

**FARKLI ORANLARDA KATKILANDIRILMIŞ BAKIR BAZLI ŞEKİL HAFIZALI
ALAŞIMLARIN TERMAL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Arife KESKİN

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY

Nisan-2014

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ORANLARDA KATKILANDIRILMIŞ
BAKIR BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN
TERMAL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arife KESKİN

(112114106)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Genel Fizik

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Nisan 2014

Nisan 2014

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ORANLARDA KATKILANDIRILMIŞ
BAKIR BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN
TERMAL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arife KESKİN

(112114106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Nisan 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Nisan 2014

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü.)

Doç. Dr. Sefa KAZANÇ (F.Ü.)

Nisan - 2014

ÖNSÖZ

Bu araştırmada beni yönlendiren, bilgi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY'a,

Deneysel çalışmalar sırasında gerekli ortamı oluşturan Prof. Dr. Mehmet ŞEKERCİ'ye; Termal ölçümlerin alınması aşamasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Dr. Zuhâl KARAGÖZ GENÇ'e;

Araştırmamın deneysel aşamalarında yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Samet GÜDELOĞLU'na ve tezimin yazılması aşamasında bana destek olan sevgili arkadaşım Hatice DEMİRCİ'ye;

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAB tarafından **FÜBAP-FF.12.35** nolu proje olarak desteklenmiştir.

Arife KESKİN

ELAZIĞ - 2014

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. MARTENSİT DÖNÜŞÜMLER	3
2.1. Martensit Dönüşümlerin Karakteristikleri	5
2.2. Termoelastik Martensit Dönüşümler	7
2.3. İzotermal ve Atermal Dönüşümler	8
3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR	10
3.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Genel Karakteristikleri	11
3.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama Olayı	16
3.1.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama Olayı	17
4. BAKIR ESASLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR	20
5. MATERYAL VE METOT	23
5.1. Materyal	23
5.1.1. Cu-Al-Mn Alaşımı	24
5.1.2. Cu-Al-Mn-V Alaşımı	24
5.1.3. Cu-Al-Mn-Cd Alaşımı	25
5.2. Metot	27
5.2.1. X- Işını Kırınım (XRD) Analizleri	27
5.2.2. Metalografik Gözlemler	28
5.2.3. TG/DTA Ölçümleri	29
5.2.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)	30
5.2.5. Sertlik Ölçümü	31
6. BULGULAR	33
6.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analizi	33
6.2. Metalografik Gözlemler	40

6.2.1. Cu-Al-Mn Alaşımının Metalografik Gözlemleri	40
6.2.2. Cu-Al-Mn-V Alaşımının Metalografik Gözlemleri	40
6.2.3. Cu-Al-Mn-Cd Alaşımının Metalografik Gözlemleri	44
6.3. Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) Sonuçları	47
6.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Sonuçları	51
6.4.1. Cu-Al-Mn (MV1) Alaşımı	51
6.4.2. Cu-Al-Mn-V (MV2) Alaşımı	55
6.4.3. Cu-Al-Mn-V (MV3) Alaşımı	58
6.4.4. Cu-Al-Mn-Cd (C1) Alaşımı	62
6.4.5. Cu-Al-Mn-Cd (C2) Alaşımı	65
6.5. Mikrosertlik lümü.....	76
7. SONUÇ VE TARTIşMA	78
7.1. X-Işını Difraksiyon Sonuçları.....	78
7.2. Metalografik Gözlem Sonuçları.....	79
7.3. DTA lüm Sonuçları	79
7.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) lüm Sonuçları	80
7.5. Mikrosertlik lüm Sonuçları	81
KAYNAKLAR	82

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI ORANLARDA KATKILANDIRILMIŞ BAKIR BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN TERMAL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Arife KESKİN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Sayfa: 84 + XI

2014

Bakır-bazlı şekil hafızalı alaşımlar kolay üretilebilirliği ve düşük üretim maliyeti nedeni ile teknolojiye yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Cu-bazlı dörtlü şekil hafızalı alaşımların üretilmesi amaçlardan biridir.

CuAlMn, CuAlMnCd ve CuAlMnV şekil hafızalı alaşımları ergitme yöntemi ile üretildi. Üretimden sonra külçeden kesilen küçük numuneler β -faz bölgesinde homojenleştirildi. Ardından alaşımların şekil hatırlama davranışının belirlenmesi için termal ve yapısal analizler yapıldı. Austenite ve martensite faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesi için diferansiyel termal kalorimetri (DSC) ölçümleri alındı. Yüksek sıcaklıktaki düzenli-düzensiz faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesi için TG/DTA ölçümleri yapıldı.

Numunelerin oda sıcaklığındaki difraksiyon düzlemlerini ve yüzey morfolojisini belirlemek için X- ışınları ve optik mikroskop ölçümleri oda sıcaklığında alındı.

Termal ve yapısal analizlerin sonucu olarak üretilen dörtlü alaşımların şekil hatırlama davranışı sergilediği belirlendi. Bütün numuneler oda sıcaklığında martensit yapıdadır ve karakteristik martensitik difraksiyon düzlemlerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Cu-bazlı dörtlü şekil hatırlamalı alaşımlar, termal analizler, yapısal incelemeler.

SUMMARY

M.Sc. Thesis

THE INVESTIGATION OF THERMAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF CU-BASED SHAPE MEMORY ALLOYS CONTRIBUTED WITH DIFFERENT PERCENTAGES

Arife KESKİN

Fırat University

Institute of Science and Technology

Department of Physics

Pages: 84 + XI

2014

Cu-based shape memory alloys are generally used in technology due to easy fabrication and low manufacturing cost. In this work; one of the aims is to fabricate Cu-based quaternary shape memory alloys.

CuAlMn, CuAlMnCd ve CuAlMnV shape memory alloys were fabricated by melting method. After fabrication the samples cut from the ingot were homogenized at β -phase region. Then the thermal and structural analysis were made to observe the shape memory behaviour of the sample. Differential scanning calorimetry measurements were made to determine the austenite and martensite phase transformation temperature. TGA/DTA measurements were made to observe the order-disorder phase transition temperatures at high temperatures. X-Ray analysis and also optical micrograph analysis were made at room temperature to determine the diffraction patterns and the structure morphology of the samples.

As a result of the thermal and structural analysis it was determined that the fabricated quaternary alloys showed shape memory behaviour. Structures of all the samples are martensite at room temperature and have characteristic martensitic diffraction patterns.

Key words: Cu-based quaternary shape memory alloys, thermal analysis, structural observations.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa Numarası

Şekil 2.1. Sıcaklık değişim ve martensit dönüşüme bağlı histerisiz (H) değişim grafiği [6].	4
Şekil 2.2. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi [1].	5
Şekil 2.3. Martensitik dönüşüme etki eden bozulma çizgisinin kırılması ve yüzey kabartısının şekli. a) Yüzey kabartısı, b) Bozulma çizgisinin kırılması [5].	6
Şekil 2.4. Martensitik dönüşüm difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim [5].	7
Şekil 2.5. a) Atermal b) İzotermal dönüşüm eğrileri [7].	9
Şekil 3.1. Şekil hatırlama özelliğine sahip düzenli kristal yapı birim hücreleri a) CsCl yapı, b) Fe ₃ Al yapı, c) Cu ₂ MnAl tipi yapı [10].	13
Şekil 3.2. Martensit dönüşüm. a) Austenit fazda β fazlı kristal, b) Martensit dönüşüm sonrasında oluşan ikizlenmiş A, B, C ve D varyantları, c) Baskın A varyantı [2].	14
Şekil 3.3. Superelastiklik mekanizmasının gösterimi [2].	14
Şekil 3.4. Şekil hafıza mekanizmasını gösteren bir atomik model [2].	15
Şekil 3.5. Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [2].	16
Şekil 3.6. Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [5].	17
Şekil 3.7. Çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik olarak gösterimi [5].	18
Şekil 3.8. Süperelastiklik histerisisinin şematik gösterimi [1].	19
Şekil 5.1. Graseby Specac marka presleme cihazı.	26
Şekil 5.2. Carbolite CWF-1200 Marka Kül Fırını.	27
Şekil 5.3. Metalografik gözlemler yapıldığı Optik Nikon MA 200 Optik Mikrograf cihazı.	29
Şekil 5.4. DTA-60AH Shimadzu marka termal analiz cihazı.	30
Şekil 5.5. DSC-60A Shimadzu marka DSC analiz cihazı.	31
Şekil 5.6. Emkotest Durascan sertlik ölçüm cihazı.	32
Şekil 6.1. MV1 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	34
Şekil 6.2. MV2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	35
Şekil 6.3. MV3 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	36
Şekil 6.4. C1 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	37
Şekil 6.5. C2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	38
Şekil 6.6. MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarına ait X-ışını difraktogramları.	39
Şekil 6.7. MV1 alaşımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.	41

Şekil 6.8. MV2 alaşımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.....	42
Şekil 6.9. MV3 alaşımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.....	43
Şekil 6.10. C1 alaşımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.	45
Şekil 6.11. C2 alaşımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları	46
Şekil 6.12. MV1 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.	47
Şekil 6.13. MV2 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.	48
Şekil 6.14. MV3 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.	48
Şekil 6.15. C1 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.	49
Şekil 6.16. C2 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.	50
Şekil 6.17. MV1 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	52
Şekil 6.18. MV1 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	52
Şekil 6.19. MV1 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	53
Şekil 6.20. MV1 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	53
Şekil 6.21. MV1 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.	54
Şekil 6.22. MV2 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	55
Şekil 6.23. MV2 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	56
Şekil 6.24. MV2 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	56
Şekil 6.25. MV2 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	57
Şekil 6.26. MV2 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.	57
Şekil 6.27. MV3 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	59
Şekil 6.28. MV3 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	59

Şekil 6.29. MV3 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.....	60
Şekil 6.30. MV3 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.....	60
Şekil 6.31. MV3 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.....	61
Şekil 6.32. C1 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	62
Şekil 6.33. C1 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 6.34. C1 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 6.35. C1 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	64
Şekil 6.36. C1 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.....	64
Şekil 6.37. C2 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	66
Şekil 6.38. C2 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	66
Şekil 6.39. C2 alaşımı için 35 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.....	67
Şekil 6.40. C2 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.	67
Şekil 6.41. C2 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.....	68
Şekil 6.42. Bütün numunelerin 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızında DSC eğrilerinin çakıştırılmış hali.	69
Şekil 6.43. A_f-M_s sıcaklığının elektron konsantrasyonu ile değişimi.	70
Şekil 6.44. Entropinin elektron konsantrasyonu ile değişimi.....	70
Şekil 6.45. Entropinin elektron konsantrasyonu ile değişimi.....	71
Şekil 6.46. MV1 alaşımına ait A_f-M_s ve T_o sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi... ..	71
Şekil 6.47. MV2 alaşımına ait A_f-M_s ve T_o sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi... ..	72
Şekil 6.48. MV3 alaşımına ait A_f-M_s ve T_o sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi... ..	72
Şekil 6.49. C1 alaşımına ait A_f-M_s ve T_o sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.....	73
Şekil 6.50. C2 alaşımına ait A_f-M_s ve T_o sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.....	73
Şekil 6.51. MV1 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.	74
Şekil 6.52. MV2 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.	74

Şekil 6.53. MV3 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi	75
Şekil 6.54. C1 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi	75
Şekil 6.55. C2 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa Numarası

Tablo 3.1. Martensit dönüşüm tiplerinin genel karakteristikleri [9]	11
Tablo 4.1. Bakır esaslı şekil hafızalı alaşımların özellikleri [13]	21
Tablo 4.2. Cu-bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar [14]	22
Tablo 5.1. Elde edilen Cu-esaslı alaşımların atomik oranları (% at.)	25
Tablo 6.1. MV1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar	33
Tablo 6.2. MV2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar	35
Tablo 6.3. MV3 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar	36
Tablo 6.4. C1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar	37
Tablo 6.5. C2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar	38
Tablo 6.6. MV1 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	54
Tablo 6.7. MV2 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	58
Tablo 6.8. MV3 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	61
Tablo 6.9. C1 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	65
Tablo 6.10. C2 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	68
Tablo 6.11. Numunelerin tane büyüklükleri ve sertlik değerleri.....	77

SEMBOLLER LİSTESİ

- A_f : Martensit $\rightarrow$ Austenit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
- A_s : Martensit $\rightarrow$ Austenit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
- bcc : Cisim merkezli kübik yapı
- ΔH : Entalpi
- ΔS : Entropi
- fcc : Yüz merkezli kübik
- hkl : Kristal yapı düzlemlerini belirleyen indis sistemi (Miller indisi)
- M_f : Austenit $\rightarrow$ martensit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
- M_s : Austenit $\rightarrow$ martensit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
- T : Sabit sıcaklık
- T_o : Austenit yapının termodinamik dengedeki sıcaklığı
- T_m : Maksimum pik sıcaklığı
- α : Çökelti fazı (fcc)
- β : e / a oranı (elektron / atom) 1,5 civarında olan süper örgülü kübik austenit faz
- β_1 : DO3 türü ana faz yapısı (bcc)
- β_2 : B2 türü ana faz yapısı (bcc)
- β_1' : 18R tipindeki martensit yapı
- $\Delta H_{M \rightarrow A}$: Martensit $\rightarrow$ Austenit entalpi değişimi
- $\Delta H_{A \rightarrow M}$: Austenit $\rightarrow$ Martensit entalpi değişimi
- $\Delta S_{M \rightarrow A}$: Martensit $\rightarrow$ Austenit entropi değişimi
- $\Delta S_{A \rightarrow M}$: Austenit $\rightarrow$ Martensit entropi değişimi

1. GİRİŞ

Teknolojinin her geçen gün hızlı bir şekilde gelişmesi ile, teknolojik uygulamalarda giderek önem kazanan fonksiyonel malzemelerin elde edilmesi ve bu malzemelerin geliştirilmesi de büyük önem arz etmektedir. Bu alanda geliştirilen çalışmalar sadece malzeme elde etmeye yönelik olmamalı, bunun yanı sıra elde edilen malzemelerin kullanılabilirliğini de önemli ölçüde artırabilmelidir. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmalar, yeni malzeme üretmenin yanı sıra, mevcut malzemelere farklı elementler katkılarak elde edilen malzemenin, gerek mekaniksel gerekse termal özelliklerinin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar, hem sanayi hem de akademik alanlarda devam etmektedir. Şekil hatırlamalı alaşımlar da gelişen teknolojik gereksinimleri karşılamak amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiş ve her geçen gün biraz daha geliştirilmeye ucu açık olan malzemelerdir. Şekil hatırlamalı alaşımların benzersiz özelliklerini kullanarak, daha fonksiyonel malzemeler ve önceden düşünölemeyecek kadar iyi kapasitede makinalar üretmek mümkündür [1].

Şekil hatırlamalı alaşımlar, sıcaklık, gerilim veya her iki faktörün etkisi altında kaybettikleri şekillerini tekrar kazanabilen bir malzeme sınıfıdır. Şekil hatırlama özelliği sergileyen malzemeler şekil hatırlamalı alaşımlar olarak adlandırılmaktadır. Şekil hatırlamalı alaşımlar termoelastik martensit dönüşüm göstermektedirler. Martensit dönüşüm sistemin sıcaklığı değiştirilerek veya dışardan bir zor uygulanarak yada her iki etkinin birlikte uygulanması ile gerçekleşebilir. Martensit faz dönüşümü difüzyonsuz faz dönüşümüdür. Difüzyonsuz faz dönüşümünde, dönüşüm öncesi ve sonrası atomların komşulukları aynı kalır [2].

Yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonucunda metal ve metal alaşımlarının farklı fiziksel etkiler altında farklı özellikler gösterdiği anlaşılmıştır. Bazı metal ve metal alaşımlara dışardan bir faktör etki ederse (basınç, sıcaklık ve zor uygulama), mevcut denge bozulur ve atomlar bulundukları konumdan daha düşük enerji gerektiren başka bir konuma geçmeye zorlanırlar. Atomların birlikte, komşuluklarını değiştirmeden, hareket edip yer değiştirmeleri sonucu, iç yapı değişir ve yeni bir denge yapısı elde edilir (Yani bir faz bir başka faza dönüşür) [3]. Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen,

hepsinin birden hacimsel yönde aynı doğrultuda taşınmasından dolayı, dönüşüm sonucunda makroskopik bir şekil değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak normal metal ve alaşımlardan farklı niteliklere sahip olan şekil hafıza etkisi ve süperelastisite gibi eşsiz ve üstün özellikler açığa çıkar. Şekil hatırlamalı alaşımların benzersiz özelliklerini kullanarak, daha fonksiyonel malzemeler ve önceden düşünölemeyecek kadar iyi kapasitede makinalar üretmek mümkündür [1].

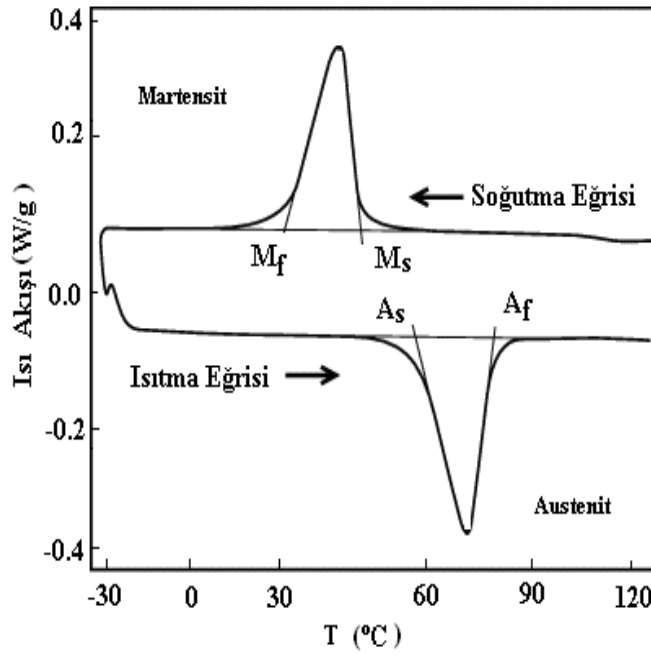
Uygulamada şekil hafıza etkisi gösteren çok sayıda alaşımların olduğu bilinmekle birlikte bunlar arasında en çok ilgi görenler nikel-titanyum alaşımları ve bakır esaslı alaşımlardır. Bu alaşım sistemlerinden nikel-titanyum ve bakır esaslı birkaç alaşım üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Öte yandan bu alaşımlara olan ilginin yüksek olmasının nedeni olarak, şekil değişimi esnasında önemli büyüklükte kuvvet üretebilmeye sahip olmaları söylenebilir [1].

Bu alaşımlardan bakır bazlı alaşımlar, kolay şekil alabilirlik, yüksek dayanım, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğinden ve bunların yanı sıra maliyetinin düşük olmasından dolayı oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al gibi üçlü alaşımlar olabildiğı gibi bu alaşımlara Manganez (Mn) ilave edilerek dörölü alaşımlar elde etmek de mümkündür [2]. Bazı şekil hatırlamalı alaşımlar, şekil hatırlama özelliğinden dolayı gözlükler, kateterler ve ortodonti gibi endüstri alanlarında ayrıca birçok medikal uygulamada da kullanılmaktadır.

2. MARTENSİT DÖNÜŞÜMLER

Martensit dönüşüm, metal ve alaşımlarda, malzemeye yüksek sıcaklık fazında iken dışarıdan sıcaklık, zor gibi etkilerin ayrı ayrı veya her iki etkinin aynı anda uygulanması ile martensit fazın elde edilmesidir. Martensit faz dönüşümünün en önemli özelliği difüzyonsuz olarak gerçekleşmesidir. Bundan dolayı martensit fazdaki atomların dönüşüm öncesi komşulukları dönüşüm sonrasında da korunur [4]. Martensit faz dönüşümleri ilk olarak çeliğin austenit fazdan soğutulmasıyla bulunmuştur ve bu faz dönüşümüne bu buluşu yapan Alman Metalograf Adolf Martens'in adı verilmiştir. Daha sonraki yapılan çalışmalarda çeliklerde görülen yüksek geçiş oranlarındaki yeni faz oluşumları başka alaşımlarda da gözlemlenmiştir.

Martensit faz dönüşümü malzemenin sıcaklığının hızla düşürülmesi veya austenit yapıya dışardan uygulanan bir zor yada her ikisinin aynı anda uygulanması ile meydana gelir. Austenit yapı $T=T_0$ sıcaklığında termodinamik dengededir. Kristal yapı, bu sıcaklıktan hızla soğutulursa kritik bir sıcaklıktan sonra (M_s) austenit yapı içerisinde martensit yapı oluşur. Martensit yapının oluşmaya başladığı bu sıcaklığa martensit başlama sıcaklığı denir ve M_s ile gösterilir. Bu anda dışardan uygulanacak mekanik zor ile M_s sıcaklığı $T=T_0$ sıcaklığının çok altına düşmeden dönüşüm başlayabilir. Dışardan uygulanan mekanik zor oluşan ürünün hacmini de artırır. M_s sıcaklığında başlayan martensit dönüşüm belirli bir sıcaklık aralığında devam eder ve durur. Dönüşümün bittiği bu sıcaklığa martensit dönüşüm bitiş sıcaklığı denir ve (M_f) ile gösterilir. Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi Martensit haldeki dönüşmüş numune, tekrar ısıtıldığında ana faz olan austenit yapıya dönüşmeye başlar. Bu nedenle martensit dönüşüm, tersinir bir dönüşümdür. Austenit fazın başladığı sıcaklığa austenit faz başlama sıcaklığı denir ve (A_s) ile gösterilir. Austenit fazın tamamlandığı sıcaklığa austenit faz bitiş sıcaklığı denir ve (A_f) ile gösterilir. Şekil 2.1.'de sıcaklık değişimi ile meydana gelen martensit dönüşüm verilmiştir. Burada martensit faz dönüşüm sıcaklığı (M_s) alaşımın türüne bağlı olarak farklı değerler alabilir [5].



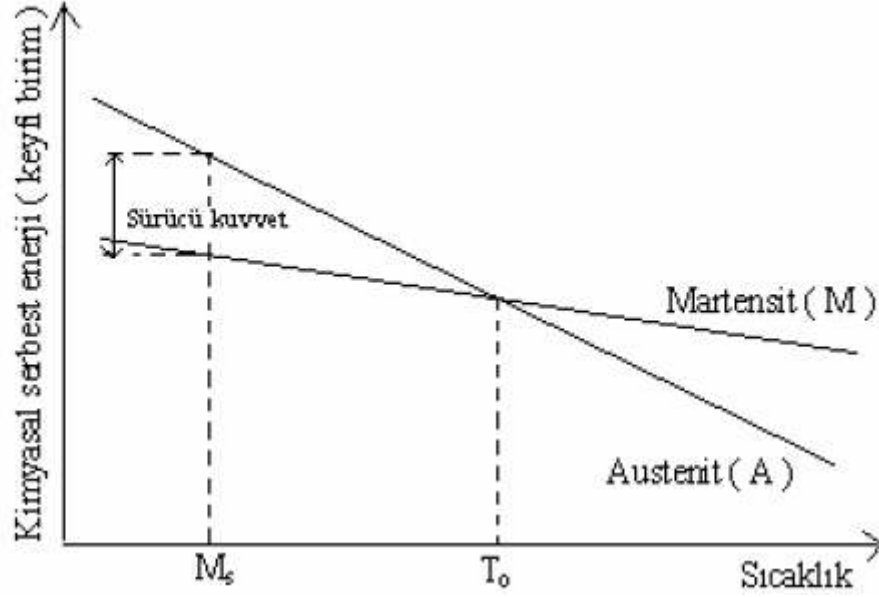
Şekil 2.1. Sıcaklık değişim ve martensit dönüşüme bağlı histerisiz (H) değişim grafiği [6].

Alaşım üzerine dışardan uygulanan sıcaklık, basınç gibi fiziksel etkilerin martensit dönüşüme neden olabilmesi için bu etki sonucunda dönüşüme neden olacak büyüklükte bir serbest enerji farkının oluşması gerekir. Austenit-martensit dönüşümün oluşabilmesi için martensit fazın kimyasal serbest enerjisinin, austenit fazın kimyasal serbest enerjisinden düşük olması gerekir. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjileri sıcaklık ve basınçtan etkilenir. Kimyasal serbest enerjinin sıcaklık ile etkileşimi Şekil 2.2.' de gösterilmiştir [6].

Sabit sıcaklık ve sabit basınçta sistemin karalılığı;

$$G=H-T\Delta S \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilen Gibbs serbest enerjisinin en küçük değeri ile belirlenir. Burada G ; Gibbs serbest enerjisi, H ; entalpi, T ; mutlak sıcaklık, ΔS ; sistemler arasındaki entropi farkıdır. Şekil 2.2.' de de görüldüğü gibi denge sıcaklığı dediğimiz T_0 sıcaklığında iki fazın serbest enerjileri eşit ve farkı sıfırdır. T_0 denge sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda martensit faz serbest enerjisi daha küçük olduğu için ürün faz daha karalıdır. T_0 denge sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda martensit fazın serbest enerjisi daha büyük olduğundan austenit faz karalıdır [1].



Şekil 2.2. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi [1].

2.1. Martensit Dönüşümlerin Karakteristikleri

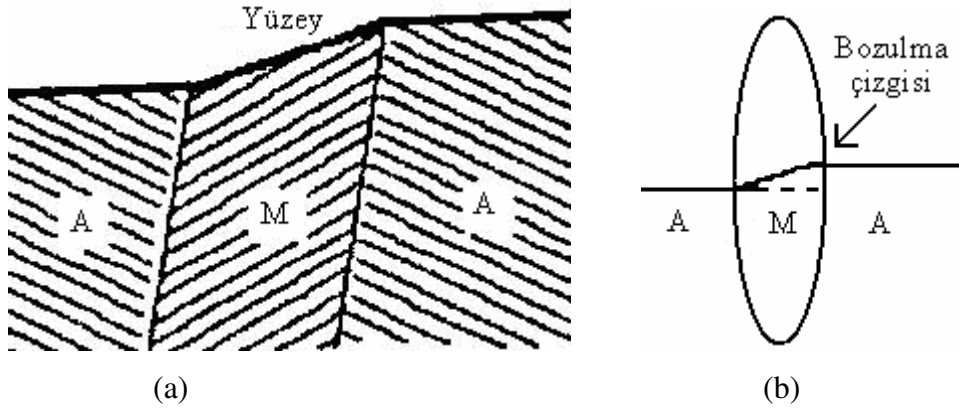
Martensit dönüşüm metal ve alaşımlarda görülen birinci dereceden yapısal bir faz dönüşümü olup ana faza dışardan uygulanan sıcaklık, zor veya her ikisinin aynı anda uygulanmasıyla martensit fazın elde edilmesidir. Kristalografik yapısından dolayı martensit bir dönüşüm yalnızca katı durumda difüzyonsuz olarak meydana gelir.

Martensit dönüşümün genel karakteristikleri kısaca aşağıdaki başlıklar altında sıralanabilir [1,5,7].

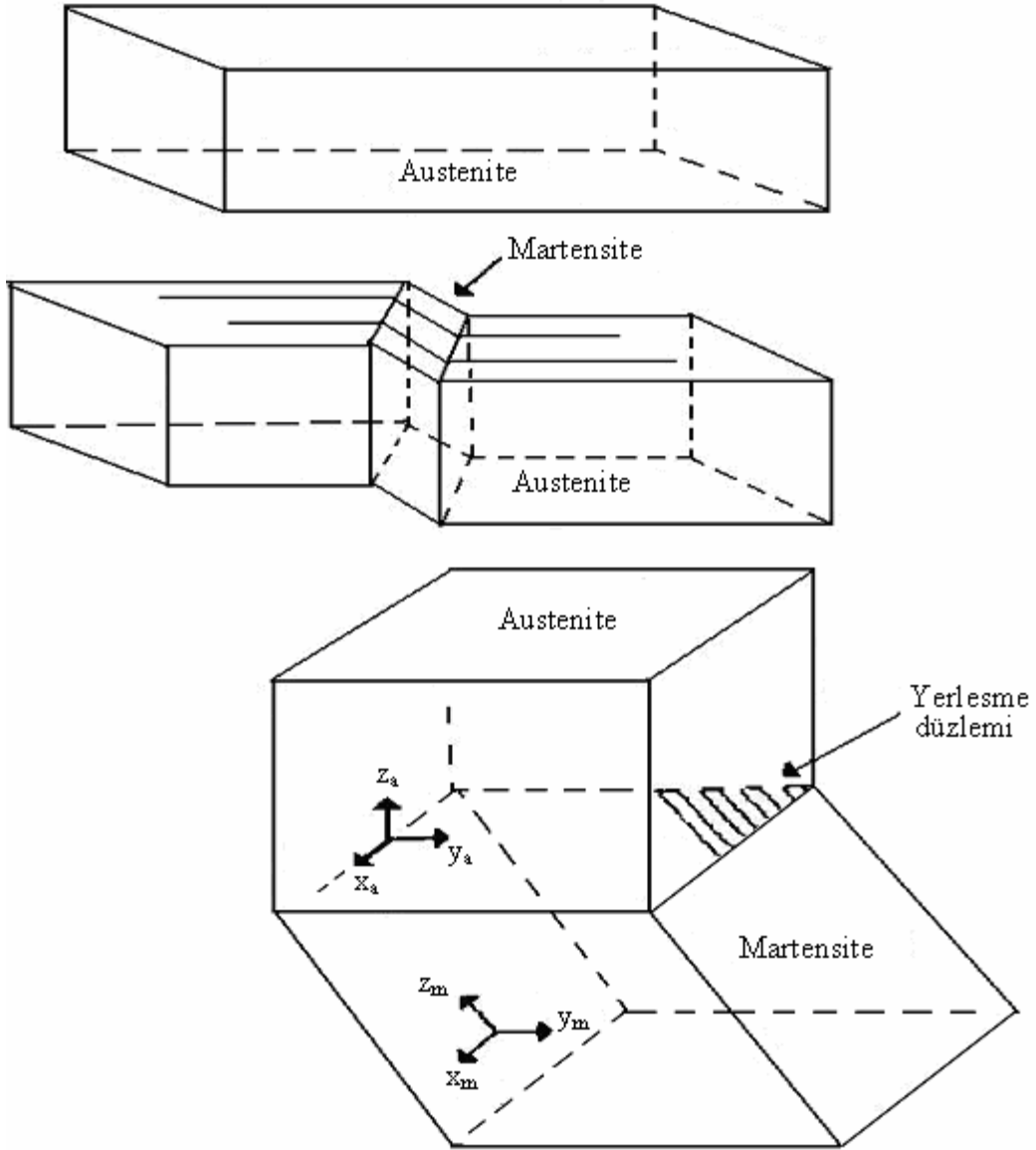
- Martensit faz ara bir katı çözeltidir.
- Dönüşüm difüzyonsuzdur. Difüzyonsuzdan kasıt, kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunur.
- Dönüşüm, sınırlı bir şekil değişikliği ile meydana gelir. Ana faz durumunda numunenin yüzeyi düzeltilip parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzey üzerinde meydana gelen martensit fazlı bölgeler kabartılar şeklinde gözlenir. Bu yapılar şekil 2.3’de gözlenmektedir. Şekil 2.3.a’ da görüldüğü gibi austenit yapı ile martensit yapı arasındaki sınırda bir bozulma çizgisi ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.3.b’ de ise bu bozulma çizgisi görülmektedir. Martensit dönüşümlere eşlik eden şekil değişiklikleri şekil hatırlama olayında önemli bir rol oynar.

- Bir martensit dönüşümünde bozulmamış olarak kalan ve ana faz ile ürün fazı ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi yerleşme düzlemi değişmez bir düzlemdir ve bu düzlem arasındaki doğrultular bozulmamıştır.
- Austenit faz ile martensit faz örgüleri arasında sınırlı bir dönme bağıntısı vardır.
- Dönüşümde kristal örgü kusurları da oluşur.

Martensit fazın şekillerini incelediğimizde martensit faz, alaşımın cinsine bağlı olarak ince plaka, kama, iğne ve benzeri şekillerde olabildiği görülmüştür [1,5].



Şekil 2.3. Martensitik dönüşüme etki eden bozulma çizgisinin kırılması ve yüzey kabartısının şekli. a) Yüzey kabartısı, b) Bozulma çizgisinin kırılması [5].



Şekil 2.4. Martensitik dönüşüm difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim [5].

2.2. Termoelastik Martensit Dönüşümler

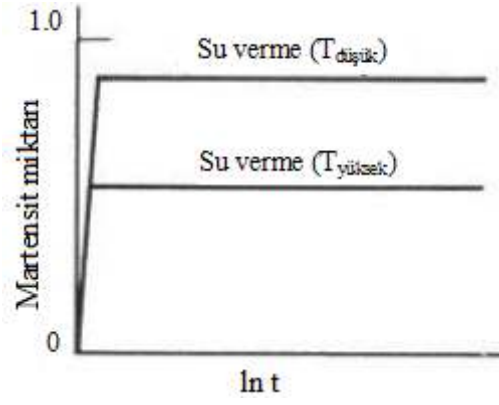
Martensit dönüşümlerin termoelastik ve termoelastik olmayan olmak üzere iki tipi vardır. Atomik boyutta sıcaklığa bağlı austenit–martensit faz dönüşümü aynı zamanda termoelastik martensit faz dönüşümü olarak adlandırılır. Termoelastik martensit dönüşüm sırasında, sıcaklık düşürüldükçe martensit plakaları devamlı olarak oluşup büyürler. Aynı işlemin tersi olarak eğer sıcaklık yükseltirise plakalar kaybolmaya başlar. Burada dönüşümün gerçekleşebilmesi için ortamın sıcaklığının değiştirilmesi ya da dışarıdan bir zor uygulanması gerekmektedir. Termoelastik olmayan dönüşümler ise soğutma esnasında

ani bir patlama reaksiyonu ile atermal olarak ana faz içinde yayılarak gerçekleşir. Bu tür dönüşümlerde şekil hatırlama özelliği gözlenmez [6].

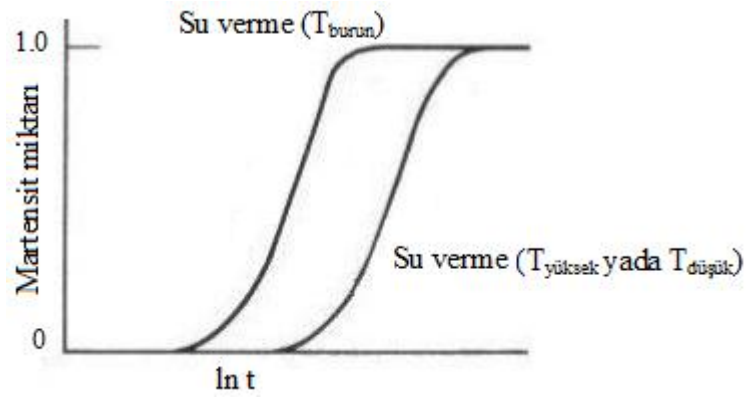
2.3. İzotermal ve Atermal Dönüşümler

Sıcaklık etkisiyle meydana gelen martensit dönüşümleri, alaşım sistemlerine göre atermal ve izotermal olmak üzere iki şekilde meydana gelir. Dönüşümün atermal veya izotermal olması alaşımın kimyasal bileşenine bağlıdır. Martensit dönüşümüne zamana bağlı olmayıp sadece sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşirse atermal dönüşüm olarak adlandırılır. Bu dönüşüm austenit haldeki numunenin sıcaklığını düşürünce belirli bir M_s sıcaklığında austenit yapı martensit yapıya dönüşür. Yani alaşımın dönüşecek bütün kısmı bu sıcaklıkta dönüşür ve tamamlanır. Dönüşüm çok hızlı gerçekleşir patlama reaksiyonları şeklinde olursa bu tip dönüşümlerde şekil hatırlama gözlenmez [7].

İzotermal dönüşümde, dönüşüm hem sıcaklığa hem de zamana zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu alaşımda austenit fazdaki numunenin sıcaklığı düşürülür ve belirli bir M_s sıcaklığına gelindiğinde austenit yapı içerisinde martensit yapı oluşmaya başlar. Numunenin sıcaklığı düştükçe dönüşüm devam eder ve M_f sıcaklığına gelindiğinde dönüşüm tamamlanır. Bunun tersi de mümkündür. Yani martensit haldeki alaşım ısıtılırsa A_s sıcaklığında, austenit yapı oluşmaya başlar ve A_f sıcaklığında, yapı tamamen austenit faza dönüşür. İzotermal dönüşüm belirli bir sıcaklık aralığında devam ettiğinden dolayı bu dönüşümün gözlemlendiği alaşımlarda şekil hatırlama olayı gözlenir [1,7]. Şekil 2.5’de atermal ve izotermal eğrileri mevcuttur.



(a)



(b)

Şekil 2.5. a) Atermal b) İzotermal dönüşüm eğrileri [7].

3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Akıllı malzemeler, kendi içinde ve çevresindeki değişimlere tepki vererek belirli işlevleri anında ve sürekli olarak yerine getirebilen malzemelerdir. Şekil hafıza alaşımları, akıllı malzemelerin bir sınıfıdır. Şekil hafıza alaşımı terimi, uygun ısı ve mekanik işlemlere maruz kaldığında, önceden tanımlı şekil veya boyutuna geri dönebilme yeteneği sergileyebilen metalik malzemelerdir. Şekil hafızalı alaşımların temel karakteristikleri; kritik dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında iki farklı şekil veya kristal yapısına sahip olmalarıdır [2].

Şekil hafıza alaşımları, kararlı iki faza sahiptir. Bu fazlar austenit (ana faz) olarak isimlendirilen yüksek sıcaklık fazı ve martensit (ürün faz) olarak isimlendirilen düşük sıcaklık fazıdır. Bu alaşımlar, kristal yapılarında oluşan martensit fazdan austenit faza dönüşümlerin etkisi ile önceki şeklini hatırlayabilen bir özelliğe sahiptir. Şekil hatırlama özelliği; malzeme martensit fazda iken deforme edilip daha sonra austenit faz sıcaklığına kadar ısıtıldığında, austenit fazda iken sahip olduğu ilk şeklini hatırlaması olayına verilen isimdir. Malzemenin deformasyondan sonra düzelip ilk görünümünü alması bu tür malzemelerin önemli bir özelliğini ifade etmektedir [2]. Bakır bazlı alaşımların β -fazları şekil hatırlama özelliği gösterirler. Şekil hafıza etkisi, kristalografik olarak difüzyon özelliği ve tersinir martensit dönüşüm gösteren bazı özel alaşımlarda gözlenmektedir [8].

Bazı alaşımların, sıcaklığın ve gerilimin etkisiyle daha büyük oranda şekil değiştirdiğinin 1930'lerden sonra farkına varılmasıyla, bu alanda bilimsel çalışmalara başlanmıştır. 1932 yılında Altın-Kadmiyum (Au-Cd) alaşımında yapılan ısı işlemler esnasında farkına varılan, büyük oranda şekil değişiminin incelenmesi sonucunda meydana gelen şekil değişiminin belli sıcaklık aralıklarında olduğu görülmüştür. Bu alaşımlara kalıcı şekil değişimi uygulandığında alaşımın belirli bir sıcaklığa ısıtılmasıyla ilk şekline geri dönmesi, şekil hafıza kavramını ortaya çıkarmıştır.

Şekil hafızalı alaşımlar, 1960 ve 1970 yıllarında nikel ve bakır esaslı şekil hafızalı alaşımların keşfine kadar fazla bir uygulama alanı bulamamıştır. Teknolojinin gelişmesiyle alaşımların üretim yöntemleri gelişmiş ve daha kullanılır hale gelmiştir. Bu alaşımlar özellikle son 20 yılda ileri teknoloji malzemeleri sınıfına girmiştir [8].

3.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Genel Karakteristikleri

Şekil hafızalı alaşımlarda, yüksek sıcaklıktaki austenit fazın uzun süren dönüşümü sonucunda, termoelastik martensit meydana gelmesi işlemi, martensit dönüşüm olarak isimlendirilir. Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen, hepsinin birden hacimsel olarak aynı doğrultuda taşınmasından dolayı, dönüşüm sonucunda makroskopik bir şekil değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak normal metal ve alaşımlardan farklı niteliklere sahip olan şekil hafıza etkisi ve süperelastisite gibi eşsiz ve üstün özellikleri açığa çıkar [9]. Tablo 3.1.'de martensit dönüşüme ait çekirdeklenme ve büyüme karakteristikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Martensit dönüşüm tiplerinin genel karakteristikleri [9].

TİP	ÇEKİRDEKLENME	BÜYÜME	KRİSTAL KUSURLARI
Termoelastik faz dönüşümü	Soğutma etkisi	Sıcaklık düşüşüyle orantılı	Dönüşüm etkili
Termoelastik olmayan faz dönüşümleri	Soğutmanın ani etkisi	Ani ve hızlı,soğutma hızından bağımsız	Dönüşüm etkili ve plastik deformasyonla

Şekil hatırlama özelliği gösteren alaşımların bazı kristalografik özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz;

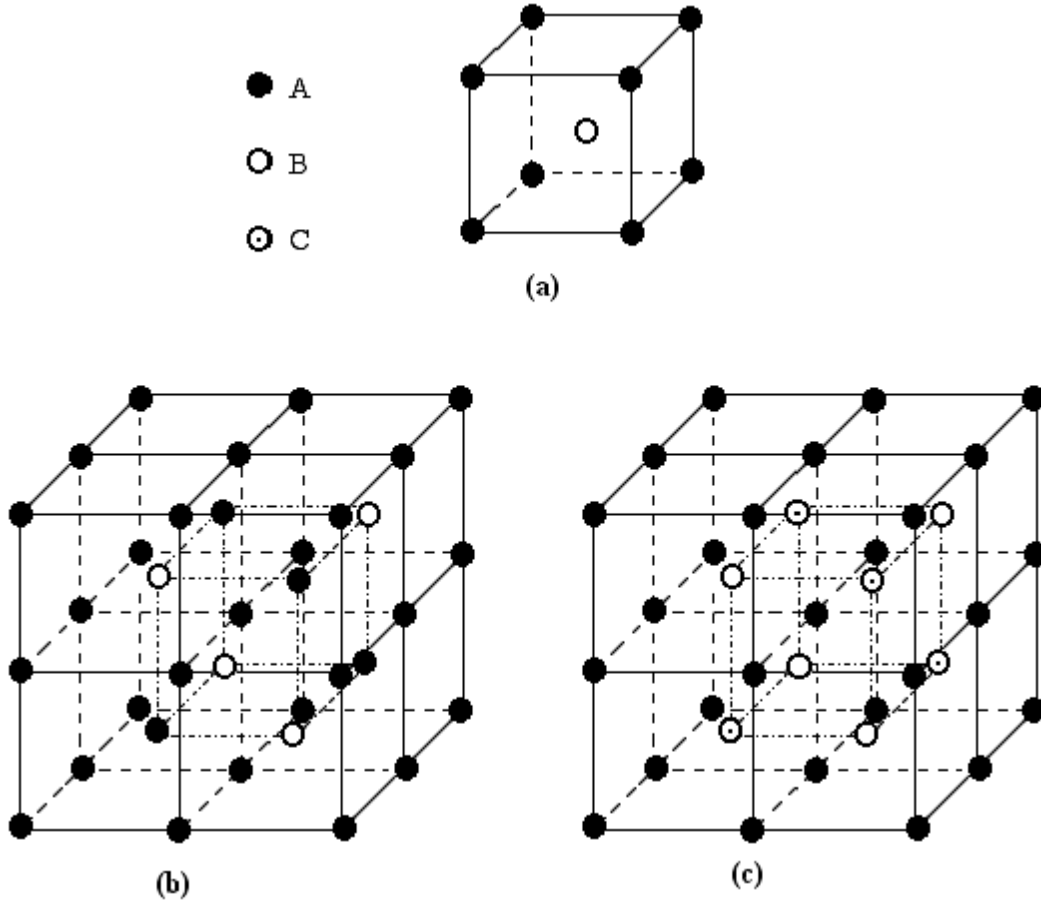
1. Kristal yapı düzenli ve süper örgülüdür.
2. Eğer düzenlilik dikkate alınmazsa ana faz bir bcc yapıya ve martensit faz ise hcp yapıya sahiptir.
3. Martensit fazdaki sabit örgü zorlanmaları ikizlenmedir, dislokasyon değildir.
4. Martensit dönüşüm düşen sıcaklıkla belli bir değere kadar termoelastik olarak ilerler.

Şekil hatırlama olayı gösteren pek çok katı çözelti, yüksek sıcaklıkta düzensiz yapıda iken düşük sıcaklıklarda düzenli yapıya geçerler ve sıcaklık düştükçe düzen derecesi artar. Şekil

hafızalı alaşımlar, genellikle süper örgülü yapılara (A2, B2, 3R, DO₃ , fcc, fct...vb) sahiptirler.

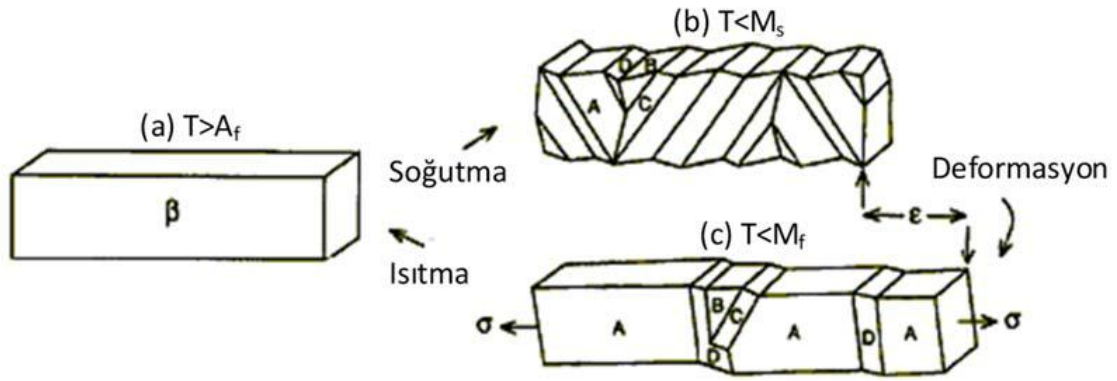
Cu-bazlı şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit dönüşümler düzenli bcc β -fazından meydana gelir. Yüksek sıcaklıktaki düzensiz β -fazı A2 (Şekil 3.1) tipi bcc kristal yapısına sahip iken soğutma ile kısa mesafeli düzenli dönüşüme uğrar ve B2 (CsCl tipi) süper örgü yapı meydana gelir. Soğutma ile en yakın komşu düzeni oluşur, yapı alaşım kompozisyonuna, soğutma hızına bağlı olarak DO₃ yapı ya da L2₁ yapı olur. Şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımlarda süper örgülerin temeli bcc örgülerdir. B2 beta (β) brass tipi süper örgülerde, yapı iç içe girmiş iki tane basit kübik yapı olarak görülebilir. Bu süper örgüye CsCl yapı da denir. Şekil 3.1.a'da görüldüğü gibi Cl atomları küpün köşelerine, Cs atomları merkeze yerleşecek şekilde dağılır. Bu tip süper örgülere şekil hatırlamalı alaşım sistemlerinde sık sık rastlanır. CsCl tipi B2 süper örgüsü 50 : 50 kompozisyon oranı ile sağlanır ve β_2 fazıyla temsil edilir. ZnCu, AuCd, AlNi, LiTl alaşımları buna örnek olarak gösterilebilir.

Cu₂MnAl yapı veya L2₁ tipi süper örgülerde ise köşelerinde Cu türü atomlar ve cisim merkezinde sırasıyla periyodik olarak Mn ve Al türü atomlar bulunan CsCl tipi birim hücrelerin yan yana gelmesiyle oluşan düzenli bir yapıdır. Birim hücre tanımı için sekiz tane CsCl tipi hücreye ihtiyaç vardır. Bu hücre Şekil 3.1.c'de görülmektedir. Cu₂NiAl, Zn₂CuAu, Cu₂MnSn gibi alaşımlar bu yapıya iyi birer örnektir [10].



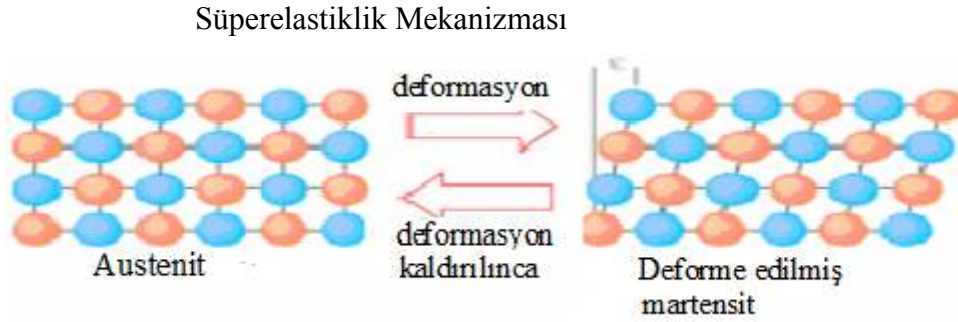
Şekil 3.1. Şekil hatırlama özelliğine sahip düzenli kristal yapı birim hücreleri a) CsCl yapı, b) Fe_3Al yapı, c) Cu_2MnAl tipi yapı [10].

Martensit dönüşümün basitleştirilmiş bir modeli şekil 3.2’de şematik olarak çizilmiştir. Sıcaklık M_s noktasının altına düştüğünde, kesme tarzındaki bir mekanizma ile martensit dönüşüm tekrar başlar. Şekil 3.2’deki A ve B bölgelerindeki martensit aynı yapıya sahiptir ancak yönelimleri birbirinden farklıdır. Her biri etkileşimli martensit varyant olarak adlandırılır. Martensit daha düşük bir kristal simetrisine sahip olduğundan dolayı aynı ana fazdan pek çok martensit varyant oluşabilir. Sıcaklık yükseldiğinde ise martensit kararsız hale gelir ve tersine martensit dönüşüm başlar. Eğer kristalografik açıdan tersinebilirlik söz konusu ise martensit, orijinal yönde ana faza geri döner. Atomik yer değiştirmeler çok küçük olmasına karşın, tersine martensit dönüşüm esnasındaki yapısal değişimlerden dolayı makroskobik bir şekil değişimi gözlemlenir [11].



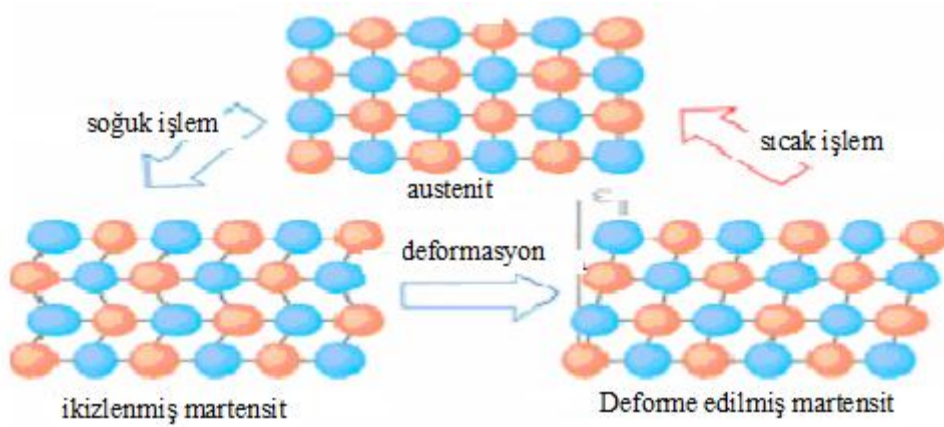
Şekil 3.2. Martensit dönüşüm. a) Austenit fazda β fazlı kristal, b) Martensit dönüşüm sonrasında oluşan ikizlenmiş A, B, C ve D varyantları, c) Baskın A varyantı [2].

Şekil hafıza etkisi gösteren alaşımlar, zor, sıcaklık veya her iki etkinin aynı anda uygulanmasıyla yapısında kalıcı değişimler gösteren metal alaşımları eşsiz bir sınıftır. Bu alaşımlar üzerindeki etki kaldırıldığında ise ilk şekline geri dönebilen metal alaşımlardır. Şekil hafızalı bu alaşımlar pseudoelastiklik (Şekil 3.3) ve şekil hafıza etkisi (Şekil 3.4) özelliği gösterir.



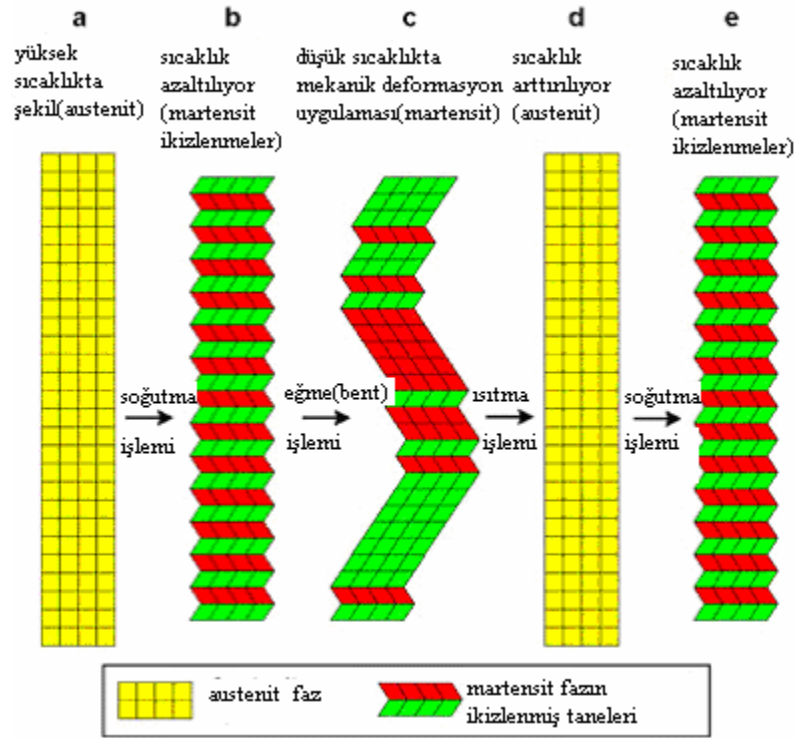
Şekil 3.3. Süperelastiklik mekanizmasının gösterimi [2].

Şekil Hafıza Mekanizması



Şekil 3.4. Şekil hafıza mekanizmasını gösteren bir atomik model [2].

Şekil hafızalı alaşımların şekil hatırlama özelliği şematik olarak Şekil 3.5’de açıklanmaktadır. Şekil hafıza özelliği, malzeme martensit fazda iken deforme edilip, daha sonra austenit faz sıcaklığına kadar ısıtıldığında, austenit fazda iken sahip olduğu ilk şeklini hatırlaması olayıdır. Malzemenin deforme edildikten sonra düzelip ilk şeklini alması malzemenin önemli bir yeteneğini ifade eder. Şekil hafıza etkisinin ortaya çıkmasına, ısıtma veya soğutma işlemleri süresince belirli bir sıcaklık aralığında oluşan yapısal değişimler neden olmaktadır. Bu etki, yapıda meydana gelen martensit dönüşümle açıklanmaktadır [1, 2].



Şekil 3.5. Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [2].

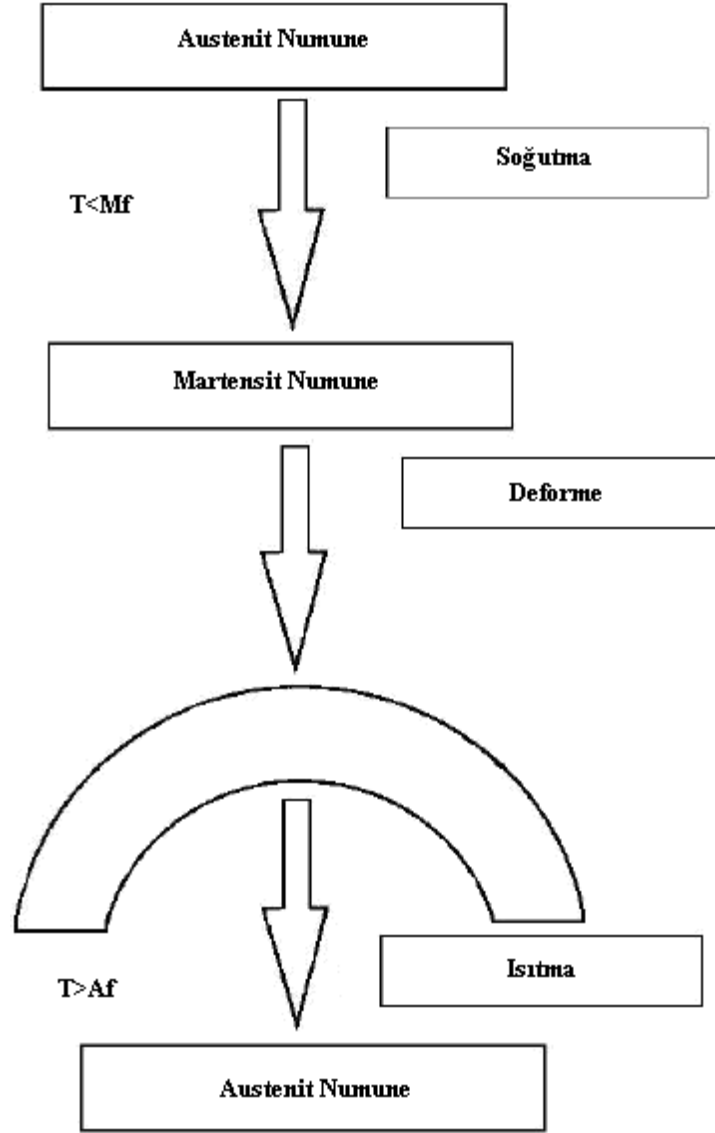
Şekil 3.5’ de verilen şemayı açıklayacak olursak;

- Şekil 3.5. a’da tek kristal yapıya sahip ana faz gösterilmiştir.
- Şekil 3.5.b’de sıcaklığın azalmasıyla martensit ikizlenmelerin oluşumu gözlenmektedir.
- Şekil 3.5.c’de düşük sıcaklıkta mekanik deformasyon uygulaması gösterilmiştir.
- Şekil 3.5.d’de numunenin sıcaklığı A_f üzerindeki sıcaklıklara kadar artırıldığında numune orijinal durumunu alarak austenit hale gelir.
- Şekil 3.5.e’de ise numunenin soğutulması sonucu b deki durumunu tekrar kazanır.

3.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama Olayı

Tek yönlü şekil hatırlama olayında numune martensit bitiş sıcaklığının altında ($T < M_f$) deforme edilirse, uygulanan zor numune üzerinden kaldırıldığında numune deformasyon öncesi şekline geri dönemez. Isıtma sonucunda numunede kalan zor kademeli olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar numunenin deforme edildiği sıcaklığa düşürülmesi üzerine, numune deforme edilmiş şeklini geri kazanamaz [12]. Martensit dönüşümü ve yeniden

yönelimle, artık zorlanma oluşturma özelliği ve ısıtma sonucunda deformasyon öncesi orijinal β -faz yöneliminin tekrar elde edilebilmesi tek yönlü şekli hatırlama olayının temel mekanizmasıdır. Tek yönlü şekil hatırlama mekanizması Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

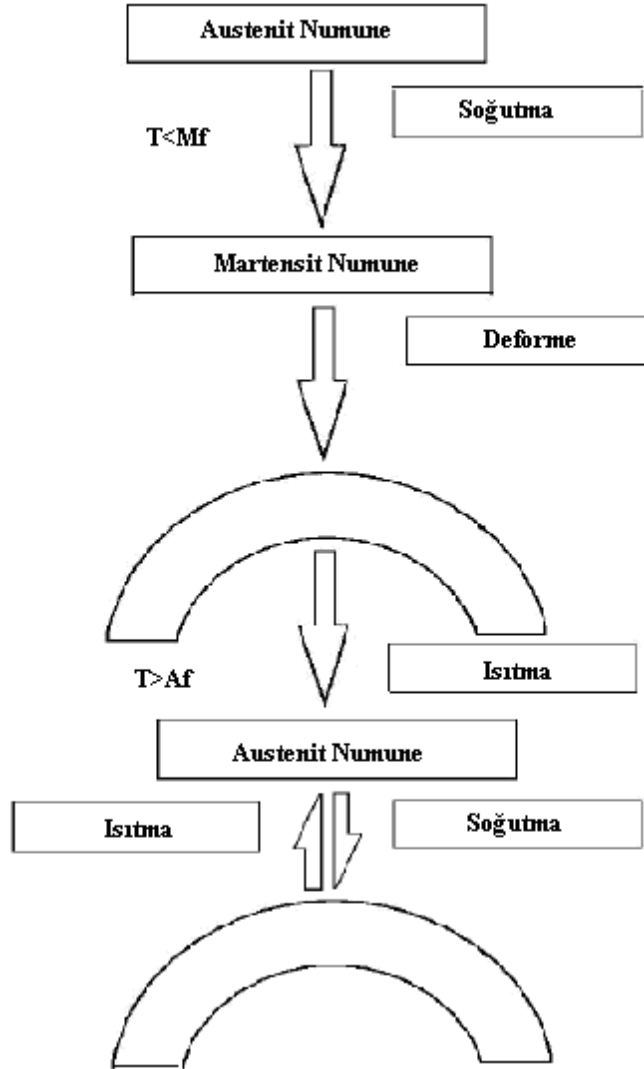


Şekil 3.6. Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [5].

3.1.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama Olayı

Çift yönlü şekil hatırlama olayında, $T < M_f$ sıcaklığında yani martensit fazda numune deforme edildikten sonra uygulanan zor kaldırılır ve numune deforme edilmiş şeklini korur. Deforme edilmiş numunenin sıcaklığı $T > A_f$ sıcaklığına yükseltilince plastik deformasyon ortadan kalkarak numune deforme edilmemiş haline geri döner. Orijinal şeklini alan numune tekrar $T < M_f$ sıcaklığına kadar soğutulduğunda tekrardan deforme

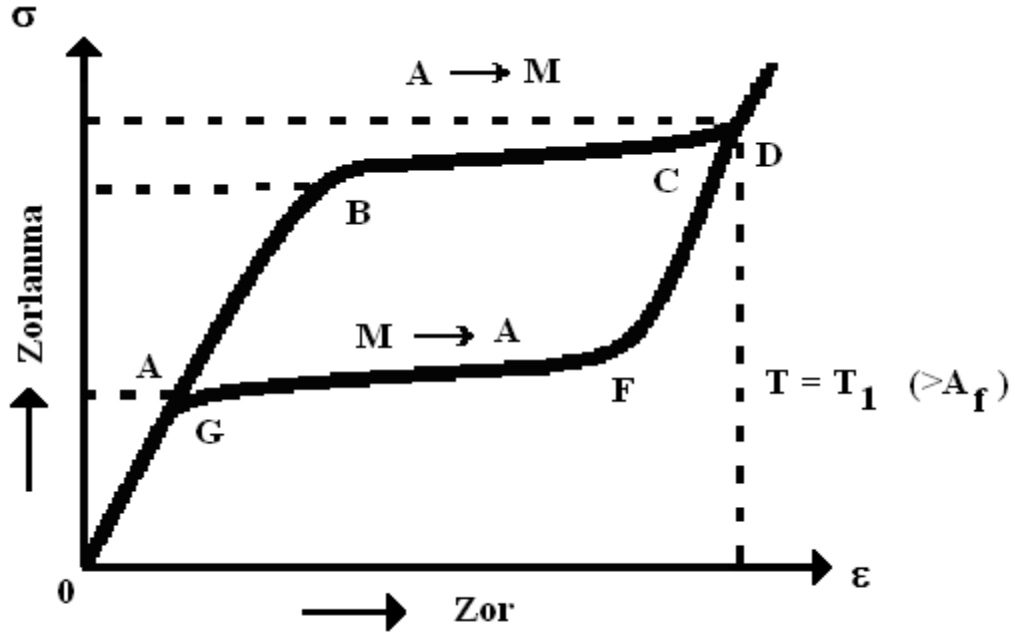
edilmiş şeklini alır. Çift yönlü şekil hatırlama etkisi Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir [12]. Bu da tersinir şekil hatırlama olayının bir sonucudur.



Şekil 3.7. Çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik olarak gösterimi [5].

Martensit dönüşüme duyarlı bir alaşıma, sabit bir T sıcaklığında iken zor uygulanırsa, Şekil 3.8’de ki gibi zor-zorlanma eğrisinde; T sıcaklığının, ters dönüşümünün zor uygulanmadan tamamlandığı bir A_f sıcaklığından daha büyük olması gerekir. Şekildeki AB kesimi ana fazın saf elastiklik deformasyonunu gösterir. Bir zor seviyesine karşılık gelen B noktasında ilk martensit plakalar oluşmaya başlar ve C noktasına ulaşıncaya kadar devam eder. Zor etkisiyle tamamen martensit faza dönüşen alaşım numunesi CD

bölgesinde elastik olarak deforme edilir. D noktası oluşan martensitin plastik akış noktasıdır ve kopma meydana gelinceye kadar alaşım plastik olarak deforme olur. F deki bir zorlanma ile ters dönüşüm başlar ve martensit kesri ana faz elde edilinceye kadar (G noktasına kadar) azalır sonuçta martensit faz tamamen ana faza dönüşür. Zor varken ve kaldırıldığında elde edilen eğrinin kapattığı bölge, kaybolan enerji miktarını belirler. Bu tür dönüşüm, suni elastik olarak adlandırılır ve genellikle A_f sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda meydana gelir [1].



Şekil 3.8. Süperelastiklik histerisisinin şematik gösterimi [1].

4. BAKIR ESASLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Bakır esaslı alaşımlar, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni alaşımlar şeklinde üçlü alaşımlar olabileceği gibi ayrıca manganezde içeren dörtlü modifikasyonları da mümkündür. Bor Seryum, Kobalt, Demir, Titanyum, Vanadyum ve Zirkonyum gibi elementler, ince taneli yapı elde etmek için alaşıma katılır. Tablo 4.1.'de Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni şekil hatırlamalı alaşımların bazı özellikleri verilmektedir.

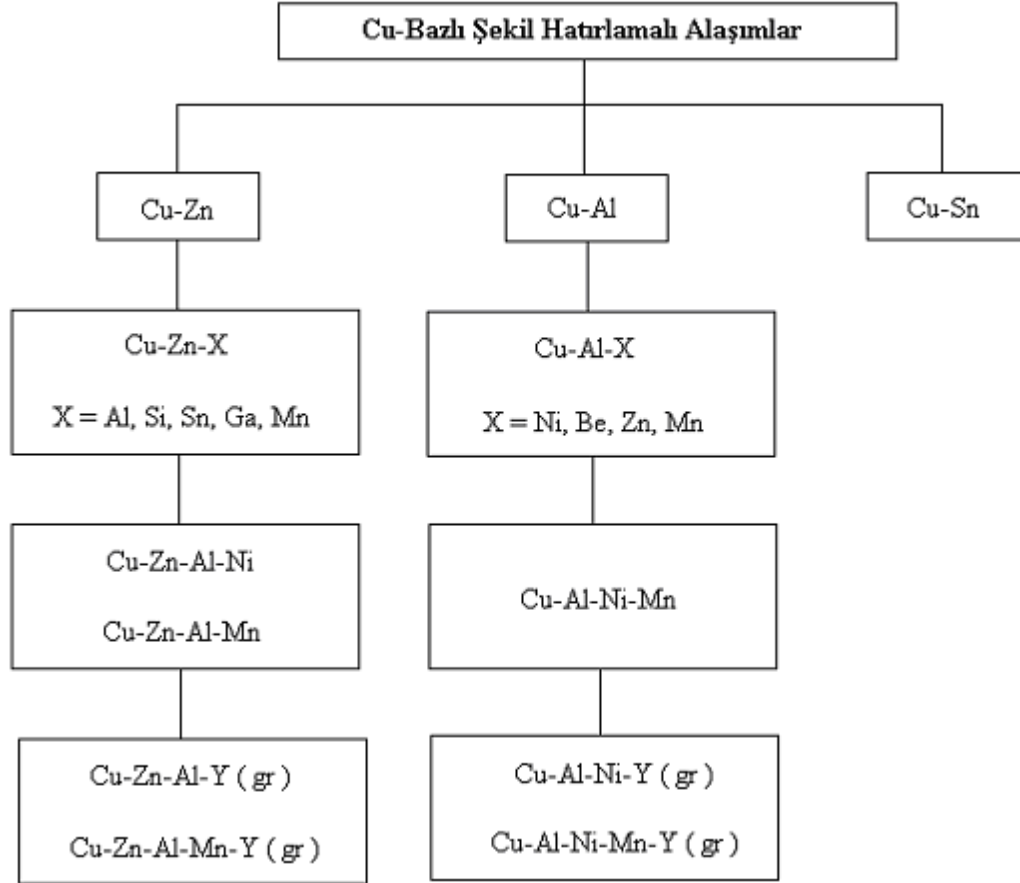
M_s ve A_s dönüşüm sıcaklıkları arasında şekil hafızalı alaşımların Young modüllerini tayin etmek çok zordur. Bu sıcaklıklarda alaşımlar lineer olarak bir elastisite sergiler ve modül hem sıcaklığa hem de gerilmeye bağlıdır. Bakır esaslı şekil hafızalı alaşımlar doğada yarı kararlı halde olduğundan şekil hafıza etkisini sağlayan β -fazının korunması için, bu fazda ısı işlem ve ardından da kontrollü soğutma yapılmalıdır. Uzun süreli ısıtma, çinko buharlaşmasına ve tane büyümesine neden olduğundan kaçınılmalıdır. Su verme sertleştirme işlemi olarak kullanılır. Açık havada soğutma işlemi, bazı yüksek alüminyum içerikli Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni alaşımları için yeterli olabilir. Sadece soğutulmuş parçalarda dönüşüm sıcaklıkları genellikle kararsız olduğundan dönüşüm sıcaklıklarını kararlı hale getirmek için A_f sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda, soğutma sonrası yaşlandırma yapılmalıdır. Cu-Zn-Al alaşımlarında soğutma hızı yüksek olduğunda martensit faza direk dönüşüm olması, martensitin kararlılığını hassaslaştırır. Bu etki tersinir dönüşümün daha yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olur. Bu nedenle, dönüşüm gecikir ve tam olarak şekil geri kazanımı sağlanamaz. M_s sıcaklığının üzerindeki ortam şartlarında yavaş soğutma veya β -fazlı halde, ara yaşlandırma sureti ile basamaklı soğutma tercih edilmelidir. Bakır esaslı alaşımların ısı kararlılığı ayrışım kinetikleri ile sınırlıdır. Bu nedenle Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni alaşımların sırasıyla 150~200°C üzerindeki sıcaklıklara uzun süreli maruz bırakılmasından kaçınılmalıdır. Daha düşük sıcaklıklarda yaşlandırma, dönüşüm sıcaklıklarını değiştirir. β -fazında yaşlandırma durumunda da benzer sonuçlar doğar. Martensit halde yaşlandırılmış alaşımlar yaşlanma kaynaklı martensit stabilizasyon etkisi gösterir [13].

Tablo 4.1. Bakır esaslı şekil hafızalı alaşımların özellikleri [13].

	CuZnAl	CuAlNi
Isıl özellikler (C)		
Erime sıcaklığı	950-1120	1000-1050
Yoğunluk (g/cm)	7,64	7,12
Elektrik direnci (microohm.cm)	8,5-9,7	11-13
Isı iletkenliği (w/cm. C)	120	30-43
Isı kapasitesi (J/Kg. C)	400	373-574
Mekanik özellikler		
Joung Modülü(Gpa)		
Beta faz	72	85
Martensit	70	80
Akma dayanımı(Mpa)		
Beta faz	350	400
Martensit	80	130
Maksimum çekme dayanımı(Mpa)	600	500-800
Şekil Hafıza Özellikleri		
Dönüşüm sıcaklıkları	120	200
Geri kazanılır gerilim	% 4	% 4
Histeresis, delta (C)	15-25	15-20

Bakır bazlı alaşımlara ait bir liste tablo 4.2’de verilmiştir. Cu-Zn-Al alaşımında Zn ve Al içeriklerinin her ikisindeki bir artış martensit dönüşümün sıcaklığını düşürür [15].

Tablo 4.2. Cu-bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar [14].



5. MATERYAL VE METOT

5.1. Materyal

Şekil hatırlama etkisi gösteren Cu-bazlı alaşımların elde edilmesi için % 99,9 saflık derecesinde toz halinde bulunan Cu, Al, Mn, V ve Cd elementleri kullanıldı. Bu çalışmada Cu-bazlı olmak üzere; Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd üçlü ve dörtlü alaşımları üretildi. Bu alaşımlar 12-24 Volt ve 75-150 Amper aralığındaki Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritildi. Daha sonra külçe şeklinde dökülen alaşımlar gerekli analizlerin yapılması için küçük parçalar halinde kesildi. Elde edilen bu alaşım parçaları Carbolite CWF-1200 marka kül fırınında 900 °C de (β faz bölgesinde) yaklaşık 1 saat süreyle ısıtılıp homojenleştirildi. Homojenleştirme işlemi sonucunda kül fırınından alınan alaşım tuzlu-buzlu suya bırakılarak ani soğutma işlemi yapıldı. Şekil hatırlama etkisi gösteren Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımlarının mikroyapıları, dönüşüm sıcaklıkları, incelendi. Bu incelemelerde aşağıdaki teknikler kullanıldı;

1. Örgü mesafelerinin ve düzeninin belirlenmesi için X-ışını difraksiyonu metodu,
2. Malzemelerin mikroyapılarını incelemek için optik mikroskopla metalografik gözlemler,
3. Alaşımlarda faz geçişlerinin belirlenmesi için veya kütle kayıpları ve oksitlenme mekanizmaları için TG / DTA ölçümleri,
4. Dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi ve aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ölçümleri .

5.1.1. Cu-Al-Mn Alaşımı

Toz halinde bulunan ve % 99.9 saflıkta olan Cu, Al ve Mn elementleri alındı ve homojen bir karışım sağlanması için karıştırıldı. Elde edilen bu karışım Graseby Specac marka presleme cihazında (şekil 5.1.a,b) preslenip paletlendi. Paletlenen bu numuneler Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritildi. Daha sonra külçe şeklinde dökülen alaşımlar gerekli analizlerin yapılması için küçük parçalar halinde kesildi. Elde edilen bu alaşım parçaları Carbolite CWF-1200 marka kül fırınında (şekil 5.2) 900 °C de (β faz bölgesinde) yaklaşık 1 saat süreyle ısıtılıp homojenleştirildi. Homojenleştirme işlemi sonucunda kül fırınından alınan alaşım tuzlu-buzlu suya bırakılarak soğutuldu. Soğutma işlemi sonrasında alaşım üzerinde oluşan oksitlenmeleri yok etmek için zımparalama işlemi yapıldı. Alaşımın atomikçe % değeri EDX analizi ile belirlendi (Tablo 5.1).

5.1.2. Cu-Al-Mn-V Alaşımı

Toz halinde bulunan ve % 99.9 saflıkta olan Cu, Al, Mn ve V elementleri alındı ve homojen bir karışım sağlanması için karıştırıldı. Elde edilen bu karışım Graseby Specac marka presleme cihazında (şekil 5.1.a,b) preslenip paletlendi. Paletlenen bu numuneler Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritildi. Daha sonra külçe şeklinde dökülen alaşımlar gerekli analizlerin yapılması için küçük parçalar halinde kesildi. Elde edilen bu alaşım parçaları Carbolite CWF-1200 marka kül fırınında (şekil 5.2.) 900 °C de β faz bölgesinde yaklaşık 1 saat süreyle ısıtılıp homojenleştirildi. Homojenleştirme işlemi sonucunda kül fırınından alınan alaşım tuzlu-buzlu suya bırakılarak soğutuldu. Soğutma işlemi sonrasında alaşım üzerinde oluşan oksitlenmeleri yok etmek için zımparalama işlemi yapıldı. Alaşımın atomikçe % değeri EDX analizi ile belirlendi (Tablo 5.1).

5.1.3. Cu-Al-Mn-Cd Alaşımı

Toz halinde bulunan ve % 99.9 saflıkta olan Cu, Al, Mn ve Cd elementleri alındı ve homojen bir karışım sağlanması için karıştırıldı. Elde edilen bu karışım Graseby Specac marka presleme cihazında (şekil 5.1.a,b) preslenip paletlendi. Paletlenen bu numuneler Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritildi. Daha sonra külçe şeklinde dökülen alaşımlar gerekli analizlerin yapılması için küçük parçalar halinde kesildi. Elde edilen bu alaşım parçaları Carbolite CWF-1200 marka kül fırınında (şekil 5.2.) 900 C de (β faz bölgesinde) yaklaşık 1 saat süreyle ısıtılıp homojenleştirildi. Homojenleştirme işlemi sonucunda kül fırınından alınan alaşım tuzlu-buzlu suya bırakılarak soğutuldu. Soğutma işlemi sonrasında alaşım üzerinde oluşan oksitlenmeleri yok etmek için zımpara yapıldı. Alaşımın atomikçe % değeri EDX analizi ile belirlendi (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Elde edilen Cu-esaslı alaşımların atomik oranları (% at.).

Alaşım Adı	Cu (at.%)	Al (at.%)	Mn (at.%)	V (at.%)	Cd (at.%)
MV-1	74.95	21.33	3.72	-	-
MV-2	75.33	21.06	3.16	0.45	-
MV-3	74.69	21.63	2.95	0.73	-
C-1	73.83	24.13	1.97	-	0.6
C-2	76.82	19.53	3.22	-	0.43



(a)



(b)

Şekil 5.1. Graseby Specac marka presleme cihazı.



Şekil 5.2. Carbolite CWF-1200 Marka Kül Fırını.

5.2. Metot

5.2.1. X- Işını Kırınım (XRD) Analizleri

Kristal yapı, atomlar ve atom gruplarının belli bir hacimde bir düzene sahip olmalarından oluşur. X-ışınlarının kristalde kırınıma uğraması, kristal yapının özelliklerinin incelemesinde olanak sağlamaktadır. X-ışınlarıyla, kristaldeki atomların dizilimleri ve atomların oluşturdıkları düzlemlere karşı gelen bir takım noktaları veya daireleri araştırılabilmektedir. X-ışınları, kristalde bulunan çekirdek etrafındaki elektronlar tarafından belirli bir saçılmaya uğramaktadır. X-ışını kırınım yöntemi Bragg yasası esasına dayanır. X-ışını kırınım yöntemiyle [5].

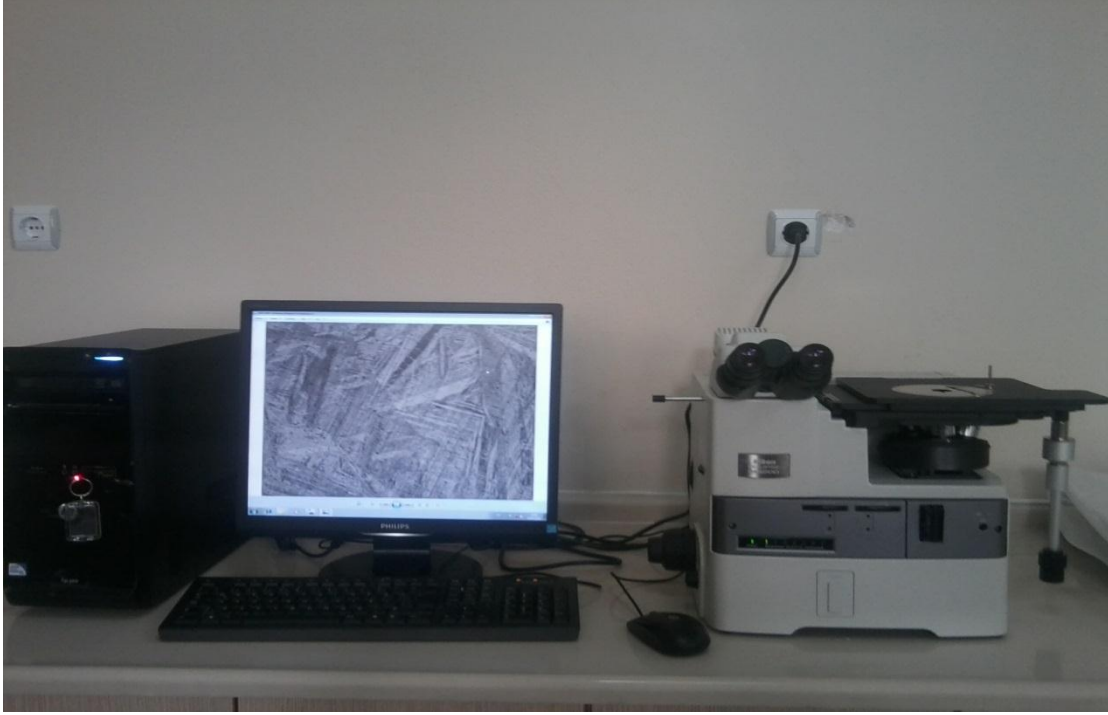
1. En yüksek kırınım pozisyonu,
2. En yüksek pikin şiddeti,
3. Kırınım açısının bir fonksiyonu olarak şiddetin dağılımı

parametrelerini hesaplayabiliriz [16]. Bu parametreler ile materyaldeki kristal düzlemleri ve örgü parametreleri hesaplanabilmektedir. Elde ettiğimiz alaşımın X-ışını analizini yaparken öncelikle numune X-ışını cihazı üzerinde bulunan dönebilen bir tablo üzerine uygun bir şekilde yerleştirilir. Sonra üzerine filtre sayesinde monokromatik bir X-ışını gönderilir ve kristal düzlemden yansıyan ışınlar bilgisayar kontrollü bir sayaç veya detektör yardımı ile kaydedilir. XRD analizinde sonuçlar şiddet-açı (2θ) diyagramı şeklinde verilmektedir. Bu sonuçlar, analiz edilen malzemenin mikroyapısı hakkında bilgi verir. Örneğin çok ince taneli bir malzemenin analizinde kırınım çizgilerinin genişliği artar. Yani tane boyutu küçüldükçe kırınım çizgileri kabalaşır. **Malzemelerin ölçüm** süresinde X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak alınmıştır [1].

5.2.2. Metalografik Gözlemler

Teknolojik uygulamalar açısından malzemelerin mikroskobik yapılarının bilinmesi oldukça önemlidir. Malzemeye ait optik mikrograflar yardımı ile mevcut fazlar tane sınırları takviyeler, fazların hacim oranları ve ikizlenmeler belirlenir. Optik mikrograf için numune hazırlarken, numunenin yüzeyi oldukça parlak olmalı ve kimyasal yada elektro kimyasal olarak dağlanmalıdır. Çünkü bir metal malzemenin parlatılmış yüzeyi kristal kusurları göstermez ancak malzeme yüksek enerji kısımlarını çözen bir kimyasal dağlayıcıya maruz kaldığında, yüksek enerjili tane sınırları ve dislokasyonun etrafındaki yüksek enerjili bölge çözünür ve çukurlaşır. Malzemenin yüzey düzlemine dik olarak gelen ışınlar parlak yüzeyde objektife aynı açı altında geri dönerken çözünmüş yüzeylerde saparak yansır. Sapmış ışınların bulunduğu bölgeler ışık objektife geri dönmediği için karanlık görünür. Gelen ışın ve yansıyan ışın düzlemlerden yansır [14,16].

Alaşımlardan küçük parçalar halinde kesilen numuneler soğuk kalıplama yöntemi ile poliestere gömüldü ve daha sonra farklı kalınlıklardaki kağıt zımparalar ile parlatıldı. Daha sonra 1 mikron elmas pasta kullanılarak kadife çuhada parlatıldılar ve parlatma sırasında çuhaya sıvı olarak saf alkol döküldü. Parlatılan bu numuneler Şekil 5.3’de verilen Nikon MA 200 Optik Mikrograf cihazı kullanılarak metalografik gözlemler yapıldı.



Şekil 5.3. metalografik gözlemler yapıldığı Optik Nikon MA 200 Optik Mikrograf cihazı.

5.2.3. TG/DTA Ölçümleri

Isıl işlem görmüş bir numunenin birçok özelliği değişebilir. Termal analizde enerji değişimi DTA ile belirlenir. Bir numunenin termogravimetrik yöntemle incelenebilmesi için sıcaklık değişiminin numunenin kütlesinde bir değişim oluşturması gerekir. Ancak enerji değişimine sebep olan dönüşümler mutlaka bir kütle değişimi yaratmayabilir. Kütle değişiminin olmadığı durumlarda termogravimetrik ölçümlerde hiçbir şey gözlenmez.

Bu yöntemde numune ve termal olarak referans maddeye aynı sıcaklık uygulaması yapılır. İkisi arasındaki fark, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Sıcaklık düzgün bir şekilde artırılır. TG deki gibi sadece kütle değişimine bağımlı olmadığı için daha geniş bir kullanım alanı vardır. Isının soğrulduğu (absorbsiyon) veya açığa çıktığı her numuneye uygulanabilir. Fiziksel olarak soğurma ve kristalizasyon olayı ekzotermik bir olaydır. Desorbsiyon, süblimleşme, erime ve buharlaşma olayları ise endotermiktir [1,17,18]. Termal analiz ölçümlerinde Şekil 5.4’de gösterilen DTA-60AH Shimadzu marka termal analiz cihazı kullanıldı. Her bir alaşımın yapısında meydana gelen faz değişimlerinin incelenmesi için diferansiyel termal analiz yöntemi kullanıldı. Numuneler oda sıcaklığından 1000 °C’ ye kadar ısıtıldı. Isıtma işlemi 20 °C/dakika ısıtma hızı ile argon gazı atmosferinde yapıldı.



Şekil 5.4. DTA-60AH Shimadzu marka termal analiz cihazı.

5.2.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit faz ve austenit faz dönüşüm sıcaklıklarının başlangıç ve bitiş değerlerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Martensit ve austenit dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan teknik DSC analizidir. Bu çalışmamızda kullandığımız numunelerimizin DSC analizlerini yapabilmek için, çalışmalarımızda kullanılan beş alaşımdan da küçük parçalar kesilerek numuneler hazırlandı. Numunelerin kesimi esnasında oluşabilecek zor zorlanma etkisinin yok edilebilmesi için, DSC analizleri yapılmadan önce 900 °C'de (β -faz bölgesinde) 1 saat süreyle homojenleştirildi. Homojenleştirme sonucunda numune hemen tuzlu-buzlu suya atılarak ani soğutma işlemi uygulandı. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra numunelerin dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ile ölçümler yapıldı. Bu ölçümler DSC-60A Shimadzu marka (Şekil 5.5) cihazla yapıldı. Bundan sonraki aşamalarda; Cu-Al-Mn üçlü alaşımına farklı oranlarda katkılanan Cd ve V elementlerinin dönüşüm sıcaklıklarını nasıl etkilediği gözlemlendi. Aynı zamanda numunelerimizin farklı ısıtma/soğutma hızlarında diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ile termal ölçümleri alıp ısıtma/soğutma hızına bağlı olarak dönüşüm sıcaklıklarının nasıl değiştiği incelendi. Bu ölçümlerde ısıtma ve soğutma hızları 15 , 25, 35, 45 °C/dakika olarak seçildi.



Şekil 5.5. DSC-60A Shimadzu marka DSC analiz cihazı.

5.2.5. Sertlik Ölçümü

Termoelastik martensit dönüşüm gösteren bakır bazlı alaşımlar demir bazlı alaşımlara göre daha az serttir. Bu çalışmada Cu-Al-Mn alaşımına vanadyum ve kadmiyum katkısının sertliğe etkisi incelenmiştir. Tüm ölçümlerde uygun ölçüm mekanizmasının sağlanabilmesi için 500 gramlık sabit bir yük kullanıldı. Sertlik ölçümleri Şekil 5.6'da verilen Emkotech Durascan marka cihazla yapıldı.



Şekil 5.6. Emtotest Durascan sertlik ölçüm cihazı.

6. BULGULAR

6.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analizi

900 °C de 1 saat homojenleştirilmiş olan MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarından alınan numune parçalarının mikroyapısı, atomik kompozisyonu ve yüzeyinde oluşan fazlar X-ışını kırınım cihazı ile tespit edilmiştir. XRD taramaları, 30°-75° lik açı aralığında yapılmıştır.

MV1 alaşımına ait X-ışını difraktogramı Şekil 6.1'de verilmektedir. Difraktogramdan da görüldüğü gibi yansıma veren düzlemler (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemleridir. Yansıma veren düzlemler ve bu düzlemlere ait 2θ değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Difraktogramı incelediğimizde en şiddetli yansıma veren düzlemin (0 0 22) düzlemi olduğunu ve 2θ = 42,740° de yansıma verdiği görülmektedir. Ayrıca, en zayıf yansıma veren düzlem Şekil 6.1'de görülen (2 0 2) düzlemi olup 2θ = 40,259° de yansıma vermektedir. MV1 alaşımına ait tane büyüklüğü 21,79 (nm) olarak hesaplanmıştır [1,18,19].

Tane büyüklükleri;

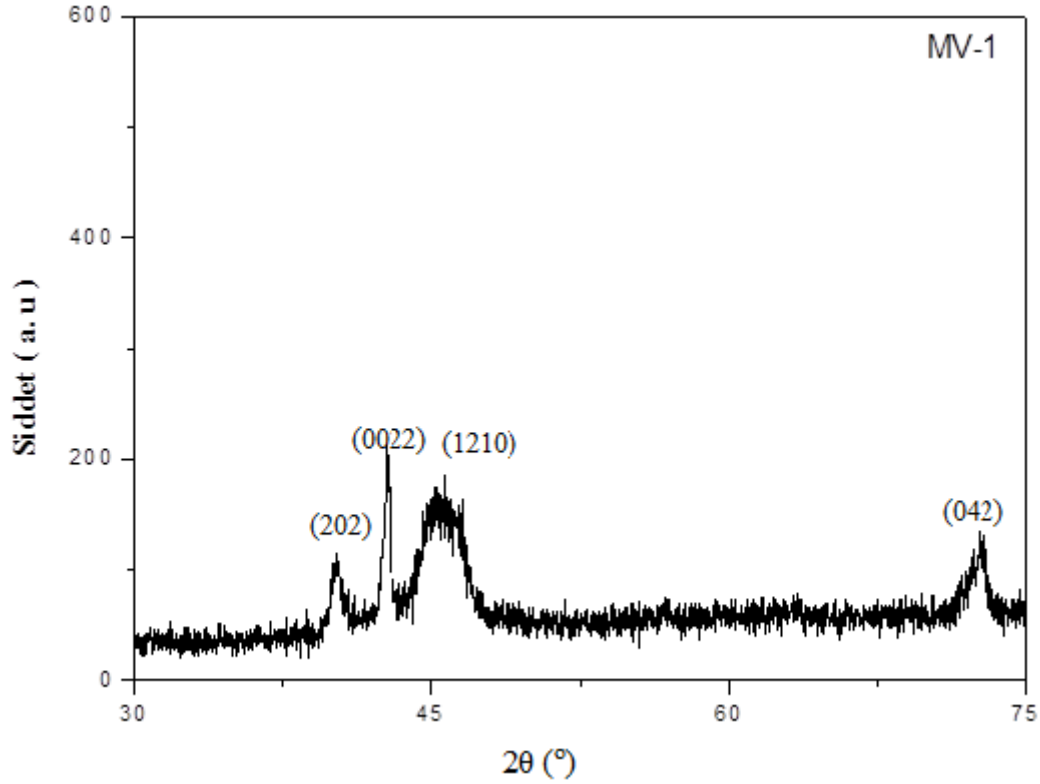
$$D=0,9.\lambda/B_{1/2}.\cos \theta$$

(6.1)

Denklemleri kullanılarak hesaplandı.

Tablo 6.1. MV1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal yapısı	2θ (°)	d(A°)	(hkl)
Ortorombik	42,740	2,1139	(0 0 22)
	45,337	1,9986	(1 2 10)
	72,895	1,2966	(0 4 2)
	40,259	2,2382	(2 0 2)

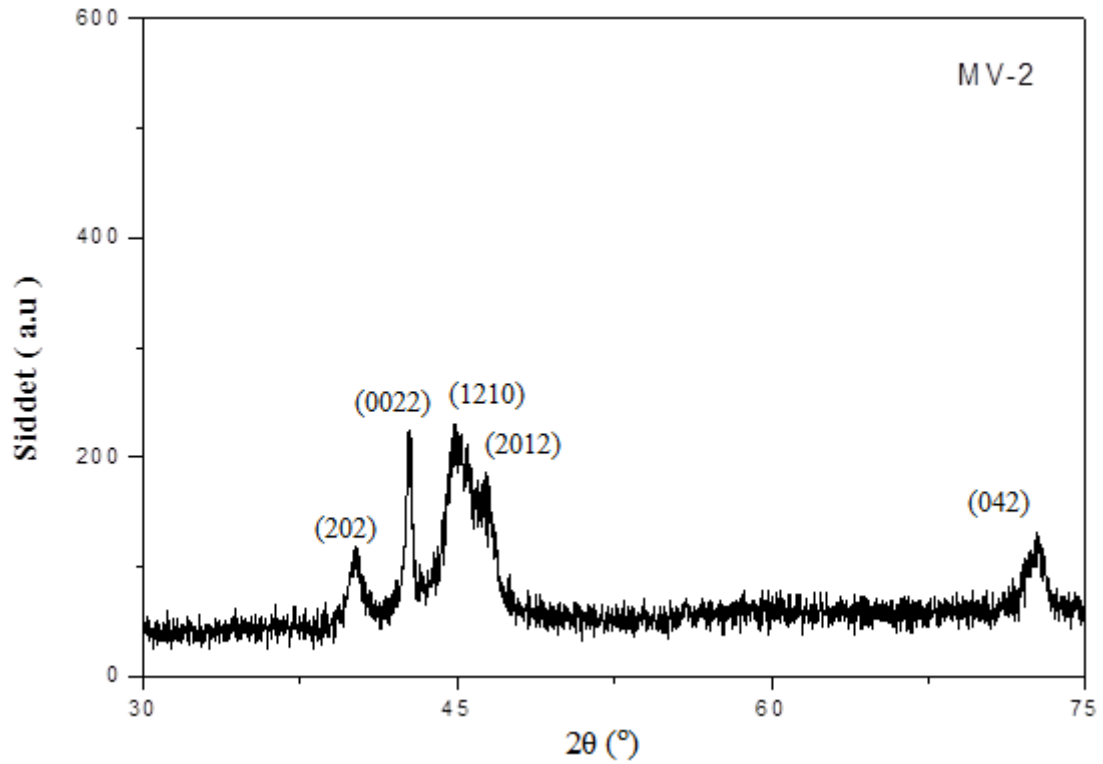


Şekil 6.1. MV1 alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

MV2 alaşımına ait X-ışını difraktogramı da Şekil 6.2'de verilmektedir. Difraktogramdan da görüldüğü gibi yansıma veren düzlemler (2 0 12), (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemleridir. Yansıma veren düzlemler ve bu düzlemlere ait 2θ değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir. En şiddetli yansıma veren düzlem (1 2 10) düzlemidir ve $2\theta=44,897^\circ$ de yansıma vermiştir. Ayrıca, en zayıf yansıma veren düzlem Şekil 6.2'de görülen (0 4 2) düzlemi olup $2\theta = 72,982^\circ$ de yansıma verdiği görülmektedir. MV2 alaşımına ait tane büyüklüğü 10,35 (nm) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.2. MV2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal yapısı	2� (�)	d(A�)	(hkl)
Ortorombik	72,982	1,2953	(0 4 2)
	46,557	1,9483	(2 0 12)
	44,897	2,0172	(1 2 10)
	42,719	2,1149	(0 0 22)
	40,137	2,2448	(2 0 2)

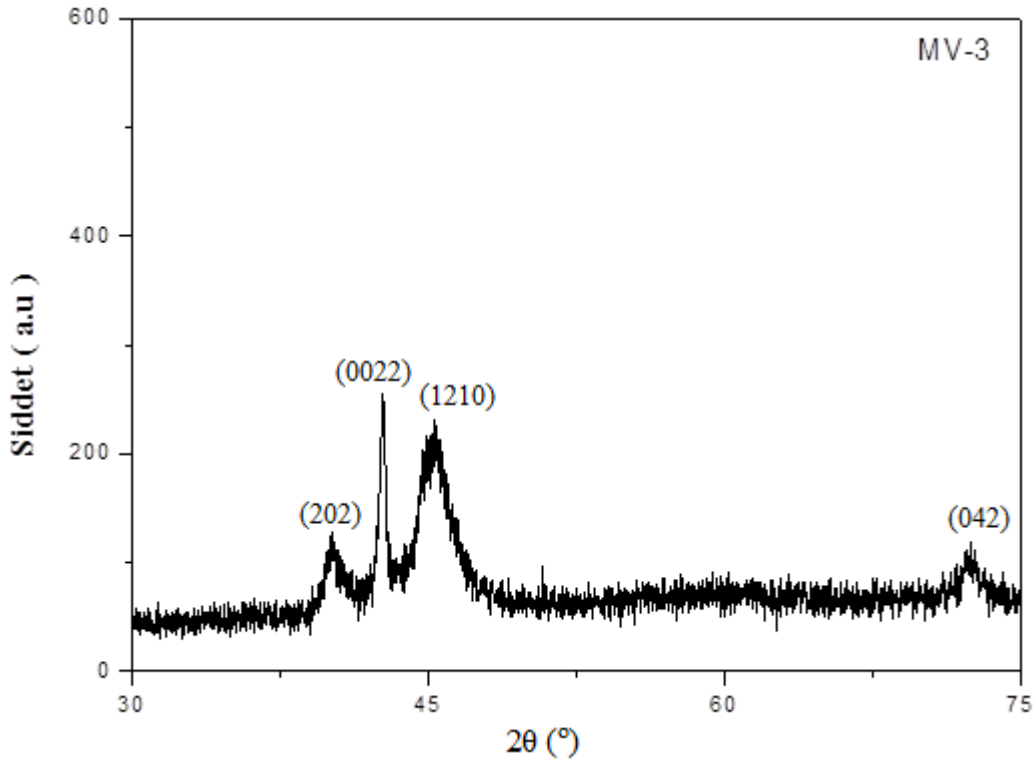


Şekil 6.2. MV2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

MV3 alaşımına ait X-ışını difraktogramı da Şekil 6.3'de verilmektedir. Yansıma veren düzlemler (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemleridir. Yansıma veren düzlemler ve bu düzlemlere ait 2  değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir. En şiddetli yansıma veren düzlem (0 0 22) düzlemidir. Ayrıca, en zayıf yansıma veren düzlem (0 4 2) düzlemidir. MV3 alaşımına ait tane büyüklüğü 8,37 (nm) olarak hesaplandı.

Tablo 6.3. MV3 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal yapısı	2 θ (°)	d(A°)	(hkl)
Ortorombik	72,297	1,3058	(0 4 2)
	45,521	1,9910	(1 2 10)
	42,661	2,1176	(0 0 22)
	40,099	2,2382	(2 0 2)

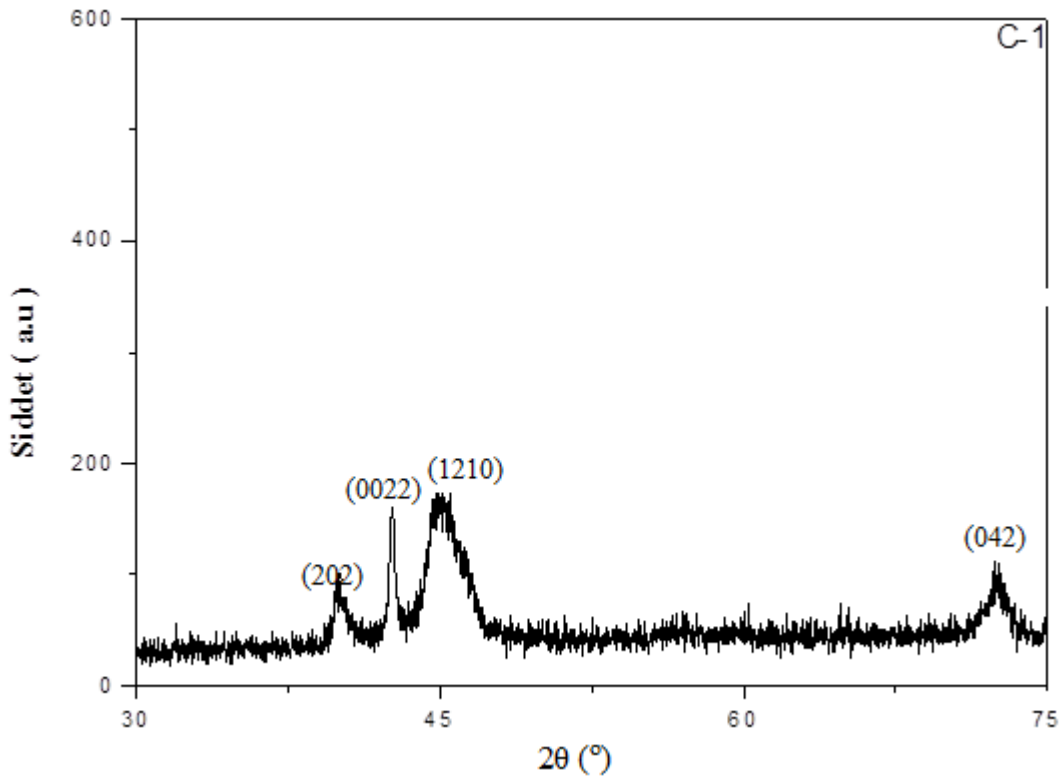


Şekil 6.3. MV3 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

C1 alaşımına ait X-ışını difraktogramı Şekil 6.4’de verilmektedir. Yansıma veren düzlemler (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemleridir. Yansıma veren düzlemler ve bu düzlemlere ait 2 θ değeri Tablo 6.4’de verilmiştir. C1 alaşımına ait tane büyüklüğü 8,26 (nm) olarak hesaplandı.

Tablo 6.4. C1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal yapısı	2θ ($^{\circ}$)	$d(\text{\AA}^{\circ})$	(hkl)
Ortorombik	72,717	1,3058	(0 4 2)
	45,201	2,0044	(1 2 10)
	42,640	2,1186	(0 0 22)
	40,060	2,2489	(2 0 2)



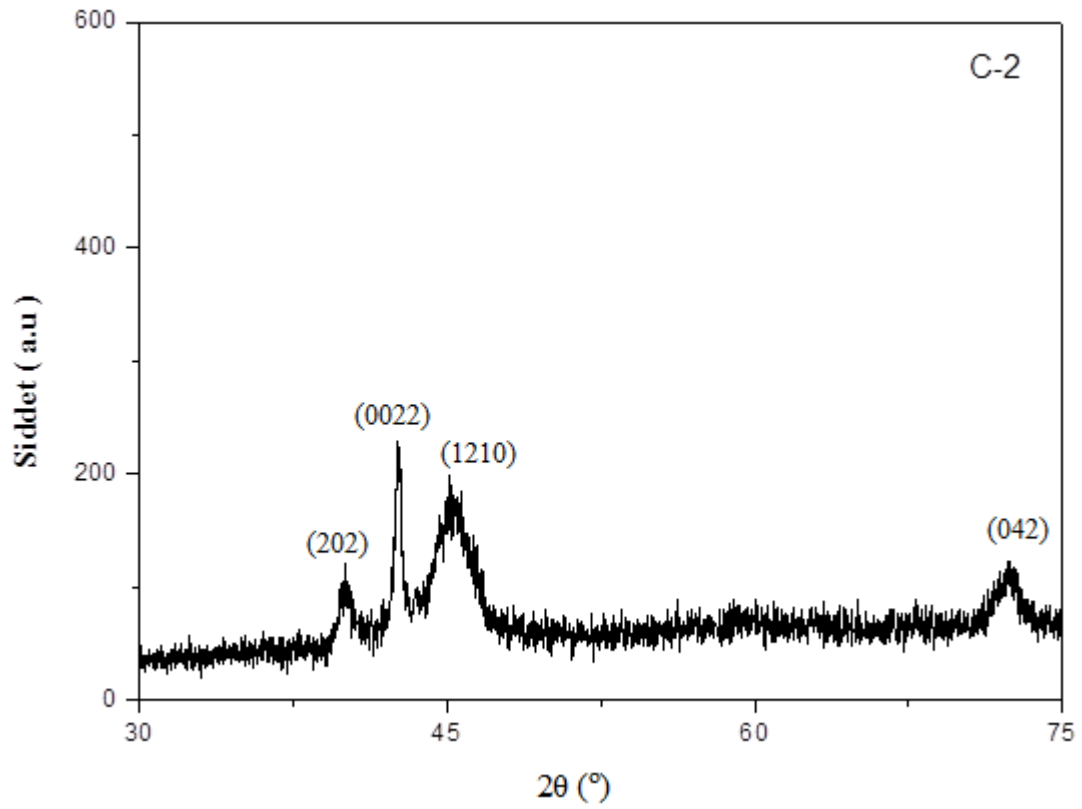
Şekil 6.4. C1 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

C2 alaşımına ait X-ışını difraktogramı da Şekil 6.5’de verilmektedir. Difraktogramdan da görüldüğü gibi yansıma veren düzlemler (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemleridir. Yansıma veren düzlemler ve bu düzlemlere ait 2θ değerleri Tablo 6.5’de verilmiştir. En şiddetli yansıma veren düzlem (0 0 22) düzlemidir ve $2\theta = 42,621^{\circ}$ de yansıma vermiştir. Ayrıca, en zayıf yansıma veren düzlem olarak Şekil 6.5’de görülen (0 4 2) düzlemi olup $2\theta = 72,297^{\circ}$ de

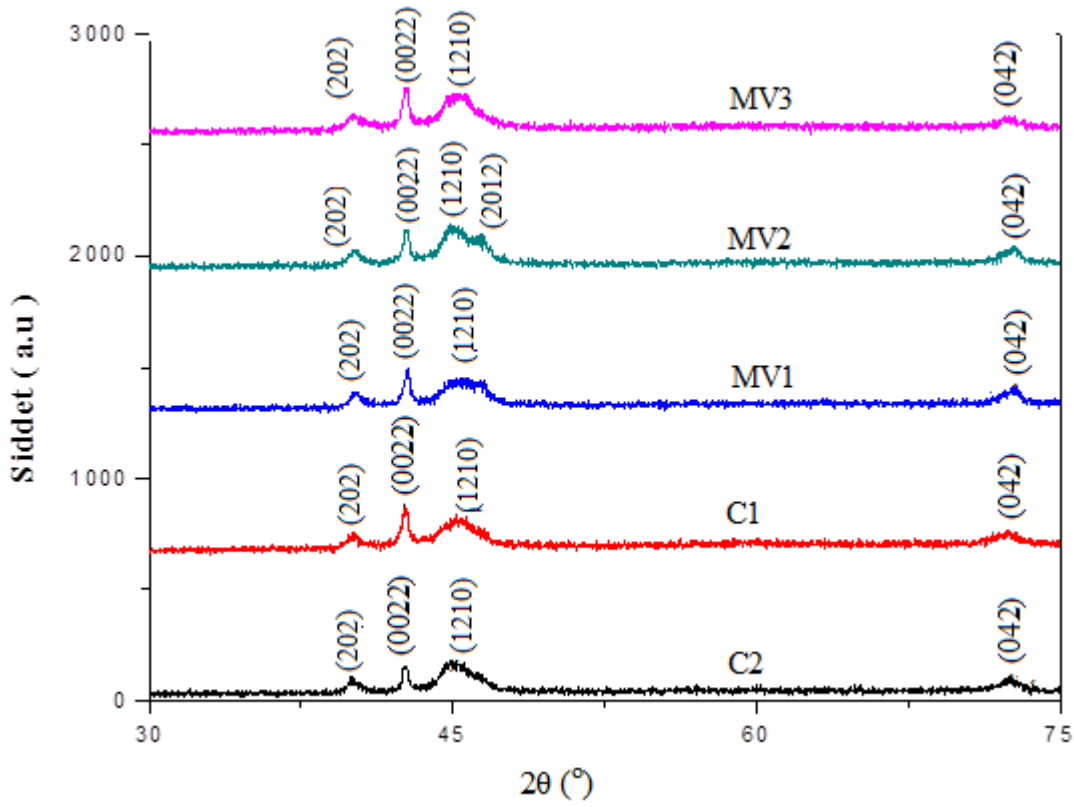
yansıma verdiği görülmektedir. C2 alaşımına ait tane büyüklüğü 22,54 (nm) olarak hesaplandı.

Tablo 6.5. C2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	72,459	1,3033	(0 4 2)
	45,344	1,9984	(1 2 10)
	42,621	2,1195	(0 0 22)
	40,001	2,2521	(2 0 2)



Şekil 6.5. C2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.



Şekil 6.6. MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarına ait X-ışını difraktogramları.

MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarının X-ışını difraktogramlarını değerlendirdiğimizde en şiddetli pikin (1 2 10) düzlemine ait olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarının yapılarında (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemlerine ait pikler de mevcuttur. MV2 alaşımının X-ışını difraktogramını incelediğimizde (2 0 12) düzlemine ait bir pikin daha var olduğu görülmektedir. MV1 üçlü alaşımına vanadyum ilavesi yaparak elde ettiğimiz MV2 ve MV3 dörtlü alaşımlarını incelediğimizde;

Alaşımlara vanadyum ilavesi yapıldığında, piklerin daha belirgin hale gelip şiddetin arttığı (Şekil 6.1, 6.2, 6.3) görülmektedir. MV3 alaşımına, MV2 alaşımına kıyasla; Mn miktarını azaltıp vanadyum miktarını artırdığımızda pik şiddetlerinin daha da arttığını söyleyebiliriz.

MV1 üçlü alaşımına kadmiyum ilavesi yaparak elde ettiğimiz C1 ve C2 dörtlü alaşımların X-ışını difraktogramlarını değerlendirdiğimizde, bu alaşımlarda en şiddetli pikin (1 2 10) düzlemine ait olduğu görülmektedir. Aynı zamanda (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) düzlemlerine ait pikler de mevcuttur. MV1 üçlü alaşımına kadmiyum ilavesi yapıldığında (1 2 10) düzlemine ait pikin şiddet değerinin düştüğü görülmektedir. C2 alaşımında C1 alaşımına kıyasla kadmiyum miktarını artırdığımızda piklerin şiddetlerinin

azaldığını söyleyebiliriz [15,19,20]. Tüm alaşımlara ait X-ışını difraktogramları Şekil 6.6’ da görülmektedir. MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarına ait tane büyüklüklerini karşılaştırdığımızda, MV1 üçlü alaşımına vanadyum katkılanırıldığında tane boyutunun küçüldüğü görüldü. MV3 alaşımında MV2 alaşımına oranla vanadyum miktarı biraz daha artırıldığında tane boyutunun MV2 alaşımına kıyasla biraz daha küçüldüğü görüldü. MV1 üçlü alaşımına kadmiyum katkılanırıldığında, kadmiyum miktarına bağlı olarak tane büyüklüğünün küçüldüğü görüldü.

6.2. Metalografik Gözlemler

Çalışmalarda kullanılan MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarından alınan numuneler parlatılıp optik mikroskopla yüzey mikrografları çekildi. Bu optik mikrograflar her bir alaşım için farklı bölgelerden çekilerek gözlemlendi.

6.2.1. Cu-Al-Mn Alaşımının Metalografik Gözlemleri

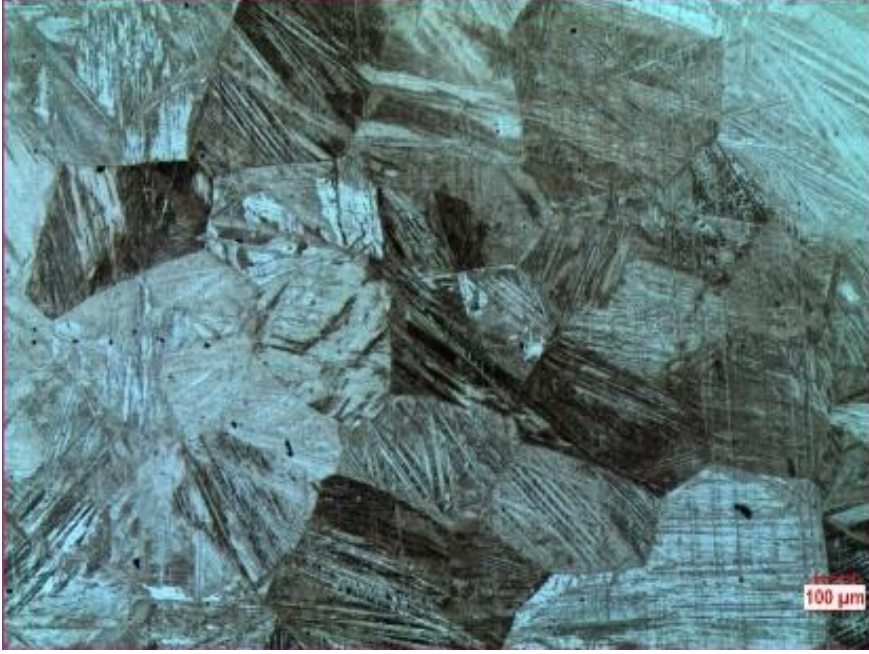
Şekil 6.7.a ve b’de MV1 alaşımına ait farklı bölgelerden çekilen optik mikrograflar görülmektedir. Optik mikrografları incelediğimizde taneler ve tane sınırları açık bir şekilde görülmektedir. MV1 alaşımına ait mikrografta tanelerin boyutlarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Farklı tanelerde farklı yönelimlere sahip martensit plakalar mevcuttur. Bu martensitlerin bazıları V-tipi bazıları ise iğne tipi martensitlerdir [1,16,18].

6.2.2. Cu-Al-Mn-V Alaşımının Metalografik Gözlemleri

Farklı bölgelerden alınan MV2 alaşımına ait optik mikrograflar. Şekil 6.8.a ve b’de verilmiştir. Farklı tanelerde oluşan martensit plakaların şekli ve tane büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı olduğu optik mikrograflardan görülmektedir. Bu tanelerde iç içe girmiş V-tipi martensit ile, aynı tane içerisinde biri birine ters yönelimde olan V-tipi martensit plakaların olduğu görülmektedir. Farklı tanelerde iğne tipi martensitlerin olduğu da gözlenmektedir.

MV3 alaşımının farklı bölgelerden alınan optik mikrografları Şekil 6.9.a ve b’de görülmektedir. Alaşımın yapısındaki taneler ve tane sınırları net bir şekilde görülmektedir.

Martensit tanelerde V-tipi ve iğne şekilli martensitler mevcuttur. Yine yapıda bulunan her tanenin boyutu bir diğerinden farklıdır ve de taneler kendi içinde farklı yönelimlere sahiptir.

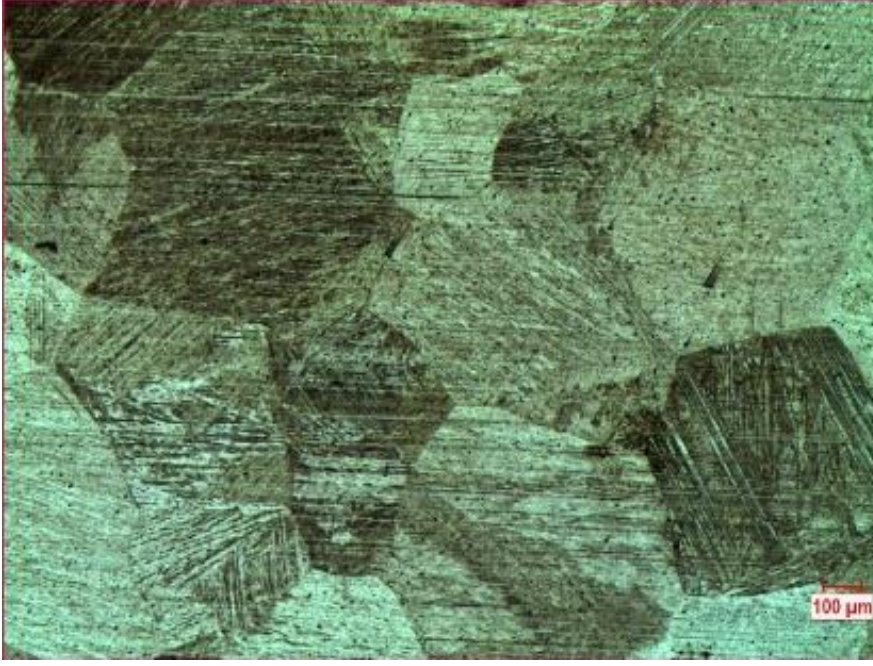


(a)



(b)

Şekil 6.7. MV1 alaşımasının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.

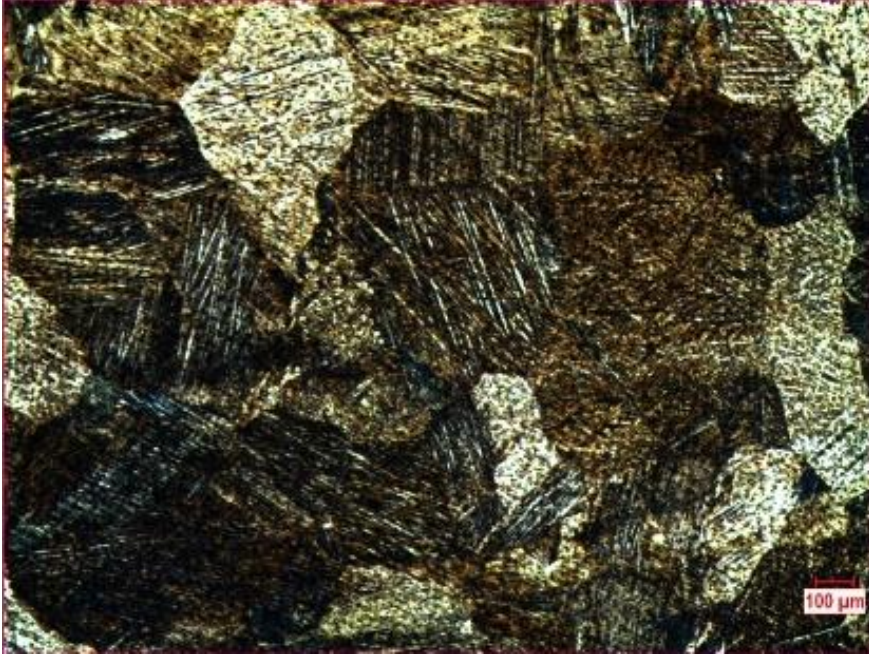


(a)

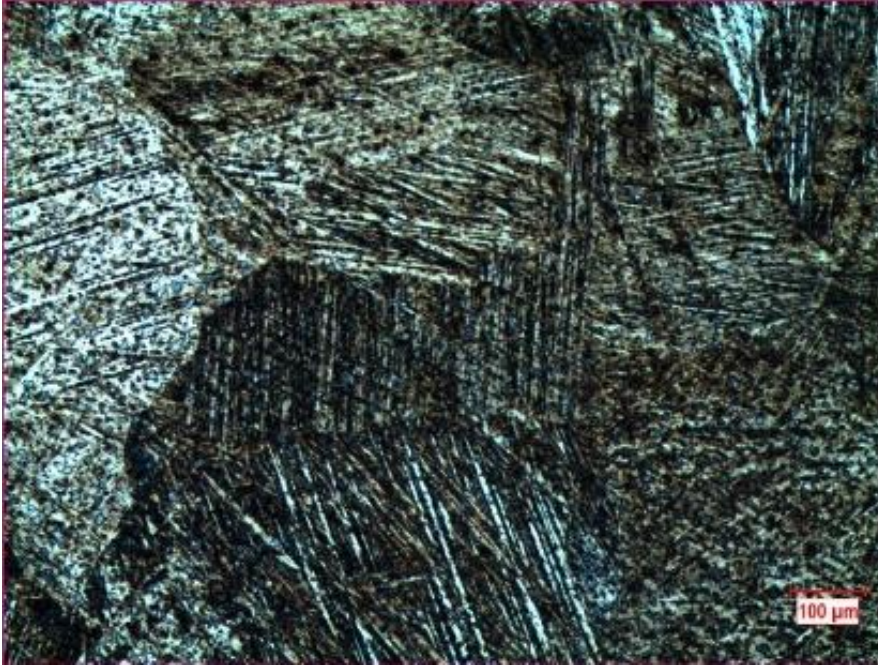


(b)

Şekil 6.8. MV2 alaşıımının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.



(a)



(b)

Şekil 6.9. MV3 alaşımasının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.

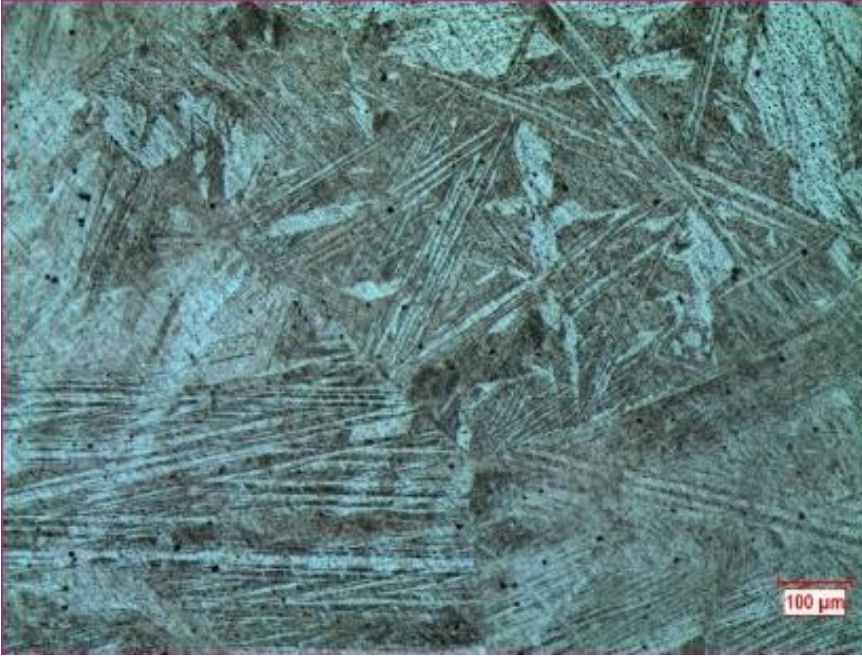
6.2.3. Cu-Al-Mn-Cd Alaşımının Metalografik Gözlemleri

C1 alaşımının farklı bölgelerinden çekilen optik mikrografları Şekil 6.10. a ve b’de görülmektedir. Alaşım martensit yapıya sahiptir. Alaşımın yapısındaki taneler ve tane sınırları net bir Şekilde görülmektedir. Alaşımda V-tipi martensitler gözlenmiştir. Yine yapıda bulunan her tanenin boyutu bir diğ erinden farklıdır ve de taneler kendi içinde farklı yönelimlere sahiptir. Alaşımda aynı tane içerisinde biri birine ters yönelimli V-tipi martensit yapılarda görülmektedir.

Farklı bölgelerden alınan C2 alaşımına ait optik mikrograflar. Şekil 6.11. a ve b’de verilmiştir. Farklı tanelerde oluşan martensit plakaların Şekli ve tane büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı olduğu optik mikrograflardan görülmektedir. Ayrıca bazı tanelerde V-tipi martensit oluşurken bazılarının da ise iğne tipi martensitler meydana gelmiştir [15, 16, 21, 24].

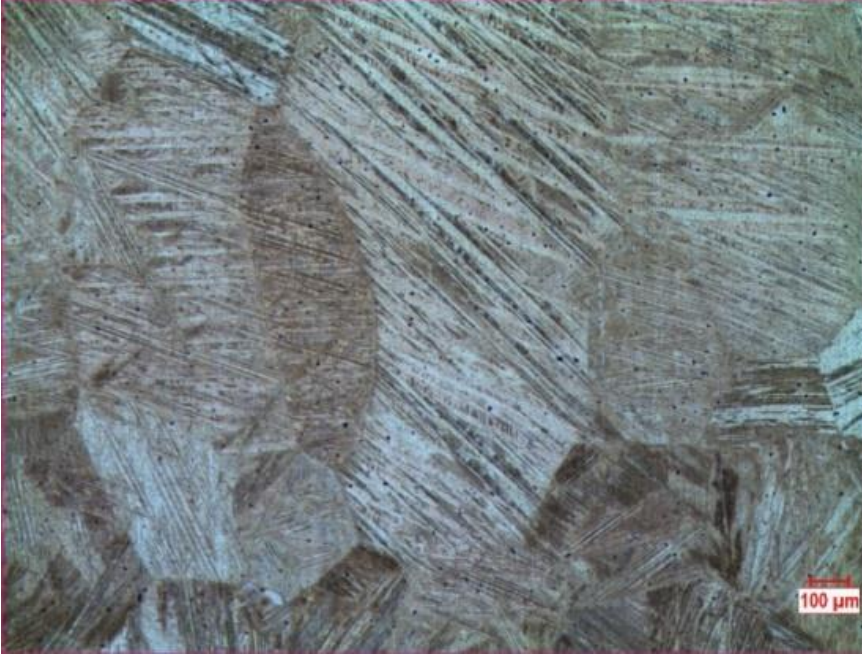


(a)



(b)

Şekil 6.10. C1 alaşımasının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları.



(a)



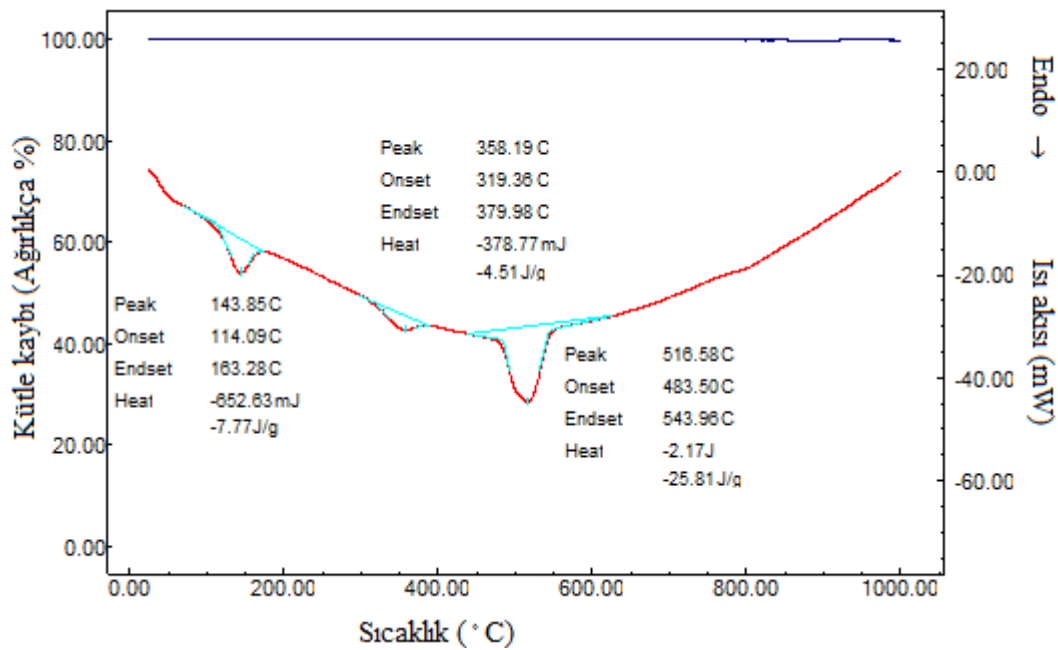
(b)

Şekil 6.11. C2 alaşımlarının farklı bölgelerden çekilen yüzey mikrografları .

6.3. Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) Sonuçları

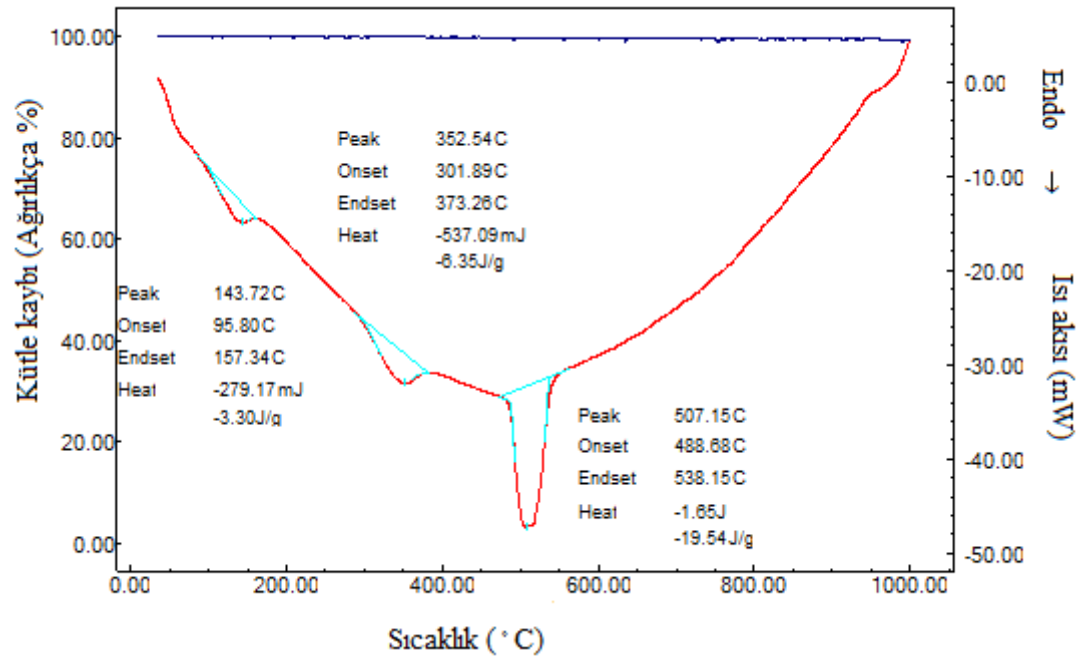
MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarının her birinde sıcaklık etkisi ile meydana gelebilecek yapısal değişimler diferansiyel termal analiz ölçümlerinde incelendi. Numuneler argon gazı atmosferi altında 20 °C/dakikalık ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 1000 °C' ye kadar ısıtıldı. Elde edilen DTA eğrilerinden alaşımların faz geçişleri belirlendi. Cu-Al-Mn alaşımları β fazdan soğutulduğunda bu alaşımlar katıhal durumunda birçok düzenli reaksiyon geçirir. Bunlar; β (A2)→ β 2 (B2)→ β 1 (DO₃/L2₁) dir.

MV1 alaşımına ait elde edilen verilere baktığımızda, MV1 alaşımının yüksek sıcaklıkta A2 fazına dönüşüm sergilediği görülmektedir (Şekil 6.12). MV1 alaşımının yapısında 550 °C civarında A2→B2 faz geçişi meydana gelmektedir. β 1→M18R, 9R, 2H dönüşümü ise 140 °C civarında görülmektedir [1, 15, 18].



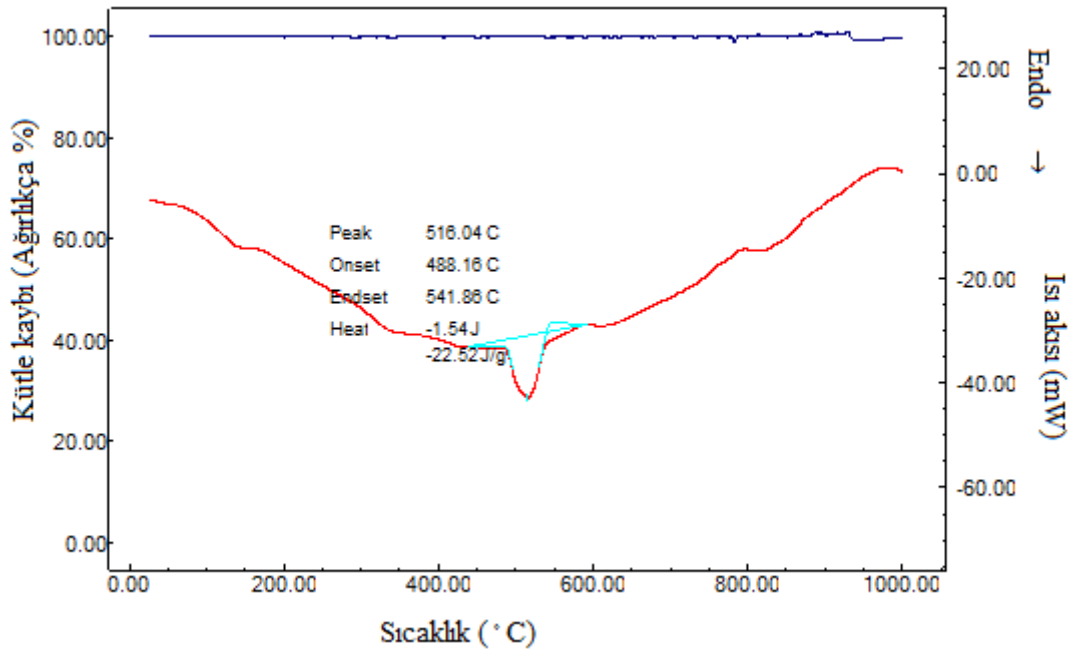
Şekil 6.12. MV1 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.

MV2 alaşımına ait elde edilen DTA eğrisini incelediğimizde, MV2 alaşımının yüksek sıcaklıkta A2 fazına dönüşüm sergilediği görülmektedir (Şekil 6.13). MV2 alaşımı 350 °C civarında β 2→ β 1 faz geçişi meydana gelmektedir. β 1→M18R, 9R, 2H dönüşümü ise 140 °C civarında görülmektedir. MV1 üçlü alaşımına dördüncü element olarak katılan vanadyumun katılmasıyla elde edilen MV2 alaşımındaki ötektoid nokta sıcaklığının ve bozulma sıcaklığının değiştiği görülmektedir [1,15,18,23].



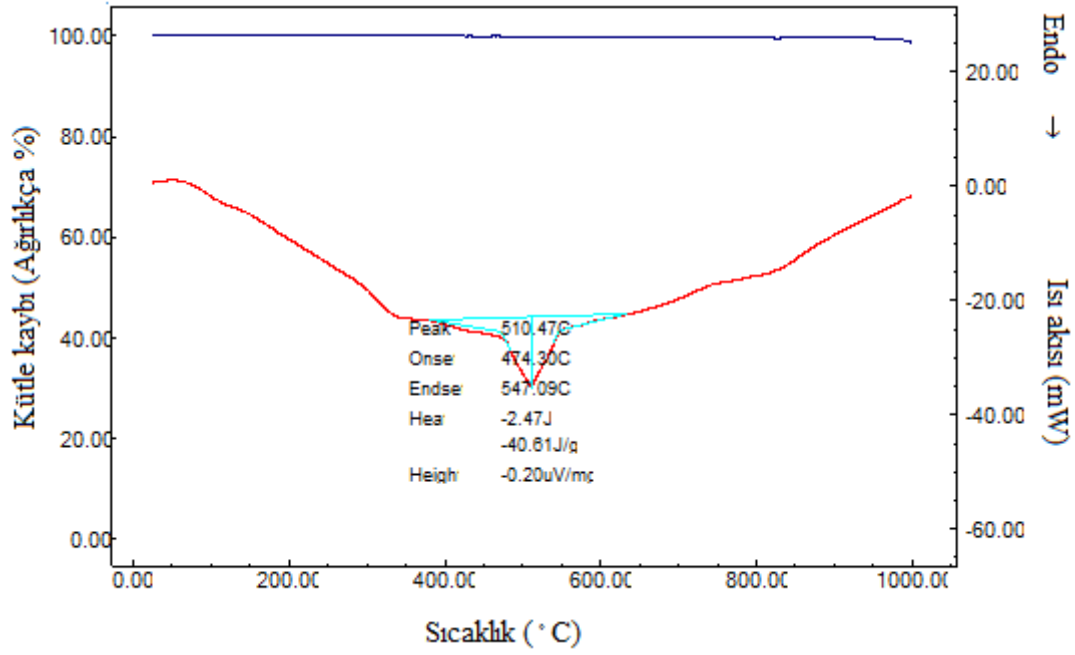
Şekil 6.13. MV2 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.

MV1 alaşımına farklı oranda vanadyum katkılayarak elde ettiğimiz MV3 alaşımına ait elde edilen DTA eğrisi (Şekil 6.14) görülmektedir. MV3 alaşımında A2→(fcc) faz geçişi belirlenmiştir.



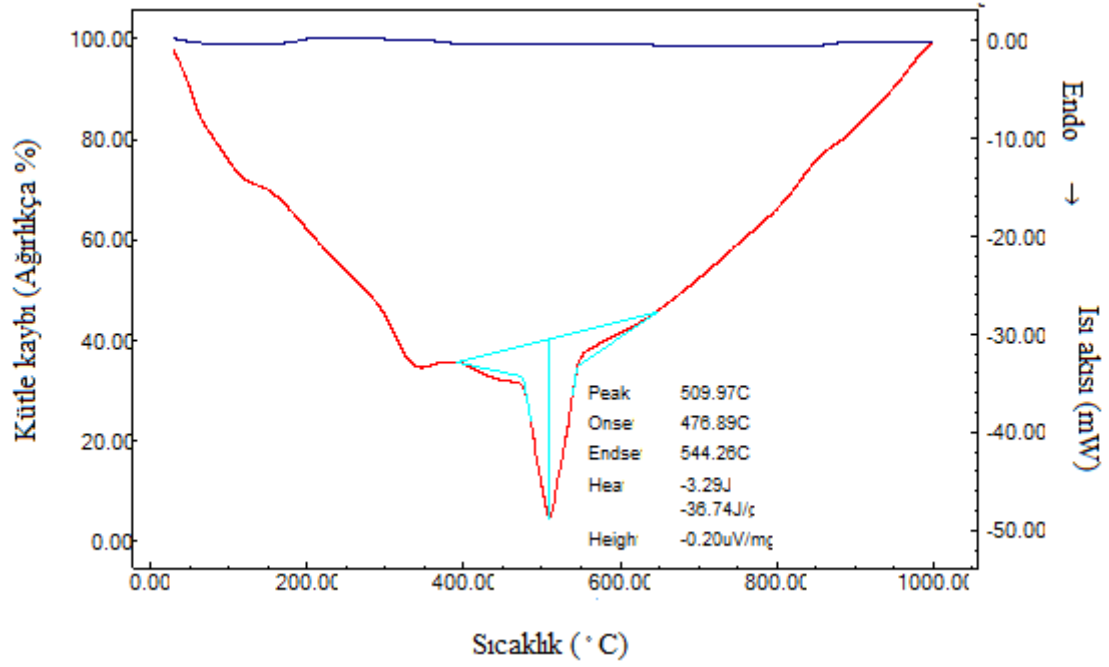
Şekil 6.14. MV3 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.

CuAlMn alaşımına kadminyum katkılayarak elde ettiğimiz CuAlMnCd (C1) alaşımına ait elde edilen DTA eğrisi şekil 6.15’de görülmektedir. C1 alaşımının yapısında 550  C civarında A2 B2 faz geçişi meydana gelmektedir. C1 alaşımında A2 (fcc) faz geçişi belirlenmiştir.



şekil 6.15. C1 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.

CuAlMn alaşımına farklı oranda kadmiyum katkılayarak elde ettiğimiz C2 alaşımına ait DTA eğrisi şekil 6.16'da görülmektedir. C2 alaşımında A2→(fcc) faz geçişi belirlenmiştir [23, 24,28].



şekil 6.16. C2 alaşımına ait TG/DTA eğrisi.

6.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Sonuçları

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının martensit-austenit dönüşüm sıcaklıkları olan M_s ve A_s 'nin belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) tekniği kullanıldı. Isıtma sırasında endotermik reaksiyon meydana gelir ve martensit→austenit dönüşüm gerçekleşir. Soğutma sırasında ise egzotermik reaksiyon meydana gelir. Burada ise austenit→martensit ters dönüşümü gerçekleşir. Alaşımların dönüşüm sıcaklıkları alaşımların içeriğindeki elementlere ve bu elementlerin % ağırlık oranına göre değişim gösterir. Bu çalışmada Cu-Al-Mn üçlü alaşımına eklenen dördüncü bir katkı elementinin dönüşüm sıcaklıklarını nasıl etkilediği ve farklı ısıtma-soğutma hızlarının dönüşüm sıcaklıklarını nasıl etkilediği incelendi [18,21,25]. Bunun yanı sıra;

$$T_o = (M_s + A_f) / 2 \quad (6.2)$$

denklemini kullanarak denge sıcaklığı (T_o) değeri [10],

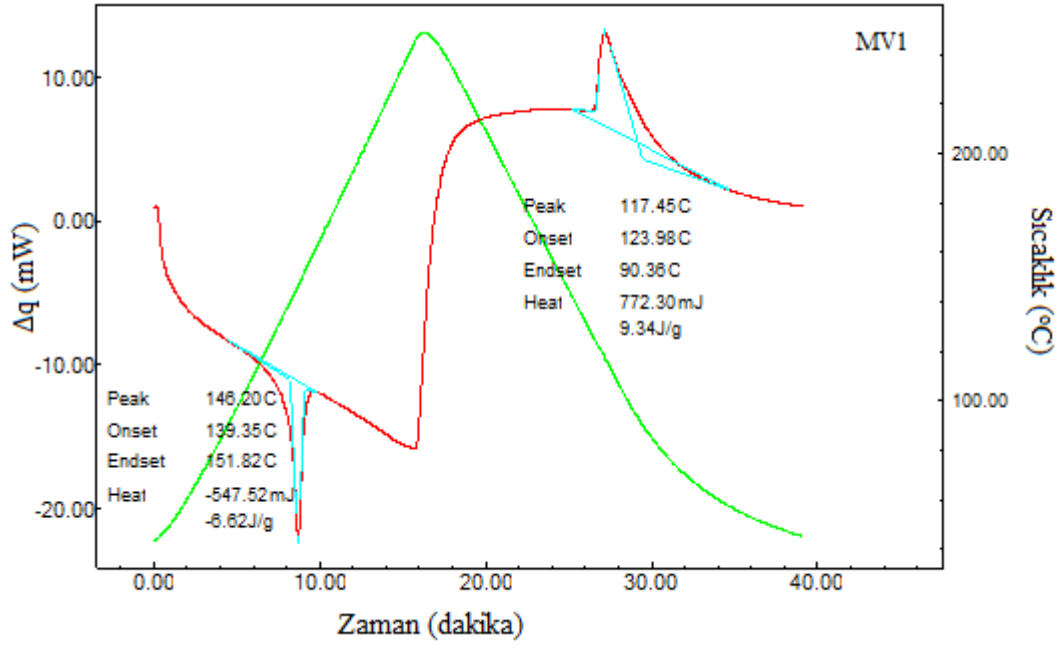
$$\Delta S = \Delta H / T_o \quad (6.3)$$

denklemini kullanarak entropi (ΔS) değeri hesaplandı.

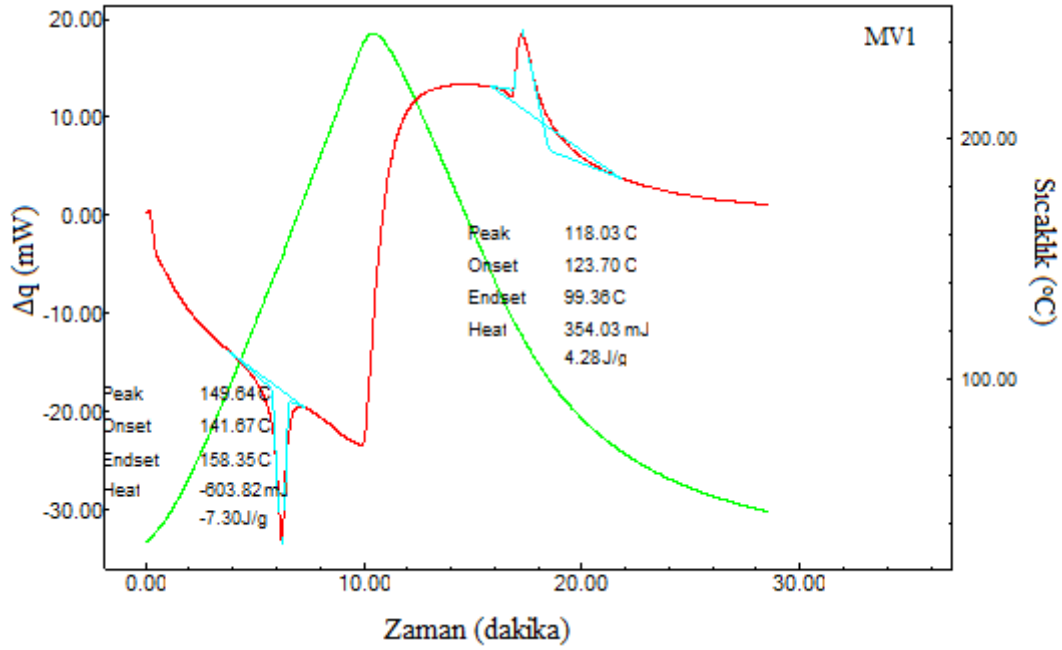
6.4.1. Cu-Al-Mn (MV1) Alaşımı

Cu-Al-Mn (MV1) alaşımlarına ait farklı ısıtma hızlarında (15, 25, 35 ve 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri sırasıyla Şekil 6.15 - 6.19'da görülmektedir. Bu eğrilerden elde edilen dönüşüm sıcaklıkları, entalpi, denge sıcaklığı ve entropi değerleri Tablo 6.6'da verilmiştir.

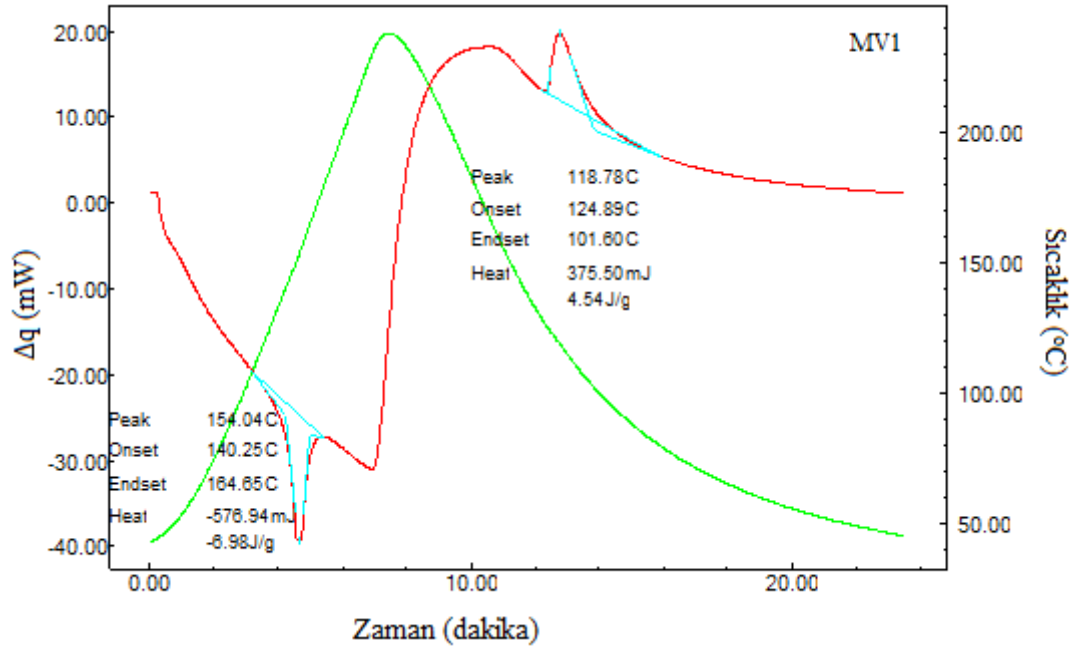
MV1 alaşımı için 15 °C/ dakika ısıtma hızında elde edilen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 139,35 - 151,82 °C dir. Bu alaşımın 25 °C/ dakika ısıtma hızında belirlenen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları ise sırası ile 141,67 - 158,35 °C dir. Farklı ısıtma hızları için belirlenen dönüşüm sıcaklıkları Tablo 6.6'da görülmektedir. Bu sonuçları karşılaştırdığımızda ısıtma hızının artmasıyla austenit dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği görülmektedir. Aynı değerlendirmeyi martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları için yaptığımızda yine ısıtma hızının artmasıyla bu sıcaklıkların da değişim gösterdiği görülmektedir. MV1 alaşımına ait entalpi ve entropi değerlerini incelediğimizde bu değerlerin ısıtma hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir [27,30,31].



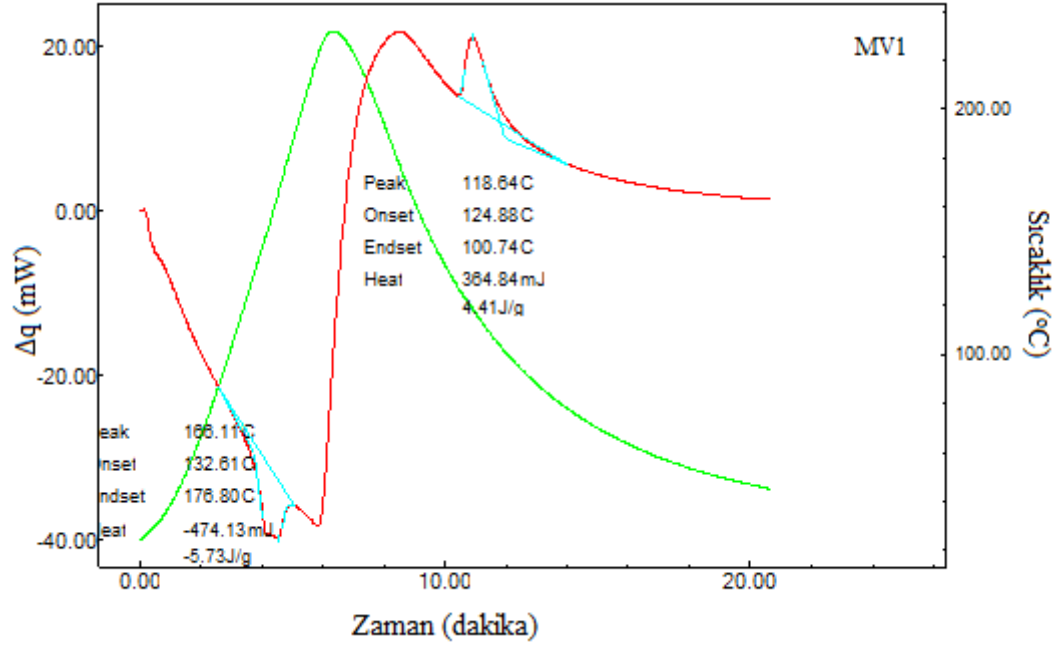
Şekil 6.17. MV1 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



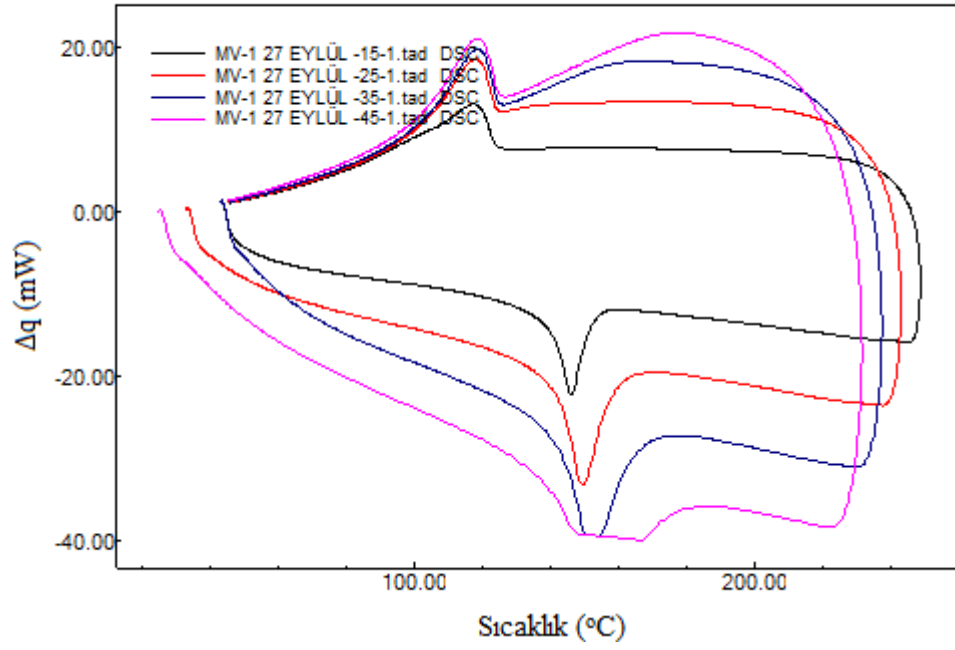
Şekil 6.18. MV1 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.19. MV1 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.20. MV1 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



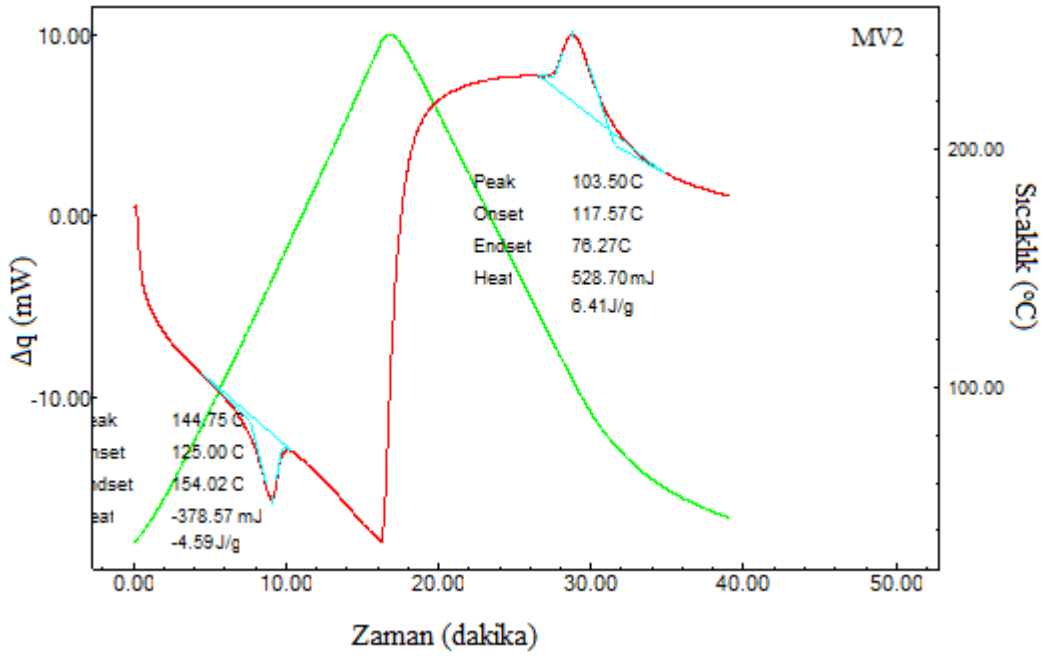
Şekil 6.21. MV1 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 6.6. MV1 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

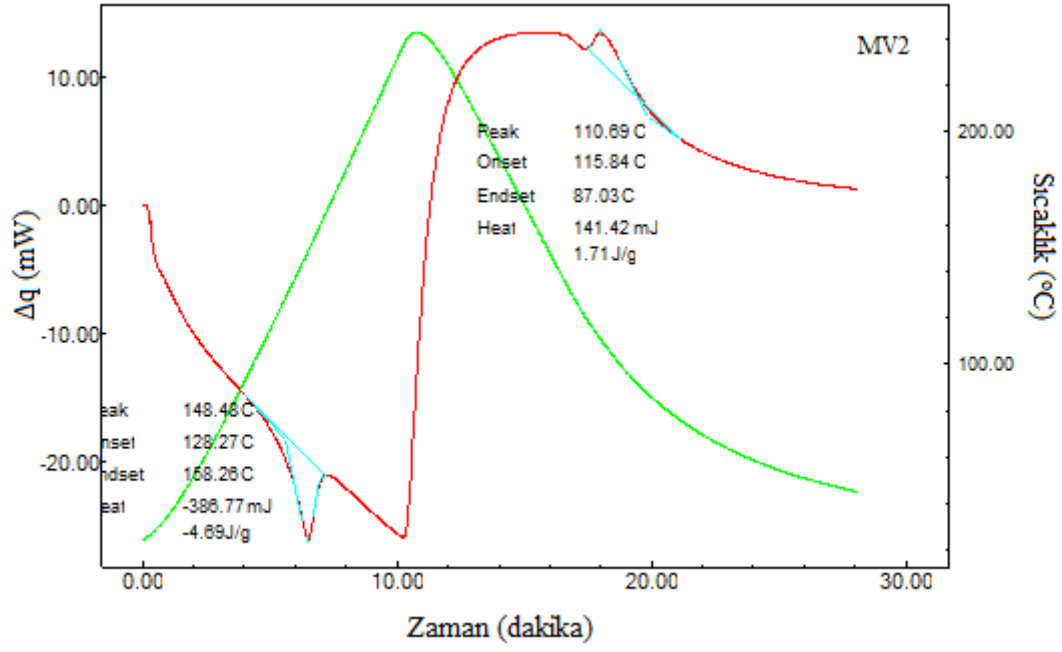
Isıtma Hızı (°C/dak.)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_o (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
15	139,35	151,82	146,20	137,9	123,98	90,36	-6,62	-0,048	9,34	0,067
25	141,67	158,35	149,64	141,02	123,70	99,36	-7,30	-0,052	4,28	0,030
35	140,25	164,65	154,04	144,77	124,89	101,60	-6,98	-0,048	4,54	0,031
45	132,61	176,80	166,11	150,84	124,88	100,74	-5,73	-0,037	4,41	0,029

6.4.2. Cu-Al-Mn-V (MV2) Alaşımı

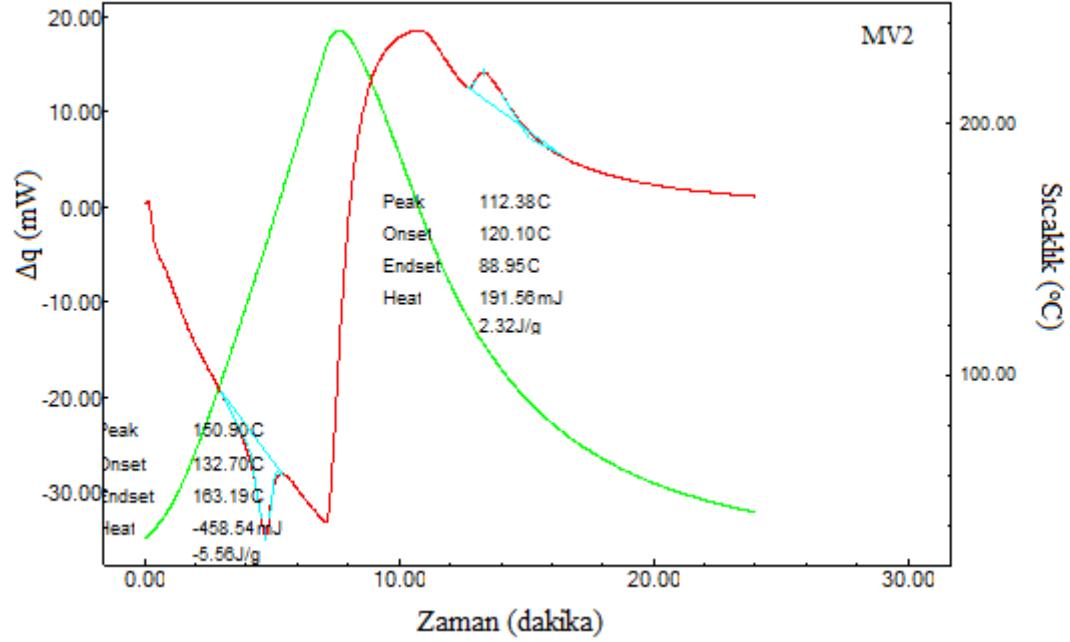
Cu-Al-Mn-V (MV2) alaşımlarına ait farklı ısıtma hızlarında (15, 25, 35 ve 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri sırasıyla Şekil 6.22 - 6.26'de görölmektedir. MV2 (Cu-Al-Mn-V) alaşımı için 15°C /dakika ısıtma hızında elde edilen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 125,00 - 154,02 °C dir. Bu alaşımın 25 °C/ dakika ısıtma hızında belirlenen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları ise 128,27 - 158,26 °C dir. Tablo 6.7'de farklı ısıtma hızlarında belirlenen dönüşüm sıcaklıkları mevcuttur. Isıtma hızındaki değişimle birlikte martensit dönüşüm sıcaklıkları, entalpi ve entropi değerleri de değişmektedir.



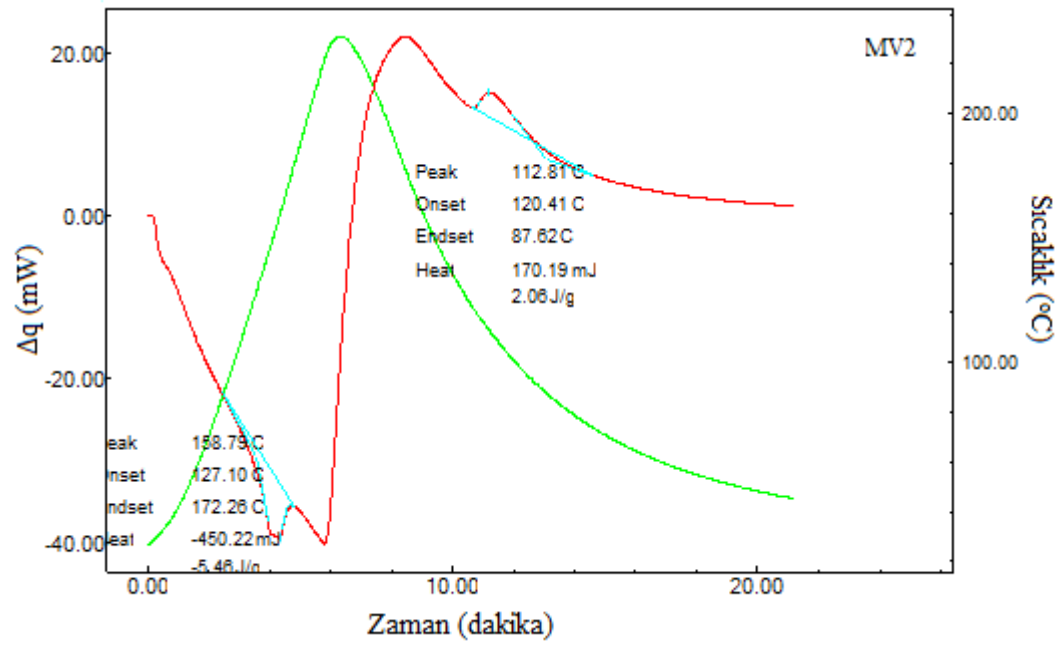
Şekil 6.22. MV2 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



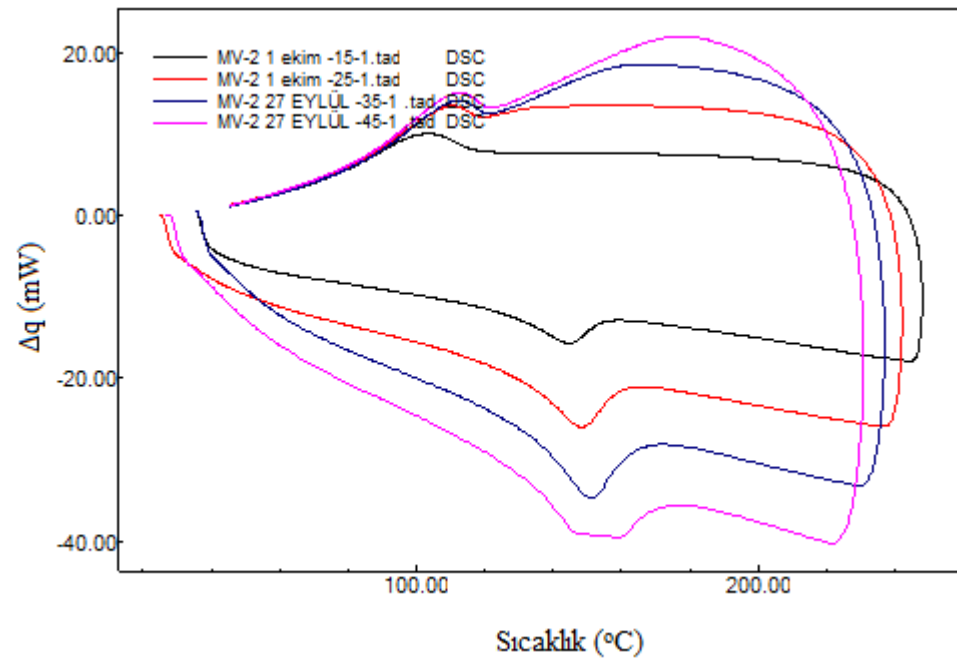
Şekil 6.23. MV2 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.24. MV2 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.25. MV2 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



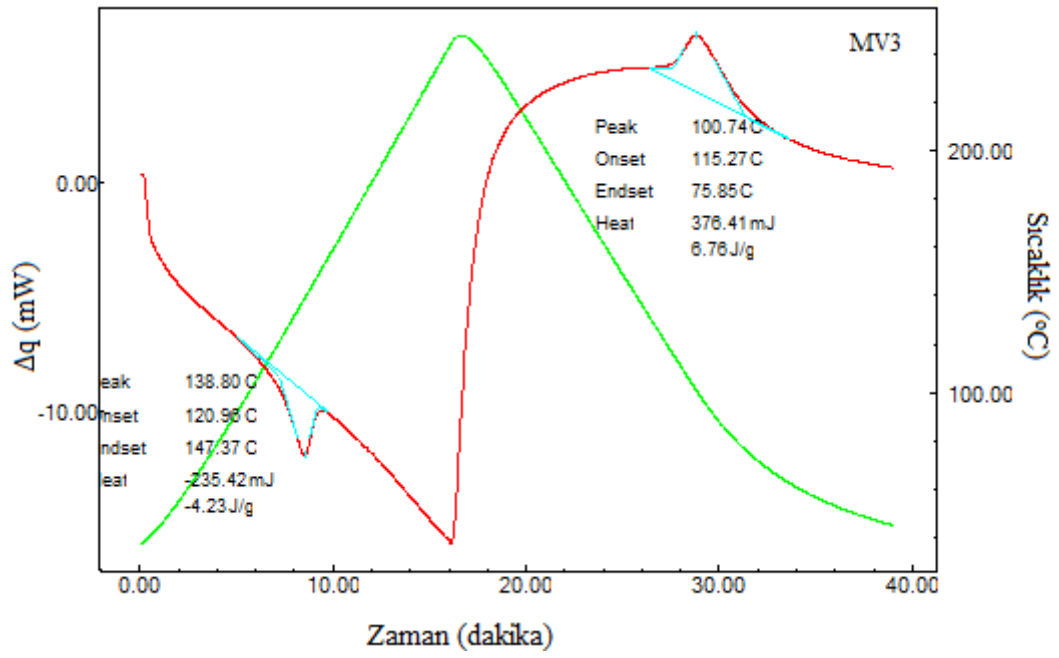
Şekil 6.26. MV2 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 6.7. MV2 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

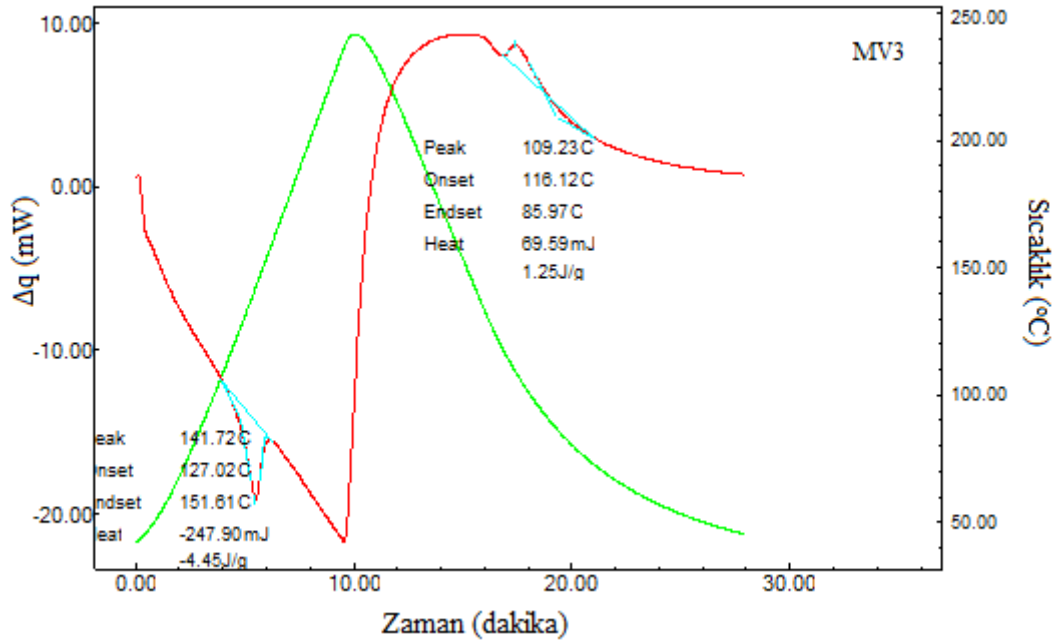
Isıtma Hızı (°C/dak.)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_o (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
15	125,00	154,02	144,75	135,78	117,54	76,27	-6,41	-0,047	4,59	0,033
25	128,27	158,26	148,48	137,05	115,84	87,03	-4,69	-0,034	1,71	0,012
35	132,70	163,19	150,90	141,64	120,10	88,95	-5,56	-0,039	2,32	0,032
45	127,10	172,26	158,79	146,33	120,41	87,62	-5,46	-0,037	2,06	0,014

6.4.3. Cu-Al-Mn-V (MV3) Alaşımı

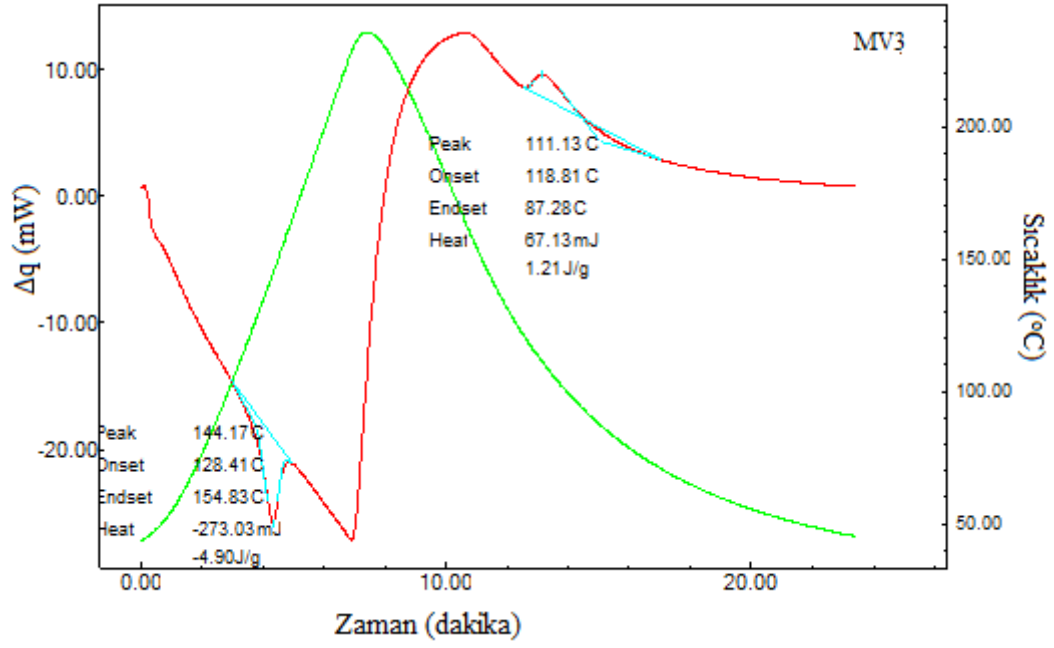
Cu-Al-Mn-V (MV3) alaşımlarına ait farklı ısıtma hızlarında (15, 25, 35 ve 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri sırasıyla şekil 6.27 - 6.31’de görülmektedir. MV3 alaşımı için 15 °C/ dakika ısıtma hızında elde edilen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 120,96 - 147,37 °C’dir. Bu alaşımın 25 °C/ dakika ısıtma hızında belirlenen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları ise sırası ile 127,02 - 151,61 °C dir. Farklı ısıtma hızları için belirlenen dönüşüm sıcaklıkları Tablo 6.8’de görülmektedir. Bu sonuçları karşılaştırdığımızda ısıtma hızının artmasıyla austenit dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği görülmektedir. Martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları da ısıtma hızının artmasıyla değişim göstermektedir. MV3 alaşımına ait entalpi ve entropi değerlerini incelediğimizde bu değerlerin ısıtma hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir [15,27,28,30].



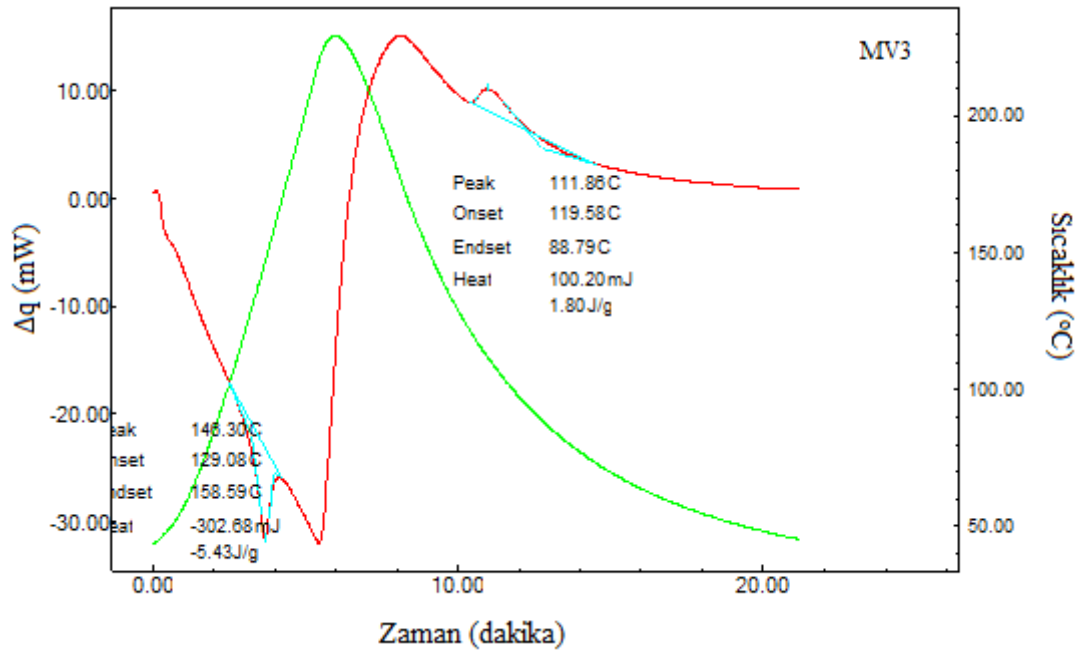
Şekil 6.27. MV3 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



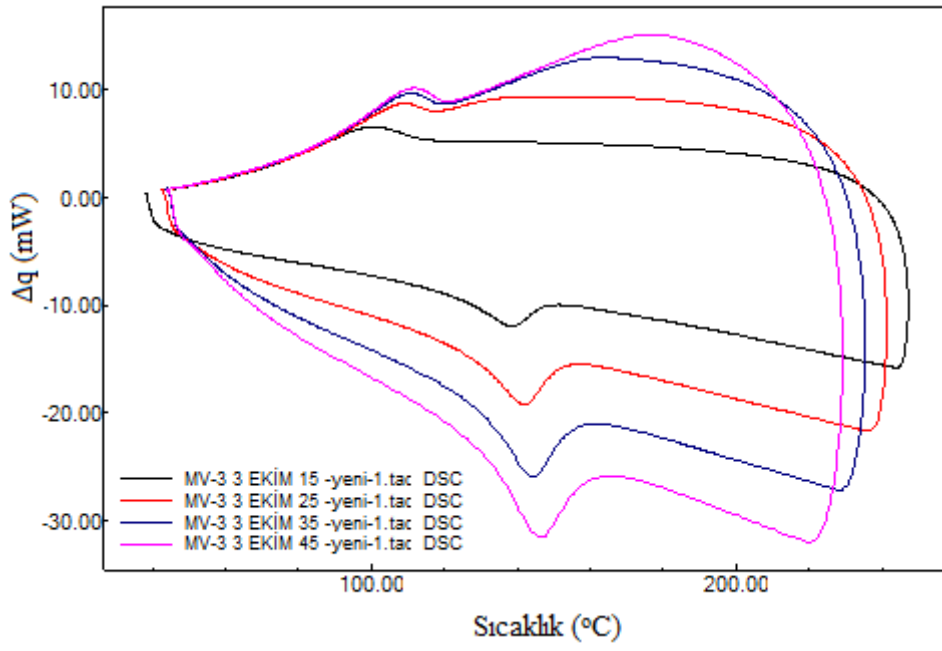
Şekil 6.28. MV3 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.29. MV3 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.30. MV3 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



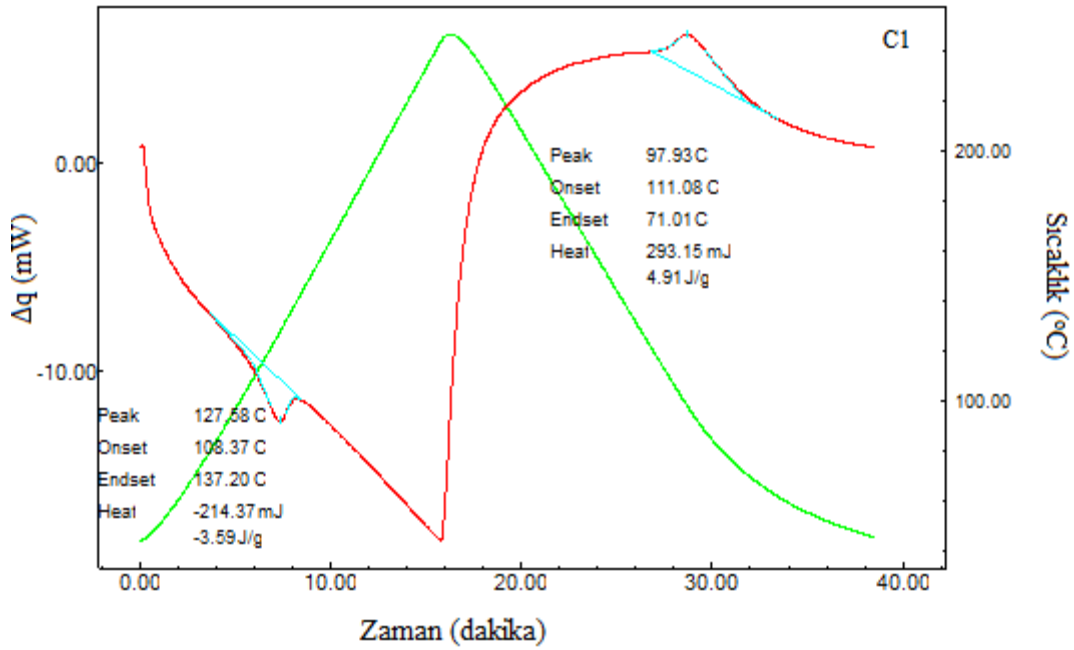
Şekil 6.31. MV3 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 6.8. MV3 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

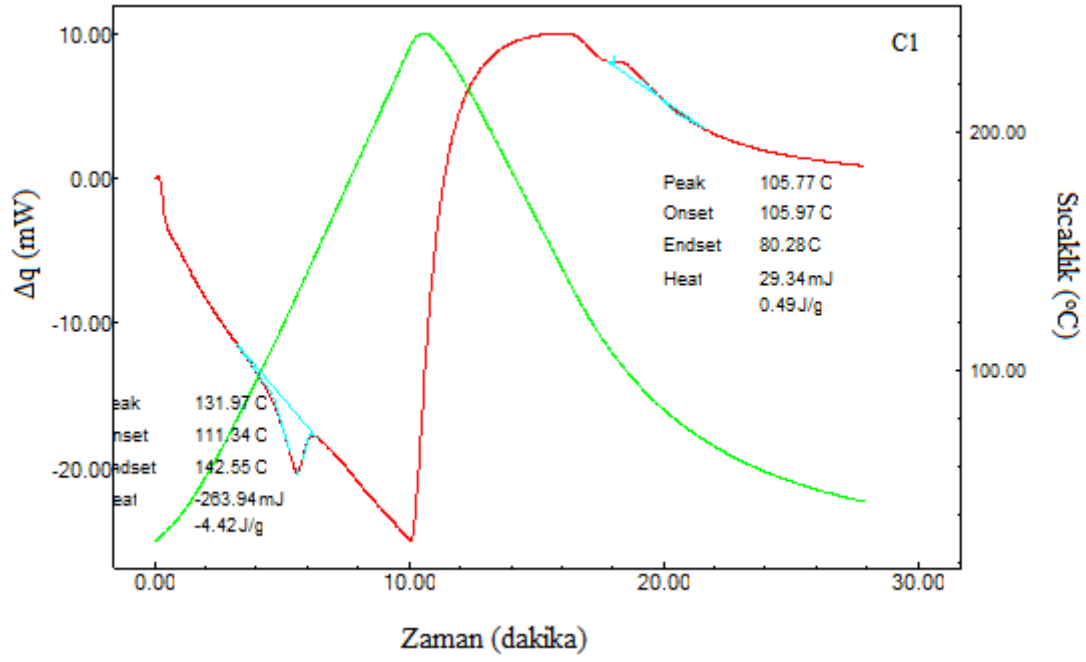
Isıtma Hızı (°C/dak.)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_o (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
15	120,96	147,37	138,80	131,32	115,27	75,85	-4,23	-0,032	6,76	0,051
25	127,02	151,61	141,72	133,86	116,12	85,97	-4,45	-0,033	1,25	0,009
35	128,41	154,83	144,17	136,82	118,81	87,28	-4,90	-0,035	1,21	0,008
45	129,08	158,59	146,30	139,08	119,58	88,79	-5,43	-0,039	1,80	0,012

6.4.4. Cu-Al-Mn-Cd (C1) Alaşımı

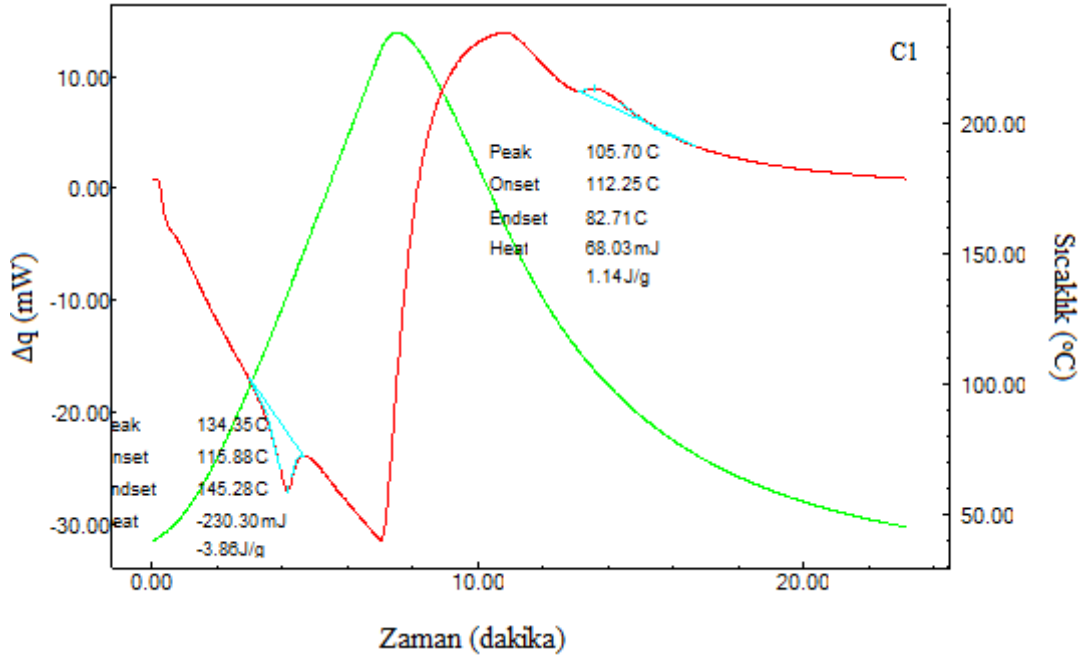
Cu-Al-Mn-Cd (C1) alaşımlarına ait farklı ısıtma hızlarında (15, 25, 35 ve 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri sırasıyla Şekil 6.32 - 6.36'da görölmektedir. C1 (Cu-Al-Mn-Cd) alaşımı için 15 °C /dakika ısıtma hızında elde edilen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları sırasıyla 108,37 - 137,20 °C dir. Bu alaşımın 25 °C/ dakika ısıtma hızında belirlenen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları ise 128,27 - 158,26 °C dir. Tablo 6.9'da farklı ısıtma hızlarında belirlenen dönüşüm sıcaklıkları mevcuttur. Isıtma hızındaki değişimle birlikte martensit dönüşüm sıcaklıkları, entalpi ve entropi değerleri de değişmektedir.



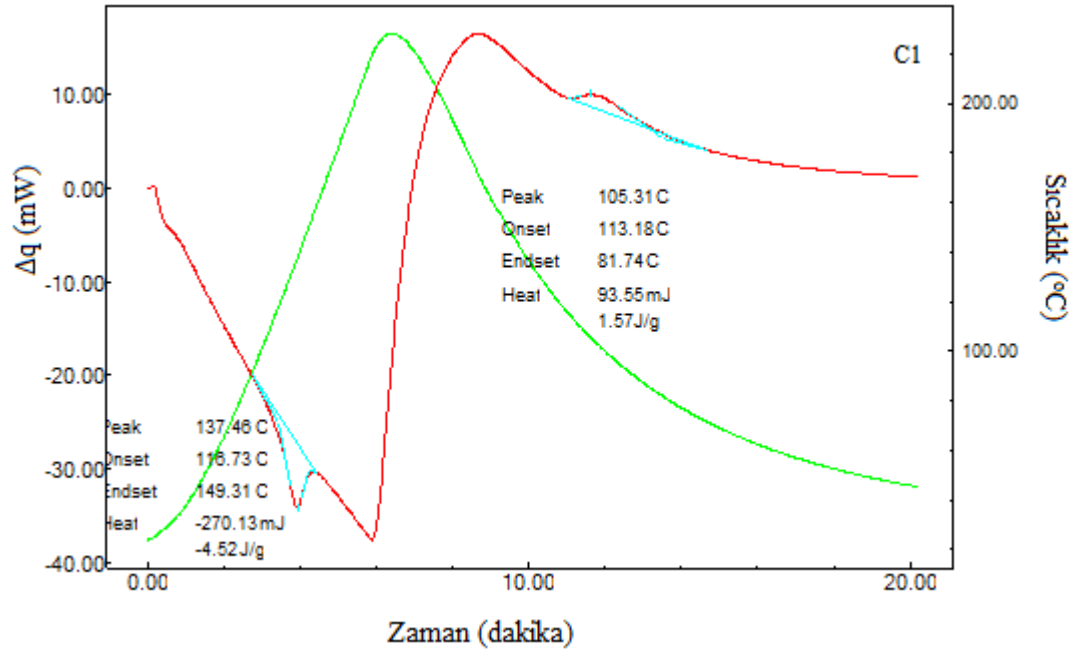
Şekil 6.32. C1 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



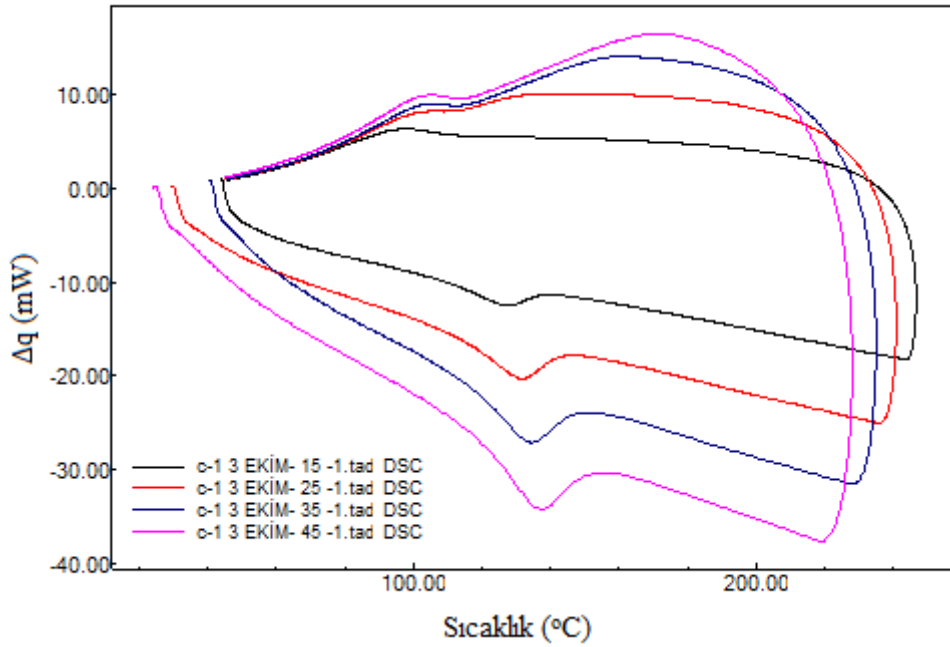
Şekil 6.33. C1 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.34. C1 alaşımı için 35 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.35. C1 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



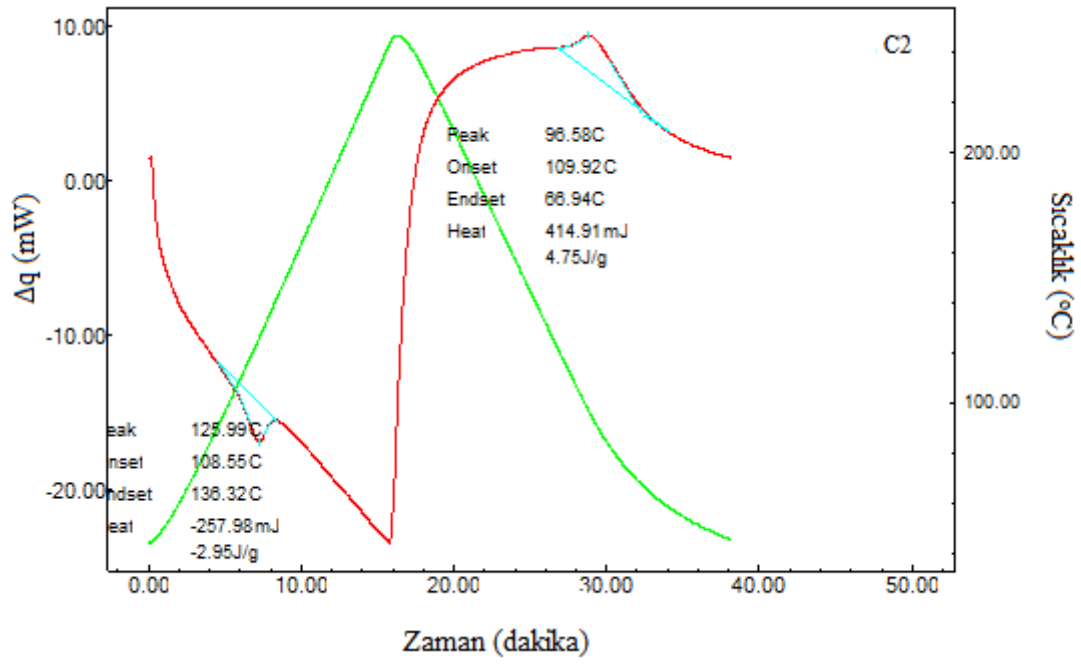
Şekil 6.36. C1 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 6.9. C1 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

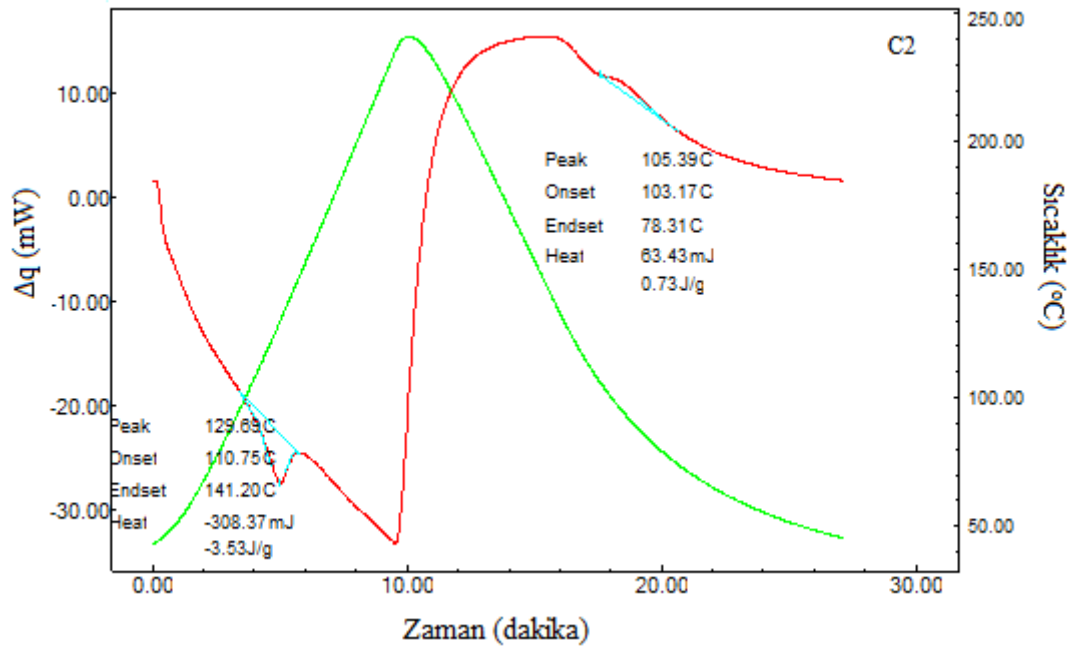
Isıtma Hızı (°C/dak.)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_o (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
15	108,37	137,20	127,58	124,14	111,08	71,08	-3,59	-0,028	4,91	0,039
25	111,34	142,55	131,97	124,26	105,97	80,28	-4,42	-0,035	0,49	0,003
35	115,88	145,28	134,35	128,76	112,25	82,71	-3,86	-0,029	1,14	0,008
45	116,73	149,31	137,46	131,24	113,18	81,74	-4,52	-0,034	1,57	0,011

6.4.5. Cu-Al-Mn-Cd (C2) Alaşımı

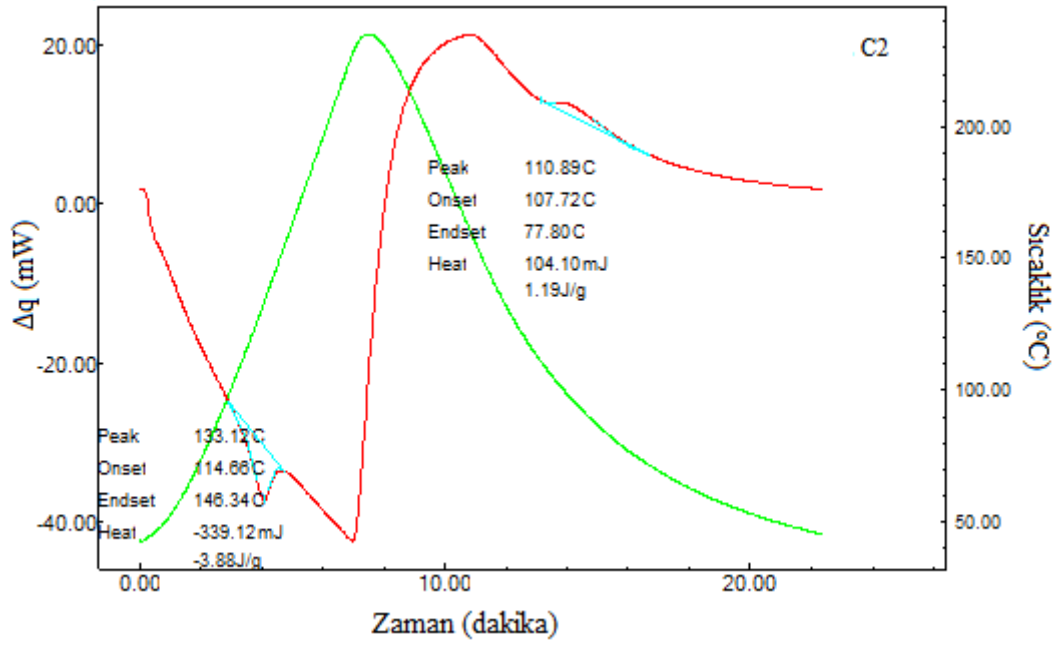
Cu-Al-Mn-Cd (C2) alaşımlarına ait farklı ısıtma hızlarında (15, 25, 35 ve 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri sırasıyla şekil (6.37 - 6.41)'de görülmektedir. C2 alaşımı için 15 °C/ dakika ısıtma hızında elde edilen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 108,55 - 136.32 °C dir. Bu alaşımın 25 °C/ dakika ısıtma hızında belirlenen austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları ise sırası ile 110.75 - 141.20 °C dir. Farklı ısıtma hızları için belirlenen dönüşüm sıcaklıkları Tablo 6.10'da görülmektedir. Bu sonuçları karşılaştırdığımızda ısıtma hızının artmasıyla austenit dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği görülmektedir. Martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları da ısıtma hızının artmasıyla değişim göstermektedir. C2 alaşımına ait entalpi ve entropi değerlerini incelediğimizde bu değerlerin ısıtma hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir [15,30,31].



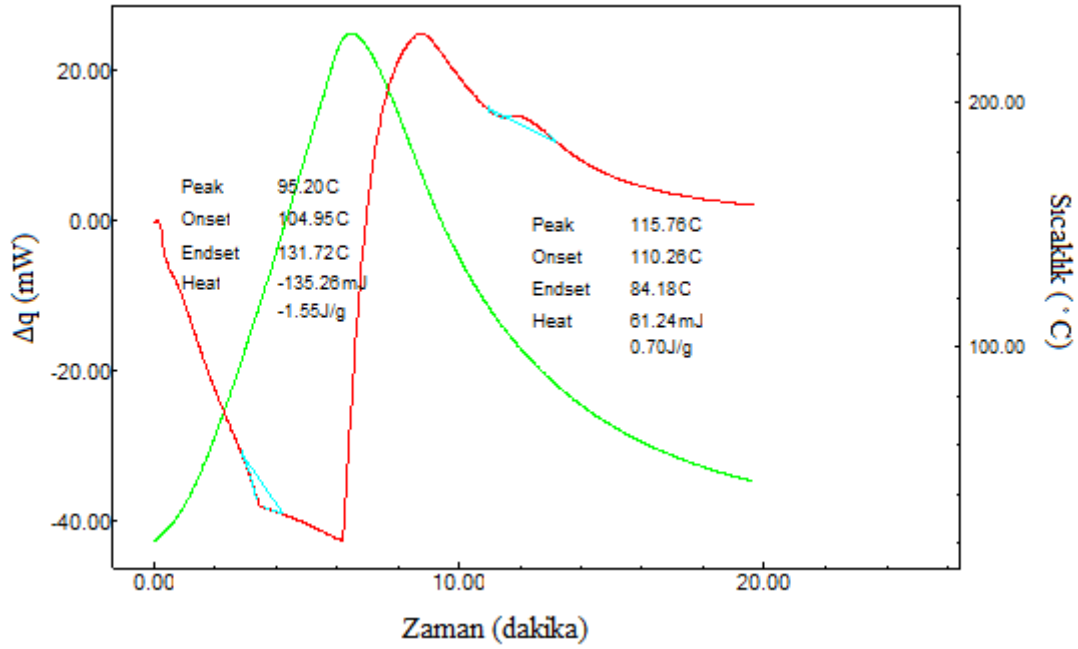
Şekil 6.37. C2 alaşımı için 15 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



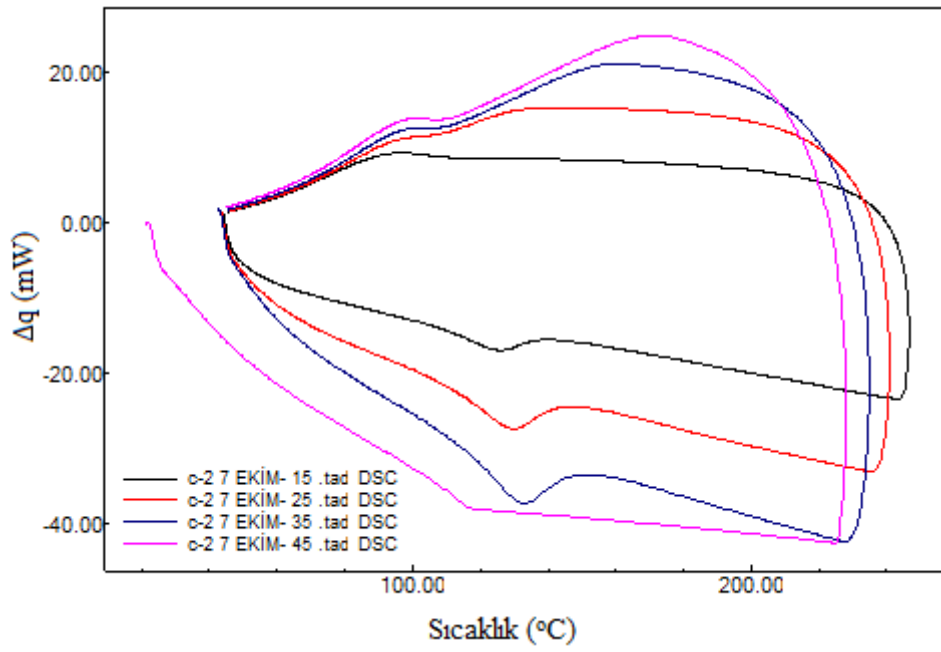
Şekil 6.38. C2 alaşımı için 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.39. C2 alaşımı için 35 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



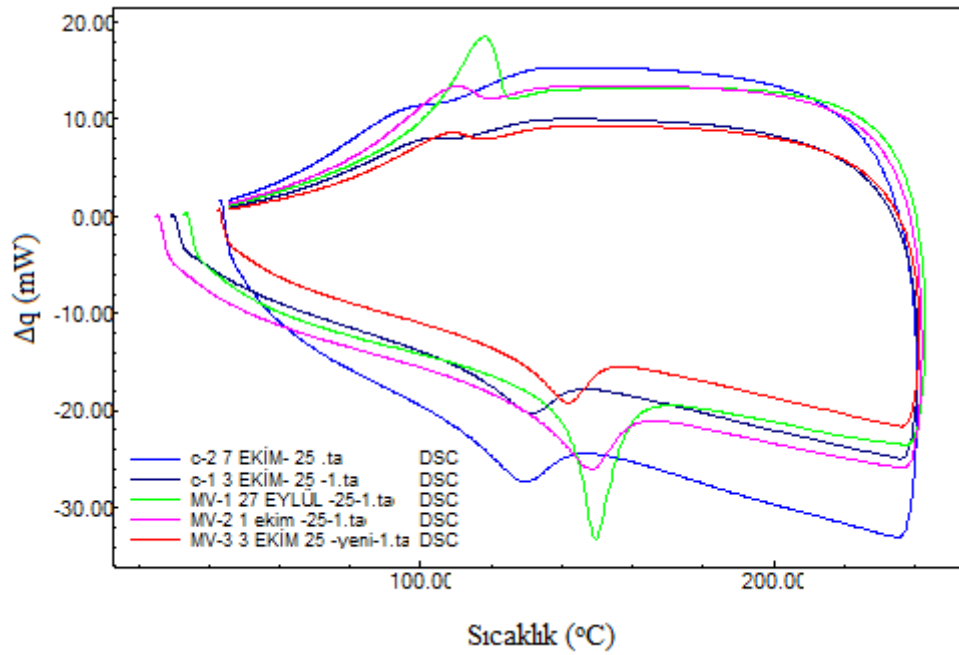
Şekil 6.40. C2 alaşımı için 45 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızı için elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 6.41. C2 alaşımı için 15, 25, 35 ve 45 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları için elde edilen DSC eğrileri.

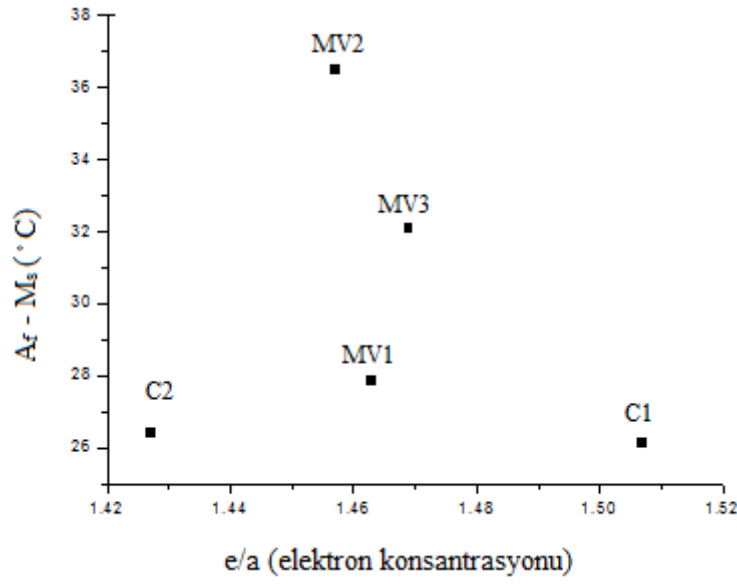
Tablo 6.10. C2 alaşımı için elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma Hızı (°C/dak.)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_o (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
15	108,55	136,32	125,99	123,17	109,92	66,94	-2,95	-0,023	4,75	0,038
25	110,75	141,20	129,69	122,18	103,17	78,31	-3,53	-0,028	0,73	0,005
35	114,66	146,34	133,12	127,03	107,72	77,80	-3,88	-0,030	1,19	0,009
45	95,20	131,72	104,95	123,74	115,76	84,18	-1,55	-0,012	0,70	0,005



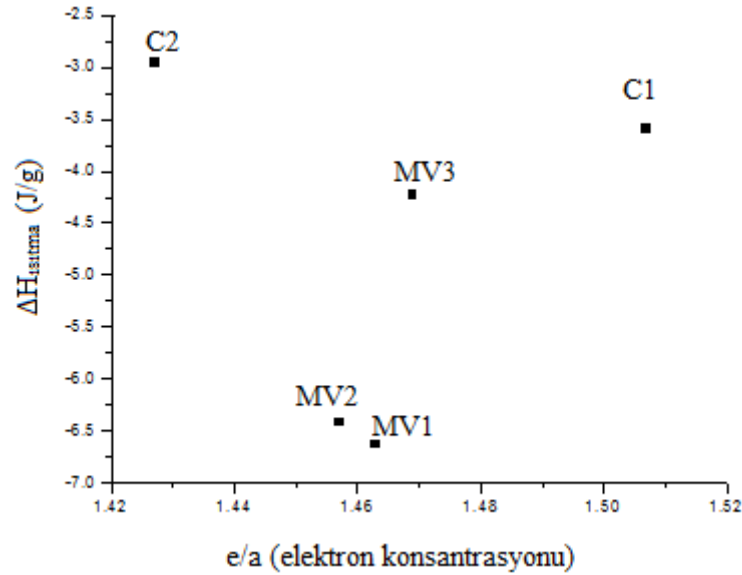
Şekil 6.42. Bütün numunelerin 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızında DSC eğrilerinin çakıştırılmış hali.

MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarına ait DSC sonuçlarına bakıldığında MV1 üçlü alaşıma vanadyum katkılanması yapıldığında MV1 alaşımına göre austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. MV1 alaşımına vanadyum katkılanması yapıldığında, entalpi (ΔH_{M-A}) değerleri ve entropi (ΔS_{M-A}) değerleri artarken, entalpi (ΔH_{A-M}) ve entropi (ΔS_{A-M}) değerleri vanadyum katkılanmasıyla azalıp vanadyum miktarının artırılmasıyla artmaktadır. MV1 üçlü alaşımına kadmiyum katkılanırıldığında elde ettiğimiz C1 ve C2 alaşımlarına ait DSC sonuçlarını incelediğimizde, alaşıma kadmiyum katıldığında dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı gözlemlendi. Entalpi ve entropi değerlerinin de değiştiği görülmektedir [1,15,27,30]. MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının Şekil 6.42’de verilen 25 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızına ait DSC eğrilerine baktığımızda, MV1 alaşımına vanadyum ve kadmiyum katkılanırıldığında, dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği görülmektedir.

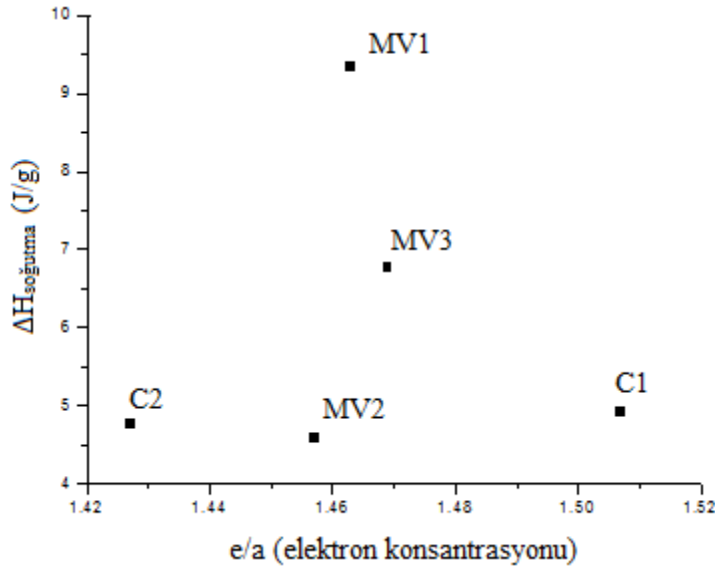


Şekil 6.43. $A_f - M_s$ sıcaklığının elektron konsantrasyonu ile değişimi.

$A_f - M_s$ sıcaklık farkı sonuçlarını kullanarak alaşımların elektron konsantrasyonları ile kıyaslama yaptığımızda Şekil 6.43’de verilen grafiği elde ederiz. $A_f - M_s$ sıcaklık farkının elektron konsantrasyonu ile bağlantılı olduğu ve MV1 alaşımına, kadmiyum katkısının vanadyum katkısına oranla $A_f - M_s$ sıcaklık farkını daha fazla düşürdüğünü söyleyebiliriz.

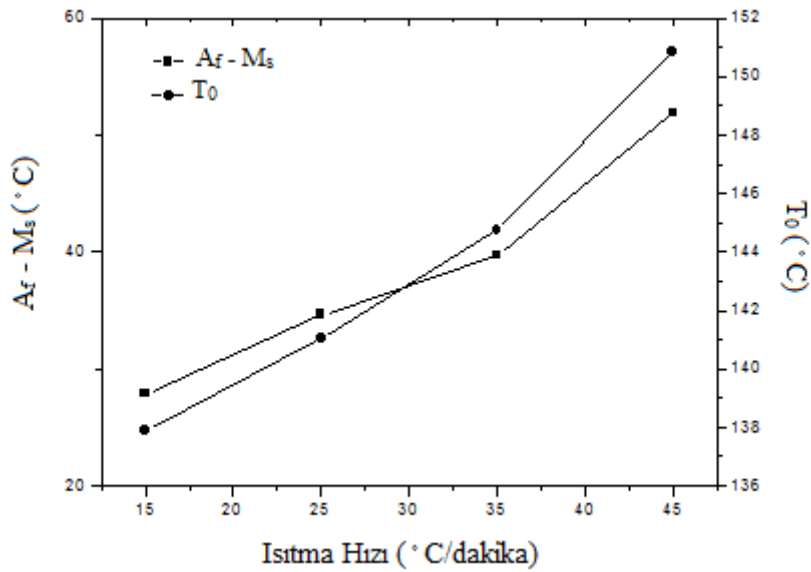


Şekil 6.44. Entalpinin elektron konsantrasyonu ile değişimi.

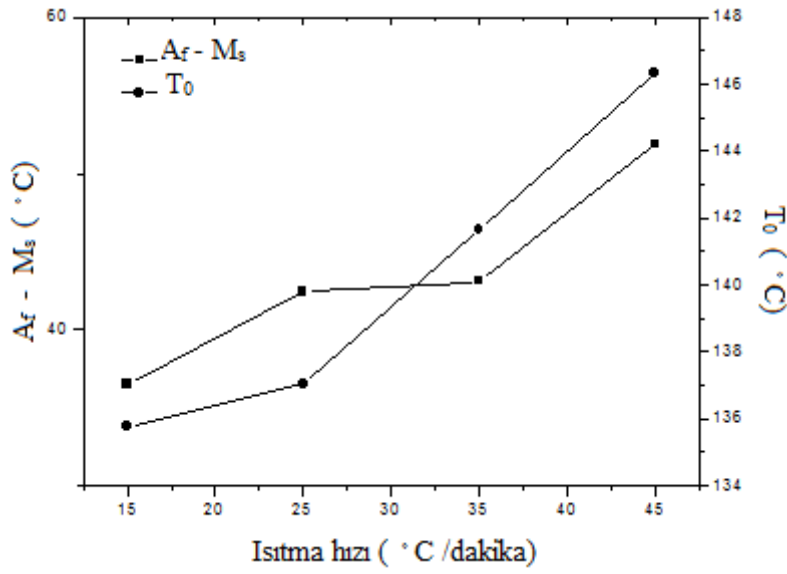


Şekil 6.45. Entalpinin elektron konsantrasyonu ile değişimi.

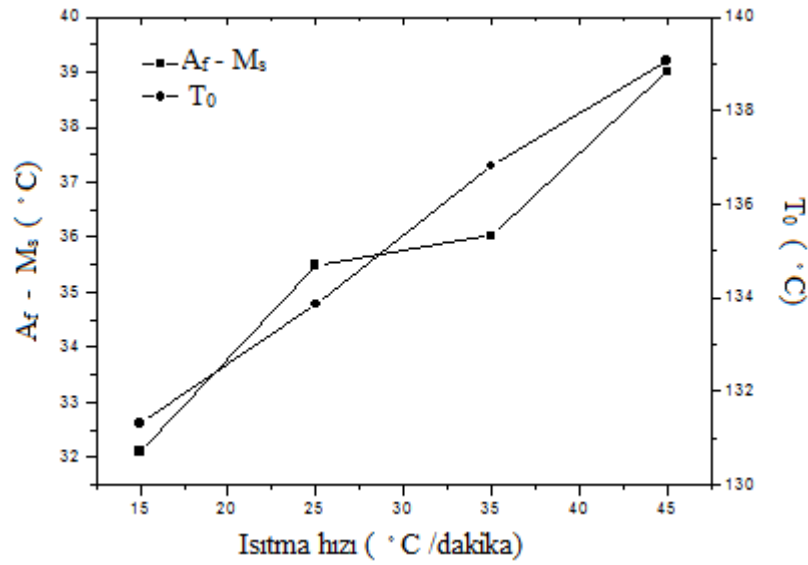
MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının 15 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçümleri kullanılarak hesaplanan entalpi ısıtma ve entalpi soğutma değerlerini, bu alaşımların elektron konsantrasyonları ile karşılaştırdığımızda (Şekil 44 - 45) bu iki farklı kavramın birbiri ile orantılı bir şekilde değişim gösterdiği söylenebilir.



Şekil 6.46. MV1 alaşımına ait $A_f - M_s$ ve T_0 sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.

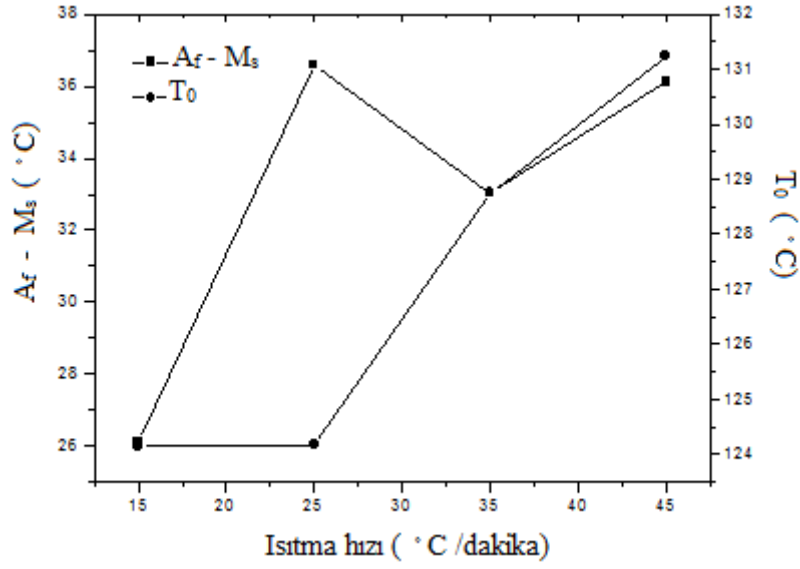


Şekil 6.47. MV2 alaşımına ait $A_f - M_s$ ve T_0 sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.

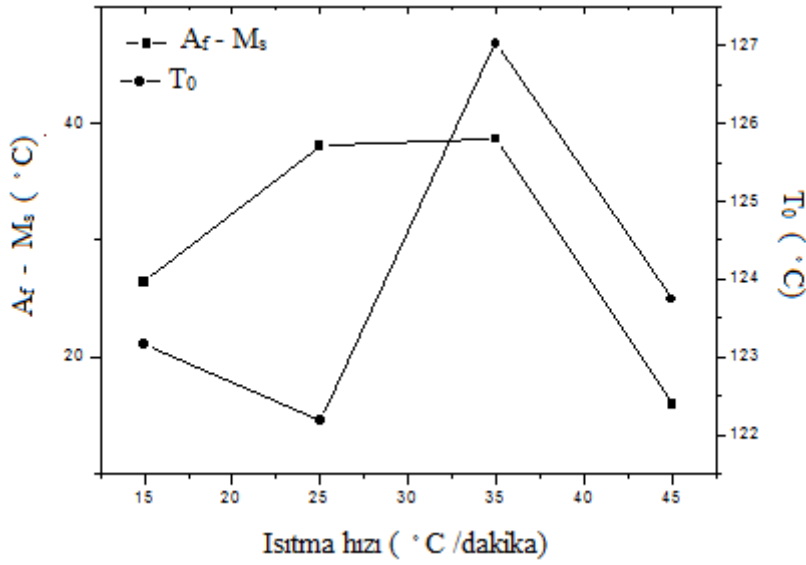


Şekil 6.48. MV3 alaşımına ait $A_f - M_s$ ve T_0 sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.

MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarının, $A_f - M_s$ sıcaklık farkı ile T_0 denge sıcaklığı sonuçlarını kullanarak, alaşımların ısıtma hızları ile kıyaslama yaptığımızda Şekil 6.46-6.48’de verilen grafikleri elde ederiz. $A_f - M_s$ sıcaklık farkının ısıtma hızı ile orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Aynı şekilde T_0 denge sıcaklığını, ısıtma hızı ile karşılaştırdığımızda, ısıtma hızının artan değerlerine karşın T_0 denge sıcaklığının da arttığını söyleyebiliriz [31].

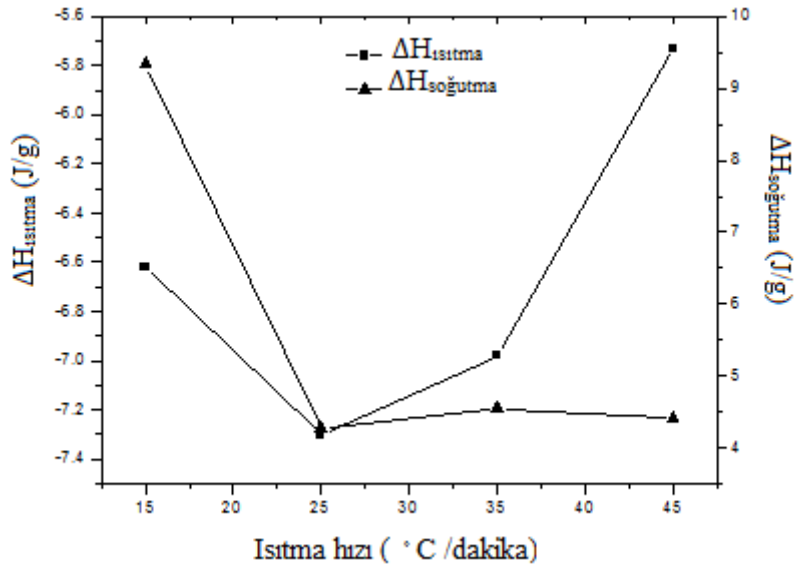


Şekil 6.49. C1 alaşımına ait $A_f - M_s$ ve T_0 sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.

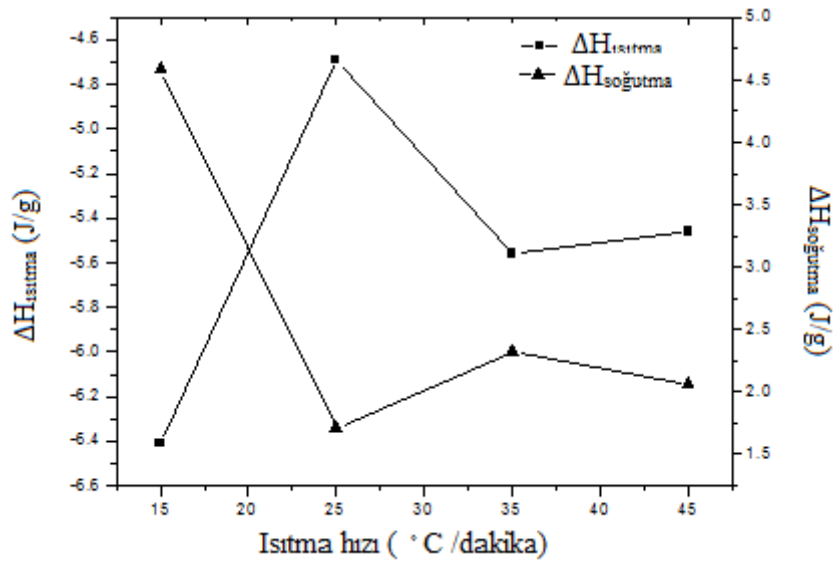


Şekil 6.50. C2 alaşımına ait $A_f - M_s$ ve T_0 sıcaklıklarının ısıtma hızına bağlı değişimi.

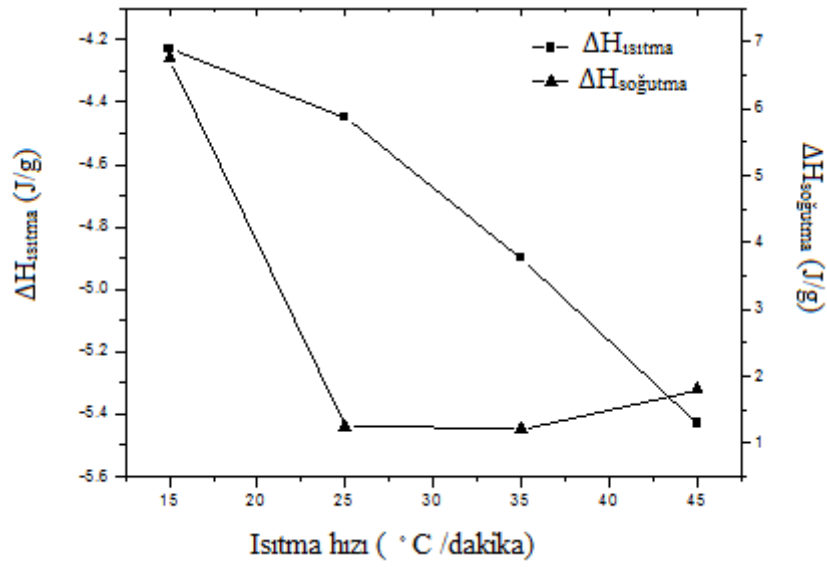
C1 ve C2 alaşımlarının, $A_f - M_s$ sıcaklık farkı ile T_0 denge sıcaklığı sonuçlarını kullanarak, alaşımların ısıtma hızları ile kıyaslama yaptığımızda Şekil 6.49-6.50’de verilen grafikleri elde ederiz. $A_f - M_s$ sıcaklık farkı ile T_0 denge sıcaklığı değerlerinin, ısıtma hızına bağlı olarak değiştiğini söyleyebiliriz [10].



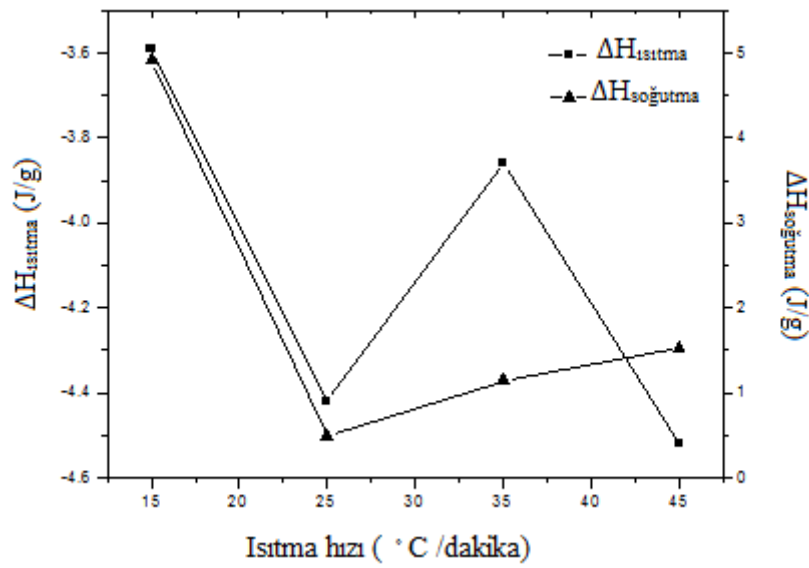
Şekil 6.51. MV1 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.



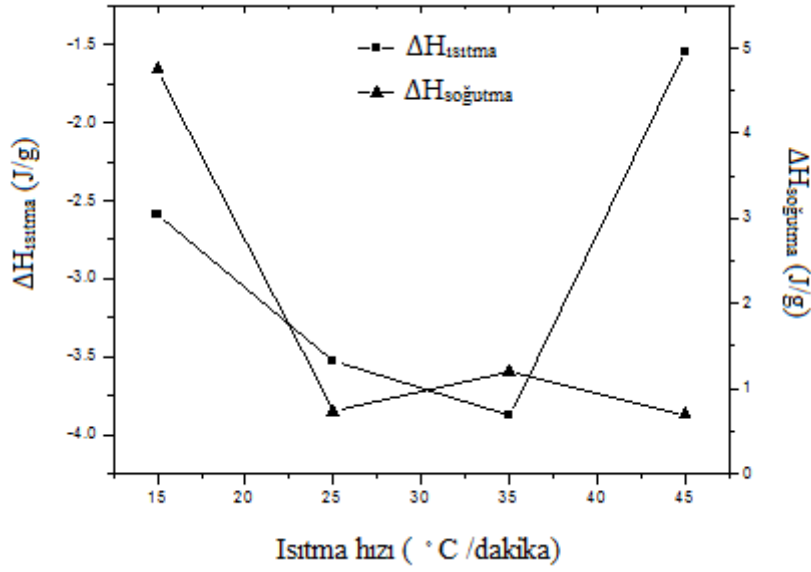
Şekil 6.52. MV2 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.



Şekil 6.53. MV3 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi



Şekil 6.54. C1 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.



Şekil 6.55. C2 alaşımına ait, Entalpi ısıtma ve soğutma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.

MV1, MV2 MV3, C1 ve C2 alaşımlarının, entalpi ısıtma ve entalpi soğutma değerlerini, alaşımların ısıtma hızları ile kıyaslama yaptığımızda Şekil 6.51-6.55'de verilen grafikleri elde ederiz. Entalpi ısıtma ve entalpi soğutma değerleri ısıtma hızına bağlı olarak değişim göstermektedir.

6.5. Mikrosertlik Ölçümü

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının sertlik ölçümü için her bir alaşımdan numuneler alındı. Her numuneden bir ölçüm alındı. Ölçüm sonuçları Tablo 6.11'de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarını değerlendirdiğimizde;

Mikrosertlik değeri en düşük olan alaşım Cu-Al-Mn (MV1) üçlü alaşımıdır. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum katkılılandırıldığında alaşımın (MV2) sertlik değerinin arttığı görülmektedir. Alaşımdaki vanadyum oranı arttıkça (MV3) sertlik değeri de artmaktadır. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına kadminyum katkılılandırılarak elde edilen Cu-Al-Mn-Cd (C1) dördü alaşımının sertlik değerinin arttığı yine tablodaki verilere bakarak söylenebilir.

Elde edilen bu sonuçları kıyasladığımızda; Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum ve kadminyum elementlerini ayrı ayrı katkılılandırıldığımızda, vanadyum katkılı numunelerin sertlik değerlerinin kadminyum katkılı numunelerden daha yüksek olduğunu Tablo 6.11'de ki verilere bakarak söyleyebiliriz. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum katkılılandırıldığında

sertliğin artmasıyla birlikte tane büyüklüğünün azaldığı görülmektedir. Vanadyum oranı arttıkça tane büyüklüğü azalmaktadır. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına kadmiyum katkılандırıldığında alaşımın sertlik değeri artmakta, tane büyüklüğü ise azalmaktadır. Kadmiyum oranının artmasıyla sertlik azalmakta tane büyüklüğünün arttığını tablodaki sonuçlara bakarak söyleyebiliriz [32,33].

Tablo 6.11. Numunelerin tane büyüklükleri ve sertlik değerleri.

Alaşım kodu	Tane büyüklüğü (nm)	Sertlik ölçümü (Hv)
MV1	21,79	194,6
MV2	10,35	224
MV3	8,37	265,3
C1	8,26	214,6
C2	22,54	211,3

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Şekil hatırlama olayı termoelastik martensit bir dönüşümdür. Bu dönüşümler difüzyonsuz dönüşümlerdir. Kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil gösterirler.

Bu çalışmada Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd üçlü ve dörtlü alaşımlarının yapısal özellikleri incelendi. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum ve kadmiyum elementlerinin ayrı ayrı katkılandırılmasının dönüşüm sıcaklıklarını, tane büyüklüğünü martensit yönelimlerini, faz geçişlerini, mikrosertlik değerlerini ve entropi değerleri gibi değerleri nasıl etkilediği incelendi.

7.1. X-Işını Difraksiyon Sonuçları

Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımlarının X-ışını difraktogramları sırasıyla Şekil 6.1-6.5’de verilmiştir. Elde edilen difraktogramların kullanılması ile alaşımların kristal yapıları, yansıma veren düzlemleri ve 2θ değerleri belirlendi. Bu deney verilerini kullanarak aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarına ait X-ışını difraktogramlarında görüldüğü gibi (1 2 10), (0 0 22), (2 0 2) ve (0 4 2) ana pikleri beş alaşımın difraktogramlarının hepsinde gözlenmektedir (Şekil 6.1-6.5). MV2 alaşımında farklı olarak (2 0 12) piki de gözlenmektedir. Bu düzlemlerin ortorombik bir kristal yapıya sahip oldukları tespit edildi. MV1 alaşımına, vanadyum katkılıyarak elde ettiğimiz MV2 alaşımı ile MV1 alaşımını kıyasladığımızda MV2 alaşımının pik şiddetlerinin arttığı, vanadyum miktarının artmasıyla pik şiddetlerin artmaya devam ettiği ve pik genişliklerinin arttığı görülmektedir. MV1 alaşımına, kadmiyum katkılıyarak elde ettiğimiz C1 ve C2 alaşımları ile MV1 alaşımını kıyasladığımızda, C1 ve C2 alaşımlarının pik şiddetlerinin MV1 alaşımının pik şiddetlerinden büyük olduğunu ve kadmiyum katkılandırılmasıyla pik genişliklerinin arttığını söyleyebiliriz [1,18,19,29,31]. Sonuç olarak elde edilen veriler bu konuda yapılan çalışmalar ile uyum içindedir.

7.2. Metalografik Gözlem Sonuçları

Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımlarının optik mikroskop gözlemleri yapılarak 100µm büyütme oranında incelendi. Bu gözlemlere dayanarak elde edilen sonuçları değerlendirecek olursak;

Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımlarına ait optik mikrograflar Şekil 6.7-6.11’de sırasıyla verilmiştir. Bu mikrograflar incelendiğinde, oda sıcaklığında Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımlarına ait yapıların tamamen martensit olduğu belirlendi. Martensit plakaları tane sınırlarında keskin bir biçimde kesilmiş ve bazı taneler içinde farklı yönelimlere sahip martensit varyantlar meydana geldiği görüldü. Bu varyantların bazıları V-tipi martensit bazıları ise iğne tipi martensittir. Farklı tanelerde oluşan martensit plakalarının şekli ve tane büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı olduğu optik mikrograflardan görülmektedir. Ayrıca bazı alaşımlarda aynı tane içerisinde bir bölgede V-tipi martensit oluşumu dikkat çekerken bu tanenin bir başka bölgesinde ters yönelimli martensit oluşum görülmemektedir. Alaşımlardaki tane büyüklüklerinin biri birinden farklı olduğu belirlendi [16,18,24,34].

7.3. DTA Ölçüm Sonuçları

Cu-Al-Mn, Cu-Al-Mn-V ve Cu-Al-Mn-Cd alaşımları 20 °C/dakikalık ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 1000 °C ye kadar ısıtılarak faz geçişleri belirlendi. Cu-Al-Mn alaşımları β fazdan soğutulduğunda bu alaşımlar katıhal durumunda birçok düzenli reaksiyon geçirir bunlar; $\beta(A2) \rightarrow \beta2(B2) \rightarrow \beta1(DO_3/L2_1)$ dır. Ayrıca ikili ve üçlü alaşımlarda $A2(\text{düzensiz}) \rightarrow B2$ ve $A2 \rightarrow B2 \rightarrow DO_3/L2_1$ geçişlerde başlangıçtaki düzensiz yapı sıcaklık düşüşüyle B2 veya DO_3 tipi düzenli yapıya dönüşür. Elde edilen TG/DTA eğrileri incelendiğinde bu alaşımların $A2 \rightarrow B2 \rightarrow DO_3/L2_1$ faz geçişleri sergiledikleri görüldü. Bu faz geçişleri yine yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru meydana gelen düzenli-düzensiz geçişlere karşılık gelmektedir. Dönüşüm sonrası faz geçişleri 9R, 18R, 2H yapısındaki martensit yapıya sahiptirler [1,17,27,29,35].

7.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için farklı ısıtma hızlarında (15 °C/ dakika, 25 °C/ dakika, 35 °C/ dakika, 45 °C/ dakika) DSC ölçümleri alındı ve her bir alaşımın farklı ısıtma soğutma hızındaki dönüşüm sıcaklıkları incelendi.

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımına ait dönüşüm sıcaklıkları DSC ölçümleri ile belirlendi. Alaşımların farklı ısıtma soğutma hızlarına göre austenit ve martensit dönüşüm başlama ve bitiş sıcaklıkları tespit edildi. Buna göre, alaşımların 15 °C/ dakikalık ısıtma hızında en düşük (A_s) ve (A_f) değerine sahip oldukları görüldü. Bunun yanı sıra, düşük ısıtma hızında martensit başlama (M_s) ve bitiş sıcaklıkları (M_f) da endüşük değerdedir. Isıtma hızının artması ile birlikte bu dönüşüm sıcaklıklarda artmakta ancak 45 °C/ dakikalık ısıtma hızında tekrar azalma görülmektedir.

MV1, MV2 ve MV3 alaşımlarına ait DSC sonuçlarına bakıldığında MV1(Cu-Al-Mn), üçlü alaşıma vanadyum katkılандırması (Cu-Al-Mn-V) yapıldığında, MV1 alaşımına göre austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. MV1 alaşımına vanadyum katkılандırması yapıldığında, entalpi (ΔH_{M-A}) değerleri ve entropi (ΔS_{M-A}) değerleri artarken, entalpi (ΔH_{A-M}) ve entropi (ΔS_{A-M}) değerleri vanadyum katkılандırılmasıyla azalır vanadyum miktarının artırılmasıyla artmaktadır.

MV1 üçlü alaşımına kadmiyum katkılандırıldığında elde ettiğimiz C1 ve C2 alaşımlarına ait DSC sonuçlarını incelediğimizde, alaşıma kadmiyum katkılандırıldığında, MV1 alaşımına göre dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı gözlemlendi. Entalpi ve entropi değerlerinin de değiştiği görülmektedir.

MV1 alaşımına kadmiyum katkılандırılması, vanadyum katkılандırılmasına kıyasla dönüşüm sıcaklıklarını daha fazla düşürdüğünü söyleyebiliriz. Cu-Al-Mn-V dördümlü alaşımında dördümlü element dönüşüm sıcaklığı üzerinde etkilidir. Alaşımların kimyasal kompozisyonundaki değişimler dönüşüm sıcaklıklarını da değiştirmektedir [12,18,21,25,30,34].

7.5. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

MV1, MV2, MV3, C1 ve C2 alaşımlarının sertlik ölçüm sonuçları Tablo 6.11’de verilmiştir. Mikrosertlik değeri en düşük olan alaşım Cu-Al-Mn üçlü alaşımıdır. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum katkılıdırıldığında alaşımın (Cu-Al-Mn-V) sertlik değerinin arttığı görülmektedir. Alaşımdaki vanadyum oranı arttıkça (MV3) sertlik değeri de artmaktadır.

Cu-Al-Mn üçlü alaşımına kadminyum katkılıdırılarak elde edilen Cu-Al-Mn-Cd (C1) dörütlü alaşımının sertlik değeriinin arttığı yine tablodaki verilere bakarak söylenebilir.

Tablo 6.11’de elde edilen bu sonuçları kıyasladığımızda; Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum ve kadminyum elementlerini ayrı ayrı katkılıdırıldığımızda, vanadyum katkılı numunelerin sertlik değeriilerinin kadminyum katkılı numunelerden daha yüksek olduğu sonucuna varabiliriz. Cu-Al-Mn üçlü alaşımına vanadyum ve kadminyum katkılıdırıldığında tane boyutlarının küçüldüğü sonucuna varabiliriz [33,35].

KAYNAKLAR

1. Aksu Canbay, C. , 2010. Bakır Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlarda Alaşım Elementlerinin ve Üretim Yöntemlerinin Termal Elektriksel Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Işık, A. , 2007. FePd Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımının Kristalografisi Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Sutou, Y. , Omori, T. Wang, J.J., Korinuma, Ishida, K.,2003. Chacacteristics of Cu-Al-Mn Base Shape Memory Alloys and Their Applications, 278-279.
4. Güney, S. 2009. Peristaltik Hareket Sağlayan Tıbbi Tekstil Metaryelinin Geliştirilmesi ve Bilgisayarlı Kontrolü.
5. Güdeloğlu, S. 2014. Cu-Al-Mn Şekil Hatırlamalı Alaşımlarda Yaşlandırmanın Fiziksel Özellikler Üzerine etkisi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
6. Kurt, B. , Orhan, N. ,2003. Şekil Hafızalı Alaşımlar Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Bölümü.
7. Fiziksel Matalurji Martenstik Dönüşümler, 2011-2012, 70.
8. Arndt, M. , Griebel, M. , Novák, V. , Sittner, P. , Roubíček, T. , 2005. Martenstik Transformationin NiMnGa Single Crystals: Numerical Simulationand Experiments.
9. Bakır Alaşımları Kalıp Kumları Metalürji Dökümhane ve Endüstri Malzeme Sanayi 2007.
10. Akis, A. Ç. , 2012. Şekil Hatırlamalı Co-Ni-Al-Si Alaşımında Yaşlandırma Olayının Martensitik Faz Dönüşümü Üzerine Etkileri.
11. Akdoğan, A. , Nurveren, K. Yıldız Tenik Üniversitesi Makine Fakültesi Mühendislik Böl. Makine Malzemeleri ve İmalat Teknolojisi
12. Özbey Sel, N. , Tekyönlü Çift Yönlü Şekil Hatırlamalı Alaşımlar.
13. Güney, S. 2009. Peristaltik Hareket Sağlayan Tıbbi Tekstil Metaryelinin Geliştirilmesi ve Bilgisayarlı Kontrolü.
14. Balo, Ş. N. 1999. Cu-Al-Be, Cu-Al-Ni Alaşımlarının Mekanik Etkilerle Şekil Hatırlama Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi.
15. Lu, X. , Chen, F. , Li, W. , Zheng, Y. ,2009. Effect of Ce addition on the Microstructure and Damping properties of Cu-Al-Mn Shape Memory Alloys,609-610.

16. U.S. Mallik, V. Sampath ,2008. Influence of Quaternary Alloying Additions on Transformation Temperatures and Shape Memory Properties of Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy, 158-159-160.
17. Koeda, N. , Sutou, Y. , Omori, T. , Oikawa, K. , Kainuma, R. , Ishida, K. , 2005. Martensitic Transformation of Cu-10at.%Al-9at.%Ga-11at.%Mn Ferromagnetic β alloy, 1154.
18. Yu-Jun Bai A. , Gui-Li Geng B. , Xiu-Fang Bian B. , Dong-Sheng Sun B. , Shou-Ren Wang 2000. Influence of Initial Heating Temperature on The Reverse Martensitic transformation of Cu-Zn-Al-Mn-Ni Alloy.
19. Sel, N. , 2009 Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni Ve Cu-Al-Be Alaşımlarında Termal Yaşlandırma Etkileri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
20. Z. Li , Z.Y.Pan, N. Tang, Y.B. Jiang, N.Liu, M. Fang, F. Zheng 2005. Cu-Al-Ni-Mn Shape Memory Alloy Processed By Mechanical Alloying And Powder Metallurgy.
21. J. Dutkiewicz, T. Czeppe, J. Morgiel Effect of Titanium on Structure And Martensitic Transformation in Rapidly Solidified Cu-Al-Ni-Mn-Ti Alloy.
22. J.M. Guilemany, B.G. Mellor, J. Fernandez, R. Franch and S.E. Willott 1995. Springs with two Way Shape Memory Obtained by Stabilised Stress Induced Martensite Training Methods.
23. J. Chen, Z. Li, Y.Y. Zhao 2009. A High-Working-Temperature Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy.
24. Qingzhou Wang, Fusheng Han, Chunxiang Cui 2010. Effect of Heat Treatment on the Two internal Friction Peaks in A Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy.
25. R.A.G. Silva , S. Gama, A. Paganotti, A.T. Adorno, T.M. Carvalho, C.M.A. Santos 2013. Effect of Ag Addition on Phase Transitions of the Cu-22.26 At.%Al-9.93 At.%Mn Alloy.
26. Agnieszka Mielczarek, Nils Kopp, Werner Riehemann 2009. Ageing Effects After Heat Treatment In Cu-Al-Mn Shape Memory Alloys.
27. Y. Sutou, T. Omori , N. Koeda, R. Kainuma, K. Ishida, 2006 Effect of Grain Size and Texture on Damping Properties of Cu-Al-Mn Base Shape Memory Alloys.
28. Y. Sutou, T. Omori, J.J. Wang, R. Kainuma, K. Ishida, 2003. Characteristics of Cu-Al-Mn Base Shape Memory Alloys and their Applications.
29. W.H. Zou, H.Y. Peng, R. Wang, J. Gui and D.Z. Yang 1994. Effect On Fine Structure of a Cu-Al-Ni-Mn-Ti Shape Memory Alloy.

30. Çavdar E., Gökdemir N., Akgün İ., ve Çavdar Ş., 2007. Ni-% 45,2 Ti Alaşımının Farklı Tavlama Sıcaklıklarında Termal Özelliklerinin İncelenmesi.
31. Tekataş A. 2013. Termal Buharlaştırma Metodu ile Bakır Esaslı Şekil Hafızalı Alaşım Üretilmesi.
32. Eskil M. FeMnSi 2006. Alaşımlarının Mekanik ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerinin İncelenmesi.
33. Kürüm F. 2013. Şekil Hatırlama Cu-Al-Co Alaşımlarının Üretimi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi.
34. C.Y. Chung, C.W.H. Lam, S.S. Tan 1997. Effect of Parent Phase Ageing on CuZnAl Shape Memory Alloys With Mn and Zr Addition.
35. Zengin R. 2002. Bakır Bazlı Basınç ve Radyasyon Etkisi Altında Şekil Hatırlama Davranışlarının İncelenmesi.

ÖZGEÇMİŞ

Arife KESKİN

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi : 1977

Doğum Yeri : Elazığ

Uyruğu : T.C.

Medeni Hali : Evli

Eğitim:

İlköğretim:

Elazığ, Değirmenönü İlköğretim Okulu

Ortaöğretim:

Elazığ, Elazığ İmam Hatip Lisesi

Lisans: (1997-2001)

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü (Samsun)