





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Titanyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Şekillendirilebilirliğine Sıcaklığın Etkileri

 Mehmet Yasin DEMİREL^{a,*},  İbrahim KARAAĞAÇ^b

^a *Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, TÜRKİYE*

^b *İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mehmetyasin.demirel@tai.com.tr

DOI: 10.29130/dubited.853833

ÖZET

Titanyum alaşımları sahip oldukları üstün mekanik özellikleri sebebiyle havacılık ve medikal endüstrileri başta olmak üzere çok sayıda sektörde kullanılmaktadır. Ancak titanyum malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksekliği ve sınırlı şekillendirilebilirlikleri bir dezavantaj olarak kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Titanyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerini artırmak için faz durumuna ve alaşım oranına göre uygun sıcaklık ve süreyle malzemeye ya da şekillendirme kalıbına müdahale etmek gerekebilmektedir. Bu çalışmada; titanyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerini artırmak için yapılan çalışmalar, kullanılan ekipmanlar ve geliştirilen yöntemler ile sıcaklığın alaşımın mikroyapısına etkileri farklı faz gruplarına göre derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Titanyum alaşımları, Isıl işlem, Mikroyapı, Şekillendirilebilirlik*

The Effects of Temperature on Microstructure and Formability of Titanium Alloys

ABSTRACT

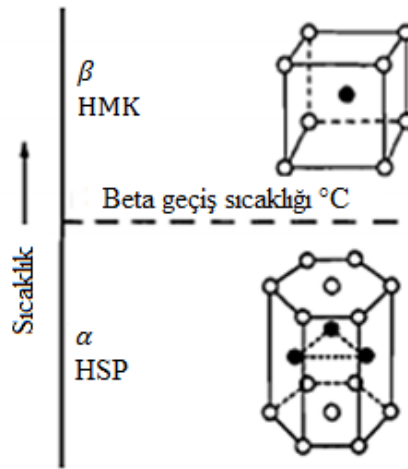
Titanium alloys are used in many sectors, especially in the aviation and medical industries due to their superior mechanical properties. However, the high production costs and limited formability of titanium materials are a disadvantage limit their usage areas. In order to increase the formability of titanium alloys, it may be necessary to interfere with the material or the forming die at the appropriate temperature and time according to the phase state and alloy ratio. In this study; the studies carried out to increase the formability of titanium alloys have been reviewed in terms of the effects of temperature on the microstructure, the used equipment and the developed methods according to different phase groups.

Keywords: *Titanium alloys, Heat treatment, Microstructure, Formability*

I. GİRİŞ

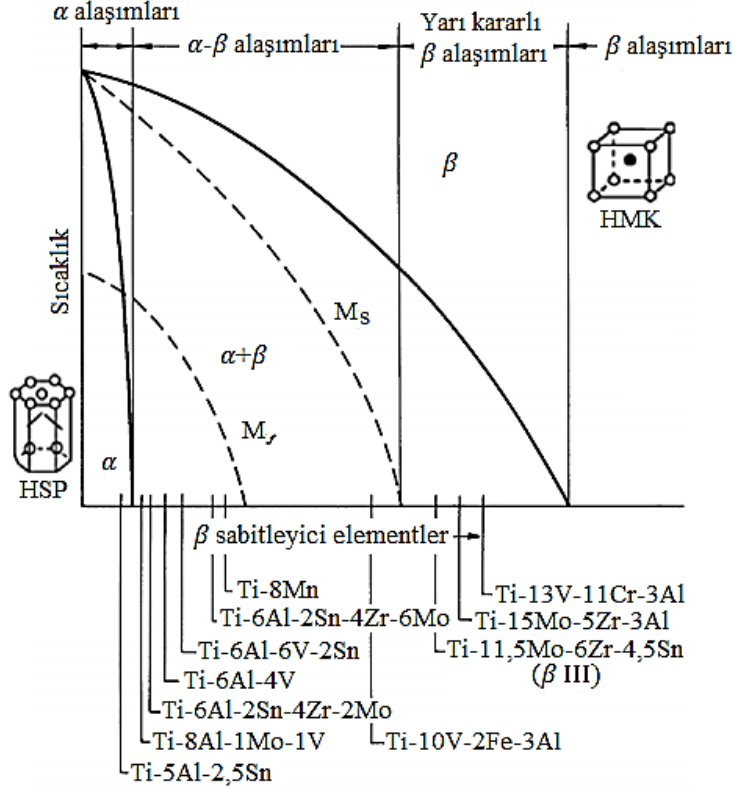
Titanyum alaşımları; sahip oldukları düşük özgül ağırlık değerlerine rağmen yüksek mekanik özellikleri, korozyon ve aşınma dirençleri sebebiyle başta havacılık olmak üzere medikal, petrokimya ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, titanyumun yüksek oksijen ilgisinden dolayı vakum arkı gibi kontrollü bir atmosfer gerektiren pahalı üretim prosesleri bu malzemenin satın alınabilirliğini de sınırlandırmaktadır [1].

Titanyum malzemeler farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapılara ve fazlara sahiptir. Titanyum malzemeler, düşük sıcaklıklarda hegzagonal sıkı paket kristal yapıdaki (HSP) α fazındayken, 882 °C sıcaklığın üzerinde hacim merkezli kübik yapıdaki (HMK) β fazına geçmektedir. HSP α titanyum ve HMK β titanyumun kristal yapısı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir [2].



Şekil 1. Titanyum mikroyapısının sıcaklıkla değişimi

Titanyum alaşımları mikroyapılarına bağlı olarak, α -alaşımları, β alaşımları ve $\alpha+\beta$ alaşımları olarak üç temel kategoride sınıflandırılmaktadır. $\alpha \rightarrow \beta$ dönüşüm sıcaklığının artırılması ya da azaltılmasına etki eden elementlerin ilavesiyle titanyum alaşımları oluşturulmaktadır. Alaşım elementlerinin faz değişimine etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu alaşım elementleri, nötr, α veya β sabitleyiciler olarak ayrılmaktadır. α alaşımları, ticari saf (CP) titanyumları ve α fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O, N, C gibi elementler ile Sn, Zr gibi nötr elementler içeren alaşımlardır. CP titanyumlar saf titanyuma yakın mekanik özellikler göstermektedirler. Bu alaşımlara çok az miktarda β fazı sabitleyicileri (Mo, V gibi) eklendiğinde yakın α fazı olarak tanımlanan yapı oluşmaktadır. Bu faz, α fazlı titanyuma yakın özellikler sergilemektedir. Ancak farklı olarak, bu alaşımlar, çalışma sıcaklığı 400-520 °C'ye varan ortamlarda da kullanılabilirler. Diğer bir grup olan $\alpha+\beta$ alaşımları, her iki fazın da varlığından dolayı daha yüksek mukavemet özelliklerine sahiptirler. Ti-6Al-4V alaşımı en çok bilinen $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olmasının yanı sıra üretilen titanyum alaşımlarının %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Diğer yandan, mikroyapısında önemli miktarda β fazı sabitleyicileri içeren β titanyum alaşımları, son otuz yılda kullanım alanlarının çok fazla artmasından dolayı endüstride artan ilgi konusu olmuştur. Bu alaşımlar, $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarına kıyasla daha iyi şekillendirilebilme ve sertleştirilebilme özellikleri nedeniyle, giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. En sık kullanılan β alaşımı Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, havacılık ve uzay uygulamalarında daha ince sac metal gereksinimlerini çözmek için Ti-6Al-4V alaşımının alternatifi olarak geliştirilmiştir [3]-[10].



Şekil 2. Titanyum faz diyagramı

Mühendislik malzemelerinde, genellikle artan mukavemet değerleri ile birlikte şekillendirilebilirlik önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum sahip oldukları olumlu özelliklere rağmen, malzemelerin kullanımını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak, şekillendirilebilirliği, mekanik özellikleri ve yapısal kararlılığı artırmak amacıyla titanyum alaşımlarına ısıl işlem prosesleri uygulanmaktadır. Bu işlemler; gerilim giderme, tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma olarak sıralanabilmektedir [11], [12].

Titanyum ve titanyum alaşımlarının ısıl işleme tepkisi, metalin bileşimine ve alaşım elementlerinin kristal yapının dönüşümü üzerindeki etkilerine bağlı olmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli alaşımlar farklı çalışma koşulları ve mekanik özellikler için geliştirildiğinden, her ısıl işlem prosesi tüm titanyum alaşımlarına uygulanamamaktadır [13].

Titanyum alaşımları, (CP titanyum, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn ve Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo gibi) sınırlı bir ölçüde soğuk şekillendirilebilmektedir. Diğer titanyum alaşımlarının soğuk şekillendirilmesi genellikle aşırı geri esnemeye neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için soğuk şekillendirme sonrası yaşlandırma veya gerilim giderme proseslerinin uygulanması ya da sıcak şekillendirme yapılması gerekmektedir. Sıcak şekillendirme, genellikle 595 ila 815 °C arasında değişen sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Bu proses, malzemenin daha kolay deforme olmasını sağlamakta ve aynı zamanda deformasyon esnasında oluşan gerilmeleri de gidererek geri esneme miktarını en aza indirmektedir [14].

Tavlama ve gerilim giderme işlemleri korozyon direncini artırma ve çarpılmaları önlemenin yanı sıra şekil verme öncesi malzemeyi hazırlamak amacı ile de uygulanabilmektedir. Bazı titanyum ve alaşımları için önerilen tavlama ısıl işleminin parametreleri Tablo 1' de verilmiştir [15].

Tablo 1. Bazı titanyum alaşımları için önerilen tavlama ısı işlemi parametreleri

| Alaşım | | Tavlama Isıl İşlem Parametreleri | | |
|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------|------------------|
| İç Yapı | Türü | Sıcaklık (°C) | Zaman (Saat) | Soğutma Ortamı |
| α | Saf titanyum | 660-770 | 0,1-8 | Havada |
| | Ti-5Al-2,5Sn | 730-850 | 0,16-4 | Havada |
| $\alpha+\beta$ | Ti-4Al-4V | 660-770 | 1-8 | Havada / Fırında |
| | Ti-6Al-4V | 715-850 | 1-8 | Havada / Fırında |
| β | Ti-13V-11Cr-3Al | 720-800 | 0,16-1 | Havada / Suda |

Isıl işlem proseslerinde diğer önemli bir nokta da titanyumun oksijene olan duyarlılığıdır. Özellikle 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda alaşım yüzeyinde kalın, sert ve kırılğan olan bir kontaminasyon tabakası oluşmaktadır. Bu kontaminasyon tabakasına α -case adı verilmektedir. Bu sert ve kırılğan tabaka istenmeyen bir durumdur ve materyalin gerilme direnci ile şekillendirilebilirliğini azaltmaktadır [16].

Bu çalışmada; sıcaklığın titanyum alaşımlarının şekillendirilebilirliğine ve mikroyapılarına etkileri farklı fazlar açısından sınıflandırılarak incelenmiştir.

II. TİTANYUM ALAŞIMLARINDA ISIL İŞLEM VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK UYGULAMALARI

Ti alaşımlarına farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan ısıl işlemlerin, şekillendirilebilirliğe ve mikroyapıya etkileri araştırılmış, literatürde yapılan çalışmalar faz tiplerine göre sınıflandırılarak aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

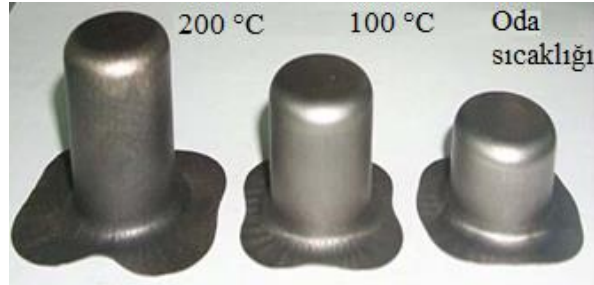
A. α FAZİ ÇALIŞMALARI

α titanyum alaşımları, CP titanyum, α alaşımları ve yakın α alaşımları olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır. Al ve Sn gibi α sabitleyicileri içeren α alaşımları, ortam sıcaklıklarında tek fazlı yapıdadırlar. Bu sebeple, çekme mukavemetleri diğer fazlara nispeten düşük olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek termal stabiliteye ve tokluğa sahiptirler. α titanyum oda sıcaklığında mükemmel sünekliğe ve şekillendirilebilirliğe sahiptir. Ancak, bazı CP titanyum çeşitleri, yüksek seviyelerde geri esnemenin oluşmasına sebep olan pekleşme oranları nedeniyle genellikle soğuk şekillendirilmektedir. Bu durum, sıcak şekillendirme yoluyla potansiyel olarak önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Yakın α alaşımları, mikroyapıda %2 seviyelerinde β fazı sabitleyicileri ve silis çökeltileri oluşturmak için % 0.5'e kadar Si içermektedirler. Bu alaşımlar, alaşımsız titanyum ve α alaşımlarına kıyasla daha yüksek çekme dayanımına sahiptirler ve 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tüm titanyum alaşımları arasında en yüksek sürünme direncini sergilemektedirler [17], [18].

CP titanyumun sıcak şekillendirilmesi üzerine çalışan Öztürk vd., çalışmalarında 0,6 mm kalınlığına sahip DIN WL 3.7024 sac malzemeyi elektrik rezistansı kullanarak ısıtmışlardır.

Numuneler 600, 650 ve 680 °C'de ısıtıldıktan sonra endüstriyel bir presle sıcak olarak şekillendirilmiştir. Mikroyapı ve faz değişimlerini incelemek için tane boyutu ölçümü ve XRD analizi yapmışlardır. Sonuçlar, belirtilen sıcaklık aralığında hiçbir mikroyapısal değişikliğin meydana gelmediğini göstermiştir. Bununla birlikte, küçük tane büyümesi ve titanyum oksit izleri gözlenmiştir. Şekillendirme sonrası geri esnemenin etkin bir şekilde ortadan kaldırılmasıyla, endüstriyel boyutta parça üretimi için elektrik dirençli ısıtma yönteminin uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir [19].

CP titanyum sac numunelerin şekillendirilebilirliğinin deneysel olarak araştırıldığı çalışmalarda Chen vd. 0,5 mm kalınlığındaki Grade 1 CP titanyum numuneleri oda sıcaklığından 300°C'ye kadar çeşitli sıcaklıklarda ısıtmışlar ve şekillendirme sınırlarını belirlemek için V-bükme ve derin çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş ve malzemenin oda sıcaklığında daha yüksek bir akma gerilimine ve daha az bir uzama değerine sahip olduğu, ancak 300 °C'ye kadar ısıtıldığında uzama miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Şekillendirme sınır oranı ve çekme derinliği değerlerinde, oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar olan aralıkta önemli bir artış olmadığı, 100 °C'den 200 °C'ye sıcaklık arttıkça, bu değerlerin hızla arttığı gözlemlenmiştir. Şekillendirilen numunelerin çekme derinliği değişimi Şekil 3'te verilmiştir [20].



Şekil 3. CP titanyum malzemelerin sıcaklığa göre derin çekilebilirliğindeki değişim

CP malzemelerin araştırıldığı bir diğer çalışmada da, Liu ve Chou Grade 4 CP titanyum sac malzemeye iki sıcaklıklı derin çekme prosesi uygulamışlardır. 25, 100, 200, 300 ve 400 °C'de ısıtılmış kalıba yerleştirilen numuneler, derin çekme işlemi sırasında su ile soğutulan zımba ile şekillendirilmişlerdir. Şekillendirme sınırı incelendiğinde, kalıp sıcaklığının ortam sıcaklığından 400°C'ye çıktığında çekilmiş numunelerin yüksekliğinin yaklaşık iki kat arttığını gözlemlemişlerdir [21].

Ayrıca, CP titanyum malzemelerin derin çekilebilirliği sonlu elemanlar yöntemiyle de incelenmiştir. Port vd., kozmetik endüstrisi için tasarlanmış CP titanyum malzemenin bir kapağın derin çekme ile şekillendirilebilirliğini optimize etmek için 3D sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçların uygunluğunu görebilmek için yapılan deneysel çalışmalarda, 0,5 mm kalınlığında titanyum sac malzeme kullanılmıştır. Karşılaştırılan sonuçlar, geri esneme değerlerini de göz önüne alan bir sayısal modelin, derin çekme işlemi sırasında numunelerin davranışını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir [22].

α fazlı titanyum malzemelerde yaşlandırma işleminin malzeme özelliklerine etkileri de literatürde kapsamlı olarak araştırılmıştır. Leyens vd. bir yakın α alaşımı olan Ti-6Al-2,75Sn-4Zr-0,4Mo-0,45Si'nin 600 °C'de ki 1, 10, 100 ve 1000 saatlik yaşlanma süreçlerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde neden olduğu değişiklikleri araştırmışlardır. 25,4 mm çapındaki numunelerin yüzeyindeki oksijen penetrasyonunun etkileri ve mikroyapı değişimleri ayrı ayrı incelenmiştir. 100 saate kadar yaşlandırılan numunelerde çekme ve akma dayanımı az miktarda artarken, 1000 saatlik süreçte bu değerlerin hızla düştüğü

gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, oksijenin nüfuz ettiği yüzeylerde mikro çatlakların görüldüğü belirtilmiştir [23].

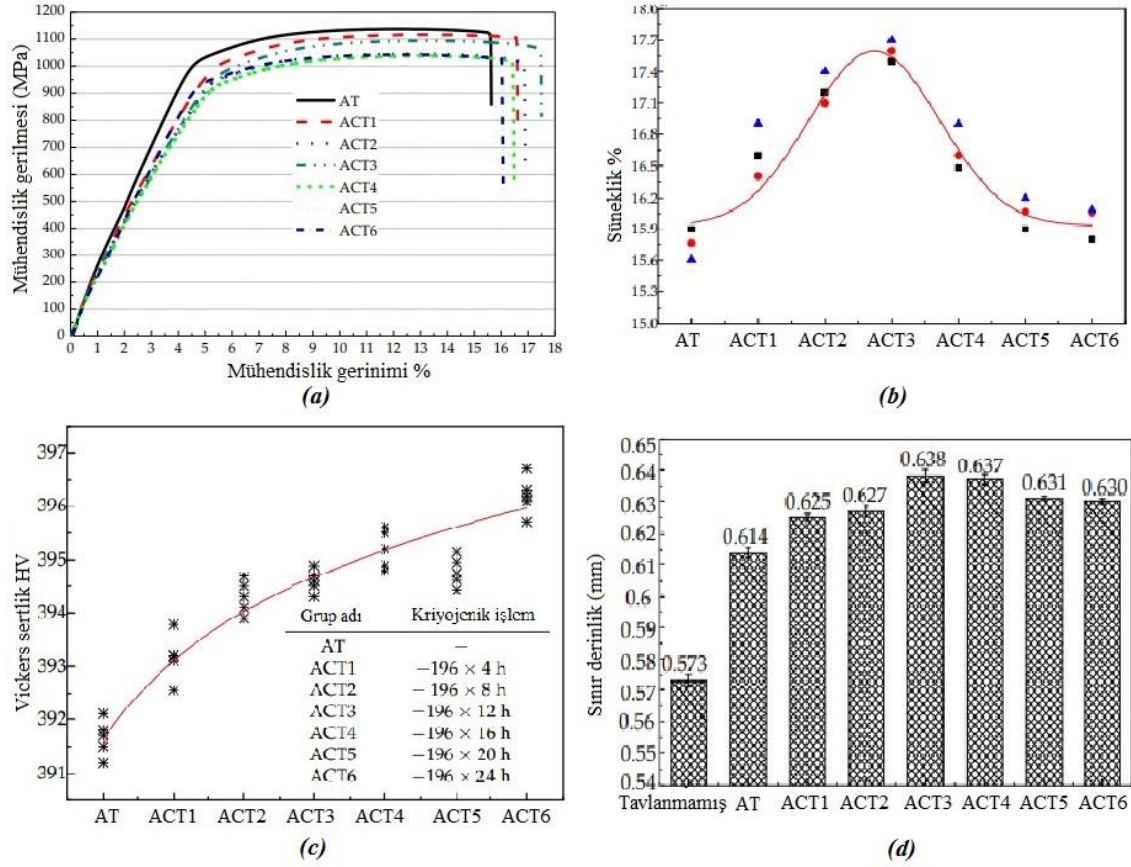
B. $\alpha + \beta$ FAZI ÇALIŞMALARI

$\alpha + \beta$ faz titanyum alaşımları oda sıcaklığında α ve β fazı içeren, yüksek mukavemetli ve ısıtım işlem uygulanabilen alaşımlardır. Genel olarak %4-6 oranında β fazı sabitleyici elementleri içermektedirler [24].

$\alpha + \beta$ fazı alaşımlar içerisinde Ti-6Al-4V, sahip olduğu işlenebilirlik ve mekanik özellikler sebebiyle endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan titanyum alaşımıdır. $\alpha + \beta$ faz alaşımları, saf titanyumun dayanımını ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek, kullanım alanını genişletmek amacıyla geliştirilmiştir. Ancak, yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı ve oda sıcaklığındaki yüksek geri esneme eğilimi nedeniyle sınırlı şekillendirilebilirliğe sahiptir. Bu durum, Ti-6Al-4V'nin oda sıcaklığında şekillendirilmesinin veya derin çekilmesinin mümkün olmadığını göstermektedir [25], [26].

Yüksek mukavemetli sacların şekillendirilmesinde ılık ya da sıcak şekillendirme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu proseste, deformasyon hızı ve şekillendirme sıcaklığı ana değişkenler olarak sıralanabilmektedir. Literatürdeki deneysel çalışmalarda, deformasyon hızı ve sıcaklığın yüksek mukavemetli sacların mikroyapısına ve şekillendirilebilirliğine etkilerinin sıklıkla araştırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, Ti-6Al-4V alaşımının 400 °C'den yüksek sıcaklıklardaki ısıtım işlemlerinde, ortamdaki oksijenden dolayı α fazlarının etkilenmesinin malzemeyi daha kırılğan hale getirdiği, bu durumu önlemek için de alaşımın yüksek sıcaklıklardaki ısıtım işlemlerinin koruyucu bir atmosferde yapılması gerektiği görülmüştür [27]-[29].

Tüm titanyum alaşımlarında olduğu gibi, $\alpha + \beta$ titanyum alaşımları için de, ısıtım işlem süreci mikroyapıyı etkileyen önemli bir faktördür. Isıtım işlemin şekillendirilebilirliğe etkilerinin araştırıldığı çalışmada Hu vd., Ti-6Al-4V alaşımına tavlama sonrası uygulanan kriyojenik işlemin şekillendirilebilirlik üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Numuneleri 760 °C'de 90 dk tavlandıktan sonra vakum fırın içerisinde 20 °C/dk soğuma hızı ile soğutmuştur. Tavlama sırasında Argon gazı sürekli olarak fırına enjekte edilmiştir. Tavlama işlemi ardından numuneler, 7 farklı sürelerde (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 saat) sıvı nitrojen içinde bekletilmiştir. İşlemin mekanik özelliklere ve şekillendirilebilirliğe etkileri Şekil 4'te gösterilmiştir.



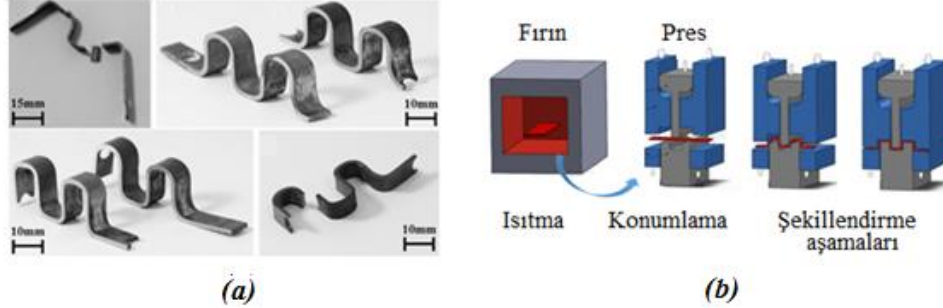
Şekil 4. Kriyojenik işlemin malzeme özelliklerine etkisi a) gerilme-gerinim b) süneklik c) sertlik d) çekme derinliği ilişkisi

Çalışmalarında ayrıca, derin çekme testleri de gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmamış malzemenin çekme derinliği 0,573 mm iken, çekme derinliği kademeli olarak artmış ve ardından 0,638 mm'lik üst değere 12 saat bekletilen (ACT3) numunelerde ulaşıldığı belirtilmiştir. Daha sonra çekme derinliğinin diğer numunelerde yine kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ısı işlemin ve kriyojenik işlemin numunelerin elastise değerlerini düşürmesiyle, çekme ve akma mukavemetleri üzerinde pozitif etkiler oluşturmasıyla açıklanmıştır [30].

Şekillendirilebilirliğin araştırıldığı bir diğer çalışmada da Li vd. 1,5mm kalınlığındaki alaşımın şekillendirilebilirliğini, 700-800 °C'de ve geniş bir deformasyon oranı aralığında (0.0005-0.05 s⁻¹) farklı biçimdeki numuneler ile yarım kübe şekillendirmesi yaparak incelemişlerdir. Gerilme hızı ve sıcaklık etkileri dikkate alınarak alaşımın şekillendirme sınırı modeli oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarında, Ti-6Al-4V alaşımının sınır geriniminin, deformasyon oranı arttıkça ve sıcaklık düşürüldükçe azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, gerilme oranının, şekillendirme sınır oranı üzerindeki etkisinin, sıcaklık arttıkça daha güçlü hale geldiği tespit edilmiştir [31].

Kopec vd. de, çalışmalarında alaşımın en iyi şekillendirme koşullarını belirlemek için 0,1 ila 5 s⁻¹ arasında değişen sabit gerilme oranları ile 600 ila 900 °C arasında değişen sıcaklıklarda tek eksenli çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. 1,5x8x90 mm boyutlarındaki Ti-6Al-4V numuneler, 2 °C/s ısınma oranında 600 ila 950 °C arasında değişen sıcaklıklarda tavllanmış, ardından hemen fırından alınarak soğuk kalıplarda şekillendirilmişlerdir. Deformasyondan sonra malzemenin sertliğinin faz dönüşümü nedeniyle arttığı belirtilmiştir. Malzemenin sınırlı

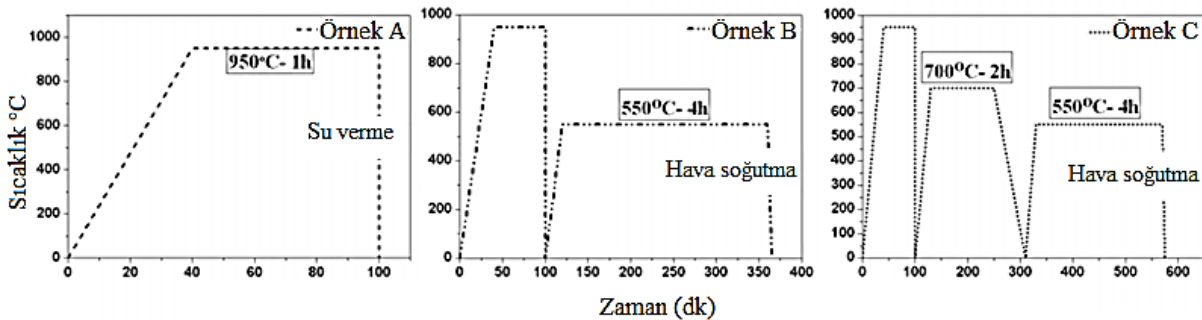
sünekliği nedeniyle şekillendirme işlemi düşük sıcaklıklarda başarısız olurken, 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, aşırı α - β faz dönüşümü meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak numunelerin kalıba sıcak transferi ve biçimlendirilmesi sırasında, sıcaklığın önemli ölçüde düşüşü biçimlendirilebilirliğin azalmasına yol açtığı belirtilmiştir. Şekil 5'te şekillendirilmiş numuneler ve yapılan çalışmanın adımları gösterilmiştir [32].



Şekil 5. Isıtma ile şekillendirme prosesi a) şekillendirilmiş numuneler b) deneysel süreç

Çetin yaptığı deneysel çalışmasında, 1mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V numuneleri farklı sıcaklıklarda ısıtarak U profil olarak şekillendirilebilirliği araştırmıştır. 350, 450, 550, 650, 750, 850 ve 950 °C'ye kadar ısıtılan sac numuneleri 10 dk boyunca homojen bir mikroyapı elde etmek amacıyla bu sıcaklıkta beklettikten sonra fırından alınarak sıcak şekillendirmiştir. 550 °C 'ye kadar ısıtılmış numunelerin mikroyapılarında herhangi bir değişim gözlenemezken bu sıcaklıktan sonra 850 °C sıcaklığa kadar α taneleri büyümeye başlamış ve daha iri α yapılarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle 850 °C'de malzemenin sünekliğinin artıp daha kolay şekillendirilebilir olmasında yeniden kristalleşmenin esas etki olduğu görülmüştür. 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan numunelerde ise mikroyapı değişiminden kaynaklı sertlik ve dayanım değerleri artmış, geri esneme açısının yükselerek şekillendirilebilirliğin düşmesine neden olduğu belirlenmiştir [33].

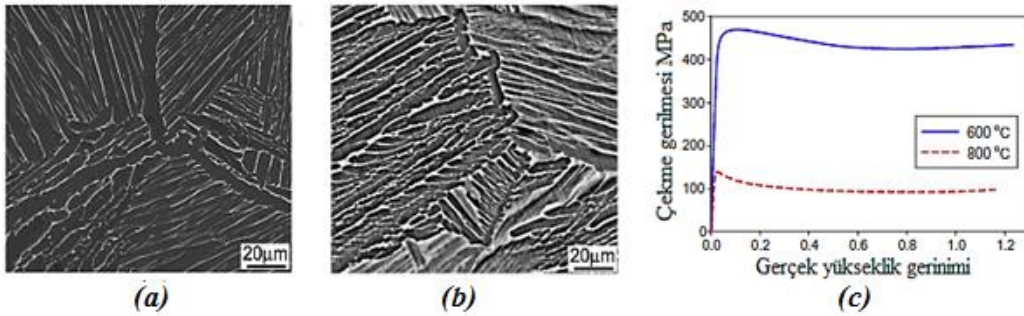
Gheysarian ve Abbasi diğer bir ısıtma işlemi olan yaşlandırma işleminin 1 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V sac numunelerin mikroyapısına, mekanik özelliklerine ve şekillendirilebilirliğine etkilerini araştırmışlardır. Numunelere, çözeltiye alma, çözelti işleminden sonra yaşlandırma ve havada soğutma, çözelti işleminden sonra tavlama ve yaşlandırma en sonunda havada soğutma prosesi uygulanmıştır. Mikroyapı karakterizasyonu için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve XRD analizleri kullanılırken, şekillendirilebilirliği değerlendirmek için geri esneme ve Erichsen testleri uygulanmıştır. Sonuçlar yaşlandırma işleminin numunenin sertliğini artırdığını ve şekillendirilebilirliği azalttığını göstermiştir. Yaşlandırma öncesi tavlama işlemi uygulamasının ise, şekillendirilebilirliği artırdığı ve geri esneme değerlerini azalttığı sonucuna varmışlardır. Şekil 6'da deneysel çalışmalarda uygulanan ısıtma işlemlere ait grafikler verilmiştir [34].



Şekil 6. Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan ısıtma işlem sıraları

Literatürde, oluşabilecek şekillendirme kusurlarını ve maliyetleri azaltmak için sonlu elemanlar metodlarının kullanıldığı çalışmalar da çok sayıda mevcuttur. Kotkunda vd, 0,9mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V sac malzeme ile ılık derin çekme deneyleri gerçekleştirmişler ve kalınlık değişimi ile kullaklanma gibi şekillendirilebilirlik kusurlarını incelemişlerdir. 400 °C sıcaklıkta yapılan çalışmalarda 54 mm numune çapı ve 1,8 derin çekme sınır oranı ile başarılı çekme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları ile Hill 1948 ve Cazacu Barlat sonlu elemanlar modelleriyle elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlarının Cazacu Barlat modeli ile daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [35].

Sıcaklığın yanı sıra deformasyon hızlarının mikroyapıya etkilerini de araştıran, Ding vd. çalışmalarında, 20mm çapında 30mm boyunda silindirik Ti-6Al-4V alaşımı numuneleri 850, 900, 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda; 0.05, 0.1, 0.5 ve 1.0 s⁻¹ deformasyon hızlarında bilgisayar kontrollü servo-hidrolik pres ile preslemiş ve ardından suda soğutmuşlardır. Yapılan incelemelerde, 850, 900 ve 950 °C deforme olan numunelerde, $\alpha+\beta$ fazlarının sadece bir kısmının, β fazına dönüştüğü görülmüştür. Bununla birlikte, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda neredeyse tüm α fazlarının β fazına dönüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, işlem sıcaklığı 1000 °C olduğunda, dinamik yeniden kristalizasyonun düşük oranda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. İşlem sıcaklığı 1050 °C olduğunda ise, dinamik yeniden kristalleşmenin nispeten büyük alanlarda gerçekleştiği belirlenmiştir [36]. Benzer bir çalışma da, Zhrebtsov vd., 8 mm çapında 12 mm uzunluğunda silindirik Ti-6Al-4V $\alpha-\beta$ iki fazlı titanyum alaşımı numunelerin katmanlı mikroyapısını küreselleştirmek ve ara yüzlerin enerjisini artırmak için düşük sıcaklıklarda (600 ve 800 °C) ısıtma işlemi ve 10⁻³ s⁻¹ nominal deformasyon hızında presleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. 600 °C'de 2, 4 ve 8 saat, 800 °C'de 1, 3 ve 9 saat, bekletilen numuneler sıcak olarak preslenmiş ve ardından suda soğutulmuşlardır. Şekil 7'de numunelerin mikroyapılarındaki değişimler verilmiştir.



Şekil 7. a ve b) SEM görüntüleri α fazları koyu, β fazları açık renk c) 600 ve 800 °C tavllanmış numunelerin gerilme-gerinim grafiği

Deneysel çalışmalarda 800 °C'de lamelli mikroyapının küresel bir yapıya dönüştüğü, bununla birlikte kalın lameller için, deformasyon sırasında dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle yeni tanecikler oluştuğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın 600 °C'ye düşürülmesinin, β fazının hacminde bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. İnce β ara lamelleri nispeten hızlı bir şekilde α matris fazına dönüştüğü ve bu durumun statik yeniden kristalleşme ile ilgili olduğu belirtilmiştir [37].

Semiatin vd. indüksiyon ile ısıtma işleminin de araştırıldığı deneysel çalışmasında, 19,1 mm çapında 101.6 mm boyundaki iki farklı Ti-6Al-4V deney numunesini, indüksiyonla ısıtma tekniği kullanılarak β tavlama sırasında, eşit eksenli α mikroyapısı ile tane büyümesi kinetiğini incelemişlerdir. Tavlama işleminde 1,4, 5,6 ve 18 °C s⁻¹ ısıtma hızları ve 1020 ila 1260 °C arasındaki sıcaklıklar kullanılmış ve istenilen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra hemen

suda soğutulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda mikroyapıdaki β tanecik boyutuna, sıcaklığın ve ısınma hızının büyük etkileri olduğu gözlemlenmiştir [38]. Daha geniş sıcaklık ve deformasyon hızı aralıklarında Seshacharyulu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, 10mm çapında 15mm boyunda silindirik Ti-6Al-4V alaşımı numuneleri 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050 ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 0.0003, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 ve 100 s⁻¹ deformasyon hızlarında bilgisayar kontrollü servo-hidrolik pres ile preslemiş ve ardından hava ile soğutmuşlardır. Numuneler, ısıtma işleminde borosilikat cam macun ile kaplanarak çevresel etkenlerden korunmuş ve yağlama sağlanmıştır. Bu çalışmanın amacının, geniş bir sıcaklık aralığında sıcak deformasyonunun mikroyapısal mekanizmalarını modellemek olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçları, malzemenin 750–950 °C sıcaklık aralığında ve 0,002 s⁻¹den daha yüksek deformasyon hızlarında ince taneli süper plastiklik sergilediğini ve β fazının, 1050 °C sıcaklığın üzerinde dinamik yeniden kristalleşmeye maruz kaldığını göstermiştir [39].

Bir diğer $\alpha+\beta$ fazı alaşımı olan TA15 (Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V) titanyum levhanın sıcak şekillendirilebilirliğini Ma vd. deneysel ve teorik olarak incelemiştir. 1,6 mm kalınlığındaki çekme numunelerine, 0,01 s⁻¹ gerinim hızı ile 800, 840 ve 880 °C'de çekme testi uygulanmıştır. Bununla birlikte şekillendirme testi için hazırlanan numunelere anti-oksidasyon koruyucusu uygulanmış ve yağlanmıştır. Test sürecinde, kalıp 700 °C'de ve zımba 880 °C'de tutularak deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlarla teorik sonuçların uygunluğu gözlemlenmiştir [40].

Sıcaklığın ayrıca titanyum alaşımının işlenebilirliğine etkileri de araştırılmıştır. Akyol çalışmasında, 16 mm çapındaki çubuk şeklindeki malzemeleri tavlama, su verme ve yaşlandırma olmak üzere üç değişik ısıl işleme tabi tutmuş ve tornalama yöntemi ile aynı kesme parametreleri kullanılarak işlenebilirliği incelemiştir. Çalışmalarında ilk olarak 3 parça için de 750 °C'de 4 saat normal fırın atmosferinde tavlama işlemi uygulanmış ve havada soğutma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra diğer iki numune su verme işlemi için 955 °C 'de 1 saat bekletilmiş ve su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, üçüncü numune 540 °C de 4 saat boyunca fırında yaşlandırılmış ve fırından çıkarılarak havada soğutularak ısıl işlemler tamamlanmıştır. β dönüşüm sıcaklığının çok altındaki bir sıcaklık olan 750 °C ye kadar ısıtılan Ti-6Al-4V numune fırın ortamında soğutularak β fazının küresel olarak α matris fazı içinde oluşması sağlanmış, nispeten yumuşak ve işlenebilirliği yüksek bir içyapı elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek sertlik değerlerine 950 °C 'den su verilmiş alaşımın 2 saat boyunca 540 °C de yaşlandırılmasıyla ulaşılmıştır [41].

C. β FAZI ÇALIŞMALARI

β fazı alaşımlar ifadesi, β dönüşüm sıcaklığının (882 °C) üzerinde soğutulduktan sonra %100 β fazlarını korumak için yeterli toplam β fazı sabitleyici içeriğine sahip alaşımlar olarak tanımlanabilmektedir. Bu alaşımlar α ve $\alpha + \beta$ alaşımlarının sahip olduğu olumsuz yönlerin üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Oda sıcaklığında sahip oldukları üstün soğuk şekillendirilebilirlik özellikleri, yaşlandırma ile elde edilen yüksek mekanik özellikler ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle bu alaşımlar artan uygulama alanları bulmaktadır. β alaşımları, yüksek gerilme mukavemetlerine (> 1,400 MPa) ulaşana kadar ısıl işleme tabi tutulabilirler. Ti-10V-2Fe-3Al gibi bazı diğer β alaşımları ise mükemmel yorulma mukavemetine sahiptirler [42]-[44].

Yarı kararlı β alaşımlarının ısıl işlemi temelde çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Ayrıca, uygulanan yaşlandırma işlemi; yüksek sıcaklıkta

yaşlandırma, düşük sıcaklıkta yaşlandırma ve dubleks yaşlandırma olmak üzere üç farklı yolla gerçekleştirilmektedir. Yaşlandırma süreci, bu alaşımların mukavemetinde % 50-80 artış sağlamaktadır. Bu alaşımlar içerisinde Amerikan Hava Kuvvetleri'nin desteğiyle geliştirilen Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn (Ti-15-3) alaşımı, özellikle havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanlarına sahip yarı kararlı β titanyum alaşımlarındandır [45], [46].

Literatür araştırmasında çalışmaların, ısıl işlemlerin sonucunda alaşımın mekanik özelliklerinin gelişimine yönelik odaklanıldığı görülmüştür. Etkin bir mukavemet ve süneklik kombinasyonunun 450 °C sıcaklığın üzerinde yaşlandırma sıcaklığı kullanıldığında elde edilebildiği belirtilmiştir. Bu nedenle β faz alaşımlarda 250-300 °C'de ön yaşlandırma ve ardından 500 °C'de yaşlandırma işlemi ile dubleks yaşlandırma işleminin iyi mekanik özellikler ve süneklik dengesi sağladığı literatürde ortaya konulmuştur. β fazı alaşımlara uygulanan ısıl işlemlerin etkilerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada Naveen ve arkadaşları, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al numunelere ön yaşlandırma ve son yaşlandırma uygulamışlardır. 16 mm çapında 6 mm kalınlığındaki numuneler ile 300 °C'de 10 saat bekletilerek bir ön yaşlandırma işlemi ve ardından faz çökmesinin ilerlemesini izlemek için 500 °C'de farklı zamanlarda (30dk, 1 saat, 2 saat, 4 saat, 8 saat, 16 saat, 32 saat ve 64 saat) son yaşlandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çökme fazını izotermal bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak hesaplayabilmek için Thermo-Calc yazılımı ile XRD tekniği kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen çökeltile α fazının miktarının, XRD sonuçlarıyla makul bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [47].

Zhang vd. çalışmalarında, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alaşımının sıcak deformasyon davranışını, sıcak presleme testleri kullanarak incelemiştir. Sıcak şekillendirilebilirlik için uygun aralığı belirlemek, gerinim hızı ve sıcaklığın mikroyapısal değişim üzerindeki etkilerini araştırmak için aktivasyon enerji haritası ve Zener-Hollomon parametre haritası geliştirilmiştir. 8 mm çapında ve 12 mm uzunluğundaki numuneler, ilk olarak 1200 °C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 5 dakika bekletilmiştir. Ardından 5 °C s⁻¹ oranında seçilen test sıcaklığına (850-1150 °C) soğutulmuş ve testten önce 30 saniye bekletilmiştir. Sıcak pres testleri, 0,001–10 s⁻¹ gerinim oranı aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sıcak deformasyon için güvenli bölgenin, incelenen tüm sıcaklık aralığı boyunca 0,001–0,1 s⁻¹ gerinim hızı aralığında meydana geldiğini göstermiştir. Hesaplanan sıcak deformasyon karakteristiği ile mikroyapısal gözlemlerin sonuçlarının uyumlu olduğu belirtilmiştir [48].

Yüksek mukavemetli sac malzemelerinin derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi sırasında yağlayıcı kullanılması şekillenme esnasında kalıp elemanları ve sac malzeme temas yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisini azaltmaktadır [49]. Harada ve çalışma arkadaşları, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al titanyum alaşımlı sac levhanın şekillendirilebilirliğini artırmak için çok aşamalı bir derin çekme işlemi uygulamışlardır. Derin çekme işlemi sırasında tutukluğu önlemek ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için yağlayıcıların yanında numunelerin yüzeyinde oluşan oksit tabakadan da faydalanılmıştır. Çok aşamalı derin çekme işleminde, yüzey pürüzlülüğü ve sertliğin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Oksit tabakanın oluşması için numuneler, 750 °C'de 5 dakika bekletilmiştir. İşlemin üçüncü aşamasında şekillenebilirliği geliştirmek için, çekilen numuneler 750 °C'de 5 dakika ara tavlama işleminden geçirilmiş ve yeniden oksit tabakası oluşması sağlanmıştır. Ara tavlama sayesinde numuneler, altı aşamada başarıyla şekillendirilerek uzun bir titanyum kap oluşturulmuştur [50].

Ti-10V-2Fe-3Al alaşımı, derin sertleşebilirlik, iyi mukavemet ve süneklik özellikleri ile yüksek kırılma tokluğu kombinasyonuna sahip bir alaşım sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

Ti-10V-2Fe-3Al, havacılık endüstrisindeki β titanyum alaşımlarının en önemli ve en sık kullanılan örneği haline gelmiştir. Neugebauer vd. çalışmalarında Ti-10V-2Fe-3Al alaşımının şekillendirilebilirlik özelliklerini incelemek için dolu silindirik malzemelerden içi boş profiller oluşturan ekstrüzyon işlemine odaklanmışlardır. Bu yöntemin, derin delik delme gibi işleme yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde daha çeşitli malzeme kullanımına izin verdiği belirtilmiştir. Test numunelerinin şekillendirilmesi, 500 ile 600 °C gibi dar bir aralıkta gerçekleştirilmiştir. Numuneler, şekillendirme süresince sıcaklığın düşüşü de göz önüne alınarak, argon gazı atmosferi altında 650 °C sıcaklıkta 60 dakika boyunca fırında ısıtılmışlardır. Şekillendirme işlemi sonucunda, Ti-10V-2Fe-3Al alaşımından yapılmış içi boş bir mil üretmeyi başarmışlardır. Bu işlem sırasında meydana gelen yüksek deformasyonların, aşırı tane incelmeye sebep olarak mukavemette muazzam bir artışa sebep olduğunu gözlemlenmiştir [51], [52].

III. SONUC

Titanyum alaşımları, mikroyapıları ve alaşım elementlerine göre çok farklı mekanik özelliklere ve şekillendirilebilirlik kabiliyetlerine sahip malzemelerdir. Bu çalışmada; farklı titanyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik davranışları ve mikroyapılarına sıcaklığın etkileri uygulanan ısıtım prosesleri açısından incelenmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar derlenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Titanyum alaşımları sahip oldukları düşük özgül ağırlık, yüksek mekanik özellikler, üstün korozyon ve aşınma dirençleri ve biyolojik uyumluluğu sebebiyle başta havacılık, medikal, petrokimya ve otomotiv endüstrilerinde, spor ekipmanları ve aksesuar imalatında sıklıkla kullanılmaktadır.
- Titanyum alaşımları, aynı faz sınıfında yer almasına rağmen, içerdikleri Al, O, N, C, Sn, Zr gibi α fazı ve V, Mo, Nb, Ta, Cr gibi β fazı sabitleyici elementlerine ve miktarlarına göre farklı mekanik ve şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip olabilmektedirler. Bu nedenle her ısıtım işlemi bütün titanyum alaşımlarına uygulanmamaktadır.
- Titanyumun allotropik bir malzeme olması nedeniyle oda sıcaklığında HSP α fazındayken, 882 °C sıcaklığın üzerinde HMK β fazına geçmektedir. α dönüşüm sıcaklığı ile β dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikroyapısında $\alpha+\beta$ fazları bulunmaktadır.
- Genellikle titanyum alaşımları, oda sıcaklığında gerçekleştirilen şekillendirme prosesleri sonucunda yüksek geri esneme değerlerine sahip olabilmektedirler. Bu kusuru ortadan kaldırmak, şekillendirilebilirliği, mekanik özellikleri ve yapısal kararlılığı artırmak amacıyla alaşımlara ısıtım prosesleri uygulanmaktadır.
- CP titanyumlar yüksek korozyon dirençlerine rağmen saf titanyuma yakın mekanik özellikler göstermektedirler ve mukavemet değerleri diğer titanyum alaşımlarına göre düşüktür. α fazlı alaşımlar, mekanik özellikler olarak saf titanyuma yakın özellikler sergilemektedirler. Bu alaşımlara çok az miktarda β fazı sabitleyicileri (Mo, V gibi) eklendiğinde yakın α fazı olarak tanımlanan yapı oluşmaktadır. Bu faz, α fazlı titanyuma yakın özellikler sergilemektedirler. Ancak farklı olarak, bu alaşımlar, çalışma sıcaklığı 400-520 °C'ye varan ortamlarda da kullanılabilirler. $\alpha+\beta$ alaşımları, her iki fazın da varlığından dolayı daha yüksek mukavemet özelliklerine sahiptirler. β fazı sabitleyicileri içeren β titanyum alaşımları, diğer titanyum alaşımlarına kıyasla daha iyi şekillendirilebilir ve sertleştirilebilir özellikleri göstermektedirler.

- Titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki oksijen ve hidrojen yatkınlığı sebebiyle ısıl işlem prosesleri koruyucu ortamlar altında gerçekleştirilmektedir. Isıl işlem prosesleri genellikle, vakum ortamında ya da argon, azot gibi gaz atmosferlerinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, numunelerin ısıya dayanıklı borosilikat cam macun ile kaplanması uygulamaları da bulunmaktadır.

IV. KAYNAKLAR

- [1] S. H. Zahiri, D. Fraser, ve M. Jahedi, “Recrystallization of Cold Spray-Fabricated CP Titanium Structures,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 16-22, 2009.
- [2] G. Ateş, “Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İç Yapısı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Termokimyasal İşlem Parametrelerinin Etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta Türkiye, 2018.
- [3] L. Urtekin, Ö. Keleş, “Biyomedikal Uygulamalar İçin Tin Kaplı Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,” *Savunma Bilimleri Dergisi*, c. 18, s. 36, ss. 91-108, 2019.
- [4] P. J. Arrazola, A. Garay, L. M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya ve F. Le Maître, “Machinability of Titanium Alloys (Ti6Al4V and Ti555.3),” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 5, pp. 2223-2230, 2009.
- [5] R. Santhosh, M. Geetha, V. K. Saxena ve M. Nageswararao, “Studies on Single and Duplex Aging of Metastable Beta Titanium Alloy Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn,” *Journal of Alloys And Compounds*, vol. 605, pp. 222-229, 2014.
- [6] Y. Yılmaz, B. Avcı ve H. Demirören, “Biyomalzeme Sektöründe Kullanılan Titanyum ve Alaşımları,” *SETSCI Conference Proceedings*, c. 4, s. 6, ss. 357-362, 2019.
- [7] X. Liu, P. K. Chu ve C. Ding, “Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys, and Related Materials for Biomedical Applications,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 47, no. 4, pp. 49-121, 2004.
- [8] C. Leyens, M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Weinheim, Almanya: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003, böl. 1, ss. 1-36.
- [9] C. Ensarioğlu, M. C. Çakır, “Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü Bölüm I,” *Mühendis ve Makina*, vol. 46, no. 546, ss. 36-46, 2005.
- [10] T. Choda, H. Oyama ve S. Murakami, “Technologies for Process Design of Titanium Alloy Forging for Aircraft Parts,” *Kobelco Technology Review*, vol. 33, pp. 44-49, 2015.
- [11] A. İşler, “Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Türkiye, 1999.
- [12] Y. Yılmaz, “Biyomalzeme Olarak Kullanılan Titanyum Alaşımlarının Mekanik Davranışları ve Korozyon Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkilerinin İncelenmesi,” Yüksek

lisans tezi, Metalurji Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ Türkiye, 2019.

[13] R. Gilbert, *ASM Handbook: Volume 4: Heat Treating*, 10. baskı, Michigan Üniversitesi, ABD: ASM International, 1991, böl. 67, ss. 913-923.

[14] J. D. Beal, R. Boyer ve D. Sanders, *ASM Handbook, Volume 14b: Metalworking: Sheet Forming*, Ohio ABD: ASM International, 2006, böl. 64, ss. 656-669.

[15] F. Öztürk, S. Toros, E. Esener ve E. Uysal, "Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi," *Mühendis ve Makina*, c. 50, s. 596, ss. 44-49, 2009.

[16] P. Oyar, "Titanyum ve Özellikleri." *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, c. 25, s. 1, ss. 151-159, 2015.

[17] I. Weiss, S. Semiatin, "Thermomechanical Processing of Alpha Titanium Alloys - an Overview," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 263, no. 2, pp. 243-256, 1999.

[18] A. O. Caballero, F. Li, D. E. I. Ojos, M. D. Atkinson ve J. Q. Fonseca, "On the Ductility of Alpha Titanium: The Effect of Temperature and Deformation Mode," *Acta Materialia*, vol. 149, pp. 1-10, 2018.

[19] F. Öztürk, R. E. Ece, N. Polat, A. Köksal, Z. Evis, ve J. Y. Sheikh-Ahmad, "Application of Electric Resistance Heating Method on Titanium Hot Forming at Industrial Scale." *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 11, pp. 4441-4448, 2016.

[20] F. K. Chen, K. H. Chiu, "Stamping Formability of Pure Titanium Sheets." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, no. 1-2, ss. 181-186, 2005.

[21] J. M. Liu, S. S. Chou, "Study on the Microstructure and Formability of Commercially Pure Titanium in Two-Temperature Deep Drawing." *Journal of Materials Processing Technology*, c. 95, s. 1-3, ss. 65-70, 1999.

[22] A. L. Port, F. Toussaint ve R. Arrieux, "Finite Element Study and Sensitive Analysis of the Deep-Drawing Formability of Commercially Pure Titanium," *International Journal of Material Forming*, vol. 2, no. 2, pp. 121, 2009.

[23] C. Leyens, M. Peters, D. Weinem ve W. A. Kaysser, "Influence of Long-Term Annealing on Tensile Properties and Fracture of Near- α Titanium Alloy Ti-6Al-2.75 Sn-4Zr-0.4 Mo-0.45 Si." *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 27, no. 6, pp. 1709-1717, 1996.

[24] C. Töre, *Mekanik Tasarımda Titanyum ve Özellikleri*, Ankara Türkiye: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2007, ss. 158-175.

[25] F. Bülbül, İ. Çelik, "Isıl İşlemin Akımsız Ni-B Kaplanan Saf Titanyumun Yapısına Etkisi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, s. 1, ss. 89-94, 2014.

[26] O. M. Badr, B. Rolfe, P. Hodgson, ve M. Weiss, "Forming of High Strength Titanium Sheet at Room Temperature," *Materials & Design*, c. 66, ss. 618-626, 2015.

- [27] N. Şen, “Experimental Investigation of The Formability of Ultrahigh-Strength Sheet Material Using Local Heat Treatment,” *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 47, no. 2, pp. 93-99, 2020.
- [28] N. Şen ve N. Kurgan, “Sac Metal Malzemelerin Ilık Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme Prosesinde Malzeme Karakterizasyonu,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 3, ss. 663-674, 2015.
- [29] N. Kotkunde, H. N. Krishnamurthy, P. Puranik, A. K. Gupta, ve S. K. Singh, “Microstructure Study and Constitutive Modeling of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures.” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, pp. 96-103, 2014.
- [30] Z. Hu, H. Zheng, G. Liu ve H. Wu, “Effects of Cryogenic Treatment after Annealing of Ti-6Al-4V Alloy Sheet on Its Formability at Room Temperature,” *Metals*, vol. 8, no. 5, pp. 295, 2018.
- [31] X. Li, G. Guo, J. Xiao, N. Song ve D. Li “Constitutive Modeling and the Effects of Strain-Rate and Temperature on the Formability of Ti-6Al-4V Alloy Sheet.” *Materials & Design*, vol. 55, pp. 325-334, 2014.
- [32] M. Kopec, K. Wang, D. J. Politis, Y. Wang, L. Wang, ve J. Lin, “Formability and Microstructure Evolution Mechanisms of Ti6Al4V Alloy During a Novel Hot Stamping Process,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 719, pp. 72-81, 2018.
- [33] G. Çetin, “Ti-6Al-4V Sacların Mikroyapı Değişimi ve Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Otomotiv Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa Türkiye, 2019.
- [34] A. Gheysarian, M. Abbasi, “The Effect of Aging on Microstructure, Formability and Springback of Ti-6Al-4V Titanium Alloy,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 26, no. 1, pp. 374-382, 2017.
- [35] N. Kotkunde, A. D. Deole, A. K. Gupta ve S. K. Singh, “Numerical Analysis of Warm Deep Drawing for Ti-6Al-4V Alloy,” *Advances in Material Forming and Joining*, pp. 109-139, 2015.
- [36] R. Ding, Z. Guo, ve A. Wilson, “Microstructural Evolution of a Ti-6Al-4V Alloy During Thermomechanical Processing,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 327, no. 2, ss. 233-245, 2002.
- [37] S. Zherebtsov, M. Murzinova, G. Salishchev, ve S. Semiatin, “Spheroidization of the Lamellar Microstructure in Ti-6Al-4V Alloy During Warm Deformation and Annealing,” *Acta Materialia*, vol. 59, no. 10, pp. 4138-4150, 2011.
- [38] S. Semiatin, P. Fagin, M. Glavicic, I. Sukonnik, ve O. Ivasishin, “Influence on Texture on Beta Grain Growth During Continuous Annealing of Ti-6Al-4V,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 299, no. 2, pp. 225-234, 2001.
- [39] T. Seshacharyulu, S. Medeiros, W. Frazier, ve Y. Prasad, “Hot Working of Commercial Ti-6Al-4V with an Equiaxed A-B Microstructure: Materials Modeling Considerations,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 284, no. 2, pp. 184-194, 2000.

- [40] B. Ma, X. Wu, X. Li, M. Wan, ve Z. Cai, "Investigation on the Hot Formability of Ta15 Titanium Alloy Sheet," *Materials & Design*, vol. 94, pp. 9-16, 2016.
- [41] S. Akyol, "Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması," Yüksek lisans tezi, Malzeme ve İmalat Lisansüstü Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Türkiye, 2007.
- [42] P. J. Bania, "Beta Titanium Alloys and Their Role in the Titanium Industry," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society-Jom*, vol. 46, no. 7, pp. 16-19, 1994.
- [43] R. Santhosh, M. Geetha, ve M. N. Rao, "Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 70, no.7, pp. 1681-1688, 2017.
- [44] R. R. Boyer, "Aerospace Applications of Beta Titanium Alloys," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society-Jom*, vol. 46, no. 7, pp. 20-23, 1994.
- [45] Q. Shi, Y. Tse, ve R. Higginson, "Microstructure Evolution and Microhardness Analysis of Metastable Beta Titanium Alloy Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Consolidated Using Equal-Channel Angular Pressing from Machining Chips," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, no. 6, pp. 4142-4153, 2020.
- [46] S. Rajaraman, G. Manivasagam, V. Kumar, ve M. N. Rao, "Structure-Property Correlation in an Aircraft Sheet Metal Alloy Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn," *TMS 2014: 143rd Annual Meeting & Exhibition*, pp. 105-112, 2014.
- [47] M. Naveen, R. Santhosh, M. Geetha, ve M. N. Rao, "Experimental Study and Computer Modelling of the B→ A+B Phase Transformation in Ti15-3 Alloy Under Isothermal Conditions," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 616, pp. 607-613, 2014.
- [48] J. Zhang, H. Di, H. Wang, K. Mao, T. Ma, ve Y. Cao, "Hot Deformation Behavior of Ti-15-3 Titanium Alloy: A Study Using Processing Maps, Activation Energy Map, and Zener-Hollomon Parameter Map" *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 9, pp. 4000-4011, 2012.
- [49] N. şen, N. Kurgan, İ. Karaağaç ve O. Uluer, "Ilık Derin Çekme Prosesinde Yağlayıcı Etkisinin şekillendirilebilirlik Açısından Deneysel Araştırılması," *Politeknik Dergisi*, c. 19, s. 2, ss. 185-193, 2016.
- [50] Y. Harada, Y. Maeda, M. Ueyama, ve I. Fukuda, "Improvement of Formability for Multistage Deep Drawing of Ti-15v-3cr-3sn-3al Alloy Sheet," *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 819-824, 2014.
- [51] R. Neugebauer, L. W. Meyer, T. Halle, M. Popp, S. Fritsch, ve C. John, "Manufacture of a B-Titanium Hollow Shaft by Incremental Forming," *Production Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 227-232, 2011.
- [52] J. D. Cotton, R. D. Briggs, R. R. Boyer, S. Tamirisakandala, P. Russo, N. Shchetnikov, ve J. C. Fanning, "State of the Art in Beta Titanium Alloys for Airframe Applications," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society-Jom*, vol. 67, no. 6, pp. 1281-1303, 2015.