

Investigation Of Mechanical Properties Of Nano Boron Nitride Added Aluminum Material Produced By Different Production Method

H. Sercan Çubuk^a, Uğur Çavdar^{b,1}

^a Izmir Demokrasi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering Program, 35580, Izmir, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-6598-351X

^b Izmir Demokrasi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 35580, Izmir, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-3434-6670

Abstract

Aluminum is a metal that is frequently used in the industry and stands out with its lightness. The development of Aluminum, which has a good strength/weight ratio as a result of various alloying and production techniques, continues. While this process is being done, different production methods and nanotechnological material contribution draw attention. When the literature was scanned, it was seen that nano Boron Nitride additive made improvements to aluminum in terms of strength, hardness, weight, machinability and cost reduction. In this review, the hardness, yield stress and tensile stress properties of Nano Boron Nitride, which is added to Aluminum with different production methods and different percentages, were investigated.

Keywords: “Aluminum, internal structure, nano boron nitrate, sintering, powder metal.”

1. Giriş

Periyodik cetvelde 3A grubunda yer alan ve 659,8°C’de eriyen metallere alüminyum (Al) denir. Alüminyum metali için mukavemet, mekanik, iletkenlik, korozyon direnci gibi özellikleri çeşitli alaşımlandırma ve imal teknikleriyle azaltılabilir veya arttırılabilir. Al malzemesi geri dönüşüme açıktır. Hafif ve yeryüzünde en çok kullanılan metallere dendir [1,2].

Ülkemizin %80’inde maden yatakları olan Bor elementinin kullanımıyla ilgili, birçok yerli çalışma mevcuttur. Periyodik tabloda 3A grubu elementlerinin en hafifi olan Bor, temizlik malzemelerinden roket yakıtına, kompozit malzeme katkısından cama kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bor ve bor takviyeli bileşiklerin kullanımını teşvik etmeye dair çalışmalar ülkemizde Bor Araştırma Enstitüsü tarafından yapılmaktadır [3,4].

İçyapısı ‘hegzagonal’ veya ‘kübik’ olarak adlandırılan Bor Nitrür (BN), Bor (B) ve Azot (N) elementlerinin bir araya gelmesinden oluşur. Hegzagonal BN yeryüzündeki grafit ile aynı kristal yapıya sahip olduğu için beyaz grafit olarak adlandırılır. BN, 1300-1450°C arasında reaksiyon verir [5,6]. BN’nin içyapısında zayıf Van der Waals bağları vardır. Yüksek sıcaklıklardaki üretimlerde kullanıma uygundur [7,8]. Nano boyutta takviye elemanı olarak kullanılabilceği ve kompozit malzeme oluşturabileceği bilinmektedir [9].

Çapı 100 µm’den az olan nano malzemelerin; iyi düzeyde optik, elektronik ve mekanik özellikleri bulunmaktadır. Kimyasal bağlayıcı özellikleri, takviye malzemesinde mekanik ve mukavemet artışları sağlayabilmektedir [10,11]. Nano Bor Karbür (NBK); malzeme üzerinde mukavemet artışı sağladığı için, nano BN ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır [6]. Yarı iletken bu malzemenin oksidasyona karşı iyi bir direnci vardır. Biyomedikal alanlarda da bahsi geçen yapı sıklıkla kullanılmaktadır [6,12-16].

Otomotiv endüstrisinden sağlık alanına kadar nano BN kompozitlerin kullanımı artmaktadır. Örnek olarak fren diskleri, hafif gövde tasarımları, metal elektrik çubukları, nano biyokompozit yapı iskeleti verilebilmektedir. Bu malzemeler imal edilirken; homojen içyapı, düşük maliyet, oksidasyon direnci ve mukavemet artışı kavramları dikkate alınır [11,17-24]. Ayrıca eşanjör, kondenser ve radyatör gibi ısı değiştiricilerinin fin ve peteklerinde güçlü ve kararlı ısı iletimi için nano BN’ın kullanıldığı görülmektedir [25-27].

¹ Corresponding Author
E-mail Address: ugur.cavdar@idu.edu.tr

Geçmiş yıllardaki araştırmalarda NBK takviyeli alüminyumun mukavemet özelliklerinin arttığı görülmektedir [28]. NBK, yüksek sıcaklıklarda zayıf oksidasyon direnci verir [29-31]. Nano BN'nin yapısı NBK'ya göre daha esnek. Yüksek sıcaklıklarda (900°C) üretilebilmesi [32], işlenebilmesi ve oksidasyona olan direnciyle bilinmektedir. Nano BN'ı oluşturan altıgen içyapı; seramik, polimer ve metaller üzerinde bağlayıcı etki oluşturmaktadır. Bu özellikler alüminyum nano BN ile güçlendirmek için önemli bir malzeme yapmaktadır [33]. Ayrıca nano BN takviyeli metal matrisli kompozitler; kıvılcım plazma sinterleme, sıcak haddeleme ve döküm gibi yüksek sıcaklık teknikleri kullanılarak üretilebilmektedir [34-38]. Nano BN incelendiğinde, hegzagonal BN'nin (h-BN) içyapısı [39] görülebilir. İçerisindeki fiziksel özellikleri ve kimyasal kararlılığa sahip olan bir III-V grubu bileşimidir. Yüksek sıcaklıklardaki ısı şok direnci, iletkenliği, işlenebilirlik ve yağlayıcılık özellikleri bulunmaktadır [39]. Bu durum çok geniş alanda yığın ve toz ürün olarak kullanılmasını sağlamaktadır [40,41]. İyi seviyede ısı, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı kompozit malzeme yapımı için kuvvetli adaylardan biri haline gelmektedir. Yapay bir malzeme olan nano BN'nin pek çok sektörde kullanımını artırmaktadır [42]. Yüksek sıcaklıklarda dayanıklı nano BN üretimi için, Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (Chemical Vapour Deposition: CVD) olarak bilinen kimyasal işlem uygulanmaktadır. Kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde sanayi, inşaat ve uçak malzemeleri yapılabilmektedir. Daha hafif ve ısıya daha dayanıklı sert malzemelerin yansira, çok ağır makine malzemeleri de üretilen malzemeler arasındadır [43,44].

Bu çalışmada saf Al tozlarına ilave edilen farklı oranlardaki nano BN katkısının malzeme üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Al-nano BN'nin mekanik özellikleri klasik sinterleme, yüksek basınç metodu, soğuk haddeleme-tavlama-sıcak pres ve kıvılcım plazma sinterleme gibi farklı üretim yollarıyla kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada 12 farklı deney düzeneği incelenmiş, yüzdece eklenen nano BN'nin, Saf alüminyum içerikli tozlara etkilerine bakılmıştır. İncelenen makalelerde bulunan özellikler Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. Nano BN takviyeli alüminyumun genel etkileri

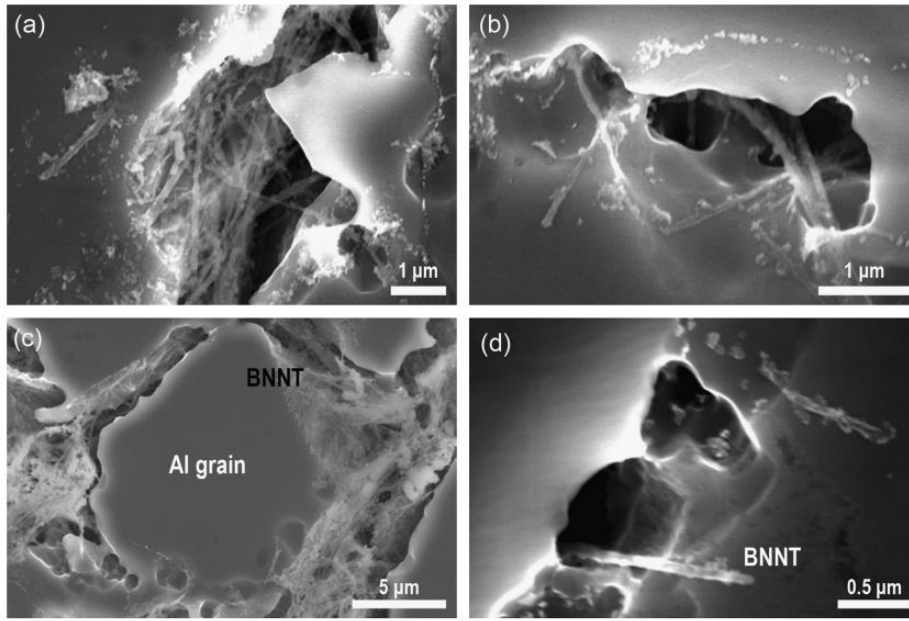
Parametreler Deney Num.	Hazırlık Yöntemi ve Sıcaklık	Nano BN Miktar (Ağırlıkça)	Al Matris Alaşım	Sonuçlar	Ref.
1	Yüksek basınç metodu 550°C	%3 h-BN	Saf Al	%150 gerilme mukavemeti artışı	[32]
2	Kıvılcım plazma sinterleme 550°C	%3 h-BN	Saf Al	Ortalama %20'lik sertlik azalışı	[32]
3	Kıvılcım plazma sinterleme 550°C	%1 h-BN	Saf Al	Saf Al ile kıyaslandığında değişim gözlenmemiştir.	[32]
4	Kıvılcım plazma sinterleme 650°C	%5 h-BN	Saf Al	Analizde, AlN'nin, AlB ₂ 'ye göre 1,55 kat fazla hacim artışı	[50]
5	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama 300°C	%0,045 Bor Nitrüt Nanotüpleri	Saf Al	Elastite modülünde %17'lik artış	[34]
6	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama 300°C	%0,022 Bor Nitrüt Nanotüpleri	Saf Al	Elastite modülünde %9,1'lik artış	[34]
7	Kıvılcım plazma sinterleme + Yüksek enerjili bilyalı frezeleme 500°C	%0,5 h-BN	Saf Al	%124 çekme mukavemeti artışı	[51]
8	Kıvılcım plazma sinterleme + Yüksek enerjili bilyalı frezeleme 500°C	%10 h-BN	Saf Al	Mukavemet artışından sonra yaklaşık %34,5 çekme mukavemeti azalışı	[51]
9	Klasik sinterleme 1750°C	%10 h-BN	Molarite Ağırlığı %90	%100 sertlik artışı	[46]
10	Kıvılcım plazma sinterleme 500°C	%5 h-BN	Haddelenmiş Saf Al	%59 sertlik artışı	[52]
11	Kıvılcım Plazma sinterleme 500°C	%5 h-BN	Saf Al	Saf Al'a göre %54 basınç dayanımı artışı	[52]
12	Kıvılcım plazma sinterleme + Soğuk haddeleme 575°C	%2 h-BN	Saf Al	%400 çekme mukavemeti artışı	[33]

Klasik sinterleme toz parçaların yüksek sıcaklıkta birbiriyle bağlanmasını sağlamaktadır. Ergime, katı hal atom hareketiyle oluşur. Mikro yapıda tozlar arasında 'boyun' adı verilen bağlantılar oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta atomlar yayılır ve yüzey enerjisi giderilir [45]. Benko ve ark yaptıkları çalışmada [46], klasik sinterleme metodunu kullanmıştır. 3-5 µm boyutundaki

Al'u, etil alkol içerisinde mekanik olarak karıştırmışlardır. Daha sonra 6 mm çapında kalıplara koyarak preslemişlerdir. 1750°C sıcaklıkta işlem gerçekleştirilmiştir. BN-Al oranı 1:9'dir. İşlem sonrası hem BN'de hem de Al'da yapısal kusurlar görülmüştür. BN yüzeyinde, ince kristal yapılar gözlenmiştir. Al-BN ara yüzünün çekirdeklendiğini ve metal alana doğru bir büyüme yaptığı gözlemlenmiştir. Numunelerin sertliklerinde yapılan ısıl işlem sonrası farklılıklar mevcuttur. Sertlik 10 MPa'dan 20MPa'ya yükselmiştir. Bu çalışma BN'nin termal çalışmalara yatkın olduğu görülmektedir. Oluşan yeni fazlarda mekanik artışlar görülmüştür.

Kıvılcım plazma sinterleme (Spark plazma sintering: SPS), metal ve seramik parçaları üretmek için kullanılan hızlı bir sinterleme tekniğidir. Bu teknikte tek eksenli bir kuvvet ve doğru akım (DC) kullanılır. Yoğunlaştırma için gerekli olan yüksek sıcaklık/soğukluk ve tane büyümesi şartları oluşabilir. Bu işlemde takviye elemanın cinsi, fazı ve yüzdesi önemlidir [47,48].

Yüksek basınç metodu (High-pressure torsion: HPT) işlemi, karşılıklı olan iki kalıbın arasına yerleştirilen disk şeklindeki numuneye, presle beraber dönme hareketi uygulanarak, numunenin basınç altında tane boyutunu küçültmeyi amaçlamaktadır [49]. Yamaguchi, M. ve ark yaptıkları çalışmada [32], SPS ve HPT sinterleme teknikleri kullanılarak malzemeleri işlemişlerdir. SPS metodu 550°C'de ve 20 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. İlk durumda saf Al'da kopma gerilmesi 0,24 MPa iken, ağırlıkça %3 BN katkısı sonrası kopma gerilmesi 0,06 MPa'ya azalmıştır. Nano HPT kompozit numunelerin artan nano BN içeriği ile çok daha güçlü ancak daha az sünek hale geldiği anlaşılmıştır. Sinterleme sonrası ise herhangi bir faz oluşmamıştır. Şekil 1'de Yamaguchi ve ark. SPS ile üretilmiş %3 katkılı nano BN-Al kompozitinden aldığı SEM görüntüleri verilmektedir (a-d) [32].



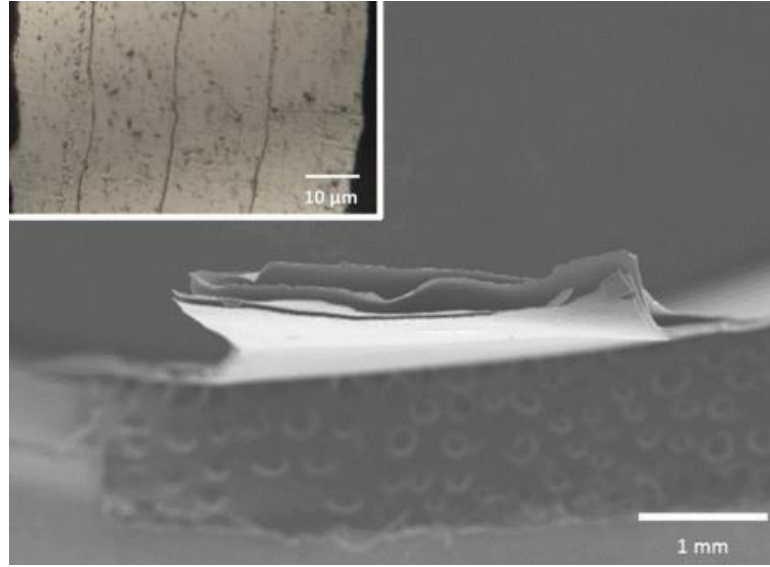
Şekil 1: SPS ile üretilmiş %3 katkılı nano BN-Al kompozitin (a) 1 µm Al-nano BN; (b) 1 µm Al-nano BN ; (c) 5 µm Al- nano BN ; (d) 0,5 µm boyutundaki SEM görüntüleri [32].

Lahiri D. ve ark. yaptıkları çalışmada [50], nano BN parçacıklarının, karışım hacmine oranı %5'dir. SPS yöntemi kullanılmıştır. Ortam, 1 saat asetonla ıslak karıştırılmıştır. Al tozu ise süspansiyon altında 30 dk. ultrasonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işlemi fırın içerisinde 60°C'de 2 saat uygulanmıştır. Hacimce %5 (4.23 g) nano BN ilavesi dikkate alınarak yapılan arayüz analizinde; AlN'nin, AlB₂ yapısına göre 1,55 kat daha fazla hacim fazlalığı görülmüştür. Firestein, K. L ve ark. yaptıkları çalışmada [51], ağırlıkça %99 saflığa sahip Al tozları 10 µm 'lik parçacık boyutuyla kullanmışlardır. SPS yöntemi uygulanmış çalışmada, toz karışımlar yüksek enerjiye sahip bilyalı değirmen kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma 800rpm'de ZrO₂ topları ile yapılmıştır. İşlem oksidasyonunu önlemek için argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Karışımlar vakum sinterleme ile 30 mm iç çapa sahip grafit kalıp ile sinterlenmiştir. (600 °C, 60°/dak, 50MPa) Oluşan numuneler 6 mm kalınlığında, 30 mm çapındadır. %10 BN içeriği ile sertlik artmıştır. Numunelerde 135 HV sertlik görülmektedir. Lahiri D. ve ark. yaptıkları çalışmalarda [52], nano BN'ı katalizör ile güçlendirilmiş tavlama ve frezeleme yoluyla imal etmişlerdir. Alüminyumun %90'ı küresel şekilli toz olup 10 µm çapındadır. Saflığı %99,7dir. Hacimce %2 ve %5 içeren nano BN içeren kompozit tozlar hazırlanmış ve kullanılmıştır. Ortam asetonla ıslatılmıştır. Kurutma 60°C sıcaklıkta 2 saatlik fırında yapılmıştır. İşlem 1 saat süresince grafit kalıpta gerçekleştirilmiştir SPS metoduyla, 500°C sıcaklık ve 80MPa basınç uygulanmıştır (Isıtma süresi 50-60°C/dk). İşlem sonunda %98-99 yoğunluklu kompozitler elde edilmiştir. Nautiyal, P. ve ark. yaptıkları çalışmalarda [33], ağırlıkça %99,7 içeren alüminyum tozu ve yoğunluğu %0,5 olan nano BN kullanmışlardır. Yapıda katalizör olmadığı için kirlilik seviyesi düşüktür. Bor ve Azot %99 saftır. Nano BN, matris hacminin %2'sini oluşturmuştur. Katmanlı olarak Al/Nano BN/Al kompoziti Kıvılcım plazma sinterleme ile üretilmiştir. 575°C sıcaklıkta, 80 MPa ile 1 saat sinterleme yapılmıştır. SPS'den sonra soğuk haddeleme yapılmıştır. Güçlü alüminyum - nano BN arayüzü, alüminyum üzerinde BN elde edilmiştir.

Haddeleme, malzemenin zıt yönde dönen iki ya da daha fazla silindir arasından sıkıştırılıp daha yoğun hale getirmesidir. Plastik şekil verilerek boyutlandırma yapılıır [53,54].

Sıcak presleme, içerisinde oksijen olmayan yoğun ve homojen malzeme üretimi için kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkla üretim istendiğinde bu teknik kullanılabilir. Sıcak presleme alüminyum ve nano parçalar arasında bir bağ meydana getirebilmektedir [55].

Tavlama metalin sertliğini azaltmak süneklik kazandırmak ve iç gerinim artışı için yapılır [56]. Antillon, M. ve ark. yaptıkları çalışmalarda [34], %100 saflığa yakın alüminyum tozlarına, %0,022 ve %0,045 oranında nano BN eklemişlerdir. Bu çalışmada sıcak presleme, haddeleme ve tavlama metodu birlikte kullanılmıştır. Saf alüminyum eklenen nihai malzemede nanosertlik, elastik modül ve çekme mukavemetinde artış görülür. 10 MPa basınç ve 300°C sıcaklıkta yapılan testlerde çekme mukavemetinde %8-13 artış sağlanmıştır. Yüzdece 0,045 nano BN'de nanosertlik %52, dislokasyon yoğunluğu 3 kat artmıştır. Şekil 2'de Antillon ve ark. çekme gerilmesi testinden sonra bulduğu Al-nano BN kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir [34]. Bu üretim yöntemleri için sertlik değerleri karşılaştırması Tablo 2'de, çekme gerilmesi değerleri karşılaştırması Tablo 3'te, akma gerilmesi değerleri karşılaştırması ise Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2: Çekme gerilmesi testinden sonra Al-nano BN kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü [34].

Tablo 2. Nano BN takviyeli Al için sertlik değerleri

Parametreler Deney Num.	Hazırlık Yöntemi	Nano BN Miktar (Ağırlıkça)	Al Matris Alaşım	Sonuçlar	Ref.
2	Kıvılcım plazma sinterleme	%3 h-BN	Saf Al	Saf Al ortalama 35 MPa iken, işlemlenmiş numunede sertlik 30 MPa ölçülmüştür.	[32]
5	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,045 Bor Nitrür Nanotüpleri	Saf Al	Saf Al'da sertlik ortalama 480 MPa iken, %0,022 katkılı nano BN-Al ortalama 540 MPa olarak ölçülmüştür.	[34]
6	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,022 Bor Nitrür Nanotüpleri	Saf Al	Saf Al'da sertlik yaklaşık 480 MPa iken, %0,045 katkılı Al- nano BN ortalama 720 MPa ölçülmüştür.	[34]
8	Kıvılcım plazma sinterleme + Yüksek enerjili bilyalı frezeleme	%10 h-BN	Saf Al	Saf numune 28 HV iken, %10 nano BN katkılı Al'da sertlik 135 HV olarak ölçülmüştür.	[51]
9	Klasik sinterleme	%10 h-BN	Molarite ağırlığı %90	Saf numunede sertlik 10 GPa iken, katkılı numunede 20 GPa ölçülmüştür.	[46]
10	Kıvılcım plazma sinterleme	%5 h-BN	Haddelenmiş Saf Al	Saf Al'da sertlik ortalama 499 MPa iken, %5 nano BN katkılı haddelenmiş Al'da sertlik ortalama 506 MPa olarak ölçülmüştür.	[52]

Tablo 3. Nano BN takviyeli Al için çekme mukavemeti değerleri

Parametreler Deney Num.	Hazırlık Yöntemi	Nano BN Miktar (Ağırlıkça)	Al Matris Alaşım	Sonuçlar	Ref.
2	Yüksek basınç metodu	%3 h-BN	Saf Al	Saf Al numunesi ortalama 207 MPa iken, %3 nano BN katkılı numune işlem sonrası ortalama 300 MPa değeri görülmektedir.	[32]
5	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,045 Bor Nitrür Nanotüpleri	Saf Al	Saf numune ortalama 47.5 MPa iken, %0.045 nano BN katkılı numune ortalama 53.6 MPa olarak ölçülmüştür.	[34]
6	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,022 Bor Nitrüt Nanotüpleri	Saf Al	Saf numuneye göre artış gözlenmiş ve 47.5 MPa olarak ölçülmüştür.	[34]
8	Kıvılcım plazma sinterleme	%10 h-BN	Saf Al	Saf numunede 92 MPa olarak ölçülen değer, %10 katkılı nano BN'ta 257 MPa olarak ölçülmüştür.	[51]
12	Kıvılcım plazma sinterleme + Soğuk haddeleme	%2 h-BN	Saf Al	Saf Al 40 MPa iken %2 nano BN katkılı numunede ortalama 200 MPa olarak ölçülmüştür.	[33]

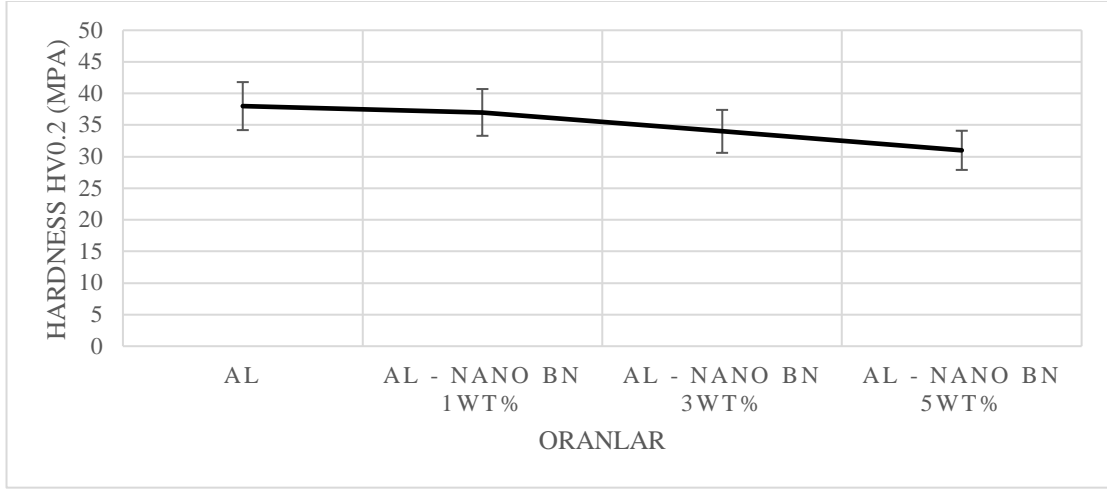
Tablo 4. Nano BN takviyeli Al için akma mukavemeti değerleri

Parametreler Deney Num.	Hazırlık Yöntemi	Nano BN Miktar (Ağırlıkça)	Al Matris Alaşım	Sonuçlar	Ref
5	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,045 Bor Nitrür Nanotüpleri	Saf Al	Çekme gerilmesi akma dayanımını geçtikten sonra artış görülmüştür.	[34]
6	Sıcak presleme + Haddeleme, tavlama	%0,022 Bor Nitrür Nanotüpleri	Saf Al	Çekme gerilmesi akma dayanımını geçtikten sonra artış görülmüştür.	[34]
7	Kıvılcım plazma sinterleme + Yüksek enerjili bilyalı frezeleme	%0,5 h-BN	Saf Al	Saf Al numunedeki çekme gerilmesi 33 MPa iken, %0,5 katkılı nano BN'de 103 MPa olarak ölçülmüştür.	[51]
10	Kıvılcım plazma sinterleme	%5 h-BN	Haddelenmiş Saf Al	Saf Al'da ortalama akma dayanımı 57 MPa iken, %5 nano BN katkılı Al'da ortalama 88 MPa olarak ölçülmüştür.	[52]

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Sertlik Özellikleri

Sertlik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Alüminyuma eklenen nano BN takviyesinin sertlik değerlerini arttırdığı görülmektedir. Alüminyuma bağlanan BN, içerisindeki zayıf Van der Waals bağları sayesinde Alüminyumun sertliğini ciddi oranda arttırmaktadır. Sadece 2 numaralı [32] çalışmada sertliğin azaldığı görülmektedir. Buna karşın Tablo 2'deki 9 numaralı çalışmada [46], nano BN'ın olduğu klasik sinterleme denemesinde, sertlik 10 MPa'dan 20MPa'a yükselmiştir. Bu durum %100 artışı gösterir. Kıvılcım plazma sinterlemede de sertlik artışı görülmektedir. Tablo 2'deki 8 numaralı çalışmada [51] %10 nano BN'a sahip alüminyumda sertlik 386 MPa olarak ölçülmüştür. Deneyde sertlik %210 artmıştır. Hacimce %5 nano BN içeren haddelenmiş alüminyumda sertlik %59 artmıştır. Nano BN katkısının %3 olduğu denemede ise sertlik %100 artış sağlamıştır. Sıcak pres, hadde ve tavlamanın beraber kullanıldığı deneyde [34], malzemede takviye yokken sertlik 476,7MPa'dır. Yüzdece 0,022 ve 0,045 nano BN takviyesi sertliği sırasıyla 567,6 MPa ve 724,7MPa arttırmaktadır. Şekil 3'te SPS ile sinterlenen %1,%3 ve %5 katkılı Al-nano BN'ın kompozitlerinin sertliği verilmiştir [32].



Şekil 3: SPS ile sinterlenen %1,%3 ve %5 katkılı Al-nano BN'in kompozitlerinin sertliği [32].

3.2. Çekme Dayanımı Özellikleri

Çekme mukavemeti artışı Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'deki 8 numaralı çalışma [51] dışındaki denemelerde, çekme mukavemeti artışı görülmektedir. Bu çalışmada saf alüminyumun çekme mukavemeti 92 MPa olarak ölçülmüştür. Deney sonrası %7'lik nano BN takviyesi çekme mukavemetini 385MPa'a kadar arttırırken, bu oran %10 çıktığında çekme mukavemeti 257 MPa'a düşmüştür. %7'den %10'a arttırılan nano BN'de %34,5 oranında çekme mukavemeti azalmıştır. Minimum artış, ağırlıkça %3 nano BN içeren ve yüksek basınç metodu kullanılarak işlenmiş Tablo 3'deki 2 numaralı çalışmada [32] görülmektedir. Bu çalışma ile %100'ü geçen çekme mukavemeti artışı oluşmuştur. Literatürdeki sayılı örnekler tarandığında en iyi sonuçlar kıvılcım plazma sinterleme ile ortaya çıkmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıkla işlenen malzemenin çekme mukavemetinde iyi sonuçlar verdiğini düşündürmektedir. Örneğin Tablo 3'deki 12 numaralı çalışmada [33] Saf alüminyumun çekme mukavemeti 40 MPa iken, %2 nano BN takviyesi sonrası 200 MPa'a artış görülür. Nihai malzemedede % 400 çekme mukavemeti artışı oluşmuştur. Tablo 3'deki 6 numaralı çalışmada [33] saf Al 47,5MPa'lık bir çekme mukavemeti verirken, %0,022 nano BN katkısında bu oran 51,3 MPa'a çıkmaktadır. Aynı şekilde Tablo 3'deki 5 numaralı çalışmada [33] nano BN oranı %0,045 olduğunda ise çekme mukavemeti 53,6 MPa olduğu görülmektedir.

3.3. Akma Dayanımı Özellikleri

Akma dayanımının özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Maksimum artış hacimce %5 BN mikro parçacığı içeren 7 numaralı deney sonucunda [51] verilmiştir. Malzemede %130 akma dayanımı görülür. Tablo 4'teki 5 ve 6 numaralı sıcak pres, hadde ve tavlama yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada [33] çekme gerilmesi akma dayanımını geçtikten sonra artış görülmüştür. Tablo 4'teki 10 numaralı çalışmada [52] ise Saf alüminyum 57,7 MPa'lık bir akma dayanımı görülürken, %5 nano BN katkısında bu oran 88,7 MPa'a çıkmaktadır. Bu durum %54'lük bir artışı ortaya koymaktadır.

3.4. Mikro Yapısal Özellikler

Tablo 1'deki 5 numaralı çalışmada [34] %0,022 nano BN içeren parçada nanosertlik artmıştır. Tablo 1'deki 6 numaralı çalışmada [34] ise %0,045 nano BN içeren parça, saf alüminyuma göre dislokasyon yoğunluğunu 3 kat arttırmıştır. Tablo 1'deki 1 numaralı çalışmada [32] HPT örneklerinin çok daha yoğun makro morfolojilere sahip olduğu incelenmiştir. Bu çalışmadaki HPT numunelerinde ince taneli bir Al matrisi içinde eşit bir şekilde dağılım gözlemlendiği yayımlanmaktadır. %3 nano BN içeren numunelerde alüminyum borür ve alüminyum nitrid dışında faz oluşmadığı görülmektedir. Tablo 1'deki 2 numaralı [32] SPS yönteminin uygulandığı çalışmada, Al-nano BN numunelerinin içyapısında alüminyumun tane sınırlarında daha yoğun olduğu incelenmiştir. Tablo 1'deki 12 numaralı çalışmada [33] elastik modülü, saf Al (70 GPa) için elastik modül değerinin iki katı olan 134 GPa olarak hesaplandığı görülmüştür. Tablo 1'deki 10 numaralı çalışmada[52] nano BN, SPS'de uzun süre yüksek basınç ve sıcaklık uygulamasına dayandığı ve ara yüzde reaksiyon ürünü oluşturmadığı görülmüştür. Al matrisine yüzde %5 nano BN ilavesi ile akma gerilmesinde %450 iyileşme gösterdiği incelenmiştir. Soğuk hadde sonrası çatlama veya parçalanma görülmemektedir. Parça kalınlığının %75 azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 4'te Nautiyal ve ark. bulduğu Al - nano BN'in kompozitinin kırılma yüzeyini gösteren SEM görüntüsü verilmektedir [33].

- [5] Angın, M.H., & Aydın, S. (2003). Bor nitrür ön fizibilite etüdü.,(Websayfası: <http://www.etimaden.gov.tr>) (Erişim tarihi :13.01.2022)
- [6] Özdemir Köklü, M. (2012). Bor içerikli nanomalzeme üretim olanaklarının araştırılması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., & Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4924-4939.
- [8] Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E. (2018). Alüminyum-grafen kompozit yapılarda çekme dayanımının, aşınma direncinin ve mikroyapının incelenmesi, SETSCI Conference Indexing System, 144-149
- [9] Loganathan, A., Sharma, A., Rudolf, C., Zhang, C., Nautiyal, P., Suwas, S., & Agarwal, A. (2017). In-situ deformation mechanism and orientation effects in sintered 2D boron nitride nanosheets. *Materials Science and Engineering: A*, 708, 440-450.
- [10] Ramesh, K. T. (2009). Nanomaterials. In *Nanomaterials*. Springer, Boston, MA., A.B.D., 1-20.
- [11] Chopra, N. G., Luyken, R. J., Cherrey, K., Crespi, V. H., Cohen, M. L., Louie, S. G., & Zettl, A. (1995). Boron nitride nanotubes. *science*, 269(5226), 966-967.
- [12] Hwang, H.J., Barakat, N.A.M., Muzafar A. Kanjwal, M.A., Sheikh, F.A., & Hak Yong Kim, H.Y. (2010). Boron nitride nanofibers by the electrospinning technique. *Macromolecular Research*, 18 (6), 551-557.
- [13] Liu, B., Gu, Y., Ji, Y., Zheng, G., Ma, F., Wang, J., Wu, F., Long, F., Zhou, B., Chen, C. (2021). Thin-walled boron nitride micron square tube decorated by nanosheets: Preparation, characterization and adsorption property. *Ceramics International*, 47(10), 14115-14123.
- [14] Pakdel, A., Zhi, C., Bando, Y., & Golberg, D. (2012). Low-dimensional boron nitride nanomaterials. *Materials Today*, 15(6), 256-265.
- [15] Lourie, O. R., Jones, C. R., Bartlett, B. M., Gibbons, P. C., Ruoff, R. S., & Buhro, W. E. (2000). CVD growth of boron nitride nanotubes. *Chemistry of Materials*, 12(7), 1808-1810.
- [16] Qiu, Y., Yu, J., Yin, J., Tan, C., Zhou, X., Bai, X., & Wang, E. (2009). Synthesis of continuous boron nitride nanofibers by solution coating electrospun template fibers. *Nanotechnology*, 20, 3456-3463
- [17] Vardar, Kadir , Aydemir, Fırat , Özdemir, Durmuş , Topuz, Mustafa , Kolay, Burakcan , Yıldırım, Yusuf , Bilici, Zehra , Baydoğrul, Mustafa Uğur , Yağan, Yunus Emre , Kaya, Bünyamin , Tandoğan, Ali , Gürer, Ethem Yiğit . "Design of Electrical Test Device for Automotive Industry". *International Scientific and Vocational Studies Journal* 5 / 2 (Aralık 2021): 154-163
- [18] Ceylan, Ç., Duran, B., Koçyiğit, O., Koçer, C., Doğan, B., Hacıoğlu, T., Şengönül, M.C., Kaftanoğlu, B., (2021). Havacılık endüstrisinde kullanılmak üzere alüminyum malzemelerin korozyon direncinin artırılması amacıyla yüzey kaplaması geliştirilmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 19(2), 96-105.
- [19] Poovazhagan, L., Kalaichelvan, K., & Sornakumar, T. (2016). Processing and performance characteristics of aluminum-nano boron carbide metal matrix nanocomposites. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(10), 1275-1285.
- [20] Altuner, S., & Keleşoğlu, E. (2012). Production of Y2O3 coated Al2O3 reinforced aluminium matrix composites and the coating of interface effects over wettability properties. *Journal of Engineering and Natural Sciences, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma*, 30, 252-258.
- [21] Shenglong, Y.S.D., & Shoujie, D.A.I. (2005). A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry, *Materials Review* 2, 022.
- [22] Duan, Z., Li, C., Ding, W., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Cao, H., Xu, X., Wang, D., Mao, C., Li, N.H., Kumar, M.G., Said, Z., Depnath, S., Jamil, M., Ali, H. M. (2021). milling force model for aviation aluminum alloy: Academic insight and perspective analysis, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(1), 1-35.
- [23] Pillari, L. K., Umasankar, V., Elamathi, P., & Chandrasekar, G. (2016). Synthesis and characterization of nano hexagonal boron nitride powder and evaluating the influence on aluminium alloy matrix. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 2018-2026.
- [24] Keidar, M., & Beilis, I. I., *Plasma engineering: Application in aerospace, Nanotechnology and Bionanotechnology* (Elsevier, Oxford, UK, 2013).
- [25] Pakdel, A., Bando, Y., & Golberg, D. (2014). Nano boron nitride flatland. *Chemical Society Reviews*, 43(3), 934-959.
- [26] Guerra, V., Wan, C., & McNally, T. (2019). Thermal conductivity of 2D nanostructured boron nitride (BN) and its composites with polymers. *Progress in Materials Science*, 100, 170-186.
- [27] Loeblein, M., Tsang, S. H., Pawlik, M., Phua, E. J. R., Yong, H., Zhang, X. W., Gan, L.C., Teo, E. H. T. (2017). High-density 3D-boron nitride and 3D-graphene for highperformance nano-thermal interface material. *ACS Nano*, 11(2), 2033-2044.
- [28] Salles, V., Bernard, S., Brioude, A., Cornu, D., & Miele, P. (2010). A new class of boron nitride fibers with tunable properties by combining an electrospinning process and the polymer-derived ceramics route. *Nanoscale*, 2, 215-217
- [29] Karaca, B., & Çavdar, U. (2014). "Saf ve bor karbür takviyeli alüminyum tozlarının ultra yüksek frekanslı indüksiyon jeneratörü ile sinterlenmesi," *Mühendis ve Makina*, 55, 59-64.
- [30] Tajzad, I., & Ghasali, E. (2020). Production methods of CNT-reinforced Al matrix composites: a review. *Journal of Composites and Compounds*, 2(2), 1-9.

- [31] Nayim, S. T. I., Hasan, M. Z., Seth, P. P., Gupta, P., Thakur, S., Kumar, D., & Jamwal, A. (2020). Effect of CNT and TiC hybrid reinforcement on the micro-mechano-tribo behaviour of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1421-1424.
- [32] Yamaguchi, M., Meng, F., Firestein, K., Tsuchiya, K., & Golberg, D. (2014). Powder metallurgy routes toward aluminum boron nitride nanotube composites, their morphologies, structures and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 604, 9-17.
- [33] Nautiyal, P., Rudolf, C., Loganathan, A., Zhang, C., Boesl, B., & Agarwal, A. (2016). Directionally aligned ultra-long boron nitride nanotube induced strengthening of aluminum-based sandwich composite. *Advanced Engineering Materials*, 18(10), 1747-1754.
- [34] Antillon, M., Nautiyal, P., Loganathan, A., Boesl, B., & Agarwal, A. (2018). Strengthening in boron nitride nanotube reinforced aluminum composites prepared by roll bonding. *Advanced Engineering Materials*, 20(8), 1800122.
- [35] Yonetken, A., & Erol, A. (2018). Production and characterization of Al-BN composite materials using by powder metallurgy. *Agronomy Research*, 16(Special Issue I), 1289-1294.
- [36] Meignanamoorthy, M., & Ravichandran, M. (2018). Synthesis of metal matrix composites via powder metallurgy route: a review. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22(1), 65-76.
- [37] Huo, S. H., Qian, M., Schaffer, G. B., & Crossin, E. (2011). Aluminium powder metallurgy. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Woodhead Publishing. pp. 655-701.
- [38] Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemleri. *Mühendis ve Makina*, 58(686), 21-47.
- [39] Kemalöğlü, Ş. (2009). Termal ara yüzey malzemesi olarak kullanılabilecek polimer/bor nitrür mikro ve nano kompozitlerinin üretim teknolojilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259402.
- [40] Akay, A. (2015). Bor nitrürün nano tabakalarına ayrılmasının incelenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [41] Özmen, D. (2008). "Production and characterization of boron nitride nanotubes," Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [42] Aydın, H. (2018). Nanoyapılı hegzagonal bor nitrür üretimi ve karakterizasyonu. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 269-275.
- [43] Korucu, Y. (2010). "Nanotüp çeşitleri ve uygulamaları," Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [44] Şengönül, M., Durgun, İ., Dökmetaş, N., Kalkan, H., & Kaftanoğlu, B. (2018). Bor nitrür kaplamının, kaynak çapaklarının metal aparat yüzeylerine yapışma davranışlarına etkisi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 14(1), 23-30.
- [45] Çavdar, U., Atik, E., (2011). Geleneksel ve hızlı sinterleme yöntemleri, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1 (15): 1-10.
- [46] Benko, E., Morgiel, J., & Czeppe, T. (1997). BN sintered with Al: Microstructure and hardness. *Ceramics international*, 23(1), 89-91.
- [47] Cavaliere, P., Sadeghi, B., Shamanian, M., & Ashrafizadeh, F. (2019). Al-based nanocomposites produced via spark plasma sintering: effect of processing route and reinforcing phases, *Spark Plasma Sintering of Materials*, Springer, 161-190.
- [48] Karaoğlanlı, A. C., Türk, A., Özdemir, İ. (2014). Seramik esaslı plazma sprey kaplamaların oksidasyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 401-405.
- [49] Arpaçay, D. (2009). Magnezyum AZ80 alaşımında yüksek basınç burulma işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [50] Lahiri, D., Singh, V., Li, L. H., Xing, T., Seal, S., Chen, Y., & Agarwal, A. (2012). Insight into reactions and interface between boron nitride nanotube and aluminum. *Journal of Materials Research*, 27(21), 2760-2770.
- [51] Firestein, K. L., Corthay, S., Steinman, A. E., Matveev, A. T., Kovalskii, A. M., Sukhorukova, I. V., Golberg, D., Shtansky, D. V. (2017). High-strength aluminum-based composites reinforced with BN, AlB₂ and AlN particles fabricated via reactive spark plasma sintering of Al-BN powder mixtures. *Materials Science and Engineering: A*, 681, 1-9.
- [52] 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.
- [53] Aydoğan, İ.K. (2007). Haddelme prosesinde malzeme karakteristiğindeki değişimlerin incelenmesi ve modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [54] Bisht, A., Kumar, V., Li, L. H., Chen, Y., Agarwal, A., & Lahiri, D. (2018). Effect of warm rolling and annealing on the mechanical properties of aluminum composite reinforced with boron nitride nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 710, 366-373.
- [55] Öztürk, C. (2004). B₄C-TiB₂-WC seramiklerinin sıcak pres tekniği ile üretimi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [56] Mısırlı, C. (2011). 5083 kalite alüminyum alaşımının homojenize edilerek sertlik değerlerinin ve mikroyapılarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.