



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 4

Titanyum ve Alaşımları

Alfa-beta metalurjisi, alaşım sınıfları, mikroyapı-özellik ilişkileri, üretim ve işleme, uygulamalar ve kalite kontrol esasları

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

Sürüm: 1.0 • **Tarih:** Ağustos 2026 • **saemuhendislik.com**

Bu doküman SAE Mühendislik tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

1. Giriş: Neden Titanyum?

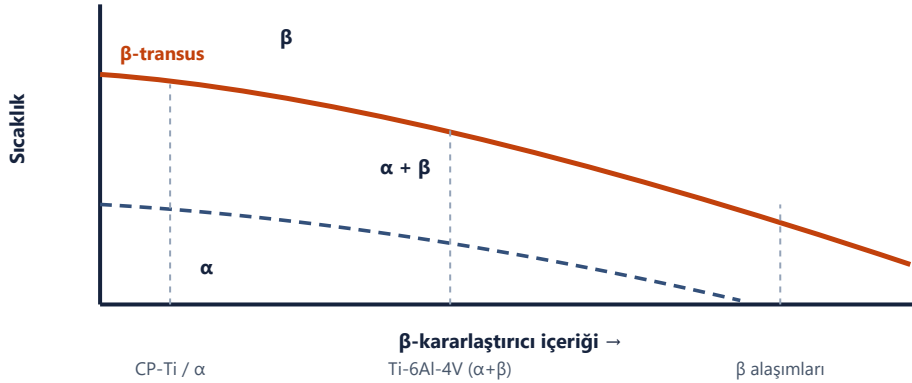
Titanyum; 4,51 g/cm³ yoğunluğuyla çeliğin %60'ı ağırlığında olup ısıtılmalı alaşımlarıyla 1000 MPa üzeri dayanıma ulaşır. Nanometrik TiO₂ pasif filmi ona deniz suyu ve klorürlü ortamlar dâhil olağanüstü korozyon direnci kazandırır; vücut sıvılarıyla reaksiyona girmemesi (**biyouyumluluk**) implant malzemesi olarak eşsiz kılar. ~600 °C'ye dek özellik koruması, jet motoru kompresör bölümlerinin de kapısını açar.

Bu üstünlüklerin bedeli maliyettir: reaktif metalurjisi (Kroll prosesi, vakumda ergitme) ve zor işlenmesi nedeniyle titanyum, alüminyumdan kat kat pahalıdır. Bu yüzden doğru mühendislik sorusu "titanyum mu?" değil, "**bu parçada titanyumun bedelini ödeten gereksinim hangisi?**" sorusudur.

2. Temel Metalurji: α ve β Fazları

Saf titanyum 882 °C'de allotropik dönüşüm geçirir: altta α (SDH), üstte β (HMK) karardır. Bu dönüşüm sıcaklığı (**β -transus**), titanyum metalurjisinin pusulasıdır; tüm ısıtıl-mekanik işlemler ona göre tarif edilir.

- **α -kararlaştırıcılar:** Al (ana element), O, N, C — β -transus'u yükseltir. Oksijen aynı zamanda güçlü katı çözelti sertleştiricisidir; Grade'ler arasındaki fark büyük ölçüde O içeriğidir.
- **β -kararlaştırıcılar:** V, Mo, Nb (izomorf); Fe, Cr, Mn (ötektoid) — β 'yi oda sıcaklığına doğru karardır kılar.
- **Nötr:** Sn, Zr — her iki fazda çözünür, katı çözelti mukavemeti sağlar.



Şekil 1. β -kararlaştırıcı içeriğine göre alaşım sınıflarının şematik faz haritası (SAE Mühendislik çizimi).

3. Alaşım Sınıfları

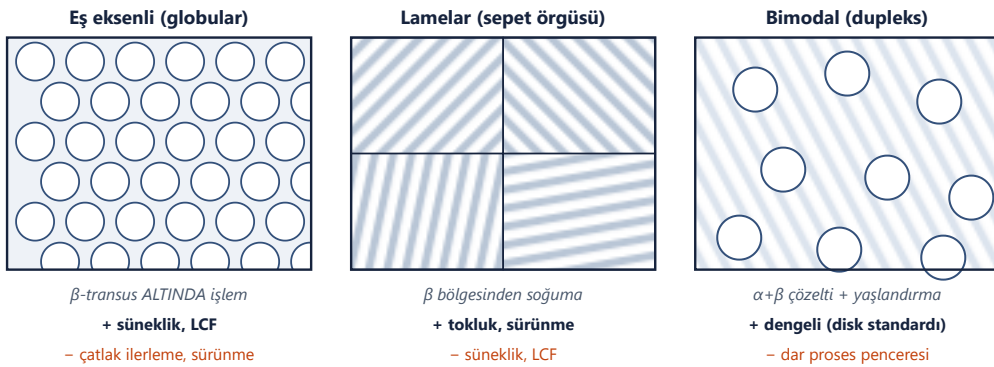
Sınıf	Tipik temsilciler	Karakter	Başlıca kullanım
Ticari saf (CP) Ti Grade 1–4	Grade 2 (en yaygın)	Orta dayanım (345–550 MPa), en iyi korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik	Kimya/proses ekipmanı, ısı eşanjörü, mimari
α / near-α	Ti-6242, Ti-8-1-1, Grade 12	Sürünme direnci, ~550–600 °C servis	Kompresör diskleri/kanatları (sıcak bölge)
$\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V (Grade 5) , Ti-6Al-4V ELI (Grade 23), Ti-6-6-2	Dayanım-tokluk dengesi, ısıl işlemlenebilir; üretimin ~%50'si	Uçak yapısal parçaları, fan kanatları, implantlar
Metastabil β	Ti-10-2-3, Ti-5553, Beta-C	En yüksek dayanım (> 1200 MPa), derin sertleşebilirlik, iyi dövülebilirlik	İniş takımı, yay, bağlantı elemanları

Ti-6Al-4V neden "iş atı"? Yeterli dayanım + tokluk + kaynaklanabilirlik + yaygın tedarik zinciri kombinasyonunu tek başına sunar. Yeni bir tasarımda özel bir gerekçe yoksa başlangıç noktası daima Ti-6Al-4V'dir; ELI (düşük oksijenli) sürümü kırılma tokluğu kritik ve implant uygulamalarının standardıdır.

4. Mikroyapı–Özellik İlişkileri

$\alpha+\beta$ alaşımlarında mikroyapı, termo-mekanik geçmişin doğrudan çıktısıdır ve iki uç tip arasında geçer:

Mikroyapı	Nasıl elde edilir	Güçlü yönü	Zayıf yönü
Eş eksenli (globular) α	β -transus ALTINDA deformasyon + tavlama (mill-annealed)	Süneklik, yorulma çatlağı başlama direnci, LCF	Sürünme ve çatlak ilerleme direnci daha düşük
Lamellar (Widmanstätten/sepet örgüsü)	β bölgesinden kontrollü soğuma (β -annealed)	Kırılma tokluğu, çatlak ilerleme direnci, sürünme	Süneklik ve LCF daha düşük
Bimodal (dupleks)	$\alpha+\beta$ bölgesinde çözeltiye alma + yaşlandırma (STA)	İki dünyanın dengesi; motor disk standardı	Dar proses penceresi ister



Şekil 2. Aynı alaşımın (Ti-6Al-4V) üç mikroyapısı ve getirdikleri. Mikroyapı **alaşımla değil termo-mekanik geçmişle** seçilir: eş eksenli yapı çatlağın **başlamasına**, lamellar yapı çatlağın **ilerlemesine** direnir; bimodal yapı ikisini dengelediği için motor disk standardıdır. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

Isıl işlemler: gerilim giderme (480–650 °C), mill-anneal, rekristalizasyon tavlı, β -anneal ve STA (örn. Ti-6Al-4V: ~930 °C çözeltiye alma → su verme → 480–590 °C yaşlandırma; α' martenzitin bozunmasıyla dayanım artar).

5. Üretim ve İşleme

5.1 Birincil üretim ve ergitme

TiO₂ → TiCl₄ → Mg ile redüksiyon (**Kroll prosesi**) → sünger titanyum. Sünger + alaşım elementleri + geri dönüşüm, **VAR** (vakumlu ark ergitme, genellikle 2–3 tekrar) veya soğuk ocaklı **EB/plazma ergitme** ile ingota dönüştürülür. Ergitme sayısı ve yöntemi; havacılıkta kritik olan **hard-alpha (yüksek O/N'li sert inklüzyon)** riskini yönetir.

5.2 Şekillendirme

- **Dövme:** α + β dövme (ince taneli, dengeli) veya β dövme (tokluk odaklı); son şekillendirme sıcaklığının β -transus'a göre konumu mikroyapıyı belirler (bkz. No.2 — Dövme Teknolojisi).
- **Süperplastik şekillendirme + difüzyon kaynağı (SPF/DB):** İnce taneli sacdan tek operasyonda karmaşık entegre paneller.
- **Döküm:** Reaktif ergiyik nedeniyle seramik kabuk + vakum; santrifüjlü hassas döküm ile pompa/vana ve havacılık parçaları.
- **Eklemeli imalat:** Ti-6Al-4V, metal 3B baskının en olgun alaşımıdır (LPBF/EBM); HIP ile porozite kapatma standart pratiktir.

5.3 Talaşlı işleme ve kaynak

- Düşük ısıl iletkenlik + yüksek kimyasal aktivite = takım ucunda ısı birikimi. Reçete: **düşük hız, yüksek ilerleme, bol soğutma sıvısı, rijit bağlama**; ince talaşta yangın riskine dikkat.
- Kaynak: TIG/plazma/lazer/EB uygulanabilir; ancak 400 °C üzerinde banyo ve ITAB'ın **tam inert koruması** (arka koruma, trailing shield, kapalı çadır) şarttır. Renk kontrolü pratik kılavuzdur: gümüş/saman rengi kabul, mavi-gri kontaminasyon işaretidir.

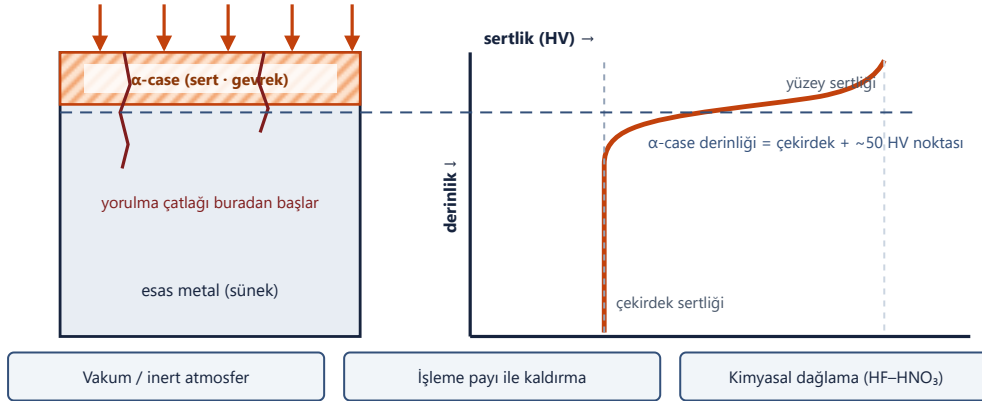
6. Uygulama Alanları

- **Havacılık (kullanımın ~yarısı):** Gövde yapıları, iniş takımı bileşenleri, motor fan/kompresör diski ve kanatları; kompozit gövdelerle galvanik uyumu sayesinde payı artmıştır.
- **Biyomedikal:** Kalça/diz protezleri, dental implantlar, travma plakları (Grade 23 ELI; kemiğe yakın elastisite modülü avantajı).
- **Kimya ve enerji:** Klorürlü proses ekipmanı, deniz suyu soğutmalı eşanjörler, jeotermal ekipman.
- **Denizcilik ve savunma:** Denizaltı bileşenleri, zırh, sualtı ekipmanı.
- **Diğer:** Spor ekipmanları, saat/gözlük, yüksek performans egzoz sistemleri.

7. Sık Karşılaşılan Sorunlar: Tanı ve Önleme

Sorun	Tipik görünüm	Kök neden	Başlıca önlemler
Alfa-case	Yüzeyde sert-kırılgan, O'ce zengin katman; erken yorulma çatlakları	Yüksek sıcaklıkta O/N alımı (ısıl işlem, döküm yüzeyi)	Vakum/inert atmosfer, kimyasal dağlama ile katman kaldırma, işleme payı
Hard-alpha inklüzyonu	UT'de iç gösterge; kırıkta sert nokta	Ergitme hammaddesinde N'ce zengin parçacık	Nitelikli sünger/hurda, çoklu VAR, tam hacim UT
Kaynak kontaminasyonu	Mavi-gri renklenme, gevrek dikiş	Yetersiz gaz koruması	Arka/iz koruması, renk kontrol kabulü, temizlik
Hidrojen gevrekliği	Gecikmeli çatlama, TiH_2 iğneleri	Asitleme/servis kaynaklı H alımı ($> \sim 150$ ppm)	Kontrollü asitleme, vakumda H giderme tavlı
Sürtünme/yenme (galling)	Bağlantılarda sarma, yüzey hasarı	Pasif filmin yerel kırılıp soğuk kaynaklaşması	Anti-seize, farklı malzeme eşleşmesi, yüzey işlemi (anodizasyon, nitrürleme)
İşleme kaynaklı yüzey hasarı	Beyaz katman, çekme artık gerilmesi	Kör takım, yüksek hız, kuru kesme	Takım yönetimi, parametre disiplini; kritik parçada bilyalı dövme (shot peening)

Yüksek sıcaklıkta (ısıl işlem - döküm - kaynak) O ve N difüzyonu



Şekil 3. Alfa-case oluşumu ve ölçülmesi. Titanyum yüksek sıcaklıkta oksijen ve azotu **çözer**; yüzeyde kalan O'ce zengin katman sert ama gevrek ve yorulma çatlaklarına hazır bir başlangıç yüzeyi sunar. Derinliği mikro-sertlik taramasıyla, **çekirdek sertliğinin ~50 HV üzerine çıktığı nokta** ölçüt alınarak belirlenir; katman kaldırılmadıkça parça sağlam sayılmaz. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

8. Kalite Kontrol ve Standartlar

- Kimya:** O, N, H analizleri (inert gaz füzyon) alaşım analizi kadar kritiktir; Grade'i fiilen oksijen belirler.
- NDT:** Havacılık döner parçalarında tam hacim daldırmalı UT; yüzey için FPI; kaynaklarda RT + renk muayenesi.
- Mikroyapı:** α tane boyutu/oranı, lamel kalınlığı, alfa-case derinliği (mikro-sertlik taramasıyla); β -transus doğrulaması.
- Mekanik:** Çekme, kırılma tokluğu (K_{IC}), LCF/HCF; implantta ISO 5832 serisi gereklilikleri.

- **Başlıca standartlar:** ASTM B265 (levha), B348 (çubuk), B367 (döküm), F136/ISO 5832-3 (cerrahi Ti-6Al-4V ELI), AMS 4911/4928 (havacılık Ti-6Al-4V), AMS 2801 (ısıt işlemleri).

9. Güncel Eğilimler

Eklemeli imalatın olgunlaşması (toz kalitesi, HIP+ısıt işlemleri reçeteleri, süreç izleme) titanyumda "al-ışle-at" oranını (buy-to-fly) düşürüyor. Diğer başlıklar: düşük maliyetli toz üretim rotaları (HDH, elektroliz temelli), Ti-6Al-4V'ye alternatif işlenebilirliği iyileştirilmiş alaşımlar, biyomedikalde gözenekli (trabeküler) baskılı yapılar ve β -Ti düşük modüllü implant alaşımları (Nb/Zr/Ta'lı, Ni içermeyen).

10. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Lütjering, G., Williams, J.C., *Titanium*, 2. baskı, Springer, 2007.
2. Leyens, C., Peters, M. (ed.), *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH, 2003.
3. Donachie, M.J., *Titanium: A Technical Guide*, 2. baskı, ASM International, 2000.
4. Polmear, I. vd., *Light Alloys*, 5. baskı, Butterworth-Heinemann, 2017.
5. ASM International, *ASM Handbook Vol. 2*, 1990.
6. İlgili standartlar: ASTM B265/B348/B367/F136, ISO 5832, AMS 4911/4928/2801.