

Bor ve Bileşiklerinin Yüksek Performanslı Kompozit Malzeme Uygulamaları

Ersin Ünal¹

Hediye Kırılı Akın²

Özet

Bu çalışma, bor ve onun bor karbür (B_4C), bor nitrür (BN) ve metal borürler (TiB_2 , ZrB_2) gibi yüksek performanslı bileşiklerinin kompozit malzemelerdeki stratejik ve teknolojik uygulamalarını incelemektedir. Bor, Türkiye'nin tekel konumunda olduğu zengin rezervlere sahip stratejik bir mineraldir. Bor bileşikleri, elmasan sonraki en sert malzemeler arasında yer alarak kompozitlerin mekanik, tribolojik ve termal özelliklerini üstün seviyelere taşır.

Çalışmalar, B_4C takviyelerinin alüminyum (Al) matrisli kompozitlerde sertliği önemli ölçüde artırdığını ve balistik zırh uygulamalarında 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağladığını göstermektedir. BN nano tüpleri ve nanolevhaları, hidroksiapatit (HA) matrisli biyo-kompozitlerde kırılma tokluğunu %86, sertliği ise %129 oranında artırarak, ortopedik implantlar için büyük potansiyel sunmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde (Al/B_4C) sıkça karşılaşılan düşük ıslatılabilirlik sorunları, nikel (Ni) kaplama gibi yüzey modifikasyon yöntemleriyle aşılmakta, böylece matris-takviye ara yüzey bağı güçlendirilmektedir. Ayrıca TiB_2 ve B_4C 'nin yüksek nötron absorplama kapasitesi, onları nükleer reaktör kontrol çubukları için kritik kılarken, hBN bazlı kaplamalar aşınma ve korozyon direncini ciddi ölçüde iyileştirmektedir. Sonuç olarak, bor ve ürünleri, havacılık, savunma ve biyomedikal gibi sektörler için yüksek performans gerektiren yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır.

- 1 Dr. Öğretim Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ersinunal@osmaniye.edu.tr <https://orcid.org/0000-0002-3183-9592>
- 2 Dr. Öğretim Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, hediyeakin@osmaniye.edu.tr <https://orcid.org/0000-0003-4862-9054>

1. Kompozit Malzemeler

Teknolojideki hızlı ilerleme ve değişim, geleneksel materyallere kıyasla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesini ve kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Bu gereklilikten yola çıkarak bilim insanları, doğal malzemelerden veya alaşımlardan daha iyi performansa sahip yeni materyaller oluşturmak için yoğun çaba göstermektedir. Bu çalışmaların sonucunda, geleneksel metal ve alaşım malzemelere göre daha gelişmiş nitelikler sunan çeşitli kompozit malzemeler ortaya çıkarılmıştır. Kompozit malzeme; farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, birbiri içinde çözünmeyen, en az iki fazın bir araya gelmesiyle oluşan, farklı boyut ve şekillerdeki bileşenlerin karmaşık bir yapı içinde birleştirilmesiyle elde edilen heterojen bir malzeme sistemi olarak tanımlanır. Bu çok fazlı yapı, mikro veya makro ölçekte bileşenler içerebilir ve nihai olarak elde edilen yeni malzemenin, kendisini oluşturan bileşenlerden daha üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergilemesi beklenir. Bir malzemenin teknik olarak kompozit olarak kabul edilebilmesi ve alaşımlardan ayırt edilebilmesi için; kimyasal olarak farklı en az iki malzemenin bir araya gelmesi, bu bileşenlerin üç boyutlu bir birleşim göstermesi ve ortaya çıkan yapının bileşenlerin tek başına sahip olmadığı yeni performans özellikleri sunması gerekmektedir [1].

Düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları ve üstün mekanik–termal özellikleri sayesinde kompozitler, özellikle havacılık, otomotiv, savunma ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bu üstün özellikler, kompozit malzemeler üzerine yapılan bilimsel ve endüstriyel araştırmaların hızla artmasına neden olmaktadır [3].

Kompozitler genellikle matris (ana yapı) ve takviye malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Matris malzemesi kompozitin ana yapısını oluştururken takviye malzemesi, genellikle daha sert ve yüksek dayanıma sahip olan bileşeni temsil eder. Matris malzemesinin başlıca görevleri; uygulanan yükleri takviye elemanlarına iletme, çatlak ilerlemesini sınırlamak, kompozitin tokluğunu artırmak ve takviye elemanlarını çevresel etkilerden korumaktır. Bu nedenle matris–takviye ara yüzünün özellikleri, kompozit malzemenin mekanik performansını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu yapı sayesinde kompozitler, cam elyaf kompozitler ve karbon elyaf kompozitler gibi lif takviyeli kompozitlerde yüksek özgül dayanım–hafiflik dengesini sağlar; bu tür malzemeler havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde yaygın kullanılır [4]. Ayrıca, nano malzeme katkılı kompozitler, matris içerisine nano ölçekli takviyeler (örneğin çok duvarlı karbon nanotüpler gibi) ilave edilerek geliştirilmiş olup, mekanik, termal ve

fonksiyonel özelliklerde belirgin gelişmeler sağlar [5,6]. Kompozit malzemeler genellikle matris türüne ve takviye geometrisine göre sınıflandırılır (Tablo 1). Matris esaslı sınıflandırmada kompozitler; polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olarak üç ana gruba ayrılır. Endüstride en yaygın kullanılan grup, üretim kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle polimer matrisli kompozitlerdir. Şekil 1'de dolgu türlerine göre kompozit çeşitleri görülmektedir [7].



Şekil 1. Dolgu türlerine göre kompozit çeşitleri [7].

Takviye türüne göre yapılan sınıflandırmada ise lif takviyeli ve partikül takviyeli kompozitler ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, cam elyaf takviyeli kompozitler (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli kompozitler (CFRP) lif takviyeli kompozitler grubunda yer almakta olup, yüksek özgül dayanım ve rijitlikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda kompozit malzemelerin performansını daha da artırmak amacıyla nano ölçekli takviyeler kullanılmaya başlanmıştır. Nano malzeme katkılı kompozitler, matris içerisine karbon nanotüp (CNT), grafen veya nano parçacıklar gibi takviyelerin ilave edilmesiyle geliştirilmiş kompozit sistemlerdir [2,6]. Bu tür katkılar, mekanik dayanımın yanı sıra elektriksel ve termal özelliklerde de önemli iyileşmeler sağlamaktadır.

Tablo 1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Örnekleri

Sınıflandırma Kriteri	Kompozit Türü	Örnek Malzemeler
Matris Malzemesine Göre	Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)	Cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP), Karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP), Nano katkı polimer kompozitler
	Metal Matrisli Kompozitler (MMC)	Al-SiC, Al-B ₄ C, Al-Bor, Al-Bor elyaf takviyeli kompozitler
	Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)	SiC-SiC, Al ₂ O ₃ -SiC
Takviye Türüne Göre	Lif Takviyeli Kompozitler	Cam elyaf kompozitler, Karbon elyaf kompozitler, Bor elyaf takviyeli kompozitler
	Partikül Takviyeli Kompozitler	SiC, Al ₂ O ₃ , B ₄ C takviyeli kompozitler, Nano partikül katkı kompozitler
	Yapısal Kompozitler	Sandviç yapılar, petek (honeycomb) kompozitler

2. Bor

Günümüzde boraks, en önemli stratejik endüstriyel minerallerden biri olarak kabul edilmektedir. Bor ve bileşiklerinin en önemli tek kaynağı boraktır[8]. Bor, bor alaşımları ve bileşikleri cam sanayisinden, balistik füze yakıtına, tekstil, metalürji uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle bor esaslı malzemeler olan bor nitrür (kübik ve hekzagonal) ve bor karbür, elmaştan sonraki en sert malzemelerdir [9].

Boraksın bir diğer stratejik önemi ise, ülkemizin (Türkiye'nin) boraks rezervleri açısından, krom cevherinde olduğu gibi, dünyada en zengin ve tekel konumunda olmasıdır. Ülkemizde özellikle son on yılda, bu madeni ülke içinde işleyerek katma değeri yüksek nihai ürünlere dönüştürmek amacıyla kamu, üniversite ve özel sektör tarafından önemli çalışmalar ve araştırmalar yürütülmektedir. Bu hedefle, geniş kapsamlı ve farklı araştırma-geliştirme faaliyetlerini incelemek üzere bir bor merkezi (BOREN) kurulmuştur [10].

2.1 Borun Özellikleri

Bor; periyodik tabloda III A grubunda yer alır, B simgesiyle gösterilir. Atom numarası 5 ve atomik kütlesi 10.81'dir, iki kararlı izotoptan oluşur. Ergime noktası 2300 °C, kaynama noktası ise 4002 °C olan metal ile ametal arası yarı iletken özellik gösteren bir elementtir.

Doğada serbest halde bulunmayan bor, diğer elementlerle bileşikler halinde mevcuttur. Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. En çok araştırılan kristalin polimorfları rombohedral formlardır. Bor elementinin kimyasal özellikleri, morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron boyutundaki amorf bor kolayca ve bazen şiddetli tepkimeye girerken, kristalin bor kolay kolay reaksiyona girmez. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava, hidroklorik asit ve hidroflorik asitler karşısında soylu bir davranış sergiler ve yalnızca yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilir. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile tepkimeye girerek bor oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile BN ve ayrıca bazı metaller ile Mg_3B_2 ve TiB_2 gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir.

Bor, bileşik halindeyken metal dışı bileşiklere benzer özellikler gösterirken, saf bor ise karbon gibi elektriği iletir. Kristalize bor, görünüm, sertlik ve optik özellikler açısından elmasa benzer bir yapıya sahiptir. Elementel bor, ilk kez 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir [11-13].

2.2 Bor Ürünlerinin Sınıflandırılması

Endüstride kullanılan bor ürünleri, üretim aşamaları, prosesleri ve kullanım alanları dikkate alınarak, **ham bor**, **rafine bor ürünleri** ve **uç ürünler** şeklinde üç ana gruba ayrılabilir [14]. Uç ürünler, daha önce bahsedilen ham ve rafine ürünlerden üretilir. En önemli özellikleri, ileri teknoloji gerektiren yöntemlerle üretilmeleridir. Ham ve rafine bor ürünlerine kıyasla üretilen uç ürün sayısı daha fazladır. Başlıca uç ürünler arasında elementel bor, B_4C , BN ve bor alaşımları (demirli, nikelli ve kobaltlı) sayılabilir [14,15].

2.2.1 Elementel Bor

Bor fiberi, genellikle Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemiyle, karbon veya tungsten altlık (çekirdek) üzerine borun kaplanmasıyla üretilir. Uygulanan ısı işlem ile hibrit yapı üzerindeki kalıntı gerilmeler giderilir. Fiberin dayanımını azaltacak aşırı tane büyümesini engellemek için sıcaklığın dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Bor fiberler çok yüksek elastiklik modülü değerine sahiptir ancak oldukça pahalıdır.

Avantajlarına rağmen, Metal Matrisli Kompozit (MMK) üretimi sırasında bor fiberinin alüminyum (Al) ve titanyum (Ti) gibi metallerle hızla reaksiyona girmesi bir dezavantajdır. Ayrıca, tungsten telin bor ile kaplanması sırasında meydana gelen reaksiyon sonucu difüzyonla tungsten

boridik oluşumu gerçekleşir. Bu durum, borun dış yüzeyine yakın bir yerde eksenine dik bir basma gerilmesi yaratarak bor fiberi kırılğan hale getirir. Bu durumu önlemek amacıyla, borun üzerine kimyasal buharlaştırma (CVD) metoduyla SiC veya B₄C kaplanması tercih edilir ve bu kaplama kalınlığı 25-45 µm civarındadır [16].

2.2.2 Bor Karbür (B₄C)

B₄C, yüzlerce bor bileşiği içinde yüksek pazar hacmine sahip önemli bir bor uç ürünüdür. İleri teknolojik bir seramik malzemesi olan bor karbür; yüksek sertliği, düşük yoğunluğu, kimyasallara karşı direnci, ısıya dayanımı ve yüksek nötron absorplama özelliklerinden dolayı birçok askeri ve sivil uygulama alanı bulmuştur. B₄C üretimi için sol jel, kimyasal buhar biriktirme, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık ve karbotermal indirgeme yöntemleri gibi çeşitli metotlar mevcuttur.

B₄C, SiC, Si₃N₄, elmas ve alümina gibi önemli sert ametal grubunda özel bir yere sahip, oksit olmayan bir seramik malzemedir. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti ve düşük yoğunluğu gibi birçok üstün niteliği sayesinde zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar ve aşındırıcılar gibi çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. B₄C, elmas ve kübik bor nitrit (kBN)'den sonraki en sert üçüncü malzemedir [17].

Yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerine sahip olmasına rağmen, yüksek maliyeti nedeniyle kompozit malzemelerdeki kullanımı henüz arzu edilen seviyeye ulaşmamıştır. Sıcaklıkla çekme mukavemetinin artması gibi çok az malzemede bulunan bir özellik, B₄C'ü diğer takviye malzemelerine göre öne çıkarır. B₄C takviyeli kompozitlerin işleme problemleri ve mekanik özelliklerdeki sınırlamalar, alüminyumun matris malzemesi olarak kullanılmasıyla önemli ölçüde azaltılabilir.

B₄C'ün yoğunluğu 2.51g/cm³, ergime sıcaklığı 2450 °C'dir çekme dayanımı 980 °C'de 155 N/mm² ve 1425 °C'de 162 N/mm² olarak belirlenmiştir. Ayrıca eğme dayanımı 345 N/mm² ve basma mukavemeti 2850 N/mm²'dir. Bor karbür yalnızca HF, H₂SO₄, HNO₃ karışımlarında yavaşta olsa çözünmektedir [12].

B₄C seramiklerin şekillendirilmesinde sıcak presleme ve basınçsız sinterleme yöntemleri kullanılır. Yüksek sertliği nedeniyle bor karbür, en çok aşındırıcı olarak tüketilmektedir. Sement karbür ve teknik seramikler gibi sert malzemelerin taşlanması ve parlatılmasında, aşınmaya dayanıklı kesme işlemlerinde kullanılan nozullarda, hafif zırh malzemesi olarak helikopterlerde

ve can yeleklerinde plaka halinde ve nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılmaktadır [18].

B₄C seramiklerin en hafifi olması, kompozitin toplam ağırlığını artırmadan mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmasına olanak tanır. B₄C ile çalışırken dikkat edilmesi gereken bir dezavantaj, yüksek sertliği nedeniyle kompozitin ekstrüzyon kabiliyetinin sınırlı olmasıdır [19]. Tamamen yoğun mikroyapıların üretiminde karşılaşılan zorluklar ve B₄C 'ün gevrek kırılmaya karşı aşırı hassasiyeti, bu takviye malzemesinin temel sınırlılıklarıdır. Tablo 2 de geniş olarak B₄C'ün özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. B₄C'ün genel özellikleri[20]

Özellikler	Değerler
Bileşimi	B ₄ C
Moleküler Ağırlığı (g/mol)	55.26
Renk	Siyah (saf kristali transparan ve renksiz)
X-Ray yoğunluğu (gr/cm ³)	2,52
Termal iletkenlik (W/m.K)	30,00
Termal genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	4,30
Elektriksel direnç (Ω.cm)	0,1-10
Vickers sertliği (GPa)	27,4-34,3
Elastisite modülü (GPa)	290-450
Kayma modülü (GPa)	165-200
Posion oranı	0,18
Esneme dayanımı (MPa)	323-430
Basma dayanımı (MPa)	2750
Oksitlenme direnci	Havada 600 °C'ye kadar oksitlenme direnci
Kimyasal direnç	Mükemmeldir.

2.2.3 Bor Nitrid (BN)

BN, düşük reaktifliği ve birçok uygulaması olan inorganik bir malzemedir. En sert insan yapısı malzemelerden bir tanesidir. Isıl, elektriksel, mekanik ve fiziksel özellikler gibi çok geniş bir malzeme nitelikleri dizisine sahip olması nedeniyle, birçok uygulaması vardır. Malzeme mühendisleri, çok çeşitli elektronik ve elektrik uygulamalarında yararlı olan, mükemmel bir ısıl şok özelliğine ilave olarak elektriksel yalıtkanlığın, yüksek ısıl iletkenliğin alışılmadık beraberliğini bor nitridde bulmuşlardır [18].

BN'nin ilk sentezinin ardından bu konudaki çalışmalar uzun bir süre laboratuvar merakı olarak devam ettirilmiştir. Daha sonraları çok yüksek sıcaklıklara ve basınçlara çıkabilen preslerin geliştirilmesiyle suni elmas üretilebilmiş ve bor nitrür tekrar ilgi odağı haline gelmiştir. BN, kompozit malzemelerde katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Kovalent bağlı olması sebebiyle sinterlenmesi için bazı katkı maddeleri gerektirmektedir [21].

BN, grafitte çok benzer altıgen (hBN) yapıda tabakalar halinde veya kübik yapıda (kBN) elmasa çok yakın özelliklerde bulunabilir. kBN bilinen malzemeler içinde elmastan sonra en sert olduğundan, malzeme endüstrisinde sert metal kaplamalar yapmada (elmastan daha üstün özelliklerde, metal işlemede) kullanılmaktadır [22].

hBN havada 1000 °C'ye kadar kararlıdır. İndirgen koşullarda ve inert atmosferlerde 1800 °C'ye kadar kullanılabilir. Üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle elektriksel yalıtkan malzemeleri, kroze ve tepkime kapları, yüksek sıcaklık buharlaştırma kapları ve özel seramiklerin üretiminde endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Toz hBN makyaj malzemelerinde dolgu malzemesi olarak kullanım alanı bulmuştur [23].

Toz halindeki hBN, yüksek sıcaklıklarda yağlama malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kübik bor nitrür ise elmas sertliğinde bir ürün olup “sunî elmas” diye tanımlanabilmektedir. 1320 °C'ye kadar özelliklerini korur [15].

BN seramik tozlarının endüstriyel amaçlı üretiminde üç farklı sentez yöntemi mevcuttur.

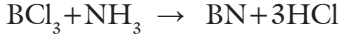
Geleneksel Endüstriyel Üretimler: Borik asit, bor oksit, azot gazı ve üre gibi azotlu organik bileşikleri hammadde olarak kullanarak hBN tozu üretimi geleneksel yöntemlere göre daha avantajlıdır. Bu yöntemle yüksek saflıkta toz üretimi mümkündür [24-26].

Plazma Yöntemi: Plazma prosesinde, çok ince tane boyutuna sahip hegzagonal bor nitrür tozları, borik asidin azot plazması altında ayrıştırılmasını takiben soğuk metan veya propan-bütan gazı ile soğutulması yöntemiyle üretilmektedir [27].

Karbotermik Redüksiyon: Bu yöntemde, bor nitrür tozlarının bor oksidin karbotermik redüksiyonu sonucu üretilmesi, B₂O₃ ile aktifleştirilmiş karbon karışımlarının azot atmosferi altında 1500 °C'de 120 dakika süre ile tutulması sonucu başarıyla gerçekleştirilmektedir [28].

kBN yüksek sıcaklık ve aşırı yüksek basınç altında sinterlenerek elde edilir. Sıcak sertlik, oksidasyon direnci ve kırılma tokluğunun iyi olması nedeniyle kBN'den yapılan kompozit kesici takımlar, sert demir içerikli malzemelerin kesme işleminde daha uzun takım ömrü ve mükemmel uç dayanımına sahiptirler.

Bor klorür ve amonyak aşağıdaki reaksiyonla, bor nitrür bileşimini meydana getirir:



Burada oluşan BN bileşiği, yaklaşık eşit sayıda bor ve azot atomlarının sırasıyla düzenlenerek oluşturduğu grafit yapısına benzer hegzagonal yapıya sahiptir. Hegzagonal boron nitrür hBN yumuşak, kaygan bir maddedir. hBN katalizör olarak bir alkali metali veya nitrürleri (lityum nitrür) gibi çözücü malzemeleri kullanarak kübik boron nitrüre kBN dönüşebilir.

Yüksek konsantrasyonlu kBN kesici uçların oda sıcaklığı sertliği karbür ve seramiklerden oldukça yüksek olup 3500-4000 HV arasında değişir. Yüksek sıcaklıkta 800-1000 °C'de kBN'ün sertliği alümina ve çoğu karbürlerin oda sıcaklığı sertliği ile karşılaştırılabilir. kBN endüstride ve araştırmalarda kullanımı, çoğunlukla tornalama ve delik büyütme işlemlerinde, çok az olarak da frezeleme işlemlerindedir [29].

2.2.4 Metal Borürler

Metal borür tozları, $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Mg}$ toz karışımlarının mekanokimyasal reaksiyon ortamında sentezlenmesi ile elde edilebilmektedir. Ayrıca Ti, Zr, Hf elementel tozlarının, elementel B tozu ile mekanik olarak alaşımlandırılması ile de borürlerin elde edilmesi mümkündür.

IVB grubu metal borürler, genel olarak, yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, yüksek termal iletkenlik, yüksek elektriksel iletkenlik, düşük yoğunluk ve yüksek kimyasal kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptirler. Bu özellikler, ileri teknoloji alanlarında kullanım yeri bulmalarına neden olmaktadır. IVB grubu metal borürler, karbotermik redüksiyon, metalotermik redüksiyon, ergimiş tuz elektrolizi, toz metalurjisi yöntemleri ve halojen metalurjisi ile üretilmektedir [30].

Titanyum Diborür (TiB_2), aşınma ve yüksek sıcaklık içeren uygulamalar için önem arz eden bir borürdür. TiB_2 , 3225 °C gibi yüksek bir ergime noktasına ve 4,52 g/cm³ düşük yoğunluğa sahiptir. Kesici takımlarda, aşınma direnci ekipmanlarında, zırh yapımında ve elektrolitik alüminyum üretiminde katot malzemesi olarak kullanılır. Nötron absorblama özelliği

bulunduğundan, yüksek sıcaklık nükleer reaktörlerde kontrol çubuk malzemesi olarak kullanılmaktadır [31].

Sıcak presle üretilmiş titanyum diborürün eğme mukavemeti 350-575 MPa, knoop sertliği değeri 2600 kg/mm² ve kırılma tokluğu 5-7 MPa. m^{1/2} dir. Elastiklik modülü 430-500 GPa ve poisson oranı 0.18-0.20'dir. TiB₂, SiC, TiC gibi oksit olmayan Al₂O₃ gibi oksit malzemelerle kompozit oluşturularak matris malzemenin dayanımı ve kırılma tokluğu artırılmaktadır [32].

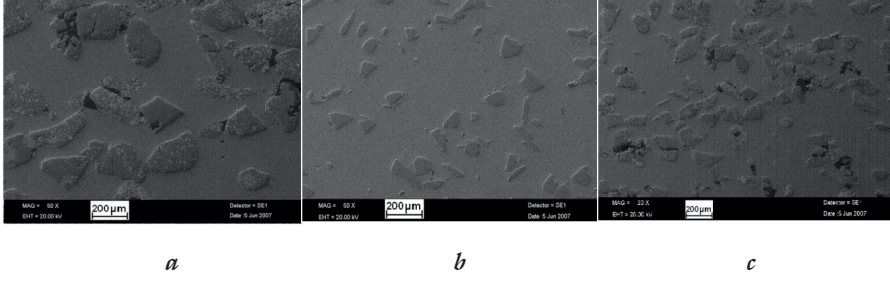
Zirkonyum Diborür (ZrB₂), sahip olduğu üstün özellikler (yüksek ergime noktası=3246 °C, Yüksek sertlik=2100 kg/mm² yüksek termal iletkenlik = 23-24 W/mK) sayesinde alüminyumun elektrokimyasal üretiminde katot olarak, aşındırma parçalarında, kesme takımlarında, nozullarda ve bazı zırh uygulamalarında kullanılır. Ayrıca yüksek oksidasyon direncine sahip olduğundan, geniş bir alanda kullanım yeri bulmaktadır. Bilinen en fazla kullanım alanı pota ve termokupl astarı yapımıdır [33].

Hafniyum Diborür (HfB₂), sahip olduğu mukavemet ve termal özelliklerinden ötürü yüksek hızlı araçlarda ısı kalkanı veya aerodinamik ana kenarlık olarak kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde bu borür, nükleer reaktör kontrol çubuklarında yeni bir malzeme olarak kullanılmaktadır [31,33].

3. Bor ve Ürünlerinin Kompozit Uygulamaları

Bor ve ürünleri kompozit malzemelerde takviye fazı veya matris olarak kullanılabilir. Bu ürünler daha çok metal matrisli kompozitlerde kullanılmakla birlikte, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitlerde de uygulama alanı bulabilmiştir. Bor ve ürünlerinin yüksek maliyetlerinden dolayı SiC, Al₂O₃ gibi diğer takviye malzemelerine oranla daha az kullanıldığı görülmektedir.

Orhan ve ark. [34], %99 saflıkta Al tozları matris olarak, %99 saflıkta B₄C tozları ise takviye olarak kullanmış ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında B₄C içeren metal matrisli kompozitler üretmiştir. Kompozitler toz metalürjisi tekniği ile üretilmiş, soğuk izostatik preslemeden sonra sıcak presleme yöntemiyle gözeneklilik minimuma indirilmiştir. Artan takviye oranlarıyla birlikte mikrosertlikte artış olduğu ve yoğunlukta azalma olduğu saptanmıştır. Şekil 2'de üretilen kompozitleri SEM görüntüleri verilmiştir [34].

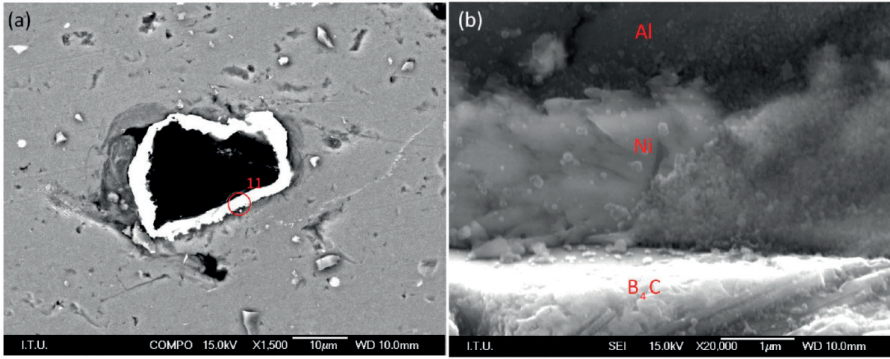


Şekil 2. Al/B_4C kompozitler a) %10 B_4C , b) %20 B_4C , c) %30 B_4C [34].

Al/B_4C kompozitler balistik açıdan zırh malzemesi olarak da kullanılabilir. Arslan ve ark. [35], savunma sanayisi için yaptıkları bir çalışmada, gözenekli bor karbür altlıklara 2024 alüminyum alaşımlarını argon ortamında basınçsız olarak emdirilmesi yöntemi ile B_4C / Al kompozitleri üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin içyapı, mekanik ve balistik özellikleri kontrol edilmiş; kalınlığı yaklaşık 1 cm olan kompozit plakaları cam elyaf örgülü destek plakası ile birleştirilerek elde edilen zırh sistemi, balistik testlerde 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağlamıştır [35]

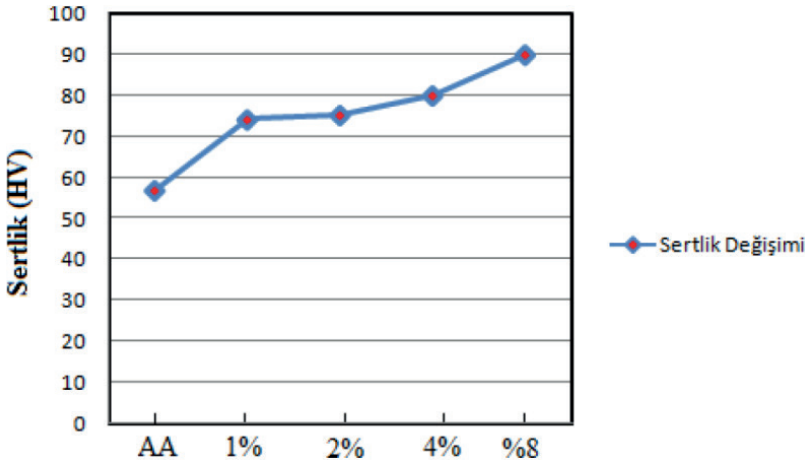
Alüminyum matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemelerin geleneksel döküm yöntemleriyle üretiminde, sıvı alüminyumun B_4C partiküllerini ıslatabilirliğinin düşük olması bir problemdir. Bu problemi çözmek için takviye partiküllerinin kaplanması ve ön ısıtma gibi işlemler kullanılır. Nikel, alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye fazın kaplanması için en çok tercih edilen metaldir.

Bir çalışmada [36], B_4C partiküllerinin yüzeyleri akımsız nikel ile kaplanarak veya farklı sıcaklıklarda oksitleyerek bor oksit tabakası oluşturularak ıslatılabilirlik iyileştirilmiştir. Akımsız nikel kaplanmış B_4C partikülleri kullanılarak döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretilmiştir. Yapılan çalışmalardan, yüzey özellikleri değiştirilen B_4C partiküllerinin, ergitme koşullarının optimizasyonu sağlandığında sıvı alüminyum tarafından ıslatılabilirliğinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır [36]. Şekil 3.'de Ni kaplanmış B_4C takviyeli bir kompozitin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. Nikel kaplanmış B_4C parçacığının Al matris içindeki SEM görüntüsü [36].

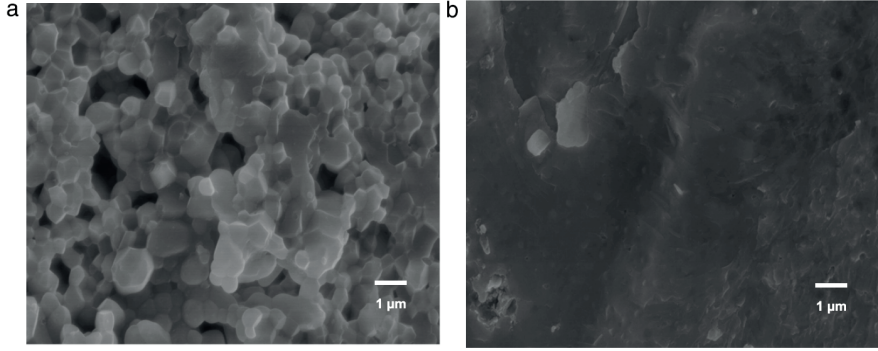
Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye oranlarına göre sertlik değişimi grafiği, Şekil 4'te Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye hacim oranlarına göre sertlik değişimi görülmektedir. Grafiğe göre %8 B_4C takviye oranında en yüksek sertlik (90 HV civarında) elde edilmiştir.



Şekil 4. Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye oranlarına göre sertlik değişimi [37].

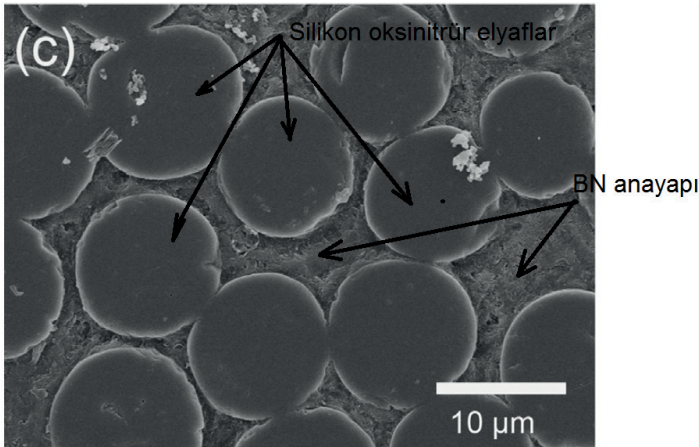
Ortopedik implant uygulamaları üzerine yapılan bir çalışmada [38], bor nitrür (BN) nano tüpleriyle (ortalama $1.98 \mu m$ boyu ve ortalama 71 nm çapında toz) takviye edilmiş hidroksiapatit (HA) matrisli (ortalama 210 nm boyu ve ortalama 37 nm çapında toz) bir kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzeme kıvılcım plazma sinterleme metoduyla üretilmiştir. %4 BN nano tüp içeren kompozit, HA ile karşılaştırıldığında elastik modülünde

%120 artış, sertlikte %129 artış, kırılma tokluğunda ise %86 artış gözlenmiştir (Şekil 5). Mekanik özelliklerdeki bu iyileşme, tane yapısındaki küçülme ve BN nanotüplerinin çatlakları köprülemesi ile sağlanmıştır. Aynı zamanda bu kompozitin aşınma direncinde ise %75 iyileşme gözlenmiştir [38].



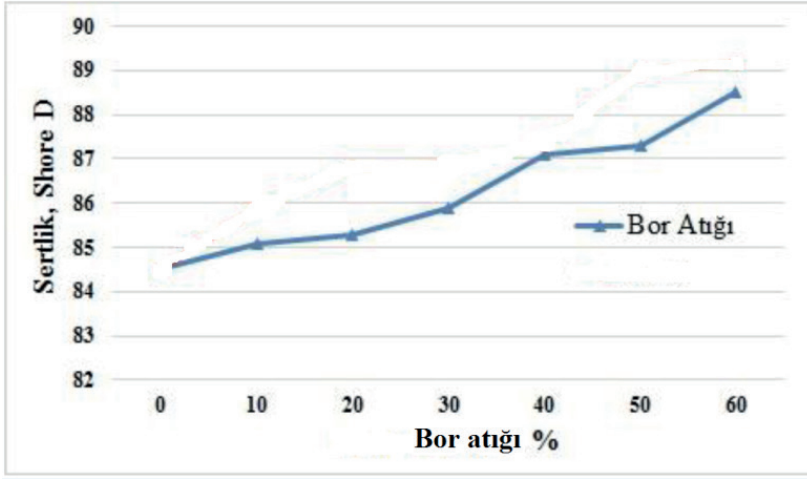
Şekil 5. Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) gözenekli HA, b) daha yoğun yapıda HA/BN nano tüp kompozit malzeme [38].

Zou ve ark. [39] yaptığı bir çalışmada Silikon oksinitrür ($S-N-O_f$) sürekli elyaflarla takviye edilmiş bor nitrür (BN) matrisli seramik kompozitlerin oksiasetilen üfleci altında ablasyon davranışı incelenmiştir. Şekil 6'da $S-N-O_f/BN$ kompozitin mikro yapısı görülmektedir [39].



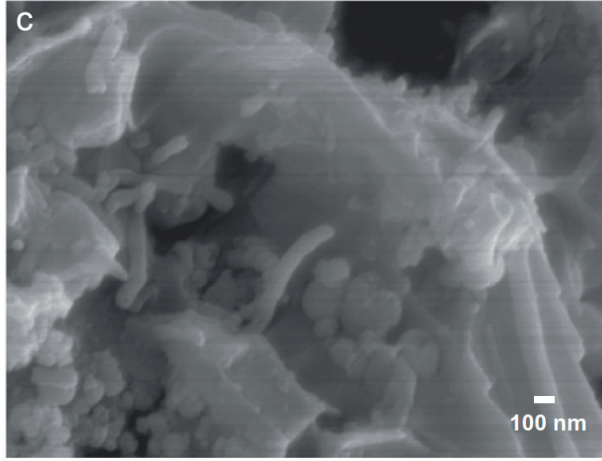
Şekil 6. $S-N-O_f/BN$ kompozitin mikro yapısı [39].

Afyon Kocatepe üniversitesinde yapılan bir tez çalışmasında bor atığı katkı polimer kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Bor atığı ise öğütülüp $75\ \mu\text{m}$ 'luk ortalama toz boyutu elde edilmiştir (Şekil 7). Elde edilen kompozitlerin sertliği ve basma dayanımı bor atığı miktarıyla artmıştır. Ayrıca bor atığı takviyesi ile aşınma direncinde de artış gözlenmiştir [40].



Şekil 7. Bor atığı takviyeli epoksi matrisli kompozitin takviye miktarı-sertlik ilişkisi [40].

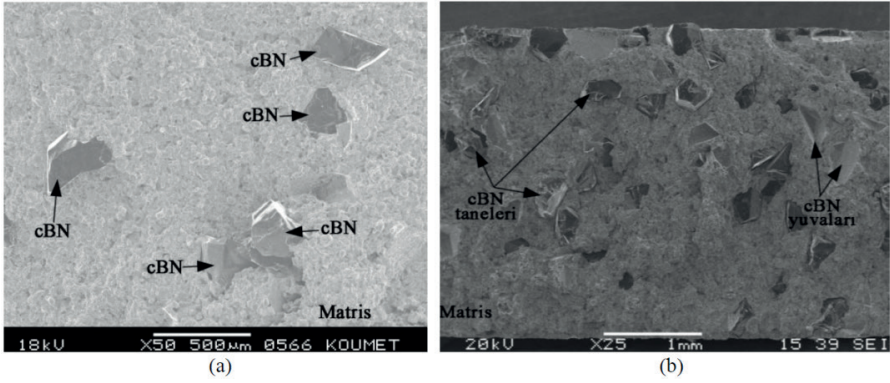
Lahiri ve ark. [41] yaptığı bir çalışmada bor nitrür nano tüplerle (BNNT) takviye edilmiş Al matrisli kompozitler kıvılcım plazma sinterleme yöntemiyle üretilmiştir. %2 ve %5 oranlarında takviyeli kompozitler üretilmiştir. %5 oranında üretilen kompozit numunede akma ve basma dayanımı sırasıyla 88 MPa ve 216 MPa elde edilmiştir ve bu değerler takviye edilmemiş Al'a göre %50 daha yüksektir. Şekil 8'de bu kompozitin iç yapısı görülmektedir [41].



Şekil 8. Al/BN nano tüp kompozit iç yapısı [41].

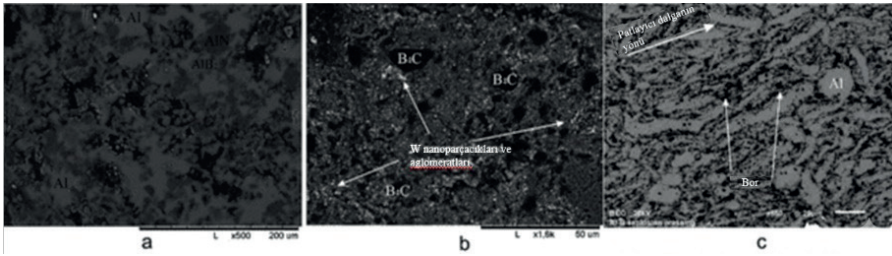
Lua ve ark. [42] yaptığı bir çalışmada %40 hacim oranında kübik bor nitrür (kBN) takviyeli NiCrAl alaşımı matrisli kompozit malzemeyi mekanik alaşımlama yöntemi ile üretmişlerdir. Mekanik alaşımlama için öğütme esnasında bilyelerde yabancı elementlerin bulaşmasını engellemek için, öğütme bilyelerini Ni ile kaplamışlardır. Üretilen kBN/NiCrAl kompozit numunede 1150 HV sertlik değerini elde etmişlerdir [42].

Fırat üniversitesinde yapılan bir doktora tezinde mermer kesici takımlarında elmas yerine kübik bor nitrür (kBN) takviye parçacıklarının kullanılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Matris malzemesi olarak 45-50 μm ortalama toz boyutunda %99.9 saflıkta bronz (%85 Cu + %15 Sn) tozları kullanılmıştır. Numuneler 600-700 °C aralığında sinterlenmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre kBN takviyeli kompozit numuneler elmas kadar olmasa da yakın özellikler sergilemişlerdir. Ayrıca kBN takviyeli kesici takım soketleri elmas takviyeli olanlara göre %30 daha fazla eğme dayanımı sergilemişlerdir. Şekil 9'da kBN takviyeli bir kesici takımın SEM görüntüleri verilmiştir [43].



Şekil 9. kBN takviyeli kesici takımın kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) 600°C'de sinterlenmiş b) 700°C'de sinterlenmiş [43]

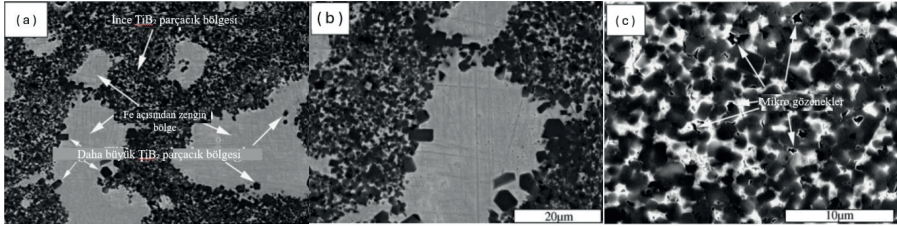
Gorshenkov ve ark. [44] yaptığı bir çalışmada Al-7075 alaşımı matrisli ve amorf bor, hegzagonal bor nitrid (hBN) ve bor karbür (B_4C) takviyeli kompozitler üretilmiş ve tribolojik testlere tabi tutulmuştur. hBN takviyeli olan numune vakum emdirme tekniği ile 800 °C'de üretilmiştir. Amorf bor takviyeli kompozit 100 μm ortalama toz boyutunda Al tozları %30 hacim oranında ve 10 μm ortalama toz boyutunda amorf bor tozları kullanılarak patlamalı presleme yöntemi ile üretilmiştir. %20 hacim oranında bor karbür (ortalama toz boyutu 100 μm) ve %2 tungsten tozları (ortalama toz boyutu 50 nm) ve Al matrisi ile mekanik alaşımlama metodu ile üretilmiştir. Test sonuçlarına göre en iyi tribolojik performansı B_4C ve W takviyeli numune göstermiştir. Bu üç numunenin de SEM görüntüleri şekil 10'da verilmiştir [44].



Şekil 10. Al matrisli a) hBN, b) B_4C ve c) amorf B ; takviyeli kompozit numunelerin SEM görüntüleri [44].

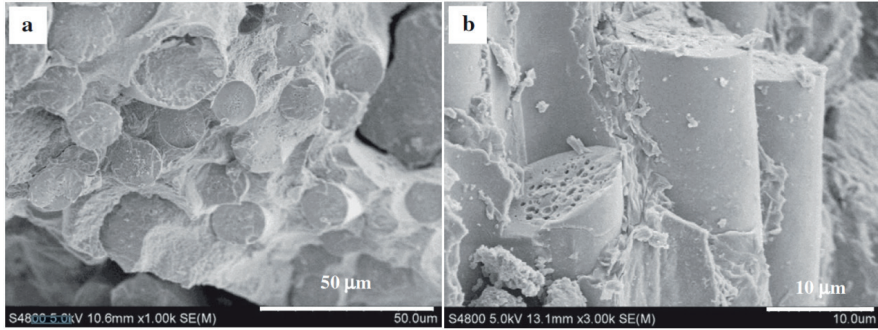
Wang ve ark. [45] yaptığı bir çalışmada Fe-Ti-B ön sisteminden %10-30-50-70 gibi farklı hacim oranlarında Fe içeriğiyle, in-situ tekniği kullanılarak

TiB₂ takviyeli kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit numuneler incelendiğinde 3 farklı bölge tespit edilmiştir. Fe içeriği bakımından zengin bölgeler, ince taneli TiB₂ bakımından zengin bölgeler ve kaba taneli TiB₂ bakımından zengin bölgeler ve de ayrıca az miktarda mikro gözenekler olduğu görülmüştür. Elde edilen kompozitin SEM görüntüsü şekil 11'de verilmiştir ve aşınma direnci takviyesiz çelik numuneden daha yüksektir [45].



Şekil 11. Çelik matrisli TiB₂ takviyeli kompozitin SEM görüntüleri [45].

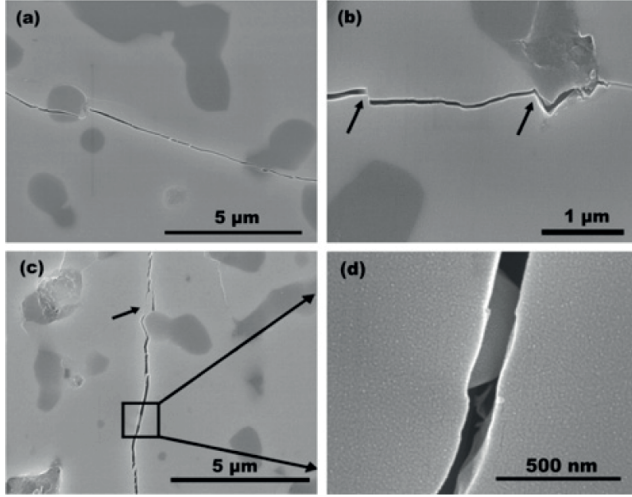
Li ve ark. [46] yaptığı diğer bir çalışmada ise silisyum bor nitrür (SiBN) elyaf takviyeli ve bor nitrür (BN) matrisli kompozit ön şekil emdirme tekniği ile 1000 °C'de üretilmiştir ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen kompozitin yoğunluğu 1.75 g/cm³ ve gözeneklilik miktarı %7.77'dir. Numunenin bükülme dayanımı 120.1 MPa, elastik modülü 46.6 GPa ve kırılma tokluğu 4.68 MPa.m^{1/2}dir. Kompozitin SEM görüntüsü şekil 12'de verilmiştir [46].



Şekil 12. SiBN elyaf takviyeli BN matrisli kompozitin SEM görüntüsü [46].

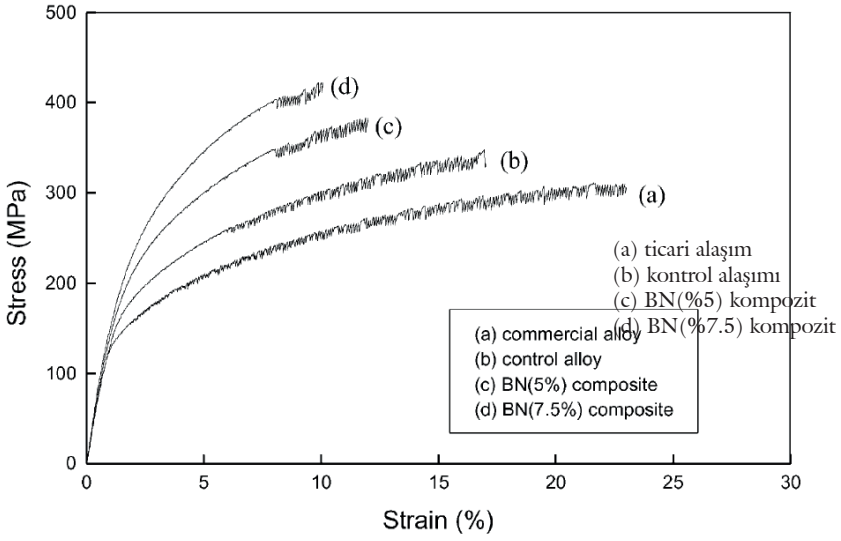
Yue ve ark. [47] yaptığı bir çalışmada ise zirkonyum diborür (ZrB₂) ve silisyum karbür (SiC) matrisli, bor nitrür nanotüp (BNNT) ve bor nitrür nanolevha (BNNP) karışımı takviyeli kompozit malzemeyi kıvılcım plazma sinterleme metodu ile üretmişlerdir. Takviye oranı %24.4'e kadar kırılma

tokluğunda artış gerçekleşmiştir. Kırılma tokluğu 3.73'ten 4.64 MPa.m^{1/2}'ye yükselmiştir. Kırılma tokluğundaki bu gelişme çatlak köprülenmesi, çatlak dallanması ve çatlak sapması mekanizmalarının birlikte etki etmesi ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 13'te bu mekanizmaların SEM görüntüleri verilmiştir [47].



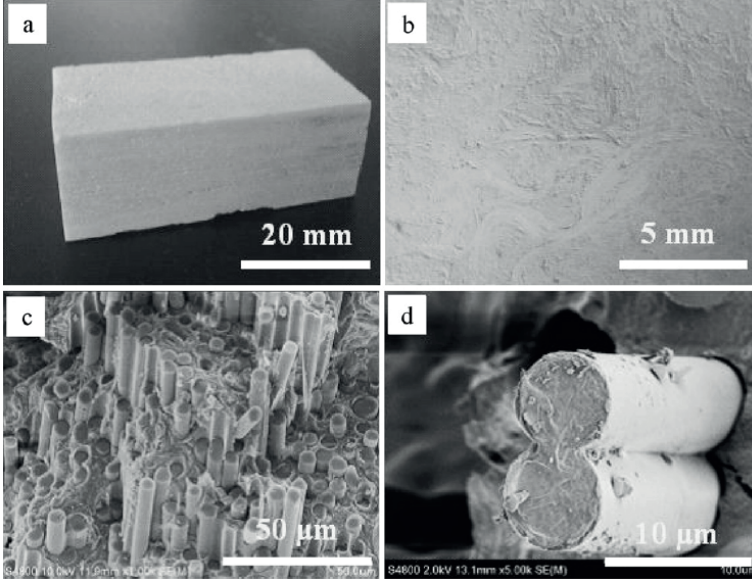
Şekil 13. (BNNT-BNNP)/(ZrB₂-SiC) kompozit malzemenin mikro çatlak SEM görüntüleri; a) mikro çatlak, b) çatlak sapması, c) çatlak dallanması, d) çatlak köprülenmesi (nanolevhalar vasıtası ile) [47].

Lee ve ark. [48] yaptığı bir çalışmada Al-%4.5Mg alaşımı matrisli ve bor nitrür (BN) takviyeli bir kompozit malzeme 800 °C'de basınçsız infiltrasyon metodu ile üretilmiştir. Üretim esnasında Al ve BN ara yüzeyinde oluşan reaksiyon sonucu alüminyum nitrür (AlN) intermetalik bileşiği oluşmuştur. Bu reaksiyon in-situ reaksiyonu olarak bilinmektedir. Elde edilen %7.5 BN takviyeli Al alaşımı esaslı kompozit ince taneli bir yapıdadır ve tane boyutu ortalama 4µm civarındadır ki bu değer ticari bir Al alaşımınınkinden 3.5 kez daha incedir. Hem BN takviyesi hemde in-situ prosesi sonucu oluşan AlN intermetalik bileşiği sayesinde dayanımda çok iyi gelişme sağlanmıştır. Şekil 14'te kompozit malzeme ve Al alaşımın gerilim-şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere BN takviyesinin dayanıma önemli ölçüde katkısı bulunmaktadır [48].



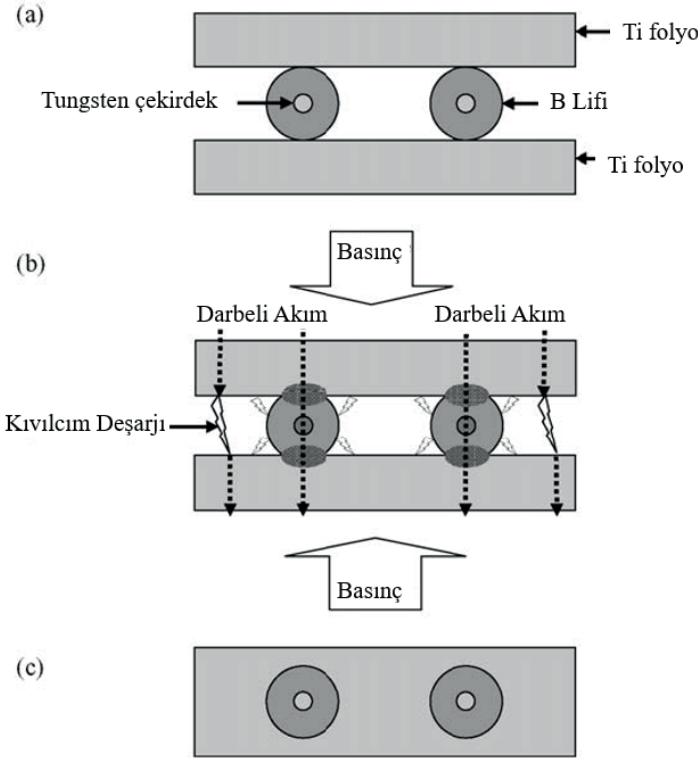
Şekil 14. Al-% 4.5 Mg alaşımı matrisli BN takviyeli kompozit malzeme ile Al-% 4.5 Mg alaşımının gerilme - şekil değiştirme eğrisinin karşılaştırılması [48].

Li ve ark. [49] bor nitrid (BN) elyaflarla takviye edilmiş BN matrisli kompozit bir malzemeyi ön şekil infiltrasyon yöntemi ile üretmişlerdir. Kompozit BN'nin ince kristalli ve yüksek içerikli yapısına sahiptir. Yoğunluğu 1.60 gr/cm^3 ve gözeneklilik oranı %4.66'dır. Kompozit iyi mekanik özellikler sergilemiştir ve bükülme dayanımı 53.8 MPa, elastik modülü 20.8 GPa, kırılma tokluğu $6.88 \text{ MPa.m}^{1/2}$ dir. Kırılma yüzeyinde yapılan SEM incelemelerinde kompozitin iyi matris/takviye arayüzüne sahip olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda kompozit mükemmel dielektrik özellikler sergilemiştir. Elde edilen kompozit numunenin optik ve SEM görüntüleri şekil 15'te verilmiştir [49].



Şekil 15. BN elyaf/BN kompozitin optik ve SEM görüntüleri [49].

Mizuuchi ve ark. [50] yaptığı diğer bir çalışmada ise bor elyaf takviyeli titanyum matrisli kompozit malzeme puls akımı sıcak presleme yöntemi ile 800 °C'de ve 32 MPa basınçta üretilmiştir ve kompozitteki hacimce bor elyaf yüzdesi 17.2'dir. Üretim sıcaklığı 900 °C'nin üzerine çıkarıldığında matris ve elyaf arayüzeyinde TiB_2 ve bor elyafın merkezinde bulunan tungsten çekirdeği etrafında ise amorf yapıda bor kristalleri olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan test sonucunda kompozitin elde edilen çekme dayanımı 706 MPa'dır. Şekil 16'da bu kompozitin üretimi şematik olarak gösterilmiştir [50].

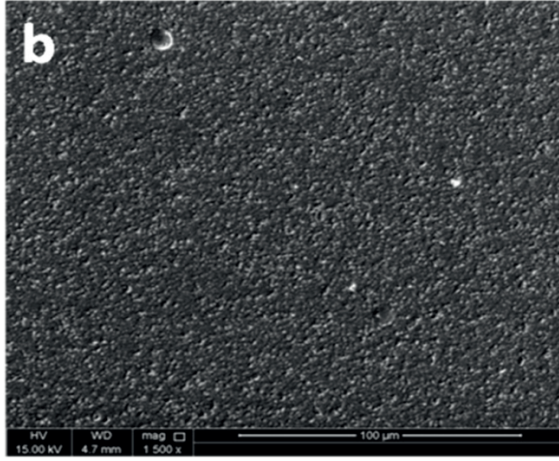


Şekil 16. Ti matrisli ve bor elyaf takviyeli kompozitin üretimi [50].

4. Bor ve Ürünlerinin Kompozit Kaplama Uygulamaları

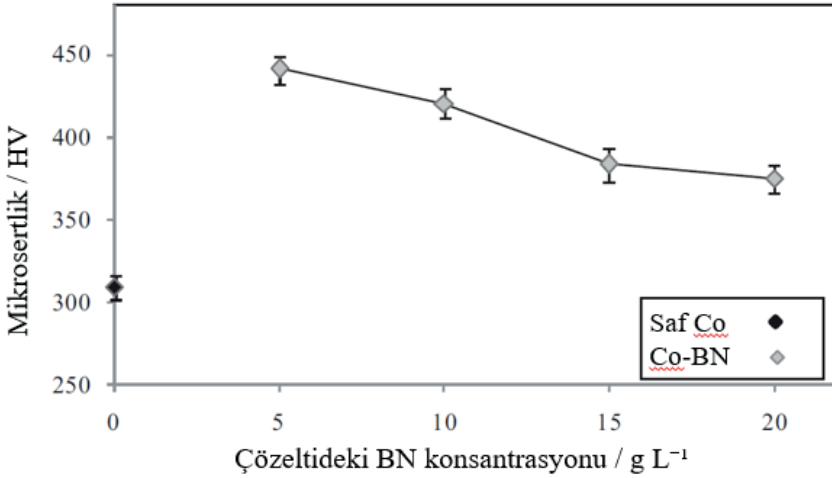
Bor ve ürünleri farklı üretim metodlarıyla çelik, alüminyum vb. metal alaşımları ile seramik veya polimerik malzemeler üzerine mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla kaplanabilmektedir. Bor ve ürünleri çeşitli metaller, seramik parçacıklar ve iletken polimerlerle birlikte kaplama olarak kullanılabilir. Borun element olarak Ni ile yaptığı alaşımların kompozit kaplamalarda kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu alaşımda Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2 , SiC , elmas, CeO_2 , TiO_2 gibi takviye elemanları kullanılabilir. Ayrıca bor nitrüründe kompozit kaplamalarda metaller veya polimerle birlikte kullanıldığı görülmektedir.

Shakoor ve ark. [51] yaptığı bir çalışmada çelik altlık üzerine Ni-B matrisli, Al_2O_3 takviyeli kompozit kaplama elektro-depolama yöntemi ile kaplanmıştır. Elde edilen kaplamanın sertlik, elastik modülü ve korozyon direnci, Ni-B alaşım kaplamaya göre daha iyidir ve şekil 17’de Ni-B- Al_2O_3 kompozit kaplamanın SEM görüntüsü verilmiştir [51].



Şekil 17. Ni-B- Al_2O_3 kompozit kaplamanın SEM görüntüsü [51].

Shahri ve ark. [52] kobalt (Co) matrisini nano boyutta (70nm) hegzagonal bor nitrür (hBN) ile takviye ederek elektro-depolama yöntemi ile bakır altlık üzerine kompozit kaplama yapmışlardır. Saf Co kaplama ile karşılaştırıldığında optimum kompozisyona sahip hBN parçacıklı kompozit kaplama daha kaba yüzey pürüzlülüğü, daha yüksek mikrosertlik ve aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir. Şekil 18’de hBN içeriği ile mikrosertlik ilişkisinin grafiği verilmiştir [52].

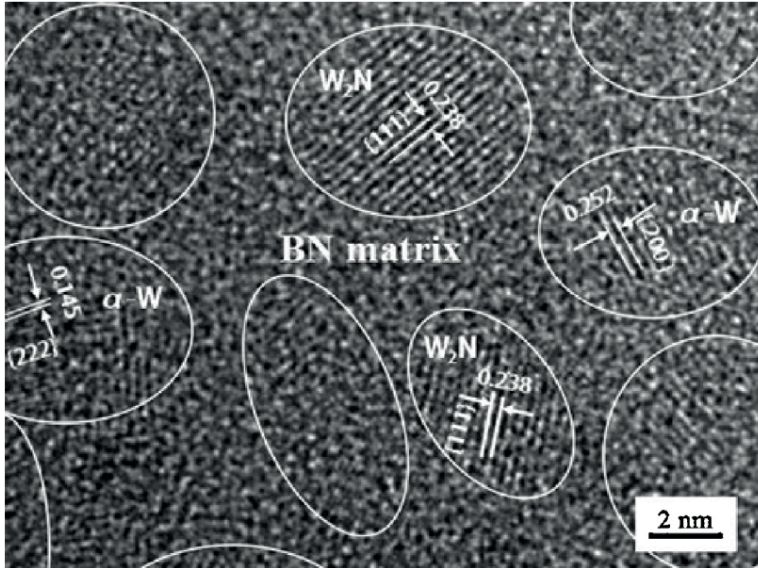


Şekil 18. hBN içeriği ile mikrosertlik ilişkisinin grafiği [52].

Xiaozhen ve ark. [53] yaptığı diğer bir çalışmada ise nikel matrisi içerisine samaryum oksit (Sm_2O_3) ve titanyum diborür (TiB_2) parçacıkları takviye edilerek elektro-depolama yöntemi ile kompozit kaplama üretilmiştir. 0.6-3 g/l arasında değişen konsantrasyonlarda Sm_2O_3 parçacık kullanılmıştır. Sm_2O_3 ve TiB_2 tek başına takviye olarak kullanımına göre birlikte kullanımı sertlik ve aşınma direncinde artışa, sürtünme katsayısında azalmaya neden olmuştur [53].

Huang ve ark. [54] yaptığı bir çalışmada korozyon direncini geliştirmek amacıyla poliamid matris, hegzagonal bor nitrür ile takviye edilerek çelik altlık üzerine kompozit kaplama elde edilmiştir. hBN parçacıklarının % 5'lik hacim oranındaki numunesi en yüksek korozyon direncini sergilemiştir [54].

Bor nitrür içeren diğer bir kompozit kaplama ise Yu ve ark. [55] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada WBN kompozit filmleri farklı bor içeriklerinde çoklu hedef magnetron sıçratma tekniği ile üretilmiştir. En iyi sertlik ve basma dayanımı %38.1 bor içeriği ile elde edilmiştir. Bu değerdeki sertlik 36.1 GPa ve basma dayanımı 2.6 GPa'dır. Ayrıca kaplama korozyon direncini de artırmıştır. Şekil 19'da kompozit kaplamanın HRTEM görüntüsü verilmiştir [54].



Şekil 19. WBN kompozit kaplamanın HRTEM görüntüsü [55].

5. Sonuçlar

Bu kapsamlı inceleme, bor ve bileşiklerinin, özellikle bor karbür (B_4C), bor nitrid (BN) ve metal borürlerin (TiB_2 , ZrB_2) yüksek performanslı kompozit malzemeler alanında oynadığı kritik rolü ve sunduğu potansiyeli açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel alaşım ve malzemelerin ötesine geçen üstün özellikler arayışı, bor esaslı takviyelerin kullanımını zorunlu kılmıştır.

Bor Bileşiklerinin Üstün Mekanik Performansı:

Bor karbür ve bor nitrid, elmasan sonra gelen en sert malzemeler olarak kompozitlerin mekanik performansını dramatik bir şekilde artırmaktadır.

- **Bor Karbür (B_4C):** B_4C 'nin yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu, onu zırh uygulamaları için ideal bir takviye yapmaktadır. Örneğin, Al/ B_4C kompozitlerin, balistik testlerde 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağladığı kanıtlanmıştır. B_4C takviye oranı arttıkça, Al matrisli kompozitlerin mikrosertliğinin de önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Bu, sertlik artışı ve yoğunlukta azalma sağlayan toz metalurjisi ve sıcak presleme gibi yöntemlerle desteklenmektedir.
- **Bor Nitrid (BN):** nano tüpleri ve parçacıkları, özellikle seramik ve metal matrisli sistemlerde olağanüstü performans iyileştirmeleri sunmaktadır. Hidroksiapatit (HA) matrisli kompozitlerde, BN nano tüp takviyesi, kırılma tokluğunda %86, elastik modülünde %120 ve sertlikte %129 gibi dikkat çekici artışlar sağlamıştır. Bu iyileşmeler, BN nanotüplerinin çatlak köprüleme mekanizmasıyla ilişkilidir. Al matrisli kompozitlerde ise %7,5 BN takviyesi, in-situ reaksiyonla oluşan AlN bileşiği sayesinde dayanımı önemli ölçüde artırmış, hatta ticari Al alaşımından 3,5 kat daha ince taneli bir yapıya ulaşmıştır. BN 'nin hegzagonal yapısı nedeniyle, hBN parçacıklı Co kaplamaların saf Co kaplamaya göre daha yüksek mikrosertlik ve aşınma direnci sergilediği gözlemlenmiştir.

Bor Bileşiklerinin Fonksiyonel Üstünlükleri:

Bor bileşikleri sadece mekanik dayanım sağlamakla kalmaz, aynı zamanda önemli fonksiyonel özellikler de sunar:

- **Nötron Absorpsiyonu ve Termal Kararlılık:** B_4C ve TiB_2 'nin yüksek nötron absorplama kabiliyeti, onları nükleer reaktörlerde kontrol çubuk malzemesi olarak vazgeçilmez kılmaktadır. hBN 'nin yüksek termal kararlılığı (indirgen atmosferde 1800 °C'ye kadar) ve yüksek ısı iletkenlikle birleşen elektriksel yalıtkanlığı, onu elektronik ve yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal yapmaktadır.

- Islatılabilirlik Sorunları ve Çözüm Yolları: B_4C gibi bor takviyelerinin sıvı Al matrisleri tarafından düşük ıslatılabilirliği, döküm yöntemlerinde karşılaşılan temel bir zorluktur. Bu sorunun üstesinden gelmek için, B_4C partiküllerinin yüzeyleri nikel ile akımsız kaplama veya bor oksit tabakası oluşturacak şekilde oksitleme gibi yüzey modifikasyon yöntemlerinin başarıyla uygulandığı görülmektedir. Bu çözümler, matris/takviye ara yüzey bağ kuvvetini iyileştirerek kompozit performansını artırmaktadır.
- Aşınma ve Korozyon Direnci: kBN takviyeli kesici takımların yüksek sıcak sertliği ve kırılma tokluğu sayesinde sert demir içerikli malzemelerin işlenmesinde üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca hBN'nin polimer matrisli kaplamalarda korozyon direncini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir.

Bor Kaynaklarının Stratejik Önemi:

Türkiye'nin boraks rezervleri açısından tek el konumunda olması ve borun yüksek katma değerli uç ürünlere dönüştürülmesi hedefi, bor esaslı kompozit araştırmalarına verilen önemi artırmaktadır. Bor atıklarının bile epoksi matrisli kompozitlerde sertliği ve aşınma direncini artırmak için başarıyla kullanılması, bu kaynağın ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi potansiyelini göstermektedir.

Gelecek Perspektifi:

Bor ve bileşikleri, hafif zırh, kesici takımlar, nükleer reaktör bileşenleri ve ortopedik implantlar gibi yüksek performans gerektiren alanlarda kritik öneme sahiptir. Özellikle BNNT ve BNNP karışımı takviyelerin, seramik matrislerde çatlak dallanması, sapması ve köprülenmesi gibi mekanizmalarla kırılma tokluğunu belirgin şekilde iyileştirmesi, ultra yüksek performanslı seramik matrisli kompozitlerin geliştirilmesi için büyük bir potansiyel vadetmektedir.

Sonuç olarak, bor ve ürünleri, kompozit bilminde mekanik üstünlük, termal kararlılık ve fonksiyonellik açısından çığır açıcı özellikler sunan, stratejik değeri yüksek malzemelerdir. Türkiye'nin kaynak zenginliği ile birleşen bu teknik potansiyel, bor esaslı kompozitlerin gelecekteki mühendislik uygulamalarında merkezi bir rol üstleneceğini işaret etmektedir.

6. Kaynaklar

1. Çıtak, R. Metalik Ba-Al Başlangıç tozlarının Düşük Sıcaklıklarda Oksidasyonu ile Al Matrisli Kompozit Üretimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-26, 1998.
2. Fedai, Y.; Basar, G.; Kirli Akin, H. (2022) Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. *Tehnički vjesnik* 29, 742-751.
3. Fedai, Y. (2023) Optimization of drilling parameters in drilling of MW-CNT-reinforced GFRP nanocomposites using Fuzzy AHP-weighted taguchi-based MCDM methods. *Processes* 11, 2872.
4. Callister, W.D.; Rethwisch, D.D.; Genel, K. *Malzeme bilimi ve Mühendisliği*; Nobel: 2013.
5. Başar, G.; Fedai, Y.; Akin, H.K. (2020) Kompozit malzemelerin delme işleminde itme kuvvetinin taguchi metodu ile optimizasyonu ve regresyon analizi ile tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35, 969-982.
6. Fedai, Y. (2024) Karbon nano tüp katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin delme parametrelerinin Taguchi tabanlı Critic-CoCoSo yöntemleriyle optimizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7, 729-750.
7. Yastımoğlu, F.; Özkan, A. (2017) Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 5, 56-66.
8. Garrett, D.E. *Borates: Handbook of deposits, processing, properties, and use*; Elsevier: 1998.
9. Bello, I.; Chong, Y.; Leung, K.; Chan, C.; Ma, K.; Zhang, W.; Lee, S.; Layyous, A. (2005) Cubic boron nitride films for industrial applications. *Diamond and related materials* 14, 1784-1790.
10. Atasoy, A. (Year) Processing and characterisation of chromite for metallurgical applications. In *Proceedings of the Proc 11th Int. Metall. and Metal. Conf. Istanbul*, pp. 718-729.
11. Odası, T.M.M. (2003) Bor Raporu. *Metaller Dergisi* 134, 1-50.
12. Teşkilatı, D.P.; Komisyonu, M.Ö.İ. *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri*; DPT: 2001.
13. Yiğitbaşıoğlu, H. (2004) Türkiye için önemli bir maden: Bor. *Coğrafi Bilimler Dergisi* 2, 13-25.
14. Acarkan, N. (2002) Bor ürün çeşitleri ve kullanım alanları, I. Uluslar arası bor sempozyumu, 1-5.

15. Samuk, T.B.(2015) Yapı malzemesi üretiminde kullanılan bor türevlerine yönelik çalışmaların analizi.
16. Akdoğan, E.(2008) Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
17. Alp, E.; Karaçay, E.; Cabbar, H.C.(2013) Düşük sıcaklıkta bor karbür üretimi ve karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 28.
18. Weimer, A.W. *Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing*; Springer Science & Business Media: 2012.
19. Lee, B.-S.; Kang, S.(2001) Low-temperature processing of B₄C–Al composites via infiltration technique. Materials Chemistry and Physics 67, 249-255.
20. Pierson, H.O. *Handbook of refractory carbides and nitrides: properties, characteristics, processing and applications*; William Andrew: 1996.
21. Pekin, Ş. Hegzagonal Bor Nitrür Sentezinde Reaksiyon Hızını Kontrol Eden Aşamalar ve Turbostratik-Hegzagonal Yapı Geçışı. Yüksek Lisans Tezi, 1992.
22. KÖYTEPE, S.; AKSOY, B.; SEÇKİN, T.(Yüksek Isıl Dayanıma Sahip Bor Nitrür Esaslı Poliimid Nanokompozitlerinin Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi.
23. Kumashiro, Y. *Electric refractory materials*; CRC Press: 2000.
24. Funahashi, T.(1992) Development and application of high-purity hexagonal boron nitride (h-BN) powder. Kawasaki Steel Giho 24, 135-141.
25. Johnson, D.W.(1981) Nonconventional powder preparation techniques.
26. Lipp, A.; Schwetz, K.A.; Hunold, K.(1989) Hexagonal boron nitride: fabrication, properties and applications. Journal of the European Ceramic Society 5, 3-9.
27. Kostić, Ž.G.; Stefanović, P.L.; Pavlović, P.B.; Cvetinović, D.B.; Šikmanović, S.Đ.(2000) Optimal plasma process routes for boron nitride (BN) powder production from boric acid (H₃BO₃). Ceramics international 26, 165-170.
28. Aydoğdu, A.; Sevinç, N.(2003) Carbothermic formation of boron nitride. Journal of the European Ceramic Society 23, 3153-3161.
29. Şahin, Y. *Talaş kaldırma prensipleri*; Nobel Yayın Dağıtım: 2001.
30. Canöz, B.; Metin, A.Ü.; Gürü, M.(2021) Mekanokimyasal yöntemle elementlerinden magnezyum diborür (MgB₂) sentezi ve enerjetik madde olarak kullanımı. Politeknik Dergisi 24, 933-941.
31. Otmer, K. Encyclopedia of Chemical Technology., Volum 19, John Wiley and Sons. 1962.

32. TÖRE, İ.; AY, N.(Borlu Seramiklerin Karakterizasyonu Characterisation of Boron Ceramics.
33. Huppertz, H. Book Review: Handbook of Ceramic Hard Materials. Vols. 1+ 2. Edited by Ralf Riedel. **2001**.
34. Orhan, A.; Gür, A.; Çalığıülü, U.(2007) Al matrisli B4C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 4, 8-13.
35. Arslan, G.; Kara, F.; Turan, S.; Kalemtaş, A.(Bor karbür – Alüminyum kompozitlerin balistik performansı.
36. Kılıçaslan, A. Modification of surface properties of B4C particles to improve wettability for Al-B4C composites. Yıldız Teknik üniversitesi, 2009, 2009.
37. TAŞCI, U.; Gökmeşe, H.; Bostan, B.(2013) AA 2014 Al Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 1, 161-168.
38. Lahiri, D.; Singh, V.; Benaduce, A.P.; Seal, S.; Kos, L.; Agarwal, A.(2011) Boron nitride nanotube reinforced hydroxyapatite composite: mechanical and tribological performance and in-vitro biocompatibility to osteoblasts. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 4, 44-56.
39. Zou, C.; Zhang, C.; Li, B.; Wang, S.; Xie, Z.; Song, Y.(2015) Ablation behavior of boron nitride based ceramic composites reinforced by continuous silicon oxynitride fiber. Ceramics International 41, 4768-4774.
40. Özorak, C. Bor atığı katkılı polimer kompozitlerin aşınma ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ..., 2014.
41. Lahiri, D.; Hadjikhani, A.; Zhang, C.; Xing, T.; Li, L.H.; Chen, Y.; Agarwal, A.(2013) Boron nitride nanotubes reinforced aluminum composites prepared by spark plasma sintering: Microstructure, mechanical properties and deformation behavior. Materials Science and Engineering: A 574, 149-156.
42. Luo, X.-T.; Li, C.-J.; Yang, G.-J.(2013) Correlations between milling conditions and iron contamination, microstructure and hardness of mechanically alloyed cubic BN particle reinforced NiCrAl matrix composite powders. Journal of alloys and compounds 548, 180-187.
43. Durmuş, K. Doğal taş kesici takımlarda kübik bor nitritin (cBN) alternatif aşındırıcı olarak kullanılmasının araştırılması. Fırat Üniversitesi, 2012, 2012.
44. Gorshenkov, M.; Kaloshkin, S.; Tcherdyntsev, V.; Danilov, V.; Gulbin, V.(2012) Dry sliding friction of Al-based composites reinforced with va-

- rious boron-containing particles. *Journal of alloys and compounds* 536, S126-S129.
45. Wang, Y.; Zhang, Z.; Wang, H.; Ma, B.; Jiang, Q.(2006) Effect of Fe content in Fe–Ti–B system on fabricating TiB₂ particulate locally reinforced steel matrix composites. *Materials Science and Engineering: A* 422, 339-345.
 46. Li, D.; Zhang, C.; Li, B.; Cao, F.; Wang, S.; Li, J.(2012) Mechanical properties of unidirectional SiBN fiber reinforced boron nitride matrix composites. *Materials Letters* 68, 222-224.
 47. Yue, C.; Liu, W.; Zhang, L.; Zhang, T.; Chen, Y.(2013) Fracture toughness and toughening mechanisms in a (ZrB₂–SiC) composite reinforced with boron nitride nanotubes and boron nitride nanoplatelets. *Scripta Materialia* 68, 579-582.
 48. Lee, K.; Sim, H.; Heo, S.; Yoo, H.; Cho, S.; Kwon, H.(2002) Tensile properties and microstructures of Al composite reinforced with BN particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33, 709-715.
 49. Li, D.; Zhang, C.; Li, B.; Cao, F.; Wang, S.; Li, J.(2011) Preparation and properties of unidirectional boron nitride fibre reinforced boron nitride matrix composites via precursor infiltration and pyrolysis route. *Materials Science and Engineering: A* 528, 8169-8173.
 50. Mizuuchi, K.; Inoue, K.; Sugioka, M.; Itami, M.; Kawahara, M.; Yamauchi, I.(2006) Microstructure and mechanical properties of boron-fiber-reinforced titanium-matrix composites produced by pulsed current hot pressing (PCHP). *Materials Science and Engineering: A* 428, 175-179.
 51. Shakoor R.A., Kahraman R., Waware U., Wang Y., Gao W., (2014) Properties of electrodeposited Ni–B–Al₂O₃ composite coatings, *Material and Desing* 64, 127-135.
 52. Shahri, Z.; Allahkaram, S.; Zarebidaki, A.(2013) Electrodeposition and characterization of Co–BN (h) nanocomposite coatings. *Applied surface science* 276, 174-181.
 53. Xiaozhen, L.; Yifan, L.; Lingling, S.; Xiaowen, S.(2010) Preparation and performance of electrodeposited Ni-TiB₂-Sm₂O₃ composite coatings. *Journal of Rare Earths* 28, 97-101.
 54. Huang, Y.-C.; Lo, T.-Y.; Chao, C.-G.; Whang, W.-T.(2014) Anti-corrosion characteristics of polyimide/h-boron nitride composite films with different polymer configurations. *Surface and Coatings Technology* 260, 113-117.
 55. Yu, L.; Zhao, H.; Xu, J.(2014) Mechanical, tribological and corrosion performance of WBN composite films deposited by reactive magnetron sputtering. *Applied surface science* 315, 380-386.

