

FBB TiN kaplamalarda taban malzemenin kalıntı gerilme üzerine etkisi

Uğur DEMİRLER*, Yılmaz TAPTIK

İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Sert seramik kaplamaların yük altında davranışlarını etkileyen önemli özelliklerinden biri içerdikleri kalıntı gerilmelerdir. Kalıntı gerilmelerin niteliği ve büyüklüğü kaplamanın taban malzemeye yapışması ve sertliği üzerinde çok etkilidir. Kaplamaların içerdiği kalıntı gerilmeleri ölçmeye yönelik değişik teknikler vardır. Bu teknikler içerisinde en yaygın kullanılanlardan bir tanesi x-ışınları kırınımıdır (XRD). Bu çalışma kapsamında ark-fiziksel buhar biriktirme (ark-FBB) tekniği kullanılarak iki farklı taban malzeme (AISI 304 paslanmaz çelik ve AISI M4 yüksek hız takım çeliği) üzerine kaplanmış olan titanyum nitrür (TiN) kaplamaların kalıntı gerilmeleri klasik kitlesel teknik ve ince film tekniği olmak üzere iki farklı x-ışınları kırınım tekniği kullanılarak ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalıntı gerilme ölçümü, XRD, FBB kaplamalar.

Substrate effects on residual stress of PVD TiN coatings

Abstract

Residual stress is one of the most important characteristic of hard ceramic coatings that directly affects their behavior under loading. The residual stresses in hard ceramic films consist of thermal stress resulted from cooling after deposition due to differences in the thermal expansion coefficient of the film and substrate, and growth stress or intrinsic stress generated during deposition. The magnitude of measured residual stress in the film depends on process parameters such as temperature, bias voltage, gas pressure, substrate, deposition time, and film thickness. The magnitude and the type of residual stress govern the adhesion and hardness properties of the coatings. Among several techniques utilized for residual stress measurements, techniques based on XRD are widely used. X-ray diffraction technique is relies on the elastic deformations within a polycrystalline material to measure residual stresses in a material. This study aims to analyze and compare the residual stress on hard ceramic TiN coatings produced by Arc-PVD technique. For this purpose two different XRD stress measurement techniques, namely classical bulk stress measurement, and thin film stress measurement were used. Every coating group were coated by using two different coating thicknesses (approximately 1µm and 3µm), two different bias voltages (150V and 250V) and two different substrates (AISI 304 stainless steel and AISI M4 high speed steel).

Keywords: Residual stress measurement, XRD, PVD coatings.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Uğur DEMİRLER. demirler@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 97.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Fiziksel buhar biriktirme TiN, CrN Ve ZrN kaplamalarda proses parametreleri ve taban malzemenin kalıntı gerilme üzerine etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.07.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 13.11.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) tekniği ile kaplama katı haldeki bir kaynağın vakum altında buharlaştırılması veya atomal hale dönüştürülmesi ve taban malzemenin üzerine biriktirilmesi ile gerçekleştirilir. FBB teknikleri kullanılarak seramik nitelikli, aşınmaya dayanıklı sert nitürler (TiN, CrN, ZrN, MoN, Mo₂N gibi), karbonitrürler (TiCN gibi), oksitler (Al₂O₃ gibi), borürler (ZrB, TiB₂ gibi) ve karbürler (TiC gibi) üretilebilmektedir (Noyan ve Kohen, 1987).

Özellikle geçiş elementlerinden üretilmiş metal nitürler FBB tekniği ile yoğun olarak üretilmektedir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiş kaplamalardan TiN kaplamalar için yapılan kalıntı gerilme ölçümleri, ince film kaplamalarda kalıntı gerilme ölçümlerinin ilk başladığı günlerden bu yana yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu durum Ti-N sisteminde yapılan kaplamaların Fiziksel buhar biriktirme tekniği ile üretilen kaplamalar arasında yoğun ticari kullanım bulmuş olmasından kaynaklanır. Bu çalışmanın amacı kaplamanın yapıldığı taban malzemenin değişmesi halinde ortaya çıkan koşulların kalıntı gerilme üzerine ne şekilde etki etdiğinin belirlenmesidir (Demirler vd., 2002; Sarıoğlu vd., 2002; Kazmanlı vd., 1999 ve Sanjinés vd., 1998).

Kalıntı gerilme ölçüm teknikleri üzerinde 1900'lü yıllardan beri çalışmalar yapılmış ve birçok ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin en bilinenleri kör delik (delik açma) yöntemi, tabaka kaldırma yöntemi, plaka eğme yöntemi, İndentasyon yöntemi, ultrasonik yöntemler, manyetik yöntemler, synchrotron radyasyon yöntemi, nötron kırınımı yöntemi, mikro-Raman spektroskopisi yöntemi ve X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemleridir (Noyan ve Kohen, 1987; Kandil vd., 2001; Lord, 2000; Nolan vd., 2000; Suresh ve Giannakopoulos, 1998; Gauthier vd., 1998; Schoenig, 1995; Hognestad ve Hanne, 1998).

Bir kaplama için sertlik, yapışma ve aşınma özellikleri kalıntı gerilmelerden büyük oranda etkilenir. Kalıntı gerilmeler kaplama üretim pro-

sesinde etkili olan bazı parametreler nedeniyle oluşur. Bu parametreler kaplama sıcaklığı, bias voltajı, gaz basıncı, birikme süresi, film kalınlığı, kaplama sonrası soğuma gibi proses parametreleri ve taban malzeme özellikleridir. Özellikle kaplama sonrası soğuma evresinde taban malzeme ve kaplama malzemesinin ısıl genişleme katsayılarının farklı olmasından dolayı oluşan ısıl gerilmeler kalıntı gerilmelerin oluşumunda büyük etki sahibidir (Demirler vd., 2002; Bendavid vd., 1994; Oettel vd., 1995).

XRD ile kalıntı gerilme ölçümü

X-ışınları difraksiyonu ile $\epsilon_{\phi\psi}$ şekil değişimi, gerilimli ve gerilimsiz durumda "d" düzlemler arası mesafeler arasındaki fark kullanılarak hesaplanabilir. ($\phi\psi$) doğrultusundaki şekil değişimi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir. Burada anılan doğrultu ve açılar Şekil 1'de verilmiştir.

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (1)$$

Burada $d_{\phi\psi}$ gerilme içeren malzemede ψ doğrultusuna dik kristal düzlemleri arasındaki mesafeyi $\{hkl\}$ ifade eder. d_0 ise aynı düzlemler için gerilmesiz hali ifade eder. Kaplamanın izotropik ve yüzeydeki gerilmenin tek eksenli olduğu varsayılırsa temel gerilmeler σ_1 ve σ_2 ile şekil değişim (gerilme) ilişkisi aşağıdaki gibi verilebilir.

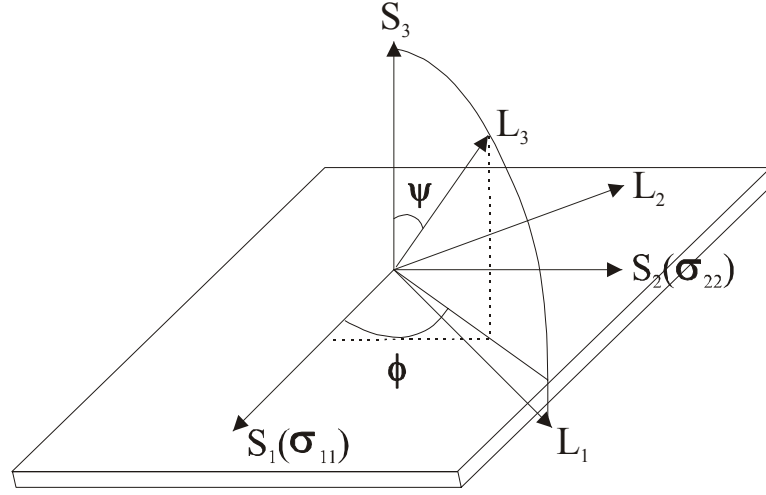
$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{S_2}{2} \cdot \sigma_{\phi} \sin^2 \psi + S_1(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

Burada S_1 ve S_2 x-ışınları elastik sabitleridir. σ_{ϕ} ise $\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi$ dir.

Elastik olarak izotropik olan bir katıda:

$$S_1 = -\frac{\nu}{E} \quad \text{ve} \quad \frac{1}{2} S_2 = \frac{1-\nu}{E} \quad \text{dir.}$$

Burada E elastisite modülü ve ν ise Poisson oranıdır (Dölle, 1979; Noyan ve Kohen, 1987; Novotna vd., 1999).



Şekil 1. Malzeme üzerinde doğrultu ve açıların şematik gösterimi

$\sin^2\psi$ tekniği malzemelerde x-ışınları difraksiyonu ile kalıntı gerilme ölçümü için kullanılan en yaygın tekniktir. Klasik teknikte malzemeler için d düzlemler arası mesafe ile $\sin^2\Psi$ eğrisi çizilir. X-ışınları difraksiyon analizi, seçilen bir $\{hkl\}$ düzlemi için yapılır. İnce filmler için ise düşük açı ile x-ışınları gönderilmesi gerektiğinden mümkün olan bütün $\{hkl\}$ düzlemlerinden difraksiyon alınarak a kafes sabitine karşılık $\sin^2\Psi$ eğrisi çizilebilir.

Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan TiN kaplamalar iki farklı taban malzeme üzerine Ark FBB yöntemi kullanılarak, farklı bias voltajları, farklı kaplama süreleri ve buna bağlı farklı kaplama kalınlıkları seçilerek üretilmiştir. Üretilen kaplamaların kalıntı gerilmeleri değerleri iki farklı XRD kalıntı gerilme ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. TiN kaplamaların yapılacağı taban malzemeler 304 kalite paslanmaz çelik (AISI 304) ve yüksek hız takım çeliği (AISI M4) olarak seçilmiştir. Taban malzemelerin bileşimleri ve bazı mekanik ve ısıl özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

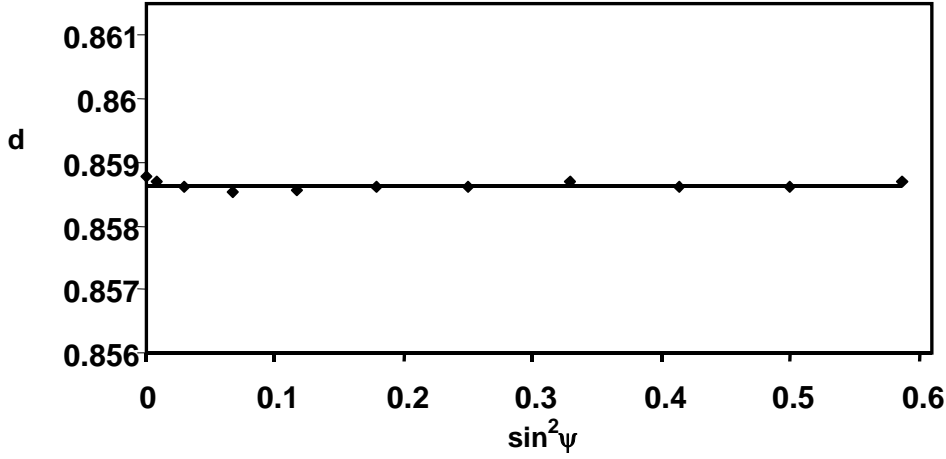
Tablo 1. AISI 304 ve AISI M4 çeliklerinin bazı mekanik ve ısıl özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (Gpa)	Sertlik (HB)	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
AISI 304	200	225	0-500 $^{\circ}\text{C}$ için 18.7
AISI M4	214	123	0-500 $^{\circ}\text{C}$ için 12.1

TiN kaplamalar “Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme” (KA-FBB) yöntemi kullanılarak Novatec-SIE (Model: NVT-12) fiziksel buhar biriktirme cihazında yapılmıştır.

Kalıntı gerilmeler, karşılaştırma amacıyla bütün malzemeler için hem klasik kitlesel teknik ile hem de ince film tekniği ile Philips PW 3710 difraktometre ile $\text{CuK}\alpha$ ışınımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler için paralel demet optikleri, grafit monokromatör, kolimatör ve orantılı dedektör kullanılmıştır. Ejiri ve diğerleri (1997) tarafından TiN için elastisite modülü olarak 427 Gpa ve Poisson oranı olarak 0.2 değerleri verilmiştir. Difraktometrenin hassasiyetini belirlemek için kalıntı gerilme içermeyen silikon numune kullanılarak kalibrasyon yapılmış ve klasik yöntem kullanılarak bulunan kalıntı gerilme değeri $\sigma=0.55$ MPa gibi sıfıra yakın bir değer çıkmıştır. Sert seramik kaplamalar üretim koşulları gereği basma yönünde yüksek sayılabilecek değerlerde ve GPa ölçeğinde ifade edilen kalıntı gerilme değerleri içermektedirler. Silikon numuneye yapılan kalıntı gerilme ölçümüne ait $d\text{-}\sin^2\psi$ grafiği Şekil 2’de görülmektedir.

Hesaplamaların doğru şekilde yapılabilmesi için elde edilen X-ışınları kırınım verileri ham olarak kullanılamaz. Yapılan hesaplama ile cihaz, numune ve diğer fiziksel koşullardan kaynaklanan olumsuz etkenler ortadan kaldırılıp kırınım pikinin gerçekte olması gereken yer belirlenir.



Şekil 2. Kalıntı gerilme içermeyen silikon numune için d - $\sin^2\psi$ grafiği

Bu işlem için “Philips PC-APD 3.6” bilgisayar programı kullanılmıştır. Kaplamaların üretimi için 150V ve 250V olmak üzere farklı iki bias voltajı belirlenmiştir. Kaplama süreleri ve birikme hızları gözönüne alınarak her iki bias voltajı için iki farklı kalınlıkta kaplama üretilmesi planlanmıştır. Planlanan kaplama kalınlıkları yaklaşık olarak $1\mu\text{m}$ ve $3\mu\text{m}$ dir. Tablo 2’de kaplamalar için bias voltajı, kaplama kalınlığı, ve hem ince film hem de kitlesel XRD yöntemleri ile ölçülen kalıntı gerilme analiz sonuçları yer almaktadır. 150V bias voltajında üretilen 1.01 ve $3.35\mu\text{m}$ kalınlığındaki kaplamalarda ince film yöntemi ile yapılan kalıntı gerilme analizi a - $\sin^2\psi$ diyagramları Şekil 3’te örnek olarak verilmiştir. Grafiklerdeki doğruların eğim farklılıkları hemen dikkati çekmektedir

ve eğimlerdeki bu farklılık kalıntı gerilmelerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3’te verilen a - $\sin^2\psi$ diyagramları hem AISI 304 hem de AISI M4 çelikleri üzerine yapılan kaplamaları içermektedir. Elde edilen bütün kalıntı gerilme değerleri basma gerilmesi yönündedir. FBB kaplamalarda kalıntı gerilmenin basma gerilmesi yönünde olması genel bir karakteristik olup kaplamanın taban malzemeye yapışmasını arttıran bir faktördür (Gill ve Clayne, 1994).

Tablo 2 incelenirse her iki kaplama kalınlığı için de 150V bias voltajında AISI 304 çeliğine yapılan kaplamaların kalıntı gerilmeleri AISI M4 üzerine yapılan kaplamalardan yaklaşık 1Gpa fazladır.

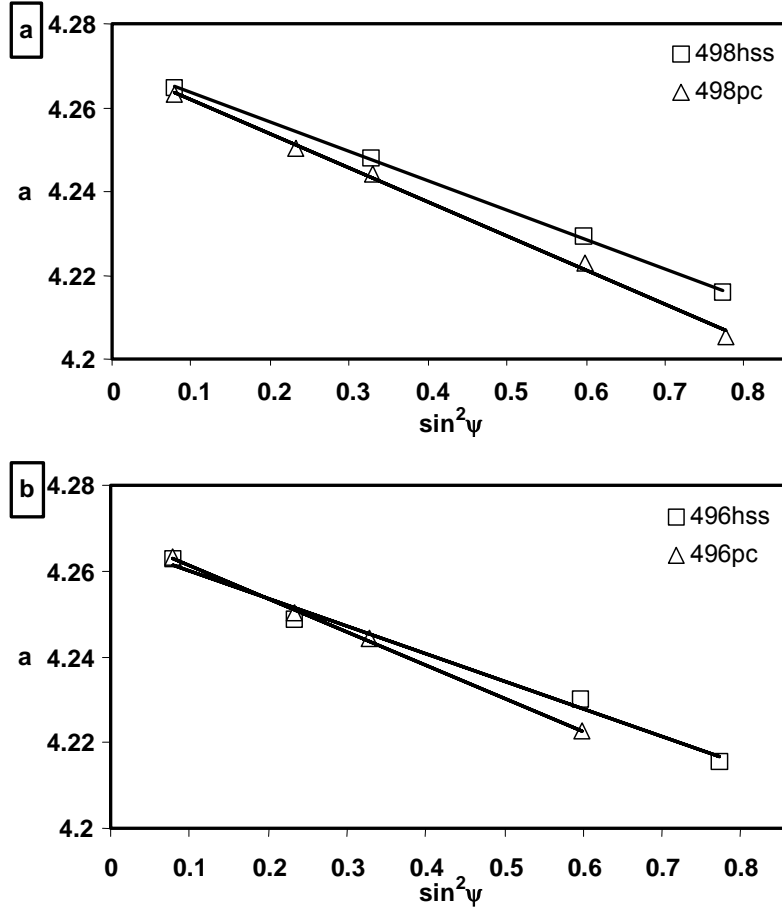
Tablo 2. Farklı taban malzemeler üzerine üretilen TiN kaplamalar için farklı bias voltajlarında ve farklı kalınlıklarda ölçülen ince film ve kitlesel XRD kalıntı gerilme analizi sonuçları

Kaplama	Bias Voltajı (V)	Taban Malzeme (malzeme kodu)	Kalınlık (μm)	Kalıntı Gerilme (GPa)	
				İnce Film Yöntemi	Kitlesel Yöntem
TiN	150	498hss-AISI M4	1.01	-5.83	-6.33
		498pc-AISI 304		-6.79	-6.73
		496hss-AISI M4	3.35	-5.35	-5.27
		496pc-AISI 304		-6.34	-6.24
	250	499hss-AISI M4	0.96	-2.90	-2.62
		499pc-AISI 304		-5.10	-4.70
		500hss-AISI M4	3.42	-3.16	-3.35
		500pc-AISI 304		-6.17	-5.72

Kaplama sonrası soğuma evresinde taban malzeme ve kaplamanın ısıl genişleme katsayılarının farklı olmasından dolayı oluşan ısıl gerilmelerin kalıntı gerilmelerin oluşumunda büyük etki sahibi olduklarından daha önce bahsedilmişti. Bu etkinin FBB-TiN kaplama sistemi için ne şekilde olduğu her iki taban malzeme için bu çalışmada yapılan kalıntı gerilme analizlerinde kendisini göstermektedir. Şekil 3'te örneği verilen 150V bias voltajında üretilmiş kaplamalar gibi 250V bias voltajında üretilmiş olan kaplamalar da AISI 304 üzerine kaplandıklarında daha yüksek kalıntı gerilme içermektedirler. 250V bias voltajında yapılan kaplamalarda taban malzemelerin kalıntı gerilme üzerine etkisi incelendiğinde artışlar neredeyse 2 kat olmuştur. 0.99 μ m kalınlığındaki kaplamalarda fark 2.2GPa, 3.42 μ m'lik kaplamalarda ise 3.01GPa'dır. Tablo 1'de taban malzemelerin ısıl genişleme katsayıları 0-500°C aralığında AISI 304 için

18.7 μ m/m-°C, AISI M4 için 12.1 μ m/m-°C olarak verilmiştir. TiN ısıl genişleme katsayısı ise 0-20°C aralığında 9.4 μ m/m-°C olup, titanyum alaşımları ısıl genişleme katsayısı ise 0-500°C aralığında 10 μ m/m-°C'dir. Seramik malzemeler için yapılan literatür araştırmasında nitrürlerin ısıl genişleme katsayılarının metalik bileşenine yakın olduğu görülmektedir. Yani TiN için 0-20°C aralığı için verilen katsayının 0-500°C aralığı için de yaklaşık olarak 9-10 μ m/m-°C civarında olacağı kabul edilebilir. Bu kabul karşılaştırma yapılırken her iki ısıl genişleme katsayısının 0-500°C aralığı dikkate alınarak değerlendirilmesi açısından kolaylık sağlayacaktır.

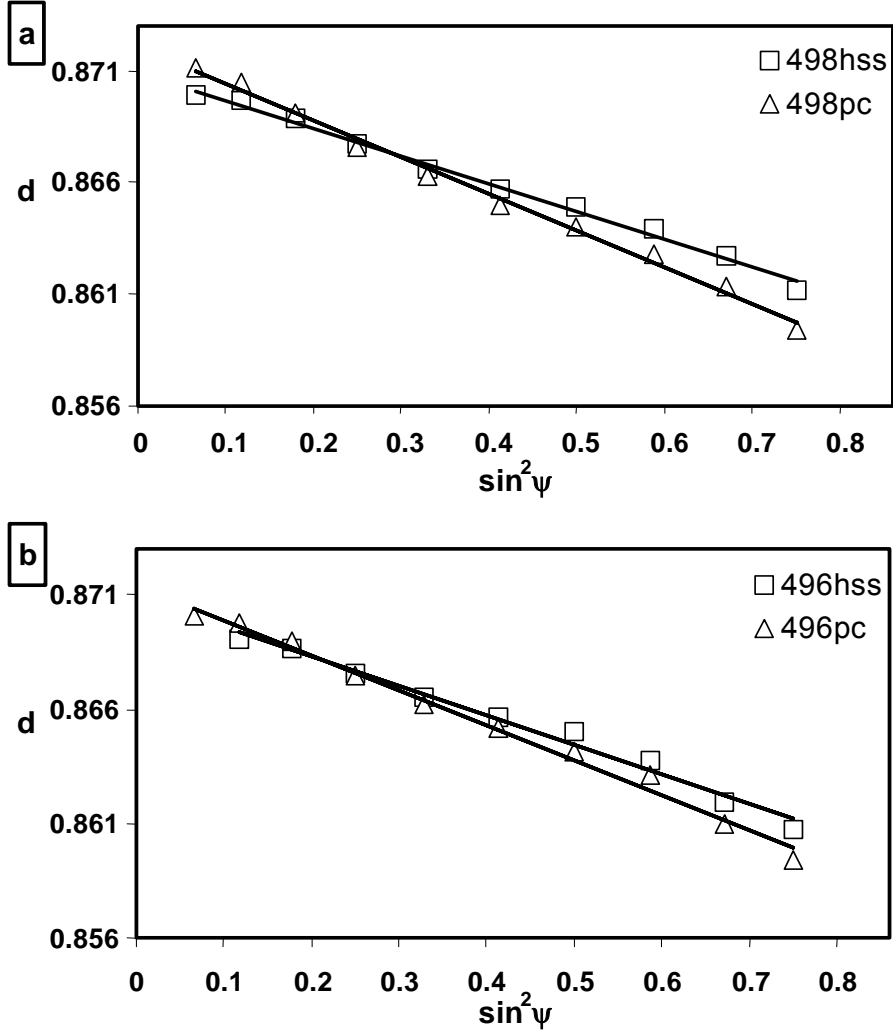
Taban malzeme farklılığının kalıntı gerilmeyi nasıl etkilediği ısıl genişleme katsayıları da göz önüne alınarak karşılaştırılırsa TiN ile AISI M4'ün ısıl genişleme katsayılarının birbirine yakın değerler olduğu görülür.



Şekil 3. 150V bias voltajında üretilen TiN kaplamalar için $a-\sin^2 \Psi$ grafikleri (a-3.35 μ m, b-1.01 μ m)

TiN ile AISI 304'ün ısı genleşme katsayıları ise birbirinden neredeyse iki kat farklıdır. Aynı kaplama kalınlığına sahip olan her iki taban malzemenin kaplaması da aynı şarjda ve aynı anda yapılmış ve her iki kaplama aynı ısınma ve soğuma koşullarına maruz kalmışlardır. Aynı şarjda yapılan kaplamaların taban malzeme farklılaştığında kalıntı gerilme değerlerinin değişmesinin temel nedenlerinden biri şu şekilde ifade edilebilir. Kaplama malzemesi ile taban malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklılığı ve bu farkın soğuma esnasında etkin bir rol oynaması kalıntı gerilmelerde de belirgin bir farklılığa neden olmaktadır.

Tablo 2'den kitlesel yöntem kalıntı gerilme analizleri ile ince film kalıntı gerilme analizlerinin birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiğini görmek mümkündür. Her taban malzeme, bias voltajı ve kalınlık kombinasyonunda her iki yöntem birbirini destekler neticeler ortaya koymuştur. Kitlesel yöntem ile elde edilen kalıntı gerilme değerlerinde taban malzemenin farklılaşması ile görülen fark 150V bias voltajında yaklaşık 1GPa, 250V bias voltajında ise yaklaşık 2-3GPa arasındadır. 150V bias voltajında hem AISI 304 hem de AISI M4 çelikleri üzerine yapılan 1.01 ve 3.35 μ m kalınlığındaki kaplamaların kitlesel yöntem ile kalıntı gerilme analizi $d\text{-sin}^2\Psi$ grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. 150V bias voltajında üretilen TiN kaplamalar için $d\text{-sin}^2\Psi$ grafikleri (a-3.35 μ m, b-1.01 μ m)

Sonuçlar

Farklı kalınlıklarda, farklı bias voltajlarında FBB tekniği ile üretilen TiN kaplamaların ince film ve kitlesel XRD yöntemleri ile yapılan kalıntı gerilme analizleri çalışmasından çıkarılan genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Analizler öncesi kalıntı gerilme içermeyen silikon numune ile yapılan klasik yöntem kalıntı gerilme analizinde bulunan sifıra yakın değer analiz sonuçlarının doğruluğunu kanıtlamaktadır.
2. TiN kaplamalar için hem kitlesel, hem de ince film yöntemi kullanılarak belirlenen kalıntı gerilme değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu da her iki yöntemin birbirini doğrular nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.
3. FBB yöntemi ile üretilen kaplamalarda kalıntı gerilmeler basma gerilmesi yönündedir. Gerilmenin bu yönde olması kaplamanın taban malzemeye tutunması açısından avantajdır. Bu çalışmada incelenen sistemlerde de sonuç aynı yönde çıkmıştır.
4. Bu çalışmada kaplamaların kalıntı gerilmeleri üzerinde en etkin parametre olarak taban malzeme özellikleri kendini göstermektedir.
5. Her koşul için AISI 304 çeliği üzerine kaplanan kaplamaların kalıntı gerilmesi AISI M4 çeliği üzerine kaplananlarınkinden daha yüksek olmuştur.
6. Kalıntı gerilme değerindeki taban malzemeden kaynaklanan artış lineer bir eğilim göstermemektedir. Kimi kaplamada fazla kimi kaplamada nispeten daha az olsa da Kaplama kalınlığı ve bias voltajı farklılığı da bu artış etkilemektedir.
7. Kaplama sonrası soğuma evresinde kalıntı gerilme oluşumunda taban malzeme-kaplama ısıl genleşme katsayılarının etkin bir rol oynadığını görülmektedir.
8. Aynı bias voltajları için kaplama kalınlıklarının artması kalıntı gerilme değerlerinde

çok belirgin bir eğilime neden olmamıştır ve “kalınlık-kalıntı gerilme” ilişkisi “taban malzeme-kalıntı gerilme” ilişkisi kadar net değildir..

9. Bu çalışmada kullanılan TiN kaplamalar için bias voltajının değişmesi kalıntı gerilme değerlerinde belirgin bir değişime neden olmamıştır.

Kaynaklar

- Bendavid, A., Martin, P. J., Netterfield, R. P. ve Kinder, T.J., (1994). The properties of TiN films deposited by filtered arc evaporation *Surface and Coatings Technology*, **70**, 97-106.
- Demirler, U., Taptık, Y., Ürgen, M. ve Çakır, A. F., (2002). Ark-Fbb tekniği ile yapılan sert seramik kaplamalarda kalıntı gerilmenin klasik ve ince film XRD tekniği ile karşılaştırmalı ölçümü, *11. Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Elektronik Kitabı*, İstanbul.
- Dölle, H., (1979). The influence of multiaxial stress states, stress gradients and elastic anisotropy on the evaluation of (Residual) stresses by X-rays, *Journal of Applied Crystallography*, **12**, 489-501.
- Ejiri, S., Sasaki, T. ve Hirose, Y., (1997). X-Ray stress measurement for TiN films evaporated by PVD, *Thin Solid Films*, **307**, 178-182
- Gauthier, J., Krause, T. W. ve Atherton, D. L., (1998). Measurement of residual stress in steel using the magnetic barkhausen noise technique, *NDT&E International*, **31**, 1, 23-31.
- Gill, S. C. ve Clyne, T. W., (1994). Investigation of residual stress generation during thermal spraying by continuous curvature measurement, *Thin Solid Films*, **250**, 172-180.
- Hognestad, H. ve Honne, A., (1998). Determination of stress in ferromagnetic steel by potential drop measurements, *Materials Science and Technology*, **14**, 1109-1114.
- Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T. ve Grant, P. V., (2001). A review of residual stress measurement methods-A guide to technique selection, *NPL Report MATC(A)04, Project CPM4.5 Measurement of Residual Stress in Components*, NPL Materials Centre, Middlesex, UK.
- Kazmanlı, M. K., (1999). Mo-N kaplamaların ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lord, J., (2000). Hole drilling techniques, *BCA Structural Materials Workshop*, NPL Materials Centre, Middlesex, UK.

- Nolan, M., Perova, T., Moore, R.A., Moore, C. J., Berwick, K. ve Gamble, H.S., (2000). Micro-Raman study of stress distribution generated in silicon during proximity rapid thermal diffusion, *Materials Science and Engineering*, B73, 168–172.
- Novotna, Z., Kralova, R., Novak, R. ve Marek, J., (1999). X-ray analysis of residual stresses in TiN coatings, *Surface and Coatings Technology*, **116–119**, 424–427.
- Noyan, I. C. ve Kohen, J. B., (1987). *Residual stress: measurement by diffraction and interpretation*, Springer-Verlag New York Inc., Printed in Germany.
- Oettel, H., Weidmann, R. ve Preibler, S., (1995). Residual stresses in nitride hard coatings prepared by magnetron sputtering and arc evaporation, *Surface and Coatings Technology*, **74-75**, 273-278.
- Sanjinés, R., Hones, P. ve Lévy, F., (1998). Hexagonal nitride coatings: electronic and mechanical properties of V₂N, Cr₂N and δ-MoN, *Thin Solid Films*, **332**, 225-229.
- Sarıoğlu, C., Demirler, U., Kazmanlı, M. K. ve Ürgen, M., (2002). Residual stresses in MoN and Mo₂N coatings deposited by arc PVD on high speed steel substrate, *Surface Modification Technologies XV*, Ed: Sudarshan, T. S. and Jeandin, M., ASM International, Ohio and IOM Cominications Ltd., U.K.
- Schoenig, F. C., (1995). Eddy current measurement of residual stress induced by shot peening in Titanium Ti-6Al-4V, *Materials Evaluation*, **Jan.**, 22-26.
- Suresh, S. ve Giannakopoulos, A. E., (1998). A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation, *Acta materiala*, **46**, 16, 5755-5767.