

H. Cesur
Mak. Yük. Müh.

B. Kaftanoğlu
Prof.Dr.

Üretim Mühendisliği Bölümü,
Atılım Üniversitesi, Ankara

A. Kalkanlı
Prof.Dr.

Malzeme ve Metalürji Mühendisliği
Bölümü, Orta Doğu Teknik
Üniversitesi, Ankara

B. Oral
Doç.Dr.

Vaksis Ar-ge ve Danışmanlık
Şirketi, Ankara

Bor Nitrür Kaplamaların Çelik Alt Malzemeler Üzerinde RF Magnetron Saçtırma Yöntemiyle Büyütülmesi

Bor nitrür kaplamalar Silikon ve çelik alt malzemeler üzerinde radyo frekanslı (rf) magnetron saçtırma yöntemiyle hegzagonal bor nitrür hedef plaka kullanılarak büyütülmüştür. Büyütme işlemi gaz oranı 5 e 1 olacak şekilde Argon ve Azot gaz karışımında ve 3×10^{-3} Torr basınç altında gerçekleştirilmiştir. Büyütme işleminde ana parametreler olan alt malzeme (bias) voltajı ve ortam sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı bor nitrür kaplamaların alt malzeme yüzeylerinde oluşturularak metal kesme işleminde kullanılabilmesi için gerekli sertlik ve yapışkanlığı elde etmektir. Deneyler sonucu elde edilen kaplamaların nitelendirilmesi için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılmıştır. Çelik örnekler üzerindeki kaplamaların mekanik özellikleri ise kalınlık, sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık ölçümleriyle belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor Nitrür, Magnetron Saçtırma, Yüksek Hız Çeliği

1. GİRİŞ

Kübik bor nitrür (c-BN) sahip olduğu üstün mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı önemli bir kaplama malzemesi olarak kesici uç uygulamalarında son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, iyi ısı iletkenlik, yüksek elektrik dirençliliği, iyi aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığı göze çarpan özellikleri olarak sayılabilir. [1-3] Kübik bor nitrür elmaştan sonra bilinen en sert malzemedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda oksijen ve demirli malzemelere karşı gösterdiği kimyasal kararlılığı elmasa göre daha üstün bir özelliktir. Bor nitrür, kaplamalarda genellikle iki farklı fazda oluşur. Bunlar hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve kübik bor nitrürdür (c-BN). Hegzagonal bor nitrür yumuşak, düşük sürtünme katsayısına sahip, düşük ve yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı özelliğe sahip, yalıtkan ve ısı iletkenliğe sahip bir malzeme olarak bilinir. Katı yağlayıcı olarak metal şekillendirme kalıplarında ve metal şekillendirme işlemlerinde yüksek sıcaklık ortamında yaygın olarak kullanılmaktadır. [4] Hegzagonal fazın aksine, kübik bor nitrür gösterdiği yüksek sertlik ve yukarıda belirtilen üstün özellikleri sayesinde kesici takımlar için kaplama malzemesi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı kübik bor nitrürün kuru kesme, yüksek hızda kesme ve sert malzemelerin işlenmesi gibi kesici takım

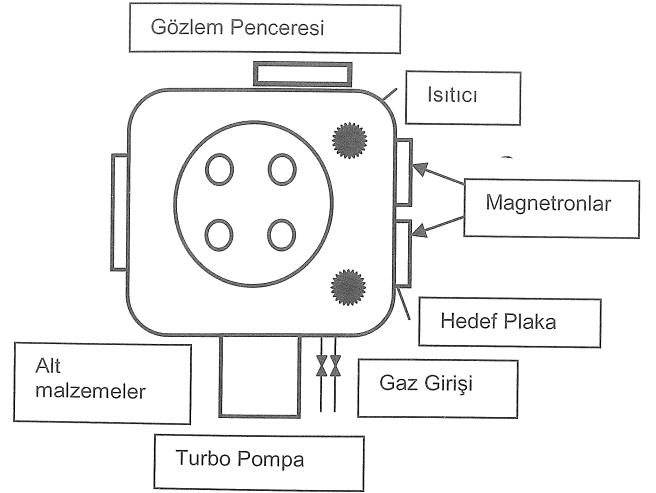
uygulamalarında kullanımı son yıllarda artış göstermiştir. [5-6] Bugün piyasada sinterlenmiş kübik bor nitrür kesici takımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sinterlenmiş c-BN uçların en büyük olumsuzluğu yüksek maliyetleri, düşük süneklik özelliği ve farklı kesici uç geometrilerinde üretim zorluluğudur. [7] Bu yüzden, bor nitrürün ince ve kalın filmler halinde büyütülmesi ihtiyacı sadece metal kesme için değil aynı zamanda koruyucu kaplama, optik kaplama ve elektriksel iletken katmanlar için ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda da, son yıllarda birçok araştırmacı kübik fazda bor nitrür sentezleyebilmek için çalışmalar yapmışlardır. Kaplama yöntemleri arasında, saçtırma tekniği – bir Fiziksel Buharlaştırma Yöntemiyle Büyütme (FBYB) işlemi – düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, çok ince kaplamalar elde edebilme imkânı ve keskin köşelerde ve karmaşık geometriler üzerinde büyütülme yapılabildiği için daha çok tercih edilmektedir. FBYB magnetron saçtırma tekniği ile büyütülen kübik bor nitrür kaplamalarla ilgili birçok çalışmayı literatürde bulmak mümkündür. [8-16] FBYB saçtırma tekniği kullanılarak büyütülen c-BN filmlerdeki ana problemler film ve alt malzeme arasında düşük yapışkanlık ve filmin içinde oluşan yüksek basma gerilimlerdir ve bu problemler c-BN kaplama kalınlığını en çok 1 µm ile sınırlandırmaktadır. Ancak birçok araştırmacı da iyi yapışkanlık gösteren ve çok tabakalı kalın filmleri büyütebildiklerini bildirmişlerdir. [17-20]

Bu çalışmada, bor nitrür filmler Silikon ve yüksek hız çeliği üzerinde radyo frekanslı magnetron saçırma tekniği ile büyütülmüştür. Özellikle c-BN filmlerin çelik üzerinde oluşturularak kesici takım uygulamalarında kullanılması ve yüksek sertlik için en yüksek kübik orana sahip bor nitrür kaplamanın elde edilmesi amaçlanmıştır. Büyütme sürecine etki eden iki ana parametrenin, sıcaklık ve alt malzeme voltajı, etkisi sabit gaz oranında araştırılmıştır. Elde edilen filmlerin nitelendirilmesi için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Taramalı elektron spektroskopisi (SEM) teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca, kalınlık, sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık gibi mekanik özelliklerinin ölçümleri de kalotest, tribometre, profilmetre ve çizik (scratch) test cihazları kullanılarak yapılmıştır.

2. DENEYSEL

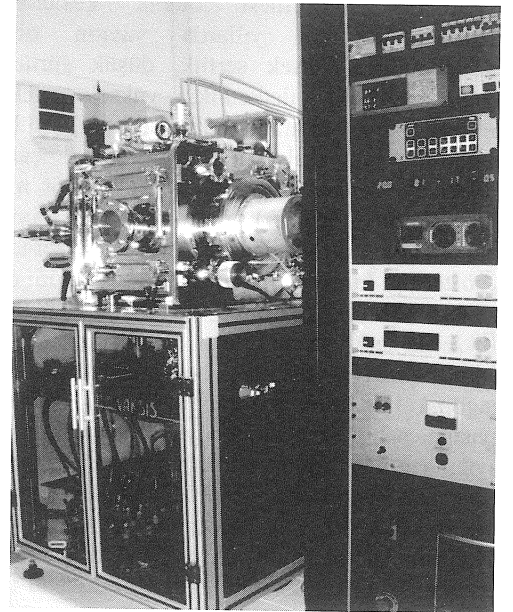
Bor nitrür filmler Si (100) yonga plakalar ve çelik alt malzemeler üzerinde 13.56 Mhz frekans altında magnetron saçırma tekniğiyle büyütülmüştür. Büyütme sistemine ait şematik diyagram ve fotoğraf Şekil 1. ve Şekil 2. de görülebilir. Katot olarak dikdörtgen şekilde 100x250 mm boyutlarında sinterlenmiş hegzagonal bor nitrür (h-BN) plaka kullanılmıştır. Alt malzeme olarak da 20x20 mm boyutlarında kare Si yonga plaka ve 30 mm çapında çelik diskler kullanılmıştır. Alt malzemeler bir tutucu yardımıyla dönen bir mil mekanizmasına bağlanarak döndürülürken, aynı zamanda ikinci bir rf kaynağıyla alt malzemelere güç uygulanmıştır. Dönen mil bağı alt malzemelere hem ekstenel hem de gezegen hareketi yapabilmekte olup, dönme hızı ve dönme yönü bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. Alt malzemeler ile h-BN hedef plaka arasındaki mesafe ise bütün deneylerde 50 mm olarak sabit tutulmuştur.

Büyütme işlemine başlamadan önce vakum haznesi basıncı 5×10^{-6} Torr a kadar turbo pompa vasıtasıyla düşürülmüştür. Daha sonra vakum haznesi Argon ve Azot gazlarıyla (Ar/N₂ oranı 5/1 olacak şekilde) doldurularak sistem basıncı 3×10^{-3} Torr a getirilmiştir. Gaz akış miktarları sistem kontrol panelinde yer alan kontrolcüler üzerinden değiştirilebilmektedir. Vakum haznesinin içinde yer alan iki adet lamba ısıtıcı sayesinde sıcaklık 400°C ye kadar çıkartılabilmektedir. Sıcaklık ısıtıcıların çıkışına yerleştirilen ısılıcift ile ölçülüp PID kontrolcüsüyle istenen sıcaklığa ayarlanabilir. Silikon yonga plakası ve parlatılmış çelik örnekler sırasıyla aseton, etil alkol ve saf suda ultrasonik olarak 20 dk boyunca yıkanmıştır.



Şekil 1. RF magnetron saçırma sisteminin şematik görünümü

Büyütme işlemine başlanmadan önce, Argon ortamında -400 V rf güç verilerek plazma temizliği yapılmıştır. Bu işlem kaplama kalitesi, yapışkanlığı ve yüzey temizliği için zorunludur. Plazma temizliğinden sonra ise hedef plakaya rf gücü uygulanmıştır ve bu güç 900 W a kadar düzenli olarak artırılmış ve deney sonuna kadar 900 W da sabit tutulmuştur. Deneylerde sıcaklık 200-250 °C arasında tutulurken, alltaşa uygulanan gerilim ise 100 ile 200 V arasında değiştirilmiştir. Büyütme işlemi 2 saat boyunca devam ettirilmiştir. Deney değişkenleri Tablo 1. de sıralanmıştır.



Şekil 2. Magnetron saçırma düzeneğinin fotoğrafı

Tablo 1. c-BN büyütme işleminde kullanılan deney değişkenleri

Hedef plaka	h-BN plaka
Alt malzemeler	Si yonga plakası ve çelik diskler
Taban basınç	5×10^{-6} Torr
Büyütme basıncı	3×10^{-3} Torr
Ar/N ₂ akış oranı	5/1
Magnetron gücü	900 W
Alt malzeme voltajı	100-200 V
Isıtıcı Sıcaklığı	200-250 °C
Büyütme Mesafesi	50 mm
Büyütme Süresi	2 saat

BN filmlerin kalınlıklarını ölçmek için öncelikle kalotest cihazıyla çelik örnekler üzerine oyuklar açılmıştır ve bu oyuklara optik mikroskop altında bakılarak kaplama kalınlığı hesaplanmıştır. 2 saatlik büyütme sonucunda yaklaşık olarak 0.5 µm kalınlık elde edilmiştir. Buna ilaveten, kaplamanın fazını anlamak için ise Fourier Transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) metodu kullanılmıştır. Yüzey morfolojisinin tespiti Taramalı Elektron Mikroskopuyla (SEM) yapılırken, film bileşiminin anlaşılması ve bağ enerjilerinin ölçülebilmesi için X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) tekniği kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık gibi mekanik özellikler ise tribometre, profilmetre ve çizik test cihazlarıyla tespit edilmiştir

3. ANALİZ VE DEĞERLENDİRMELER

3.1. BN filmlerin yapısal karakterizasyonu

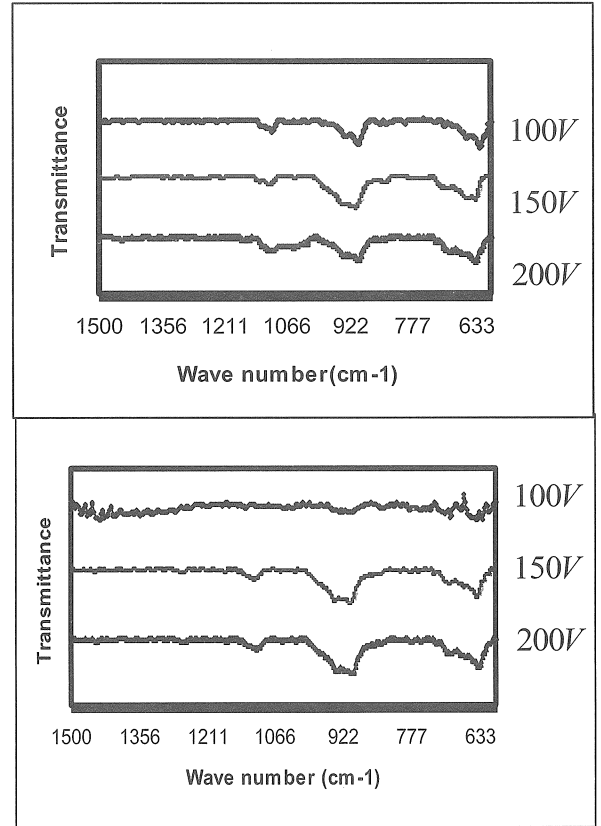
3.1.1. FTIR Ölçümleri

Kaplama fazının kübik mi yoksa hegzagonal mi olduğunu anlamak için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) denilen teknik kullanılmıştır. Şekil 3. de Silikon yonga plakalar üzerinde değişik sıcaklık ve değişik alt malzeme voltajları altında büyütülen bor nitrür filmlere ait FTIR spektrumu görülmektedir. Bor nitrür kaplamalarda kübik faz için soğurma tepe noktası yaklaşık 1060 cm⁻¹ dalga sayısında görülürken, hegzagonal faz için bu değerler yaklaşık 780 ve 1380 cm⁻¹ dalga boylarında görülmektedir [11-16]. Kübik faz oranı ise FTIR grafiklerindeki tepe yüksekliklerinin aşağıdaki formül kullanılarak birbirlerine oranlanmasıyla bulunmaktadır.

$$cBN\% = \frac{I_{cBN}}{I_{cBN} + I_{hBN}} \times 100\% \quad (1)$$

Şekil 3. de görüldüğü gibi kübik bor nitrür oranı sıcaklık ve uygulanan alt malzeme voltajına göre değişiklik göstermektedir. İlk deney setinde,

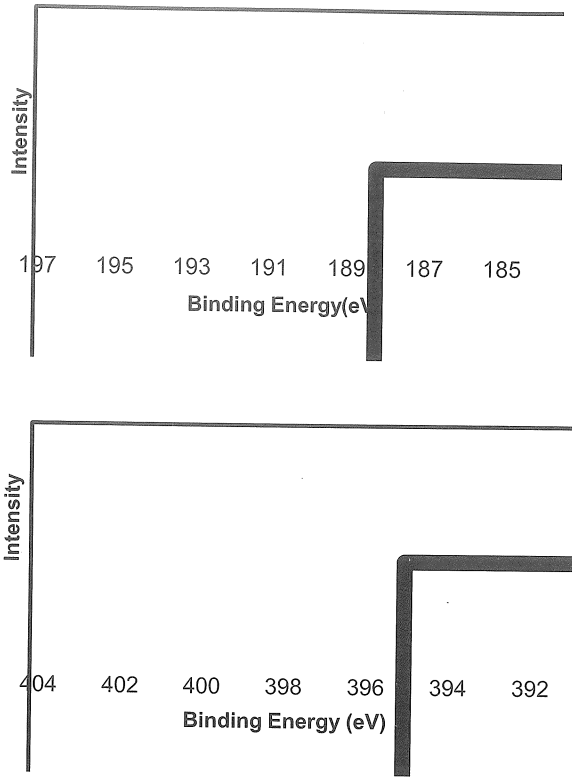
sıcaklık 200 °C de sabit tutulup alt malzeme voltajı 100V ile 200V arasında değiştirilmiştir. İkinci deney setinde ise, sıcaklık bu kez 250 °C de sabit tutulmuş ve voltaj değerleri değiştirilmiştir. FTIR sonuçları kıyaslandığında %75 ile en yüksek kübik faz oranı 200 °C sıcaklık ve 200 V alt malzeme voltajı altında büyütülen bor nitrür kaplamada gözlemlenmiştir.



Şekil 3. (a) 200 °C de büyütülen BN filmlerinin FTIR spektrumu, (b) 250 °C de büyütülen BN filmlerinin FTIR spektrumu

3.1.1. XPS Ölçümleri

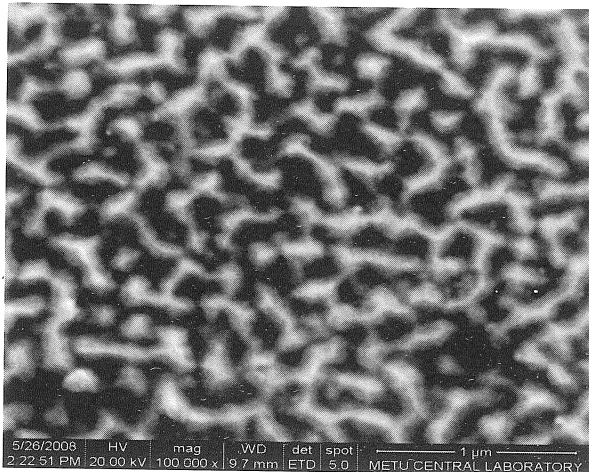
X-Ray fotoelektron spektroskopisi(XPS) büyütülen filmlerin bileşimsel analizinin yapılmasında kullanılmıştır. Şekil 4. de 200 °C de ve 200 V alt malzeme voltajı altında çelik örnek üzerinde büyütülen XPS spektrumuna ait grafik görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, bor ve azota (B_{1s} ve N_{1s}) ait tekli kimyasal durumlara ait tepe noktaları 190,3 ve 397,5 eV bağ enerjilerinde görülmüştür. [8] Ayrıca, XPS analizinden elde edilen bileşimsel oranda B/N= 1,1 olarak bulunmuştur ki bu da filmlerin stokiometrik olarak başarılı bir biçimde büyütüldüğünü göstermektedir.



Şekil 4. Bor ve Azot atomlarının 1s bağ enerjilerine ait XPS spektrumu

3.1.1. Elektron Mikroskobu Ölçümü

Filmlerin yüzey morfolojilerinin anlaşılması için Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) bakılmıştır. Şekil 5.de Silikon yonga plakası üzerindeki filme ait 100 000 kere büyütülmüş fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5. Silikon yonga plakası üzerinde büyütülmüş BN filme ait SEM fotoğrafı

3.2. BN filmlerin mekanik karakterizasyonu

3.2.1. Kalınlık Ölçümü

Bor nitrid filmlerin kalınlığı kalotest cihazıyla tahrip edici biçimde ölçülmüştür. Çelik örnekler kalotest cihazındaki mengeneler arasına sıkıştırıldıktan sonra kaplanmış yüzey dönen bir mile bağlı çelik bir küre ile temas ettirilmiştir. Aşındırıcı sıvının ilave edilmesiyle, mil belirli bir hızda döndürülmeye başlanmıştır. Mile bağlı çelik kürenin dönmesiyle de kaplama yüzeyinde krater oluşmaya başlamıştır. Bu işleme krater yeterli boyuta ulaşmaya kadar devam edilmiştir. Daha sonra optik mikroskop altında kaplama ve alt malzeme yüzeyinde oluşan kraterin çapları ölçülmüş ve basit bir formül yardımıyla kaplama kalınlığı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. İki saat süren deney sonucu yaklaşık kalınlık 0.5 μm olarak hesaplanmıştır. Farklı deney süreleri için kaplama değerleri Tablo 2. de verilmiştir.

Tablo 2: Farklı büyütme sürelerine göre ölçülen kaplama kalınlıkları

Süre	1 hr	2 hr	3hr
Kalınlık	0.2 μm	0.5 μm	0.8 μm

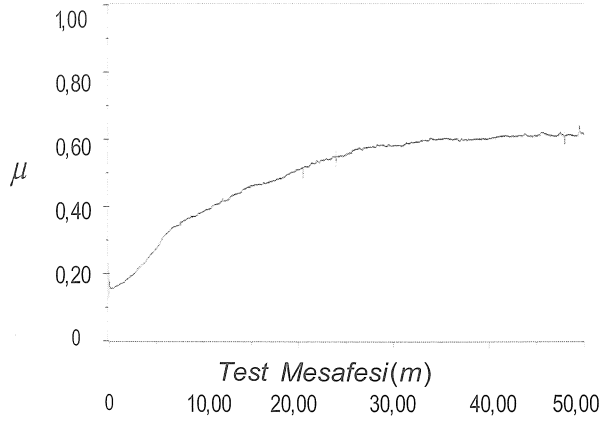
3.2.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Ölçümleri

Sürtünme katsayısına ait bilgiye ulaşmak için tribometre denilen cihaz kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı ölçümleri hava ortamında oda sıcaklığında ve yağlayıcı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Testler 1 N normal yük altında, 50 mm/s lineer hızda, dönüş çapı 5 mm olacak şekilde 50 m boyunca yapılmıştır. Şekil 6. daki grafikte de görüleceği gibi bu test koşullarında alüminaya karşı ortalama sürtünme katsayısı 0,5 olarak ölçülmüştür. Kübik bor nitridin çeliğe karşı sürtünme katsayısı daha önce yapılan çalışmalarda 0,4 olarak belirtilmiştir ki, bu da elde edilen sonuçları anlamlı kılmaktadır. [21] Aşınma ölçümleri için tribometre testi sonucu oluşan izlere profilemetre denilen cihaz altında bakılmıştır. Ancak, aşınma izlerini yüzey pürüzlülüğünden ayırt etmek mümkün olmamıştır. Buradan yola çıkarak bor nitrid kaplamaların oldukça iyi aşınma direncine sahip olduğu söylenebilir.

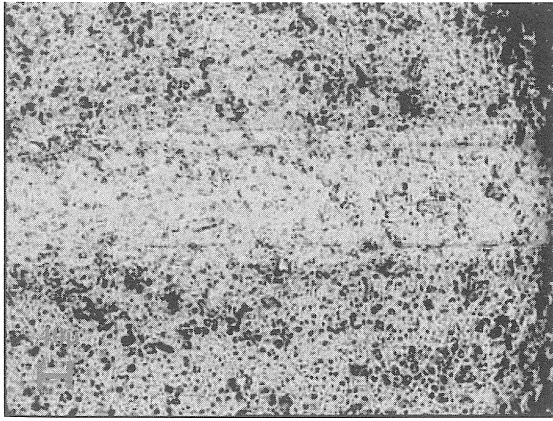
3.2.3. Yapışkanlık Ölçümleri

Kaplamaların yapışkanlık ölçümleri için çizik test cihazı kullanılmıştır. Testler lineer olarak artan yük altında yapılmıştır. Uygulanan yük 0,2 N dan başlayıp dakika da 100 N luk artışla 80 N a kadar çıkartılmıştır. Aşındırıcı uç olarak 200 μm çapında

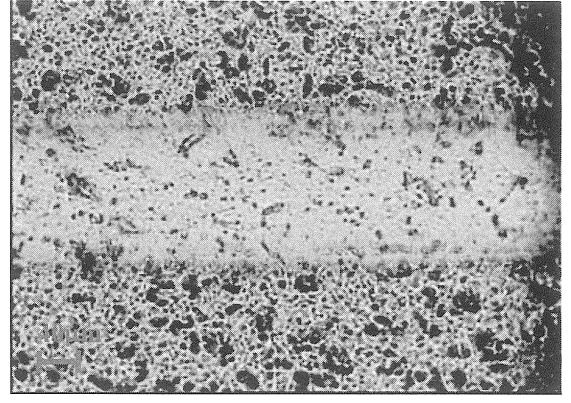
elmas kullanılmış ve 10 mm/s hızla hareket eden bu uçla kaplama yüzeyi 8 mm uzunluğunda çizilmiştir. Yükün artmasıyla birlikte elmas ucun nüfuz etme derinliği de artmıştır. 8 mm lik çizik sonunda yük 80 N olurken, kaplamanın yüzeyinden 50 µm içeri girilmiştir. Testler farklı deney parametrelerinde büyütülen örnekler için tekrarlanmıştır ve çiziklere ait birçok fotoğraf alınmıştır. Şekil 7. görülen 20 kere büyütülmüş fotoğraflardan da anlaşıldığı gibi 80 N yük altında dahi kaplamanın kenarlarında herhangi bir çatlak, kalkma veya yırtılma gözlemlenmemiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı parametrelerde yapılan çizik testleri için kritik yükler 20 ila 25 N arasında belirtilmiştir [21]. Bu sonuçlara göre ise çelik örneklerde üzerinde büyütülen bor nitür kaplamaların yapışkanlığının oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. BN filme ait sürtünme katsayısı



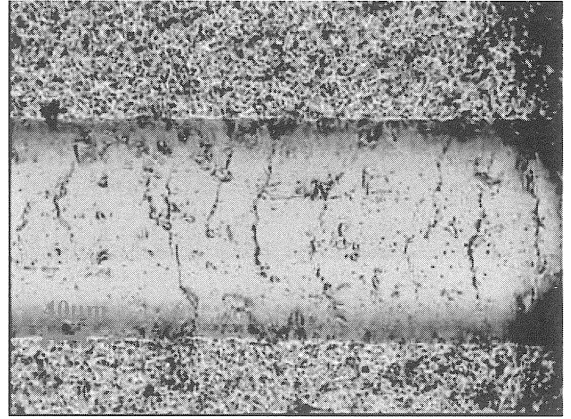
20 N yük altında



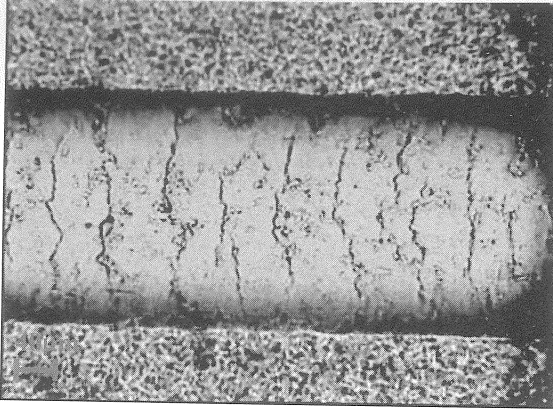
30 N yük altında



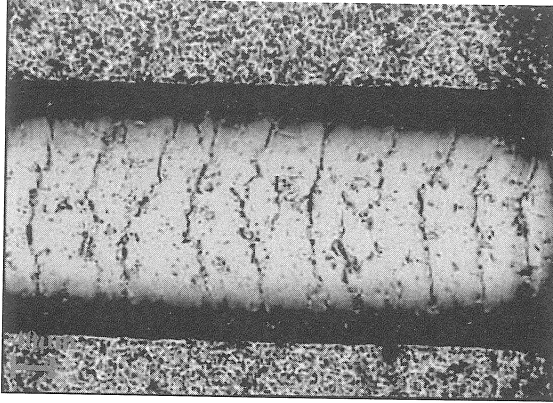
40N yük altında



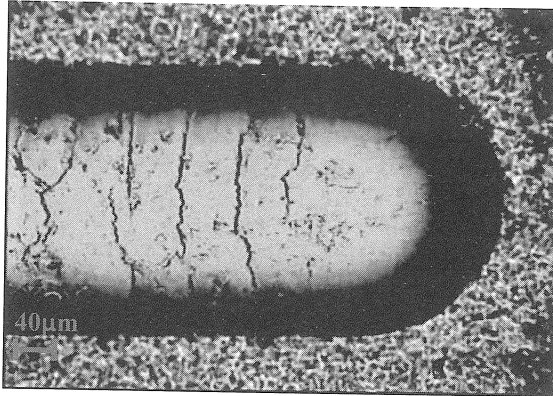
50 N yük altında



60 N yük altında



70 N yük altında



80 N yük altında

Şekil 7. Çizik testi sonucu oluşan izlerin gözlemlenmesi

4. SONUÇ

Bu çalışmada, bor nitrür filmler Silikon yonga plakalar ve çelik örnekler üzerinde rf magnetron saçırma yöntemiyle büyütülmüştür. Sinterlenmiş hekzagonal bor nitrür plaka hedef malzemesi olarak kullanılmıştır. Filmlerin karakterizasyonu göstermiştir ki, bor nitrür

kaplamalar hem silikon hem de çelik örnekler üzerinde başarıyla elde edilmiştir. FTIR sonuçlarına göre en yüksek kübik faz oranı 200 °C sıcaklıkta ve 200 V alt malzeme voltajı altında sağlanmıştır. Büyütme sürecinde yapılacak birkaç modifikasyonla bu oranı artırmak mümkündür. XPS sonuçlarına göre filmler stokiometrik olarak büyütülmüştür. Kalotest ölçümleri sonucu 2 saat deney sonucunda 0,5 µm kalınlığında kaplama olduğu anlaşılmıştır. Alümina malzemeye karşı ortalama sürtünme katsayısı 0,5 olarak ölçülmüştür. Aşınma ölçümlerine göre kaplamaların oldukça yüksek aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Yapışkanlık testleri kaplamaların yapışkanlığının yüksek olduğunu göstermiştir.

Kaplamaların değerlendirilmesine nano sertlik deneyleriyle devam edilecektir. Büyütme parametreleri kaplamaların uygulanabileceği alanlara göre optimize edilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar Ulusal Bor Araştırma Enstitüsüne, Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumuna ve ODTÜ Merkezi Laboratuvarına teşekkür eder. Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumunca desteklenen 105M370 nolu proje çerçevesinde yürütülmüştür.

DEPOSITION OF BORON NITRIDE COATINGS ON STEEL SUBSTRATES BY RF MAGNETRON SPUTTERING

Boron nitride coatings have been deposited on Si and steel substrates by radio frequency (rf) magnetron sputtering technique from a hexagonal boron nitride target. Deposition process was carried out in an Ar and N₂ mixture environment having a ratio of 5 to 1, respectively at a total pressure of 3x10⁻³ Torr. Main parameters were bias voltage and temperature in the deposition of boron nitride and the effect of these parameters were investigated. The objective of this study is to increase the fraction of cubic phase in coating in order to achieve high hardness and adhesion for the metal cutting applications. The characterizations of coatings were performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-Ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) techniques. Mechanical properties of boron nitride coatings on steel substrates were determined by thickness, friction coefficient, wear and adhesion measurements.

Keywords: Boron Nitride Coating, Magnetron Sputtering, High Speed Steel

KAYNAKÇA

1. Prouch J.-J., Alterovitz S.-A., Synthesis and Properties of Boron Nitride, Materials Science Forum, Vol 54&55 (1990), Trans Tech Publications.
2. Willa G., Perkins P.-G., Is there a new form of boron nitride with extreme hardness?, Diamond and Related Materials 10 (2001) 2010-2017.
3. Audronis M., Valiulis A.-V., Silickas P., Recent Developments in the Deposition of c-BN Coatings, ISSN 1392-1320 Materials Science (MEDŽIAGOTYRA), Vol. 10, No. 2. (2004)
4. Kimura Y., Wakabayashi T., Okada K., Wada T., Nishikawa H., Boron nitride as a lubricant additive, Wear 232_1999.199-206.
5. Klages C.-P., Fryda M., Matthke T., Schsfer L., Dimigen H., Diamond and c-BN Coatings for Tools, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 16 (1998) 171-176.
6. Neo K.-S., Rahman M., Li X.-P., Khoo H.-H., Sawa M., Maeda Y., Performance evaluation of pure c-BN tools for machining of steel, Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 326-331.
7. Jin M., Watanabe S., Miyake S., Murakawa M., Trial fabrication and cutting performance of c-BN-coated taps, Surface and Coatings Technology 133-134 (2000) 443-447.
8. Zhou Z.-F., Bello I., Kremnican V., Fung M.-K., Lai K.-H., Li K.-Y., Lee C.-S., Lee S.-T., Formation of cubic boron nitride films on nickel substrates, Thin Solid Films 368 (2000) 292-296.
9. Deng J., Wang B., Tan L., Yan H., Chen G., The growth of cubic boron nitride films by RF reactive sputter, Thin Solid Films 368 (2000) 312-31.
10. Zhu P.-W., Zhao Y.-N., Wang B., He Z., Li D.-M., Zou G.-T., Prepared Low Stress Cubic Boron Nitride Film by Physical Vapor Deposition, Journal of Solid State Chemistry 2002 167, 420-424.
11. Ye J., Rothaar U., Oechsner H., Conditions for the formation of cubic boron nitride films by r.f. magnetron sputtering, Surface and Coatings Technology 105 (1998) 159-164.
12. Tzeng Y., Zhu H., Electron-assisted deposition of cubic boron nitride by r.f. magnetron sputtering, Diamond and Related Materials 8 (1999) 1402-1405.
13. Hu C., Kotake S., Suzuki Y., Senoo M., Boron nitride thin films synthesized by reactive sputtering, Vacuum 59 (2000) 748-754.
14. Zhao Y.-N., Wang B., Yu S., Tao Y.C., He Z., Li D.M., Zou G.T., Preparation of c-BN films by RF sputtering and the relation of BN phase formation to the substrate bias and temperature, Thin Solid Films 320 (1998) 220-222.
15. Jiang L., Fitzgerald A.-G., Rose M.J., Lousa A., Gimeno S., Formation of cubic boron nitride by r.f. magnetron sputtering, Surface Interface Analysis 2002 , 34, 732-734.
16. Yang T.-S., Tsai T.-H., Lee C.-H., Cheng C.-L., Wong M.-S., Deposition of carbon-containing cubic boron nitride films by pulsed-DC magnetron sputtering, Thin Solid Films 398-399 (2001) 285-290.
17. Bewilogua K., Keuncke M., Weigel K., Wiemann E., Growth and characterization of thick cBN coatings on silicon and tool substrates, Thin Solid Films 469-470 (2004) 86-91.
18. Bello I., Chan C.-Y., Zhang W.-J., Chong Y.-M., Leung K.-M., Lee S.-T., Lifshitz Y., Deposition of thick cubic boron nitride films: The route to practical applications", Diamond & Related Materials 14 , (2005) 1154-1162.
19. Bello I., Chong Y.-M., Leung K.-M., Chan C.-Y., Ma K.-L., Zhang W.-J., Lee S.-T., Layyous A., Cubic boron nitride films for industrial applications, Diamond & Related Materials 14 (2005) 1784 - 1790.
20. Yamamoto K., Keuncke M., Bewilogua K., Deposition of well adhering cBN films up to 2 mm thickness by B-C-N gradient layer system, Thin Solid Films 377-378 (2000)331-339.
21. Keuncke M., Bewilogua K., Wiemann E., Weigel K., Wittorf R., Thomsen H., Boron containing combination tool coatings- characterization and application tests, Thin Solid Fils 494 (2006) 58-62.