




Şekil Hafızalı Ve Süperelastik Ni-Ti Esaslı Alaşım Nitinol'ün Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması

Necdet Düzgören^{1,*} , Volkan Onar² , Fatih Özen¹ 

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Denizli, Türkiye

²Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Batman, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 16.07.2024

Kabul: 06.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Şekil bellekli alaşımlar

NİTİNOL

Kaynaklanabilirlik

Süperelastik

ÖZET

Şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemeler uygun ısı ve mekanik işlemlere maruz bırakılması durumlarında ilk boyutlarına geri dönebilme yeteneğine sahip malzemelerdir. Bu durum farklı endüstri dalları için büyük avantaj sağlamaktadır. Günümüz teknolojisinde geliştirilen değişik şekil bellekli alaşım grupları bulunmaktadır. Bu alaşımlardan endüstride en çok tercih edileni Ni-Ti esaslı alaşım olan "NİTİNOL" alaşımıdır. Bu çalışmanın amacı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım türlerinden biri olan Ni-Ti esaslı alaşım olan NİTİNOL alaşımının kendi içerisinde ve diğer malzeme grupları ile farklı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynaklanabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaç kapsamında yapılan çalışmaların incelenmesinde Ni-Ti esaslı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemelerinin kendi içinde ve diğer malzemelerle farklı kaynak yöntemleri kullanılarak ergitmeli ve katı hal kaynak yöntemlerinden bazıları ile kaynak işleminin uygulanabildiği ve alaşımın kendine özgü olan bu üstün özelliklerini koruduğu tespit edilmiştir.

Investigation of The Weldability of Nitinol, A Shape Memory And Superelastic Ni-Ti Based Alloy

ARTICLE INFO

Received: 16.07.2024

Accepted: 06.08.2024

Keywords:

Shape memory alloys

NİTİNOL

Weldability

Superelastic

ABSTRACT

Shape memory and superelastic alloy materials are materials that have the ability to return to their original dimensions when subjected to appropriate thermal and mechanical treatments. This provides great advantages for different industries. There are different shape memory alloy groups developed in today's technology. The most preferred among these alloys in the industry is the Ni-Ti based alloy "NİTİNOL". The aim of this study is to investigate the weldability of NİTİNOL alloy, one of the shape memory and superelastic alloy types, which is a Ni-Ti based alloy, in itself and with other material groups by using different welding methods. In the examination of the studies carried out within the scope of this purpose, it has been determined that Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy materials can be welded in themselves and with other materials by using different welding methods, with some of the melt and solid-state welding methods, and the alloy preserves these unique superior properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin ilerlemesi ile tüketicinin istekleri doğrultusunda üreticiler yeni malzemeler arayışı içine girmişlerdir. Her geçen gün artan talepler doğrultusunda şekil hafızalı süperelastik özellik gösteren alaşım malzemeler ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu malzemelerin kullanımı tamiratının ve birleştirme özelliklerinin de bilinmesi gerekliliğini arttırmaktadır. Araştırmacılar buna yönelik çalışmalarında özellikle birleştirme yöntemleri üzerinde çalışmalar yapmış ve farklı birleştirme yöntemleri kullanmışlardır ve istenen optimum mekanik özellikleri sağlayan birleştirmeleri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu alaşımların hafıza özelliğinden faydalanılarak farklı birleştirme yöntemleri ile tasarımlar oluşturmuşlardır. Bu birleştirme yöntemlerinden biri de kaynaklı

*Corresponding author, e-mail:nduzgoren22@posta.pau.edu.tr

To cite this article: N. Düzgören, V. Onar, F. Özen, Investigation of The Weldability of Nitinol, A Shape Memory And Superelastic Ni-Ti Based Alloy, Manufacturing Technologies and Applications,5(2),104-117, 2024.

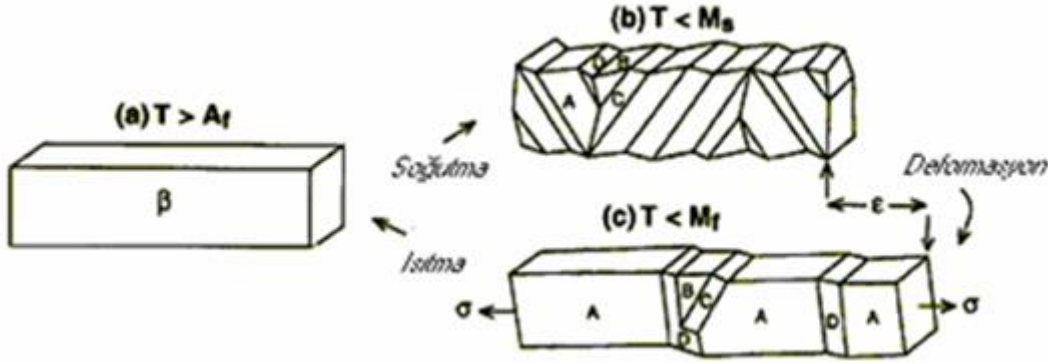
<https://doi.org/10.52795/mateca.1517314>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

birleştirme işlemleridir. Hali hazırda kullanılan farklı kaynak yöntemleri bulunmakla beraber bu alaşım malzemelere taşıdıkları özellikleri koruyabilecekleri kaynak işlemlerinin uygulanması da oldukça önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar ışığında şekil hafıza ve süperelastik özelliğine sahip alaşımlara farklı kaynak yöntemleri uygulanarak birleştirme işlemlerinin gerçekleştirildiği gözlemlenmiş ve bu işlemler neticesinde şekil hafıza özelliklerini tamamen kaybetmedikleri görülmüştür. Bu özelliklere sahip yüksek ısı girdisinden olumsuz etkilenen bu alaşımların kendi içinde ve farklı alaşım malzemelerle birleştirme işlemleri endüstride kullanılabilirlik açısından önem arz ettiği için bu malzemelerin kaynaklanabilirlikleri ve hangi yöntemlerle kaynak işlemlerinin uygulanabildiği üzerine genel bir araştırma yapılmıştır.

2. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR (SHAPE MEMORY ALLOYS)

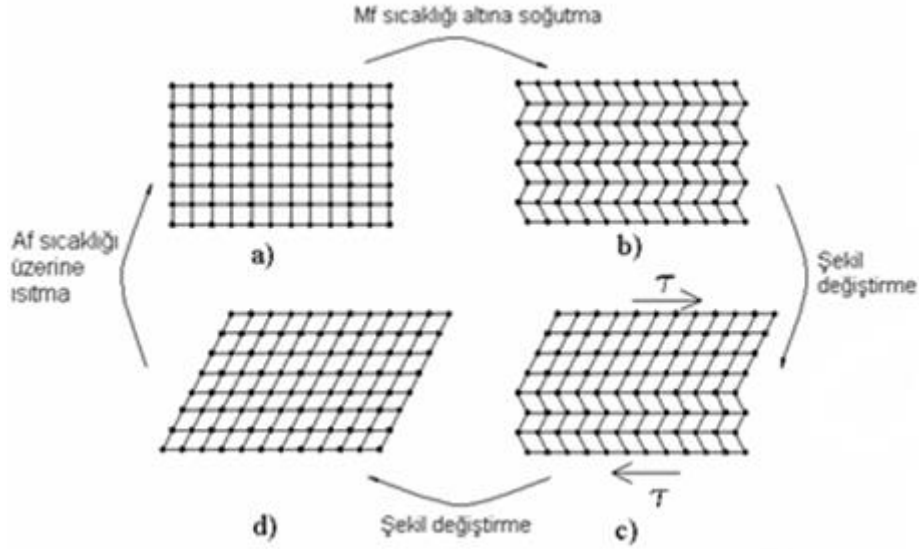
Malzeme biliminde farklı özelliklere sahip birçok alaşım bulunmaktadır. Bu farklı özelliklere sahip alaşımlardan biri de şekil hafızalı ve süperelastiklik özelliğe sahip olan alaşımlardır. Bu alaşımlar Şekil 1'de görüldüğü üzere ısıl ve mekanik işlemlere tabi tutulduğunda kritik sıcaklığın altında ve üstünde iki farklı kristal yapıya sahip olduklarından ilk şekline dönebilen alaşımlardır. Şekil hafıza özelliğine sahip farklı alaşımlar mevcuttur ve bu alaşımlardan Ni-Ti ve Cu esaslı olan alaşımlar üzerine daha yoğun çalışmalar literatüre kazandırılmıştır [1].

Şekil hafızalı alaşımlarda malzemenin ısıl veya mekanik özelliklere maruz kalması ile şekil değiştirerek eski şekline tekrar geri döndüğü, bu şekil değişimlerinin mikro ve makro yapılarıdaki faz dönüşümleri ile olduğu anlaşılmaktadır. Bu faz dönüşümlerinin ısı enerjisinin değişimiyle ve termodinamik yasalara uygun olduğu değerlendirilmiştir. Şekil değişimini kavrayabilmek için martenzitik faz dönüşümünün termodinamiğinin bilinmesi gerektiği bilinmelidir. Şekil hafızalı alaşımların martenzit fazda deformasyona uğraması ve östenit sıcaklığa çıkılıp tekrar soğutulması sonucu ilk şekline dönmesi ve soğutma süresince malzemeden alınan veya ısıtma esnasında malzemeye verilen enerjilerin faz dönüşüm entalpileri kadar olup termodinamik yasalara uygun olduğu bilinmektedir [2].



Şekil 1. (a) Beta fazlı kristal
 (b) Soğutma ve martenzite dönüşümü takiben kendi kendine yerleşen A, B, C ve D ikizlenmiş üniteler
 (c) A ünitesi uygulanan gerilme bitiminde konfigürasyonda baskın olur ve ısıtma anında malzeme beta fazlı yapısına yani orijinal şekline tekrar dönüş yapar [1]

Şekil hafıza etkisi martenzitik dönüşüm ile açıklanmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi alaşım östenit fazdayken soğutulup martenzit faza dönüştüğü anda kalıcı şekil değişimine maruz bırakıldıktan sonra tekrar malzemeye ısı verilip östenit faza ulaşıldığında malzemenin ilk şekline dönüştüğü görülür ve bu termodinamik değişim malzemenin şekil hafıza etkisi olarak tanımlanmıştır [3].



Şekil 2. Şekil hafıza dönüşüm mekanizması (Shape memory conversion mechanism) [3]

Şekil hafızalı alaşımların sıcaklık veya deformasyon etkisiyle faz değişimine uğradıkları ve buna bağlı olarak şekil değiştirdikleri ve bu durumun bu alaşımlara çok farklı avantajlar kazandırdığı gözlemlenmiştir. Bu alaşımların yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençleri gibi özellikleri sebebiyle havacılık sanayisi ve otomotiv sektörlerinin yanı sıra biyomedikal uygulamalarda da kullanıldığı bilinmektedir. İmplant malzemesi olarak kullanılan alaşımlardan canlı sistemleri ile uyumluluk beklenmekte ve bu uyumluluğun aşınma ve korozyon davranışları ile yüzey özellikleri iyi olan malzemelerle sağlanabildiği bilinmektedir. Şekil hafızalı alaşımların kimyasal yapıyı bozmadan yük taşıyıcı biyolojik sistemlerde yüksek mukavemet gösterdiği ve sağlık alanında avantaj sağladığı sonucuna çeşitli araştırmalar ışığında ulaşılabilmektedir [4].

Tablo 1. İki farklı şekil hafızalı alaşımın karşılaştırılması (Comparison of two different shape memory alloys) [5]

Özellikler	Şekil Hafızalı Alaşım Türü	
	Ni-Ti	Cu-Zn-Al
Geri Kazanılabilen Gerinim	%8 (max.)	%4 (max.)
Geri Kazanılabilen Gerilim	400 MPa (max.)	200 MPa (max.)
İşlenebilirlik	Zayıf	Orta
Korozyon Dayanımı	İyi	Kötü
Şekil Bellek Prosesi	Kolay (Göreceli)	Zor (Göreceli)
Çevrim Ömrü	105($\epsilon=0,02$)	10 ² ($\epsilon=0,02$)
	107($\epsilon=0,005$)	105($\epsilon=0,005$)

Yapılan araştırmalar neticesinde Ni-Ti alaşımı haricinde Tablo 1’de belirtildiği üzere farklı şekil hafıza özelliği sergileyen alaşımlarda keşfedilmiştir. Bunlar Cu-Zn-Al, Fe-Mn-Si ve Cu-Al-Ni gibi farklı türlerde şekil hafıza özellikli alaşımlardır ancak korozyon direnci, çevrim ömrü gibi farklı üstün özellikleri sebebiyle endüstride en çok Ni-Ti alaşımları tercih edilmektedir [5].

Tablo 2. Bazı şekil bellekli alaşımlar ve özellikleri (Some shape memory alloys and their properties) [3]

Alaşım	Kimyasal Bileşim	Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (°C)	Yaklaşık Dönüşüm Histerizisi (°C)
Ag-Cd	44-49 %Cd	-190 ~ -50	15
Au-Cd	46.5-50 %Cd	30 ~ 100	15
Cu-Al-Ni	14-14.5 %Al 3-4.5 %Ni	-140 ~ 100	35
Cu-Sn	Yaklaşık %15Sn	-120 ~ 30	
Cu-Zn	38.5-41.5 %Zn	-180 ~ -10	10
Cu-Zn-X (X=Si, Sn, Al)	az %X	-180 ~ 200	10
In-Ti	18-23 %Ti	60 ~ 100	4
Ni-Al	36-38 %Al	-180 ~ 100	10
Ni-Ti	49-51 %Ni	-50 ~ 110	30
Fe-Pt	yaklaşık 25 %Pt	yaklaşık -30	4
Mn-Cu	5-35 %Cu	-250 ~ 180	25
Fe-Mn-Si	32 %Mn, 6 %Si	-200 ~ 150	100

Tablo 2’de görüldüğü üzere Ni-Ti bazlı alaşımlar dışında şekil bellek ve süperelastik özellik taşıyan ve keşfedilen bazı alaşım türleri ve bu alaşımların özellikleri listelenmiştir.

2.1. Ni-Ti Esaslı Şekil Hafızalı ve Süperelastik Alaşım NİTİNOL (Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy NITINOL)

1962 yılında Donanma Mühimmat Laboratuvarında keşfedilişi itibariyle nikel (Ni) ve titanyumun (Ti) neredeyse eşit atomik yüzde bileşiminden oluşan NİTİNOL alaşımı, şekil hafızalı ve süperelastik davranış sergileyen alaşımlardan biridir. Diğer alaşım grupları içerisinde şekil bellek ve süperelastik özelliklerinde en iyi performans gösteren alaşımdır. Isıtma, manyetik veya mekanik yükleme yoluyla orijinal şekillerini plastik olarak bozulmuş bir durumdan geri yükleme veya ezberleme konusundaki dikkate değer genel kapasiteleri nedeniyle, NİTİNOL popülerlik kazanmaya başlamıştır. Tablo 3’te Ni-Ti esaslı NİTİNOL alaşımının genel olarak tüm özellikleri belirtilmiştir. NİTİNOL alaşımı ikili bir alaşım sistemi olup intermetalik eşit atomlu bir bileşiktir. NİTİNOL, mikro-elektromekanik sistem (MEMS) cihazlarında ve diğerlerinin yanı sıra robotik, elektronik, havacılık, biyomedikal, otomotiv alanlarında çeşitli diğer gelişmiş uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli kendine özgü özellikleri nedeniyle kesilmesi zor bir metaldir. NİTİNOL’ü geleneksel işleme ile işlemenin önünde çok sayıda engel vardır [6].

Yapılan araştırmalarda Ni-Ti şekil bellekli alaşımların özellikleri ve kullanım alanları incelemişlerdir. Günümüzde teknolojik alanlarda kullanımı hızla yaygınlaşan şekil hafızalı alaşımlar tıp sektöründe implant uygulamalarında, uzay teknolojileri ve savunma sanayisi alanında ve daha birçok alanda kullanılmaya başlandığı değerlendirilmiştir. NiTi şekil bellekli alaşımlar konusunda Türkiye’de bir başlangıç olarak gerçekleştirilen pirometalurjik üretimin; bu alanda yapılacak Ar-Ge çalışmalarına yardımcı olacağı ve daha ekonomik sistemlere çözüm sağlayacağı değerlendirilmiştir [3].

Angadi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların son 5 yılda küresel araştırma topluluğu tarafından üretimleri için kullanılan çeşitli üretim yöntemleri ve bu malzemelerin karakterizasyon, optimizasyon, mekanik özellikler ve fonksiyonel özellikler hakkındaki tartışmaları incelenmiştir. Nihai olarak bu malzemelerin üretim yöntemleri arasında lazer ateşleme veya yanma sentezi (CS), seçici lazer eritme (SLM), lazer bazlı toz yatağı füzyonu (PBF), mikrolazer metal tel biriktirme (mLMWD) içeren kendi kendine yayılan yüksek sıcaklık

sentezi (SHS), hassas döküm, kısıtlı oluk presleme (CGP), boru işleme, lazer ışını eritme (LBM) ve plazma biriktirme (CGP) oldukları sonucuna ulaşmışlardır [7].

Tablo 3. Ni-Ti esaslı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım NİTİNOL'ün özellikleri (Properties of Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy NITINOL) [8]

Özellik	Değer
Ergime Sıcaklığı (°C)	1300
Yoğunluk (g/cm ³)	6.45
Elektrik Direnci (mikro-ohm.cm)	Yaklaşık
- Östenit	100
- Martenzit	70
Isıl İletkenlik (W/cm. °C)	
Östenit	18
Martenzit	8.5
Korozyon Direnci	300 serisi paslanmaz çeliklere veya titanyum alaşımlara yakın
Young Modülü (GPa)	Yaklaşık
- Östenit	83
- Martenzit	28 – 41
Akma Dayanımı (MPa)	
- Östenit	195 – 690
- Martenzit	70 – 140
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	895
Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	-200 ~110
Dönüşüm Sırasındaki Gizli Isı (kJ/kg.atom)	167
Şekil Hafıza Gerinimi (%)	Maksimum %8.5

Immanuel ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise şekil hafızalı alaşımların imalat süreçleri, mekanik özellikleri, kesme sıvısı türleri ve yaşlanma özellikleri incelenmiştir. Kaplamalı takımların kaplamasız takımlara kıyasla işleme prosesleri sırasındaki sürtünmelerinin kontrol edilebilir olduğu görülmüştür. Ni-Ti şekil hafızalı alaşımın üretimi sırasında kimyasal bileşim; ergime sıcaklığını, arayer elementlerinin çözünürlüğünü ve soğuk işlenebilirliğini etkilediği sonucuna varılmıştır. MQL tipi yağlayıcı uygulamasının bu malzemelerin işlenmesi sırasında takım ömrünün uzamasına yardımcı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [9].

3. Ni-Ti ESASLI ŞEKİL HAFIZALI VE SÜPERELASTİK NİTİNOL ALAŞIMININ KAYNAKLANABİLİRLİĞİ (WELDABILITY OF Ni-Ti BASED SHAPE MEMORY AND SUPERELASTIC NITINOL ALLOY)

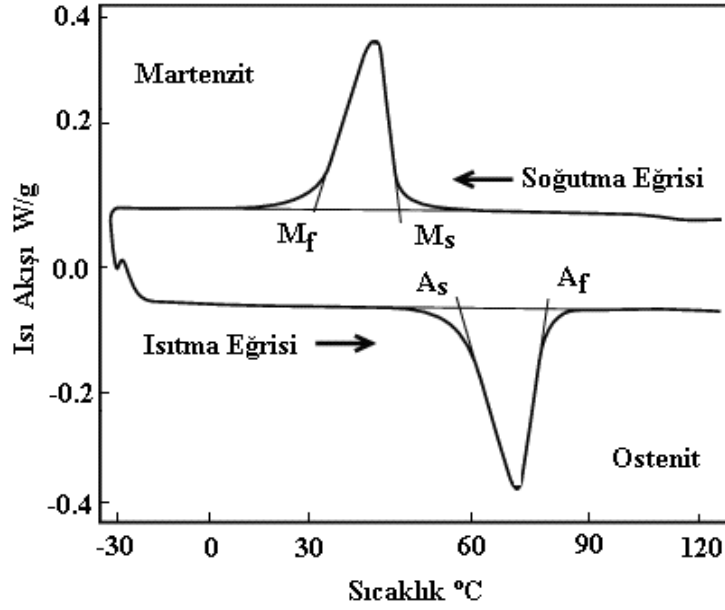
3.1. Metal Malzemelere Uygulanan Genel Kaynak Yöntemleri (General Welding Methods Applied to Metal Materials)

a) Ergitmeli Kaynak Yöntemleri: Oksi-Gaz kaynağı, ark kaynağı, TIG kaynağı, MIG-MAG kaynağı, tozaltı kaynağı, elektrik direnç kaynağı, yakma alın kaynağı, saplama kaynağı, plazma kaynağı, elektron ışın kaynağı, lazer ışın kaynağı, curufaltı kaynağı, termit kaynağı, su altı kaynağı [10].

b) Katı Hal Kaynak Yöntemleri: Difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı, sürtünme-karıştırma kaynağı, patlama kaynağı, ultrasonik kaynak, yüksek frekans kaynağı [10].

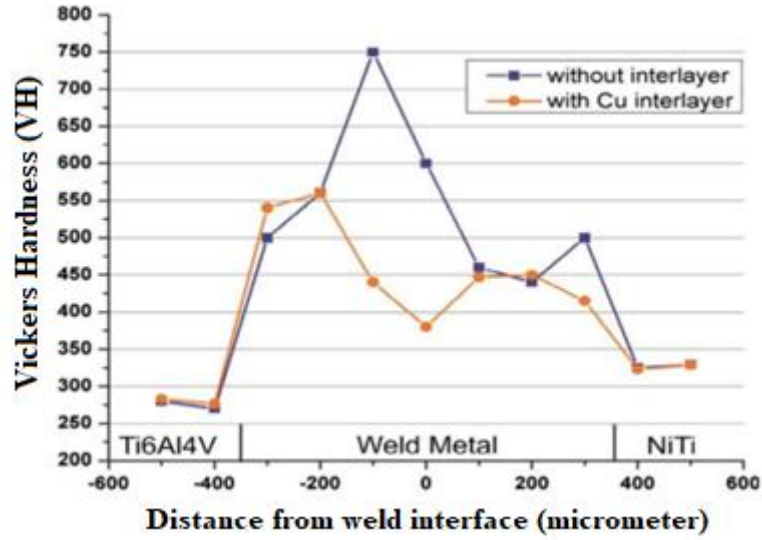
Şekil hafızalı alaşımlardan bazılarının farklı kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabildiği ancak ısı girdisi sebebiyle fiziksel ve mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana geldiği görülmüştür. Şekil 3'te Ni-Ti esaslı alaşım malzemenin faz dönüşüm sıcaklıkları belirtilmiştir. Kaynak işlemi uygulanabilen şekil hafızalı alaşımlardan bazıları ise Fe-30Mn-6Si, Fe-30Mn-6Si-5Cr, Ni-49.6Ti ve Cu-6.94Al-18.86Zn alaşımları olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak uygulanan kaynak

yöntemlerinin lazer kaynağı, TIG kaynağı, elektrik direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri olduğu yapılan araştırmalar neticesinde anlaşılmıştır. [11].



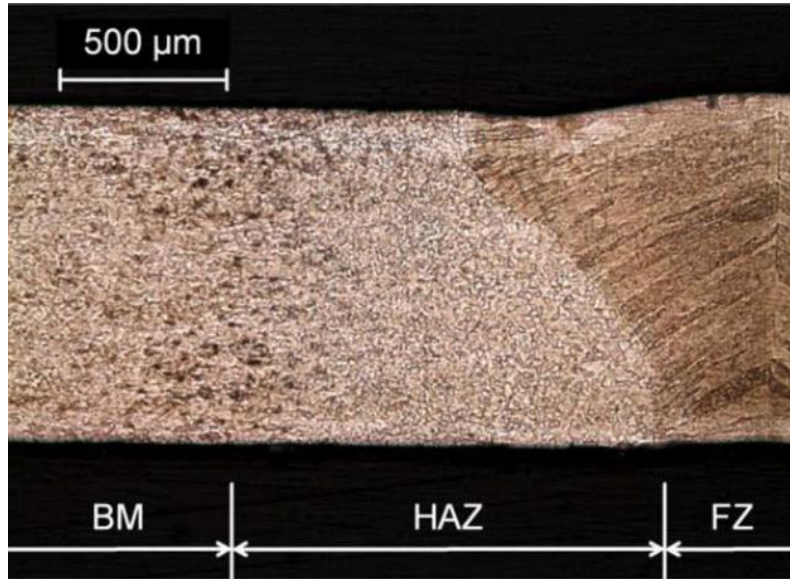
Şekil 3. Ni-Ti Alaşım malzemenin DSC analizi sonucu faz dönüşüm sıcaklık değerleri (Phase transformation temperature values as a result of DSC analysis of Ni-Ti Alloy material) [11]

Araştırmacılar yaptıkları çalışmada şekil hafızalı alaşım malzemelerinden biri olan Ni-Ti alaşımı ile yine Ti esaslı Ti-6Al-4V alaşımı bazı numunelere bakır ara katmanı da eklenerek elektrik direnç nokta kaynak işlemi uygulayarak mikroyapısal ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Yapılan çalışmada 400 µm kalınlığında ve %50.8 Ni'lik bir kimyasal bileşime sahip süper elastik bir Ni-Ti levha kullanılmıştır. Kaynak sonrası malzemenin oda sıcaklığında hala tam ostenitik fazda olduğu ve bu nedenle çekirdek bölgesinde istenmeyen martenzit oluşumu sonucu bozulma olmadığı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Ni-Ti şekil hafızalı alaşım malzemesine yapılan direnç nokta kaynağı işlemi sonucu kaynak bölgesinde ve ITAB bölgesinde herhangi büyük bir kusur gözlemlenmemiş. DSC ile ölçülen dönüşüm sıcaklıkları incelendiğinde kaynak bölgesinde iki farklı tane boyutu dağılımı ve ek bir tepe noktası gözlemlenmiş, mikrosertlik ölçümünde kaynak bölgesinde büyük tane boyutları nedeniyle Şekil 4'te görüldüğü üzere daha düşük bir ortalama sertlik değeri (~340 HV) tespit edilmiştir. Cu ara katmanının eklenmesi çatlamış bir bağlantıyı maksimum 300 MPa'lık çekme mukavemetine sahip bir malzemeye dönüştürdüğü için olumlu değerlendirilmiştir. Ayrıca Cu ara katmanın eklenmesi, kaynak metalinde Ti₂-Cu ve Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşmasına yol açtığı tespit edilmiştir. Nihai değerlendirmede ise malzemenin süperelastik özelliğinin korunduğu tespit edilmiştir [12].



Şekil 4. Cu ara katmanlı ve katmansız uygulanan kaynak işlemi sonucu alınan mikrosertlik profili (Microhardness profile obtained as a result of the welding process applied with and without Cu interlayer) [12]

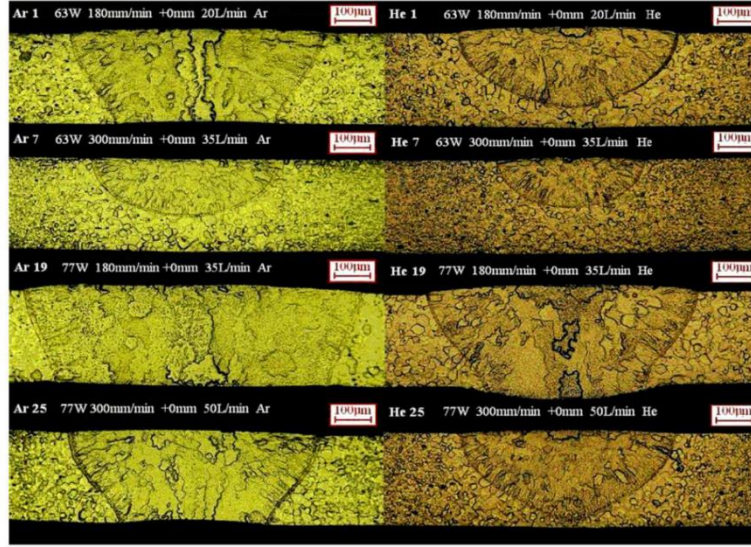
Başka bir çalışmada araştırmacılar süperelastik Ni-Ti esaslı şekil hafızalı alaşım malzemenin birleştirme işleminde Nd: YAG lazer kaynak yöntemi kullanılarak mikroyapı ve mikrosertlik özellikleri hakkında çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalara göre, işlem sürekli dalga boyunda çalışan Nd: YAG lazer kaynağını özel bir hazneye enjekte edilen Argon gazı koruması altında yapmışlardır. Kaynak işlemleri ve çekme deneyleri hadde yönünde uygulanmıştır. Yaptıkları sertlik testleri sonucunda kaynak bölgesindeki değerlerde düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Haddeleme yönünde kaynaklanmış numunelerde diğer yöndeki kaynaklanan numunelere göre daha üstün mekanik mukavemet olduğu tespit edilmiş, kaynak bağlantısının 50 MPa altı gerinimler için süperelastik davranış gösterdiği belirlenmiştir. Kaynak bölgesinde düşük sertlik ve düşük UTS değerleri alınmış, Şekil 5'te görüldüğü gibi ITAB'da yeniden kristalleşme ve tane büyümesi tespit edilmiştir. Fraktografi gözlemleri ile kırılma yüzeyleri incelendiğinde kaynak bölgesinin belirgin sünek olduğu değerlendirilmiştir [13].



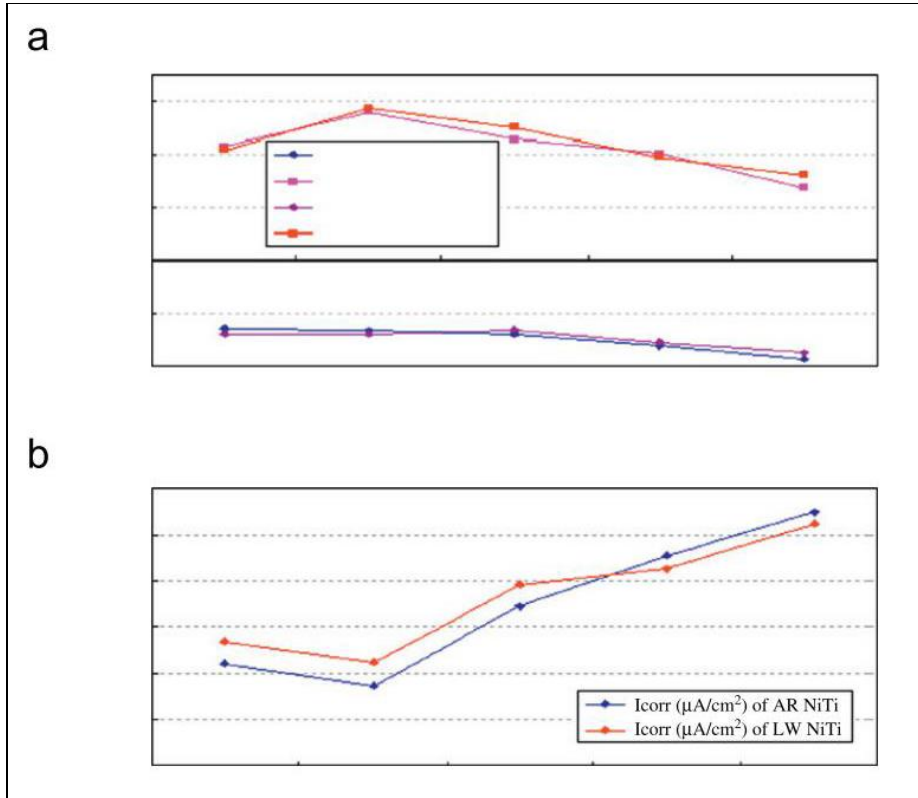
Şekil 5. Haddeleme yönünde yapılan kaynak işlemi neticesinde kaynak bölgesinin mikroskobik görünümü (Microscopic view of the welding area as a result of the welding process in the rolling direction) [13]

Diğer bir çalışmada Chan ve Man, Ni-Ti ince folyo malzemeye Ar ve He gazı korumasında lazer kaynak işlemi uygulayarak kaynak bağlantısının en ve boy oranı üzerindeki etkilerini incelemek için iki L27 taguchi deneyi uygulayarak araştırma yapmışlardır. Taguchi deney tasarımı ile en

büyük en/boy oranına ve arzu edilen mikro alaya sahip tam nüfuzlu kaynak üretmek için optimum parametreler belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinin korozyon özelliklerini iyileştirmek için 573 ila 1173 K arasında değişen kaynak sonrası ısıl işlemlerinin etkisini incelemişlerdir. Şekil 6 ve Şekil 7’de görüldüğü üzere ısıl işlem gören Ni-Ti kaynağının korozyon özelliklerini, yüzey morfolojisini, mikroyapısını ve Ti/Ni oranını analiz etmişlerdir. Kaynak sonrası 573 K’da 1 saat uygulanan ısıl işlemin kaynak bölgesinde en iyi oyuklaşma korozyon direncini sağladığını gözlemlemişlerdir. En büyük en/boy oranına ve arzu edilen mikroyapıya sahip Ni-Ti kaynağını üretmek için (Ar18) 70 W, 300 mm/dk +1.6 mm, 35 L/dk ve Ar koruması altında olduğunu tespit etmişlerdir [14].



Şekil 6. Ar ve He gazı korumalı Ni-Ti kaynaklarının mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of Ar and He gas shielded Ni-Ti welds) [14]

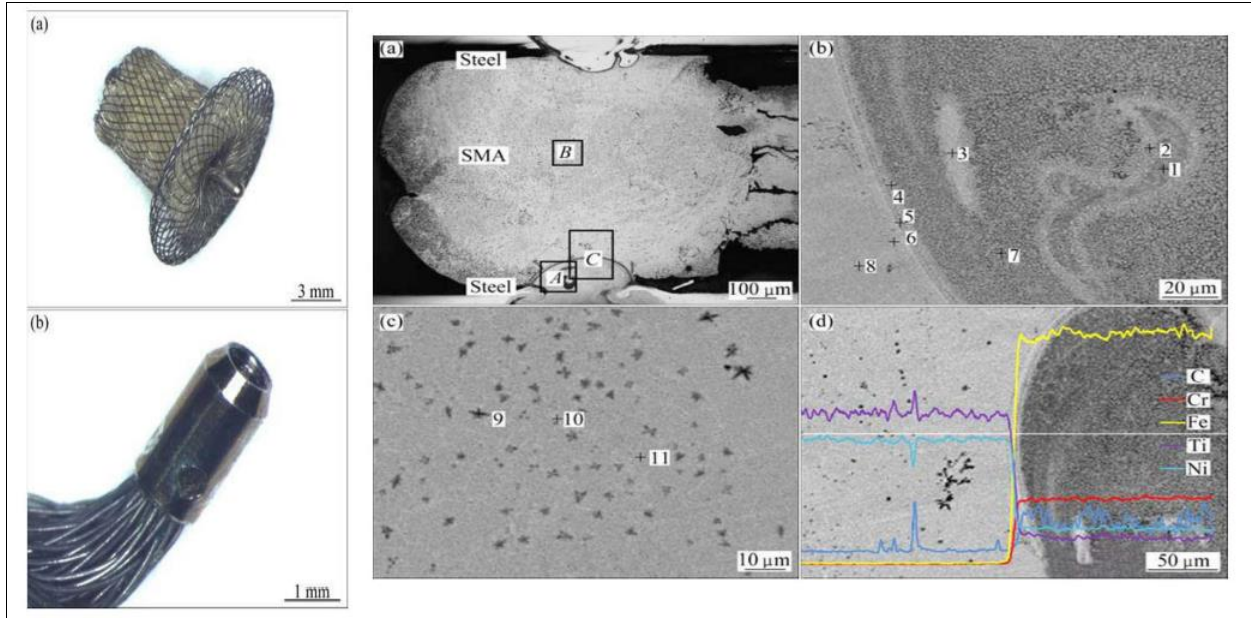


Şekil 7. Optimize edilmiş Ni-Ti kaynaklarının (Ar 18) ve daha önce alınan Ni-Ti numunelerinin ve farklı sıcaklıklarda tavlama sonrasında (a) çukurlaşma potansiyeli (E_{pit}), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve (b) akım yoğunluğu (I_{corr}) değerlerinin grafikleri [14]

Optimize edilmiş Ni-Ti kaynağının kaynak merkezindeki mikroyapının tane boyutu yaklaşık 3 mm olan dentrit yapıda olduğunu belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinin esas olarak B2 fazından ve az miktarda NiB3Ti fazından oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yaşlandırma işlemi olmadan optimize edilmiş kaynak bölgesi ile ana malzemesinin benzer korozyon direnç performansı gösterdiklerini görmüşlerdir. Kaynak bölgesinin korozyon direncinin 573 K'da 1 saat yaşlandırma işlemi ile büyük ölçüde arttığını tespit etmişlerdir [14].

Prabu ve arkadaşları, şekil hafızalı Ni-Ti malzemenin şekil hafıza davranışını koruyarak kaynaklı birleştirme uygulayabilmek için bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma kaynak (FSW) tekniğiyle kaynaklı birleştirme işlemini uygulamışlardır. Yapılan kaynak işlemi sonucunda dinamik yeniden kristalleşme nedeni ile kaynak bölgesinde tane incelmeye olduğu gözlemlenmiştir, numunelere uygulanan çekme testinde 800 ve 1000 rpm dönüş hızında yapılan kaynaklarda süperelastik özelliğin korunduğunu belirlemişlerdir. 800 rpm'de yapılan kaynak işleminin sonucunda kaynak bölgesinde ve ana metalde faz dönüşüm sıcaklıklarının hemen hemen aynı olduğu ve 1000 ile 1200 rpm'de yapılan kaynak işleminde ise kaynak bölgesi yüksek ısıdan etkilendiği için ana malzemeye göre farklı olduğunu gözlemlenmiştir [15].

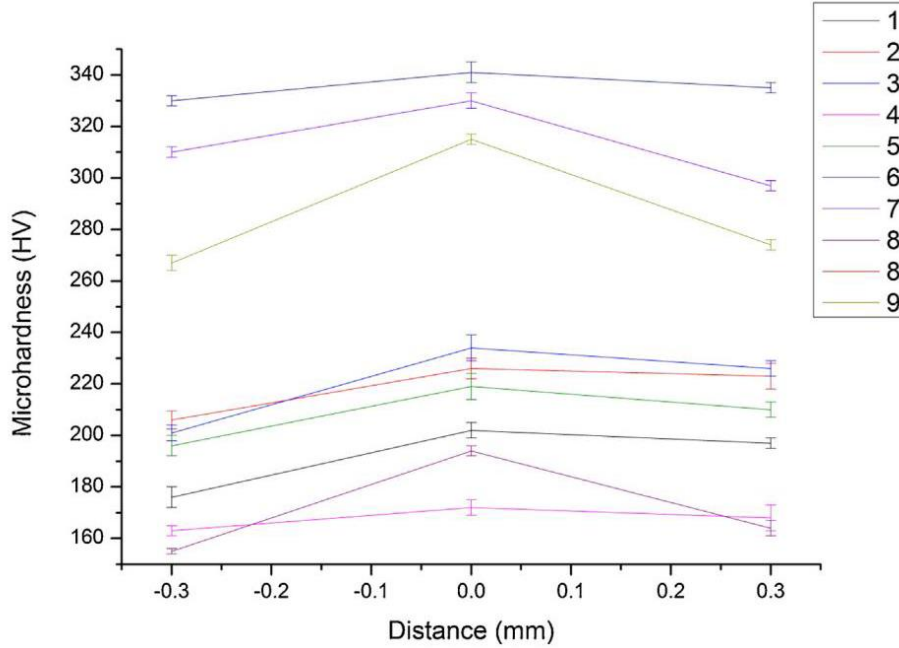
Lü ve arkadaşları yaptıkları çalışmada şekil hafızalı Ni-Ti alaşım malzeme ile medikal tıbbi tıkaçıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılan 316L paslanmaz çelik malzemeye kaynak işlemi uygulamışlardır. Öncelikle şekil hafızalı alaşım malzemedan (Ni-Ti alaşımı) elde edilmiş tel numuneleri TIG arkı ile ergitme işlemi ile birleştirilmiş ardından birleştirme işlemi uygulanan malzeme ile 316L paslanmaz çelik malzemeye lazer ışın punta kaynağı ile kaynaklı birleştirme işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 8'de görüldüğü üzere mikroyapısal olarak incelendiğinde, TiC bileşiklerinin dağılmış olduğu, yapılan lazer ışın nokta kaynağı kaynak bölgesi incelendiğinde kaynağın füzyon sınırı çevresinde TiC bileşiklerinin miktarının büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir NiTi şekil hafızalı alaşımın TIG işleminde TiC ve siyah yıldız fazlarının çoğunun lazer nokta kaynağı ile tane boyutunun artmasına rağmen kaynak sınırı çevresinde kaybolduğu tespit edilmiştir [16].



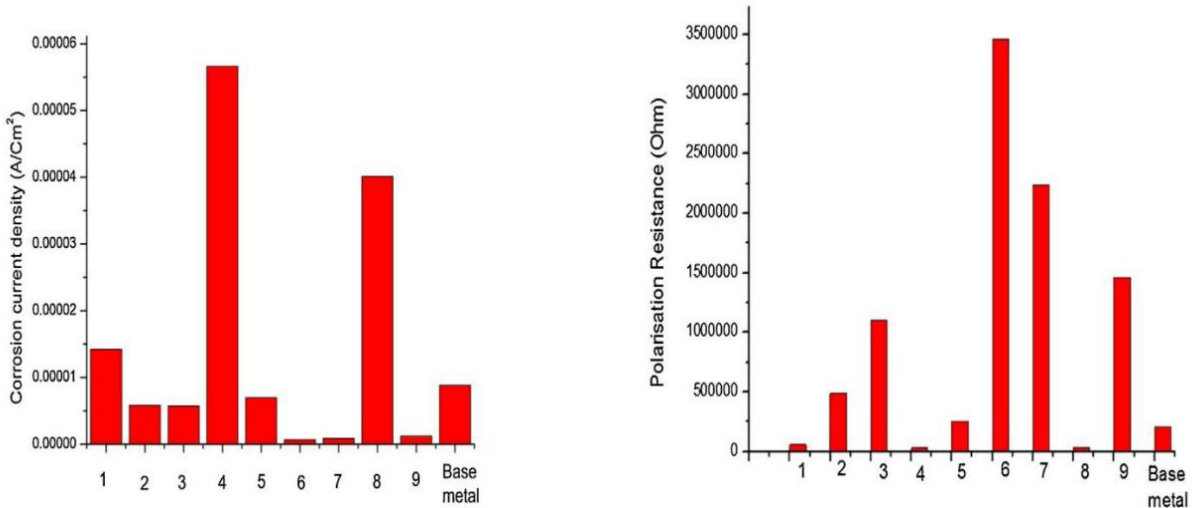
Şekil 8. NiTi SMA telleri ile paslanmaz çelik boru (b) arasındaki tıbbi tıkaçıcının (a) ve lazer nokta kaynağının fotoğrafları ve Lazer nokta kaynağında ve NiTi SMA TIG kaynağında geri saçılan elektron görüntüleri ve çizgi tarama analizi sonuçları: (a) Tam görünüm; (b) A Alanı; (c) B Alanı; (d) Alan C [16]

Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 1 mm kalınlığında Ni-55.64at.%Ti levhaya Yb: YAG lazer kaynak işlemini uygulanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Kaynak işlemi koruyucu Ar gazı ile sabit gaz akışı hızında ayrıca değişen kaynak hızı, gaz üfleme mesafesi ve ışın gücü ile gerçekleştirilmiş, uygulanan 9 deneysel çalışmanın 7'sinde tam penetrasyonun sağlandığı, kaynak hızı ve gücündeki değişikliğin tane yapısının geometrisini büyük

ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Mikroyapıda dentritler tespit edilmiş, koruyucu gaz üfleme mesafesinin yakın olmasının kaynak bölgesinde gözeneklere sebep olduğu belirlenmiştir. Gözeneklerin varlığının Şekil 9'da belirtildiği gibi mikrosertlik değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Kaynak bölgesinin korozyon direnci incelendiğinde ise Şekil 10 incelendiğinde ana malzemeye göre daha iyi korozyon direncine sahip olduğu görülmüş, bunu etkileyen faktöründe Ti/Ni oranındaki değişimden dolayı olduğu yorumlanmıştır. Nihai olarak 900W güç, 2100mm/dk kaynak hızı, -0.5 odak konumu ve 16 mm koruyucu gaz üfleme mesafesinde yapılan kaynak işleminde daha üstün özelliklerde tane yapısı, sertlik ve korozyon direnci olduğu tespit edilmiştir [17].



Şekil 9. 9 adet numuneye ait kaynak parçasının tümünün mikrosertlik değerleri (Microhardness values of all 9 sample weld pieces) [17]



Şekil 10. 9 adet numuneye ait kaynak ve ana metal için korozyon akım yoğunluğu ve polarizasyon direnci (Corrosion current density and polarization resistance for weld and base metal of 9 samples) [17]

Mehrpouya ve arkadaşları tarafından Ni-Ti şekil hafızalı alaşımının lazer kaynak işleminde optimum uygulama parametrelerinin tahmini için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Ni-Ti alaşımının lazer kaynak işlemi malzemenin ısıdan olumsuz etkilenmesinden dolayı zorlu bir işlem olduğu için ısıyı, ısıdan etkilenen bölgeyi ve füzyon bölgesindeki ısıdan etkilenme oranını azaltabilmek, daha iyi bir kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirebilmek ve optimum kaynak parametrelerini

belirleyebilmek için sayısal bir model kullanılmıştır. Deney için 0.5 mm kalınlığında ticari bir Ni54.76Ti alaşımı (üretici tarafından tavlama işlemine tabi tutulmuş) levha kullanılmış ve alın kaynak işlemi uygulanmıştır. Isı transferi analizi için ABAQUS programında sonlu eleman modellemesi işlemi yapılmıştır. Kaynak işleminde optimum lazer parametrelerinin tahmini için yapay sinir ağı (YSA) ve ayrıca eğitim algoritması işlemleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda en yüksek ısı girdisine neden olan lazer kaynağı ve tarama hızı sırasıyla 500 W ve 3 mm/s olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesine ısı girdisinin artmasının nedeni olarak Ni ve Ti elementlerinin yapıdaki miktarını etkilediğini tespit edilmiştir. Ayrıca ısı girdisinin yüksek olmasının kaynak bölgesinin tane yapısının ITAB bölgesinin tane yapısına kıyasla daha büyük taneli olduğu tespit edilmiştir [18].

Sadati ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise lazer kaynağının şekil hafızalı alaşımlar üzerindeki etkisini, kaynak bölgesinin mikroyapısının yanı sıra mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak işlemi için sektördeki en popüler şekil hafızalı alaşım olan Ni-Ti alaşımı kullanılmıştır. Kaynak işlemi için Nd:YAG (PIM-3475, IQL-20) model (1 mm çapından küçük numunelere kaynak işlemi uygulayabilen tek cihaz) kaynak cihazını kullanılmıştır. Sonuç olarak iki Ni-Ti numunenin lazer kaynağı başarılı olarak gerçekleştirilmiş ve mikroyapısal incelemede de küçük ve yayılmış gözenekler gözlemlenmiştir. Yapılan gerilme testinde hadde yönünde yapılan kaynak numunesinde nihai gerilme mukavemetinin ve ek maksimum uzamanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapısal incelemelerde kaynak bölgesinde katılma davranışının Ni-Ti ana malzemenin kaynak bölgesi arayüzünden kaynak merkezi hattına doğru dentritik yapıda olduğu görülmüştür. Ni-Ti ana malzeme ile kaynak bölgesinin karşılaştırılmasında kabul edilebilir gerilme-uzama davranış farkı olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneyinde kaynaklı bağlantı noktasının ayrıca 118 MPa çekme mukavemetine ve %8 gerilmeye ulaştığını tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesi ve civarında yapısal hatalar gözlemlenmiştir [19].

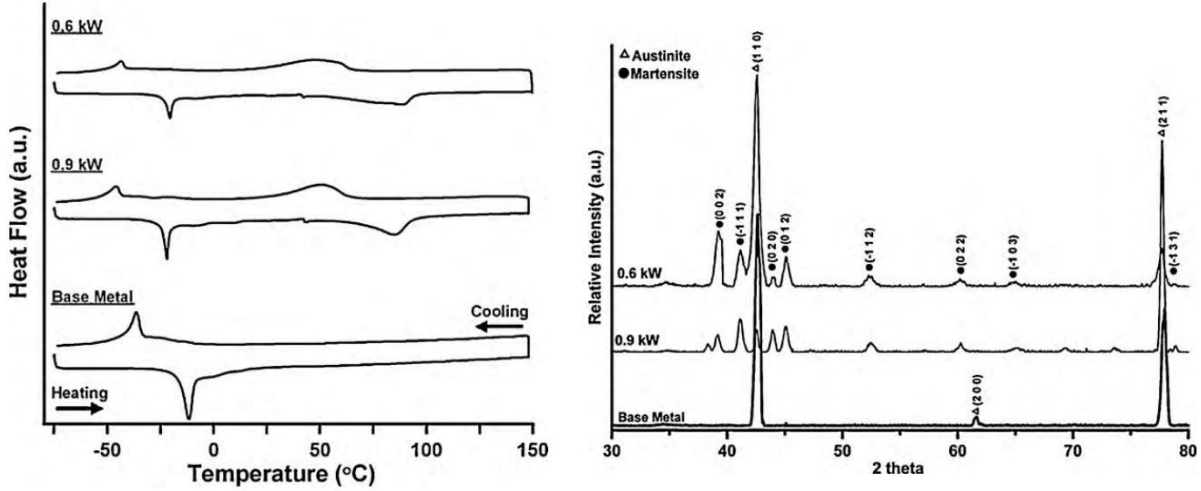
Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların lazer kaynağında gri ilişkisel analiz (GRA) kullanılarak çoklu performans özelliklerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma sunulmuştur. 1mm kalınlığındaki nitinol malzemeye Yb: YAG lazer kaynak işlemi uygulanarak boncuk plaka kaynak işlemi yapılmış, deney parametreleri olarak kaynak hızı, koruyucu gaz üfleme mesafesi, odak konumu ve güç miktarını Taguchi L9 tasarımı temelinde belirlenmiştir. Çoklu performans özellikleri üzerindeki parametrelerin yüzde katkısının hesaplanmasını (ANOVA) varyans analizi yöntemiyle yapılmış, nihai olarak kaynak hızının çoklu performans özellikleri üzerinde en etkili parametre olduğu ve takiben koruyucu gaz üfleme mesafesinin, kaynak gücünün ve odak pozisyonunun etkili oldukları tespit edilmiştir. [20].

Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların iteryum alüminyum granat (Yb: YAG) lazer kaynak işlemi üzerine araştırma yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. İşlem parametreleri taguchi L9 tasarımına dayalı olarak belirlenerek nitinol levha malzemeye boncuk kaynak işlemi yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda çoklu yanıt özellikleri ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu için ortogonal dizili TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Optimize edilmiş parametre kombinasyonu ise; 2100 mm/dk kaynak hızı, 30° koruyucu gaz üfleme açısı, 0mm odak konumu, 940 W kaynak gücü olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlere karşılık gelen çıkış parametreleri ise 1,186mm penetrasyon derinliği, 1.737 mm boncuk genişliği ve 204.5 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Ayrıca bu işlemin çoklu yanıt özellikleri için önemli parametreleri hesaplamak üzere ANOVA işlemi uygulanmış, önerilen TOPSIS ve ANOVA kombinasyonunun optimize parametrelerinin belirlenmesinde daha etkili oldukları tespit edilmiştir [21].

Datta ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada ise 1 mm kalınlığındaki NİTİNOL levhaya fiber lazer ile alın kaynağı işlemi uygulanmış, işlem sonucu malzemenin boncuk geometrisi, mikroyapısı, yeni faz oluşumu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Girdi ve çıktı parametreleri istatistiksel regresyon analizi ile ilişkilendirilmiş, kaynak dikiş alanı minimum tutulup mikrosertlik değerinin ana malzemeninkinden sapmasını azaltmak için kısıtlı bir optimizasyon problemi formüle edilmiştir. GWO, CA, BO ve GA gibi dört metasezgisel optimizasyon tekniği kullanılarak optimum girdi ve çıktı parametreleri elde edilmiştir. Nihai olarak ana malzemenin,

ITAB'dan kaynak dikişine doğru tane irileşmesi nedeniyle mikrosertlik değerinde azalma olduğu görülmüş, kaynak bölgesindeki ortalama mikrosertlik 242 ila 296 HNV0.05 arasında, ana malzemenin mikrosertlik değeri ise 350 HNV0.05 olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde Ti₂Ni ve Ni₃Ti gibi farklı intermetalik bileşikler görülmüş ve bu durumun mukavemeti azalttığı, kırılma modunun ise sünekten sünek ve kırılma kırılma karışımında olduğu sonucuna varılmıştır. Girilen parametreler ve sonuçlar ışığında düşük güç, yüksek tarama hızı ve odak konumunun tane boyutu büyümesini en az olarak ve mikrosertlik değerindeki düşüşünde en az olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan dört metasezgisel işlemten en iyi çözüm yeteneğini BO, en yavaş olanı ise CA olduğu belirlenmiştir [22].

Khan ve Zhou tarafından yapılan çalışmada, NİTİNOL'un (Ni-49.2 at. %Ti) darbeli Nd:YAG lazer kaynak işleminden kaynaklanan yerel faz dönüşümü ile ilişkili bazı önemli bulguları detaylandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 0.37 mm kalınlığında ticari olarak temin edilebilen SE508 Nitinol şerit kullanılmıştır. Numunelere 1.06 m dalga boyuna sahip bir ışın üreten Myachi Unitek darbeli Nd:YAG lazer sistemi (Model LW50 A) kullanılarak kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi yekpare levhalar üzerinde yapılmış, oksidasyonu önlemek için alt ve üst argon koruması altında kaynak işlemi uygulanmıştır. Akış hızı olarak önceki çalışmalar ışığında 30 CFH'lik bir akış hızını seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda lazerin nitinol dönüşüm sıcaklığı üzerindeki etkileri analiz edilmiş, Şekil 11 incelendiğinde DSC sonuçlarına göre kaynak bölgesinde yerel faz dönüşümüne ek yüksek sıcaklık zirvesi ortaya çıktığı belirlenmiştir. Şekil 11 incelendiğinde XRD analizi ile ana metalde yalnızca östenit fazı görülmüş ve kaynak bölgesinde ise martenzit pikleri olduğu tespit edilmiştir. TEM gözlemlerinde oda sıcaklığında işlenmiş/erimiş bölgede martenzitin varlığının desteklendiği görülmüştür. Nihai olarak yapılan bu işlemin nitinolün çekme özelliklerini değiştirdiği belirlenmiştir [23].



Şekil 11. Baz ve işlenmiş metal için DSC taramaları ve XRD verileri (DSC scans and XRD data for base and wrought metal) [23]

Zoeram ve arkadaşı tarafından yapılan çalışmada Ti-6Al-4V alaşım malzeme ile NİTİNOL şekil hafızalı malzemelerin lazer kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği araştırılmış, kaynak işlemi için Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi (Ni-50.7 at%Ti) olan ve 1 mm kalınlıkta Ti açısından zengin Nitinol malzeme kullanılmış, lazer kaynağı dalga boyu 1.064µm olan bir SW-1 darbeli ND:YAG lazer makinesi kullanılarak kaynak işlemi uygulanmıştır. Bu iki farklı malzemenin kaynağında kaynak bölgesinde enine çatlakların oluşması sebebiyle düşük mukavemet ve sünek yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle kırılma fazlarının oluşumunu azaltmak ve müteakip çatlakları ortadan kaldırmak ve metalin kimyasal bileşimini değiştirmek amacıyla ana malzemeler arasına 75 µm kalınlığında bir bakır ara katman yerleştirilerek kaynak işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak kaynak işlemi bakır ara katmanı ile başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Ana metaller arası farklı genleşme katsayıları ile birlikte kaynak metalinde Ti₂Ni kırılma fazının oluşumunun ve kaynak bölgesinde enine çatlakların oluşumunun bağlantı bölgesinde hatalara yol

açtığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki bu Ti₂Ni fazının azalmasında kullanılan bakır levhanın etkisinin çok fazla olduğu belirlenmiştir. Bu bakır katmanının kullanılması ile çatlaklar oluşmuş kaynak bölgesinin özellikleri iyileştirilerek maksimum 300 MPa'lık çekme mukavemetine sahip kaynak bağlantısına dönüştürdüğü saptanmıştır. Bakır ara katmanının eklenmesi kaynak metalinde Ti₂-Cu ve Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşmasını sağladığı bu sebeple bir bakır ara katmanının eklenmesinin kaynak metalinin sertliğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V/Cu/NiTi malzemelerin kaynaklı birleştirme işlemiyle Ti₂Cu ve ayrıca Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşumunun çekme numunelerinin gevrek kırılmalarının kaynağı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [24].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde farklı alanlarda kullanılan üstün özelliklere sahip şekil hafızalı ve süperelastik malzemelerin farklı birleştirme yöntemlerinden biri olan ve malzemenin özelliklerini etkileyen yüksek ısı girdisinin olduğu ve belirgin üstün özelliklerinin belirli ölçüde korunmak suretiyle kaynak işlemlerinin başarıyla uygulanabildiği ve verim alındığı görülmüştür. Şekil bellek özelliği ile süperelastik özelliklere sahip farklı alaşım gruplarına kaynak işlemi uygulanabilmekle beraber bu alaşım türlerinden biri olan ve daha üstün özelliklere sahip Ni-Ti esaslı ticari adı ile NİTİNOL alaşımına ergitmeli ve katı hal kaynak yöntem türlerinin başarılı olarak uygulanabildiği ve olumlu sonuçlar alındığı sonucuna yapılan literatür araştırmalarından ulaşılmıştır. Hâlihazırda uygulanabilen kaynak yöntemleri ele alındığında ise öne çıkan yöntemler ergitmeli kaynak türlerinden olan lazer ışın kaynağı, elektrik direnç nokta kaynağı, TIG kaynağı olup, ayrıca bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynak işlemidir. Uygulanan kaynaklı birleştirme yöntemlerindeki en önemli problem yüksek ısı girdisi ve dolayısıyla malzemenin mikroyapısal özelliklerindeki değişimdir. Ancak uygulanan yöntemlerde ısı girdisi kritik seviyenin altında olduğunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca kaynak birleştirmelerinde özellikle kaynak bölgesinde oluşan faz yapılarından dolayı çatlaklar oluştuğu ve bu durumun mukavemeti olumsuz etkilediği görülmüş, bazı çalışmalarda bu durumun önüne geçmek için bakır ara katmanı kullanılarak kaynak bölgesindeki çatlak oluşumu sınırlandırılarak daha sünek bir yapı elde edilmek suretiyle mukavemetin arttığı tespit edilmiştir. Nihai olarak henüz uygulanmayan farklı kaynak yöntemleri bulunmaktadır, ısı girdisinin kritik seviyenin üzerine çıkmadan kontrollü bir şekilde uygulanması ile optimum parametreler belirlenerek şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemelere kendine has üstün özelliklerini kaybetmeden kendi içinde ve farklı malzeme grupları ile kaynak işlemleri uygulanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Akdoğan, K. Nurseven, Şekil hafızalı alaşımlar, Mühendis ve Makine, 44(521): 35-44, 2003.
2. Ö. Çakmak, M. Kaya, Akıllı malzeme şekil hafızalı alaşımların termodinamiği, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(2): 541-555, 2017.
3. S. Dilibal, N. Sönmez, H. Dilibal, NiTi şekil bellekli alaşımlar (ŞBA) ve teknolojik kullanım alanları, Politeknik Dergisi, 20(3): 623-627, 2017.
4. Z.D. Yakıncı, Şekil hafızalı alaşımların sağlık alanındaki uygulamaları, İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi, 3(2): 1-6, 2015.
5. H.O. Erdoğan, NiTi şekil bellekli alaşımların süperelastik özelliklerinin termo-mekanik işlemlerle süperelastik özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
6. N. Besekar, B. Bhattacharyya, Experimental investigation and characterization of NiTiInol shape memory alloy during wire electrochemical machining, Journal of Manufacturing Processes, 81: 346-361, 2022.
7. S.V. Angadi, S.H. Nayak, G.S. Ranjith Kumar, A. Buradi, S.P.S. Yadav, Recent advancements in the manufacture of nitinol including its characterization and properties, Materials Today: Proceedings, 62: 9-17, 2022.
8. K. Nurveren, NiTi alaşımında şekil hafıza etkisinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2008.

9. I.D. Immanuel, M. Gangariu, D. Arulkirubakaran, R. Ralkia Razalin Prince, T. Debnath, D. Palanisamy, Fabrication, mechanical testing, machining of shape memory alloy-A review, *Materials Today: Proceedings*, 68(5): 1718-1723, 2022.
10. N. Kahraman, B. Gülenç, *Modern Kaynak Teknolojisi*, 1. baskı, Epamat Basım Yayın Promosyon San. Ltd. Şti., Ankara, 2016.
11. B. Kurt, N. Orhan, Şekil hafızalı alaşımların kaynak edilebilirliği, *Doğu Anadolu bölgesi araştırmaları* 4, 2(1): 1-5, 2003.
12. A. Shamsolhodaei, A. GhateiKalashami, A. Safdel, A. R. H. Midawi, M. A. Elbestawi, Resistance spot welding of NiTi shape memory alloy sheets: Microstructural evolution and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, 81: 467-475, 2022.
13. L. Alberty Vieira, F.M. Braz Fernandes, R.M. Miranda, R.J.C. Silva, L. Quintino, A. Cuesta, J.L. Ocana, Mechanical behaviour of Nd:YAG laser welded superelastic NiTi, *Materials Science and Engineering A*, 528: 5560-5565, 2011.
14. C.V. Chan, H.C. Man, Laser welding of thin foil nickel–titanium shape memory alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 49: 121-126, 2011.
15. S.S. Mani Prabu, H.C. Madhu, C.S. Perugu, K. Akash, R. Mithun, P.A. Kumar, S.V. Kailas, M. Anbarasu, I.A. Palani, Shape memory effect, temperature distribution and mechanical properties of friction stir welded nitinol, *Journal of Alloys and Compounds*, 776: 334-345, 2019.
16. S. Lü, Z. Yang, H. Dong, Welding of shape memory alloy to stainless steel for medical occluder, *Transactions of nonferrous metals society of china*, 23: 156-160, 2013.
17. T. Deepan Bharathi Kannan, A.R. Shegokar, P. Sathiya, T. Ramesh, Parameter design And analysis in laser welding of Nitinol shape memory alloy, *Materials Today: Proceedings*, 4: 8883-8891, 2017.
18. M. Mehrpouya, A. Gisario, H. Huang, A. Rahimzadeh, Numerical study for prediction of optimum operational parameters in laser welding of NiTi alloy, *Optics and Laser Technology*, 118: 159-169, 2019.
19. M.E. Sadati, Y. Javadi, Investigation of mechanical propertiesin welding of shape memory alloys, *Procedia Engineering*, 149: 438-447, 2016.
20. T. Deepan Bharathi Kannan, T. Pavani Priya,, P. Sathiya, T. Ramesh, Metallurgical Aspects and Optimisation of Yb: YAG Laser Welded NiTinol Shape Memory Alloy, *Materials Today: Proceedings*, 4: 1268-1276, 2017.
21. T. Deepan Bharathi Kannan, P. Sathiya, T. Ramesh, Experimental investigation and characterization of laser welded NiTinol shape memory alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 253-261, 2017.
22. S. Datta, M.S. Raza, A.K. Das, P. Saha, D.K. Pratihari, Experimental investigations and parametric optimization of laser beam welding of NiTinol sheets by metaheuristic techniques and desirability function analysis, *Optics and Laser Technology*, 124: 105982, 2020.
23. M.I. Khan, Y. Zhou, Effects of local phase conversion on the tensile loading of pulsed Nd:YAG laser processed Nitinol, *Materials Science and Engineering A*, 527: 6235-6238, 2010.
24. A.S. Zoeram, S.A.A. Akbari Mousavi, Laser welding of Ti–6Al–4V to Nitinol, *Materials and Design*, 61: 185-190, 2014.