ALUMİNYUM ESASLI İNTERMETALİK BİLEŞİKLER

İntermetalik bileşikler, yüksek sıcaklıkta kimyasal ve mekanik kararlılık gerektiren çeşitli uygulamalar için geliştirilmiş malzemelerdir.

İntermetalikler içinde aluminyum içerikli malzemeler yani alüminidlerin, potansiyel ağırlık tasarrufunun yanı sıra oksitleyici ortamda ve havada ısıtıldığında, yüzeyinde koruyucu alümina tabakası oluşmaktadır. Bu bileşikler yüksek ergime noktasına, iyi korozyon direncine ve yüksek mukavemete sahip olup nispeten düşük yoğunluklu malzemelerdir.

Aluminyum esaslı intermetalik bileşikler içerisinde en çok kullanılanları;

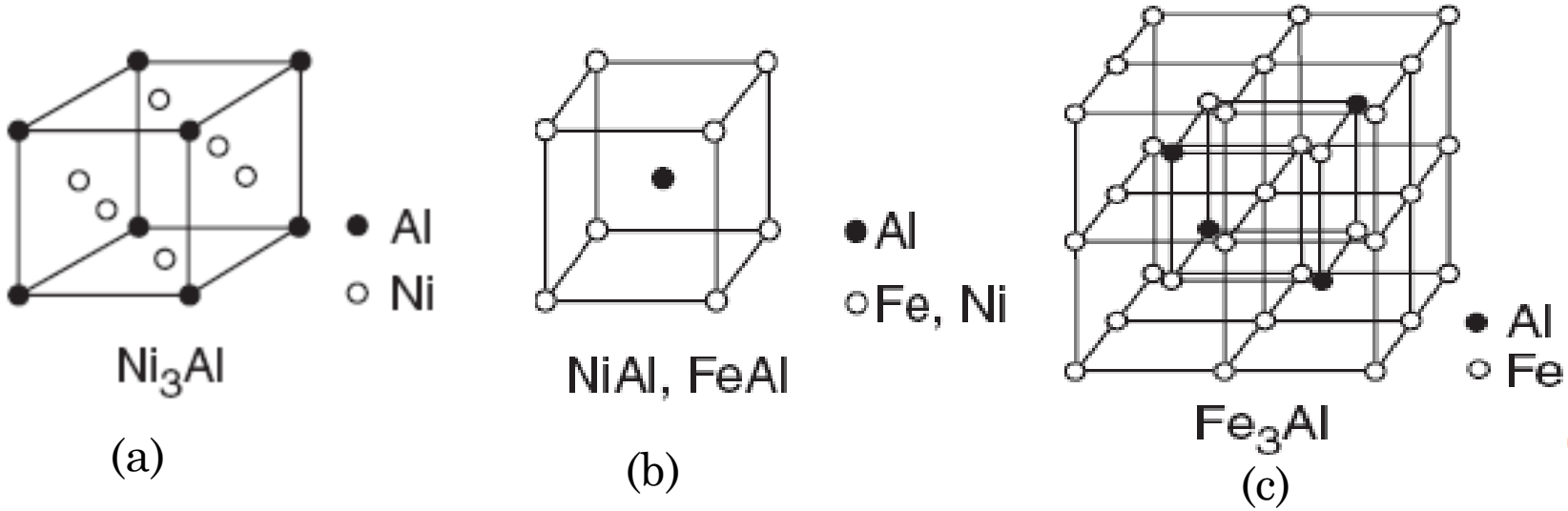
- Demir alüminidler
- Nikel alüminidler
- Titanyum alüminidlerdir.

Yüksek çalışma sıcaklığı için, süper alaşımlar veya çelikler gibi daha yoğun yapısal malzemelere alternatif olarak Ni_3Al, NiAl, Fe_3Al, FeAl, Ti_3Al ve TiAl gibi aluminyum esaslı intermetalik bileşikler kullanıma sunulmuştur.

Bu tip alaşımların içinde de demir alüminidler bu özelliklerinin yanı sıra düşük malzeme maliyeti ile ilgi uyandırmaktadır .

Yüksek sıcaklık uygulamaları için oldukça elverişli olan Ti-, Fe- ve Ni- aluminidler üzerinde son yıllarda yapılan araştırmalarda, alaşımlama ve üretim işlemleri kontrol altında tutularak kristal yapıları, mikroyapısal oluşumları, tane yapıları ve kompozisyonları geliştirilerek gevreklik problemleri giderilmeye çalışılmaktadır. Yeterli Al içeren bileşiklerde oksitleyici ortamda, yüzeyde kompakt ve koruyucu alümina (Al_2O_3) oluşmaktadır.

Şekilde alüminid yapılarda atomların dağılımları gösterilmiştir. Alüminidlerin çoğu belirtilen kompozisyon aralığının üzerinde oluşmakta ve stokiometriden sapma artarken düzen oranı da düşmektedir. İlave edilen elementler yapıda herhangi bir düzensizlik oluşturmadan yerleşirler. Örneğin Ni_3Al'da Si atomları alüminyum konumlarına, Co atomları nikel konumlarına ve Fe atomu her iki konuma da yerleşebilmektedir.



Şekil. Nikel ve demir aluminidlerin kristal yapıları (a) $L1_2$, (b)B2, (c) DO_3

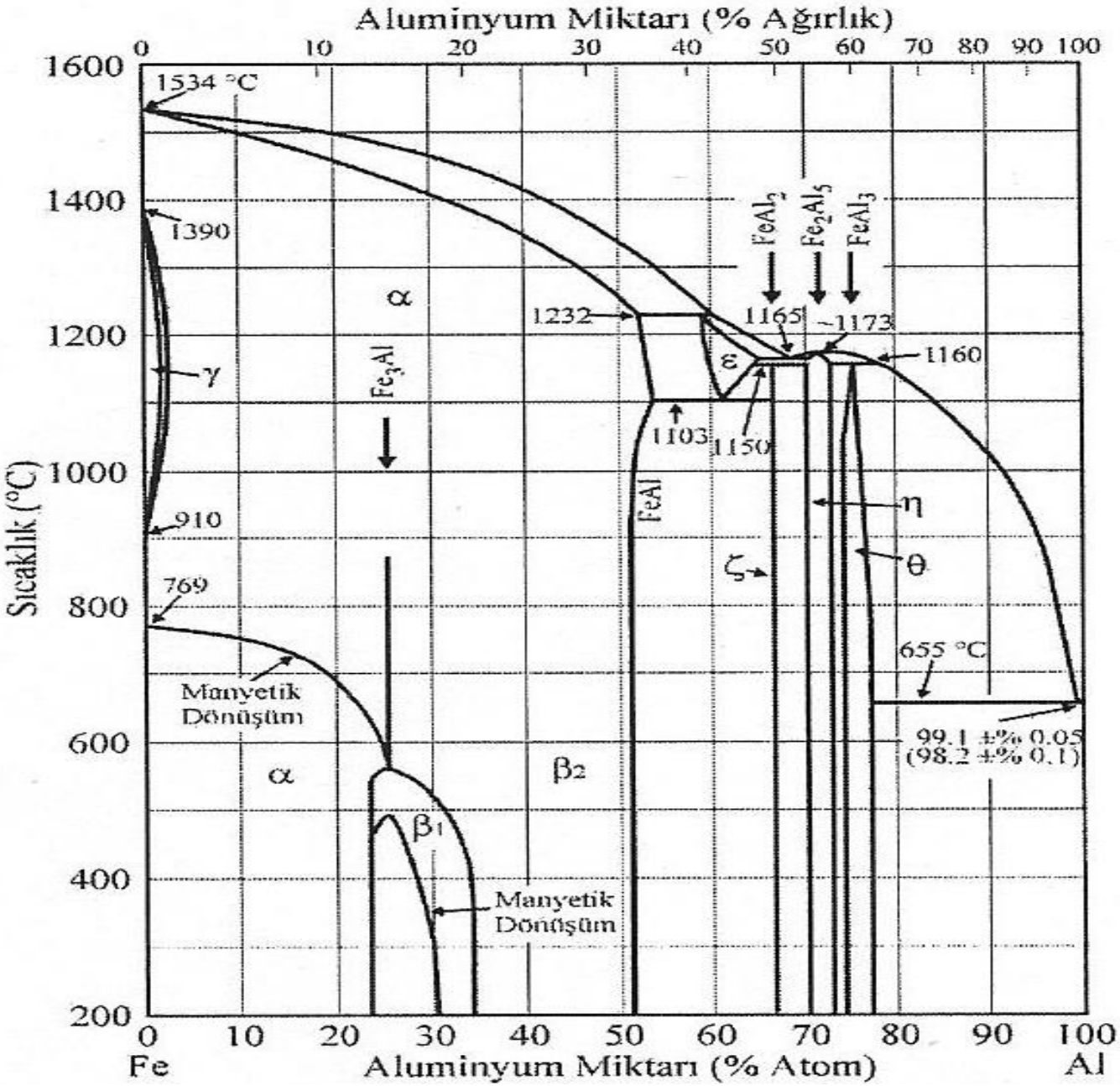
Demir Aluminidler: Fe-Al ikili faz diyagramında Fe_3Al, FeAl, $FeAl_2$, Fe_2Al_5 ve $FeAl_3$ intermetalik bileşikleri mevcuttur. Bu intermetalik bileşiklerden, Fe-Al faz diyagramının demirce zengin kısmında bulunan, B2 yapısı ile FeAl ve $D0_3$ yapısı ile Fe_3Al, Fe-Al sisteminin en kararlı yapıları olup;

- fiziksel,
- ısıl,
- elektrik ve
- mekanik

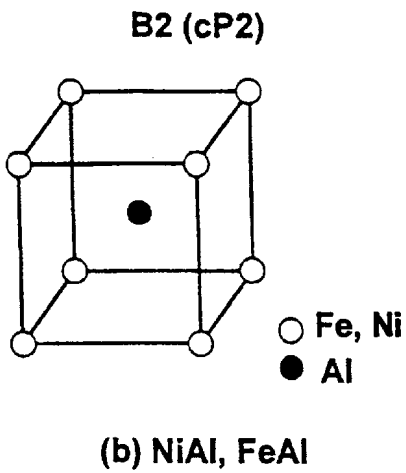
yönden çekici özelliklere sahiptir .

Demir alüminidler;

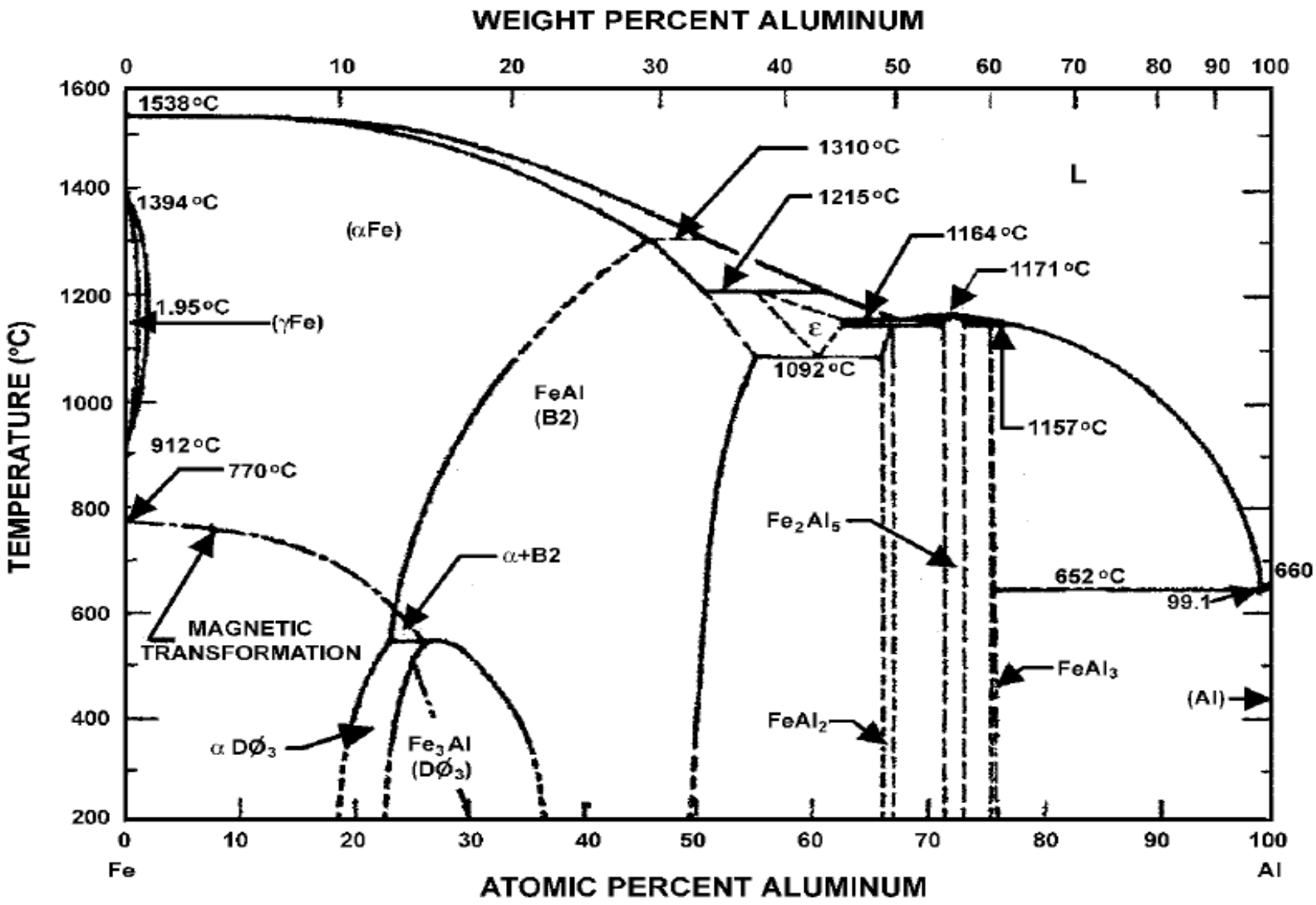
- yüksek ergime noktasına,
- yüksek mukavemete,
- demir esaslı malzemelere göre düşük yoğunluğa,
- nispeten düşük malzeme maliyetine,
- yüksek sertliğe,
- mükemmel korozyon ve oksidasyon direncine,
- yüksek elastik modüle ve
- ticari metalik alaşımlardan farklı olarak yüksek elektrik direncine sahiptirler.



Fe-Al ikili denge diyagramı



FeAl'un kristal yapısı


WEIGHT PERCENT ALUMINUM
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
TEMPERATURE (°C)
1538°C
1394°C
1.95°C
(γFe)
(αFe)
912°C
770°C
MAGNETIC
TRANSFORMATION
α DØ3
Fe3Al
(DØ3)
α+B2
FeAl
(B2)
1310°C
1215°C
1164°C
1171°C
L
ε
1092°C
1157°C
Fe2Al5
652°C
660
99.1
FeAl3
(Al)
FeAl2
Fe
Al
ATOMIC PERCENT ALUMINUM

Tablo. Denge diyagramında yer alan fazlar, ağırlıkça oranları ve Pearson sembolleri

Faz	Bileşim, Ağ. % Al	Pearson Sembolü
(αFe)	0-28	cI2
(γFe)	0-0,6	cF4
FeAl	12,8-37	cP2
Fe_3Al	13-20	cF16
ε	40-47	cI16
$FeAl_2$	48-49.4	aP18
Fe_2Al_5	53-57	oC?
$FeAl_3$	58.5-61.3	mC102
(Al)	100	cF4
Meta fazlar		
Fe_2Al_9	68.5	mP22
$FeAl_6$	74.3	oC28

Bununla birlikte, bu alaşımların başlıca dezavantajları;

- zor elde edilmeleri,
- oda sıcaklığında düşük sünekliğe ve kırılma tokluğuna sahip olmaları,
- 500-600 ºC civarındaki sıcaklıklarda mukavemetinin düşmesi,
- rutubete maruz bırakıldığında orta ve oda sıcaklığında lokal gevrekleşme hassasiyeti,
- atmosferik su buharı ve metaller arasında, hidrojenle kimyasal reaksiyon sonucu gevrekleşme meydana gelmesidir .

Demir alüminidlerin kullanımını sınırlandıran en önemli faktör gevrek karakterleridir. Demir alüminidlerin gevrekliğinin muhtemel nedenlerini;

- zayıf tane sınırı,
- lokal gevrekleşme ve
- boşluk sertleşmesi oluşturmaktadır.

Havadaki mevcut nemin sebep olduğu lokal gevrekleşme Fe_3Al ve FeAl'un düşük gerilme sünekliğinin ana nedenidir. Fe_3Al alaşımlarının gevrek karakterinin nedeni lokal gevreklik iken, %38 üzerinde alüminyum seviyesine sahip FeAl bileşimlerindeki gevrekliğin nedeni tane sınırlarının zayıflığı ve boşluk sertleşmesidir. FeAl alaşımları için taneler arası kırılma baskın olduğunda oda sıcaklığındaki düşük gerilme süneklikleri tane büyüklüklerine bağlı olmaktadır.

İşleyiş bakımından lokal kırılma, havadaki nem ile Al atomlarının reaksiyonunu ve hidrojenin açığa çıkmasını kapsayan bir kimyasal reaksiyon ile izah edilmektedir. Hidrojen atomunun çatlak uçlarına girmesi FeAl alaşımlarında hidrojenin neden olduğu gevrekliğe yol açmaktadır.

Bununla birlikte, lokal gevreklik FeAl alaşımlarındaki zayıf gevreklik ve düşük sünekliğin tek sebebi değildir. Artan Al konsantrasyonu tane sınırı zayıflığına neden olmakta ve gerilme sünekliğini sınırlamaktadır.

İlave olarak, FeAl alaşımlarındaki ısıl boşluklar, kayma düzlemleri boyunca klivaj kırılmasını arttırmaktadır. Ancak bu tip malzemelerin mekanik özellikleri, alaşımlama ve mikroyapı kontrolü ile geliştirilebilmektedir .

Ayrıca demir alüminidlerin sürünme dayanımı, kararlı ikinci faz partiküllerine ve var olan ince disperse olmuş partiküllere bağlıdır ve 500-600ºC sıcaklık aralığında sürünme dayanımının, çözelti veya karbür eklemesiyle geliştiği bilinmektedir.

Demir alüminidlerin, ticari anlamda yaygın kullanımı için, düşük maliyet avantajının yanında, güvenilir malzeme üretim tekniklerine ihtiyaç vardır.

Demir alüminidler;

- mekanik alaşımlama,
- basınçlı sinterleme
- geleneksel ergitme ve dökme teknikleri,
- geleneksel haddeleme veya
- toz metalurjisi yöntemleri

ile üretilebilmektedir. Döküm işlemi sırasında demir alüminidler, kolayca hidrojeni absorbe ederek hidrojen gaz boşlukları oluşturabilmektedir. Eğer demir alüminid nemli havada ergitilecekse He ve Ar gibi koruyucu gaz atmosferi gereklidir.

Demir alüminidlere sıcak işlem veya ekstrüzyon ile de şekil verilmektedir. Demir alüminidlerin üretimindeki bir diğer yöntem ise basınçlı sinterleme metodu olup bu metot az miktarda malzeme ve teçhizat kullanımına, ikincil deformasyon işleme gerek duyulmamasına, son şekle yakın malzeme üretimine ve üründe mikroyapı kontrolüne imkan vermektedir. Demir alüminidler, demir esaslı ticari alaşımlarla karşılaştırıldığında mükemmel oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinden dolayı, otomotiv endüstrisinde özellikle enerji verimini arttırmada tercih edilen bileşiklerdir .

Fe_3Al ve FeAl esaslı demir alüminidler oksijen ve havada ısıtıldığında yüzeye tamamen yapışan ve sürekli bir koruyucu alümina tabakası oluşturmak için yeterli derecede yüksek Al konsantrasyonuna sahiptir.

Buna karşın birçok ticari alaşım ağırlıkça % 2'den daha az Al içerir ve aynı şekilde oksidasyon direnci için yüksek konsantrasyonda ağırlıkça %18Cr içerir. Krom içeren alaşımlar hava ve oksijene maruz kaldığında Cr_2O_3 şeklinde oluşur ve oksidasyon direnci 950ºC'deki Cr_2O_3-CrO_3 dönüşümüyle sınırlıdır.

Demir alüminidlerin yüzeyinde koruyucu alümina tabakası oluşması nedeniyle oksidasyon atmosferinde mükemmel korozyon direnci sergilemeleri, bu alaşımları kömür enerji dönüşüm sistemleri, gaz filtreleri, korozyon direncini arttırmada kaplama malzemesi ve ara yüzey tabakasında bağlayıcı eleman olarak kullanım için aday malzemeler haline getirmiştir.

Ayrıca demir alüminidler, nikel ve krom gibi stratejik elementler ilave edilen daha pahalı yüksek sıcaklık yapı malzemeleri için düşük maliyetli alternatif potansiyel malzemelerdir ve bu alaşımlar yüksek elektriksel dirence sahip olduklarından, direnç gösteren ısıtıcı eleman olarak kullanılabilecek ideal yapılardır.

FeAl: FeAl, hacim merkezli kübik (HMK) yapının bir türevi olan B2 yapısına sahiptir. B2 yapısı en basit yapı olup, yapı bileşenlerinin formülü AB şeklindedir. A atomları birim kafes yapının hacim merkezine, B atomları ise birim kafesin köşelerine yerleşmektedir.

FeAl, yaklaşık Fe-36Al'dan, 400ºC civarındaki sıcaklıklardaki stokiometrik bileşimlere kadar, geniş bileşim aralığında kararlıdır. Fe_3Al alaşımları ile mukayese edildiğinde, FeAl daha iyi oksidasyon ve korozyon direncine ve nispeten düşük yoğunluğa sahiptir.

FeAl, çelik ve ticari demir bazlı alaşımlarla karşılaştırıldığında mükemmel oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemet ve düşük yoğunluğa sahiptir. İlave olarak, birçok ticari metalik ısı elemanıyla karşılaştırıldığında ise daha yüksek elektriksel öz direnç sergiler. Bu özellikleri ile FeAl alaşımları, yüksek sıcaklık yapı malzemeleri, gaz filtreleri, bağlayıcı ve ısıtıcı elemanlar olarak düşünülen bileşikler haline gelmiştir.

Tek kristalli FeAl, düşük sıcaklık derecelerindeki basmada, düşük süneklik gösterir. Pratik olarak çok kristalli FeAl'in stokiometrik bileşimindeki çekme sünekliği, basma sünekliği kadar düşüktür ve süneklik azalan Al ile ve stokiometrik sapmanın artışıyla artar.

FeAl alaşımlarının havada gevrek olduğu bilinmektedir. Gevrek karakterleri, demiri zengin olduğunda sadece % 2-3 uzama ve stokiometrik kompozisyona yakın alaşımlarda ve özellikle sünekliğin olmayışı ile B2 faz kararlılığı devam eder. FeAl'un havada kırılma şekli stokiometrinin duyarlılığına bağlıdır.

Gevreklik, FeAl'un çatlaklarındaki hidrojen çözülmesine bağlıdır ve artan deformasyon oranıyla azalmaktadır. Yapıdaki boşluklar sertliği, akma mukavemetini arttırır ve sünekliği azaltır. Etkiler azaltıldığında, FeAl kuru oksijende, % 18'e kadar kopma uzaması ile tamamen sünek olabilir.

FeAl, iyi kaynak özellikleri, yüksek korozyon ve yüksek aşınma direnciyle tanımlanmaktadır. FeAl bileşiğinin deformasyon ve kırılma davranışları, tasarım ve üretim aşamasında belirli fiziksel metalurji prensipleriyle geliştirilmektedir.

Söz konusu temel prensipler;

- Al seviyesinin kontrol altında tutulması (< % 38Al)
- Tane büyüklüğünün inceltilmesi
- Koruyucu yüzey kaplamasının oluşturulması
- 400 ºC'nin altında yavaş soğuma ile ısıl boşlukların en aza indirilmesi
- Faydalı elementlerin alaşıma ilave edilmesi olarak sıralanabilir.

Kömür enerji sistemlerindeki elemanlar
Isıtma elemanları
Karbürize ortamında çalışan sanayi sistemleri için yapısal unsurlar
Gıda sanayiinde
Otomotiv parçaları
Korozyon direncini arttırmada kaplama malzemeleri

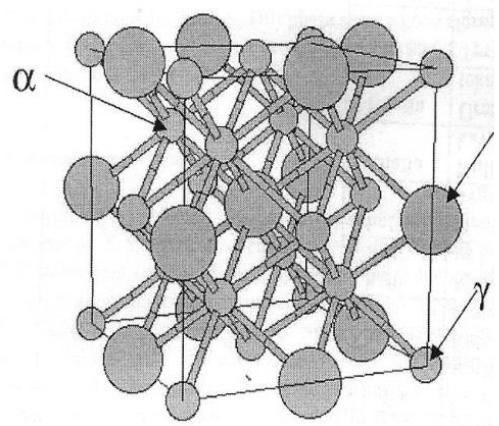
Tablo. FeAl intermetalik bileşiğine ilave edilen bazı alaşım elementleri ve alaşım elementlerinin geliştirdiği özellikler

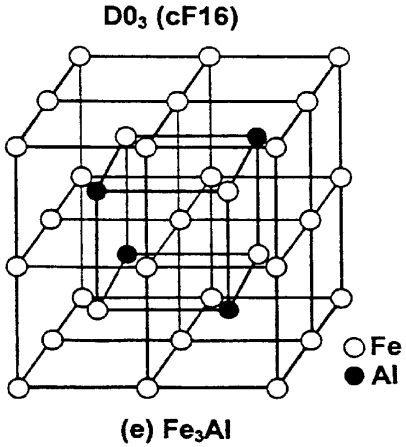
Alaşım Elementi	Özellikleri
Bor	Tane sınırlarını kuvvetlendirir
Karbon	Kaynak yapılabilirliği iyileştirir ve karbürlerin oluşmasını sağlar
Zr boratlar/karbürler	Tane büyüklüğünün kontrolü ve lifli tane yapısının muhafazası için
Mo	Sürünme direncinin ve mukavemetin arttırılması

Fe_3Al: Fe_3Al, $D0_3$ yapısı ile demir alüminidlerin en kararlı yapılarından biridir. $D0_3$ fazı, alaşım elementleri gibi geçiş metallerine ve birkaç demir alt kafesine sahiptir.

Kübik alt kafeste tamamen (γ) ve ikinci alt kafeste yarı (α) dizilmiş halde Fe atomları bulunmaktadır. Al, (β) alt kafesinde bulunur. (γ) alt kafesindeki Fe atomları ve β alt kafesindeki Al atomları, oktahedral düzlemdeki en yakın komşuları gibi sadece 8 Fe atomuna sahip olduğu halde, (α) alt kafesindeki Fe atomları, tetrahedral düzlemde 4 Al ve 4 Fe atomuyla çevrilidir.

Fe_3Al, katı durumdaki zincirleme reaksiyonlarla soğuma sırasında oluşmaktadır, daha sonra HMK düzensiz katı çözeltiye dönüşmektedir, Bu çözelti 800ºC'nin üzerinde kararlıdır. İlk FeAl fazı B2 yapısıyla oluşur, bu faz 550-800ºC arasında sabittir. Daha sonra $D0_3$ yapısıyla da Fe_3Al'a dönüşür. Bu reaksiyon zincirinin kritik derecesi, ergime derecesinden çok daha düşüktür. Bu da NiAl gibi alüminidlerle karşılaştırıldığında atomlar arasında daha güçsüz bağlara işaret eder.





Şekil. Fe_3Al'un kristal ($D0_3$) yapısı (γ) ve (α) demir alt kafesi, (β) Al alt kafesi

Fe_3Al ve HMK FeAl katı çözeltisi arasında bir denge vardır. Demiri zengin bölgede iki fazlı bir denge vardır. Alüminyumu zengin bölgede ise $D0_3$ yapılı Fe_3Al'dan B2 yapılı FeAl'a iki yönlü bir geçiş vardır. Zincirin 550ºC civarında olan kritik noktası üçüncü bir element eklenmesiyle daha yüksek sıcaklıklara dönüştürülebilir. Bu elementler Cr, Mo, Mn, Ti ve Si olabilir.

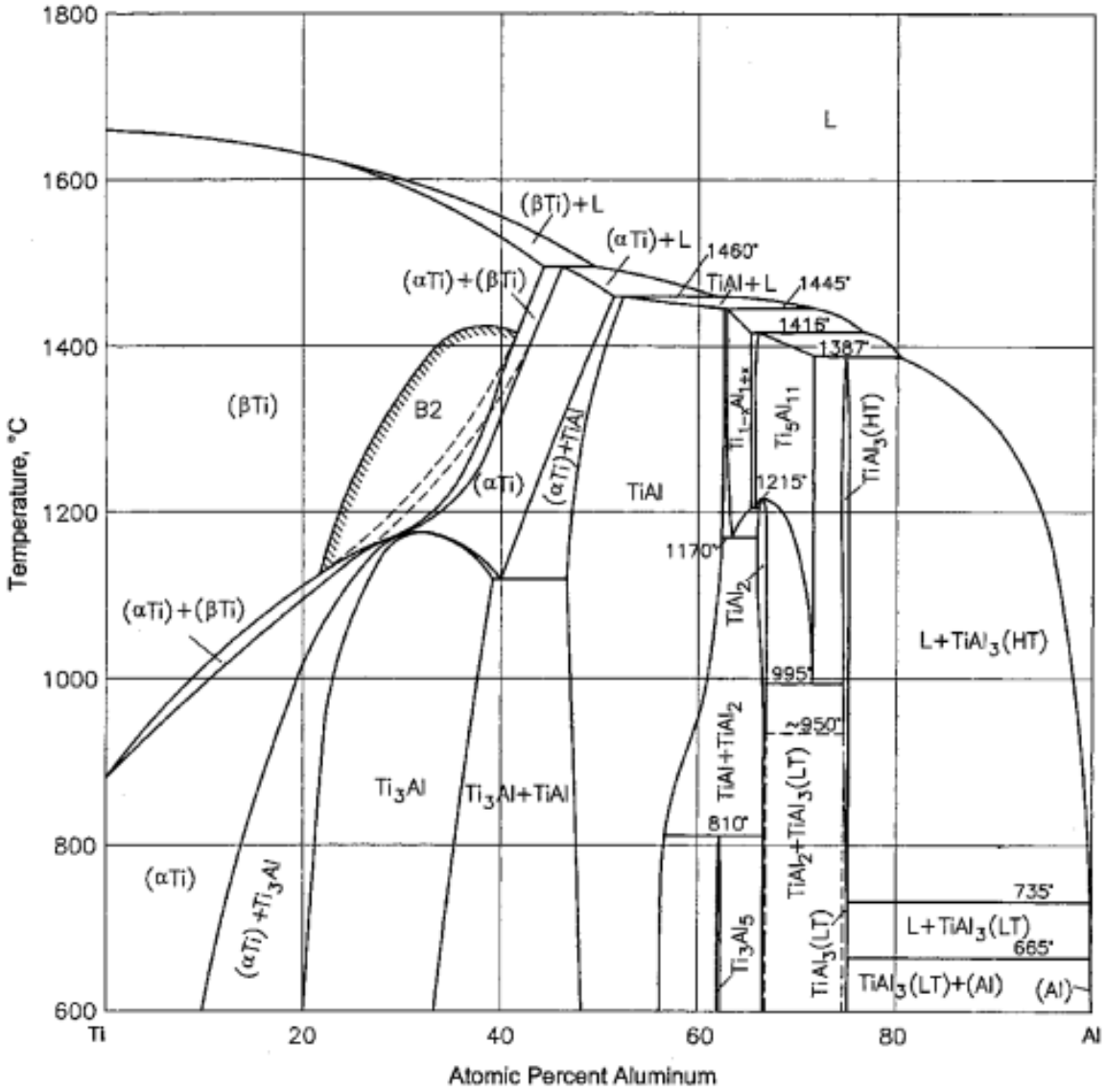
Düşük oluşum entalpisinden dolayı kolaylıkla ısıl boşluklar oluşmaktadır. Öyle ki düşük oluşum entalpisi, yayınma entalpisinden dahi daha düşüktür. Bunun sonucu olarak, Ni_3Al ve saf metallere göre boşluk konsantrasyonunda yüksek bir denge söz konusudur ve difüzyon enerjisi Al ile değişmektedir.

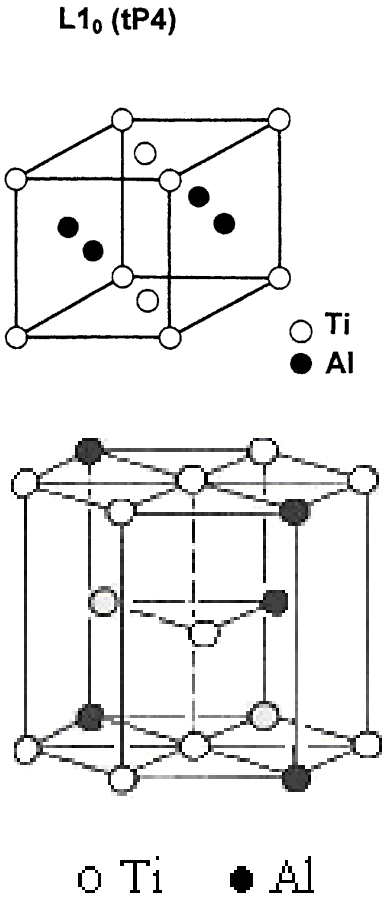
Yüksek manyetik geçirgenlik özelliği Fe_3Al'u manyetik bir malzeme olarak kullanışlı hale getirmektedir. Ayrıca Fe_3Al, petrokimya endüstrisinde ve geleneksel güç ünitelerinde veya kömür dönüşüm fabrikalarında yüksek sıcaklık uygulamaları için umut vaat eden malzemedir. Ayrıca oda sıcaklığında sınırlı süneklik özelliği, dönüşüm reaksiyon sıcaklığının üzerinde azalan mukavemet, düşük kırılma tokluğu, zayıf işlenebilirlik ve düşük lokal gevreklik direnci sergilemesine rağmen bu özelliklerde, kontrollü üretim ve kompozisyon bileşimi ile tatmin edici gelişmeler elde edilmektedir.

Fe_3Al geleneksel üretim metotlarıyla geliştirilen bileşiklerdendir ve bu metot yüksek sıcaklık senteziyle (SHS) kendi kendine meydana gelen ürün prensibine dayanmaktadır.

Titanyum Alüminidler

Titanyum alüminidlerin, sıkı paket hegzagonal A3 yapısı ile Ti_3Al ve kübik A2 yapısı ile TiAl bileşikleri sahip oldukları üstün özelliklerle ilgi uyandırmaktadır.



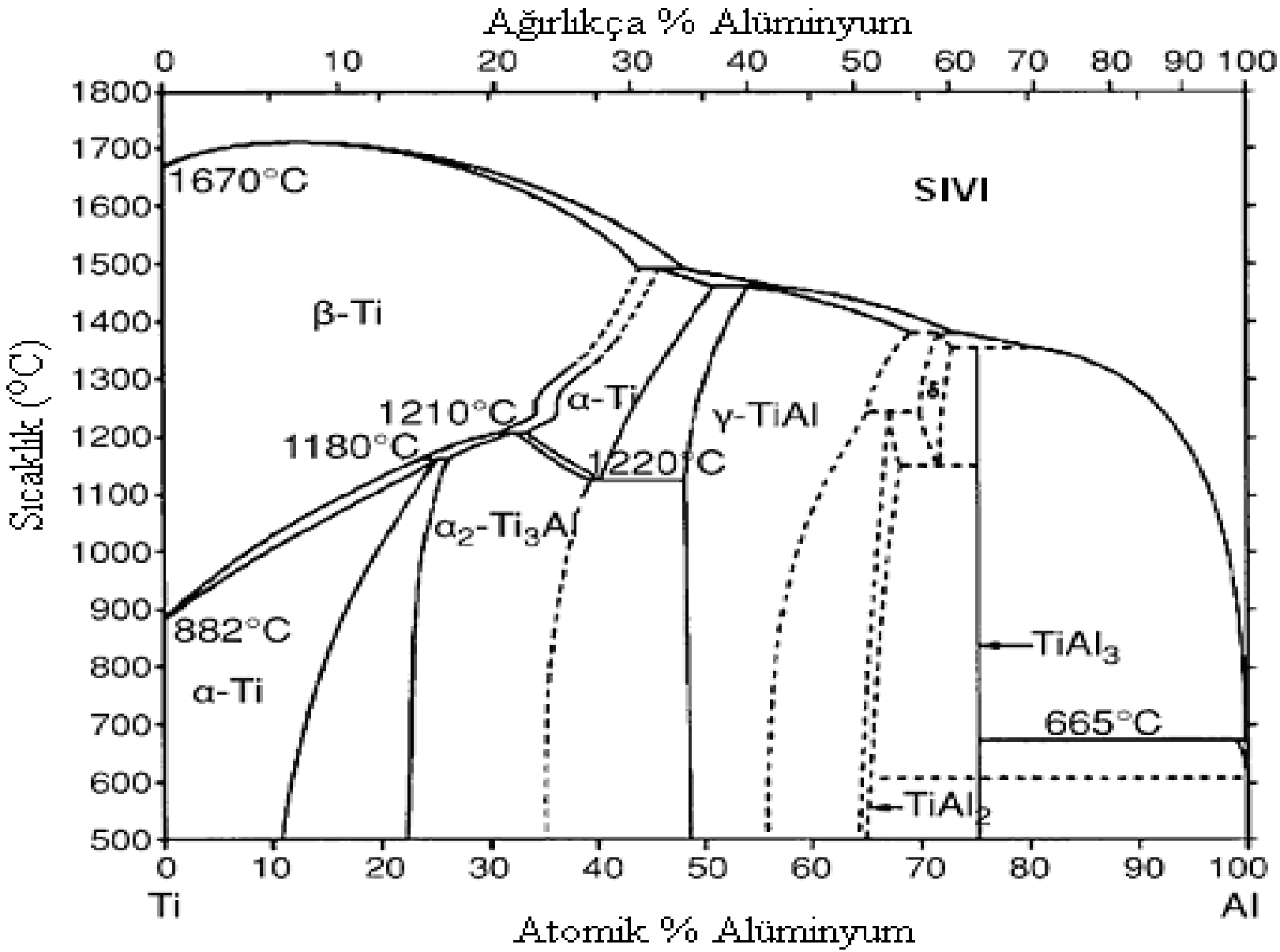


Şekil. Titanyum alüminidlerin kristal yapıları

Tablo. Titanyum alüminitlerin kristal yapıları ve latis parametreleri

Phase	Composition, at.% Al	Pearson symbol	Prototype	Lattice parameter, nm
$TiAl_3$ (HT)	74.5-75.0	*tI*8	$TiAl_3$	a = 0.3849 c = 0.8609
$TiAl_3$ (LT)	~75	*tI*32	...	a = 0.3877 c = 3.3828
Ti_5Al_{11}	66-71	(a)	...	a = 0.3953 c = 0.4104(b)
$TiAl_2$	66-67	*tI*24	$HfGa_2$	a = 0.3970 c = 2.4309
$Ti_{1-x}Al_{1+x}$	63-65	*tP*4	AuCu	a = 0.4030 c = 0.3955
Ti_3Al_5	62	*tP*32	Ti_3Al_5	a = 1.1293 c = 0.4038
TiAl(γ)	50-62	*tP*4	AuCu	a = 0.4000 c = 0.4075(c)
$Ti_3Al(\alpha_2)$	~20-39	*hP*8	Ni_3Sn	a = 0.5782 c = 0.4629

(a) Tetragonal. (b) Subcell parameters at 66 at.% Al. (c) At 50 at.%


Ağırlıkça % Alüminyum
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
1800 1700 1600 1500 1400 1300 1200 1100 1000 900 800 700 600 500
Sıcaklık (°C)
1670°C
SIVI
β-Ti
1210°C
α-Ti
γ-TiAl
1180°C
1220°C
α2-Ti3Al
882°C
α-Ti
TiAl3
665°C
TiAl2
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Ti
Al
Atomik % Alüminyum

Titanyum aluminid intermetalikleri özellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve yüksek sıcaklık özellikleri ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte zayıf kırılma tokluğu, düşük süneklik ve gevreklik gibi özelliklere sahiptir.

Alaşım elementi ilavesiyle (ör; B, Mn, Cr, V, Nb.. v.b) bileşiklerin süneklik değerleri iyileştirilmiştir. Titanyum alüminidler yüksek sıcaklıklarda koruyucu Al_2O_3 den ziyade, TiO_2 oluşum eğilimi ile karakterize edilirler. Bu eğilim, alüminidlerin max. kullanım sıcaklıklarında oksidasyon direncini arttırır ve yüksek sıcaklıklarda yeterli seviyede sürtünme mukavemeti sağlar. Bu alüminidlerin özellikleri ve süper alaşımlarla mukayesesi tabloda gösterilmiştir.

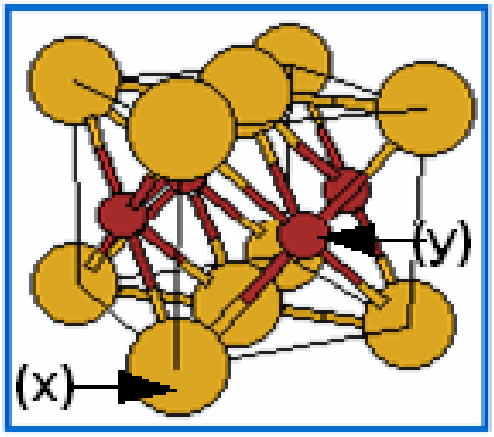
Tablo. Ti-Aluminid alaşımları ve süper alaşımların özellikleri

	Geleneksel Ti alaşımları	Ti_3Al	TiAl	Nikel-esaslı süperalaşımlar
Yoğunluk, g/cm^3	4,5	4,1-4,7	3,7-3,9	8,3
Young modülü, MPa	96-100	100-145	160-176	206
Akma mukavemeti, MPa	380-1150	700-990	400-650	...
Çekme mukavemeti, MPa	480-1200	800-1140	450-800	...
Sürünme limiti, °C	600	760	1000	1090
Oksidasyon limiti,°C	600	650	900	1090
Oda sıcaklığında süneklik, %	20	2-10	1-4	3-5
Yüksek sıcaklıkta süneklik, %	Yüksek	10-20	10-60	10-20
Kristal Yapı	HSP/HMK	DO_{19}	$L1_0$	YMK/L_2

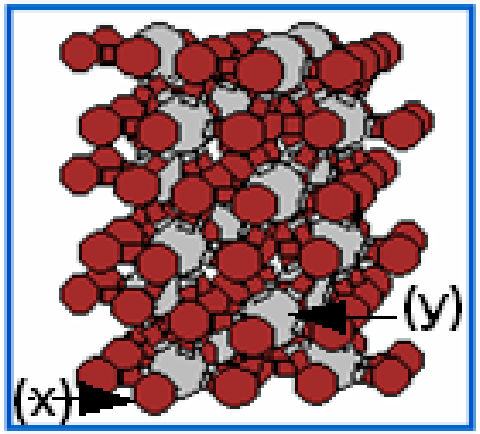
Ti_3Al ve TiAl esaslı titanyum aluminidler çok düşük yoğunluklarından dolayı geliştirilmiş uçak motoru uygulamaları için aday malzemelerdir. Kırılma direncinin düşük olmasına rağmen, titanyum aluminidler yüksek performans için büyük potansiyele sahiptirler.

Bu alaşımlar geleneksel titanyum alaşımlarından daha yavaş difüzyon hızına sahip olduğundan mukavemetin korunması, sürünme ve gerilme kopması ve yorulma direnci gibi artan yüksek sıcaklık özellikleri gösterirler.

En büyük dezavantajları ise düşük sıcaklıklarda düşük sünekliğe ilaveten yüksek sıcaklıklarda istenilenden daha düşük oksidasyon direnci göstermesidir.



(a)



(b)

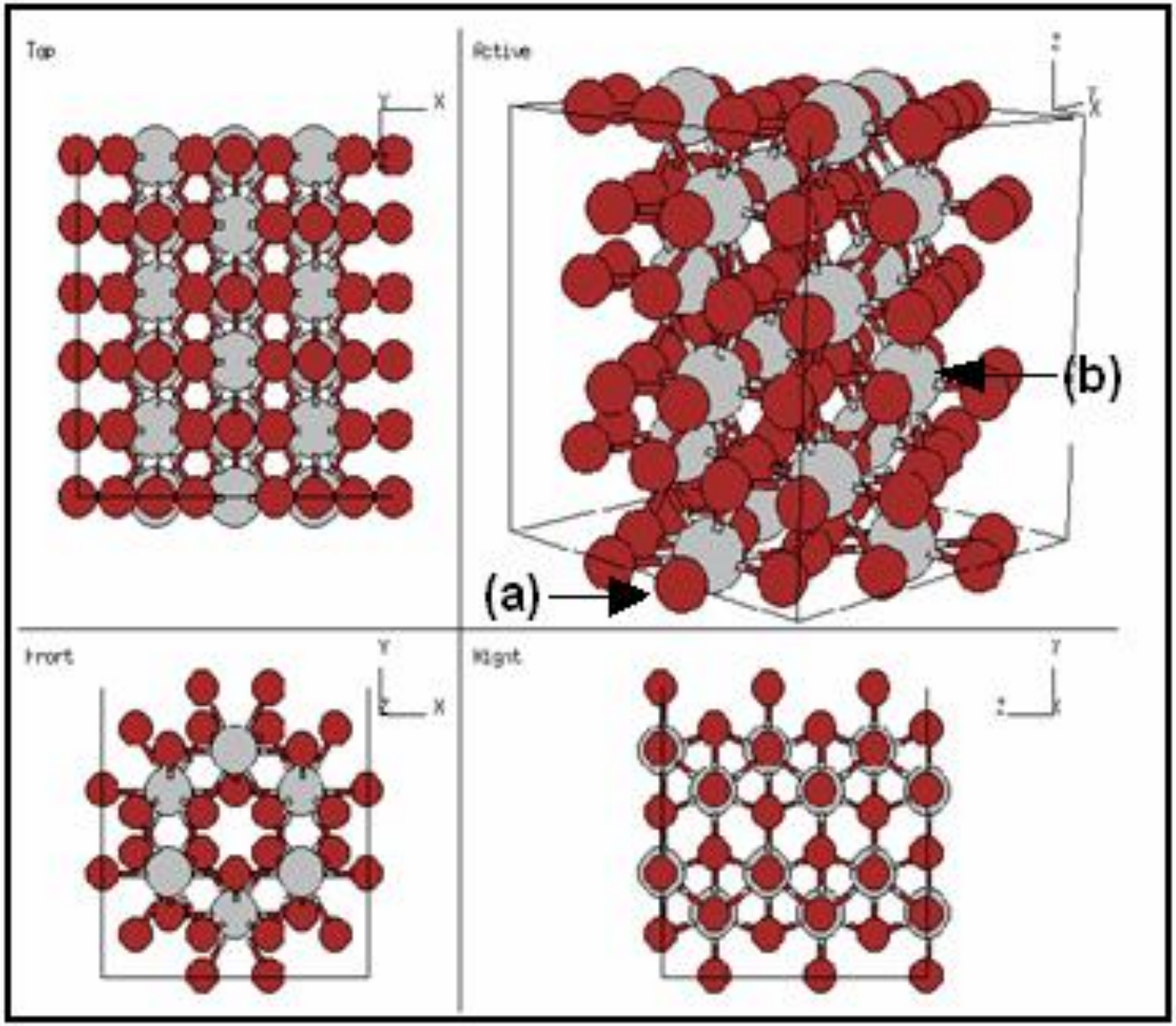
Şekil. Titanyum aluminidlerin kristal yapıları (a) TiAl, $L1_0$, (b) Ti_3Al, DO_{19} (x:Ti, y:Al)

Ti_3Al: Ti_3Al, $D0_{19}$ düzenli hegzagonal kristal yapısına sahip olup kafes parametreleri c ve a oranı (c/a) 0.8'dir. Genellikle yoğunluk için kabul edilen değer 4.2 gr/cm³'tür. Oda sıcaklığında, % 26 Al içeriği ile Ti_3Al için, Poisson oranı 0.29, young modülü 149 GPa, kayma modülü 58 GPa olarak bulunmuştur.

Ti_3Al bazlı alaşımlar için young modülü 100-145 GPa arasındadır, Ti bazlı geleneksel alaşımlar da ise bu değer 96-110 GPa arasındadır.

Ti_3Al bileşikleri düşük yoğunlukları ve yüksek sıcaklık özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, 600ºC üzerindeki düşük sıcaklıklarda pratik olarak deformasyon kabiliyeti olmayışı ile gevrek karakterdedir. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon kabiliyeti artmaktadır. Kırılma mukavemeti 600ºC üzerinde 600MPa civarındadır. Yüksek sıcaklıklarda ısıl olarak yumuşama meydana gelerek, muhtemel plastik deformasyondan sonra kırılma mukavemetinin altında akma mukavemeti meydana gelmektedir.

Ti_3Al bazlı intermetaliklerin, mikroyapı kontrolü ve ilave alaşım elementi eklenmesiyle süneklik ve mukavemet özellikleri geliştirilmektedir.



Şekil . Ti_3Al aluminidlerin kristal yapısı (a) Ti, (b) Al

Ti_3Al esaslı çeşitli malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla mikroyapı kontrolü ve alaşımlama ile hem dayanımı hem de sünekliliği iyileştirmek hedeflenmiştir.

Nb elementi sünekliliği iyileştiren en etkili elementtir. Mühendislik açıdan yapısal uygulamalarda Ti_3Al alaşımları %10-30 oranında Nb içermektedir. Daha düşük oranlarda Nb içerdiğinde malzemede daha fazla kayma sistemleri görülmesine karşın sünekliği düşük oranlarda iyileştiği tespit edilmiştir. Nb miktarı arttırıldığında A2 yapılı düzensiz β-Ti, düzenli B2 yapı veya ortorombik fazlara dönüşüm gerçekleşmektedir. Bu fazlar kayma mesafesini sınırlayan ve süneklik üzerine yararlı etkileri olan bir faz yapısıdır.

Her durumda mekanik davranışları;

- farklı fazların komşu taneler arasındaki ilişkisine,
- yüzeyler arası yapıya,
- kristal yapıya,
- kompozisyona,
- şekil, boyut ve dağılımına

bağlı olarak değişmektedir.

Yüksek sıcaklık uygulamaları için en önemli özellik sürünme direncidir. Mukavemeti geliştiren diğer alaşım elementleri **Cr, Ta, B, Mn, V, Zr ve Mo**'dir.

Ti_3Al veya Ti_3Al esaslı alaşımlar yüksek sıcaklıkta oksijene maruz bırakıldığında bir yandan oksidasyon meydana gelirken diğer yandan alaşımdaki oksijen ayrışır. Oksidasyon direnci, seçili oksidasyonla oluşan koruyucu Al_2O_3 tabakası olarak düşünülebilir, ancak Al_2O_3 kararlılığı, TiO kararlılığından biraz daha yüksektir ve Ti_3Al içindeki titanyum alüminyumdan daha fazladır. Bu nedenle TiO, Ti_3Al ile temas ettiğinde TiO_2 olarak şekillenir. Bu özellikleri Ti_3Al'un yüksek kullanım sıcaklıklarında oksidasyon direncini arttırarak, sürünme mukavemetinin yeterli seviyelerde tutulmasını sağlar.

Alaşım elementleri **Cr, Ta ve Mo** mukavemet özelliklerini ve sürünme dirençlerini iyileştiren elementlerdir.

Fe, C, Si elementleri ile mikro alaşımlama şeklinde ilave edilmektedir.
V ve **Sn** özelliklerin iyileştirilmesi için kullanılır.
Zr hem sünekliğin hem de dayanımın arttırmaktadır

TiAl: TiAl, geniş bileşim aralığına sahiptir ve ergime noktasına kadar kararlıdır. Çözünürlük sınırları arasındaki Al içeriğindeki değişim Ti veya Al bölgelerinde aşırı Ti veya Al atomlarıyla yapısal düzensizliklere sebep olmaktadır ve c/a oranı (tetragonal gibi) minimum Al içeriği için 1.01 ve maksimum Al içeriği için 1.03 arasında değişmektedir.

TiAl, tetragonal L1o kristal yapısına sahiptir. Kafes parametreleri c ve a oranı (c/a) 1.015'tir. 3.76 gr/cm³ olan yoğunluk değeri ile Ti esaslı alaşımlardan ve Ti_3Al bileşiğinden daha düşük yoğunluğa sahiptir. Oda sıcaklığındaki stokimetrik TiAl için Poisson oranı 0.23, kayma modülü 70GPa, young modülü 174GPa olarak bulunmuştur.

700ºC'ye kadar, yaklaşık 500MPa kırılma mukavemetine sahiptir. TiAl alaşımının mekanik özellikleri ve korozyon davranışı **Nb, Ta, Zr, W** gibi alaşım elementleri ile geliştirilebilir.

TiAl'un oksidasyon direnci, yüksek Al içeriği nedeniyle Ti_3Al'dan daha yüksektir. Titanyum alüminidler, hafiflik ve diğer fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ile uzay endüstrisinde yapısal malzemeler olarak kullanılabilen ideal yapılardır .

TiAl, korozyon davranışını ve mekanik özellikleri optimize etmek ve kontrol etmek amacıyla çeşitli atomsal yer değişimlerle ve ara yer elementlerle alaşımlandırılmıştır.

Yapılan çalışmalarda **V, Mn** ve **Cr,** Al ile veya hem Al hem Ti ile yer değiştirirken **Nb, Ta, Zr, Mo** ve **W** ise Ti ile yer değiştirmektedir. Bu alaşımlandırma çalışmalarının TiAl kafesindeki tercih yeri ve tetragonallik üzerine etkileri son zamanlarda deneysel bulgularla kısmi uyum içinde olduğu görülmüştür.

Ti_3Al ile karşılaştırıldığında elastik sabiti daha büyük, Poisson oranı daha küçüktür. TiAl geniş bileşim dağılımına sahip olup ergime noktasına kadar kararlıdır.

Mukavemet ve süneklik özellikleri Ti_3Al alaşımları ile benzer özellik taşımaktadır. 700ºC'ye kadar pratik olarak deformasyon kabiliyeti olmayışı ile gevrektir ve sadece yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyon gözlemlenir.

İkili Ti-Al sisteminde **$TiAl_3$** intemetaliğinin oluşumu pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar genel olarak titanyum alüminidlerin tane inceltici etkisi üzerine olmuştur.

Sistemin Al'ca zengin köşesinde yaklaşık olarak % 1,2 Ti bileşimi ve 665°C sıcaklıkta

$$L + TiAl_3 \leftrightarrow \alpha\text{-}Al$$

peritektik reaksiyonu oluşmaktadır.

$TiAl_3$ intermetalikleri ağırlıkça % 36,5-37,5 arası Ti içerirler ve 3,37 g/cm^3 yoğunluğa sahiptirler. Al ile olan büyük yoğunluk farkından dolayı $TiAl_3$ partikülleri sıvı Al içinde dibe doğru gitme eğilimindedirler. Yüksek sıcaklıktan yavaş soğutma yapraksı partiküllere neden olur.

Hızlı soğutma ve yüksek ısıl farklılık iğnesel oluşumlara neden olmaktadır. Eğer alaşım göreceli olarak düşük sıcaklıkta üretildiyse ve yüksek Ti içeriyorsa kübikten uzun tabakalara değişkenlik gösteren bloklar oluştuğu tespit edilmiştir .