

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ



MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

**MAK437-Mukavemet Artırıcı Sistemler ve
Mikroyapı Tasarımı**
Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

**Metal Matrisli Kompozitler ve
Mikroyapının Özelliklere Etkisi**

*MAK437-Mukavemet Artırıcı Sistemler ve
Mikroyapı Tasarımı*

Hafta-4



METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER (MMK)

- Metaller tasarım ihtiyacını karşılayabilmek için kendi özelliklerini artırmak veya azaltmak için takviye edilir. Örneğin Silisyum karbür gibi takviyeyle elastik rijitlik ve mukavemet artırılabilir. Yüksek değerdeki termal genleşme ve elektriksel iletkenlik azaltılabilir.
- Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerinde sıcaklıklarda kullanılacak ve daha yüksek spesifik mukavemet özelliğine sahip malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle 1960'lı yılların başında metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler geliştirilmiştir.

*Metal matrisli kompozit malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle üretilen yeni malzemelerdir.



METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER (MMK)

- MMK'lar sermet, metalik köpük, partikül veya fiber takviyeli metaller gibi geniş bir malzeme grubunu oluşturmaktadır.
- Metal matrisli kompozit malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak amacıyla bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber veya partikül şeklinde takviye fazı içerir.
- Matris, takviye fazını bir arada tutmaya yarayan bağlayıcı gibi davranır ve asıl işlevi katkı fazına yükü iletmeğdir.



METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN AVANTAJLARI

- Düşük yoğunluk,
- Tekrar üretilebilir içyapı ve özellikler,
- Yüksek mukavemet ve esneklik modülü,
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet,
- Sıcaklık değişikliklerine veya ısı şoka karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik.



Genel olarak bakıldığında metal matrisli kompozitlerin, metallere göre üstün olan temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Daha yüksek aşınma direnci,
- Daha iyi yorulma direnci,
- Düşük ısı genleşme katsayısı,
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri,
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (spesifik mukavemet),
- Yüksek esneklik modülü/yoğunluk oranı (spesifik modül).



MMK'ların ana sınırlayıcı özellikleri ise aşağıda sıralanmaktadır:

- Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda kompozit üretimi için genellikle zor ve karmaşık üretim süreçlerinin kullanılması gerekmektedir.
- Metallere göre kompozitlerin sünekliği daha düşüktür.
- Kompozit üretiminde metallere oranla daha yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizata ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kompozitler yeni gelişen bir malzeme ailesi olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin bu alanda bilgi birikimi metallere oranla daha zayıftır.



Kompozit malzemelerde matristen beklenen özellikler: hafiflik , korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye elemanı ile uyumluluk olarak sıralanabilir.

Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparken aynı zamanda da takviye elemanlarını aşınma ve korozyona karşı korur. Takviye elemanlarından kırılğan çatlakların yayılmasını engeller.

Matris malzemeleri kompozit yapının kayma, basma, akma, sürünme, dielektrik ve termo mekanik özelliklerini belirleyici bir rol oynamaktadır



Kompozit yapılarda yaygın olarak tercih matris malzemeleridüşük yoğunluk, tokluk ve iyi mekanik özelliklere sahip olan hafif metal ve alaşımlardır.

Bu hafif metal alaşımları, dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması sebepleriyle özellikle ağırlığın ön planda olduğu, hafif yapılarda tercih edilmektedir.

Bu tür malzemelerde atmosfere karşı korozyon dayanımının da oldukça yüksek olması diğer bir karakteristik özelliktir.

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde alüminyum (Al), magnezyum (Mg), çinko (Zn), bakır (Cu), titanyum (Ti) ve nikel (Ni) gibi metaller ve bu metallerin alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır.



Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

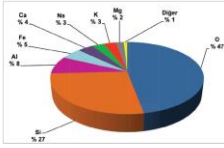
- Metal matrisli kompozit malzemeler için matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilir.
- Matris malzemesi olarak düşük yoğunluk ve ergime sıcaklıkları nedeniyle alüminyum ve alaşımları ilk sırayı almaktadır.
- Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris olarak kullanılabilir.
- Alüminyum ve alaşımları dışında en çok titanyum ve magnezyum alaşımları, elektronik sistemlerde bakır alaşımları kullanılır.



Çizelge 1. Al'nin genel özellikleri

Metal	Yoğunluk g/cm ³	Akma Mukavemeti MPa	Spesifik Mukavemet N/m ³ kg
Magnezyum (Mg)	1,74	69	39,6
Berylyum (Be)	1,85	120	64,9
Titanyum (Ti)	4,51	140	31,0
Nikel (Ni)	8,90	148	16,6
Bakır (Cu)	8,93	69	7,7
Tungsten (W)	19,25	550	28,6
Molibden (Mo)	10,22	345	33,8
Niobium (Nb)	8,57	105	12,3

Özellik	Değer
Yoğunluk, g/cm ³	2,70 ⁽¹⁾
Esneklik Modülü, GPa	68 g ⁽¹⁾
Mukavemet, MPa	290 ⁽¹⁾
Akma Mukavemeti, MPa	30 ⁽¹⁾
Spesifik Mukavemet, N/m ³ kg	11,1 ⁽¹⁾
Isıl İletkenlik, W/m°C	221 ⁽¹⁾
Bil Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶ /°C) (25-100°C)	23,6 ⁽¹⁾



Şekil 2. Yerkabuğunda bulunan elementlerin miktarları (8)



Genel olarak Al'nin sahip olduğu özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- Bol bulunur ve dolayısıyla göreceli olarak ucuz bir malzemedir.
- Oldukça hafif bir malzemedir.
- Yüksek spesifik mukavemete sahiptir.
- Çözelti sertleştirilmesi ve yaşlandırma gibi mukavemeti arttırmaya yönelik işlemlerin uygulanmasına elverişlidir.
- Oldukça iyi ısı ve elektriksel özelliklere sahiptir.
- Zehirli olmadığı için yiyeceklerin paketlenmesinde de kullanılmaktadır.
- Al genellikle yorulmada dayanım sınırı sergilemez, bu nedenle de kopma, oldukça düşük gerilimde meydana gelir.
- Ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı yüksek sıcaklıklardaki performansı iyi değildir.
- Düşük sertliğe sahip olmasından dolayı aşınma direnci de oldukça düşüktür.



Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

- Kullanım yerine bağlı olarak metal matrisli bir kompozitte takviye elemanından beklenen temel özellikler; yüksek modül ve dayanım, düşük yoğunluk, matris ile kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı ve yüksek sıcaklıkta dayanımını muhafaza etmesidir.
- Metal matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, TiC, bor ve karbondur.
- Uygulamada mukavemetin yüksek olması gerektiği durumlarda kısa fiberlerli kompozitler kullanılır. Rijitlik ve mukavemetin en iyi kombinasyonu ise anizotropik özelliklere ve en önemlisi de yüksek maliyete sahip süreklî fiber katkılı metal matrisli kompozitler verir.

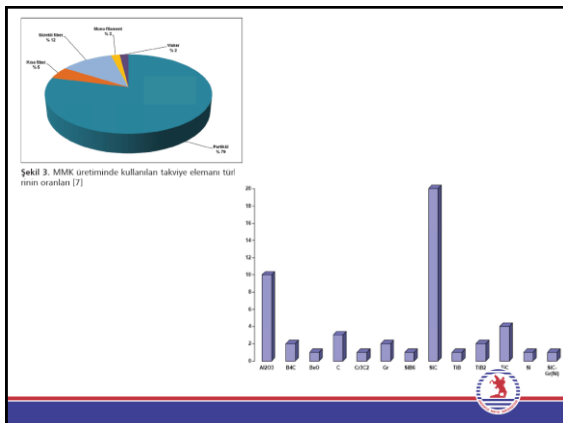


TAKVİYE ELEMANI – MATRİS ETKİLEŞİMİNİN ÖNEMİ

Takviye fazı ve matris alaşımı arasındaki arayüzey özellikleri, MMK'ların mekanik davranışlarında önemli bir etkiye sahiptir. MMK'ların yüksek esneklik modülü ve dayanıma sahip olması, uygulanan dış kuvvetlerin matris tarafından takviye fazına transferi ve dağılımı ile mümkün olduğundan takviye fazı ile matris arasında güçlü bir arayüzey olması bu anlamda çok önemlidir.

Metalurjik açıdan ise takviye fazının, matris alaşımı tarafından yeterince ısıtılabilmesi, arayüzeyde çok düşük oranda ve hızlarda kimyasal tepkimelerin olması, fazlar arasında çok az veya hiç yayılım olmaması ve dolayısıyla takviye fazının bozunmaması çok önemlidir.





Çizelge 4. MMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan seramik takviye malzemelerinin yoğunluk, ergime sıcaklığı, sertlik ve güvenilirlik modülü değerleri

Malzeme	Esneklik Modülü GPa	Yığın Modülü GPa	Kayma Modülü GPa
AlN	330 ^[21]	212 ^[21]	133 ^[21]
Si ₃ N ₄	310 ^[21]	152	120
SiC	460 ^[21]	219 ^[21]	200 ^[21]
B ₄ C	450 ^[21]	217 ^[21]	195 ^[21]
TiB ₂	556 ^[21]	233 ^[21]	249 ^[21]
Al ₂ O ₃	435 ^[21]	228	175 ^[21]
WC	690 ^[21]	386 ^[21]	287 ^[21]



Çizelge 7. MMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan seramik takviye malzemelerinin alan yazından derlenen eğme, basma ve çekme mukavemeti ile kırılma tokluğu değerleri

Malzeme	Eğme Mukavemeti MPa	Basma Mukavemeti MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Kırılma Tokluğu MPa
AlN	310 ^[22]	1500–4000 ^[22]	390	3,70 ^[22]
Si ₃ N ₄	490–980 ^[22]	3000 ^[22]	550	5,60 ^[22]
SiC	580 ^[22]	588–4116 ^[22]	200	2,80 ^[22]
B ₄ C	310 ^[22]	2600	650	3,00 ^[22]
TiB ₂	277 ^[22]	2400 ^[22]		2,70 ^[22]
Al ₂ O ₃	294–392 ^[22]	2000 ^[22]	248	2,80 – 4,50 ^[22]
WC	1000 ^[22]	4100–5850 ^[22]		7,00 ^[22]



METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER (MMK)



Partikül Takviyeli Kısa Fiber Takviyeli Sürekli Fiber Takviyeli



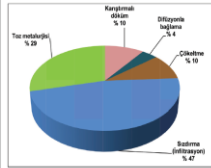
MMK'ların Üretim Yöntemleri

MMK üretim yönteminin seçiminde, üretilecek olan kompozit malzemenin beklenen özellikler dikkate alınarak üretim yöntemi belirlenir. MMK üretiminde dikkate alınan en önemli özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- Elde edilecek üründen istenen boyutsal özellikler,
- Kullanım sıcaklık aralığı,
- Takviye malzemesinin şekli,
- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu,
- Matris ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi,
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında olası olan tepkimeler,
- Takviyenin matris malzemesi içerisinde eş dağılımlı olması,
- Matris-takviye arayüzey bağlanmasının tam olarak sağlanabilmesi.



Yöntem	Malzety	Uygulama	Açıklama
Difüzyonlu bağlama	Yüksek	Levha, kanat, mil ve yataklık elemanlar	Matris için levha ve takviye fazı için filaman kullanıma
Toz metalurjisi	Orta	Küçük çarpan elemanlar, civata, platis, valf ve yüksek mukavemetli taşıy dirençli malzemeler.	Matris ve takviye fazları toz halinde ve partikül takviyesi için uygundur. Ergime olmadıktan sonra lehimle birleştirilir ve karma yapış malzemeleri mukavemetli yapışdır.
Sıvı metalurjisi	Dışık - Orta	Rot, klap ve dişlilerin tek aşkında maksimum ömürü sağlayan elemanlar.	Filaman takviye fazı kullanılmaktadır.
Sıkıştırma döküm	Orta	Platin, bağlama rolleri, kulplar, kök, silindirik başı gibi otomotiv parçaları.	Her tür takviye fazı için uygundur ve üretim yapışzeta geniştir.
Püskürtme	Orta	Sürünme malzemeleri, motor ügünleri, keçeler ve taşıma elemanları.	Partikül takviye fazı kullanılmaktadır. Yüksek yüklenişli malzemeler üretilmektedir.
Kompozit döküm	Dışık	Otomotiv, lozay, endüstriyel ekipman ve spor malzemeleri ve yataklık malzemeleri	Özellikle partikül takviye süreksiz fiberler için uygundur.



Endüstriyel firmaların tercih ettiği MMK üretim yöntemlerinin oranları



Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

• Metal matrisli bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilecek parçanın şekline istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matrise, takviye elemanı şekli ve türüne göre belirlenir.

A) Katı Faz Üretim Yöntemleri

- Toz Metalurjisi Teknikleri
- Difüzyon Bağlı Yöntemi

B) Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme



Katı Faz Üretim Yöntemleri

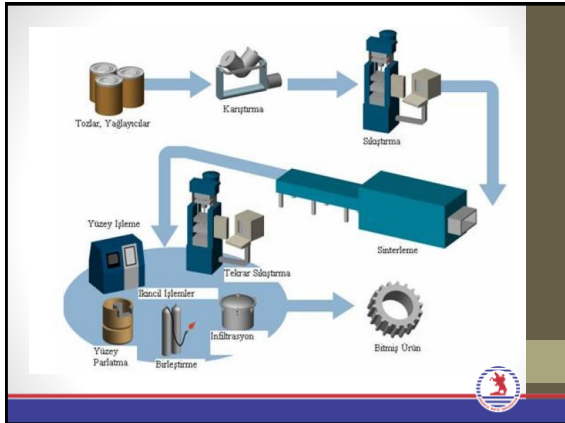
Toz Metalurjisi

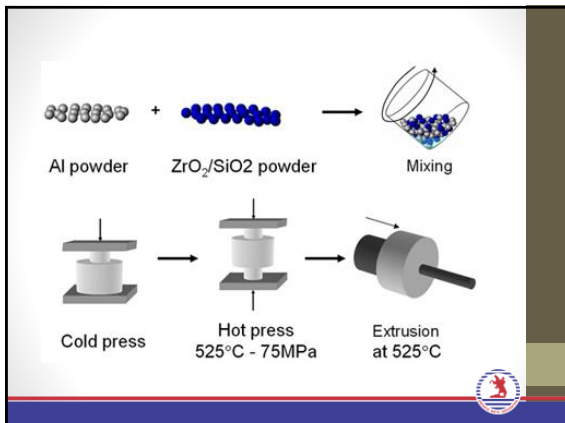
Bu teknikte genel olarak partikül formunda takviye elemanları ile toz haldeki metal kullanılarak, metal matrisli kompozit malzeme oluşturulur.

Yaygın kullanılan takviye elemanları silisyum karbür, grafit, titanyum karbür, en çok kullanılan matris malzemeleri ise alüminyum, titanyum ve bakırdır

- Toz metalurjisi (T/M) ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda matris ve takviye elemanı arasında daha az etkileşim olmaktadır.
- Takviye elemanının matris içinde homojen dağılımının sağlanabilmesi ancak T/M yöntemiyle gerçekleştirilebilmektedir.
- Yüksek takviye hacim oranının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bundan dolayı da yüksek modüllü, düşük termal genişleme katsayısına sahip kompozitler üretilmektedir.



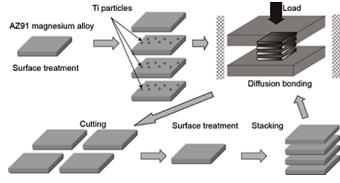




Difüzyon Bağlı Yöntemi

Difüzyon bağı yönteminde, takviye elemanları metal folyolar üzerine istenilen açıda ve miktarda yerleştirilebilmekte ve bu işlemler tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklık altında basılarak veya haddelenerek matris ile takviye arasında bir bağ oluşturulmak suretiyle kompozit malzeme üretilmektedir.

Ancak yöntem oldukça pahalı bir yöntem olup sınırlı malzeme formu ve çeşidi ile gerçekleştirilmektedir.



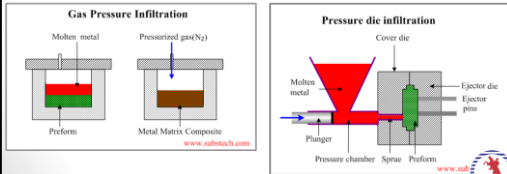
Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Sıvı Metal İnfiltrasyon Yöntemi

İlk işlem olarak istenilen profilde ön şekillendirme yapılmakta, fiberlerin yönlendirilmesi ve hacimsel oranı bu aşamada ayarlanmaktadır.

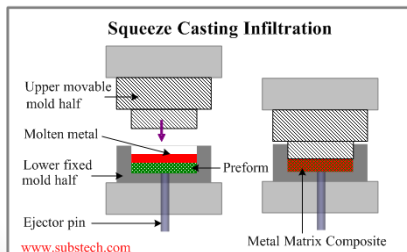
Ön şekiller kalıba bir bağlayıcı ile tutturulduktan sonra kalıp içerisine ergimiş metal emdirilmekte ve katılaşmaya bırakılmaktadır.

Hızlı ve yüksek üretim kapasitesine sahip olması ve son ürün şekline yakın üretim imkanı sağlaması gibi avantajları nedeniyle bu teknik, metal matrisli kompozit malzeme üretiminde önemli bir yer edinmiştir.



Sıkıştırma Döküm Yöntemi

Sıkıştırma döküm yöntemi; metal bir kalıp içerisine yerleştirilen, ön ısıtma yapılmış, seramik fiber veya başka bir takviye malzemesinden oluşmuş ön şekle, kuvvet yardımıyla ergiyik metalin emdirilmesi ve böylece sıkıştırılan ergiyik metale yüksek basınç uygulanarak katılaştırılması işlemidir.

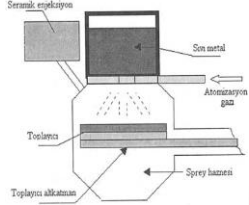


Plazma Püskürtme (Metal Püskürtme)

Yöntemi

Özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde kabul görmüş bir yöntemdir. Plazma püskürtme, atomize edilmiş ergimiş metal parçacıklarının takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir.

Püskürtülen ergiyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır. Bu tip üretim yöntemi alüminyum gibi ergime sıcaklığı düşük olan metallerde uygulanır.



Sıvı Metal Karıştırma Teknikleri

Sıvı metal karıştırma tekniklerinde, ön ısıtma yapılmış veya ön işlemlerden geçerek hazırlanmış takviye malzemeleri, sürekli karıştırılan ergimiş metal içerisine değişik yöntemlerle katılmakta ve daha sonra döküm işlemi yapılmaktadır.

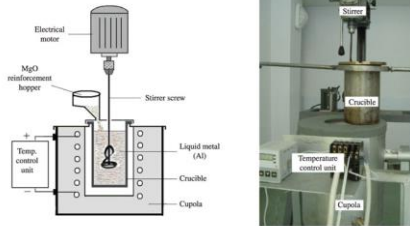
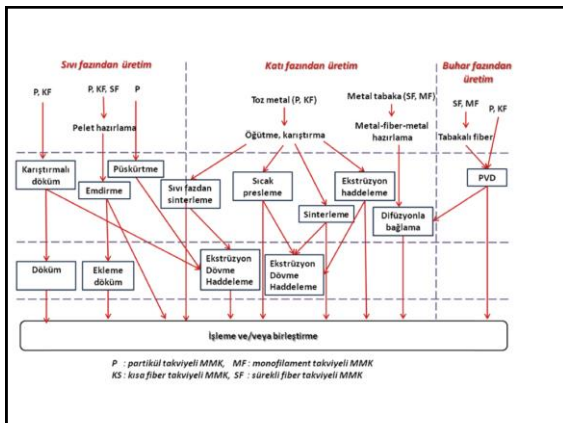
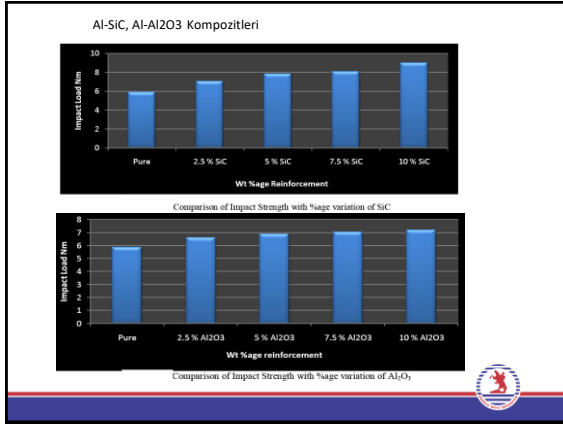


Figure 1. Melt stirring test apparatus (For the production of composite specimens).





Al-SiC, Al-Al₂O₃ Kompozitleri

Results of hardness Test

Sample No	Sample Name	Hardness				Mean Hardness
		Rockwell Hardness				
	LM 6 +	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	
1	Pure	53.7	52.7	54.5	51.9	53.2
2	2.5 % SiC	56.7	59.5	56.1	60.1	58.1
3	5 % SiC	50	48	53	51	51.0
4	7.5 % SiC	86.3	89.3	85.8	89.8	87.8
5	10 % SiC	91.2	90.7	91.7	91.3	91.2
6	2.5 % Al ₂ O ₃	76.5	74.3	75.2	75.6	75.4
7	5 % Al ₂ O ₃	85.2	83.2	86.6	86.6	85.4
8	7.5 % Al ₂ O ₃	89.9	89.4	91.6	87.6	89.6
9	10 % Al ₂ O ₃	91.6	98.8	92.5	101.3	95.8

Al-SiC, Al-Al₂O₃ Kompozitleri

Tensile Strength Results

Alloy (LM6)	Yield Strength N/mm ²	UTS N/mm ²	Elongation (%)
Pure	65	180	9
2.5% SiC	78	220	7.5
5% SiC	85	245	5.5
7.5% SiC	112	250	3.2
10% SiC	150	310	2.1
2.5 % Al ₂ O ₃	75	190	8.1
5 % Al ₂ O ₃	88	201	6.5
7.5 % Al ₂ O ₃	105	250	3.9
10 % Al ₂ O ₃	140	290	2.8

