönüşümü azalır⁽²⁰⁾.
13. Austenite ile bainite arasında herhangi bir yönelim bağıntısı bulunamamıştır. Austenite ile martensite arasındaki yönelim bağıntısı ise Kurdjumov-Sacks ve Nishiyama gibi birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur⁽¹⁹⁾.
14. Bainite ve martensite yapıların mekanik özellikleri karbon miktarı ile lineer olarak artar. Bütün karbürler yüksek miktarda çözünmemişse austenite sıcaklığı mekanik özelliğini etkilemez⁽²⁰⁾.
15. Bainitik yapı izotermal veya sürekli soğutma ile meydana gelen bir dönüşümdür. Martensite yapı ise hem izotermal hem de atermal ile meydana gelen bir dönüşümdür⁽²⁰⁾.

1.7. Kaynak Özetleri

Atmışlı yılların başında bainite yapı, dönüşüm ürünü olarak kabul ediliyor ve ferrit, perlit ve martensite yapılardan ayrılıyordu. Günümüzde yapılan araştırmalarda, Bainite yapı martensite yapının olduğu sıcaklığın altındaki tüm sıcaklıklarda izotermal dönüşüm esnasında sabit perlit ve ferrit yapının olduğu durumda elde

edilir. Yüksek sıcaklıkta oluşan üst bainite yapılar, ferrit tabakaların arasına sert parçacıkların yerleşmesi sonucu tabakalar arasında oluşur. Alt bainite yapılar daha az sert parçacıkların ferrit tabakalar arasına yerleşmesi sonucu tabakalar arasında oluşur ve bu özelliğiyle üst bainite yapılardan ayırt edilir⁽²⁰⁾.

C. Garcia-Mateo, F.G. Caballero ve H. K. D. H. Bhadeshia (2003) Fe-%0,98C-%1,46Si-%1,89Mn-%0,26Mo-%1,26Cr-%0,09V alaşımını 1200 °C de 2 gün ısıl işleme tabi tutmuşlar. Elde edilen bu numuneyi X-ışını deneylerine tabi tutarak kristalografik yapısını araştırmışlar. Numuneyi JEOL JEM-200CX geçirmeli elektron mikroskopunda incelemek için 100 μm kesmişler ve 1200 kalınlıklı su zımparası yardımıyla 50 μm inceltip, yüzeyi pürüzsüzleştirmek için %5 perklorikasit, %15 gliserol ve % 80 metanol çözeltisi içerisinde dağlamışlar. Elde ettikleri verilerden şu sonucu çıkarmışlar; düşük sıcaklıkta elde edilen Bainite yapının dönüşüm hızını artırmak ve reksiyonu hızlandırmak aynı zamanda reaksiyonun oluşum süresini azaltmak için bazı metodlar rapor etmişler. Buldukları bu metodlardan birinde austenite yapının ferrit yapıya dönüşümüne eşlik eden serbest enerjinin, bainite yapının sertliğinden ödün vermeden artırılması reaksiyonu hızlandırmıştır⁽²¹⁾. Burada reaksiyonu hızlandıran bir diğer metod ise alaşıma %1,6 oranında Co ve %0,99 oranında Al ilavesidir (H. I. Aaronson, H. A. Domain and G. M. Pound AIME, 236(1966)). Yine aynı çalışma da izotermal dönüşüm sonunda

X-ışını verilerini kullanılarak alaşımların izotermal eğrilerini, zamana göre oluşum yüzdelerini ve (TTT) eğrilerini elde etmişler.

F.G. Caballero ve H. K. D. H. Bhadeshia, K. J. A. Mawella, and D. G. Jones, and P. Brown (2002), Fe-%0,02Ni-%1,59Si-%1,94Mn-%0,30Mo-%1,33Cr-%0,09V alaşımını 1200 °C'de 2 gün homojen hale getirmek için ısıl işleme tabi tutmuş ve havada soğutmuş. Homojen numune 1000 °C'de 15 dakika bekletilerek austenite hale getirilmiş. 125 ile 500 °C sıcaklık aralığında çeşitli defalar su içinde soğutularak izotermal dönüşümü tamamlanmış. Numune optik mikroskop ve SEM de incelenmek için hazırlanmış. 100 μm kalınlığında kesilmiş ve 800'lük su zımparası yardımıyla 50 μm inceltip, yüzeyi pürüzsüzleştirmek için %5 perklorik asit, %15 gliserol ve % 80 metanol çözeltisi içerisinde dağlanmış. SEM ve TEM görüntüleri elde etmişler. Sonuçta değişim sıcaklığı 125 °C ye kadar yüksek karbon ve yüksek silikon yapıya sahip çeliklerde bainite yapı gözlenmiştir. 50 nm genişliğindeki bainite tabakalar arasında yüksek dayanıklılığa sahip ki 2-5 GPa değerinde ve fark edilir kanallar şeklinde inanılmaz yapılar elde edilmiş. Bu özellikler daha önce bainite yapılarda hiç gözlenmemiş olup, bainite reaksiyon teorilerinde bundan sonrası için yüksek dayanıklılığa sahip çelik yapılar ve karşılaştırılabilir mekanik ve mikro yapıya sahip yeni alaşımların kullanılması konusunda bizlere bilgi vermiştir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. SEM İncelemeleri İçin Numune Hazırlanması

Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V ısıtılmış alaşımı spiral taş kesici ile 5mm kalınlığında kesilerek 500,800 ve 1200'lük kalınlıklarındaki su zımparaları ile yüzey pürüzsüzleştirilip 9, 6, 3 ve 1'lik elmas pastaları ile yüzey mekanik olarak parlatılmıştır. Daha sonra yüzeyde oluşan tane sınırlarını, kristal yapılarını gözlemleyebilmek için %3 nital (%3 Nitrik asit, %97 Metanol) çözeltisi içerisinde dağlama yapılarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'nda yüzey incelemesi yapılmıştır.

2.1.2. Mössbauer Spektroskopisi Ölçümleri İçin Numune Hazırlanması

Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V alaşımında bainite yapının incelenmesi için numune Kırıkkale Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu kesme bölümünde spiral kesici ile tezgâh üzerinde 20µm kalınlığında kesilmiştir. Hazırlanan numuneler Mössbauer spektroskopisi yöntemi ile incelenmiştir.

2.1.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)Ölçümleri İçin Numune Hazırlanması

Elmas dişli bir eğe yardımıyla toz haline getirilerek hazırlanan numune Kırıkkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Araştırma Laboratuvarı'nda Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile incelenmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Hakkında Genel Bilgiler

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'nda numune yüzeyi çok ince bir elektron ışını demeti ile satırsal olarak taranır. Işını oluşturan birincil elektronların çarpması ile numune yüzeyinden fırlatılan ikincil elektronlar bir dedektör yardımıyla toplanır. Gelen sinyaller dönüşüm ve kuvvetlendirme aşamalarından geçirilerek bir bilgisayar ekranına aktarılır⁽⁰⁴⁾.

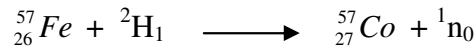
Yüzeyin çıkıntılı yerlerinden çok sayıda ikincil elektronlar saçıldığında bu bölgeler açık, daha derinde bulunan bölgeler koyu olarak görülür. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'nun odaklanma derinliğinin büyük olması nedeniyle kırılma yüzeylerini ve yüzeyin diğer ayrıntılarını incelemeye oldukça elverişlidir⁽⁰⁴⁾.

2.2.2. Mössbauer Spektroskopisi Sistemi Hakkında Genel Bilgiler

Günümüzde, kristal örgüsü içindeki bir atom tarafından enerji kaybı olmaksızın gama fotonu salınması olayı *Mössbauer Olayı* olarak bilinmektedir⁽²⁵⁾.

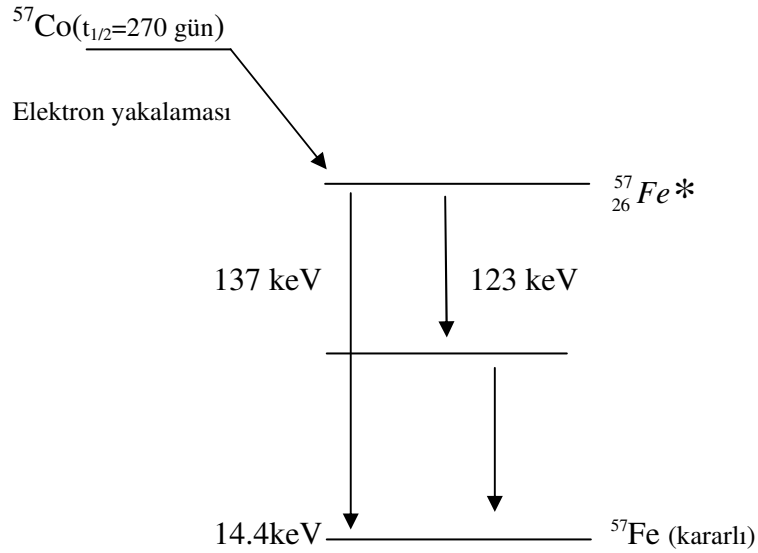
Mössbauer spektroskopisi nükleer fizikte özellikle atomik çekirdeğin fiziksel ve kimyasal çevre ortamlarının özelliklerini belirlemede ayrıca uzun ömürlü nükleer durumların quadrapol momentlerini ölçmekte katıhal fiziğinde, aşırı ince yapı etkileşimleri, yapı faktörlerinin belirlenmesi, antiferromagnetik değişim etkileşimine sahip olan metallerdeki magnetik kirliliğin düşük sıcaklık özelliklerinde, metal ve metal alaşımlarının faz dönüşümlerinin incelenmesinde, austenite yapı içerisinde soğutma ve deformasyon sonucu oluşan martensite kristallerinin hacim oranlarının belirlenmesinde ve pek çok fiziksel özellikleri belirlemek için kullanılır. Ayrıca Mössbauer spektroskopisiyle Mars'ın toprak yapısını incelemek için Mars'a gönderme planları yapılmaktadır⁽⁰⁴⁾.

Tüm Mössbauer deneylerinde radyasyon kaynağı olarak radyoaktif bir izotop olan $^{57}_{27}\text{Co}$ izotopu, $^{57}_{26}\text{Fe}$ izotopunun döteronlarla ($^2\text{H}_1$) bombardıman edilmesiyle oluşur.



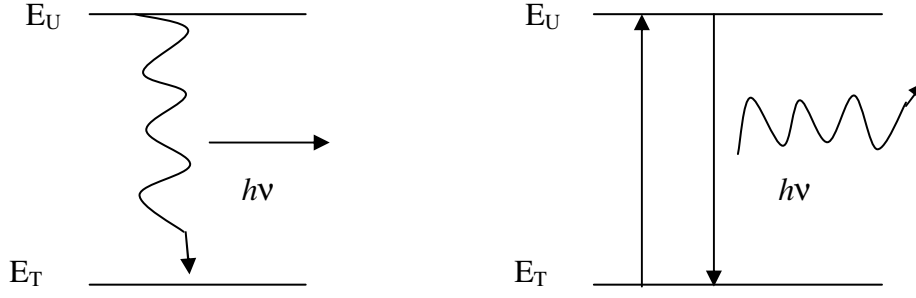
^{57}Co 'nin izotopu da bir elektron yakalamasıyla uyarılmış $^{57}_{26}\text{Fe}^*$ çekirdeğini meydana getirir.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bu durumda ${}^{57}_{26}\text{Fe}^*$ uyarılmış enerji ışını düzeyindedir ve üç γ (14.4,123,137 keV) yayınlarak, taban durumundaki kararlı ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ ’ye bozunur⁽²⁵⁾.



Şekil 2.1. Radyoaktif ${}^{57}_{27}\text{Co}$ izotopunun, kararlı ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ ’ye bozunma şeması

Uyarılmış bir çekirdek, E_U uyarılmış enerji durumundan E_T taban enerji durumuna geçerken $h\nu = E_U - E_T$ bağıntısına göre, ν frekanslı bir γ fotonu yayınlamaktadır. Bu fotonun aynı çekirdeğin taban durumu tarafından soğurulması olayına *rezonans* adı verilir (Şekil 2.2.). Rezonansla soğurma olayının meydana gelmesi için, birinci çekirdeğin yayınladığı fotonun frekansının ikinci çekirdek için;

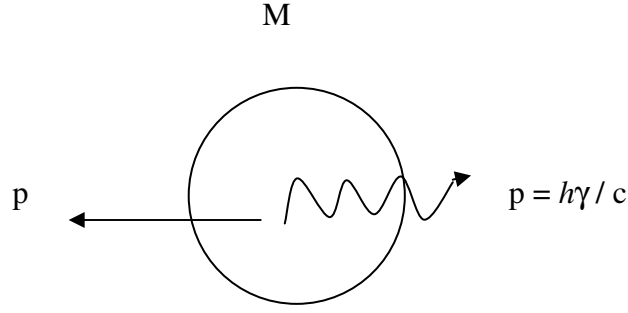


Şekil 2.2. Uyarılmış durumdan taban duruma geçiş

$$\nu = \frac{E_U - E_T}{h} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilen ν frekansına tam eşit olması gerekir. Yani rezonans olayının olabilmesi için yayınlanan bu γ enerjisinin başka bir çekirdek tarafından alınması gerekir. Bunun için en uygun çekirdek ise taban durumundaki bir başka ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ çekirdeğidir. Gerçekte, birinci çekirdek bir γ fotonu yayınlarken, momentumun korunumu kanununa göre, çekirdek de, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi aynı momentumla zıt yönde geri teper. E_G ile göstereceğimiz geri tepme enerjisini bu olayda ortaya konulan $E_U - E_T$ enerjisinden alacağı için, yayınlanan fotonun enerjisi, kütle merkezi sisteminde $E_U - E_T$ olduğu halde, laboratuvar sisteminde;

$$h \nu_{\text{yay}} = h\nu_0 - E_G \quad (2.2)$$



Şekil 2.3. γ fotonu yayınlayan bir çekirdeğin eşit momentumla geri tepmesi

olur ki burada $h\nu_0 = E_U - E_T$, geri tepme olmadığında yayınlanması beklenen foton enerjisidir. Aynı şekilde, ikinci çekirdek gelen fotonu soğurduğunda yine momentumun korunumu kanununa göre, E_G enerjisi ile geri tepeceğinden, bu çekirdeğin uyarılması için gerekli enerji;

$$h \nu_{\text{soğ}} = \nu_0 - E_G \quad (2.3)$$

dir. Bu sebeple, yayınlama ve soğurma çizgileri arasındaki frekans farkı;

$$\Delta\nu = \nu_{\text{soğ}} - \nu_{\text{yay}} = \frac{2 E_G}{h} \quad (2.4)$$

olur. İki arasındaki enerji farkı ise;

$$h \Delta\nu = 2 E_G \quad (2.5)$$

olacaktır. Atomun kütesini M ile gösterirsek, P geri tepme momentumu γ fotonunun $h\nu_0 / c$ momentumuna eşit olacağından E_G geri tepme enerjisi;

$$E_G = \frac{P^2}{2M} = \frac{(h\nu_0)^2}{2Mc^2} \quad (2.6)$$

olur.

Uyarılmış bir seviyenin enerjisinde daima bir yayılma, bir belirsizlik vardır, fakat belli bir genişliğe sahiptir. Enerji seviyesinin genişliği;

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (2.7)$$

Şeklindeki Heisenberg belirsizlik ilkesinden bulunabilir. Burada ΔE , enerjideki belirsizliği, Δt ise çekirdeğin uyarılmış seviyede kalma süresidir. Bu kalma süresi, enerji seviyesinin ortalama ömrü olan τ mertebesindedir. Enerji seviyesinin genişliği de $\Gamma = \Delta E$ olur. Böylece Heisenberg belirsizlik ilkesine göre

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar \quad (2.8)$$

yazılır. Yayınlanan γ -ışınları enerjisi, Lorentzyen biçiminde bir dağılım gösterir. Bu dağılımın yarı yükseklikteki genişliği ise Γ' dir.

Spektral çizgi genişliği geri tepme enerjisine göre çok küçük olduğunda gama ışını yayınlama ve soğurulma çizgileri üst üste gelmez ve rezonansa soğurulma olayı gözlenmez. Gama ışınlarının rezonansla soğurulmasını gerçekleştirmek için, iki eğrinin üst üste gelmesini sağlamak üzere, genellikle Doppler kaymasından faydalanılır. Doppler kayması, kaynağın ya da soğurucunun birbirine göre hareket

ettirilmesiyle elde edilir. Doppler kayması için çoğu zaman kaynağı soğurucuya göre hareket ettirmek tercih edilir. Eğer kaynak çizgisel hızı v olan bir hızla soğurucuya yaklaştırılırsa ya da uzaklaştırılırsa doppler olayı sonucu ışınım frekansı;

$$\nu = \nu_0 (1 + v/c) \quad (2.9)$$

bağıntısına göre artar, (Şekil 2.4.). Böylece, gelen fotonların frekansında;

$$(\Delta\nu)_D = \nu - \nu_0 = \nu_0 v/c \quad (2.10)$$

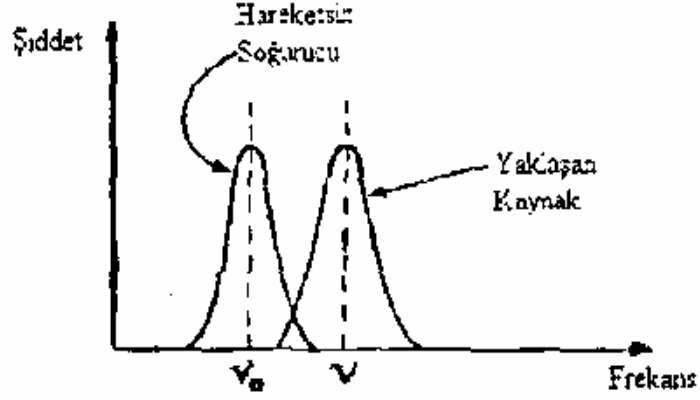
kadar bir artma ve dolayısıyla enerjilerin de;

$$(\Delta E)_D = h(\Delta\nu)_D = h \nu_0 v/c \quad (2.11)$$

değerinde bir artma sağlanmış olur⁽⁰⁹⁾.

$(\Delta E)_D = 2E_G$ olacak şekilde v hızı ayarlanırsa, geri tepme sonucu azalan enerji Doppler enerji artması ile karşılanmış olur ve böylece yayınlama çizgisi ile soğurma çizgisinin üst üste gelmesi sonucu rezonansla soğurma mümkün olur⁽⁰⁹⁾. Kaynak ve soğurucudaki Mössbauer atomları aynı kimyasal ortama sahipse rezonans etkilenmez, fakat soğurucudaki ve kaynaktaki atomlar farklı bir kimyasal kombinasyonda ise, sıfırdan farklı bir değerlikte olan bir atomun çekirdeği ile s- elektronları arasındaki Coulomb çekim kuvveti etkileşmesi sonucu atomun çekirdek enerji seviyeleri bir değişime uğrar. Bu olayda Mössbauer spektrumunda çizginin yer değiştirmesi şeklinde kendini gösterir. Bu olaya *İzomer Kayması* denir. Şekil 2.5. (a) da ^{57}Fe çekirdeğinin durumu, Şekil 2.5.(b)'de de Mössbauer spektrumu

gösterilmiştir. Spektrum çizgisindeki bu değişim miktarı da aşağıdaki şekilde belirtilmiştir⁽⁰⁹⁾.

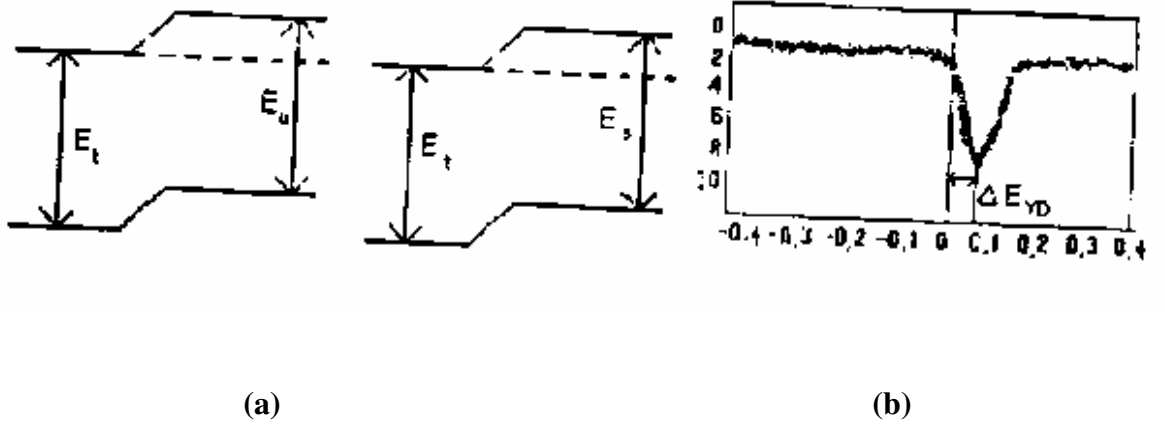


Şekil 2.4. Doppler genişlemesi sonucu spektrum çizgisi

Değişik materyallerde taban ve uyarılmış durumlar elektron dalga fonksiyonlarının çekirdekle örtüşmesinden dolayı farklı kaymalar gösterir. Bunun rezonans üzerindeki etkisi, onu sıfır bağıl hızdaki yerinden kaydırmaktır. İzomer kayma;

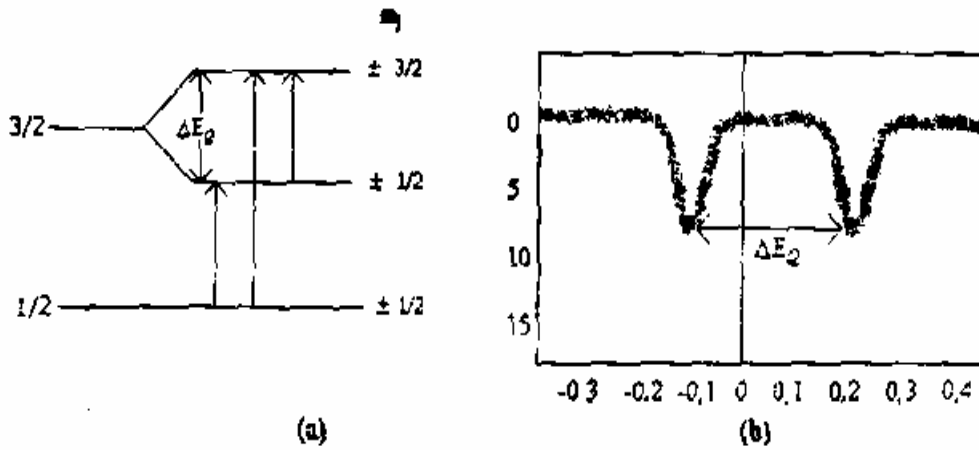
$$\Delta E_{YD} = 2\pi / 5 \quad Ze^2 [|\psi_s(0)|^2 - |\psi_u(0)|^2] (R_{2uy} - R_{2ta}) \quad (2.12)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada E_0 taban seviyesinin enerjisi $|\psi_s(0)|^2$ ve $|\psi_u(0)|^2$ sırasıyla soğurucu maddenin ve gama kaynağının elektron yoğunluğu fonksiyonu, R_{uy} ve R_{ta} sırasıyla çekirdeğin uyarılmış ve taban durumlarında yarıçapları, e elektron Ze çekirdeğin yükleri ve ΔE_{YD} ile de Mössbauer spektrumun çizgisinin yer değişim miktarını gösterir⁽⁰⁹⁾.



Şekil 2.5. İzomer Kayması

Aynı şekilde Mössbauer atomun çekirdek elektrik alanı gradiyentinin girişimi sonucunda nükleer spinlerin ayrılmasıyla çekirdek seviyeleri de farklı şekilde yeni seviyelere bölünür. Bunun sonucunda da Mössbauer spektrumunda bu seviyelere karşı gelen iki veya daha fazla rezonans çizgisi görülür⁽⁰⁹⁾.



Şekil 2.6.a. ⁵⁷Fe için çekirdek enerji seviyelerinde ortaya çıkan yeni seviyeler

b. Mössbauer Spektrum çizgileri

Nükleer quadrapol moment bir elektrik quadrapol yarılması verecek şekilde bir elektrik alan gradiyenti ile etkileşebilir. Bu yarılma m^2 ile orantılıdır ve m ile $-m$ arasında bir ayırım yapılamaz. Ayrıca $l = l/2$ ise yarılma kaybolur. Şekil 2.6.a'da ^{57}Fe için çekirdek seviyeleri, Şekil 2.6.b 'de de bu durumun Mössbauer spektrum çizgileri gösterilmiştir. ^{57}Fe 'de elektrik quadrapol etkileşmeleri durumunda iki çizgi, magnetik dipol momentinin etkileşmesi sonucunda çekirdek seviyelerinde fazla miktarda yarılmalar meydana gelebilir. Taban durum ve uyarılmış durum spini farklı olan diğer izotoplar için çizgilerin sayısı farklı olabilir⁽⁰⁹⁾. Mössbauer spektrumları aracılığıyla elde edilen quadrapol yarılmaları ölçümlerinden, incelenen materyalin kimyasal özellikleri hakkında bilgi edinilebilir⁽²⁶⁾. Magnetik alanın spektral çizgiler üzerine etkisi *zeman olayı* adını alır ve açısal momentumu l olan bir düzeyin magnetik alanda m dejenereliğinin kalkmasını ifade eder; alan, düzeyi eşit aralıklı $2l+1$ alt düzeye ayırır. Taban ve uyarılmış durumun magnetik momentleri farklıdır. Taban durum kararlı ise ve magnetik momenti tam olarak bilinirse Mössbauer spektrumu uyarılmış durumun magnetik momentini gerçekten büyük bir hassasiyetle verebilir. Alanın belirlenmesi ise atomik yapı hakkında önemli ipuçları verebilir⁽⁰⁴⁾. Şekil 2.7.'de taban ve uyarılmış durum farklı nükleer magnetik dipol momentine sahipse ΔE enerji yarılması farklı olur. Burada momentler ters işaretlidir. Dipol momentleri için yalnız

$$\Delta m = 0, \pm 1$$

olabilir ve bu sebeple altı bileşen görülmektedir.

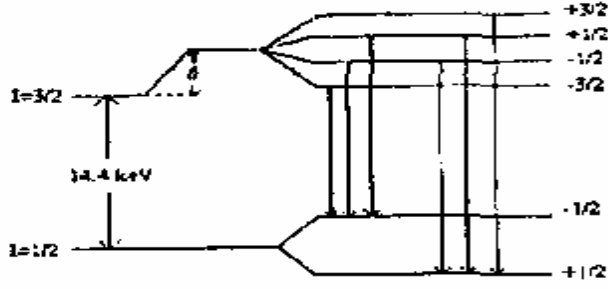
Genel bir Mössbauer deneyi yapmak için, radyoaktif bir kaynak, bir soğurucu, bir γ sayacı, bir tek kanal diskriminatörü ve birçok kanal analizatörü gereklidir. Ayrıca, kaynak ile soğurucu arasında bağıl hızı sağlamak için bir düzenek kurulmalıdır. Bir radyoaktif kaynaktan yayılan belirli bir γ ışınımının önüne bir soğurucu konulur. Soğurucudan geçen γ ışınları sayaca gelir. Sayaktan gelen atmalar bir çizgisel şiddetlendirici ile çift kutuplu hale gelerek çok kanal analizatörüne gider. Bu analizatör, her biri farklı enerjilere karşılık gelen atmaları farklı kanallara yerleştirir. Maksimum kanal sayısı 512 olup, çift kutuplu atmalar, 1-256 ile 256-512 kanalları arasında simetrik olarak gözlenir^(09,27).

2.2.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Sistemi Hakkında Genel

Bilgiler

Termal analiz, materyale ait bir fiziksel özelliğin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak veya bir tepkimede alınan ya da açığa çıkan ısının izlendiği yöntemleri içerir. Bu yöntemlerin başlıcaları termogravimetre (TG), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)'dir (04).

Termal analizler, genellikle sabit basınç altında yürüdüğünden, geçerli olan termodinamik eşitlik Gibbs-Hemholtz ifadesidir.



(a)



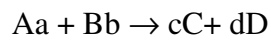
(b)

Şekil 2.7. a. ^{57}Fe 'nin taban ve uyarılmış düzeylerinin magnetik alanda yarılmaları

b. Yarılmalar sonucu Mössbauer spektrumunda oluşan çizgiler

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (2.13)$$

Burada G sistemin serbest enerjisi, H sistemin entalpisi, S sistemin entropisi ve T'de sistemin Kelvin sıcaklığıdır.



gibi genel bir kimyasal tepkime için: $\Delta G < 0$ ise, tepkime yazıldığı şekilde kendiliğinden olur, $\Delta G = 0$ ise, sistem dengededir ve $\Delta G > 0$ ise, tepkime olmayacaktır. Termal analiz, kendiliğinden olan ($\Delta G < 0$) tepkimelerin incelenmesini içerir⁽⁰⁴⁾.

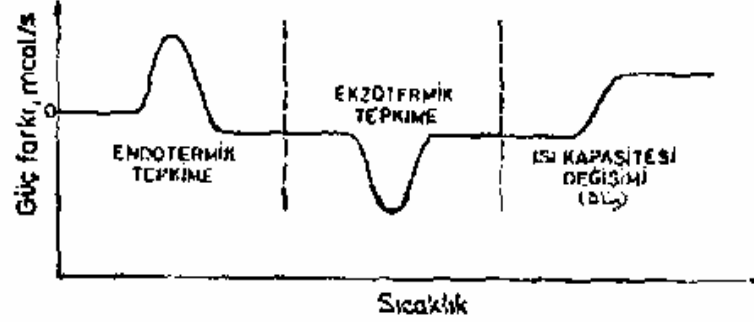
Sıcaklığın bağımsız değişken olduğu yöntemler (DTA, DSC) için (2.13) eşitliğindeki TΔS ifadesi önemlidir. Gibbs-Hemholtz denkleminin sıcaklığa göre türevi alınır;

$$d(\Delta G)/dT = -\Delta S \quad (2.14)$$

elde edilir. Bu denklem, tepkimenin olmadığı bir durumdan ($\Delta G > 0$), tepkimenin olacağı bir duruma ($\Delta G < 0$) nasıl geçebileceğini gösterir. Eğer ΔS pozitif ise sıcaklığın artması, ΔS negatif ise sıcaklığın azalması ile ΔG negatif olur ve kendiliğinden olan bir tepkime elde edilir. Tepkime bir kere başladıktan sonra, olayı izlemek için uygun yöntemlerden biri kullanılabilir⁽⁰⁴⁾.

DSC yönteminde malzeme ve referans maddesine aynı sıcaklık programı uygulanırken malzemede bir değişiklik olması halinde, malzemeye veya referansa bir elektrik devre yardımı ile dışarıdan ısı eklenerek her ikisinin de aynı sıcaklıkta kalması sağlanır. DSC eğrileri eklenen ısının sıcaklığa karşı çizilen grafikleridir. Şekil 2.8.'de görülen pikin altında kalan tepkimede emilen veya açığa çıkan ısı ile pik yükseklikleri de tepkime hızı ile doğrudan orantılıdır. ΔH pozitif ise

(endotermik), malzeme ısıtıcısına ısı eklenir. ΔH negatif ise (ekzotermik), referans ısıtıcısına ısı eklenir(04).



Şekil 2.8. DSC Eğrisi

DSC yalnız entalpi değişiminin olduğu olaylara karşı değil aynı zamanda malzeme ile referansın ısı kapasiteleri arasındaki farka karşı da çok duyarlıdır⁽⁰⁴⁾.

Bu yöntemde malzeme ve referans maddesi birbirinden yalıtılmış ayrı kaplara yerleştirilir. Isıtıcılar malzeme ve referans hücrelerine mümkün olduğu kadar yakın konur. Termal çift bir sıcaklık farkı gösterdiğinde, soğuk olan tarafa sıcaklık eşitleninceye kadar ısı eklenir. Sıcaklıkları eşit tutabilmek için uygulanan ısıtma hızı, malzeme sıcaklığının fonksiyonu olarak kaydedilir⁽⁰⁴⁾. Bilimin birçok alanında DTA ve DSC bilimsel araştırmalarda, materyal teknolojisinde ve mühendislikte çözümlü zor problemlerde kullanılmaktadır⁽⁰⁴⁾. DSC, basit veya karmaşık materyallerin kalite kontrollerinde, doğal veya üretilmiş maddelerin bileşimlerinin belirlenmesinde, silikatlar, ferritler, oksitler, seramikler ve camlar gibi inorganik maddelerin ısısal davranışlarında faz diyagramlarının oluşturulması ve faz geçişlerinin

incelenmesinde, organik bileşiklerin erime, kaynama ve ayrışma noktalarının kolay ve kesin saptanmasında, kinetik analizleri, petrol, polimer, yağ ve bal mumu gibi malzemelerin oksit kararlılığında, eczacılıkta ilaç örneklerinin saflığının araştırılmasında, katı katı reaksiyonlarda örneğin fişekçilikte, yüksek patlayıcıların karakteristik ayrışmalarında yaygın olarak kullanılır⁽²⁸⁾.

3.ARAŞTIRMA BULGULARI

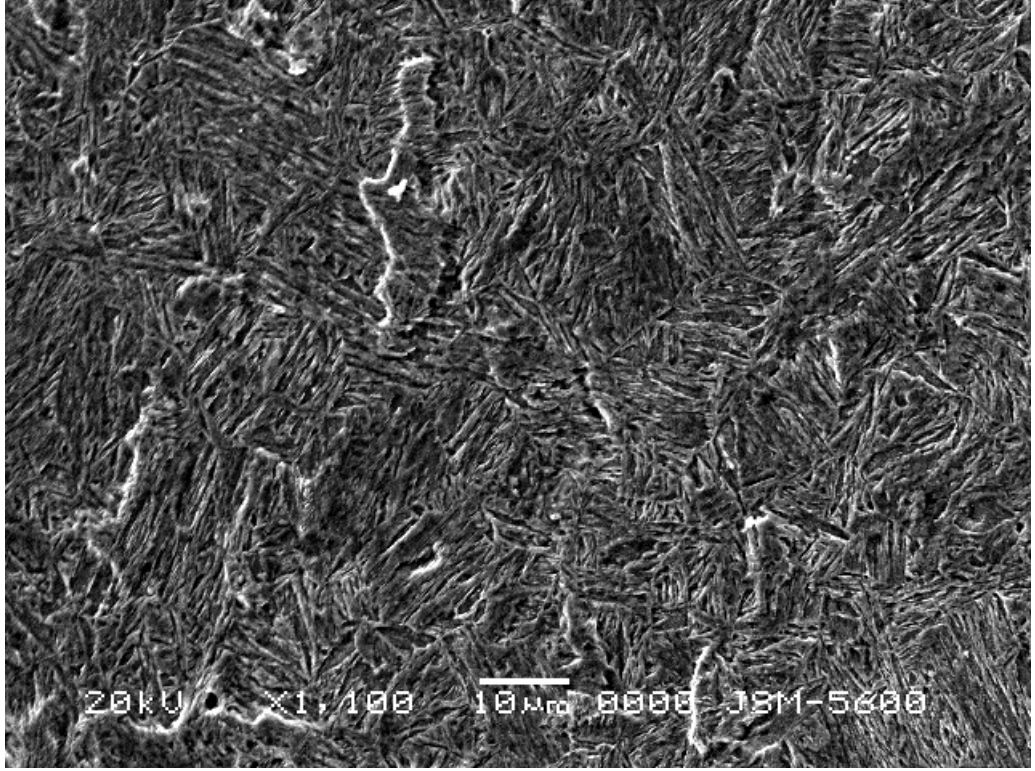
Fe-alaşımaları yaklaşık olarak 1500 °C'de ergir. Havasız ortamda oda sıcaklığına soğutulurken yaklaşık 900 °C civarında yüz merkezli kübik (f.c.c.) yapıda kristalleşir. Alaşımın bu fazına austenite adı verilir. Austenite fazdaki alaşıma uygulanan fiziksel etkenler sebebi ile hacim merkezli tetragonal (b.c.t.), sıkı paketlenmiş hekzagonal (h.c.p.) veya hacim merkezli kübik (b.c.c.) kristal yapıya dönüşür. Alaşımın bu fazına ise martensite adı verilir. Austenite faz, martensite faza dönüşürken ferrit, perlit ve bainite ara kademeleri oluşur. Perlit kademesi ile martensite kademesi arasındaki bölgeye ise bainite adı verilir.

Bainite, aynı serbest enerjiye sahip aynı kompozisyondaki ferrit ve austenite T₀ sıcaklığının altında martensitik dönüşümler gibi difüzyonsuz olarak meydana gelir. Martensite ve bainite yapıların ayrıntılı kristalografileri incelendiğinde, dönüşüm sıcaklıkları, mekanik özelliklerinde farklılık olmasına rağmen yapısal olarak birbirine çok benzemektedirler. Birçok araştırmacı Fe-Mn-Cr alaşımlarında martensitik faz dönüşümünü ve alaşıma N, Al, Ni, C, ... vs elementleri ilave ederek alaşımın fiziksel ve mekaniksel etkilerini incelemişler ve martensite yapı oluşumunun Mn oranına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada kullanılan Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V alaşımı, 1100 °C'de 12 saat ısıtılardan sonra fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar yavaş soğutma sonucu ortaya çıkan faz dönüşümlerinin yapısal özellikleri SEM, oluşan fazların magnetik özellikleri Mössbauer spektrometresi ve malzemenin termal özellikleri ise DSC ile incelenmiştir.

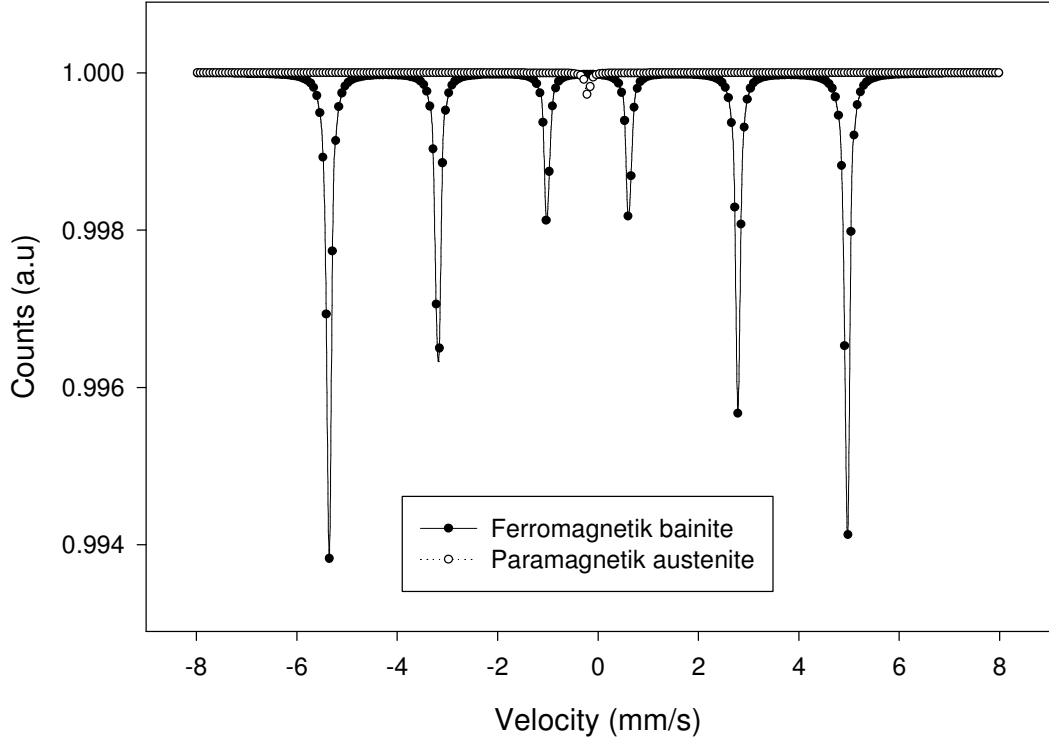
Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V alaşımında ortaya çıkan faz dönüşümlerinin yapısal özelliklerinin SEM incelemeleri sonucunda 1100 °C'de 12 saat ısıtılardan sonra fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulan numunenin Şekil 3.1.'de verilen bainitik yapı olduğu görülmüştür.

Dönüşüm sıcaklıkları oda sıcaklığının üzerinde olup dönüşüm izotermal olduğundan hızlı soğutmada martensite yapı oluşumu için gereken süre yeterli olmadığından martensite yapı gözlenmemiştir.



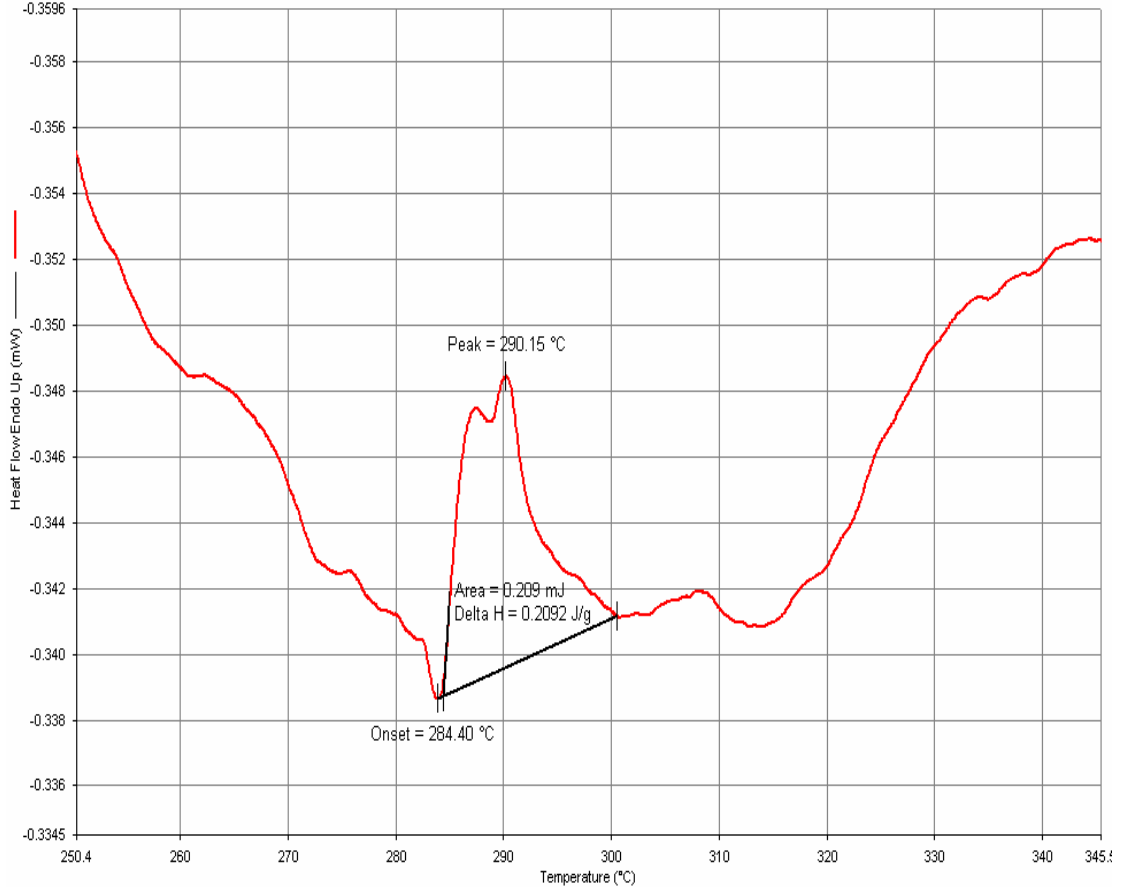
Şekil 3.1. Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V alaşımında oda sıcaklığında soğutulan numunenin SEM görüntüleri

Mössbauer spektroskopisi yöntemi ile incelenen alaşımın ne çeşit bir magnetik özellik gösterdiği de açığa çıkarılmıştır. Fe-%3Ni-%0,8Cr-%0,2Mn-%0,2V alaşımında bainitik faz dönüşümlerinin başlama sıcaklığı oda sıcaklığının üstünde olmasından dolayı Mössbauer spektrumlarında hem paramagnetik hem de ferromagnetik iki faz gözlenmiştir. Numune içerisinde % 99,5 oranında ferromagnetik yapı gözlenmiş olup Mössbauer spektroskopisinde 6 adet pik ile temsil edilmektedir. Bu oran numune içerisindeki bainite yüzdesini vermektedir. Mössbauer spektroskopisinde tek bir pik ile temsil edilen paramagnetik austenite faz miktarı ise %0,5 olarak bulunmuştur. 1100 °C'de 12 saat ısıl işlem gördükten sonra fırın içinde soğutulan numunenin oda sıcaklığında alınan Mössbauer spektrumu Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 1100 oC'den oda sıcaklığına fırın içinde soğutulan numunenin oda sıcaklığında alınan Mössbauer spektrumu

DSC yöntemi kullanılarak bainite fazdan austenite faza geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu yöntem ile bainite fazdan austenite faza geçiş sıcaklığında endotermik bir reaksiyon gözlenmiştir. Şekil 3.3.'deki sonuçlara göre fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulan numunenin dönüşüm sıcaklığı 284.40 °C olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.3. 1100 °C'den oda sıcaklığına kadar fırın içerisinde soğutulan numunenin DSC grafiği

4.TARTIŐMA VE SONUÇ

Bainite yapılar da diğer yapılarla nazaran daha düşük mekanik özellik elde edilmesine karşın, gerilmesi az ve çatlama riski olmayan mekanik özellik gösterir. Bu özelliklerinden dolayı sanayide birçok kullanım alanı bulmuştur. Günümüz hızlı tren rayları dayanıklılığı ve kırılma olmama vasıflarından dolayı bainite yapı gösteren maddelerden yapılmaktadır. Ayrıca büyük miktarda yük taşıma gemileri de bainite yapısına sahip malzemelerden imal edilmektedir.

KAYNAKLAR

01. T. N. Durlu, Metal Fiziği'ne Giriş, Ders Notu, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Ankara, 1991.
02. T. N. Durlu, Katıhal Fiziğine Giriş, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 1989.
03. Ş. Küçük, Fe-%15Mn-%2Cr Alaşımında Gözlenen Difüzyonsuz Faz Dönüşümleri Üzerinde Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 2004.
04. Ş. Ocak, Fe-Mn-Cr Alaşımında Austenite-Bainite-Martensite Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 2003.
05. S. Gezci, Katıhal Fiziği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, 1992.
06. D. R. Askeland, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayın, 1998.
07. H. J. Bargel, G. Schulze, Malzeme Bilgisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1993.
08. M. Yılmazlar, Faz Dönüşümleri Bitirme Tezi, KTÜ., Trabzon, 1993
09. H. Güngüneş, Fe-Mn-Cr Alaşımında Austenite Martensite Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2001.
10. L. Kaufman and M. Cohen, Progr. Met. Phys., 7, 165(1958).
11. R. F. Bunshah and R. F. Mehl, Trans. AIME, 197, 1251(1953).
12. S. Aktürk, Fe-Ni-Mn Alaşımında Austenite Martensite Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 1996.

13. H. M. Otte, Acta Met., 5, 614(1957).
14. K. E. Easterling and A. R. Tholen On the Growth of Martensite in Steel.,
Pergamon Pres, Oxford., 1976.
15. T. N. Durlu, Some Aspects of the Martensite Transformation in Fe-Ni-C Alloys.,
Doktora Tezi, Oxford Üniversitesi., 1974.
16. C. W. Wegst, Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, (1986).
17. METALS HANDBOOK Vol.4 Heat Teating, American Society For Metals,
Metals Park, Ohio 44073, 1981.
18. J. M. Oblak, R. H. Goodenow and R. F. Hehemann, Trans. AIME. 230,
258(1964)
19. A.Topbaş, Isıl İşlemler, Yıldız Teknik Üniversitesi, Prestij, İstanbul,1993.
20. H. K. D. H. Bhadeshia, Bainite in Steels, Cambridge University Pres,
London,1992.
21. K. Tsuzaki and T. Maki, Journal de Physique III, vol5, C8-61(1995).
22. A. B. Greninger and A. R. Troiano, Trans. AIME.; 140,307(1940).
23. K. J. Irvine and F.B. Pickering, J. Iron Steel Inst., 187, 292(1957).
24. K. J. Irvine and F.B. Pickering, ibid., 188, 101(1958).
25. G. M. Bancroft, An Introduction For Inorganic Chemist and Geochemist,
Mcgraw-Hill Book Company, London, 1973.

26. U. Gonser, Topics in Applied Physics, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Newyork,1975.
27. K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley and Sons Inc., Newyork, 1998.
28. A.Yıldız ve Ö. Genç, Enstrümental Analiz, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, A-64, 1993.