

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALİK-İNTERMETALİK LAMİNAT (MİL)
KOMPOZİT ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Sinan YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sakin ZEYTİN

Şubat 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METALİK-İNTERMETALİK LAMİNAT (MİL)
KOMPOZİT ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Sinan YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Bu tez 09 / 02 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. Sakin ZEYTİN
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Hatem AKBULUT
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Özkan ÖZDEMİR
Üye**

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bilimsel katkıda bulunarak, eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e en içten teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Çalıőmalarım esnasında bana sunulan laboratuvar imkânlarından dolayı Met. ve Malz. Müh. bölüm başkanı Prof. Dr. Cuma BİNDAL ile SEM ve XRD imkânlarından faydalanmama izin veren Prof. Dr. Hatem AKBULUT'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalıőmalarımda bana yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mediha İPEK, Araő. Gör. Ramazan KARSLIOđLU, Mehmet UYSAL, Tekniker Ersan DEMİR ve Uzman Fuat KAYIŐ'a teşekkürü bir borç bilirim. Bana maddi ve manevi her türlü desteği veren aileme minnettarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından desteklenen 104M184 numaralı projenin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir. Bu vesile ile desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a özellikle teşekkür etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Kompozit Malzeme Teknolojisi.....	6
2.3. İleri Teknoloji Kompozitler.....	6
2.4. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	7
2.4.1. Yüksek mukavemet.....	8
2.4.2. Kolay şekillendirilebilme.....	8
2.4.3. Elektriksel özellikler.....	8
2.4.4. Korozyon ve kimyasal etkilere karşı mukavemet.....	8
2.4.5. Isıya ve ateşe dayanıklılık.....	8
2.4.6. Kalıcı renklendirme.....	9
2.4.7. Titreşim söndürme.....	9
2.5. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	9
2.6. Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	10

2.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre.....	11
2.6.1.1. Plastik matrisli kompozitler.....	11
2.6.1.2. Metal matrisli kompozitler.....	12
2.6.1.3. Seramik matrisli kompozitler.....	13
2.6.2. Yapı bileşenlerinin şekillerine göre.....	14
2.6.2.1. Partikül esaslı kompozitler.....	14
2.6.2.2. Lamel esaslı kompozitler.....	15
2.6.2.3. Fiber esaslı kompozit malzemeler.....	15
2.6.2.4. Dolgu kompozitleri.....	16
2.6.2.5. Tabaka yapılı kompozitler.....	16
2.7. Tabakalı Kompozitlerin Örnekleri ve Uygulamaları.....	18
2.8. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	19

BÖLÜM 3.

METALİK-İNTERMETALİK LAMİNAT (MİL) KOMPOZİTLER.....	23
3.1. Giriş.....	23
3.1.1. Yapısal performans özellikleri.....	28
3.1.2. Yapısal ve balistik özellikler.....	31
3.1.3. Yapısal ve sıcaklık yönetim özellikleri.....	32
3.1.4. Çok fonksiyonlu mil bileşenleri.....	34
3.1.4.1. Titreşim engelleyici boşluklu MİL kompozitler.....	34
3.1.4.2. Akışkan tüp modifiyeli MİL kompozitler.....	35
3.1.4.3. Algılama kapasiteli MİL kompozitler.....	36
3.1.4.4. İçinden kalın tel veya boru geçen MİL kompozitler.....	36
3.1.4.5. Tam fonksiyonel MİL kompozitler.....	37
3.2. İntermetalik Bileşikler.....	39
3.3. Al-Ti İkili Denge Diyagramı... ..	41
3.4. Ti-Al ₃ Ti Laminat Kompozit.....	45

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMA	56
4.1. Amaç ve Gerekçe.....	56

4.2. Deneş malzemeleri.....	56
4.3. Deneşlerin yapışı.....	58
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR.....	62
5.1. Gözle muayene.....	62
5.2. Enstrümantal sonuçlar.....	62
5.2.1. SEM ve SEM-EDS incelemeleri.....	63
5.2.2. XRD incelemeleri.....	66
5.2.3. Sertlik ölçümleri.....	68
5.2.4. Tabaka kalınlık ölçümleri.....	70
BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

MİL	:Metalik-intermetalik laminat kompozit
MMC	:Metal matrisli kompozit
SMC	:Seramik matrisli kompozit
PEEK	:Termoplastik kompozitler
SHS	:Kendiliğinden yürüyen yüksek sıcaklık sentezi
GSP	:Geometrik sıkı paket
TSP	:Topolojik sıkı paket
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
TEM	:Geçirimli elektron mikroskobu
CTP	:Cam fiber takviyeli polyester

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kompozit malzemelerde yapı türleri.....	3
Şekil 2.1.	Kompoziti oluşturan malzemeler ve onların bileşiklerinin resmi..	10
Şekil 2.2.	Kompozitlerin Havacılık Sektöründe Kullanımlarına Bazı Örnekler.....	20
Şekil 3.1.	a) Bir abalon kabuğunun kırılma yüzeyinin, mikroyapıyı oluşturan özel altıgen aragonit taşlarını gösteren bir SEM görüntüsü. b) Kırık bir numunedeki abalonun orta ölçekli görüntüsünde, bu çok tabakalı malzemedeki elde edilen çatlak ilerlemesini gösteren bir optik mikroskop görüntüsü.....	25
Şekil 3.2.	Düzlemsel tabakaların üretimi için levhasal pres fırını.....	26
Şekil 3.3.	Muhtelif MİL kompozitler için yorulma kaynaklı çatlak büyüme eğrileri.....	27
Şekil 3.4.	Basma mukavemetinin spesifik malzeme sertliğine olan oranını gösteren malzeme özellik haritası	29
Şekil 3.5.	Tipik bir MİL kompozit SEM mikroyapısı	30
Şekil 3.6.	Bir dizi yapısal malzemenin spesifik modüle karşı spesifik kırılma tokluğunu belirten özellik haritası. Koyu gri bölge MİL kompozitleri (Ti-Al ₃ Ti) ve diğer laminat sistemleri açık gri (L ile belirtilmiş), metaller, alaşımlar ve kompozitler	31
Şekil 3.7.	a) Bir MİL kompozitte balistik bir testte çarpma bölgesinin kesiti (levha kalınlığı 2cm), b) Balistik performansı geliştirmek için seramik fiberle güçlendirilmiş MİL kompozitin optik mikroskop görüntüsü.....	32
Şekil 3.8.	Bir dizi yapısal malzeme için spesifik modül ve kırılma tokluğu ile spesifik ısı kapasitesi ve termal iletkenliğin karşılaştırıldığı özellik haritası	33

Şekil 3.9. Bir Ti-Al ₃ Ti MİL kompozitin intermetalik tabasında kalınlık boyunca oluşturulmuş boşlukların X-Ray floroskop görüntüleri. Gri silindirik bölge yaklaşık 13cm çapındadır.....	34
Şekil 3.10. Bir Ti-Al ₃ Ti MİL kompozitin intermetalik tabasında kalınlık boyunca geniş bir boşluğun (10cm çaplı) çelik parçacıklarla doldurulmuş yapının X-Ray floroskopik görüntüsü.....	35
Şekil 3.11. İntermetalik katmanda gömülü tüpler içeren MİL kompozitlerin şematik gösterimi. solda ilk mikro yapı ve sağda patlama sonrasında çöken tüplerin mikro yapısı.....	35
Şekil 3.12. İki metal kablo geçirilmiş seramik tüp içeren Ti-Al ₃ Ti MİL kompozitin mikroyapısı	36
Şekil 3.13. Bir Ti-Al MİL kompozitinde kalınlık boyunca titanyum bir kablo gömülmüş bir örneğin mikro yapısı.....	37
Şekil 3.14. Bir Ti-Al ₃ Ti MİL kompozitin intermetalik tabasında seramik ile izole edilmiş tellerle birbirine bağlanan kalınlık boyunca ki boşlukların bir x-ray floroskop görüntüsü.....	38
Şekil 3.15. a) Yapısında bir piezoelektrik sensörü bulunduran MİL kompozitin görüntüsü ve b) reaksiyondan önce yerleştirilmiş piezoelektrik sensörün fotoğrafı.....	38
Şekil 3.16. Plakanın reaksiyonu sırasında aynı anda MİL kompozite gömülen dört piezoelektrik sensörden kaydedilen voltaj sinyalleri.....	38
Şekil 3.17. Al-Ti ikili denge diyagramı.....	42
Şekil 3.18. Sıcaklığa bağlı olarak, farklı Ti-Al bileşimlerinin dönüşüm serbest enerjileri grafiği.....	45
Şekil 3.19. Sinterleme öncesi ve sonrası tabakaların kalınlıkları. a)Sinterleme öncesi b)Sinterleme sonrası.....	46
Şekil 3.20. Takip eden reaksiyon sürelerinden sonra ard arda Ti-Al reaksiyonunun elektron geri saçılım mikroyapı görüntüleri: a) 1saat, b) 1 saat 20 dakika, c) 1 saat 30 dakika, d) 2 saat, e) 3 saat, f) 4 saat, g) 5 saat ve h) 6 saat.....	49

Şekil 3.21. İki lineer rejimle gösterilen reaksiyon süresiyle intermetalik tabaka kalınlıkları. Yarıda kesilen reaksiyon çalışmalarının verileri.....	50
Şekil 3.22. Katı Ti–sıvı Al ara yüzeyinde Al ₃ Ti'nin sentezinde ard arda oluşan olaylar; a) Başlangıç b) ve c) İnce tabaka halinde çekirdeklenme ve büyüme d) Ara yüzey enerjisinin sonucu olarak küreselleşme e) Katılaşma ve düşük reaksiyon kinetiği f) Yeni oluşan ara yüzeyden bitişik Al ₃ Ti bölgeleri g) Bitişik Al ₃ Ti bölgelerinin küreselleşmesi ve katılaşması h) Kürelerin ayrılması..	50
Şekil 3.23. Kısmi reaksiyona uğramış kompozitte reaksiyona uğramamış Al ile oluşan Al ₃ Ti intermetalik kürelerinin TEM mikroyapı görüntüsü.....	51
Şekil 4.1. Folyoların istif şekli.....	58
Şekil 4.2. Deneylede numunelerin istif edilerek fırına yerleştirildiği aparat	59
Şekil 4.3. Cıvatalar arasında kalan iki plaka arasındaki bölgeye numunelerin yerleştirilme düzeni.....	59
Şekil 4.4. Deneylede uygulanan tipik bir ısıtma rejimi.....	60
Şekil 4.5. Deneylelerin gerçekleştirildiği fırın.....	61
Şekil 5.1. 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapısı	63
Şekil 5.2. 650°C de 5 saat sinterlenmiş (127µm Ti-100µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	64
Şekil 5.3. 700°C de 10 saat (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	65
Şekil 5.4. 700°C'de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin XRD paterni.....	66
Şekil 5.5. 700°C'de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin XRD paterni	67
Şekil 5.6. 700°C'de 10 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin XRD paterni	67
Şekil 5.7. 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) istifli numunenin 50gf, 15sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı.....	68

Şekil 5.8.	650°C de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı.....	69
Şekil 5.9.	700°C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı.....	69
Şekil 5.10.	700°C de 10 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin 100gf, 15 sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı.....	69
Şekil 6.1.	650°Cde 7,5 saat sinterlenmiş 250µm Ti-100µm Al istifli numunenin SEM mikroyapısı.....	71
Şekil 6.2.	650°C’de 2,5 saat sinterlenmiş numunenin SEM mikroyapısı.....	73
Şekil 6.3.	Şekil 6.2’deki mikroyapıya ait karakteristik EDS paternleri a) %100 Ti b) Ti ve Al (hesaplanan değerlere göre Al ₃ Ti) c) %100 Al.....	74
Şekil 6.4.	700°C’de 10 saat sinterlenen numunenin Al ₃ Ti tabakasının ortasındaki mikroyapı.....	75
Şekil 6.5.	700°C’de 10 saat sinterlenen numunenin intermetalik tabakasının ortasındaki bölgenin SEM (ikincil elektron modunda) görüntüsü...	75
Şekil 6.6.	700°C’de 10 saat sinterlenen numunenin intermetalik tabakasının ortasındaki bölgenin SEM (geri saçılan elektron görüntüsü modunda) görüntüsü.....	76
Şekil 6.7.	700°C’de 7,5 saat süre ile işlem görmüş 250µm Ti /250µm Al başlangıç istifli numunede sertlik izi ve çatlakların davranışı.....	77
Şekil 6.8.	700°C’de 10 saat süre ile işlem görmüş 250µm Ti /250µm Al başlangıç istifli numunede sertlik izi ve çatlakların davranışı.....	78
Şekil A.1.	650°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	83
Şekil A.2.	700°C de 2,5 saat sinterlenmiş (500µm Ti-250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	84
Şekil A.3.	700°C de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti- 250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	85
Şekil A.4.	700°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti- 250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü	86
Şekil B.1.	650°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin 100gf, 15sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı	87

Şekil B.2.	700°C de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti-250µm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı	87
Şekil B.3.	700°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti- 250µm Al) numunenin 100gf, 20 sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı.....	88
Şekil C.1.	650°C de 2,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni.....	89
Şekil C.2.	650°C de 5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni	89
Şekil C.3.	650°C de 7,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni.....	90
Şekil C.4.	700°C'de 7,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni	90

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber takviyeli malzemelerin uygulama alanları.....	7
Tablo 3.1. Metaller arası bileşiklerin kritik özellikleri. Özellik Karakteristik tanımlar.....	40
Tablo 3.2. Al-Ti sistemine ait kristal yapılar.....	43
Tablo 4.1. DeneYlerde kullanılan folyoların özellikleri.....	57
Tablo 4.2. DeneYlere ait parametreler	60
Tablo 5.1. Şekil 5.1'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları.....	64
Tablo 5.2. Şekil 5.2'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları.....	65
Tablo 5.3. Şekil 5.3'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları.....	65
Tablo 5.4. Folyoların başlangıç ve sinterleme sonrası kalınlıkları.....	70
Tablo 6.1. Şekil 6.2'deki Görüntünün EDS sonuçları	73
Tablo 6.2. Şekil 6.4'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları	75
Tablo 6.3. Şekil 6.5'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları	76
Tablo A.1. Şekil A.1'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları	83
Tablo A.2. Şekil A.2'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları.....	84
Tablo A.3. Şekil A.3'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları.....	85
Tablo A.4. Şekil A.4'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları	86

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Laminat Kompozit, İntermetalik, Difüzyon, Kırılma tokluğu

Bu çalışmanın amacı, hafif ve yüksek performanslı yapısal uygulamalar için yüksek spesifik mukavemetli, yüksek tokluklu ve yüksek sertlikte bir malzeme üretmektir. Bu tür uygulamalar için halen monolitik titanyum aktif olarak kullanılmakla beraber, yüksek üretim maliyetleri onun büyük ölçüde kullanılmasını sınırlandırmaktadır. Ti-Al₃Ti laminat sistemi monolitik titanyumdan ve diğer laminat sistemlerden daha düşük bir yoğunlukta yüksek mukavemet, tokluk ve sertlik özelliklerine aynı anda sahiptir. Dahası, alüminyum titanyuma göre nispeten ucuz olduğundan, Ti-Al₃Ti sistemi ekonomik olarak monolitik titanyumdan çok daha caziptir. MİL kompozitleri yüksek sıcaklık ve basınç altında kontrollü bir reaksiyon yardımı ile yeni bir tek adımlı proses ile elementel alüminyum ve titanyum folyolarından üretilmektedir. Bu üretim prosesi açık havada gerçekleşir ve tam yoğun bir laminat kompozit verir. Orijinal titanyum ve alüminyum folyolarının kalınlıkları alüminyum folyonun komşu titanyum tabakaları ile reaksiyona girerek tamamen tükeneceği şekilde seçilir. Bu tür bir tabaka dizisi Al₃Ti ve Ti'den ibaret değişen tabaka yapılı bir kompozit meydana getirir ve son ürünlerdeki tabakaların kalınlığı başlangıç Ti ve Al folyolarının kalınlıklarına bağlıdır.

FABRICATION OF METALLIC INTERMETALLIC LAMINATE (MIL) COMPOSITES

SUMMARY

Key Words: Laminate composite, Intermetallic, Diffusion, Fracture toughness

The goal of this work is to produce a material with high specific strength, toughness and stiffness for light weight and high performance structural applications. While monolithic titanium is currently being actively used in these applications, high production costs limit its widespread use. Ti-Al₃Ti laminate system possesses a combination of high strength, toughness and stiffness at a lower density than monolithic titanium or other laminate systems. Further, since aluminum is relatively inexpensive compared to titanium, the Ti-Al₃Ti system is economically more attractive than monolithic titanium. MIL composites have been produced from elemental titanium and aluminum foils by a novel one-step process utilizing a controlled reaction at elevated temperature and pressure. This fabrication process is performed in open air and produces a fully dense laminate composite. The thickness of the original titanium and aluminum foils is chosen to ensure that the entire aluminum layer is consumed upon reaction with adjacent titanium layers. Such a layering scheme results in a composite with alternate layers of Al₃Ti and residual Ti and the thickness of the final layers are dependent upon the thickness of the original Ti and Al foils.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Cam fiberli polyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, çelik telli otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermetler bunlara birer örnektir. Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı bulunur [1].

Aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemedeki toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, kompozit malzemeler olarak adlandırılırlar. Atomal veya molekül düzeyde birleştirilen malzemeler (örneğin alaşımlar) makroskopik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar [2].

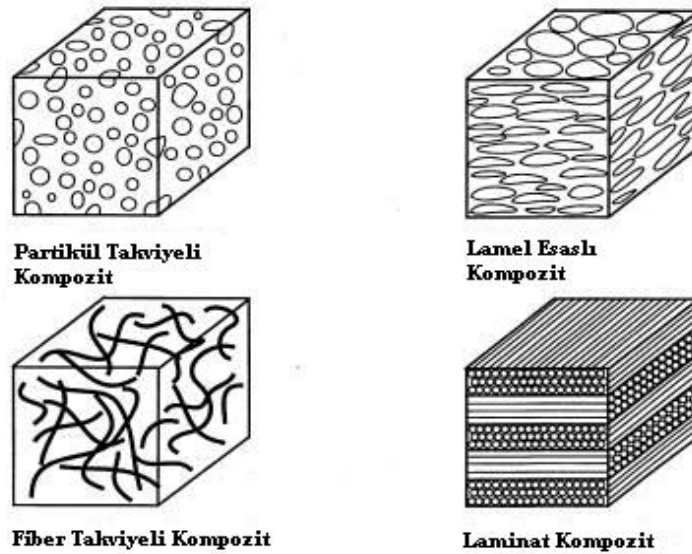
Malzeme özelliklerinin hepsi aynı anda iyileşmez ve zaten buna gerek de yoktur. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir kompozit malzemenin, bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb.). Bazı özellikler için ise bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Tasarımcı bu durumda emniyetli davranarak emniyet katsayılarını çok yüksek seçmek zorunda kalır ve kompozit malzeme kullanımı ekonomik olmaktan çıkabilir [2].

Kompozit malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır, önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılacak en uygun malzemedir, ilk CTP tekne 1942'de yapılmış, ilk fiber

sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri kompozit malzemeden yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda kullanılan kompozit malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (plastikler) içerisine gömülmüş karbon fiberleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron fiberleri veya 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisnde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli kompozit malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam fiber-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere kullanılacak kompozit malzeme istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb. özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturulabilmektedir [2].

Bu malzeme grubu hava ve uzay endüstrileri yanında kara ve deniz taşımacılığı, çeşitli spor malzemeleri tıp gereçleri, robot yapımı (eylemsizlikleri az ve rijit olduklarından), kimya sanayi (korozyona dayanıklı olduklarından), elektroteknik, elektronik (yalıtkan olduklarından) ve müzik aletleri yapımı gibi birçok uygulama sahası bulmuş durumdadır. Sıralanan bu uygulamalarda kompozit malzemeler geleneksel bazı malzemelerle yarış halindedirler [2].

Kompozit malzemelerin üretilmesindeki asıl amaç, az enerji harcayarak çok iş yapabilen araçların, cihazların ve yapıların üretilmesini sağlamaktır. Günümüzde kullanılan otomobillerin fren diskleri genel olarak dökme demirden yapılmaktadır. Bu geleneksel malzeme yerine alternatif olarak metal matrisli kompozitler kullanılabilir. Böylece, daha düşük ağırlığa sahip alternatif malzemeler üretilerek, çok daha düşük yakıt sarfıyatı, daha uzun malzeme ömrü ve daha başarılı bir frenleme elde edilebilir. Bu konu ile ilgili bir başka örnek uzay mekiklerinin uzaya çıkması verilebilir. Seramik ve metal matrisli kompozit malzemelerin kombinasyonu şeklinde yapılan bir mekik, geleneksel malzemelerin ağırlıkta olduğu bir mekiğe göre çok daha ucuz, uzun ömürlü, yüksek hızlı uçuşlar yapabilmektedir [3].



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerde yapı türleri [4]

Teknolojinin ilerlemesi ile söz konusu malzemeler kendilerinden beklenen özellikleri sağlayamaz oldular. Mesela, çelik istenen mukavemet özelliğini sağlamasına rağmen ağırlığı sebebi ile gelecekteki birçok uygulama alanında yerini kaybetmektedir. Ağırlık problemi alüminyum gibi özgül ağırlığı daha az olan malzemelerle halledile biliniyor ise de maliyet ve mukavemet gibi başka özelliklerin sağlanamaması sonucu malzeme üretimi konusunda yeni kaynaklara ve teknolojilere ihtiyaç ortaya çıkmaktadır [5].

İnsanlar ağaç ve benzeri bitki liflerinin kullanılmasında çok eskilere dayanan bir alışkanlığa sahiptir. İpek, deri, boynuz, kuştan ineğe her türlü hayvanın kemiği ve kuştüyü gibi malzemeleri de çok eski zamanlardan beri kullanmıştır. Bunlar mukavemet, tokluk, şekil değişimine karşı direnç gibi mekanik özellikler sebebi ile kullanışlı hale gelmiş ve günümüzde kullanılabilirliğini kaybetmemiş malzemelerdir. Bazıları canlı vücuduna ayak ve diş gibi protezler olarak kullanılmıştır. Bitkisel esaslı malzemeleri ele alacak olursak; bunlar tarım ve gıda bilimi ile uğraşanlar tarafından inceden inceye araştırılmıştır. Yapı botanikçileri de ince yapılar üzerinde elektron mikroskobu kullanarak derinlemesine araştırmalar yapmışlardır. Bitkileri mühendislik malzemesi olarak kullanmalarına rağmen malzeme bilimcileri bu malzemelerin yapısı konusunda çok az çalışmışlardır. Bu durum bitkisel asıllı malzemelerin botanik terimleriyle tanımlanmasına, dolayısıyla malzeme bilimi

açısından oldukça karmaşık olan bitki yapısının anlaşılmasına sebep olmuştur. Malzemeciler bitki yapısını incelemeye hücre seviyesinden başlamalıdır [5].

Bu çalışmada tabakalı kompozitlerin bir alt sınıfında bulunan Ti-Al₃Ti (metalik-intermetalik) laminat kompozitlerin üretim yöntemi incelenmiştir ve bazı özellikleri karakterize edilmiştir. İçerik olarak kompozit malzemelerin gerekliliği ve gruplandırılmasına da yer verilmiştir [5].

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Giriş

Belirli özgül özelliklerinin çok yüksek olması sebebiyle kompozit malzeme kullanımı hızla artmakta, pek çok alanda da geleneksel malzemelerin yerini almaktadırlar. Başlangıçta hafiflikleri sebebiyle uzay sanayinde kullanımı ile dikkat çekmişlerse de günümüzde gıda sektöründen otomotiv sektörüne, inşaat sektöründen denizcilik sektörüne kadar hemen her alanda kullanılmaktadırlar [5].

Kompozit malzeme kullanımı izotropik malzeme şartlarında dizayn ve tasarıma alışmış mühendis ve malzemeciler için oldukça farklı bir ortam oluşturmaktadır. İzotropik malzemenin her yönde yalnız bir değerle ifade edilebilen özelliklerinin, kompozit malzeme kullanımı durumunda birden çok değerle ifade edilmesi gerekmektedir. En basit durumda, tek yönde takviye edilmiş ortotropik yapıya sahip bir levhada takviye doğrultusunda ve buna dik doğrultuda olmak üzere iki çekme mukavemeti, iki elastisite-modülü, iki ısı genleşme katsayısı ile iki elektrik ve ısı iletim katsayısı gibi değerlerinin bilinmesi ve tasarımda göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Üstelik bu değerler doğrultulara göre çok büyük farklılık göstermektedir [5].

Kompozit malzemenin izotropik malzemeye göre farklı yönlerinden biri de malzemenin, makine parçasının üretimi sırasında hazırlanmasıdır. Yani, izotropik malzemedeki olduğu gibi yarı mamul malzemedeki çeşitli işlemlerle parça imalatı çoğu zaman söz konusu değildir [5].

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen dört temel faktör vardır. Bunlar; matris malzemesinin özellikleri, fiber malzemesinin özellikleri, ara yüzey özellikleri ve mikroyapı özellikleri olarak sayılabilir. Kompozit malzeme basit

şekliyle sürekli doğrusal bir fiber ve fiberle yapışık olarak katılmış bir matris malzemeden meydana gelmektedir. Matris ve fiber malzemelerin gerekli şartları sağlayan çeşitli kombinasyonları ile oluşturulan kompozit malzemeler kullanılan fiber/matris malzemelerine göre isimlendirilirler. Buna göre bazı kompozitler; Cam/Cam, Cam/Epoksi, Metal/Metal, Seramik/Metal, Karbon/Seramik şeklinde örneklenebilir. Ayrıca matris malzemesine göre metal matris kompozitler (MMC), seramik matris kompozitler (SMC), termoplastik kompozitler (PEEK) şeklinde de adlandırılmaktadırlar [5].

2.2. Kompozit Malzeme Teknolojisi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı, inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan kerpiç duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Sonraları taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Otoyollar, asfalt ve çakıl taşı karışımı ile daha lineer, dayanımlı bir duruma getirilmiştir. Teknoloji gelişimine paralel olarak elektrik enerjisi naklinde kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İyi bir iletken olan bakır fiberler ile hafif bir metal olan alüminyum matris kullanılarak, enerji nakli daha verimli bir hale getirilmiştir. Selüloz ve reçineden oluşan kâğıt ise, yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak bilimin ve insanlığın hizmetine sunulmuştur. Kompozitler her çağda geniş kullanım alanı bulmuşlar ve sürekli geliştirilmişlerdir [6].

2.3. İleri Teknoloji Kompozitler

İleri kompozitler, uçak ve uzay sanayisi gibi dayanım bükülmezlik ve hafiflik kombinasyonunun gerekli olduğu uygulamalarla ilgilidir. Bazı örnekler Tablo 2.1’de verilmiştir. İleri kompozitlerde tipik olarak polimer veya metal matris içerisinde boron grafit veya kevlar fiber kullanılır. İleri kompozitler, yüksek dayanım alaşımlarından daha iyi dayanım ve yorulma direncine sahiptirler [7].

Tablo 2.1. Fiber takviyeli malzemelerin uygulama alanları [7]

Malzeme	Uygulamalar
Borsik-Alüminyum	Motorlarda, diğer hava taşıtlarında, uzay uygulamalarında
Kevlar – Epoksi	Havacılık, uzay (uzay mekiği dâhil), bot teknesi
Kevlar – Polyester	Spor gereçleri (tenis raketleri, golf sopası, olta çubuğu) uçaksavar kılıfı
Grafit – Polimer	Uzay, otomotiv, spor gereçleri
Cam – Polimer	Hafif otomotiv uygulamaları, su ve denizcilik uygulamaları, korozyon dirençli uygulamalar, spor gereçleri, uzay ve havacılık parçaları.

İleri kompozitler, yüksek özgül dayanım avantajı sağlamak için modern uçaklarda hem yapısal hem de yüzey kısmında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler sıcaklık nispeten düşük olduğunda daha etkilidir. Grafit, boron veya silisyum karbürle mukavemetlendirilmiş alüminyum titanyum veya nikel gibi metal matris kompozitler, yüksek sıcaklıkla karşılaşıldığında kullanılır [7].

2.4. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre önem kazanmaları, bunların değişik uygulamalarda belirli özelliklere sahip olmasından ileri gelir. Bunlar; çekme, basma, eğme, akma, sürünme, yorulma mukavemeti, sertlik, tokluk, rijitlik, aşınma direnci gibi mekanik özellikler; elektriksel iletkenlik/yalıtkanlık, magnetik özellikler, yoğunluk v.b fiziksel özelliklerle; kararlılık, korozyon direnci gibi kimyasal özelliklerdir. Malzeme seçimi ve dizaynında önem kazanan ve değişik tekniklerle ölçülebilen bu özelliklerin yanı sıra malzemenin birim maliyeti, gereksinilen tonaj, kolay bulunabilirlik, işlenebilme ve şekillendirilebilme gibi diğer faktörler de mühendis ve işletmecilerin her zaman göz önünde bulundurdukları faktörlerdir [6].

Uygulamada pek çok durumda elimizdeki malzemedan yukarıda ileri sürdüğümüz özelliklerin çoğuna sahip olmasını bekleriz. Kompozit malzemelerin özelliklerini şu şekilde açıklayabiliriz [6].

2.4.1. Yüksek mukavemet

Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetleri birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı, kompozitlere istenilen yönde ve istenilen bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedен tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilir [6].

2.4.2. Kolay şekillendirilebilme

Kompozitler malzemeler yeni tasarım esneklikleri sunarlar. Büyük ve kompleks parçalar, tek işleme bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar [6].

2.4.3. Elektriksel özellikler

Uygun malzemelerin seçilmesiyle, çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilir [6].

2.4.4. Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet

Kompozitler; hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler, kimyevi madde tankları, boru ve aspiratör, tekne ve deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır [6].

2.4.5. Isıya ve ateşe dayanıklılık

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özellikleri, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir [6].

2.4.6. Kalıcı renklendirme

Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenilen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez [6].

2.4.7. Titreşim sönümlendirme

Kompozit malzemelerde, süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özellikleri metallere önemli ölçüde fazladır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiştir [6].

2.5. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin mantığı gereği, bir tür malzemenin olumsuz özellikleri mevcutsa bu özellik mevcut kompozit malzemeye yansır. Örneğin kompoziti oluşturan matris organik çözücülere karşı dayanıksız ise, onun oluşturduğu kompozite de bu olumsuzluk yansır. Dolayısıyla bu kompozit malzemelerin, organik çözücülerin bol miktarda bulunduğu ortamda kullanılmaması gerekir. Aynı mantık, sıcaklık, nem v.s. gibi kimyasal etkiler açısından kullanılmaması da yürütülebilir [6].

Kompozit malzemelerde şu tür dezavantajlar görülmektedir:

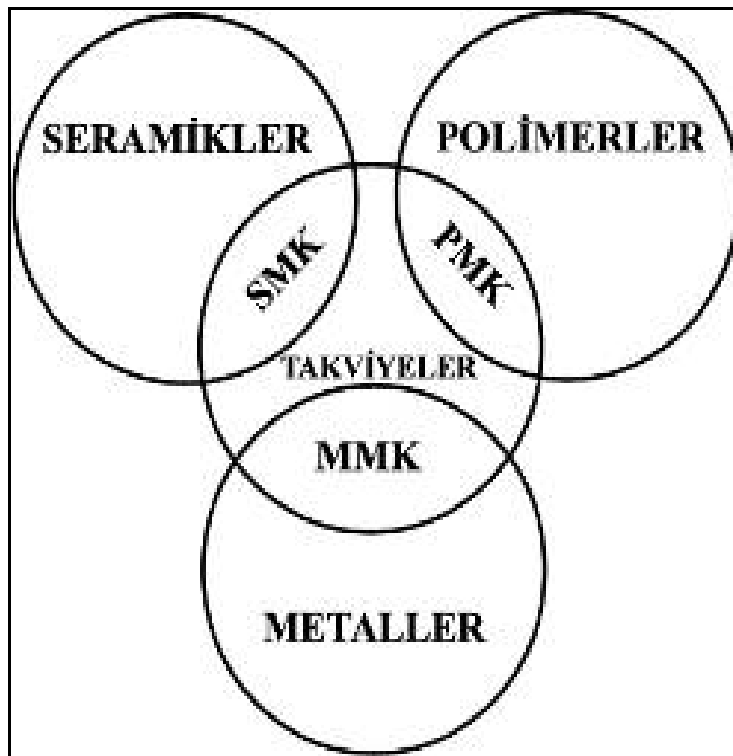
- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri, malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkiler.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda, değişik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme türü operasyonlar fiberlerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- İyi tanımlanmamış tasarım parametreleri varsa, bundan dolayı ham malzeme açısından en yüksek imalat verimliliğine ulaşamaması bir dezavantajdır.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlara rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından, deniz teknelerine, kimyasal madde depolama

tanklarına, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir [6].

2.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler anafazı oluşturan malzemeye göre üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar, seramik matrisli, polimer matrisli ve metal matrisli kompozitlerdir (Şekil 2.1) [3].



Şekil 2.1. Kompoziti oluşturan malzemeler ve onların bileşmelerinin resmi [3]

Kompozit malzemeler, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre plastik kompozitler, metalik kompozitler, seramik kompozitler v.b. bir gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de partikül esaslı kompozitler, lamel esaslı, fiber esaslı kompozitler, dolgulu (kafes) kompozitler, tabaka yapıları kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir [6].

2.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre

2.6.1.1. Plastik matrisli kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici, darbe emici ya da istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki ayrı sınıfta incelenebilir [6].

a) Termoplastikler: Bu tür plastikler, ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. Genellikle 5-500°C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu gruba giren plastikler olarak; naylon, polietilen, karbon florür, akrilikler, selülozikler, viniller sayılabilir [6].

b) Termoset Plastikler: Bu tip plastiklerde ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikleri ise; polyesterler, epoksiler, alkiller, aminler olarak verilebilir [6].

— **Plastik-Metal fiber kompozitler:** Endüstride çok kullanılan bir tür olan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (bakır, bronz, alüminyum, çelik vs.) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirilmesi amacıyla elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirilme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır [6].

— **Plastik-Cam fiber kompozitler:** İsteğe göre termoplastikler veya termoset plastikten oluşan matris ve cam fiberlerin uygun kompozisyonlarından üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam fiberler birçok durumda metal, asbest, sentetik fiber ve pamuk ipliği gibi fiberlere tercih

edilebilirler. Ancak cam fiberli kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılğan olmasından dolayı çok az dirençlidirler [6].

Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de, daha önce belirtildiği gibi termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerin de düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam fiber takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyesterlerdir [6].

— **Plastik-Köpük kompozitler:** Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta, köpük ise matris konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük bir kısmı sentetik olarak imal edilmiş hafif maddelerdir. Köpük hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir [6].

2.6.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bakır ve Alüminyum matrisli, Wolfram veya Molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşılmasını sağlamaktadır [6].

Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli fiberler şeklinde olabildiği gibi, geliş güzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedir [6].

Metaller organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlı matrislerdir. Buna ek olarak metal matris, kompozit malzemelerin tokluğunun ve kullanım sıcaklığının yükselmesini sağlar. Ancak matrisin metal olduğu kompozit malzemelerin üretimi güçtür ve bunlar her fiber ile birlikte kullanılamazlar. Metal matris içinde en kolay

kullanılabilen fiber en nadir ve pahalı fiber türü olan bor ve borsik (yüzeyi silisyum karbür kaplı bor) fiberdir. Yaygın olarak kullanılan metal matrislere örnek olarak 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları ile 1010 saf alüminyum gösterilebilir. Burada kompozit malzeme 450–550°C sıcaklıkta sıcak presleme ile üretilebilir. Böyle bir karma malzeme 300°C 'ye kadar, oda sıcaklığındaki özelliklerini korur. Titanyum alaşımları da yayınma bağı yoluyla borsik ve SiC fiberle birleştirilerek matris olarak kullanılabilir. Bu tür bir kompozit malzemenin kullanım sıcaklığı 420..520°C'a çıkar. Karbon fiber da alüminyum alaşımı içine gömülebilir, ancak karbon ile alüminyum arasındaki galvanik korozyonun önlenmesi için önce yüzeyinin nikel veya gümüşle kaplanması gerekir [2].

2.6.1.3. Seramik matrisli kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleştirilmelerinden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler [6].

Seramik matrisli kompozitlerin geliştirilip kullanılmasındaki amaç, enerji darboğazında olan dünyada, daha hafif ama bir o kadar mukavemetli malzemelere ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca seramiklerin vazgeçilmez özelliği olan yüksek sıcaklıkta çalışma, seramik matrisli kompozitlerin geliştirilip kullanılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Özet olarak seramik matris, yüksek sıcaklıkta çalışma, korozyon direnci, sertlik, aşınma dayanımı, düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır. Takviyelerinin amacı da malzemeye yüksek tokluk ve malzemenin kullanım ömrünün uzatma gibi özellikler katmak için kullanılmaktadır. Seramik malzemeler iki başlık altında toplanmaktadır. İlki monolitik seramik malzeme, diğeri ise seramik kompozit malzemelerdir. Monolitik seramikler kompozit seramiklere göre çok daha kırılğan olmaktadır. Seramik kompozitlerde ise takviye fazlarının katkısıyla yüksek tokluk değerlerine ulaşılabilmektedir [3].

Seramiklerin matris olarak kullanılması halinde kompozit malzemeler 1300°C'ye kadar kullanılabilme şansına sahip olur. Bu tür- kompozit malzemelerin en gelişmişlerine örnek olarak SiC veya Al₂O₃ fiber ile takviye edilmiş, SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir. Karbon fiberinde kullanılabildiği bu tür matrislerde (cam, seramik, mullit, MgO, Al₂O₃, SiC) fiberlerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matristen çok farklı olmayan fiberin buradaki görevi daha çok malzemenin tokluğunu arttırmaktır.

Karbon matris içine gömülü karbon fiberinden oluşmuş kompozitlerin 4000°C'ye kadar dayanma şansı vardır. Burada matris bir organik matrisin poligonizasyonu veya buhar çökeltme ile elde edilir. Bu kompozitler yüksek sıcaklıklarda olağanüstü ısı ve mekanik özelliklere sahiptirler [2].

2.6.2. Yapı bileşenlerinin şekillerine göre

2.6.2.1. Partikül esaslı kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilirler. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve dolgu kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rasgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir [6].

Partikül takviyeli kompozit malzemelerde, belirgin uniform olarak dağılmış sert, gevrek malzeme yumuşak daha sünek bir matrisle kuşatılmıştır. Aslında yapı, iki fazlı dağılım mukavemetlendirilmiş metal alaşımlarına benzemektedir. Buna karşın, kompozitlerde dağılan partikülleri oluşturmak için faz dönüşümü kullanılmaz.

Partikül kompozitler, partikül boyutu ve partiküllerin kompozit özelliklerine etki durumuna dayalı olarak iki genel alt gruba ayrılabilir. Bu iki sınıf (a) dağılım mukavemetlendirilmiş kompozitler ve (b) gerçek kompozit partikülleri içermektedir [8].

2.6.2.2. Lamel esaslı kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir [6].

2.6.2.3. Fiber esaslı kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan fiberlerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır [6].

Fiberler yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler [6].

Fiber-matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet vs.) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha

sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlendirme göstermelerine karşılık süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir [6].

2.6.2.4. Dolgu kompozitleri

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir [6].

2.6.2.5. Tabaka yapılı kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlendirilmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [6].

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı

sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir [9].

Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir deyişle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir [9].

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı fiber yönlendirmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallerle göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Pek çok katmanlı kompozit düşük maliyet, yüksek dayanım veya hafifliğini korurken, aşınma veya abrasif aşınma direnci, gelişmiş görünüm ve mükemmel ısıl genişleme

özelliklerini kapsamaktadır. Buna karşın korozyon ve aşınma direnci gibi önemli özelliklerin pek çoğu öncelikle kompoziti oluşturan elemanlardan birine bağlıdır [9].

Elektrik şarjını depolamak için kullanılan kondansatörler esas itibariyle dönüşümlü olarak bir iletken ve bir yalıtkan katmanların üst üste gelerek meydana getirdiği katmanlı kompozitlerdir [9].

2.7. Tabakalı Kompozitlerin Örnekleri ve Uygulamaları

Katmanlı kompozitlerin sayısı öylesine fazla ve uygulamaları, amaçları öylesine çoktur ki davranışları hakkında genelleme yapılması mümkün değildir. Yaygın olarak kullanılanlar ise [6];

— **Katmanlar:** Katmanlar organik bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış malzeme katmanlarıdır. En yaygın katman, her bir alternatif katta dik açılarla ağaç kaplama açılarının dizildiği kontra plaklardır. Bu katlar fenolik veya amin reçineler gibi bir yapıştırıcı ile birleştirilir [7].

Emniyet gözlükleri, polivinil butiral gibi plastik bir yapıştırıcı ile iki cam malzemesinin birleştirildiği katman malzemelerdir. Cam kırıldığı zaman yapıştırıcı cam parçacıklarının ayrılmasını önler. Katmanlar, motorlarda, yalıtım için dişlilerde, basılmış devre katlarında kullanılmaktadır. Yapıştırıcı katmanlar, mükemmel hafiflik, alevlenmeyi geciktirici darbe dayanımı, korozyon direnci, kolay şekillendirme ve işleme, sürtünme ısısının dağıtılması ve iyi yalıtım özelliklerini bünyesinde toplamaktır [7].

— **Sert yüzey oluşturma:** Sert, aşınmaya dirençli yüzeyler, sert yüzey oluşturma olarak bilinen ergitme kaynağı teknikleri daha yumuşak ve sünek malzemeler üzerinde biriktirilebilir. Sert yüzey alaşımlar, çeliğin sertleştirilebilen sınıflarını, sert karbürler oluşturan demir ve çelikleri, kobalt esaslı alaşımları ve belirli demir dışı alaşımları içermektedir. Kompozit tungsten karbür çubukları aynı zamanda aşınma yüzeyinde tungsten karbür oluşturmak için kullanılabilir. Benzer kaynak işlemleri yüzeyin korozyon ve ısıya karşı direncini artırır [7].

— **Giydirilmiş Metaller:** Metal-metal kompozitleridir. Giydirilmiş malzemeler yüksek dayanım ile birlikte iyi korozyon direnci kombinasyonuna sahiptir. Alklad adı verilen giydirilmiş kompozit malzemede, ticari saflıktaki alüminyum yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına bağlanır. Saf alüminyum yüksek dayanımlı alüminyum korozyondan korumaktadır. Saf alüminyum katmanının kalınlığı toplam kalınlığın yaklaşık %1–1,5' i kadardır. Alklad, korozyon direnci, dayanım ve hafifliğin arzu edildiği uçak gövdesinde, ısı dönüştürücülerinde, bina yapımında ve depolama tanklarında kullanılır [7].

— **İkili Metaller:** Sıcaklık göstergeleri ve kontrol edicileri, katmanlı kompozitteki iki metalin ısıl genleşme katsayısındaki farklılıktan yararlanmaktadır. İki metal parçası ısıtılırsa yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip metal daha fazla uzamış olmaktadır. İki parça birbirine sıkıca bağlı ise ısıl genleşme katsayılarındaki fark şeridin eğilmesine ve eğilimli bir yüzey oluşmasına neden olur. Şeridin bir ucu sabit ise serbest olan uç hareket eder. Bu hareketin miktarı sıcaklığa bağlı olup, şeritteki bükülme ve sapmanın ölçülmesi ile sıcaklık tespit edilmektedir. Aynı şekilde şeridin serbest ucu, elektrik anahtarını hareket ettirirse düzenli sıcaklık hareket elde etmek için bir fırının veya soğutucunun açılıp kapatılması mümkündür [7].

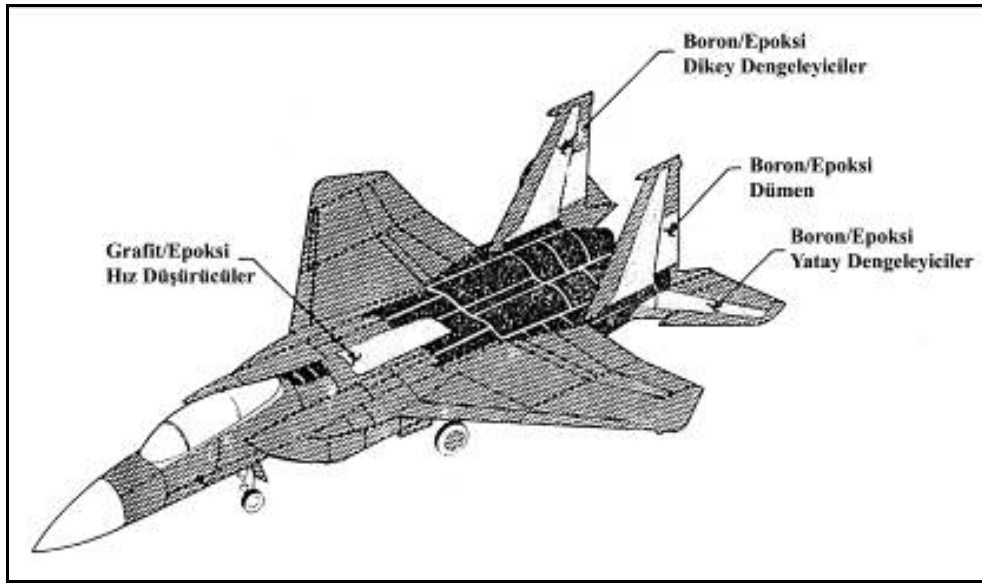
2.8. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozitlerin malzemelerin kullanım alanları günümüzde çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Ülkemizde henüz çoğunun boş bulunduğu bu alanların başlıcaları şunlardır [7]:

— **Havacılık ve uzay sektörü:** Havacılık ve Uzay Sektörü kompozit malzemelerin yararlarının farkına varan ilk sektör olmuştur. Uçaklar, roketler ve füzeler kompozitler sayesinde daha yukarı, daha hızlı uçabilmişlerdir. Cam, Karbon ve kevlar fiber kompozitleri uzun zamandan beri bu sektörde kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay sektöründe sadece 1999 yılında 10,5 grosston kompozit kullanılmıştır. Havacılık ve uzay sektöründe yüksek performans karakteristiklerinden dolayı en çok karbon fiber kompozitler kullanılmaktadır. Elle yayma metodu uzay ve havacılık sektöründe en çok kullanılan üretim metodudur [10].

F-11, F-14, F-15 gibi askeri savaş uçaklarında ağırlığı azaltmak için kompozitler kullanılmaktadır. Bu uçaklarda ağırlık azaltmanın başlıca amacı uçuş menziline arttırmak ve daha çok cephane taşımaktır. Bu uçaklarda kullanılan kompozit elemanlar Şekil 2.2’de gösterilmiştir [10].

Uzay Endüstrisinde kompozitlerin kullanılmasının başlıca sebebi ağırlık avantajı ve termal stabiliteLERİDİR [10].



Şekil 2.2. F-15 savaş uçağında kullanılan polimer anafazlı kompozitler [3]

— **Elektrik ve elektronik sanayi:** Kompozit malzemeler, elektrik ve elektronik sanayinde, her amaca uygun kullanım özellikleri, yüksek elektrik izolasyonu, mekanik dayanım gibi üstün nitelikleri nedeni ile her türlü elektrik ve elektronik malzemelerin yapımında üretim malzemesi olarak tercih edilmekte ve başarı ile kullanılmaktadır. Ark söndürme ünitesi, orta gerilim izolatörleri, bara tutucular, yüksek mukavemetli yalıtkan parçaların imali bunlara örnek gösterilebilir [10].

— **Tarım sektörü:** Kompozit malzemeler tarım sektöründe, sera, ilaçlama depoları, tahıl depolama siloları, drenaj suyu boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler bu sektörde de üreticiye, seri imalat imkânları, kolay montaj, düşük yatırım imkânı, düşük kalıp maliyeti, kapasitenin tam

kullanabilmesi gibi avantajlar sağlar. Bu sektörde kompozitlerin ışık geçirgenliği, korozyona dayanıklılık, tabiat şartlarına dayanıklılık ve yüksek mekanik dayanım sağlayabilmesi de büyük bir avantajdır [10].

— **Otomobil sanayi:** Otomotiv sanayinde, kompozit malzemelerin oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Otomobil ve kamyon kaputu, kamyon ve otobüs karoseri parçaları, traktör parçaları, iç donanımı, demir yolu vagonları iç döşemesi vb. bu alanlardan başlıcalarıdır. Kompozit malzemeler bu sanayi alanında üreticiye, seri üretim, düşük yatırım imkânı, düşük kalıp maliyeti, kapasitenin tam kullanılabilmesi, kolay ve ucuz model değiştirme imkânı gibi yararlar sağlar. Kullanıcıya da, yüksek mekanik dayanım, ucuz ve kolay onarım imkânı sağlar [10].

— **Ev aletleri:** Saç kurutma makinesi, mikser, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları vb. imalinde de kompozit malzemeler başarıyla kullanılmaktadır. Bu alanda kompozit malzemeler üreticiye komple ve karmaşık parça üretimi, montaj kolaylığı ve elektrik izolasyonu gibi faydalar sağlar. Kullanıcıya da, elektriksel etkilerden korunma ve hafiflik gibi avantajlar sağlamış olur [10].

— **İnşaat sektörü:** Kompozit malzemeler, bu alanda da önemli kullanım alanına sahiptir. Kompozit malzemeler kullanılarak cephe kaplamaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları, ondüle levha üretimi yapılabilmektedir. Bu alanda üreticiye, tasarım esnekliği ve kolaylığı, ucuz izolasyon, hafiflik, montajda ve nakliyede kolaylık gibi imkanlar sağlanmış olur. Kullanıcı için de hafiflik, bakım giderlerinin en aza inmesi, izolasyon problemlerine çözüm ve yüksek mekanik dayanımı gibi faydalar sağlar.

— **İş makineleri:** Bu alanda, iş makinelerinin koruma kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler başarıyla kullanılmaktadır. Bu alanda üreticiye, kalıplama kolaylığı, parça sayısını azaltma imkânı, tek parçada üretim, hassas boyutlarda ürün yapabilme imkânı, elektrik izolasyonu malzemelerinden tasarruf gibi kolaylıklar sağlar. Kullanıcı için de elektriksel etkilerden korunma ve hafiflik gibi faydalar sağlar [10].

— **Taşımacılık sektörü:** Kompozit malzemeler bu sektörde, nakliye tankerleri, frigorifik kamyon kasaları gibi üretimlerde de başarıyla kullanılmaktadır. Bu alanda üreticiye, kolay kalıplama imkânı, malzemelerden tasarruf ve düşük maliyet gibi avantajlar, kullanıcıya ise yüksek ısı izolasyonu ve kolay temizlenebilirlik gibi kolaylıklar sağlar [10].

— **Şehircilik:** Kompozit malzemeler bu alanda, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme (heykel, çöp bidonu, banklar vb.) çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu alanda üreticiye çok sayıda standart ürünün kısa zamanda imal edilebilmesi, montajdan tasarruf, ucuz maliyet, hafiflik gibi imkanlar, kullanıcıya ise, yüksek izolasyon kapasitesi ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlar [10].

— **Mobilya sanayi:** Kompozit malzemelerden bu sanayi alanında da geniş bir şekilde faydalanılmaktadır. Kütüphane, mutfak dolapları, masa, sandalye, sehpalar, koltuk, çiçek saksıları ve dekoratif eşyalar kompozit malzemeler kullanılarak üretilebilmektedir. Kompozit malzemeler bu alanda üreticiye, seri ve ucuz üretim, ürün eldesi, kolay model değiştirme, tasarımda kolaylık ve esneklik gibi faydalar sağlar. Kullanıcıya ise, yüksek mekanik dayanım, alışılmışın dışında farklı görünüm ve tasarım gibi yararlar sağlar [10].

— **Spor endüstrisi:** Spor ve Eğlence ekipmanları kompozit malzemelerin yoğun olarak kullanıldığı sektörlerden biridir. Kompozitlerin kullanıldığı başlıca spor ürünleri; golf sopalar, tenis raketleri, balıkçılık ekipmanları ayrıca da sörf yapılırken kullanılan bumba, board ve direklerdir [10].

BÖLÜM 3. METALİK-İNTERMETALİK LAMİNAT (MİL) KOMPOZİTLER

3.1. Giriş

Yüksek spesifik sertlik (stiffness) ve yüksek spesifik mukavemet ve termal özellikleri (yüksek ısıya dayanabilme, geniş bir sıcaklık aralığında kararlı kalabilme, olağanüstü termal iletkenliği ve ısı yok edimi gibi fonksiyonları) nedeniyle berilyum alaşımları bazı yapısal uygulamalar için cazip bir malzeme grubudur. Ancak, insan sağlığına zararlı olması, az bulunması, üretiminin pahalı olması ve yüksek fiyatlarından dolayı, bu malzemelerin yerine sağlığa zararlı olmayan ve daha ekonomik yeni malzemelerin ikame edilmesi için uzun çalışmalar vardır. Bu malzemelerden biri yakın zamanlarda geliştirilen yeni çok fonksiyonlu bir malzeme sınıfı olan metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitler olarak adlandırılan bir malzeme grubudur ve esas olarak, yapıyı oluşturan ana fazlara dayalı olarak Ti-Al₃Ti metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitleri olarak adlandırılır [11].

K. S. Vecchio'nun çalışmasında, MİL kompozitler reaktif folyo sinterleme tekniği ile Al ve Ti folyolarının 700°C'de ısıtılan bir fırında basınç altında beraberce ısıl işleme tabi tutulması ile elde edilmiştir. Bu prosesin en önemli yanı, özel bir koruyucu atmosfer gaz veya vakuma ihtiyaç duyulmaması yani ticari olarak mevcut Al ve Ti folyoları kullanılarak açık atmosferde yapılmış olmasıdır. İşlem süresi 10 saat veya daha uzun olabilir [11].

Metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitleri Be, Al, Ti ve çeliğe alternatif olarak geliştirilen çok fonksiyonlu bir malzeme grubudur ve füze savunma sistemleri yapısal ve termal yönetim problemlerinin çözümünde kullanılması planlanmaktadır. Bu uygulamalar için en cazip malzeme grubu berilyum alaşımlarıdır; ancak sağlık,

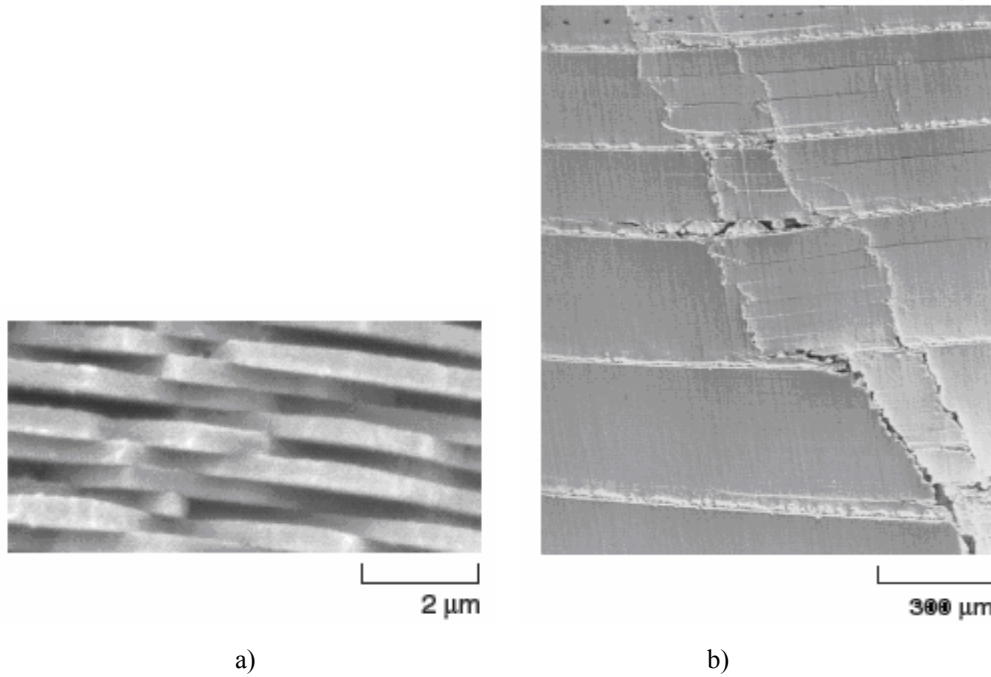
fiyat mevcudiyet ve üretim problemleri gibi problemleri vardır. Diğer alternatif malzemeler kötü performansa sahiptir [11].

Belli bir yapısal ve işlevsel özellikler grubu için hedeflenen malzeme mikro-yapı tasarımı alanı artık malzeme bilimi ve mühendisliğinde kabul görmüş bir odak alanıdır. Bu çalışma yapısal malzemelerin, geniş malzeme özellikleri yelpazesi elde etmek amacıyla tasarlanmış ve spesifik işlevsellikleri elde etmek üzere uyarlanmış mikro, orta ve makro yapılara sahip bulunmakta ve metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitler adı verilen yeni bir sınıfını tarif etmektedir. Üstün spesifik özellikleri bu sınıf kompozitleri yüksek performanslı havacılık-uzay uygulamaları için son derece çekici hale getirmektedir ve MİL kompozitleri elde etmek için kullanılan üretim metodu, işlevsellik ve yeteneklerini arttıracak şekilde malzemelerle müştereken kullanılacak yeni entegre teknolojilere imkan tanımaktadır [12].

Bir dizi hedeflenmiş mekanik ve işlevsel özelliği elde etmek amacıyla kullanılan malzeme mikroyapı tasarım alanı yeni malzeme gelişim stratejilerinin temel dayanaklarından biri haline gelmiştir. Tartışılmaz doğalarından dolayı hizmet sırasında mekanik yükleri taşımak amacıyla kullanılan yapısal malzemeler orta, mikro veya nano yapılarının adapte edilmesi suretiyle performans arttırıcı ek işlevler sağlayacak şekilde tasarlanabilirler. Bu performans arttırıcı yeteneklere sahip yapısal malzemeler "sentetik çok işlevli malzemeler" olarak adlandırılmışlardır. Yapısal kompozitler, çok fazlı özellikleri sayesinde, performans arttırıcı çok işlevli malzemelerin tasarımı için pek çok fırsat sağlamaktadırlar. Yakın geçmişte San Diego'daki California Üniversitesinde metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitler adı verilen yeni bir yapısal malzeme sınıfı geliştirilmiştir. Bu malzemeleri geliştirme amacı, bir yandan düşük maliyetli, çarpıcı ve işlevsel mikro-yapılardan faydalanırken diğer yandan spesifik yapısal özellikleri optimum seviyeye çıkarmak amacıyla çok işlevli kompozitler tasarlamak ve sentez etmek için, yumuşakça kabukları gibi hiyerarşik çok fazlı karmaşık doğal kompozitler tarafından sergilenen mühendislik özelliklerinin pozisyonunu tespit etmek idi [12].

Biyolojik sistemler sıklıkla geniş birçok işlevli malzeme tertibi sergiler ve sentetik çok işlevli malzemeler geliştirmek için mükemmel bir biyolojik taklit motivasyonu

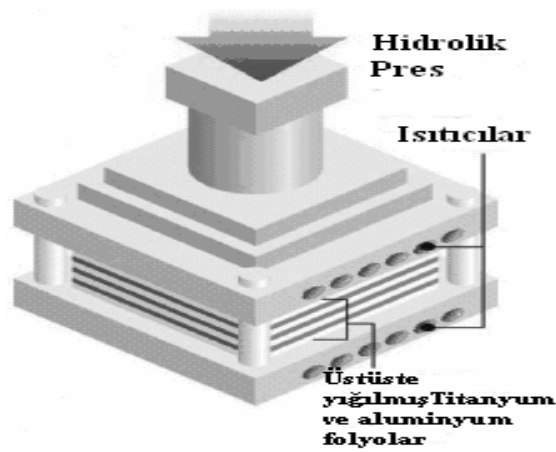
sağlarlar. Yumuşakça kabuklarının sertlik sağlamak için son derece optimum seviyeye getirilmiş birleşik yapılara sahip oldukları bilinmektedir. Üzerlerinde en yoğun biçimde çalışmalar yapılmış olan iki yumuşakça *Haliotis Rufescens* (abalon) ve *Pinctata* (helezonik sedef kabuk)'tur. Kabukların meydana geldikleri zayıf bileşenler (ki bunlar kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve bir dizi organik yapıdır) dikkate alındığında, bu kabukların mekanik özellikleri son derece çarpıcıdır. Bunların gerilme kuvveti 100MPa ila 300MPa, kırılma tokluğu ise 3MPa ita 7MPa- $\text{m}^{1/2}$ arasında değişir. CaCO_3 sırası ile buna karşılık gelen 30MPa ve $< 1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 'lik kuvvet ve sertlik değerlerine sahiptir. Bu yumuşakçalar 4-5nm ebatlarında tekli CaCO_3 kristalleri (nano-yapı) ile başlayıp, 0,5-10nm ebatlarında mikro-yapılar (Şekil 3.1a) ile devam eden ve 0,2–0.5mm'lik tabakalar (orta-yapı, Şekil 3.1b) ile biten birleşik şekilde organize olmuş bir yapı sayesinde olağanüstü mekanik özelliklere sahiptirler [12].



Şekil 3.1. a) Bir abalon kabuğunun kırılma yüzeyinin, mikroyapıyı oluşturan özel altıgen aragonit taşlarını gösteren bir SEM görüntüsü. b) Kırık bir numunedeki abalonun orta ölçekli görüntüsünde, bu çok tabakalı malzemede elde edilen çatlak ilerlemesini gösteren bir optik mikroskop görüntüsü [12]

Bu kabuklarda bulunmuş olan tabaka mikro-yapı dizaynına dayanılarak, yüksek sıcaklık ve basınçta kontrollü bir reaksiyondan faydalanan yeni bir tek aşamalı proses ile bu yapıları taklit etmek için elementel titanyum ve alüminyum folyolardan Ti-

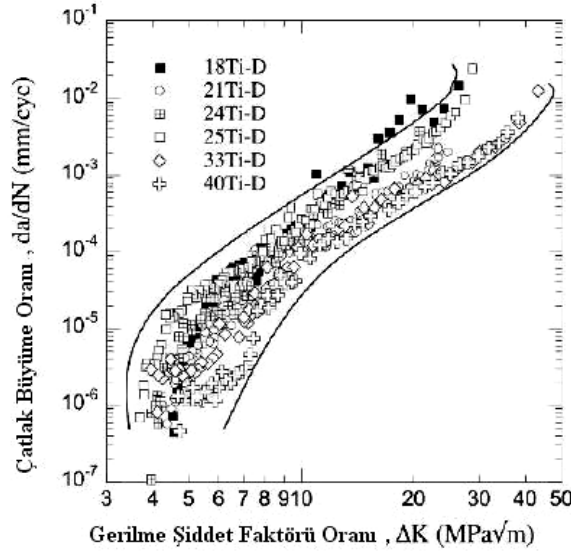
Al_3Ti MİL kompozitler üretilmiştir. Bu üretim prosesinin yeniliği açık havada gerçekleştirilmesine ve tamamen yoğun bir tabaka bileşim üretmesine dayanır. Şekil 3.2’de açık havada ısıtılmış basit bir levha pres kullanılarak MİL kompozitlerin üretimi için proses düzeneğinin şeklini göstermektedir. Orijinal titanyum ve alüminyum folyoların kalınlığı bitişindeki titanyum tabakalar ile etkileşime girdiğinde alüminyum tabakanın tamamının tüketilmesini sağlayacak şekilde seçilmektedir. Bu tip bir tabaka yerleşim planı alternatif Al_3Ti tabakaları (kabuklardaki sert $CaCO_3$ tabakalarını taklit eden) ile titanyum kalıntısına (kabuklardaki katı protein tabakalarını taklit eden) sahip bir bileşim ile sonuçlanır. Nihai tabakaların kalınlığı orijinal alüminyum ve titanyum folyoların kalınlığına bağlıdır, ilgili metal/metal aluminid kombinasyonlarını üretmek için, aynı bileşim içinde tek başına veya kombinasyon halinde titanyum dışındaki metal alaşım folyoların da kullanılabilir olması nedeniyle, bu proses son derece esnek. Örneğin, tarif edilen bu teknik kullanılmak suretiyle, başlangıç metal tabakası olarak (titanyum yerine) demir esaslı, nikel esaslı ve kobalt esaslı alaşımlar kullanan MİL kompozitler başarı ile üretilmiştir. Bu metot ile üretilen MİL kompozitler doğal kabuklardaki biçimde birleşik yapılarda değil, daha ziyade, iki boyutlu tabaka yapılarındadırlar [12].



Şekil 3.2. Düzlemsel tabakaların üretimi için levhasal pres fırını [12]

Şekil 3.2’deki fırın kullanılarak ısıtılan metalik-intermetalik laminat kompozitin gösterimi. Karmaşık levha tasarımları aynı tek aşamalı ve açık havada

gerçekleştirilen operasyonda üç boyutlu, nete yakın şekilli MİL bileşimlerin üretilmesi için kullanılabilirler [12].



Şekil 3.3. Muhtelif MİL kompozitler için yorulma kaynaklı çatlak büyüme eğrileri [13]

MİL kompozitlerin, kompozisyon, fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılan folyo bileşimi, kalınlıkları ve tabaka diziliminde basitçe değişiklik yapılmak suretiyle kompozitin kalınlıkları optimize edilebilir ve çeşitlendirilebilir. Bu yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen MİL bileşim üretimi, kendisini ticari olarak ölçeklenebilir yapısal malzemeler ile özel işlevler için tasarlanmış mikro-yapıların üretimi için ideal şekilde uygun yapan bazı anahtar avantajlara sahiptir. İlk olarak, faydalanılan ilk malzemeler ticari olarak temin edilebilir metalik folyolar şeklinde olduklarından, ilk malzeme maliyeti küçük çaplı araştırma çevrelerinde yaygın biçimde uygulanan sıra dışı malzeme işleme yöntemlerinin çoğuna kıyasla oldukça düşüktür. Bu çalışmanın yüksek spesifik özellikleri nedeniyle Ti-Al sistemi üzerinde odaklanacak olmasına rağmen, bu aynı zamanda geniş bir kompozitler yelpazesinin kolayca üretilebileceği anlamına gelir [12].

İkinci olarak, başlangıçta biçimlendirilebilir metalik folyoların kullanımı karmaşık şekillerdeki tabakaların oluşturulmasını mümkün kılar. Bu da çubuklar, borular, şaftlar ve koniler gibi düzlemsel olmayan yapıların üretilmesine, özel folyoların

karmaşık üç boyutlu yapılar için basitçe işlenmesine ve parçaların net şekilde oluşturulmasına imkân tanır. İlk metalik folyoların kullanımı aynı zamanda, işleme tabi tutulacak folyoların, işlemeden önce pasif bastırma yada kabartma gibi entegre işlevselliklerin dahil edilmesini sağlayan boşluklar ve yollar ihtiva etmelerine izin verir [12].

Üçüncü olarak, sıcaklık, basınç ve atmosfer bağlamındaki işleme şartları son derece makuldürler. Alüminyum folyo ihtiva eden numunelerin kullanıldığı durumlarda, işleme sıcaklıkları 700°C'nin, işleme gerilmeleri ise 4MPa'nın altındadırlar. Bu MİL kompozitlerinin işlenmesinin muhtemelen en çarpıcı özelliği işlemin açık havada gerçekleştirilmesi ve herhangi bir özel inert gaz veya vakum haznesi düzeneğine ihtiyaç olmamasıdır. Bu işleme özelliklerinin kombinasyonu işleme metodunun bizzat kendisini düşük maliyetli hale getirir, karmaşık şekillerin üretimine olanak tanır ve bilgisayarlı kontrole uyumludur [12].

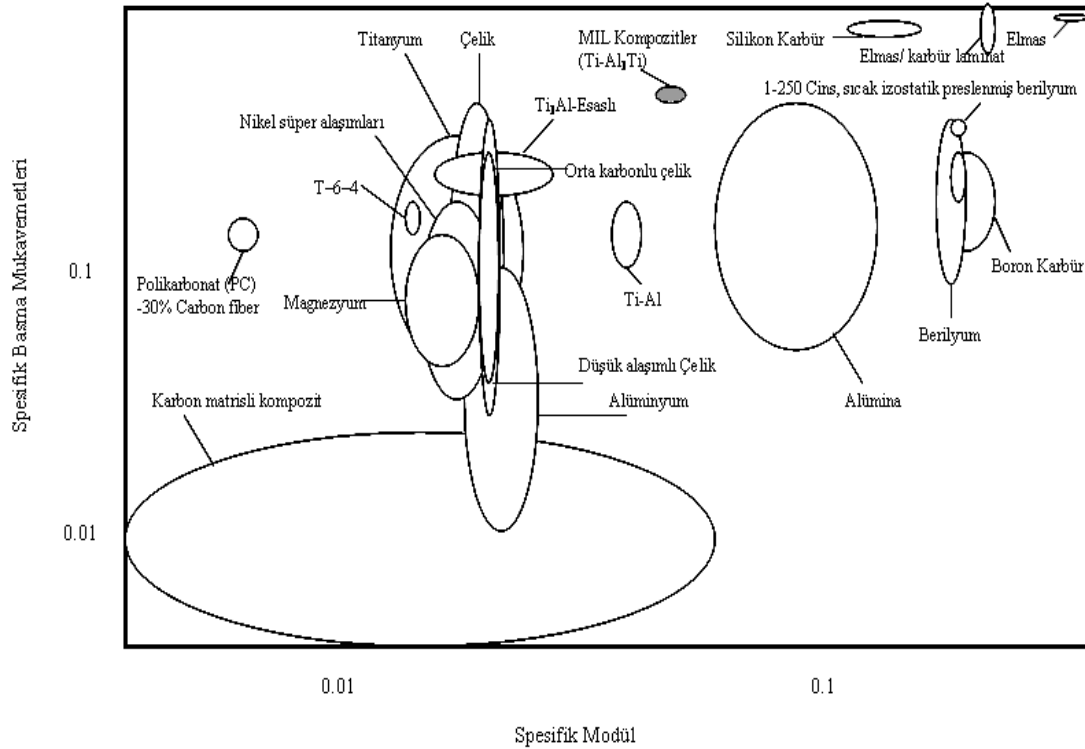
Son olarak, MİL bileşiklerin mikro-yapısı folyo kalınlığı ve terkibi ile işleme şartları tarafından belirlenir. Malzeme yapı tarzı metal folyoların seçimine dayandığından, mikro-yapıyı bir yüzeyden bir diğerine tamamen adapte etmek mümkündür. Ayrıca, MİL kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri, MİL bileşim malzeme sistemini özel performans hedeflerini elde etmek amacıyla mikro-yapı mühendisliği için ideal şekilde uygun hale getirecek biçimde folyo kimyasal bileşimi ve kalınlığının seçimi suretiyle adapte edilebilirler [12].

MİL kompozitlerin eşsiz özellikleri alternatif şekilde tabakalar halinde yayılmış intermetalik-aluminid fazın yüksek sertlik ve bükülmezliğinin, metal alaşımların yüksek dayanıklılık, sertlik ve sünekliliği ile kombine edilmesinden kaynaklanır. Şekil 3.5'de belirgin şekilde farklı tabaka kalınlıklarına sahip iki Ti-Al₃Ti MİL bileşim mikroyapısı örneği göstermektedir [12].

3.1.1. Yapısal performans özellikleri

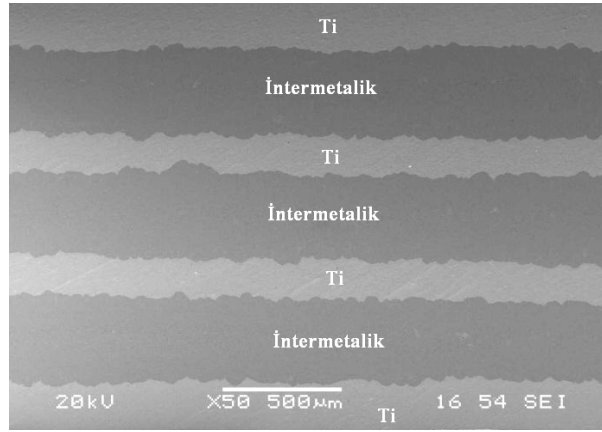
Ti-Al₃Ti MİL kompozit halinde özgül sertlik (modül/yoğunluk) neredeyse çeliğin iki katı olur, spesifik tokluk ve spesifik mukavemet neredeyse tüm metal bileşenlerinden

daha iyi veya benzer durumdadır ve özgül sertlik birçok seramik maddesiyle aynıdır. MİL bileşenlerinin madde özelliklerinin ilginç bir karşılaştırılması madde özellik haritası ile elde edilebilir. Şekil 3.4'de x ekseninde gösterilen bir maddenin spesifik modülünü ve y ekseninde spesifik basma mukavemetini gösteren bir alan var. Bu alanda, sayısız madde bölgeleri gösterilmiş ve bu özellikleri optimize etme konusundan bakıldığında (spesifik basma mukavemeti ve sertlik bütünleşmiş) sağda yukarıdaki bölge hedefi temsil ediyor. MİL bileşen bölgesi çelik, titanyum bileşenleri, nikel bileşenleri, alüminyum bileşenleri ve titanyum bazlı metallere gibi klasik metallere sağında gösterilmiştir. Yüksek özgül sertliğe sahip tek metal madde berilyum bileşenleridir. SiC, B₄C, Al₂O₃ ve elmaslar gibi MİL bileşenlerinden daha yüksek özgül sertliğe sahip birçok seramik madde gösterilmiştir. Açık bir şekilde görülüyor ki MİL bileşenleri yapısal uygulamalar için gerekli olan büyük bir potansiyele sahip, özellikle yüksek özgül sertliğe (high-specific-stiffness) gereksinim duyan uygulamalar için [12].



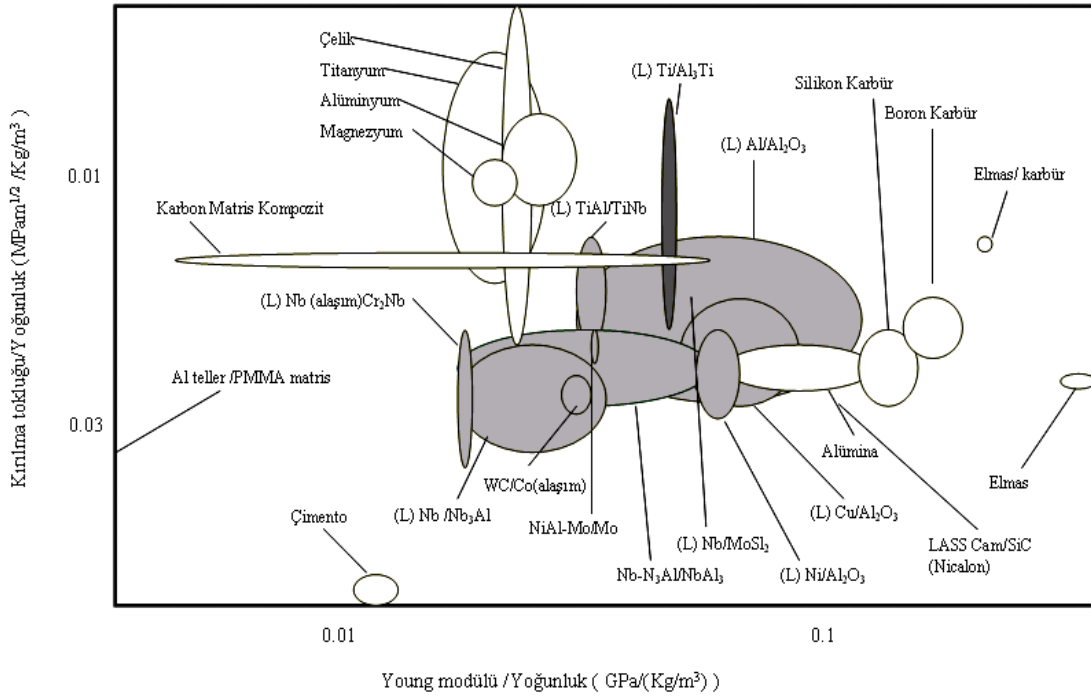
Şekil 3.4. Basma mukavemetinin spesifik malzeme sertliğine olan oranını gösteren malzeme özellik haritası [12]

MİL bileşenlerinin üst düzeydeki kırılma-çatlama dayanıklılığı maddenin yüksek derecedeki anisotropik tabaka yapısının ve her bir ardışık metal tabakadaki çatlama başlangıcına duyulan ihtiyacın kombinasyonundan elde edilmiştir. Benzer çatlak gelişimlerine karşı dayanıklılıkta MİL bileşenlerinin tek parça titanyum bileşenlerinden daha yüksek derecedeki sertliği ve düşük yoğunluğundan dolayı uzay çalışmalarında tercih edilebilmektedir [12].



Şekil 3.5. Tipik bir MİL kompozit SEM mikroyapısı

Şekil 3.6'da spesifik kırılma tokluğu, MİL bileşenleri içeren çeşitli mühendislik maddelerinin özgül modülünü gösteriyor (koyu gri elips ile gösterilmiştir). Birçok katman Şekil 3.6'da gri ile belirtilmiştir. Ti/Al₃Ti katman bileşenlerinin diğer katmanlardan daha yüksek özgül dayanıklılığının olduğu ve Ti/Al₃Ti özgül zorlanım çarpanının sadece Al₂O₃ metal sistemi tarafından geçildiği görülmektedir. γ -TiAl/TiNb ye yakın olarak, MİL bileşenleri kanal (veya faz) evresinin aynı hacim (parçası-bölümü) için daha yüksek çatlak dayanıklılığına ve daha yüksek özgül zorlanım çarpanına sahiptir. Bu yüzden Ti/Al₃Ti tabakasının üretim kolaylığından, düşük üretim maliyeti ve ilgi çekici mekanik özelliklerinden dolayı, MİL (Ti/Al₃Ti) bileşenleri düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve yüksek sertlik ihtiyacı duyan mühendislik uygulamalarında kullanılmaya adaydır [12].

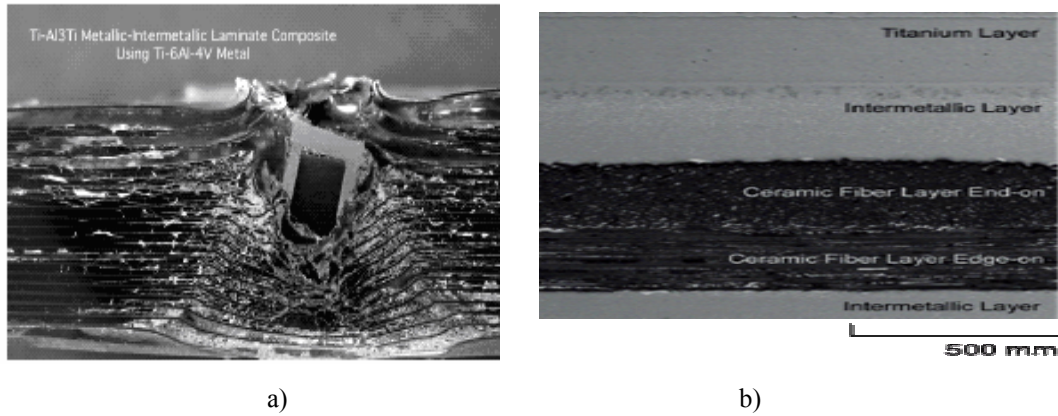


Şekil 3.6. Bir dizi yapısal malzemenin spesifik modüle karşı spesifik kırılma tokluğunu belirten özellik haritası. Koyu gri bölge MİL kompozitleri (Ti-Al₃Ti) ve diğer laminat sistemleri (L ile belirtilmiş), metallere, alaşımlara ve kompozitlere yerleştirilmiştir [12]

3.1.2. Yapısal ve balistik özellikler

MİL bileşenlerinin özgül fiziksel ve mekanik özellikleri yapısal uygulamalar için bu bileşenleri vazgeçilmez yapıyor. Bunun yanında balistik özellikleri de oldukça etkileyicidir özellikle diğer yapısal maddelerle karşılaştırıldığında. Şekil 3.7’de MİL bileşenine uygulanan balistik bir testteki bölgesel etki boyunca geçen yatay bir kesitin fotoğrafını gösteriyor. Verilen örnek, başlangıçta yaklaşık 2cm kalınlığı olan %20 Ti-6-4 ve %80 Al₃Ti tabakasıdır. Bu bileşen 3,5 g/cm³ yoğunluk olan bir örnek teşkil ediyor, bu yüzden bu yapıda açık (kesin-özgül hedef 7 g/cm³ bölgesel yoğunluğa ulaşmak. Kullanılan çubuk, yaklaşık 10g kütlesi ve başlangıç çapı 6,15mm olan bir tungsten yüksek alaşım çubuğu (93W-7FeCo). Çubuk 900m/s hızla normal mesafeden derine nüfuz edecek yönde ateşlenmiştir. MİL hedefi içindeki bölge 1 cm den daha azdır. MİL bileşenlerinin sergilediği mekanik özellikler onları yapısal uygulamalar için uygun kılıyor, bunun yanında balistik özellikleri onları zırh ile ilgili uygulamalarda çekici kılıyor, çok fonksiyonlu (yapısal+balistik) bir madde oluşturuyor. Bu MİL bileşenlerinin balistik performansları seramik gibi daha sert bileşenlere sahip maddelerle geliştirilebilir. Metalik-intermetalik kaplama bileşenleri

alüminyum esaslı seramik bileşenli, metal matris bileşenler kullanılarak başarıyla imal edilmiştir, seramik fiber şeritleri alüminyum tabakaların arasına yayarak, seramik fiberlerin intermetalik tabakanın içine yerleştirilmesi başarılı olmuştur. Şekil 3.7b’de Ti-A13Ti-Al₂O₃ fiberli-A₃Ti-Ti katmanlı bir MİL bileşeninin optik mikro yapısını gösteriyor. Al₂O₃ seramik fiberler 0–90 açısıyla her bir kalın Al₃Ti katmanının merkezi olmak üzere 2 katman arasına yığılmıştır (sıkıştırılmıştır) [12].

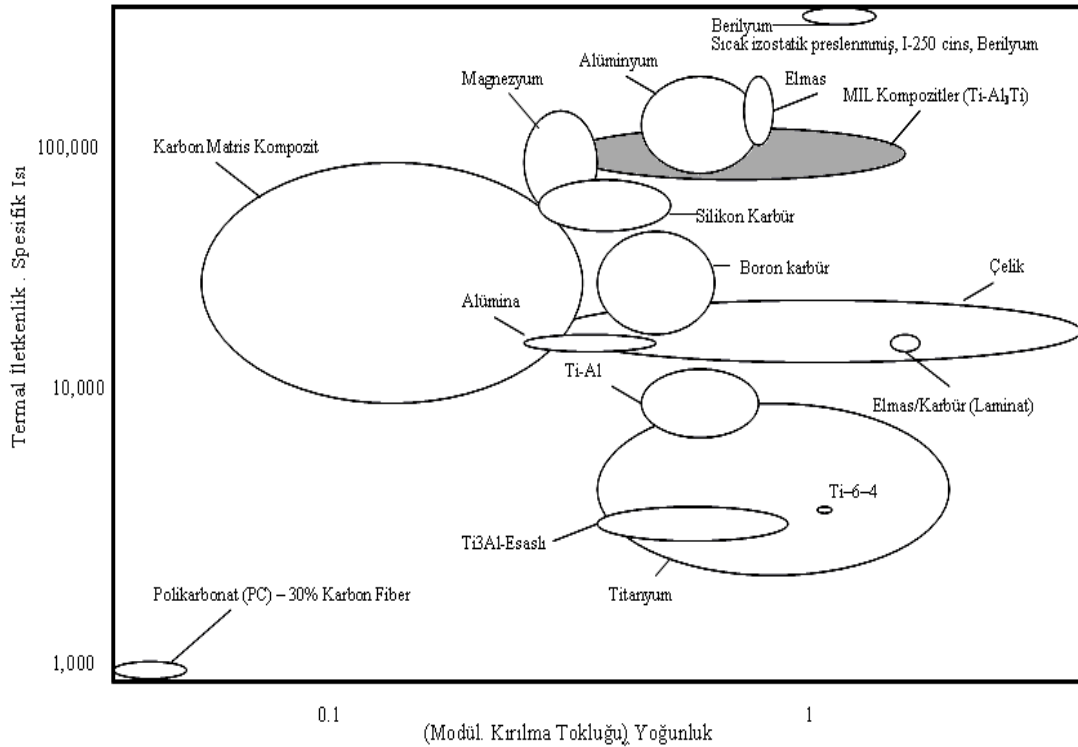


Şekil 3.7. a) Bir MİL kompozitte balistik bir testte çarpma bölgesinin kesiti (levha kalınlığı 2 cm), b) Balistik performansı geliştirmek için seramik fiberle güçlendirilmiş MİL kompozitin optik mikroskop görüntüsü [12]

3.1.3. Yapısal ve sıcaklık yönetim özellikleri

Yapısal soğutucular gibi uygulamalar için, yüksek düzeyde dayanıklılık gösteren maddeler termal enerjiyi saklayan yüksek özgül ısı kapasitesine ve ısı küvetinden ısıyı taşıyacak yüksek ısı iletkenliğinin yanında daha önce anlatılan yapısal özelliklere sahip olması gerekir. Şekil 3.8’de spesifik modül ve kırılma tokluğuna karşı ısı iletkenliği ve özgül ısı kapasitesini gösteren bir tablo görülmektedir. Spesifik modül ve kırılma tokluğu seçilmiş çünkü yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık isteyen birçok yapısal uygulamalar için en uygun ölçüyü temsil ediyor, bu özellikler bütününün elde edilmesi seramik gibi en yüksek sertliğe sahip fakat en düşük kırılma tokluğuna sahip maddeler düşünüldüğünde genellikle zordur. Isı yönetimi açısından düşünüldüğünde seramik gibi en yüksek sertliğe sahip maddeler genellikle düşük iletkenliğe ve yüksek düzeyde ısı iletkenliğine sahip alüminyum ve bakır bileşenleri düşük özgül sertliğe sahipliler [12].

Bu örneklerin dışında kalan berilyum bileşenleri yüksek sertliğe, yüksek ısı iletkenliğine ve yüksek ısı kapasitesine sahiptir. Diğer taraftan berilyum bileşenleri geniş alanda kullanıldıkları için dezavantaj da sergilerler, berilyumun kısıtlı tedariki, berilyum bileşenlerinin maliyeti ve berilyum üretimi esnasındaki ciddi sağlık sorunları. Bu yüzden berilyum bileşenlerine alternatif olabilecek hem yapısal hem de ısı yönetimi uygulamaları için uygun maddeler aranmaktadır. Şekil 3.8’de ısı yönetim kapasitesi açısından yapısal özellikler bakımından MİL bileşenleri berilyumdan sonra 2. sırada gelmektedir. Isı yönetimi açısından MİL bileşenleri sadece berilyum bileşenleri bazı alüminyum bileşenleri ve elmas tarafından geçilmektedir. Elmasın yüksek maliyeti ve elmastan yapısal bileşenler elde etme zorluğu onu bir seçenek olmaktan çıkarıyor. Bununlar birlikte MİL bileşenlerinin özgül yapısal performansı, neredeyse yüksek performans gerektiren uzay çalışmalarında kritik olan alüminyum bileşenlerinden 3 kat daha fazladır. Ti-Al MİL bileşenleri soğutma uygulamalarında berilyum bileşenlerine göre daha caziptir [12].



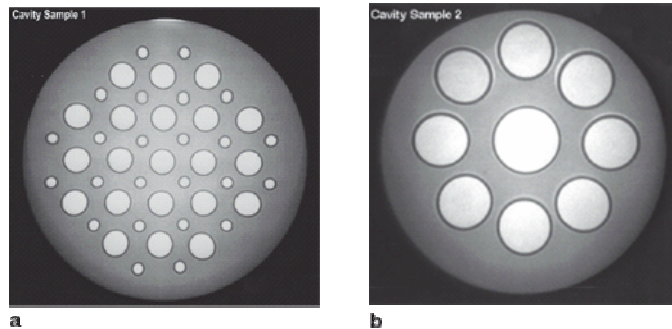
Şekil 3.8. Bir dizi yapısal malzeme için spesifik modül ve kırılma tokluğu ile spesifik ısı kapasitesi ve termal iletkenliğin karşılaştırıldığı özellik haritası [12]

3.1.4. Çok fonksiyonlu MİL bileşenleri

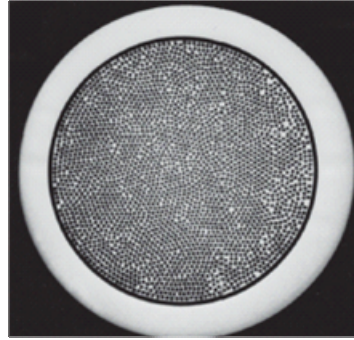
Tabakalı birleşime bağlı olarak maddelerin doğası ile alakalı olarak MİL bileşenlerine ek özellikler eklenebilir. Her bir MİL bileşen tabakası metal tabakaları olarak çıktığından dolayı, her bir tabakada veya daha fazla tabakada açık bir alan oluşturacak şekilde delikler ve yarıklar oluşturmak mümkündür. Bu oyuk (delik) ve yarıkların içine MİL bileşenlerin özelliklerini daha da geliştirmek üzere ek özellikler entegre edilebilir. Bu yaklaşım her nasılsa bir tabaka halinde veya tabakalar arasında ortaya çıkan karşılıklı bağlantılı çoklu tabakalı elektronik devre panosu metodolojisini meydana getirerek, geliştirilmiş özellikler gömülü 3-D mimarisini katıyor [12].

3.1.4.1. Titreşim engelleyici boşluklu MİL kompozitler

Alüminyum tabakalarda oyuk açılması ve bu oyukların taneli maddelerle doldurulması neticesinde, intermetalik tabakalardaki titreşimi uygun düzeyde azaltılmış MİL bileşenleri üretmek mümkündür. Şekil 3.9'da Bir Ti-Al₃Ti MİL bileşenin içindeki oyukların varlığına bir örnek gösteriyor. MİL bileşeni içinde ölçü, dağılım ve oyukların yeri, her bir alüminyum katmanındaki oyukların yerleşimi ve bu katmanların yaprak demetleri içindeki yerleşimi sayesinde madde tasarım işlemi aşamasında seçilebilir. Bu yarıklar yastık (tampon)vazifesi görmek için taneli maddelerle doldurulabilir. Şekil 3.10'da taneciklerle doldurulmuş yarık konseptini göstermek için çelik boncuklarla doldurulmuş büyük bir yarıktan yapılmış MİL bileşenin bir örnek gösteriyor [12].



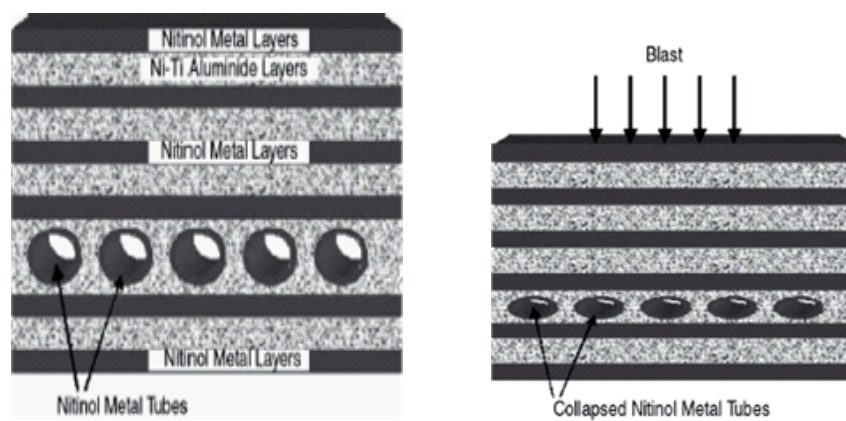
Şekil 3.9. Bir Ti-Al₃Ti MİL kompozitin intermetalik tabasında kalınlık boyunca oluşturulmuş boşlukların X-Ray floreskop görüntüleri. Gri silindirik bölge yaklaşık 13 cm çapındadır [12].



Şekil 3.10. Bir Ti-Al₃Ti MİL kompozitin intermetalik tabakasında kalınlık boyunca geniş bir boşluğun (10 cm çaplı) çelik parçacıklarla doldurulmuş yapının X-Ray floreskopik görüntüsü [12].

3.1.4.2. Akışkan tüp modifiyeli MİL kompozitler

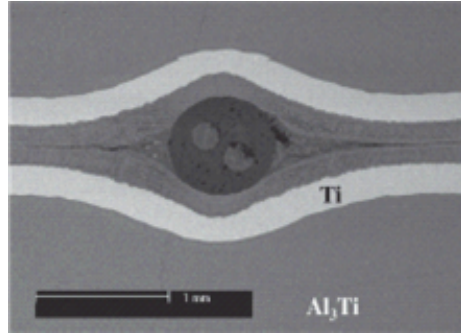
MİL bileşenlerinin farklı tabakalarının arasına borular yerleştirilerek, bu maddelere enerji-emme özelliği (kapasitesi) kazandırmak mümkündür, özellikle patlama derecesinin düşürülmesi için. Bu borular çarpışma esnasında deforme olur ve olay anındaki şok enerjisini emer. Şekil 3.11’de Enerji-emici MİL bileşeni, sistemi kavramını gösteriyor. Ek olarak boruların MİL bileşenlerine yerleştirilmesi bu yapıda, muhtemelen ısı değişimi, sıvı taşıma ve yerleşik reaksiyonlar için kullanılacak gazların ve sıvıların geçişini kolaylaştırır [12].



Şekil 3.11. İntermetalik katmanda gömülü tüpler içeren MİL kompozitlerin şematik gösterimi. solda ilk mikro yapı ve sağda patlama sonrasında çöken tüplerin mikro yapısı [12]

3.1.4.3. Algılama kapasiteli MİL kompozitler

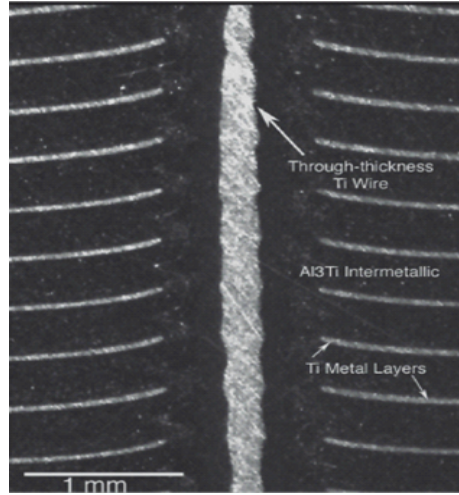
Hasar tespit ve life monitoring (hayat-görüntüleme) amacıyla elektriksel ve ya optik yollara yerleştirilmiş kablo ve boruların sentezi bu MİL bileşenlerini tam anlamıyla çok amaçlı yapabilir. MİL sentezinden önce alüminyum tabakalarda yuva oluşturarak metal kablolar, metal veya seramik borular, metal kablo içeren seramik borular ve optik fiberler kullanılabilir. Kablo ve ya fiberler kullanılarak intermetalik tabakalar arasındaki hasarları tespit etmek mümkün. Ayrıca bu gömülü teller intermetalik tabakalar arasında sertleştirici (güçlendirici) bir görev üstlenirler. Şekil 3.12’de intermetalik bir tabaka içindeki gömülü seramik bir boruyu göstermektedir. Bu seramik borunun içinde elektriğe karşı izole edilmiş 2 adet tel vardır [12].



Şekil 3.12. İki metal kablo geçirilmiş seramik tüp içeren Ti-Al₃Ti MİL kompozitin mikroyapısı [12].

3.1.4.4. İçinden kalın tel veya boru geçen MİL kompozitler

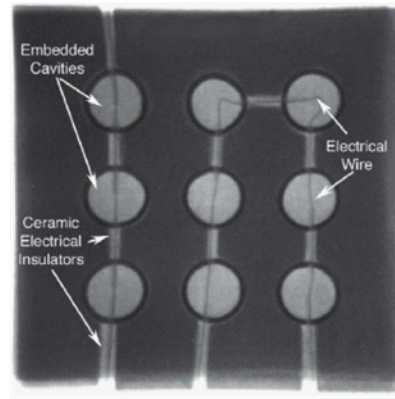
Başlangıç maddesi olarak metal folyolar kullanıldığından dolayı, tabakaların, üretim adımlarını kolaylaştırmak için tek tek veya grup halinde üretmek mümkündür. Bütün tabakalarda delik açarak ve deliğe tel veya boru yerleştirerek, sertleştirici-güçlendirici bir özellik meydana getirmek mümkündür. Şekil 3.13’de bir Ti-Al MİL bileşenine yerleştirilmiş titanyum tele örnek gösteriyor. Bu tellerin dağılımı ve yerleşimi kalınlık ve enine gerilim arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla yerleştirilebilir. Bu teller aynı zamanda zorlanma algılayıcısı veya hasar tespit amacıyla gömülü (yerleşik-entegre) elektrik rezistansı olarak görev yapabilirler. Telleri boruların yerine koyarak, perçin tipi ek delikler ve kalın fiber optikler elde edilebilir ve bunlar görüntüleme ve çevresel algılama amaçlı kullanılabilirler [12].



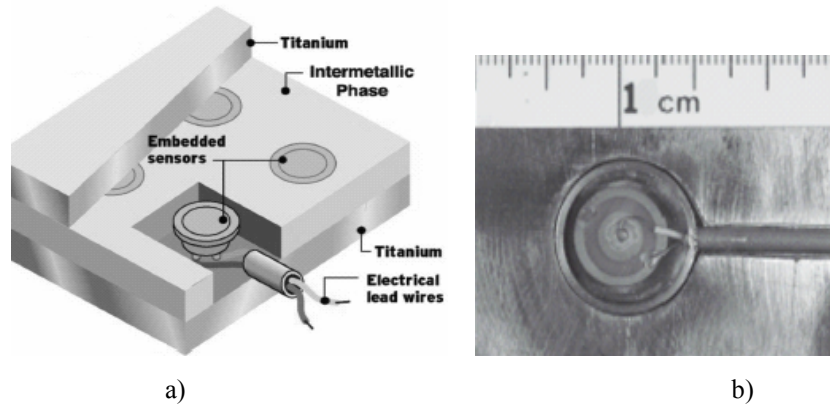
Şekil 3.13. Bir Ti-Al MİL kompozitinde kalınlık boyunca titanyum bir kablo gömülmüş bir örneğin mikro yapısı [12]

3.1.4.5. Tam fonksiyonel MİL kompozitler

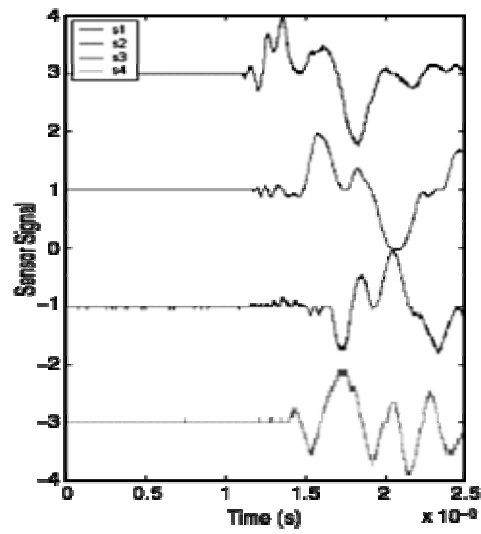
MİL bileşenlerinin bir sonraki adımı orta düzey oyuklarına ve elektriksel kanallarının olmasıyla ve bu yolla piezoelektrik cihazlar, ivmeölçer, yatay gözler gibi algılayıcı cihazlarda kullanılırlar. Şekil 3.14'de elektrik yalıtkanlarıyla birbirine bağlanmış bir dizi oyuğa ve oyuktan geçen bir çift tele sahip bir MİL bileşenin x-ray fluoroskop resmini göstermektedir. Bu oyuklar aynı zamanda, mekanik hareketleri algılamak (veya maddenin mekanik hareketim sağlamak) için kullanılan lityum niobate piezoelektrik kristaller gibi yüksek ısı kapasitesine sahip maddelerle (device=cihazlarla) doldurulabilir. (Şekil 3.15) Piezoelektrik algılayıcı entegre edilmiş MİL bileşenin görüntüsünü ve MİL bileşenini tepkisinden önceki asıl algılayıcının bir fotoğrafını gösteriyor. Sensörlerin tepkileri levhaya yerleştirmeden önceki tepkisiyle benzer. Bu sensörlerden (algılayıcılardan) gelen sinyaller etki bölgesini belirlemek ve bu sinyallerin analizi sonucu etki gücünün büyüklüğünün tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır [12].



Şekil 3.14. Bir Ti-Al₃Ti MİL kompozitin intermetalik tabakasında seramik ile izole edilmiş tellerle birbirine bağlanan kalınlık boyunca ki boşlukların bir x-ray floroskop görüntüsü [12]



Şekil 3.15. a) Yapısında bir piezoelektrik sensörü bulunduran MİL kompozitin görüntüsü ve b) reaksiyondan önce yerleştirilmiş piezoelektrik sensörün fotoğrafı [12]



Şekil 3.16. Plakanın reaksiyonu sırasında aynı anda MİL kompozite gömülen dört piezoelektrik sensörden kaydedilen voltaj sinyalleri [12]

3.2. İntermetalik Bileşikler

İntermetalik bileşikler, katı çözeltilerle güçlendirilmiş metalik bileşikler ya da ikinci bir fazla takviye edilmiş katı çözeltilerle seramikler arasında önemli bir yere sahiptirler. Bu bileşikler genellikle dar kompozisyon aralıklarında, basit oranlar çerçevesinde iki metalin bileşik oluşturacak şekilde kimyasal olarak birleşmesi ile oluşurlar. İntermetalik bileşikler kritik düzenlenme sıcaklığında ($T_c < 700^\circ\text{C}$) uzun mesafede düzenli kristal yapılardan oluşan metalik bağlı bir malzeme sınıfıdır [14].

İntermetalik bileşikler iki tip olabilir:

— **Normal valans bileşikleri:** Kimyasal valans kurallarına uygun olarak oluşurlar. Ör; Mg_3Sb_2 , Mg_3Bi_2 . Bu valans bileşikleri genellikle kuvvetli metalik kimyasal özelliklere sahip bir metal (Mg) ile zayıf metalik kimyasal özellik gösteren metal (Sb, Bi, Sn,..) arasında oluşurlar. Çoğunlukla bu bileşikler ana metallere göre daha yüksek ergime sıcaklığına sahiptir [14].

— **Elektron bileşikleri:** Bu bileşikler normal valans kurallarına uymaz. Söz konusu İntermetalik bileşiklerin bir molekülünde atomların toplam sayısı ve bütün atomların valans bağlarının toplam sayısı (toplam valans sayısı/ toplam atom sayısı) arasında sabit bir oranı vardır. Genel olarak Hume-Rothery oranları 3'e ayrılır:

3/2 oranı ($21/14$) $\rightarrow \beta$ yapıları (CuZn , Cu_3Al , Cu_5Sn , Ag_3Al ,..)

21/13 oranı $\rightarrow \gamma$ yapıları (Cu_5Zn_8 , Cu_9Al_4 , $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, Ag_5Zn_8 ,..)

7/4 oranı ($21/12$) $\rightarrow \epsilon$ yapıları (CuZn_3 , Cu_3Sn , AgCd_3 , Ag_5Al_3 ,..)

Bununla birlikte, pek çok İntermetalik bileşik ne valans bileşiklerine ne de Hume-Rothery oranlarına uymayabilir. Kafes çalışmalarıyla İntermetalik bileşiklerin tam tanımlanması yapılarak karbür, nitrür ve borürlerden (pek çok kompozit malzemede katkı fazları) farkları belirtilmiştir. Bu bileşikler, genel olarak, birkaç farklı stokiometrik oranda düzenli yapıda iki elementten oluşur. Yapılar genel olarak s, p ve d seviyesindeki elektronlarca kontrol edilen bağlarından dolayı metalik karakter göstermektedir. Bu bileşikler genellikle A ve B gibi iki elementten oluşan A_3B , A_2B ,

A_5B_3 , A_7B_6 ve AB kompozisyonuna sahip 5 farklı stokiometrik kombinasyonda sınıflandırılır. Her bir stokiometrik gruptaki İntermetalik bileşikler farklı kristal yapıda oluşurlar. Pek çok kristal yapı, geometrik sıkı paket (gsp) yapı olarak tanımlanan düzlemde iki elementin sıkı paket köşelerine yığılması ile tanımlanır. Benzer şekilde, kompleks yapıların çoğu topolojik sıkı paket (tsp) olarak tanımlanır; bu yapıda hayali polihedrada atom gruplarının yığılmasından kaynaklanan farklılık mevcuttur [14].

İntermetalik bileşiklerin düzenli latisleri ile mekanik davranışları ve olağanüstü dislokasyon yapıları arasındaki ilişki 1960'lardan beri detaylı olarak araştırılmaktadır. Bu bileşiklerin deformasyonu ikili dislokasyon veya süperlatis kayması ile kontrol edilir. Yüksek sıcaklıklarda süperlatis dislokasyonlarının hareketi nispeten düşük olup akma davranışında yükselmeye neden olmakta ve artan test sıcaklığına paralel olarak akma mukavemetinde artış gözlenmektedir. Anormal akma davranışı pek çok İntermetalik bileşikte (Ni_3Al , Cu_3Au) gözlenmiştir. İntermetalik bileşiklerin kritik özellikleri ile fiziksel ve kimyasal karakteristikleri arasındaki ilişki Tablo 3.1 de listelenmiştir [14].

Tablo 3.1. Metaller arası bileşiklerin kritik özellikleri. Özellik Karakteristik tanımlar [14].

Sürünme Mukavemeti	Ergime Sıcaklığı, Bağ yapısı
Oksidasyon Direnci	Oksit oluşturan elementlerin yüksek Aktivasyonu, Kristal Yapı
Süneklik	Kristal Yapı, Stokiometri
Termal Genleşme	Ergime Sıcaklığı, Bağ yapısı
Elastik Modül	Kristal yapı, Bağ yapısı
Alaşımlama Potansiyeli	Faz Alanının Genişliği
Yoğunluk	Esas element, Kristal yapı

Kuvvetli İntermetalik bileşiklerin gevrekliklerinden dolayı yapısal uygulamalar için şekillendirilmeleri oldukça zordur. Üretilseler bile; düşük kırılma tokluğu, yüksek çentik hassasiyeti, aşırı yorulmadan kaynaklanan çatlak büyümesi ve düşük

süneklik özellikleri bu malzemelerin kullanım alanlarını oldukça sınırlandırmaktadır. Ayrıca İntermetalik bileşikler küçük kompozisyon değişikliklerine ve hidrojen içeren ortamlara karşı aşırı hassastırlar. 1970'li yıllarda fiziksel metalurji prensipleri kullanılarak alaşım dizaynı ile İntermetalik bileşiklerin üretilebilirliklerinde ve mekanik özelliklerinde gelişmeler sağlanmıştır. Bunun için yapı kontrolü, mikro alaşımlama ve makro alaşımlama yapılmaktadır. Co_3V 'un sünekliği Fe ile makro alaşımlama yapılarak iyileştirilmiştir. Fe ilavesi, ortalama elektron konsantrasyonunu azaltarak bileşiğin yapısını hegzagonal yapıdan kübik yapıya dönüştürmüştür. Kübik L12 yapılı $(Fe,Co,Ni)_3V$ alaşımın oda sıcaklığındaki süneklik değerinde %40'dan fazla iyileşme sağlanmıştır. Aynı şekilde Al_3Ti bileşiğine Cr ve Mn, Ni_3Al bileşiğine de Mn, Fe ve Cr ile makro alaşımlama yapılarak süneklik özellikleri iyileştirilmiştir. Çok kristalli Ni_3Al bileşiğine ilave edilen bor'un tane sınırlarına segregasyonu ile taneler arası kırılma önlenerek kırılma tarzı değişmekte ve süneklik değeri hızla artmaktadır. Mikroyapı kontrolü ile de İntermetalik bileşiklerin sünekliği iyileştirilmektedir. $NiAl$ bileşiğinin tane boyutu inceltirilerek $400^{\circ}C$ den yüksek sıcaklıklarda süneklik değeri artırılmıştır. Ni_3Al bileşiğinin sünekliğinin artırılmasında diğer bir yaklaşım ise yönlü katılaşmadır. Bunlar kuvvetli İntermetalik bileşiklerde yüksek süneklik değerlerine ulaşmada örnek uygulamalar olarak verilmektedir. İntermetalik bileşiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile pek çok uygulamalar için kullanılabilceği görülmüştür. Aşağıda İntermetalik bileşiklerin uygulama alanları genel olarak verilmiştir [14].

Metaller arası Bileşiklerin Uygulama Alanları;

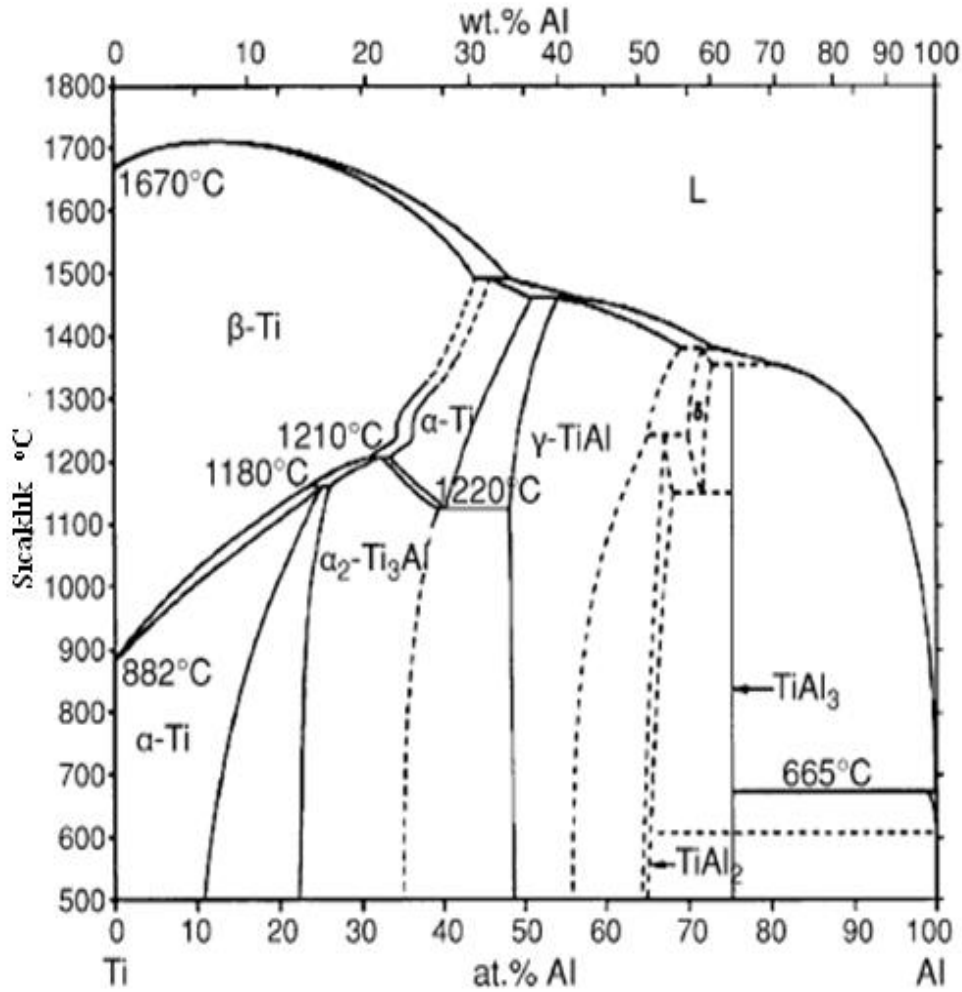
Otomotiv, Uzay, Magnetik Enerji depolama, Piller, Hidrojen depolama Isıtıcı elemanlar, fırın donanımı, takımlar ve kalıplar korozif ortamlar, kimya endüstrisi için borular kladlama, Kaplamalar, Elektronik devreler [14].

3.3. Al-Ti İkili Denge Diyagramı

Şekil 3.17'de gösterilen Ti-Al ikili denge diyagramı oldukça karışıktır ve farklı kaynaklardaki diyagramlarda önemli farklar bulunur. Alüminyum $660^{\circ}C$ ve titanyum $1670^{\circ}C$ de ergimektedir. Katı halde alüminyum herhangi bir faz dönüşümü

göstermez. Titanyum ise faz dönüşümü gösterir: α -Ti oda sıcaklığından 882°C 'ye kadar kararlıdır; bu sıcaklıkta ergime sıcaklığına kadar kararlı olan β -Ti'a dönüşür. Birçok titanyum alaşımının özellikleri bu fazların oranları ayarlanmak sureti ile kontrol edilebilmektedir [15].

Ti-Al ikili denge diyagramında 4 intermetalik bileşik vardır:



Şekil 3.17. Al-Ti ikili denge diyagramı [15].

α_2 -Ti₃Al: Yaklaşık olarak ağırlıkça %13–23 Al içerikleri arasında kararlı olan bu faz yaklaşık 1210°C de ökteoid reaksiyonla (α -Ti + β -Ti \rightarrow Ti₃Al) oluşur.

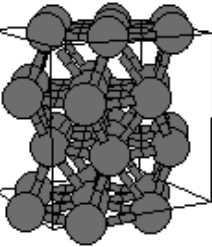
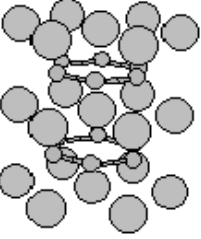
γ -TiAl: Yaklaşık ağırlıkça %36–42 Al içerikleri arasında yaşayan bu bileşik bileşime bağlı olarak 1350°C üzerindeki sıcaklıklarda ergir. Yaklaşık 1430°C’de ve ağırlıkça % 40 Al bileşiminde α -Ti ve sıvıdan peritektik reaksiyonla oluşur (α -Ti + Sıvı \rightarrow γ -TiAl).

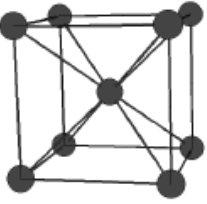
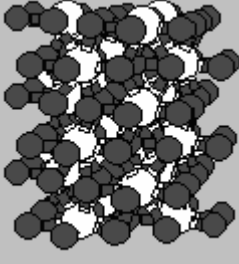
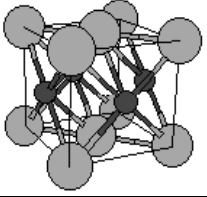
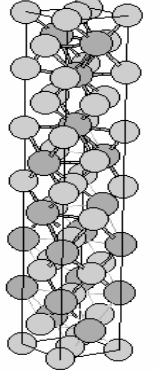
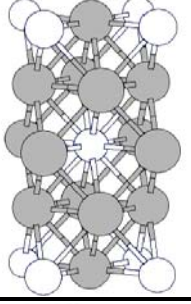
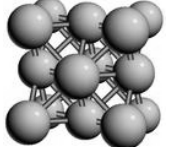
TiAl₂: Yaklaşık olarak ağırlıkça %51–52 Al bileşim aralığında bulunan bu bileşik 1250°C’de γ -TiAl ve δ fazlarından ötektoid reaksiyon ile (γ -TiAl+ δ \rightarrow TiAl₂) oluşur. δ fazı yaklaşık 1150°C üzerinde dar bir aralıkta kararlıdır.

TiAl₃ (Al₃Ti): Ağırlıkça yaklaşık %63 Al bileşiminde bulunan bir intermetaliktir. Yaklaşık 1330°C’de ağırlıkça %63 Al bileşiminde δ ve sıvı fazlarından peritektik reaksiyon ile oluşur. Daha düşük alüminyum bileşimlerinde TiAl₂ ve daha yüksek Al bileşimlerinde sıvı (yüksek sıcaklıklar) veya Al (düşük sıcaklıklar) ile beraber bulunur. Bu bileşik yüksek elastik modül, yüksek katılık ve yüksek basma mukavemeti gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir.

Tablo 3.2’de Al–Ti ve aralarında oluşturdukları fazların kristal yapı ve parametreleri gösterilmektedir.

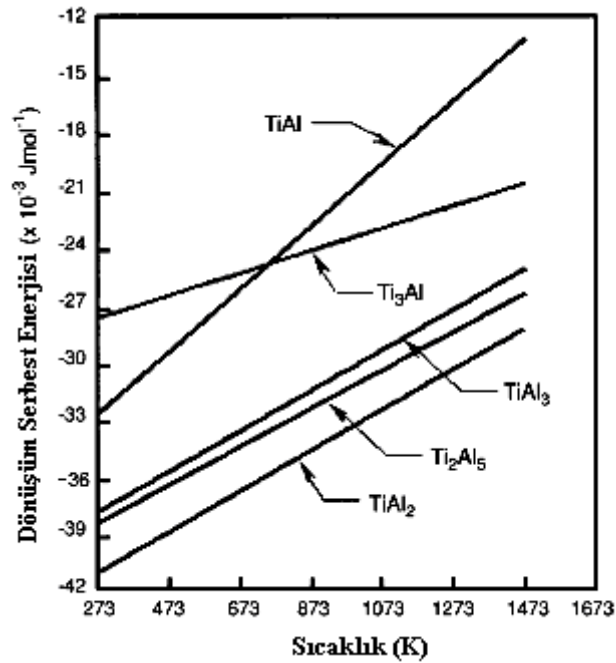
Tablo 3.2. Al-Ti sistemine ait kristal yapılar [16]

Kristal yapı	Bileşim	Sınıfı	Yapı Sembolü	Latis Parametreleri
	Ti (alpha)	A3	hP2	a = 0.295 nm c = 0.468 nm
	Ti (γ)	C32	hP3	a = 0.4625 nm c = 0.2813 nm

	Ti (beta)	A2	cI2	a = 0.331 nm
	AlTi ₃	D0 ₁₉	hP8	a = 0.5780 nm c = 0.4647 nm
	AlTi	L1 ₀	tP2	a = 0.400 nm c = 0.407 nm
	Al ₂ Ti		tI24	a = 0.3976 nm c = 0.2436 nm
	Al ₃ Ti	D0 ₂₂	tI8	a = 0.385 nm c = 0.429 nm
	Al	A1	cF4	a = 0.405 nm

Şekil 3.18’de serbest enerji değerlerinin karşılaştırıldığı şekilde Ti-Al sisteminde mevcut aluminidlerden Al₃Ti aluminidinin oluşumu, Al direkt olarak Ti ile reaksiyona girdiği zaman, termodinamik ve kinetik açıdan diğer aluminidlere tercih

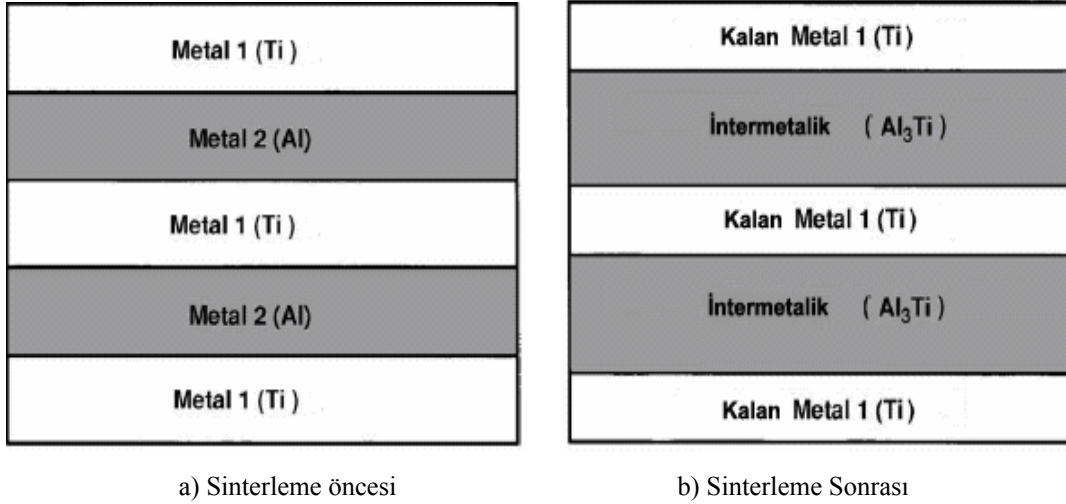
edilir [17]. Al_3Ti 'un bu tercihli oluşumu, bu aluminidin 216 GPa'lık Young Modülü, yüksek oksidasyon direnci ve AlTi_3 ve AlTi gibi diğer aluminidlerinden düşük olan $3,3 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğu göz önüne alındığında, bir şanstır. Yüksek basma mukavemeti ve yüksek basma katılığı yüksek bağ mukavemetinden ileri gelir [17].



Şekil 3.18. Sıcaklığa bağlı olarak, farklı Ti-Al bileşimlerinin dönüşüm serbest enerjileri grafiği [15]

3.4. Ti-Al₃Ti Laminat Kompozit

Metalik-İntermetalik kompozitler, malzemede intermetalik fazın yüksek mukavemet ve sertliği ve metalin yüksek tokluğunun sonucunda, ana bileşenlerin başlıca özellikleri ve faydalarını optimize etmek için yapısal olarak dizayn edilebilirler. İntermetalikler tokluğu yükseltilebilmesi için yumuşak metal tabakaları partiküller ve teller ile takviye edebilirler. Gevrek malzemelerin sünek faz takviyesi, çatlak başlangıcında çekmede azalma oluşturarak ve sünek metal fazında kompozitin kırılma direncini arttırmak için plastik deformasyon işi kullanılarak çatlak laminat etkileşimi kullanılarak çatlağın açılmasını ve büyümesini sınırlayan bir köprü bağlantısı zonu oluşturulur [18].



Şekil 3.19. Sinterleme öncesi ve sonrası tabakaların kalınlıkları. a) Sinterleme öncesi b) Sinterleme sonrası [19]

Proses sırasında, başlangıç Al ve Ti folyoları birbiri ile reaksiyona girerek Ti-Al₃Ti'den ibaret bir sıralı laminat kompozit elde edilir. Titanyumun reaksiyona girmemiş kısmı (metalik faz) ile Al ile reaksiyona girerek Al₃Ti intermetalğini oluşturan kısmı kimyasal olarak birbirine bağlıdır. Seramiğe benzer olan aluminid fazı (Al₃Ti) fazı kompozite yüksek sertlik ve katılık verirken, bununla beraber reaksiyona girmemiş metalik Ti fazı sistemi fleksibıl kılmak için kompozitin gerek duyduğu yüksek mukavemet, tokluk ve süneklığı sağlar. Kompozitin çok tabakalı yapısı tabaka kalınlığında ve buna bağlı olarak metalik ve intermetalik fazların hacim oranlarında değişimlere izin verir; tabaka kalınlıkları basitçe başlangıç Al ve Ti folyo kalınlıklarına bağlıdır. Bu durum, verilen herhangi bir uygulama için termal özelliklerin optimizasyonunu mümkün kılar [12].

Sonuç olarak Ti-Al₃Ti kompoziti, Be alaşımlarına uzun araştırmalar sonucu elde edilen bir alternatiftir. Be alaşımları yüksek üretim maliyeti ve insan sağlığına karşı tehlikelerine karşılık yüksek hızlı uçaklar, füzeler (nozullar), uzay araçları ve uçak frenleri gibi uç uygulamalar için primer yapısal ısı azaltıcı malzemelerdir. Ti-Al₃Ti kompozitleri bu tür uygulamalar için gerekli kırılma tokluğu, termal iletkenlik, düşük ağırlık, katılık ve boyutsal kararlılık gibi özellikleri sağlar [12].

Açık atmosferde MİL kompozit üretimi çeşitli boy ve şekillerde daha büyük numune üretimini de kolaylaştırır. Üretimde geniş boyutlar ve yüksek uyumluluk

kompozitlerin bu sınıfının zırh ve yapısal malzemeler, özellikle düşük ağırlık gerektiren uzay uygulamalarında da kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Açık atmosferde ısı kaynağı seçimi önemlidir ve yükleme yapısında yüksek uyumluluk vardır. Başlangıç folyo malzemeleri çeşitli kalınlık ve kompozisyonda temin edilebilir [18].

Tabaka kalınlıkları çok hassas seçilebildiği gibi mükemmel mikroyapı kontrolü ve mikroyapı değişkenliği için potansiyel vardır. Ek olarak folyo dizilimi ve folyo malzemesi özel uygulamalar için mikroyapı optimizasyonu ve dereceli yapıları oluşturmak için kalınlıklarda çeşitlendirilebilir. Ayrıca bu kompozitler uyarlanabilen potansiyel yüksek anizotropik özelliklere sahiptir [18].

Laminat kompozit üretimi reaksiyonu reaktif folyo metalurjisi ve özellikli reaksiyon mekanizması açıkça belirlenemese de reaksiyon kinetiği ölçülmesine rağmen kendinden yayılan yüksek sıcaklık sentezini (SHS) kapsar. SHS prosesi orijinal olarak toz komponentlerden (yüzey hacim oranının yüksek olduğu) refrakter bileşimleri geliştirildiğinde ve bir dış sıcaklık kaynağı olmadığında kendini sürdürebilen yüksek bir ekzotermik reaksiyonla karakterize edilebilir. Katı ürünler için SHS reaksiyonu deneysel olarak incelenmiştir ve Reaktanlar, saniyeler içinde reaksiyonun tamamlanmasıyla 2273°C 'nin reaktanları için ısı kapasitesine ($\Delta H^{\circ}_{1238}/C_{p298}$) dönüşümün standart serbest enerjisinin bir minimum oranına uyan 2073°C den yüksek bir adyabatik yakma sıcaklığına ihtiyaç duyarlar. Bir SHS tipi reaksiyonun bir sonucu gibi bir vakum ya da bir inert atmosferde metalik-intermetalik laminat üretimi önerilebilirdi. Burada tartışılan kompozitlerin reaksiyonları bu aynı reaksiyon mekanizmasıyla oluşursa belirlenebilecektir [18].

Difüzyon ve Al_3Ti intermetalik fazının oluşumu için titanyum ve alüminyum arasında ki reaksiyon alüminyumun ergime noktasının (660°C) altında ve üstündeki sıcaklıklarda önemli bir oranda araştırıldı. Alüminyumun ergime noktasının altındaki sıcaklıklardaki (400°C den 642°C kadar) araştırmalar Al'un sadece boşluklara difüze olduğunu göstermiştir. Al'nin difüzyonu iç oksit tabakalarından önemli bir şekilde etkilenmedi, fakat bir iç oksit tabakası Al_3Ti 'nin dönüşüm hızını düşürecektir. Al_3Ti intermetalik fazının büyümesi Al kalıntılarının küçük bir bölümüyle titanyumun çok

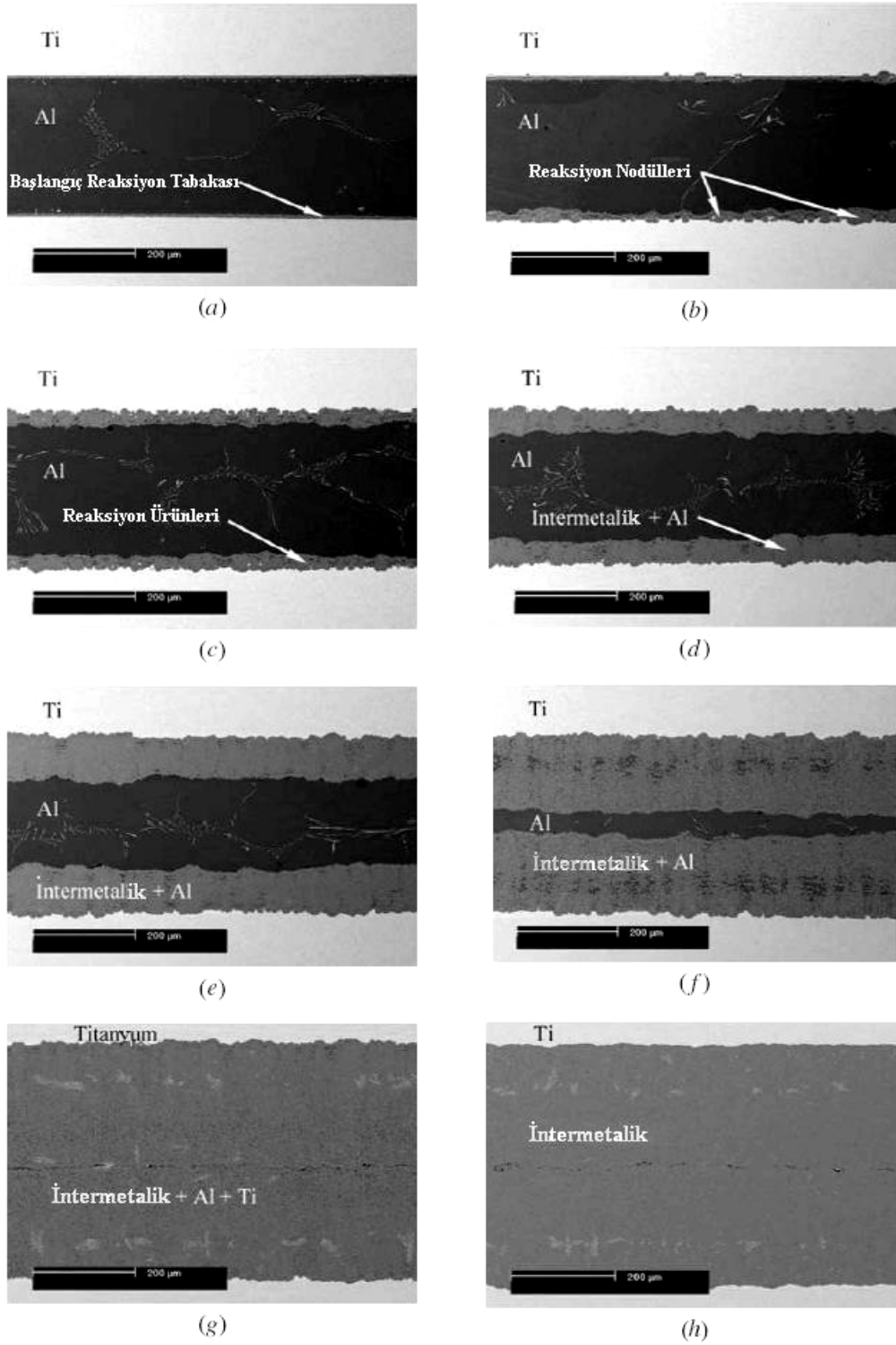
olduğu kısımda yalnızca oluştu ve parabolik intermetalik büyüme hızı gözlemlendikten sonra oksit tabakasının kırılmasına kadar lineer kinetikler gözlemlendi metaller arasında oksit filmi oluştuğu zaman lineer kinetiklerin difüzyonunun erken safhalarında görüldüğü ve sonra parabolik olduğu anlaşılmıştır [18].

Alüminyumun ergime noktasının (660 °C) üstündeki ve 700°C üstünde sıcaklıklardaki araştırmalar titanyumun boşluklara difüze olduğunu gösterdi. Tabaka oluşum hızının lineer olduğu gibi Al_3Ti fazının dönüştürülmesi nedeniyle yüzey reaksiyonunun mümkün olduğu düşünülür. Oluşan reaksiyon tabakası bir alüminyum matristeki Al_3Ti partiküllerinin birleşimidir ve katı çözeltili gözükmemektedir. Partiküller termal akımla alüminyumun içine süpürülen ve intermetalik tabakanın çatlağa sebep olmasıyla geniş hacmi kaplayan intermetalik tabakanın büyümesinden sağlanan gerilmelerle oluştuğu düşünülür [18].

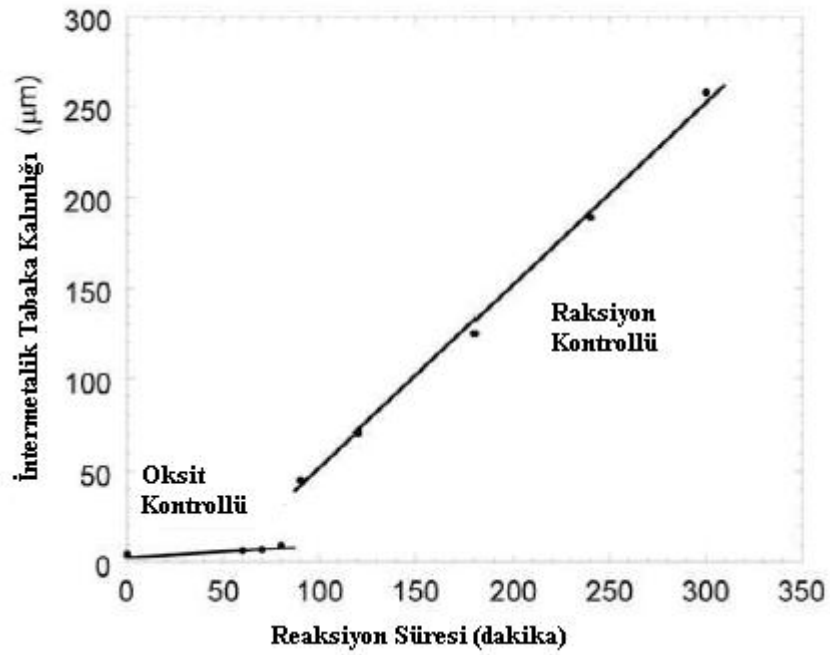
Şekil 3.20’de, sinterleme reaksiyonunun başladığı andan itibaren, belirli sürelerde işlem gördükten sonra bitirilen deneylerden elde edilen malzemelerin mikroyapıları gösterilmektedir. Bu incelemeler neticesinde farklı sürelerde farklı difüzyon oluşumları gözlemlenmiştir. Bu farklı oluşumların sebebi difüzyonun süresi arttıkça daha geniş alanlara yayılmasıdır [18].

Şekil 3.21’de ise Ti ve Al folyalarının sinterlenmesi esnasında ara yüzeyde oluşan difüzyonun ilerlemesini göstermektedir. Bu şekiller Şekil 3.22’deki TEM görüntüsünde olduğu gibi intermetalik fazın difüzyon neticesinde çekirdeklendikten sonra küresel bir yapıda oluşup malzeme merkezine doğru ilerleyişini anlatmaktadır. Bu kürecikler arayüzeyde sürekli olarak oluşmakta ve bu kürelerin oluşumu tamamen intermetalik bir yapı oluşuncaya kadar ilerlemektedir [18].

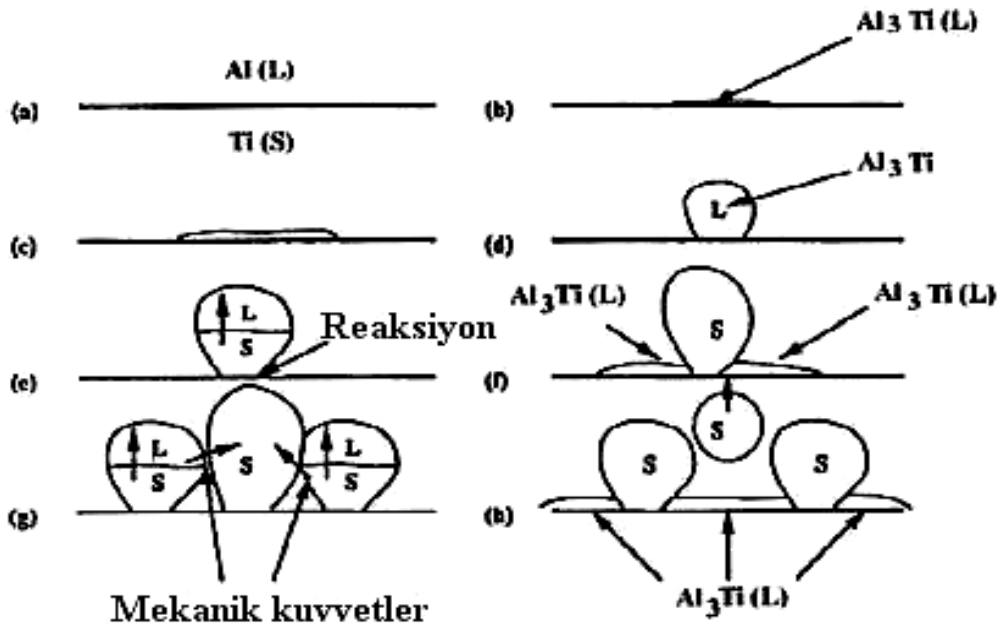
Şekil 3.22’de Ti ve Al folyoları arasında difüzyonun başlangıç ve ilerleyişi gösterilmiştir. Şekil 3.23’de ise bu oluşan küreciklerin TEM görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 3.20. Takip eden reaksiyon sürelerinden sonra ard arda Ti-Al reaksiyonunun elektron geri saçılım mikroyapı görüntüleri: a) 1 saat, b) 1 saat 20 dakika, c) 1 saat 30 dakika, d) 2 saat, e) 3 saat, f) 4 saat, g) 5 saat ve h) 6 saat [18]

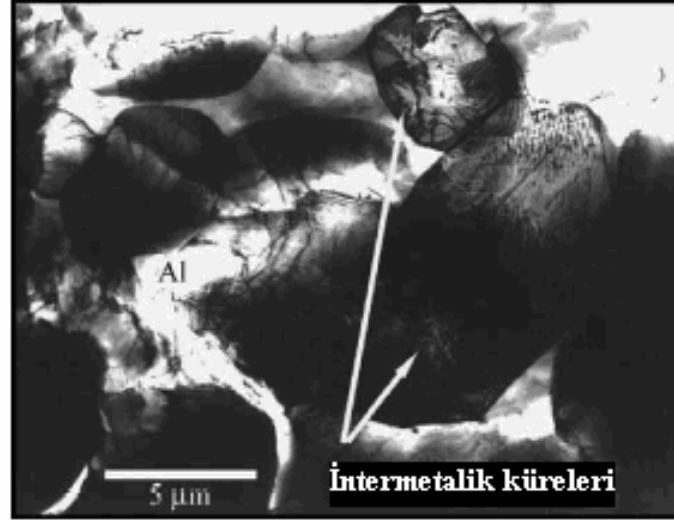


Şekil 3.21. İki lineer rejimle gösterilen reaksiyon süresiyle intermetalik tabaka kalınlıkları. Yarıda kesilen reaksiyon çalışmalarının verileri [18]



Şekil 3.22. Katı Ti – sıvı Al ara yüzeyinde Al_3Ti 'nin sentezinde ard arda oluşan olaylar; a) Başlangıç b) ve c) İnce tabaka halinde çekirdeklenme ve büyüme d) Ara yüzey enerjisinin sonucu olarak küreselleşme e) Katılaşma ve düşük reaksiyon kinetiği f) Yeni oluşan ara yüzeyden bitişik Al_3Ti bölgeleri g) Bitişik Al_3Ti bölgelerinin küreselleşmesi ve katılaşması h) Kürelerin ayrılması [18]

Difüzyon esnasında oluşan kürecikler Şekil 3.23’de TEM ile çekilmiş mikroyapıda görülmektedir.



Şekil 3.23. Kısmi reaksiyona uğramış kompozitte reaksiyona uğramamış Al ile oluşan Al_3Ti intermetalik kürelerinin TEM mikroyapı görüntüsü [18]

İntermetalikler yüksek basma mukavemeti ve katılık ile yüksek oksidasyon direnci, yüksek ergime sıcaklığı ve bazı hallerde düşük yoğunluk ve genellikle iyi sürünme direnci gibi olumlu özelliklerine sahip olmalarına karşılık, dislokasyonların sınırlı hareketleri nedeniyle düşük sıcaklıklarda gevrektirler [18]. Yetersiz sayıda kayma ve ikizlenme sistemleri vardır, çatlak ucunda çok az plastik deformasyon olduğundan veya hiç olmadığından yüzey enerjileri çok düşüktür. Örneğin, Al_3Ti oda sıcaklığında çok gevrektir ve ancak yaklaşık $2 \text{ MPa m}^{1/2}$ mertebesinde bir kırılma tokluğuna sahiptir. Düşük kırılma tokluğu bu malzemelerin yapısal uygulamalarda kullanımını sınırlar. Bu problemi aşmak için, intermetalikleri sünek bileşenlerle takviye etmek her zaman iyi bir yaklaşım olarak görülmüş ve birçok araştırmanın konusu olmuştur. Bunun için, optimal uygulama-spesifik mikroyapı tasarımı ancak doğru mikroyapı bileşenlerinin ve mimarının seçimi ile başarılabilir. Çeşitli araştırmacılar sünek metalin partikül veya tabakalarını kullanarak intermetaliklerin tokluğunu artırmayı denemişlerdir. Aynı sünek faz hacim oranında laminatın partikül ve fiber takviyesinden daha çok tokluk artışı sağlamış olması enteresandır. Bu yolda önemli bir kilometre taşı metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitlerin geliştirilmesi olmuştur [18]. Metal-intermetalik kompozitler bileşenlerin biricik ve

yararlı özelliklerini optimize etmek suretiyle yapısal kullanımlar için tasarlanabilmektedir. Bu şekilde, intermetalik fazın yüksek mukavemet ve katılığı ile metalin yüksek tokluğunun kombine olduğu bir yapı elde edilir. Gevrek malzemelerin sünek faz ile takviyesi çatlak açılımı ve büyümesini sınırlayan bir köprüleşme bağ zonu meydana getirir ve sünek metal fazının plastik deformasyonu için harcanan enerji kompozitin kırılma direncini artırır [18].

Al_3Ti intermetalik fazının iyi özelliklerinden yararlanmak için, gevrek fazı daha tok olan sünek metaller ile takviye etmeye gerek vardır. Bu tür fazlardan bir laminat kompozit üretmek için çeşitli yollar (difüzyon bağlanması, depozisyon ve spreying gibi) denenmiş olmakla beraber, son geliştirilen “reaktif folyo sinterlemesi” veya “reaksiyon bağlanması” en başarılısı olmuştur [18].

Açık havada MİL kompozitlerin üretimi farklı şekillerin (tam boyuta yakın üretim dâhil) daha büyük boyutlarda üretimine olanak sağlar. Üretimde daha büyük boyutlar ve artan esneklik zırh ve yapısal malzemeler (özellikle düşük ağırlığın gerekli olduğu havacılık uygulamaları) gibi kullanım alanları için bu kompozit sınıfının göz önüne alınmasını mümkün kılar. Açık havada, ısı kaynaklarının ve yük uygulama sistemlerinin seçimlerinde büyük bir esneklik vardır. Başlangıç folyo malzemeleri çok geniş bir kalınlık ve bileşimde bulunabilmektedir ve bu çalışmada gösterileceği gibi, açık havada reaksiyona girecek olsalar bile sadece küçük bir ön hazırlama gereklidir. Mükemmel mikroyapı kontrolü ve tabaka kalınlığının yüksek bir hassasiyetle seçilebildiği farklı mikroyapıların elde edilebilmesi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, folyo istif sırası ve folyo malzemeleri spesifik uygulamalar için optimize edilmiş dereceli yapıları (graded structures) ve mikroyapıları elde edecek şekilde kalınlıkça değiştirilebilmektedir. Dahası, bu kompozitler potansiyel olarak düzenlenebilen yüksek oranda anizotropik özelliklere sahiptirler [18].

Laminat kompozitleri üretimde kullanılan reaksiyon reaktif folyo metalurjisi ve kendiliğinden yürüyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) olarak isimlendirilmektedir, bununla beraber, ne spesifik reaksiyon mekanizması açık olarak ortaya konulmuştur veya ne de reaksiyon kinetiği ölçülmüştür [18].

Metalik-intermetalik laminat kompozitler intermetalik fazın yüksek mukavemeti ve katılığını ve metalik fazın yüksek tokluğuna aynı anda sahip bir malzeme vermek üzere, bileşenlerin üstün özellik ve iyi yanlarını optimize edecek şekilde yapısal uygulamalar için tasarlanabilmektedir. İntermetalik faz, tokluğu artırmak için sünek metallerin partikül, çubuk veya tabakaları ile takviye edilmektedir. Gevrek malzemelerin sünek faz ile takviyesi, bir köprüleşme bağ bölgesi meydana getirmek için çatlak ile laminat tabakasının interaksiyonlarından faydalanır; bu köprü çatlak ilerlemesine kapalı alanlar meydana getirmek suretiyle bağ bölgesinde çatlak açılımını ve çatlak büyümesini sınırlar; kompozitin kırılma direncini artırmak için sünek metal fazındaki plastik deformasyon enerjisinden faydalanır [18].

Li ve arkadaşlarının MİL prosesi, değişken sıra ile alüminyum ve titanyum folyolarının dizilmesinden ve sonra kompozit sentez cihazına yerleştirilmesinden ibarettir. Folyo istifi kartuşla ısıtılmış iki nikel plaka arasına yerleştirilir ve yük uygulayan cihazın çenelerine bağlanır. Basınç uygulanması ve ısıtma açık havada yapılır. Başlangıç basıncı 3,8MPa'dır. Sıcaklık 25°C'den 625°C'ye ısıtılır ve orada 2-3 saat beklenir. Bu, tabakaların difüzyon ile birbirine bağlanmasına imkân verir. Sıcaklık sonra 650°C'ye çıkarılır. Reaksiyonun başlaması basınçta azalmaya yol açar ve sıvı fazın oluşmaya başlaması ile basınç 1,5MPa'a kadar düşer. Reaksiyonun tamamlanmasıyla, basınç gene 3,5MPa'a yükseltilir. MİL prosesindeki basınç/sıcaklık ilişkisi alüminyumun tümüyle reaksiyona girecek ve son üründe tabakalar arasında hiçbir boşluk kalmayacak şekilde seçilmektedir. Başlangıç Al ve Ti alaşımı plakaların kalınlıkları final fazları arasında istenen kalınlık ve oranı verecek şekilde seçilmektedir. Folyo boyutları, Al₃Ti intermetalik bileşiği oluşturmak suretiyle alüminyumun tamamıyla harcanacağı şekilde seçilmektedir. Son ürün, kısmen reaksiyona girmemiş metalik Ti fazı ile Al₃Ti intermetalik tabakalarının sıra ile dizilmiş şeklinden ibarettir [20].

Laminat kompozitler elektronik cihazlar, yapısal kompozitler, zırhlar gibi potansiyel uygulamalar açısından büyük ölçüde araştırılmaktadır. Seramik-seramik, metal-seramik, metal-metal, metal-seramik-intermetalik ve metal-intermetalik sistemleri istenen özellikleri göstermektedirler. Özel olarak, Ti-Al₃Ti sistemi düşük yoğunluğu ve mükemmel spesifik mekanik özelliklerinden dolayı yapısal uygulamalar için

büyük bir potansiyele sahiptir. Bu intermetaliklerin yüksek sıcaklık sentezi reaksiyonu ile sentezlenebildiğini gösterilmiştir. Buna dayanak olan çalışmalarda vakum veya argon koruyucu gaz atmosferi kullanılmıştır. Halbuki Harach ve Vecchio ise bu laminatları açık havada sentezlemişlerdir. Bu durum büyük bir teknolojik avantajdır ve endüstriyel üretimde önemli bir fiyat avantajı sağlayabilir [20].

Li ve arkadaşları, Yaptıkları çalışmada, Ti-Al₃Ti MİL kompozitinin sünekliğinin metalik titanyum fazının miktarının artması ile arttığı sonucuna varılmıştır. MİL kompozit çok düşük şekil değişimi hızı duyarlığı göstermiştir. Kompozitin basma mukavemeti yaklaşık olarak titanyum alaşımının mukavemetine eşittir. Bu sonuç, titanyumun zayıf intermetalik etkilerini sınırlamada çok önemli olduğunu göstermektedir [20].

Malzemelerin tokluğunu artırmak için laminat kompozit yapma fikri yeni değildir. 1966'da, bir Ti-5Al-2.5Sn alaşımının laminatlarının aynı kalınlıktaki kitlesel numuneye nazaran 6-7 kat daha yüksek bir tokluğa sahip oldukları gösterilmiştir. Literatürde ayrıntılı olarak incelenmiş laminatlar arasında Al-Al₂O₃ sistemi, γ -TiAl-TiNb, metalik bileşeni Cu, Ni veya Al olan metal-alumina kompozitleri sayılabilir [17].

Titanyum-titanyum tri-aluminid (Ti-Al₃Ti) metalik-intermetalik laminat (MİL) kompozitleri yüksek sıcaklık ve basınçlarda kontrollü bir reaksiyon yardımı ile bir yeni tek adımlı proses ile elementel titanyum ve alüminyum folyolarından üretilmektedir. Bu üretim prosesinin yeniliği onun açık havada gerçekleştirilmesidir ve bu yolla tam yoğun bir lamine kompozit üretilmektedir. Orijinal titanyum ve alüminyum folyolarının kalınlığı bütün alüminyum tabakasının komşu titanyum tabakaları ile reaksiyona girerek harcanacak şekilde seçilmiştir. Böyle bir tabaka oluşum şeması Ti ve Al₃Ti'ün değişken tabakalı bir kompozitle sonuçlanır ve final (son) tabakaların kalınlığı orijinal Ti ve Al folyoların kalınlığına bağlıdır. Yukarıdaki proses çok esnek, zira Ti'dan başka metal/alaşım folyoları tek tek veya kombinasyon halinde bunların metal-metal aluminid kompozitlerini üretmek için kullanılabilmiştir [17].

Al_3Ti 'un (veya genel olarak, intermetaliklerin) yüksek basma mukavemeti ve yüksek basma katılığı onların yüksek bağlanma mukavemetinden ileri gelir. Ne var ki, intermetalikler düşük sıcaklıklarda sınırlı dislokasyon hareketi, yetersiz sayıdaki kayma ve ikizlenme sistemleri ve/veya çatlak ucunda çok az plastik deformasyon olması veya hiç olmamasından ileri gelen çok düşük yüzey enerjisi nedeniyle gevrektiler. Örneğin, Al_3Ti oda sıcaklığında aşırı gevrektiler ve yak. $2 \text{ MPam}^{1/2}$ 'lik çok düşük bir kırılma tokluğuna sahiptir. Çeşitli araştırmacılar onları partiküllerle, çubuklarla ve sünek metal tabakaları ile takviye ederek intermetaliklerin tokluğunu artırmayı denemişlerdir. İlgi çekici nokta şudur: Sünek takviye fazının aynı hacim oranı için, laminat formundaki sünek faz maksimum toklaştırma etkisine sahiptir ve onu fiber ve partikül morfolojileri takip eder [17].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Amaç ve Gerekçe

Deneysel çalışmaların amacı MİL kompoziti üreterek malzemenin karakterize edilebilmesini sağlamaktır. Bu çalışmalar yapılırken bu konuyla ilgili önceki çalışmalardan model olarak faydalanılmıştır. Bu kompozitin üretiminde (Bkz. Şekil 3.2) Vecchio'nun kullanmış olduğu fırının özelliklerinden faydalanılmıştır. Malzeme üretildikten sonra mikroyapı ve kimyasal bileşim incelemesi için SEM ve EDS, Faz sertliklerinin belirlenebilmesi ve tabaka kalınlık ölçümleri için Mikrosertlik, Bulunan fazların incelenmesi için XRD cihazı kullanılmış ve ilerleyen bölümlerde sonuçlar irdelenmiştir.

4.2. Deney Malzemeleri

Deneylerde, Alfa Aesar (www.alfa-chemcat.com) firmasından temin edilen ve özellikleri Tablo 4.1'de verilen folyolar kullanılmıştır. Folyo saflık ve kalınlıklarının seçiminde şu faktörler göz önüne alınmıştır:

a) Saflık: Literatürde bu derecede saf olmayan, hatta Al ve Ti alaşımları kullanılarak MİL kompozit üretildiğine dair çalışmalar vardır. Dolayısıyla, folyonun saflığı MİL kompozit üretimi için birinci derecede belirleyici bir faktör değildir. Ancak, bir dereceye kadar saf folyoların kullanılması oluşacak intermetalik fazları tanımlamada kolaylık sağlar. Folyo bileşimlerinin Tablo 4.1'deki gibi seçilmesi, Al ve Ti denge diyagramı göz önüne alındığında, olası intermetalik faz sayısını denge diyagramındaki fazlarla sınırlar ve faz tanımlamasını kolaylaştırır. Ancak, istenirse daha karmaşık bileşimli alaşım folyoları kullanılarak MİL kompozit üretimi ve o koşullarda faz tanımlaması da mümkündür. Folyoların saflık derecelerinin

birbirinden farklı olması noktasında ise, folyo üreticisi firmanın koşullarına bağlı kalınmıştır.

b) Kalınlık: Folyo kalınlıklarının seçimi iki faktörce etkilenmiştir:

- i) Literatürdeki çalışmalar
- ii) Son üründe metalik fazın kalması gereği.

Özellikle ikinci faktör önemlidir. Zira MİL kompozit üretimi sırasında, Al ve Ti folyolar arasında bir difüzyon reaksiyonu ile intermetalik faz oluşur. Son üründe, hem metalik hem de intermetalik fazların kalması gerektiği için, özellikle yüksek sıcaklıklardaki uzun tutma sürelerinde reaksiyona girmemiş metalik Ti fazının kalmış olması arzu edilmiştir. Buna karşılık, metalik alüminyum ise tamamen tüketilmelidir. Bu nedenle, her iki yanından alüminyum ile çevrili olmasından dolayı, reaksiyona girmemiş bir titanyum tabakasının kalmasını sağlamak için her bir istifteki titanyum folyoların kalınlığı alüminyum folyonun kalınlığına eş veya ondan daha büyük seçilmiştir.

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan folyoların özellikleri

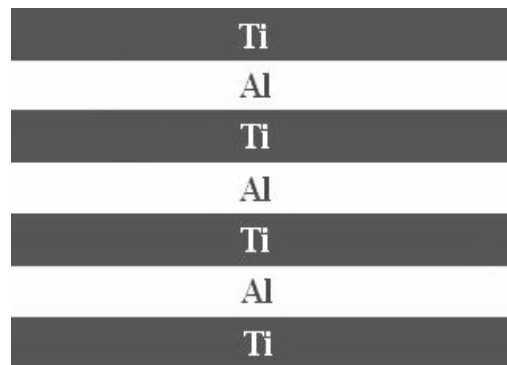
Folyo adı	Kalınlığı, μm^*	Safılık, %*
Ti	127	99
	250	99,5
	500	99,2
Al	100	99,99
	250	99
	500	99,9

*Kalınlık ve safılık değerleri, tedarikçi firma tarafından sağlanan ürün kartları üzerindeki değerlerdir.

4.3. DeneYlerin Yapılışı

Deneysel çalışmalarda 27 adet değişik sıcaklık, zaman ve yüklerde deney yapılmıştır. Bu deneylerin 20 tanesi sonuç üretme veri toplamak için yapıldıklarından sadece son 7 tanesi tez içeriğinde gösterilmiştir. İlk yapılan deneylerde difüzyonun ne oranda oluştuğu ve tabakalar arası bağlanmanın ne şekilde olduğu gözlenmiş ve sonuç olarak aşağıdaki parametrelere ulaşılmıştır.

Tablo 4.1’de özellikleri verilen folyolardan 8x12 mm boyutlarında parçalar kesilmiş, parça kenarları çapaklardan arındırılmış ve birbirlerine iyi temas etmeleri için, kesme sırasında oluşan düzgünsüzlükler bir el presi yardımı ile giderilerek mümkün olduğunca düz bir yüzey elde edilmesi sağlanmıştır. Alkol ile yıkanan titanyum ve alüminyum folyo numuneleri kurutulduktan sonra bir cımbız yardımıyla ardışık sıralı dizilerek düzgün bir şekilde istif edilmişlerdir. İstiflerin alt ve üst sıraları titanyum folyolardan oluşur. Dolayısı ile her istifte alüminyum folyodan bir fazla titanyum folyo bulunmaktadır. Örnek olarak; 250 µm kalınlığında folyolar kullanıldığında, 4 titanyum ve 3 alüminyum folyosu, 500 µm kalınlıklı folyolar kullanıldığında 3 titanyum ve 2 alüminyum folyosu beraberce istif edilmişlerdir. İstif kalınlığının yaklaşık olarak aynı olmasına ($1750 \pm 250 \mu\text{m}$) dikkat edilmiştir. Folyoların istif şekli Şekil4.1’de görülmektedir.

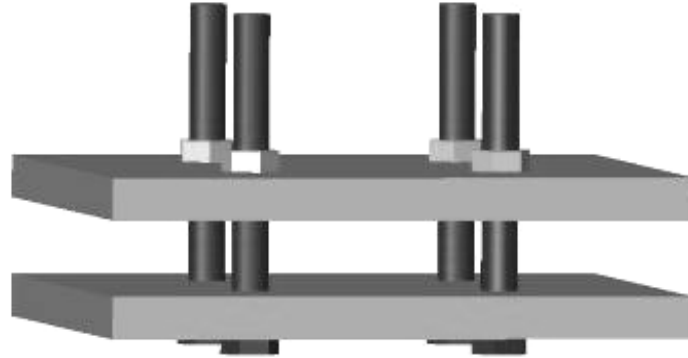


Şekil 4.1. Folyoların istif şekli

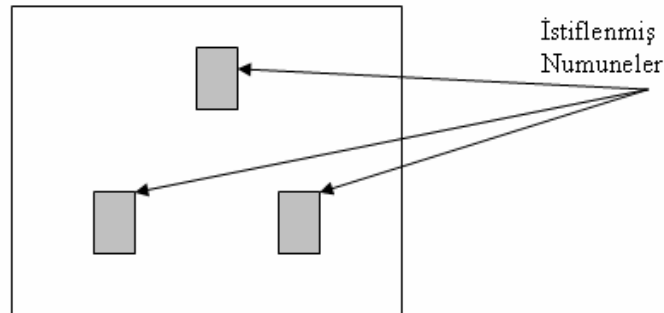
Folyo istifleri Şekil 4.2’deki gibi özel olarak hazırlanmış bir aparatın içine özenle yerleştirildikten sonra aparatın üzerine 1,5MPa gerilim sağlayacak şekilde çekme

cihazı ile basma gerilmesi uygulanmıştır ve gerilme altında civatalar sıkıldıktan sonra aparat açık atmosferli bir elektrik direnç fırınına yerleştirilmiş ve kademeli olarak işlem sıcaklığına ısıtılmıştır. Fırının ısıtma hızı 100°C/dakika olarak seçilmiş, 500°C sıcaklığına erişildiğinde 10 dakika beklenmiştir. Süre, fırın istenen sıcaklığa eriştikten itibaren ölçülmüştür. Çalışmalar esnasında fırının soğuma süresi yaklaşık 1,5 saat olarak ölçülmüştür (Şekil 4.4.). Yukarıda anlatılan koşullar altında önceden belirlenen süreler fırında tutulan ve sürenin bitiminde oda sıcaklığına soğumasından sonra fırından alınan nihai ürünler gerekli incelemelerin yapılması için standart metalografik işlemlerle hazırlanmışlardır.

Şekil 4.2’de deneylerde folyolara gerilim uygulayabilmek için kullanılan aparat görülmektedir. Şekil 4.3’de ise Şekil 4.2’de görülen aparatın orta bölgesinde numunelerin yerleşimi görülmektedir. Her deneyde bu aparatın arasına 3’er adet aynı veya farklı tür eş kalınlıkta numuneler yerleştirilmektedir.

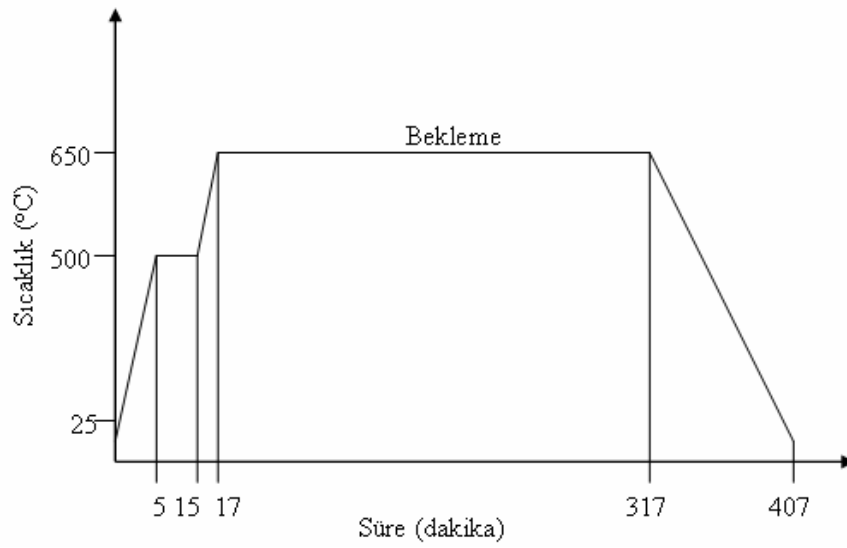


Şekil 4.2. Deneylerde numunelerin istif edilerek fırına yerleştirildiği aparat



Şekil 4.3. Civatalar arasında kalan iki plaka arasındaki bölgeye numunelerin yerleştirilme düzeni

Fırın sıcaklıkları Tablo 4.2’de gösterildiği gibi 650 ve 700°C ve tutma süreleri ise 2,5 – 5 – 7,5 ve 10 saat olarak seçilmiştir. 650°C de difüzyon hızı düşük olduğu için 10 saatlik deney yapılmamıştır. Süre tamamlandığında, numuneler fırında soğutulmuştur. Bu nedenle, fırının sıcaklığı yavaş bir şekilde azaldığı için, difüzyon reaksiyonunun belirlenen süreden daha uzun bir süre devam etmiş olması mümkündür.



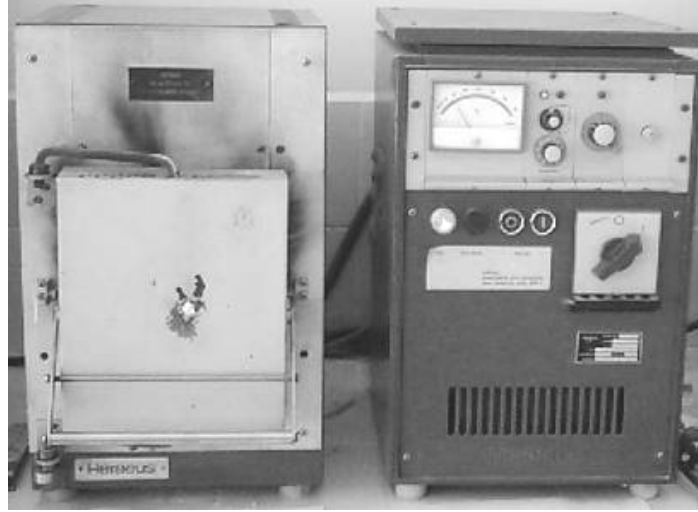
Şekil 4.4. Deneylerde uygulanan tipik bir ısıtma rejimi

Şekil 4.4’de verilen ısıtma rejimi diyagramında 5 saatlik bir deneyin ısıtma ve soğutma süreleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Deneylere ait parametreler

Deney Sıcaklığı	Deney Süreleri (saat)
650°C	2,5
	5
	7,5
700°C	2,5
	5
	7,5
	10

Deneylerin tamamında Şekil 4.5’de görülen elektrik direnç fırını kullanılmıştır. Fırında işlemler gerçekleştirilirken bir termokupl vasıtası ile fırın merkez sıcaklığı da kontrol edilmiştir.



Şekil 4.5. Deneylerin gerçekleştirildiği fırın

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

5.1. Gözle Muayene

Görsel olarak yapılan incelemelerde şu genel bulgu ve sonuçlara ulaşılmıştır:

a) 650°C'de yapılan deneylerde ince folyolarda (127µm Ti-100 µm Al), genellikle tek parça (birbirine yapışmış) numune üretilmesi mümkün olmuştur.

b) 700°C'de yapılan çalışmalarda, folyoların birbirine bağlanmasında teknik olarak bir problem yoktur. Ancak, bazı başarısız sonuçlar da elde edilmiştir ki, bunun nedeni uygun olmayan folyo kalınlıklarının seçimidir. Örneğin, 250 mikron titanyum ile 250 mikron alüminyum kombine edildiğinde (250µm Ti -250µm Al) işlem süresinin kısa olması gerekmektedir. Zira uzun işlem sürelerinde alüminyum ile titanyumun tamamı reaksiyona girmekte ve metalik titanyum tabakası incelmeye ve hatta tamamen yok olmaya doğru gitmektedir. Oysa bu çalışmanın özü metalik ve intermetalik tabakaların kombinasyonudur. Buradan çıkarılacak çok önemli başka bir sonuç ta şudur: Titanyum ile kombine edilecek alüminyum folyonun titanyum folyodan daha ince olması iki tabakalı yapının üretimi için gereklidir.

5.2. Enstrümantal Sonuçlar

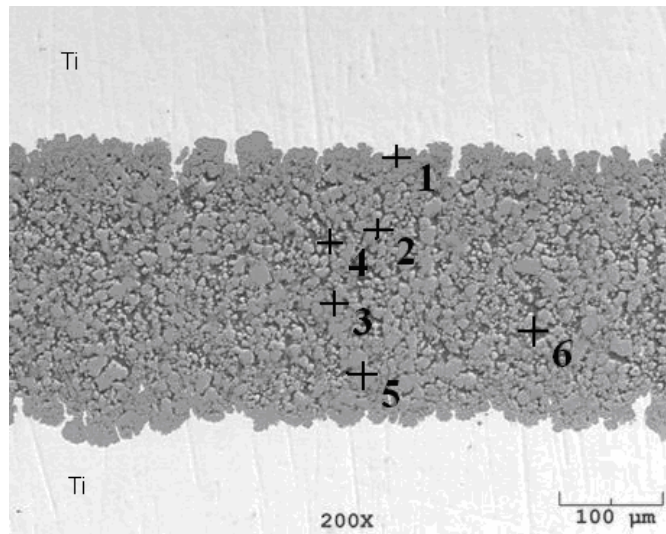
Fırından çıkarılan numuneler dik kesitlerini gösterecek şekilde kalıplanmış ve metalografik numune hazırlama teknikleri kullanılarak yüzeyleri zımparalanmış ve 1 mikron elmas pasta ile parlatılmıştır. Bu numuneler üzerinde aşağıdaki incelemeler yapılmıştır:

- SEM ve SEM-EDS incelemeleri
- XRD analizi
- Sertlik ölçümleri
- Tabaka kalınlık ölçümleri

5.2.1. SEM ve SEM-EDS incelemeleri

Sinterlenmiş ürünler dik kesitlerini gösterecek şekilde kalıplandıktan sonra normal metalografik yollarla zımparalanmış ve parlatılmıştır. İntermetalik faz ile metalik fazın kolay ayırt edilebilir olması ve denemelerde bu fazın çözelti ile çok hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüzey kalitesini bozması nedeniyle, numuneler dağlanmamıştır. JEOL 6060 LV taramalı elektron mikroskobu kullanılarak sinterlenmiş numunelerin mikroyapıları sekonder elektron ve geri saçılan elektron modları ile incelenmiş ve EDS yardımıyla fazların kimyasal yapıları belirlenmiştir.

Şekil 5.1’de başlangıçta 250µm Ti–250µm Al kalınlığındaki folyolar kullanılarak oluşturulan ve 650°C’de 2,5saat pişirilen numunenin SEM mikroyapısı görülmektedir. Bu numuneden alınan SEM-EDS incelemesinden Tablo 5.1’de verilen ağırlıkça element oranları incelendiğinde 1, 2, 3, 5 noktalarında Al₃Ti bileşiğine yakın değerler bulunduğu anlaşılmıştır. 4. ve 6. noktalarda ise alüminyumun yüksek konsantrasyonda olduğu ve oksijenin bulunduğu görülmüştür.

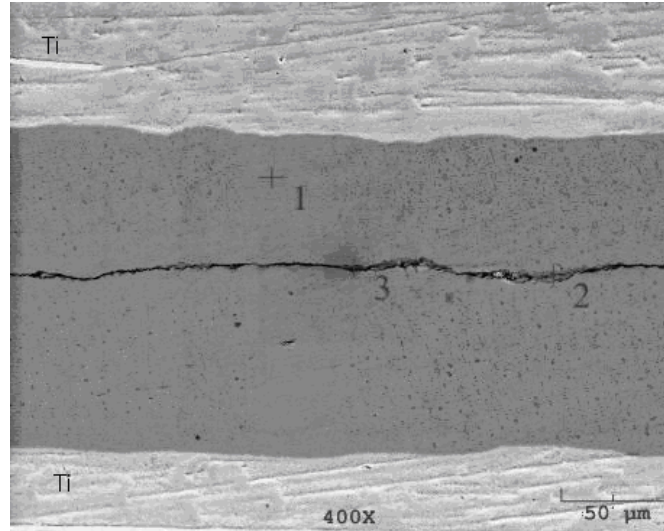


Şekil 5.1. 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapısı

Tablo 5.1. Şekil 5.1'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	31.166	68.834	-
2	25.573	74.427	-
3	32.306	67.694	-
4	1.883	96.698	1.419
5	32.446	67.554	-
6	-	96.031	3.969

Şekil 5.2'de başlangıçta 127µm Ti–100µm Al kalınlığındaki folyolar kullanılarak oluşturulan ve 650°C de 5saat pişirilen numunenin SEM mikroyapısı görülmektedir. Bu numuneden alınan SEM-EDS incelemesinden Tablo 5.2'de verilen ağırlıkça element oranları incelendiğinde 1. noktada Al₃Ti bileşimine yakın bir bileşim vardır fakat 2. ve 3. noktada yüksek alüminyum konsantrasyonu ve oksijen bulunmaktadır.

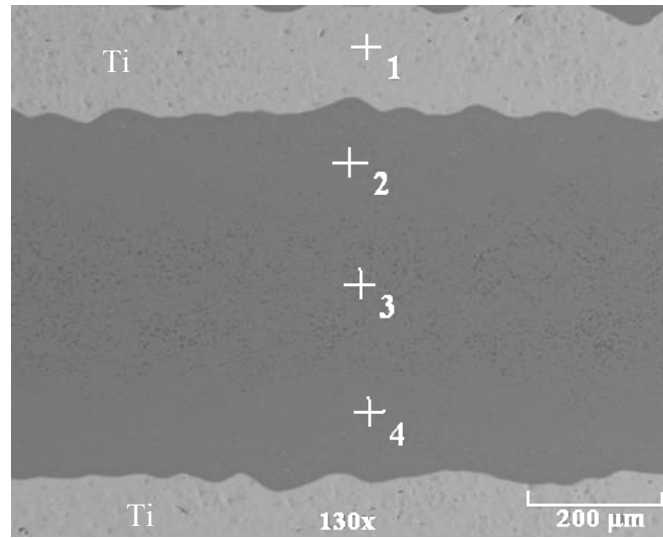


Şekil 5.2. 650°C de 5 saat sinterlenmiş (127µm Ti–100µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

Tablo 5.2. Şekil 5.2'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	32.871	67.129	-
2	26.037	43.875	30.088
3	6.459	54.047	39.494

Şekil 5.3'de başlangıçta 250µm Ti–250µm Al kalınlığındaki folyolar kullanılarak oluşturulan ve 700°C de 10saat pişirilen numunenin SEM mikroyapısı görülmektedir. Bu numuneden alınan SEM-EDS incelemesinden Tablo 5.3'de verilen ağırlıkça element oranları incelendiğinde 1. noktada Ti ve 2, 3, 4 noktalarda ise Al₃Ti bileşimine yakın bir bileşim vardır fakat 3. noktada oksijen bulunmaktadır. Diğer SEM ve SEM-EDS İnceleme sonuçları EK A'da verilmiştir.



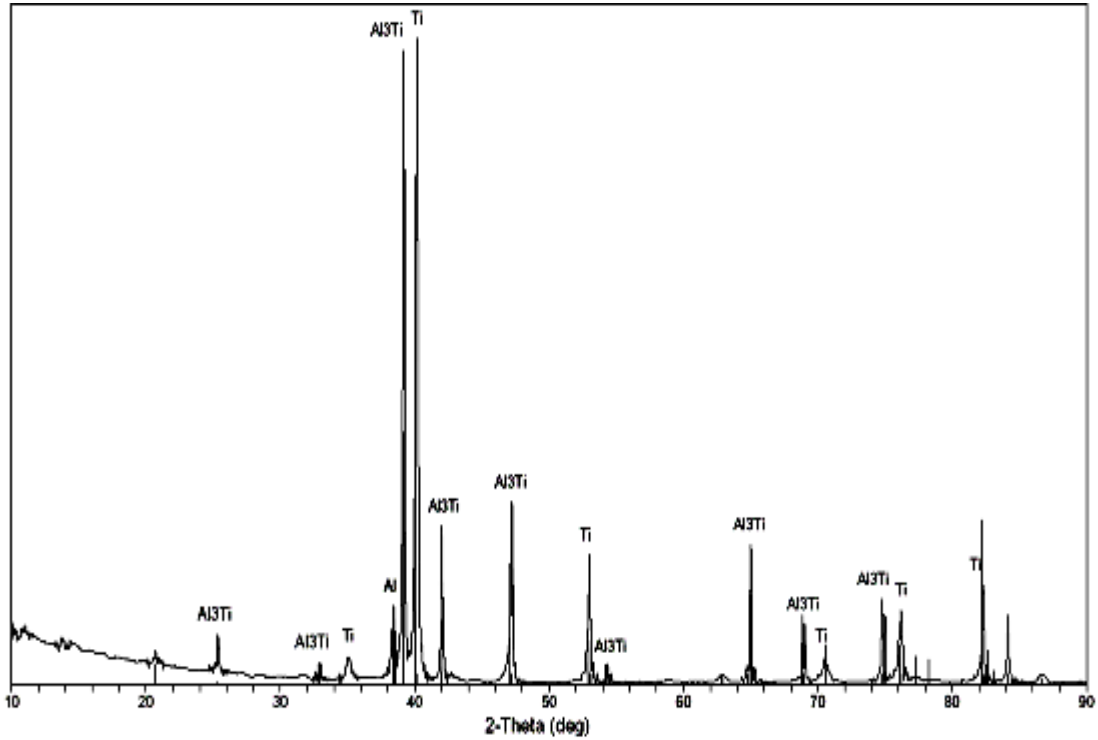
Şekil 5.3. 700°C de 10 saat (250µm Ti–250µm Al) istifli numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

Tablo 5.3. Şekil 5.3'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

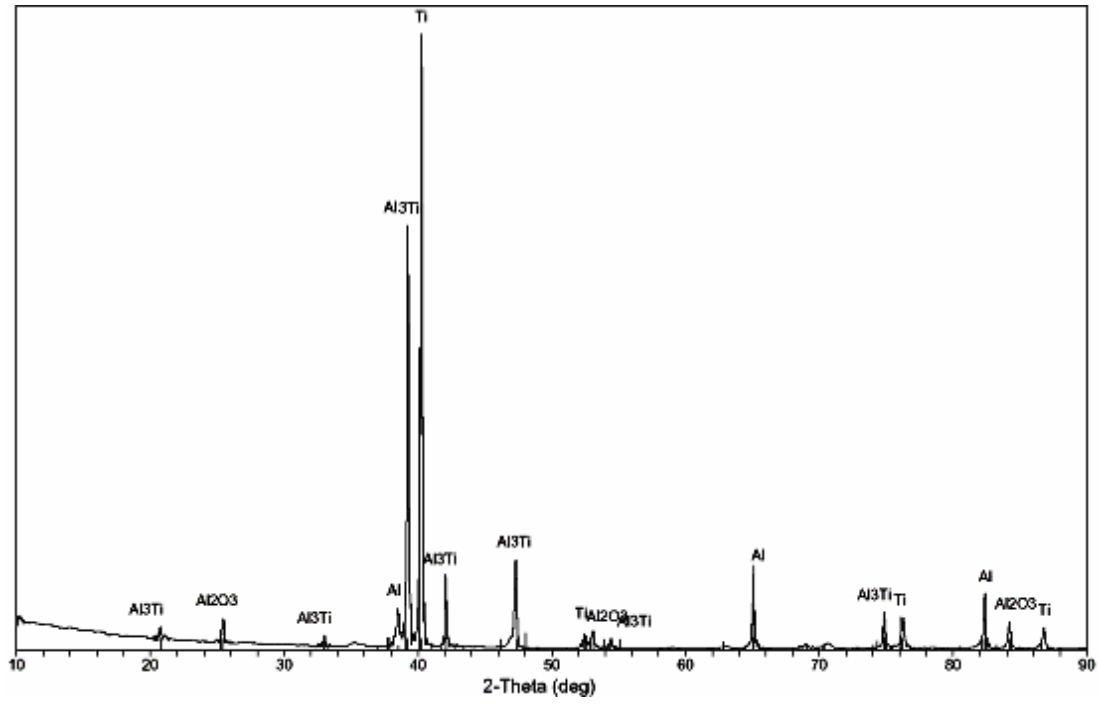
Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	100	-	-
2	32.590	67.410	-
3	24.731	66.492	8.777
4	32.618	67.382	-

5.2.2. XRD incelemeleri

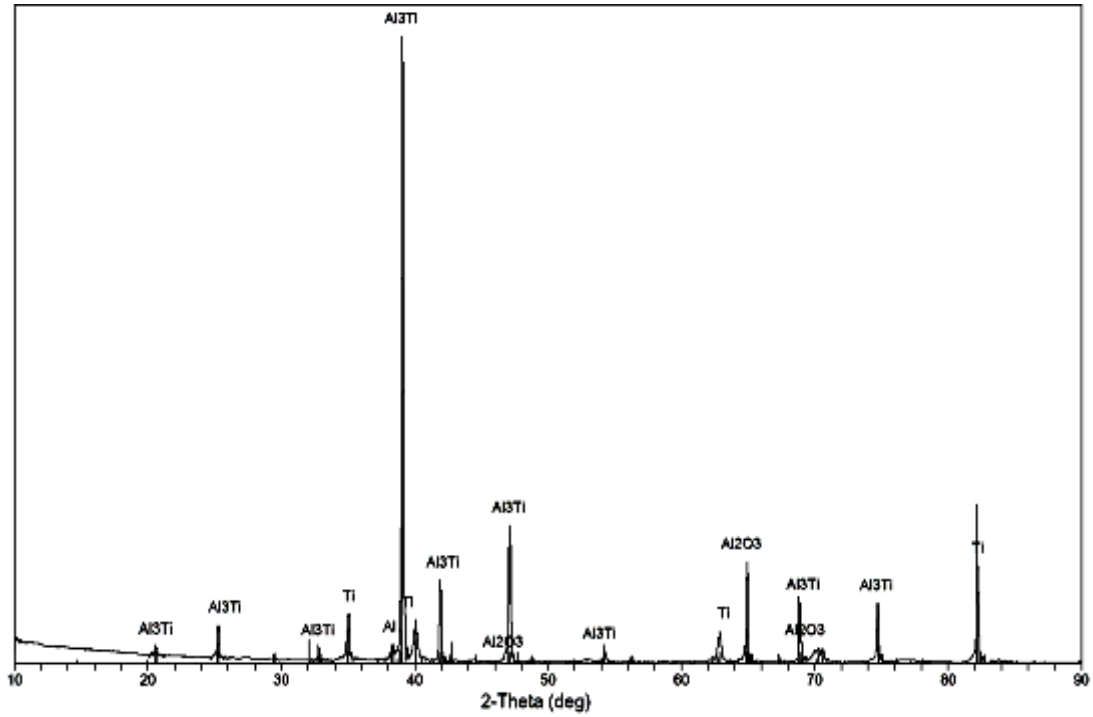
Rigaku D/MAX/2200 X ışınları cihazı ile Cu K α radyasyonu kullanılarak numunelerin XRD (faz) analizleri yapılmıştır. Bu incelemeler Ti ve intermetalik tabakanın aynı anda görülebildiği dik kesitte gerçekleştirilmiştir. 700°C’de 2,5–5 ve 10 saat süre ile pişirilmiş numunelerin XRD paternleri sırasıyla Şekil 5.4–5.6’de gösterilmiştir. XRD incelemelerinde 250 μ m Ti–250 μ m Al başlangıç istifli numuneler incelenmiştir. Bu paternlerden; 700°C 10 saatlik numunede metalik Ti, Al ve Al₃Ti fazlarına ilave olarak Al₂O₃ fazı da detekte edilmiştir. Al₂O₃ fazının piki çok belirgindir ve deneyler sırasında bariz bir oksidasyonun olduğunu göstermektedir. 700°C’de 7,5 saatlik numunede XRD analizlerinde ise TiO₂ bileşiğine rastlanmıştır. Diğer XRD sonuçları EK C’de verilmiştir. Hâkim fazlar Al₃Ti ve Ti olmakla beraber, Al₂O₃ ve TiO₂ bileşikleri de mevcuttur. EDS analizlerinde de bazı numunelerde oksijen fark edilmiştir.



Şekil 5.4. 700°C’de 2,5 saat sinterlenmiş (250 μ m Ti- 250 μ m Al) istifli numunenin XRD paterni



Şekil 5.5. 700°C'de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti- 250µm Al) numunenin XRD paterni



Şekil 5.6. 700°C'de 10 saat sinterlenmiş (250µm Ti- 250µm Al) numunenin XRD paterni

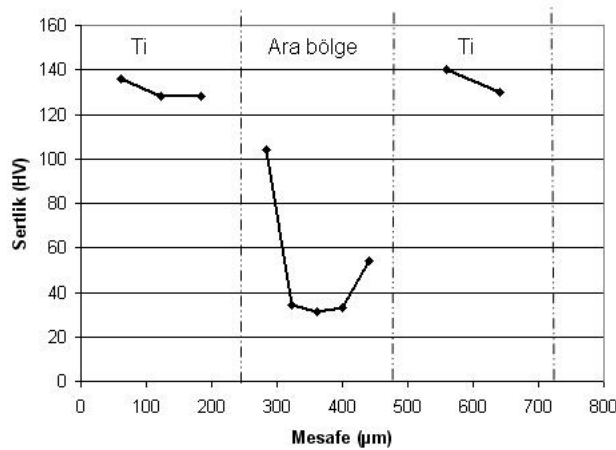
5.2.3. Sertlik ölçümleri

Genel olarak; metalik alüminyumun 30 HV, titanyumun 120–150 HV ve intermetalik fazın ise 300–650 HV mertebesinde sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Metalik fazların sertlikleri işlem öncesi sertliklerine yakındır ve işlem parametreleri ile sertlik değişimleri çok önemli değildir. Ancak intermetalik tabakaların sertlikleri;

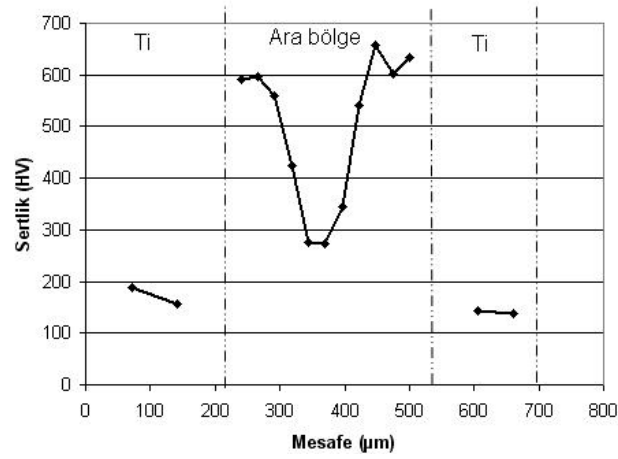
- Tabaka kalınlığı boyunca ve
- İşlem sıcaklığı ve süresi ile dikkati çekecek şekilde değişim göstermektedir.

Şekil 5.7’de 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş, 250µm Ti–250µm Al başlangıç folyolarından oluşmuş numunenin 50gf, 15sn şartlarında ölçülen malzemenin kesitinde fazlardaki sertlik değerleri bir grafik halinde verilmiştir. Bu grafikte Ara bölgenin sertlik değerlerine bakıldığında merkezde çok yüksek oranda alüminyumun olduğu ve dönüşümün Ti ve Al arasında daha başlangıç aşamasında olduğu anlaşılmaktadır.

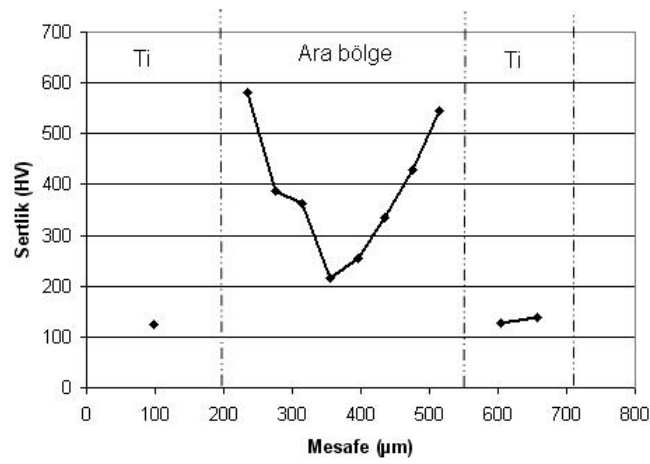
Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10’daki grafiklerde ara bölgenin sertlik değerlerinin işlem süresine bağlı olarak arttığı fakat tam merkezdeki bölgede ise Şekil 5.10’da 350 HV’e kadar arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında merkez bölgenin sertliğinin 10 saatten uzun bir sinterleme süresinde daha da yükseltilebileceği görülmüştür. Diğer sertlik dağılım sonuçları EK B’de verilmiştir.



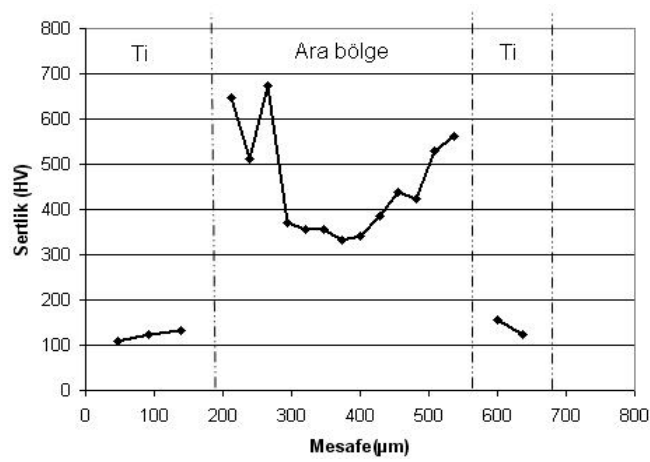
Şekil 5.7. 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) istifli numunenin 50gf, 15sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı



Şekil 5.8. 650°C de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı



Şekil 5.9. 700 °C de 2,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı



Şekil 5.10. 700°C de 10 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) istifli numunenin 100gf, 15 sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı

5.2.4. Tabaka kalınlık ölçümleri

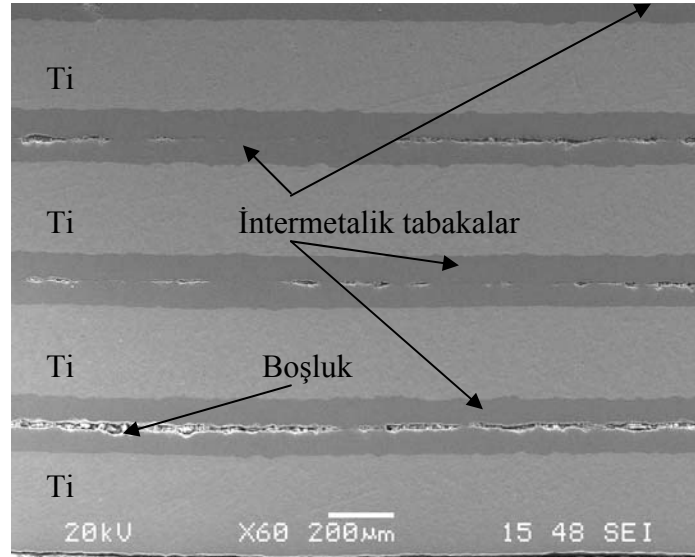
Tablo 5.4’de başlangıç tabaka kalınlıkları ve sinterleme sonrasında ölçülen tabaka kalınlıkları sinterleme sıcaklık ve süresine bağlı olarak gösterilmiştir. Düşük sıcaklık ve sürelerde intermetalik tabaka kalınlıklarının düşük olduğu, buna karşılık metalik titanyum tabakalarının orijinal folyo kalınlığından sadece biraz daha ince olduğu ve henüz intermetalik oluşumu tamamlanmadığı için metalik Al tabakasının da ölçüldüğü görülmektedir. Uzun işlem sürelerinde ve yüksek sıcaklıklarda, daha kalın Al_3Ti tabaka ile daha ince metalik titanyum kalınlıkları ölçülmüştür. Tabaka kalınlık ölçüm sonuçları, mikrosertlik cihazı ile her bir tabaka için 5 farklı bölgeden kalınlık ölçümü alınarak ortalamalarının bulunmasıyla belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Folyoların başlangıç ve sinterleme sonrası kalınlıkları

Deney Sıcaklığı	İşlem süresi (saat)	Başlangıç folyo kalınlıkları (μm)		Son tabaka kalınlıkları (μm)	
		Ti	Al	Ti	Al_3Ti
650°C	2,5	250	250	241	235
	5	250	250	160	320
	7,5	250	250	156	320
700°C	2,5	250	250	155	358
	5	250	250	110	405
	7,5	250	250	140	375
	10	250	250	113	378

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Şekil 6.1’de 650°C de 7,5 saat pişirilmiş 250µm Ti–100µm Al başlangıç folyo kalınlıklı numunenin SEM mikroyapısı görülmektedir. Bu numunede 5 tabaka Ti ve 4 tabaka Al kullanılmıştır. Bu numunede mukavemeti düşük olan Al tabakasının ince oluşu ve tabaka sayısının fazlalığından dolayı oluşum esnasında merkezde kalan alüminyumca zengin bölgenin oluşan gerilmelere dayanamayarak çatladığı düşünülmüştür. Bu nedenle deneylerin çoğunda gerilmeyi tolere edebilecek kalınlıkta (250µm) Al folyolar kullanılmıştır. Kullanılan 250µm kalınlıktaki Al folyolarla 250µm’luk Ti kullanıldığı zaman bu merkezde görülen boşluklara rastlanmamıştır. Bu gözlemler de bu ayrılmalara gerilmelerin sebep olduğu görüşünü desteklemektedir. Bu gerilmeleri azaltmak için işlem esnasında değişken yükler uygulama fikride göz önünde bulundurulmalıdır.



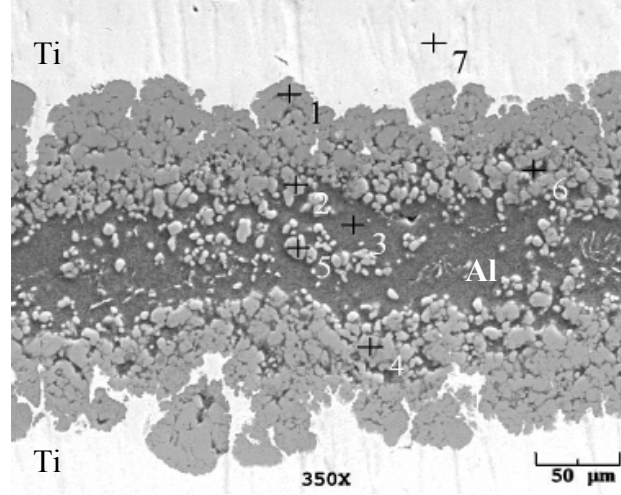
Şekil 6.1. 650°Cde 7,5 saat sinterlenmiş 250µm Ti–100µm Al istifli numunenin SEM mikroyapısı

İntermetalik tabakanın metalik titanyuma komşu bölgeleri en yüksek sertliğe sahiptir. Tabakanın merkezine doğru sertlik düşmektedir. Bu durum esasen beklenen bir

durumdur; zira titanyuma komşu bölgelerde Al_3Ti oluşumu en erken tamamlanır (yani alüminyum harcanması ve stokiometrik Al_3Ti bileşimine erişme/yaklaşma öncelikle bu bölgelerde olur). Dolayısı ile bu bölgelerin sertliği Al_3Ti sertliğine en yakın veya ona eş değer olur. Tabakanın iç kısımlarının sertliği ise, kısa süreler ve düşük sıcaklıklarda düşükken, süre arttıkça ve sıcaklık yükseldikçe, alüminyumun harcanarak Al_3Ti oluşumun ilerlemesine bağlı olarak yükselmektedir.

SEM incelemelerinden hatırlanacağı gibi, bazı malzemeler de intermetalik oluşumu henüz başlamış (sadece ince bir dönüşüm tabakası- $650^{\circ}C$ 2,5 saat), bazı numunelerde ise intermetalik tabakanın ortasında bir metalik alüminyum zonu bulunmaktadır. Bu numunelerde tabakanın titanyuma komşu bölgeleri ile iç kısımları arasındaki sertlik farklılığı çok açıktır. Ancak, $700^{\circ}C$ 'de 10 saat süre ile işlem görmüş numunelerde de intermetalik tabakanın kenarları ve ortası arasında bir sertlik farklılığı olduğu görülmektedir. SEM resimlerinden bu numunede intermetalik zonun orta kısmında siyah noktacıkların varlığı (bunlar metalik alüminyuma işaret etmektedir) görülmekle beraber, bunlar EDS analizlerinde fark edilememiştir. EDS analizlerine göre, tüm intermetalik tabakanın Al_3Ti bileşimine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, sertlik ölçümleri SEM bulgularını destekler şekilde açık olarak sertlik farkını (dolayısı ile, belki bileşim farkını) ortaya koymaktadır. Buradan, tam dönüşüm için $700^{\circ}C$ 'de 10 saatten de uzun işlem sürelerine ihtiyaç olduğu sonucu çıkarılabilir.

Şekil 6.2'de $650^{\circ}C$ 'de 2,5 saat sinterlenmiş numunede difüzyon ile oluşan intermetalik (gri bölge), Ti (beyaz renkli bölge) ve Al (en koyu renkli bölge) bölgeleri gözükmemektedir. Bu SEM mikroyapı görüntüsü $650^{\circ}C$ 'de 2,5 saat sinterlenmiş bir numunede difüzyonun tam olarak gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu mikroyapı difüzyonun her iki tarafa doğru ilerlediğini göstermiştir ve orta bölgede alüminyumca zengin geniş bir alan dikkat çekmektedir. 2,5 saatlik sinterleme süresinin, $250\mu m$ Ti ve $250\mu m$ Al başlangıç folyoları için tamamen Al'un tükenerek intermetalik faza dönüşmesi için yetersiz olduğu kesindir.

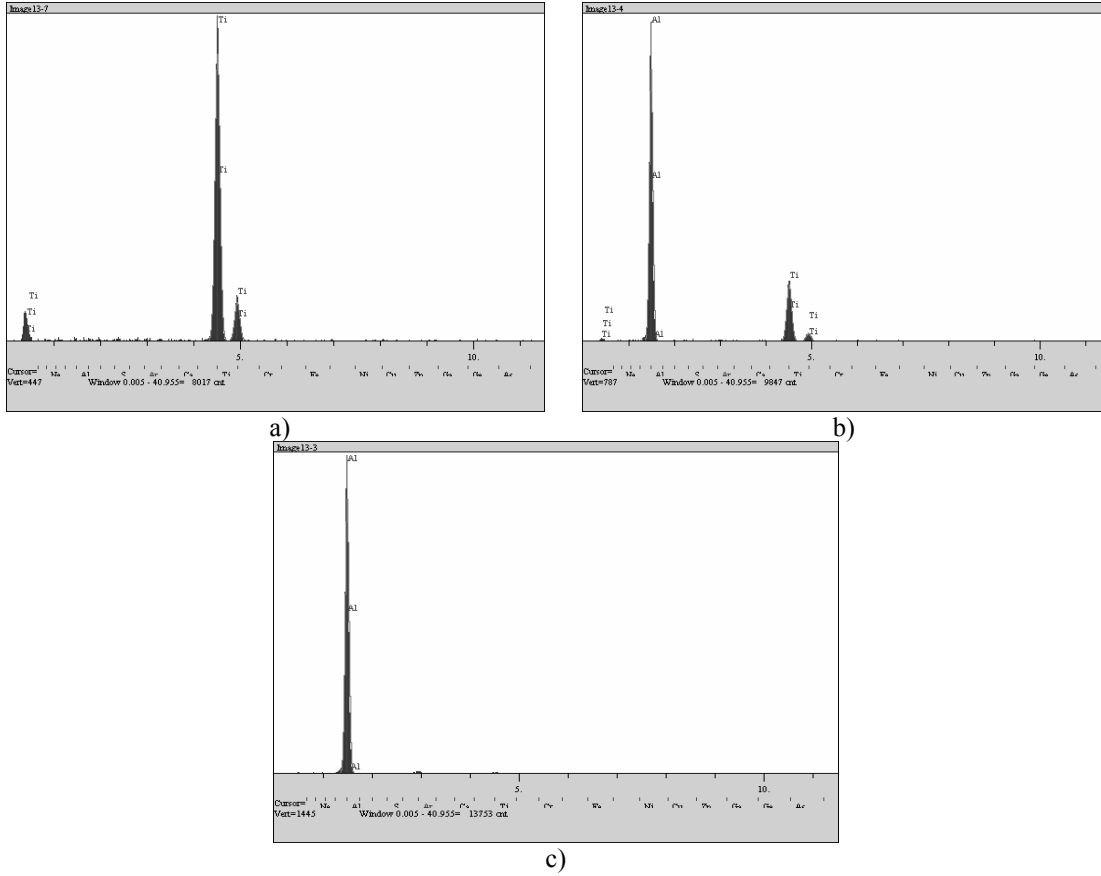


Şekil 6.2. 650°C'de 2,5 saat sinterlenmiş numunenin SEM mikroyapısı

Tablo 6.1. Şekil 6.2'deki Görüntünün EDS sonuçları

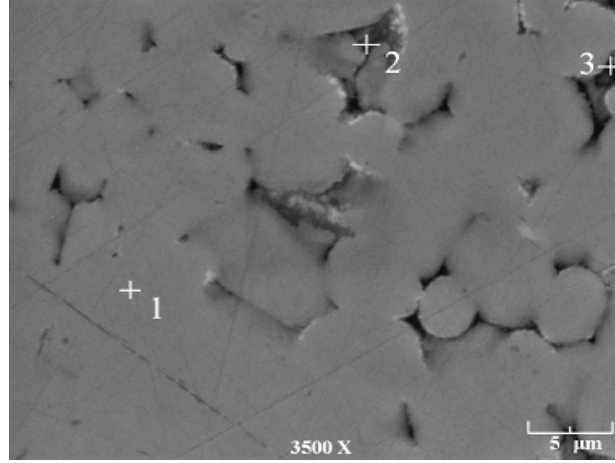
Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	31.180	68.820	-
2	31.824	68.176	-
3	-	100	-
4	32.571	67.429	-
5	31.732	68.268	-
6	-	100	-
7	100	-	-

Tablo 6.1'de verilen ağırlıkça element oranlarından yapıda Ti, Al ve hesaplamalar neticesinde Al_3Ti fazlarının görüldüğü anlaşılmıştır. Bu EDS sonuçları numunenin noktasal kısımlarından alınarak değerlendirilmesi çok net sonuçlar vermese de istenen sonuçlara yaklaşıldığını işaret etmiştir. Şekil 6.3'de, Şekil 6.2'deki noktasal analizlerden elde edilen karakteristik paternler görülmektedir.



Şekil 6.3. Şekil 6.2'deki mikroyapıya ait karakteristik EDS paternleri; a) %100 Ti, b) Ti ve Al (hesaplanan değerlere göre Al_3Ti), c) %100 Al

Şekil 6.4'de 700°C de 10 saat pişirilen numunenin intermetalik tabakasının orta bölgesine ait SEM görüntüsü görülmektedir. Bu mikroyapıda difüzyonla oluşan küreler bariz şekilde görülmektedir. Küreciklerin arasında kalan boşluk gibi alanların çok az oranda Al içerdiği SEM-EDS analizlerinde görülmüştür fakat tam olarak bu boşlukların oluşum sebebi anlaşılamamıştır. Bu boşluk gibi olan görüntüler her halükarda difüzyonun tam olarak tamamlanmadığına işaret etmektedir ve 10 saatlik sürenin yeterli olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda bu boşlukların sebebi uygulanan gerilmenin düşük oluşundan olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

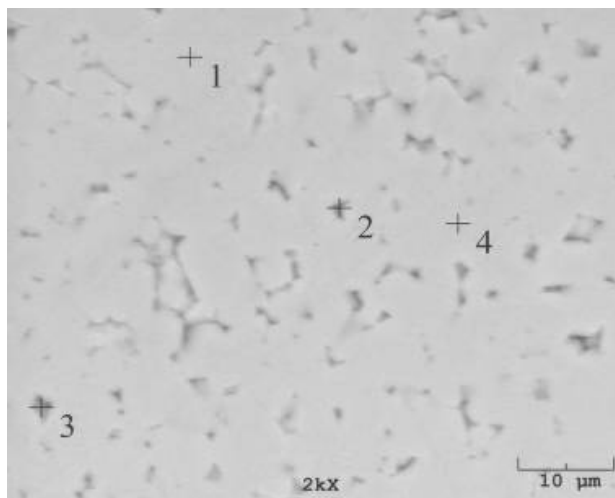


Şekil 6.4. 700°C’de 10 saat sinterlenen numunenin Al_3Ti tabakasının ortasındaki mikroyapı

Tablo 6.2. Şekil 6.4’deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	32.213	67.787	-
2	28.298	71.702	-
3	27.295	72.705	-

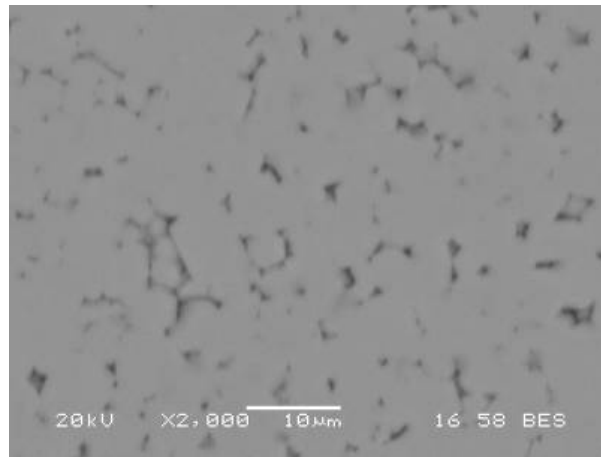
Şekil 6.5’de bu orta bölgenin daha düşük büyütmedeki SEM görüntüsü görülmekte ve Şekil 6.6’da ise Şekil 6.5’deki görüntünün geri saçılan elektron modundaki görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.5. 700°C’de 10 saat sinterlenen numunenin intermetalik tabakasının ortasındaki bölgenin SEM (ikincil elektron modunda) görüntüsü

Tablo 6.3. Şekil 6.5'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	31.621	68.379	-
2	28.828	62.083	9.090
3	31.730	68.270	-
4	32.528	67.472	-

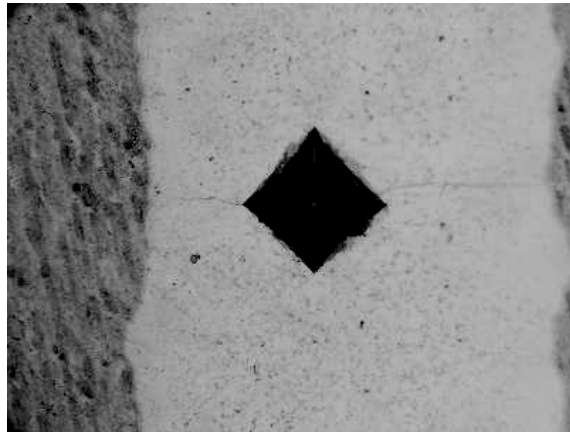


Şekil 6.6. 700°C'de 10 saat sinterlenen numunenin intermetalik tabakasının ortasındaki bölgenin SEM (geri saçılan elektron görüntüsü modunda) görüntüsü

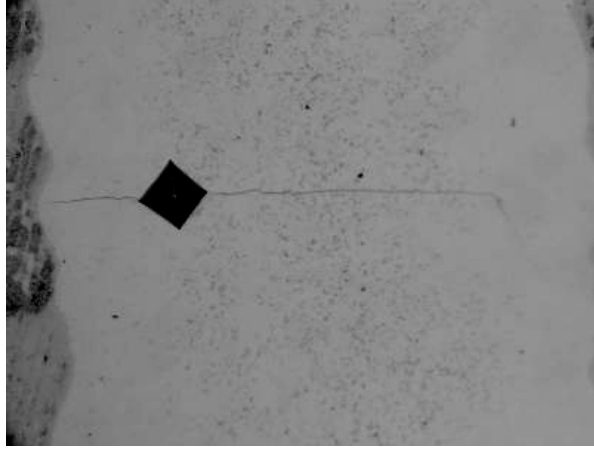
XRD analizlerinde Al_2O_3 fazının bulunması önemli olabilir. Bilindiği gibi, bu çalışmada kullanılan hem alüminyum hem de titanyumun kuvvetli oksitlenme eğilimleri vardır. Bu açıdan, açık atmosfer koşullarında gerçekleştirilen deneylerde alüminyum oksitlenmesi açıkça sürpriz olmaz. Ancak, alüminyumun oksidasyonu titanyum alüminid oluşumunu nasıl etkilediğinin anlaşılması önemli bir noktadır. Mantıksal olarak, Ti/Al ara yüzeyinde difüzyon başlamadan önce oksidasyonun başlamış olması belki reaksiyonun başlaması ve gelişimini olumsuz etkileyecektir. Veya difüzyonun tüm ara yüzey boyunca değil çok sayıdaki temas noktasından başlaması ve temas noktaları arasındaki kısımlarda difüzyondan önce oksit oluşmaya başlaması da mümkündür. Belki, Al_3Ti fazının adacıklar şeklindeki difüzyon bölgeleri üzerinden büyümesi bu tür bir gelişmenin bir sonucudur. Daha açık olarak şöyle söylenebilir: Al ve Ti metalik folyoları basınç altında ısıtıldıklarında, birçok temas noktasında reaksiyon başlarken aralarındaki çok sayıda noktada oksidasyon nedeniyle reaksiyon diğer noktalarla eş zamanlı olarak başlayamamaktadır. Bu

şekilde, alüminyum ve titanyumun reaksiyona girerek alüminid oluşturmaya başladığı binlerce adacık arasında oksidasyon nedeniyle titanyum ile reaksiyona girememiş çok sayıda alüminyum bölgesi bulunacaktır. Bu durum, esas olarak tabakanın büyümesini de bir ölçüde izah edebilir.

Şekil 6.7'de 700°C'de 7,5 saat süre ile sinterlenmiş 250/250 istifindeki Al₃Ti intermetalik tabaka üzerinde 50sn süre 2000gf yük kullanılarak oluşturulmuş bir Vickers sertlik izi (250x büyütmede) görülmektedir. İz kasten titanyum tabakalardan birine daha yakın alınmıştır. Sertlik izinin titanyum tabakalara doğru yönelmiş iki ucunda çatlak oluşmuş, fakat tabakalara paralel uçlarda ise çatlak oluşmamıştır. Titanyum tabakalara dik doğrultudaki uçlardaki çatlaklar önemli bir noktaya işaret etmektedir. İzin sol tarafında titanyum tabakaya sadece kısa bir mesafe vardır ve oluşan çatlak, diyagonalin ucundan hemen sonra Ti/Al₃Ti ara yüzeyine ulaşmıştır (henüz çatlağın ilerlemesi için yeterince yüksek enerjisi varken); ancak Ti tabakaya ulaşınca durmuştur. Resmin sağ yanında ise, iz ile titanyum tabaka arasındaki mesafe oldukça uzundur, fakat diyagonal ucunda oluşan çatlak düz bir doğrultuda ilerleyerek yine titanyum tabakaya ulaşmış ve o noktada enerjisini kaybederek durmuştur (çatlağın enerjisi titanyumun atomlar arası bağlarını koparmaya yeterli düzeyde değildir). Bu durum, sertliği titanyumdan çok daha yüksek olduğu halde niçin monolitik Al₃Ti yerine Ti tabakaları ile sıralı istif yapılmış Al₃Ti tabakalarının kullanıldığını gayet iyi anlatmaktadır.



Şekil 6.7. 700°C'de 7,5 saat süre ile işlem görmüş 250µm Ti /250µm Al başlangıç istifli numunedeki sertlik izi ve çatlakların davranışı



Şekil 6.8. 700°C’de 10 saat süre ile işlem görmüş 250µm Ti /250µm Al başlangıç istifli numunede sertlik izi ve çatlakların davranışı

Şekil 6.8’deki fotoğraf 50sn süreyle 1000gf yük uygulanarak 250x büyütmede çekilmiştir. Ve bu fotoğrafta çatlağın sağ tarafta daha fazla ilerlediği gözlenmiştir. Sol tarafta ise sünek fazın çatlağın ilerlemesini engellediği görülmüştür.

Yukarıda anlatılan durum malzemenin kırılma tokluğu ile ilgilidir. Bu tür (ince ve gevrek) malzemelerin kırılma tokluklarını ölçme yollarından biri, belki en pratik ve önemli olanı, indentasyon yöntemi ile sertlik ölçümüdür. Bu yöntemde, uygun bir yük altında malzeme bir sertlik izi oluşturulur, bu noktada kullanılan yükün normal sertlik ölçmede kullanılan yükten bir miktar daha fazla olması gerekir, çünkü oluşturulan sertlik izinin köşelerinde rahat okunur ve ölçülebilir çatlaklar meydana gelmelidir. Kırılma tokluğu hesabı için, sertliği alınan malzemenin elastik modülü ile oluşturulan sertlik izinden belirlenen sertlik değeri ile diyagonaller doğrultusunda meydana gelen çatlakların sertlik izinin merkezinden itibaren uzunluklarına (boylarına) ihtiyaç vardır. Dolayısı ile, bir önceki paragrafta izah edilen görüntü, kırılma tokluğu ölçümü (kantitatif değerlendirme) için yeterli değildir, ancak kalitatif bir değerlendirme yapmak mümkün olabilmektedir.

Çalışmalar neticesinde, sıcaklık, süre, yük ve başlangıç folyo kalınlıkları ve tabaka adetlerinin malzeme özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olduğu anlaşılmıştır. Farklı kalınlıklı Ti ve Al folyolarının ardışık sıralı dizilmesi ile elde edilen istiflerin farklı sıcaklık ve sürelerde açık atmosferli fırında sinterlenmesi ile üretilen numunelerin incelenmesi ile ulaşılan sonuçlar şunlardır.

1. Bu çalışmada tabakaların boşluksuz, oksitsiz ve daha yoğun şekilde üretilmesi için uygulanan yükün çok önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir ve sinterleme esnasında uygulanması gereken optimum gerilme 1,5 MPa'dır.
2. 650°C'lik sinterleme sıcaklıkları Al₃Ti intermetalığı elde etmek için yeterli değildir. Bu sıcaklıklarda istenen intermetalik katmanı elde etmek için uzun sinterleme sürelerine ihtiyaç vardır. 700°C'de ise intermetalik tabaka elde edilebilmektedir. Ancak, dönüşümün tamamlanması için nispeten daha uzun sinterleme süreleri gereklidir (10 saatten fazla).
3. SEM-EDS analizleri 700°C'deki sinterleme işlemlerinin yüksek oranda Al₃Ti tabakasını verdiğini göstermiştir.
4. 500–700°C sıcaklık aralığında yapılan sinterleme işlemlerinde Ti ve Al'nin oluşturabileceği fazların içinden sadece Al₃Ti'nin oluşabildiği kanıtlanmıştır.
5. MİL kompozitin üretilmesi için, alüminyum folyonun tam olarak tüketilmesi buna karşılık Ti folyonun kısmen tüketilmesi gerekir. Bu bakımdan, folyo istiflenirken titanyumdan daha kalın alüminyum folyo kullanılmamalıdır. Tercihan Al folyo Ti folyodan ince olmalıdır. Eğer eş kalınlıklı folyolar kullanılırsa, sinterleme süresi mümkün olduğunca kısa olmalıdır.
6. MİL kompozitteki Ti fazının sertliği 130 HV üzerinde iken Al₃Ti intermetalik fazının sertliği yaklaşık 650 HV mertebesindedir.
7. Üretilen malzemelerin tabakalı yapıda sünek ve gevrek malzemelerden oluşması nedeniyle ile oluşabilecek çatlakların enerjisini yutabilme kabiliyetine sahiptirler.

Metalik-intermetalik laminat (üst üste konulan metal tabaka) kompozitler çoklu kullanım konseptini meydana getirir. Bunlar ısı yönetimi, balistik koruma, patlama şiddeti azaltma, ısı değişimi (transferi-iletilmesi) titreşim-sarsıntı azaltma ve diğer birçok cihazlarda kullanma potansiyeline sahiptir. Maddeler, tabakalar (katmanlar) halinde fonksiyonel özellikler intermetaliklere öncelikli olacak şekilde ve karşılıklı bağlantılar belirli bir tabakada ve elektrik iletim kabloları da tabakalar arasında olacak şekilde birleştirilirler. Bu (karşılıklı) bağlantıların performansını azaltmadan bu tabakalarda kullanılması için stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir.

Buna ek olarak, hem özellik hem de fonksiyonellik (işlevsellik) açısından doğruluğu ve etkiyi tahmin edebilecek büyük ölçekli bilgisayarlara entegre edilebilecek yapıcı ve hasar gelişim modelleri geliştirilmelidir. Tasarımcılar için, bu ayrılmaz ve entegre özellikleri kullanmak amacıyla kurallar ve araçların gelişimi ve dağıtımı yaygınlaşması, maddeler içindeki yoğunluğu bu maddelerin çok amaçlı kullanılmasına katkıda bulunacaktır.

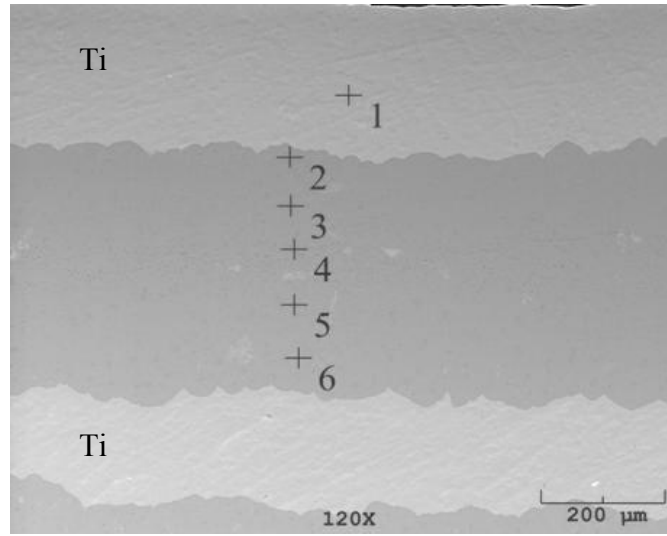
KAYNAKLAR

- [1] ONARAN, K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, 2000
- [2] ARAN, A., Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, sayı:1420, 1990
- [3] AKIN, E., Bakır Hibrid Mak Fren Balatası Üretimi Ve Sürtünme Özellikleri, T.C. Sakarya üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2006
- [4] <http://www.emba.uvm.edu/~iatridis/me257/Introduction.htm>
- [5] TOPÇU, M., TARAKÇILAR, A. R., TAŞGETİREN, S., Kompozit Malzemelerle Konstrüksiyon, Mühendis ve makine, cilt 36 sayı 420
- [6] BAYKAL, D., Pim Bağlantılı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi Dokuz Eylül Üniversitesi, Bitirme Tezi, İZMİR 2004
- [7] KAZANÇ, V., Kompozit Malzemeler Ve Mekanik Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bitirme Tezi, ISPARTA 2002
- [8] ASKELAND, D.R., The Science and Engineering of Materials, 3.baskıdan çeviri, Çeviri: Dr. Mehmet ERDOĞAN,Cilt:2, Nobel yayın dağıtım, ANKARA 1998
- [9] CEYHUN, V., TURAN, M., Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, Mühendis Ve Makine, Sayı 516, Ocak 2003
- [10] ÇAM, Y., ÖZDEMİR, H.O., Yanal Delaminasyon Bölgesi İçeren Termoplastik Tabakalı Kompozitlerde Burkulma Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Bitirme Tezi, Haziran, İZMİR 2005
- [11] VECCHIO, K. S., Metallic-intermetallic (Ti-Al₃Ti) laminate (MİL) composites, www.ccatsandiego.org
- [12] VECCHIO, K. S., Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites, University of California, Postprints, Paper 337, 2005

- [13] RAGHAVENDRA, ADHARAPURAPU, R., VECCHIO, K. S., ROHATGI, A., JIANG, F., Fracture of Ti-Al₃Ti Metal-Intermetallic Laminate Composites: Effects of Lamination on Resistance-Curve Behavior, Metallurgical And Materials Transactions A, Volume 36a,— 3217, November 2005
- [14] ÖZDEMİR, Ö., Ni-Al İntermetalik Malzemeler, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_5763.pdf, Esentepe Kampüsü-Adapazarı
- [15] PENG, L. M. , WANG, J.H., LI, H., ZHAO, J.H., HE, L.H., Synthesis and microstructural characterization of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MİL) composites, Scripta Materialia, Acta Materialia Inc. Published by Elsevier Ltd.52, 243–248, 2004
- [16] <http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/alloys/alti.html>
- [17] ROHATGI, A., HARACH, D. J., VECCHIO, K. S., HARVEY, K. P., Resistance curve and fracture behavior of Ti-Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MİL) composites, Acta Materialia, 51 2933-2957., 2003
- [18] HARACH, D.J., VECCHIO, K. S., Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate composites synthesized by reactive foil sintering in air, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol: 32A, 1493-1505, June 2001
- [19] PENG, L. M., LI, H., WANG, J. H. “ Processing and mechanical behavior of laminated titanium-titanium tri-aluminide (Ti-Al₃Ti) composites” Material Science and Engineering A 406, 309-318, 2005
- [20] LI, T., GRIGNON, F., BENSON, D. J., VECCHIO, K. S., OLEVSKY, E.A., JIANG, F., ROHATGI, A., SCHWARZ, R.B., MEYERS, M. A., Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MİL) composites, Mat. Sci. & Eng. A, 374, 10-26, 2004

EKLER

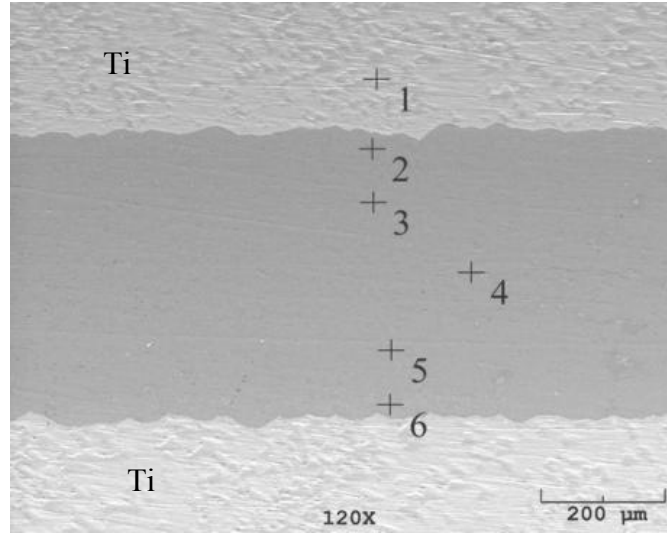
EK A. SEM ve SEM EDS Sonuçları



Şekil A.1. 650°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

Tablo A.1. Şekil A.1’deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

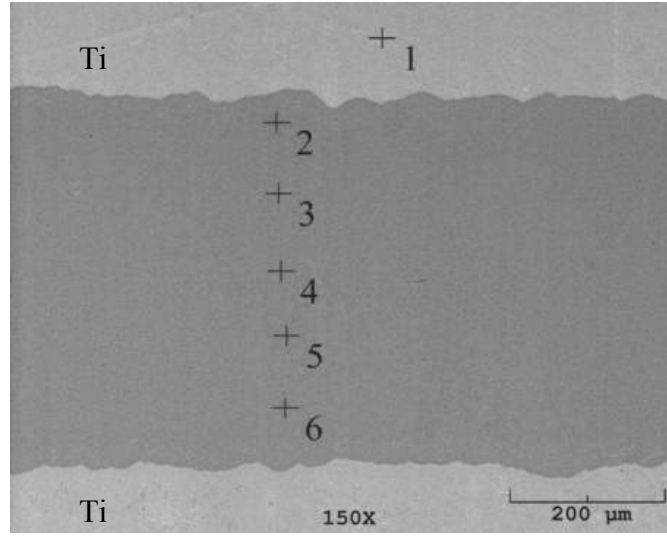
Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	100	-	-
2	28.355	71.645	-
3	31.409	68.591	-
4	30.776	69.224	-
5	31.977	68.023	-
6	31.980	68.020	-



Şekil A.2. 700°C de 2,5 saat sinterlenmiş (500μm Ti–250μm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

Tablo A.2. Şekil A.2'deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

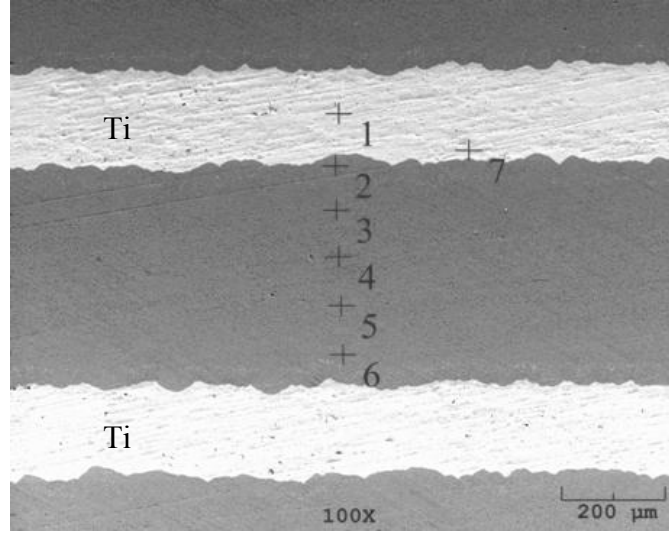
Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	100	-	-
2	33.005	66.995	-
3	32.655	67.345	-
4	32.598	67.402	-
5	31.910	68.090	-
6	32.414	67.586	-



Şekil A.3. 700°C de 5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

Tablo A.3. Şekil A.3’deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	100	-	-
2	32.181	67.819	-
3	31.843	68.157	-
4	32.492	67.508	-
5	30.994	69.006	-
6	32.342	67.658	-

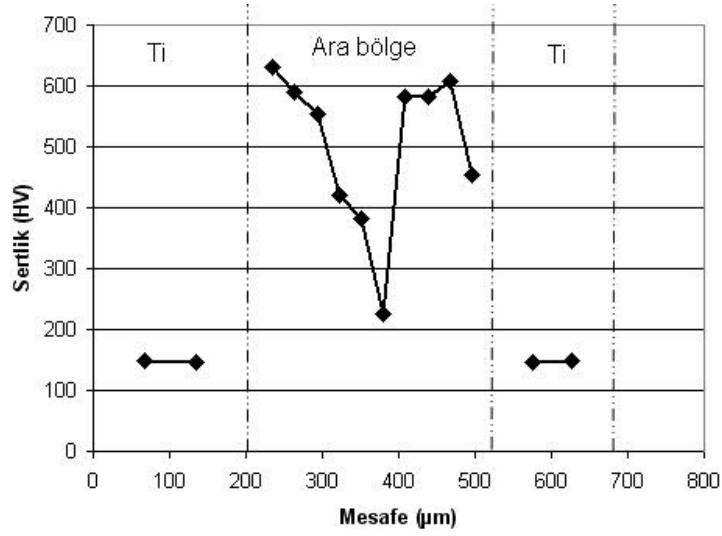


Şekil A.4. 700°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250µm Ti–250µm Al) numunenin SEM mikroyapı görüntüsü

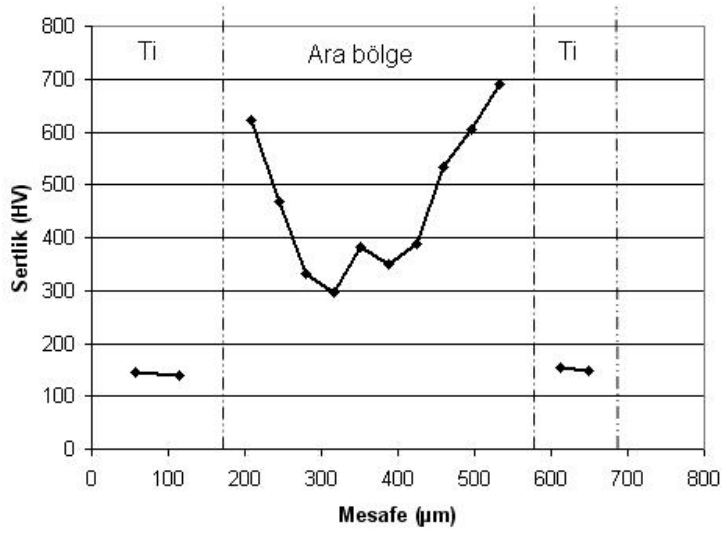
Tablo A.4. Şekil A.4’deki noktaların (EDS) elementel analiz sonuçları

Noktalar	Elementler (ağırlıkça yüzdeleri)		
	Ti	Al	O
1	100	-	-
2	32.513	67.487	-
3	33.278	66.722	-
4	31.754	68.246	-
5	31.580	68.420	-
6	32.121	67.879	-
7	100.000	-	-

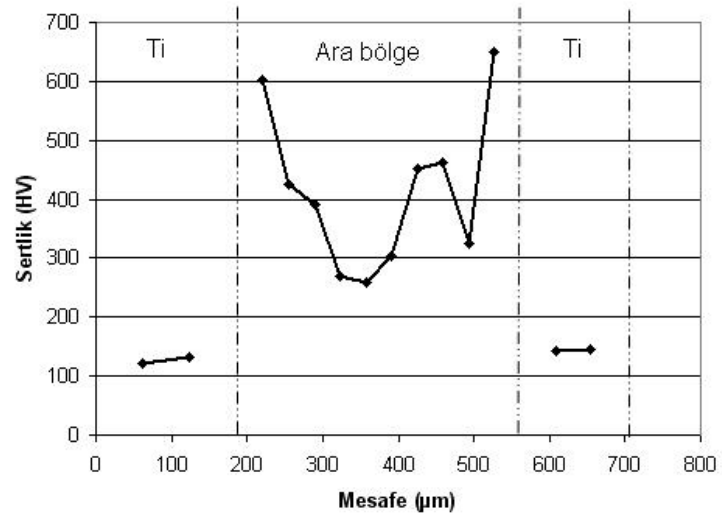
EK B. Kalınlık ve Sertlik Ölçüm Sonuçları



Şekil B.1. 650°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250μm Ti–250μm Al) numunenin 100gf, 15sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı

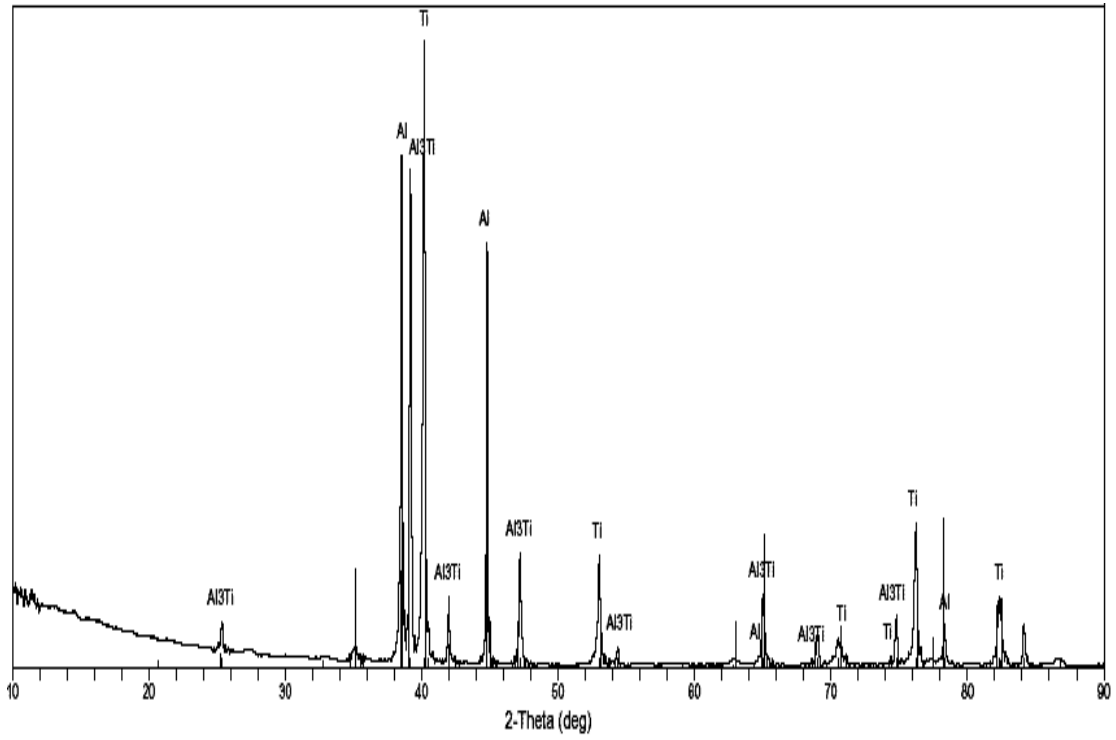


Şekil B.2. 700°C de 5 saat sinterlenmiş (250μm Ti–250μm Al) numunenin 100gf, 20sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı

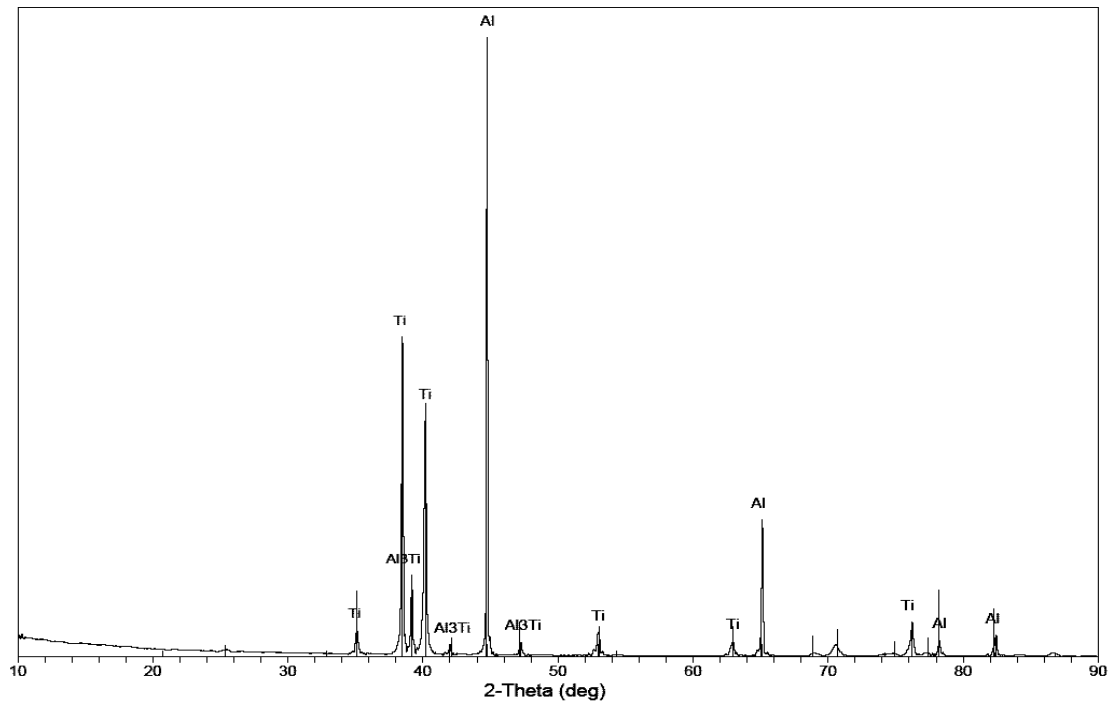


Şekil B.3. 700°C de 7,5 saat sinterlenmiş (250μm Ti–250μm Al) numunenin 100gf, 20 sn şartlarında (HV) sertlik dağılımı

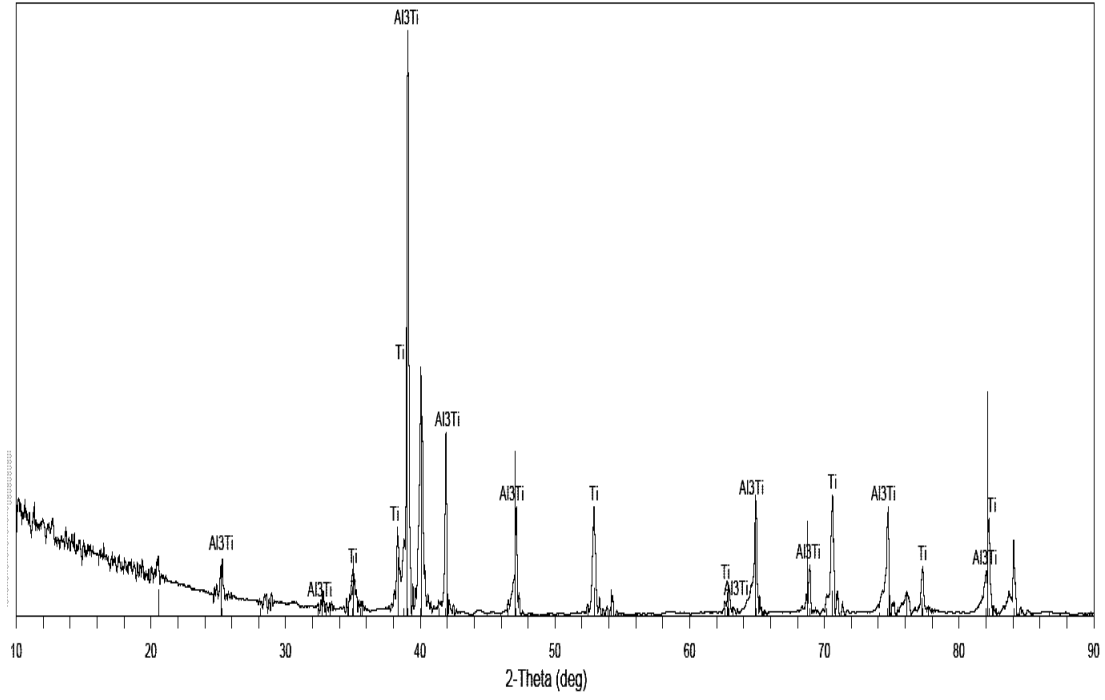
EK C. XRD Paternleri



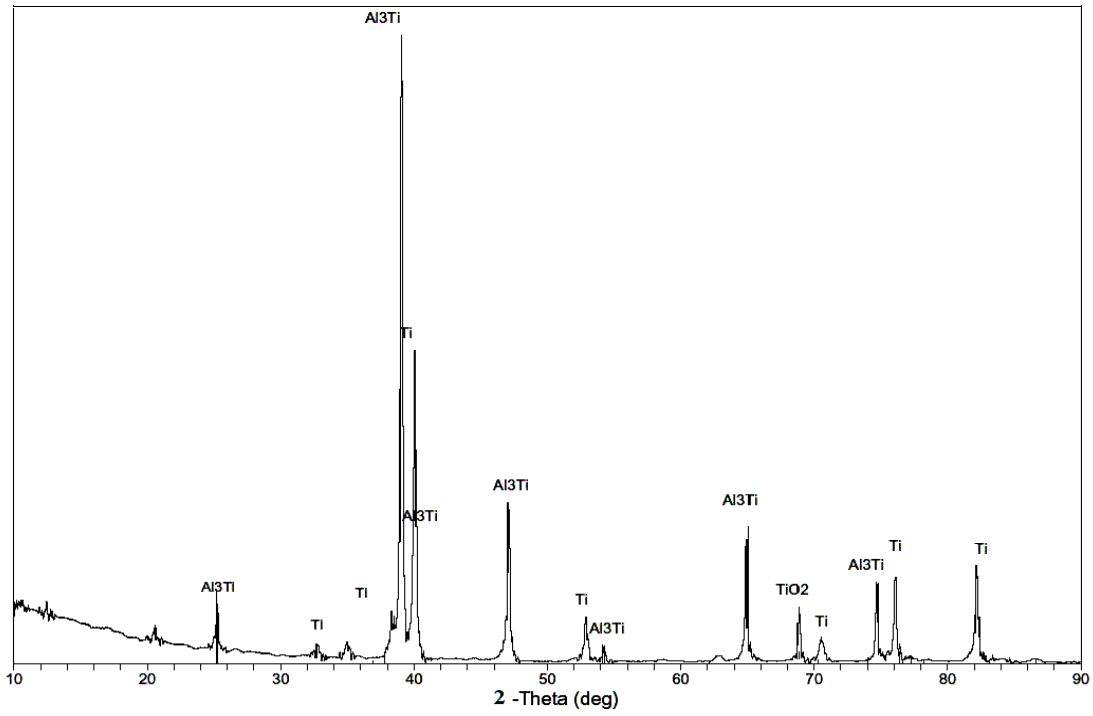
Şekil C.1. 650°C de 2,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni



Şekil C.2. 650°C de 5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni



Şekil C.3. 650°C de 7,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni



Şekil C.4. 700°C'de 7,5 saat sinterlenmiş numunenin XRD paterni

ÖZGEÇMİŞ

Sinan YILDIZ, 1980 yılında Kdz Ereğli'nin bir maden kasabası olan Kandilli'de doğmuştur. İlk ve Orta öğrenimini Armutçuk İlköğretim okulunda tamamlamıştır. Lise eğitimini Kdz Ereğli Lisesinde MF bölümünde bitirmiştir. 1999 Yılında Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2001 ve 2002 yıllarında sırasıyla, ERDEMİR A.Ş. 1. Soğuk Haddehane ve 1. Sıcak Haddehanede işletme ve kurum stajlarını tamamlamıştır. 2003 Yılında Sakarya Üniversitesinde, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği lisans eğitimini başarıyla tamamlamıştır. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans okuma hakkı kazanmıştır ve ROSEM'de o yıl tek sınıf olarak açılan orta seviyeden başladığı İngilizce hazırlığı başarıyla bitirerek 2004 yılında yüksek lisans ders aşamasına geçmiştir. Halen Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsünde tez çalışmalarına devam etmektedir.