

Araştırma Makalesi / Research Article

Demir Esaslı Sert Dolgu Kaplamaların Karakterizasyonu ve Kırılma Tokluğunun İncelenmesi

Melis YURDDASKAL¹¹Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

e-posta: melis.yurddaskal@ege.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8774-3848>

Geliş Tarihi: 02.11.2022

Kabul Tarihi: 02.05.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Sert dolgu kaplama;
Mikroyapı; Makro
indentasyon kırılma
tokluğu; Palmqvist
çatlağı

Metal bileşenler genellikle kırılmalarından değil, aşınmalarından, orijinal boyutlarını ve kullanılabilirliklerini kaybetmelerinden dolayı amaçlandığı gibi çalışmazlar. Sert dolgu kaplamalar, endüstride kullanılan bileşenlerin/aletlerin ömrünü uygun maliyetle arttırmasından ötürü oldukça popüler olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ferrokrom ve ferroboron tozu ilavesiyle masif tel ve krom karbür içerikli özlü tel kullanılarak S235JR çeliğinin yüzeyi metal ark kaynağı tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Kaplamaların makro ve mikro sertlik testleri yapılmış, mikroyapı incelemeleri ve faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sert kaplamalarda oluşan sert fazların kaplamanın kırılma tokluğu üzerindeki etkisini göstermek amacıyla indentasyon tekniği kullanılarak oluşan Palmqvist çatlakları ile kırılma toklukları hesaplanmıştır. Kaplamada oluşan sekonder sert faz morfolojisinin kırılma tokluğu üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Characterization and Fracture Toughness Investigation of Iron Based Hardfacings

Abstract

Keywords

Hardfacing;
Microstructure; Macro-
indentation fracture
toughness; Palmqvist
crack

Metal parts frequently fail to perform as intended not because they break but because they deteriorate over time and lose their original shape and functionality. Because they cost-effectively extend the life of components and tools, hardfacing coatings are very common in industry. In this study, the surface of S235JR steel was coated using metal arc welding technique, using massive and chrome carbide cored wires with the addition of ferrochrome and ferroboron powders. Macro and micro hardness tests, microstructure studies and phase analyzes of the coatings were carried out. The hard phases' effects on the coating's fracture toughness were demonstrated using the indentation technique, and the formation of Palmqvist cracks was used to calculate fracture toughness. It was observed that the morphology of secondary hard phases formed in the coating had a positive effect on the fracture toughness.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Sert dolgu kaplamalar malzemelerin sertliğini ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için çeşitli kaynak yöntemleri kullanılarak metalik bir bileşen üzerine belirli bir alaşım malzemesinin kaplanması ile elde edilir. Metaller için istenen aşınma, darbe, korozyon ve ısı şok direnci gibi özellikleri karşılayabilen çeşitli alaşımlar vardır. Kaynak, bu gereklilikleri yerine getirmek ve sert dolgu alaşımlarını uygulamak için kilit bir teknolojidir (Garbade *et al.* 2021). Sert dolgu

kaplamaların düşük maliyetli olması yaygın kullanımlarına neden olmaktadır. Böylelikle aşınan parçanın %25'ine varan maliyetlerle o parçayı yeniden kullanıma kazandırmak mümkündür. Ayrıca aplanan malzemenin ömrünü 30 ila 300 kat uzatır ve arıza süresini ve yedek parça stoklarını azaltmaya olanak sağlar. Bununla birlikte, sert dolgu bileşenleri daha ucuz ana metalden üretilebilir (Ahn 2013). İki yüzey birbirine temas ettiğinde ve biri diğerinden daha sert olduğunda, abrasiv aşınma oluşur.

Özellikle tarım ve madencilik ekipmanlarında mekanik bileşenlerin sertliğini ve abrasiv aşınma direncini artırmak için sert kaplamalara başvurulur. Parçacıkların boyutu, malzemelerin aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Coronado *et al.* 2009).

Sert kaplama için, korumalı metal ark kaynağı (Nikolić *et al.* 2021), özlü ark kaynağı (Cardoso *et al.* 2022), toz altı kaynağı (Patel, Wanare, and Kalyankar 2021), gazaltı kaynağı (Kravchenko, Kartsev, and Kuznetsov 2021), toz püskürtme (Patel *et al.* 2021), Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme (HVOF) (Aoudia *et al.* 2020), plazma transferli ark (Srimath and Sathyabalan 2020), elektrik ark (Singh *et al.* 2022), tungsten soy gaz kaynağı (TIG) (Krzysztof *et al.* 2019) gibi çeşitli kaynak yöntemleri kullanılır.

Sert kaplamalarda dolgu malzemesi olarak masif ve/veya özlü tellerin kullanımı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan bir yöntemdir. Düşük alaşımlı çelikte sert kaplamalar için uygun malzemelerin seçilmesi maliyetleri büyük ölçüde azaltabilir (Yang *et al.* 2013). Ancak bazı durumlarda istenen özellikleri elde edebilmek için kullanılması gereken tel miktarı maliyeti oldukça arttırabilir. Kaynak işlemine toz ilavesi ise, kaynak alaşımı özelliklerini geliştirmek için kullanılan en ekonomik yollardan biridir (Srikarun and Muangjunburee 2018).

Metalik sert dolgu malzemelerinin aşınma ve triboloji özellikleri genellikle WC, Cr₃C₂, VC, Al₂O₃, Mo ve TiC (Hou *et al.* 2007; Rakanopoulou *et al.* 2014; Celik 2013) gibi sert partiküller tarafından güçlendirilir. Aşınmaya dayanıklı demir bazlı sert dolgu alaşımlarının mikro yapısı, östenit, ferrit, perlit veya martensit matrisi içerisinde sert fazlar-özellikle karbürler, borürler veya krom, demir, niyobyum, tungsten ve vanadyum karboborürleri-içerebilir. Yapılan bazı çalışmalarda yapıdaki karbürlerin kırılma davranışının Fe bazlı sert dolgu alaşımlarının aşınma direncini etkileyebileceği bildirilmiştir (Correa *et al.* 2007; Doğan and Hawk 1995; Coronado 2011). Bu tür fazların kırılma davranışı, kırılma tokluğu testleri kullanılarak incelenebilir. Ancak Fe esaslı sert dolgu alaşımlarında çok sayıda katılma çatlak görüldüğünden, Charpy ve CTOD Testi (Crack Tip Opening Displacement Test (Çatlak Ucu Açma Yer Değiştirme)) için numune hazırlamak

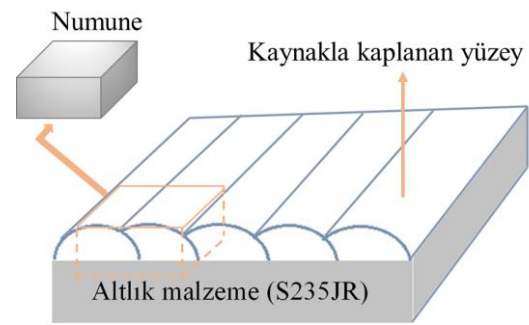
oldukça zordur. Bu nedenle, Fe bazlı sert dolgu alaşımlarının kırılma tokluğu hakkındaki literatürün sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için son yıllarda indentasyon tekniği geliştirilmiştir. İndentasyon tekniği ile çok daha hızlı ve basit bir şekilde sonuç alınabilmektedir (Moradkhani *et al.* 2013)

Bu çalışmada da S235JR çeliğinin yüzeyi metal ark kaynak yöntemi ile krom karbür içerikli özlü tel ve masif tele sırasıyla ferrokrom ve ferrobor toz ilavesi yapılarak kaplanmıştır. Sert kaplamaların içyapısı, oluşan fazlar, sertlikleri ve kırılma toklukları araştırılmıştır. Böylelikle sert kaplamalarda sıklıkla kullanılan karbür ve borür fazlarının kırılma tokluğu üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Malzemelerin Üretilmesi

Bu çalışmada kullanılan numuneler 5 mm kalınlığındaki S235JR çeliğinden plakanın üzerine elektrik ark yöntemiyle sert dolgu kaplanarak üretilmiştir (Şekil 1) (Durmuş *et al.* 2018). Kaplamalarda kullanılan toz ve kaynak teli kimyasal bileşimleri Çizelge 1 ve Çizelge 2’de, kaplama içerikleri ve üretim parametreleri ise sırasıyla Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilmiştir. Kaplama öncesi çelik malzemeye herhangi bir ön ısıtma işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 1. Üretilen numunelerin şematik gösterimi

2.2 Mikroyapı ve XRD analizleri

Sert fazların mikroyapısı ve hacimsel oranı, Clemex Yazılımı kullanılarak Nikon Eclipse LV 100 optik mikroskop ile incelenmiştir. Sert dolgu kaplamalarının zımparalanmış üst yüzeyinden 20°-90° arasında X-ışını kırınım analizi (XRD) gerçekleştirilmiştir. XRD analizinden hem oluşan

fazların türü tespit edilmiştir hem de Origin Pro yazılımından elde edilen yarı yükseklikteki tam genişlik (full width at half maximum-FWHM) değeri (Şekil 2) ile sekonder fazların demir esaslı matris fazının kafes yapısında meydana getirdiği distorsiyonlar hakkında fikir edinilerek yoruma katkı sağlanmıştır.

Çizelge 1. Dolgu tellerinin seyreltilmemiş kimyasal bileşimi (%ağırlıkça)

Tel Türü	C	Cr	B	Si	Mn	Ni	Fe
Masif	0,08	-	-	0,8	1,45	-	Kalan
Özlü tel	3,60	34,30	2,20	0,30	0,13	0,27	Kalan

Çizelge 2. Ferrokrom ve ferroboronun kimyasal bileşimleri (%ağırlıkça)

Toz Türü	C	Cr	B	Si	Fe
Ferrokrom	6	55	-	2	37
Ferrobor	-	-	17	-	83

Çizelge 3. Sert kaplamaların içerikleri

Numune	Kullanılan Tel Türü	Tel (%)	Toz (%)	Ferrobor (%)	Ferrokrom (%)
FeB	Masif	50	50	100%	-
FeCr	Özlü tel	70	30	-	100%

Çizelge 4. Kaplamaların üretim parametreleri

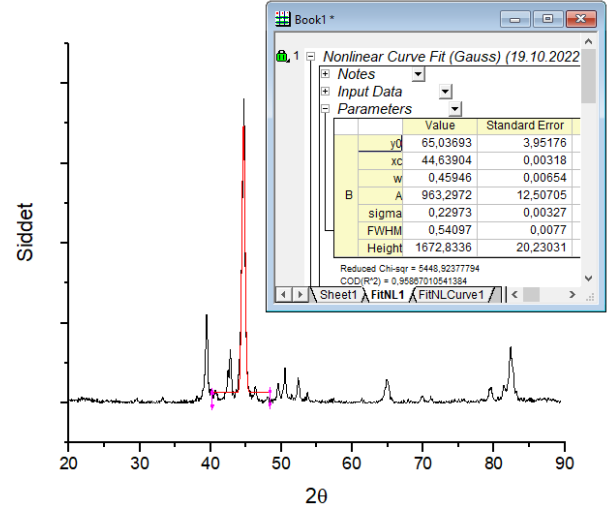
Numune	Takviye türü	Tel miktarı (g/dak)	Toz debisi (g/dak)	Voltaj (V)	Amper (A)	Tel ilerleme hızı (mm/dak)	Tel çapı (mm)	Serbest tel boyu (mm)
A	FeB	62	62	27.5	280-300	170	1.6	20-25
B	FeCr	157.5	105	27.5	400	220	3.2	35

2.3 Sertlik testi ve kırılma tokluğu hesaplamaları

Sert kaplamaların enine kesitinden alınan makro-Vickers sertlik ölçümleri, ASTM E-384'e göre 20 kgf yük altında Emco-Test DuraVision sertlik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri kaplamadan alınan beş farklı ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde batıcı ucun numune üzerinde oluşturduğu izin etrafını çevreleyen Palmqvist radyal çatlakların uzunluğu bir optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür ve kırılma toklukları aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmıştır (Majumdar *et al.* 2006):

$$K_{IC} = 0.087\sqrt{HW} \quad (1)$$

burada H sertlik (Pa) ve W çatlak direnci parametresidir ve $W=P/LT$ formülüyle hesaplanır. Burada P uygulanan yük (N), LT ise toplam çatlak uzunluğu (m) olarak alınmıştır. Sertlik testleri beş kez tekrarlanmış ve çalışmada ortalama değerlere yer verilmiştir.



Şekil 2. Origin Pro yazılımıyla yarı yükseklikteki tam genişlik değerinin elde edilmesi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Mikroyapı ve XRD analizi

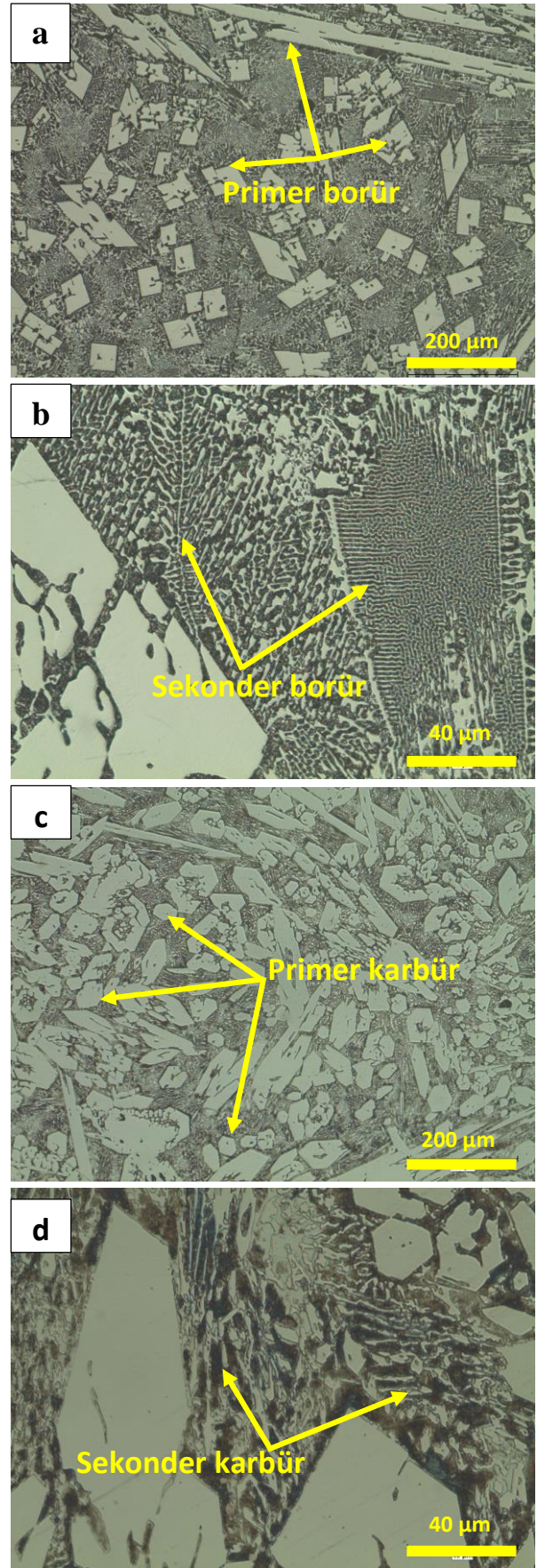
Şekil 3 ve Şekil 4'te sert dolgu kaplamalara ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Krom ve bor takviyesinin farklı morfolojide primer fazlar meydana getirdiği tespit edilmiştir. A numunesi olarak adlandırılan bor içerikli kaplamanın, dört köşeli morfolojide primer borürler ve demir esaslı matris fazı içerisinde dağılmış nano boyutta, ağsı yapıda sekonder borür/matris ötekliği içerdiği görülmüştür (Şekil 3.a-b). Krom içerikli B numunesinde ise altıgen morfolojide primer krom

karbür ve karmaşık şekilli, ayırık partiküller halinde matris fazında dağılmış sekonder karbürler tespit edilmiştir (Şekil 3.c-d). Yapılan bir çalışma (Durmuş *et al.* 2018) Fe-Cr-C-B içerikli sert dolgu kaplamalarda artan bor içeriğinin sekonder karbür/matris ötektiğinin morfolojisini değiştirdiğini ifade etmiştir ve ötektiğin çökelmiş parçacıklardan sürekliliği olan ağ yapıya dönüştüğünü göstermiştir. Şekil 4'te sert dolgu kaplamaların altlık malzemesi/kaplama ara yüzeyine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu bölgede primer fazların meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, alaşım elementince yoksun olan altlık malzemesinin kaplama işlemi sırasında eriyerek, eriyik haldeki kaplama malzemesini alaşım elementi bakımından seyreltmesidir. Bu durumda primer fazları meydana getirecek bor/krom miktarı azalacağından primer fazlar yerine mikroyapıda sekonder karbür/borür oluşumu gözlenmiştir.

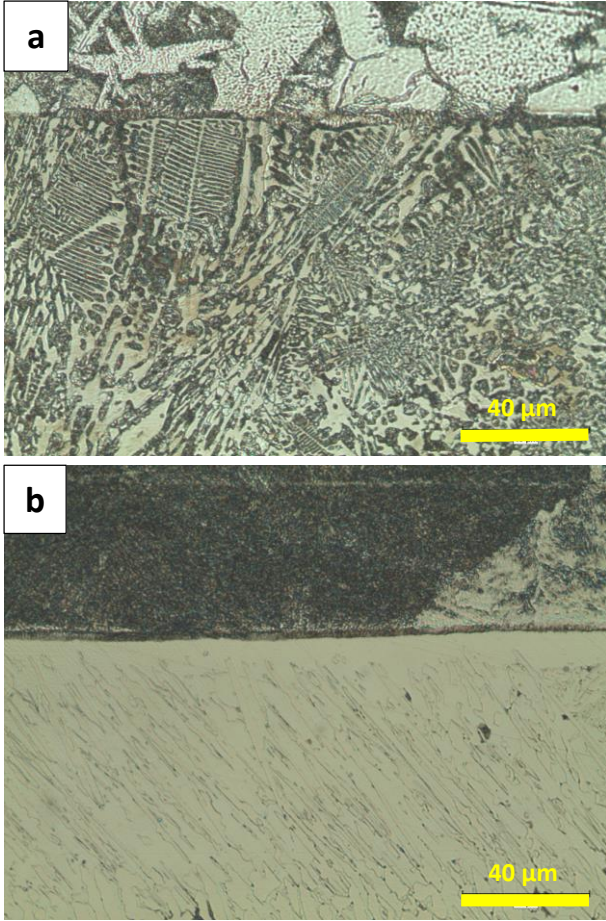
Mikroyapı incelemelerinde gözlenen fazların türünü belirlemek amacıyla yapılan XRD analizlerine göre (Şekil 5), FeB içeren A numunesinin köşeli şekle sahip olan birincil fazları (Şekil 5.a) demir-bor bileşikleri (FeB ve Fe₂B) olarak tespit edilmiştir. Shoushtari Fe-B-C sert dolgu alaşımlarının mikroyapı morfolojisini incelemiştir (Shoushtari 2019). Çalışması sonucunda XRD analizi ile Fe₂B ve FeB fazlarını tespit etmiştir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen mikroyapı görüntülerine (Şekil 3.b) benzer şekilde sekonder fazların ağ benzeri morfolojide olduğu görülmüştür.

B numunesine ait XRD grafiği incelendiğinde (Şekil 5.b) Cr₇C₃ fazına ait spesifik piklerin varlığı tespit edilmiştir. Her iki kaplama da demir esaslı bir altlık yüzeyine yapıldığı için grafiklerde yaklaşık 45° de matris fazına ait α-Fe piki de gözlemlenmiştir.

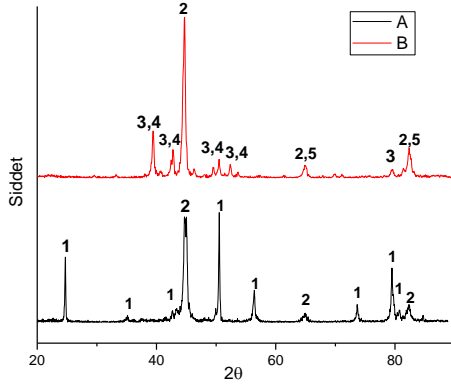
Sert dolgu kaplamaların fazlarına ait hacimsel oran analizine göre (Şekil 6) FeB içeren A numunesinde yapıya sertlik veren borür fazlarının oranı yaklaşık olarak %58,8 dir. Bu oran karbür içeren B numunesinde %61,2 dir.



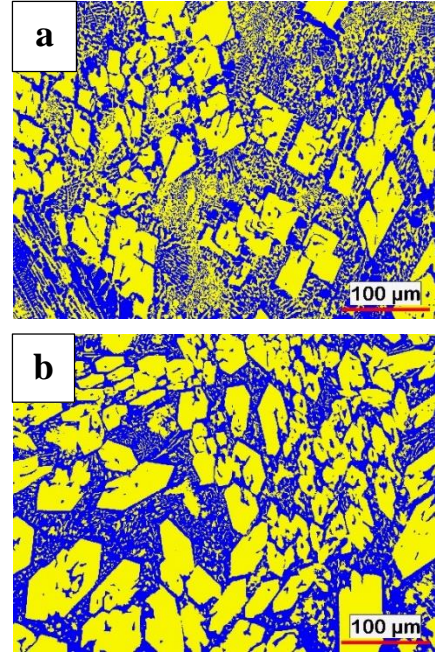
Şekil 3. Sert kaplamaların mikroyapıları a) FeB içeren numunenin genel morfolojisi b) FeB içeren numunenin sekonder faz morfolojisi c) FeCr içeren numunenin genel morfolojisi d) FeCr içeren numunenin sekonder faz morfolojisi



Şekil 4. Altlık malzeme/kaplama ara yüzüne ait mikroyapı görüntüleri: a)FeB, b)FeCr



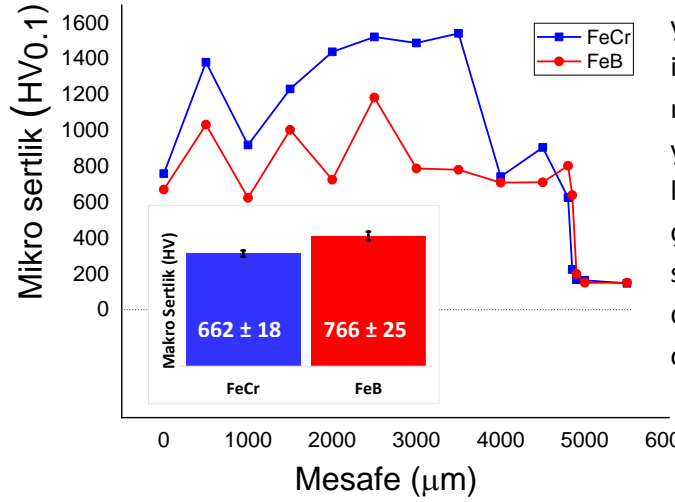
Şekil 5. Kaplamaların XRD sonuçları 1: Demir-bor 2: Ferrit 3: Cr₇C₃ 4: Fe₇C₃ 5: Fe



Şekil 6. Sert fazların (sarı) ve matrisin (mavi) fraksiyonel analizi a)FeB b)FeCr

3.2 Sertlik ve kırılma tokluğu

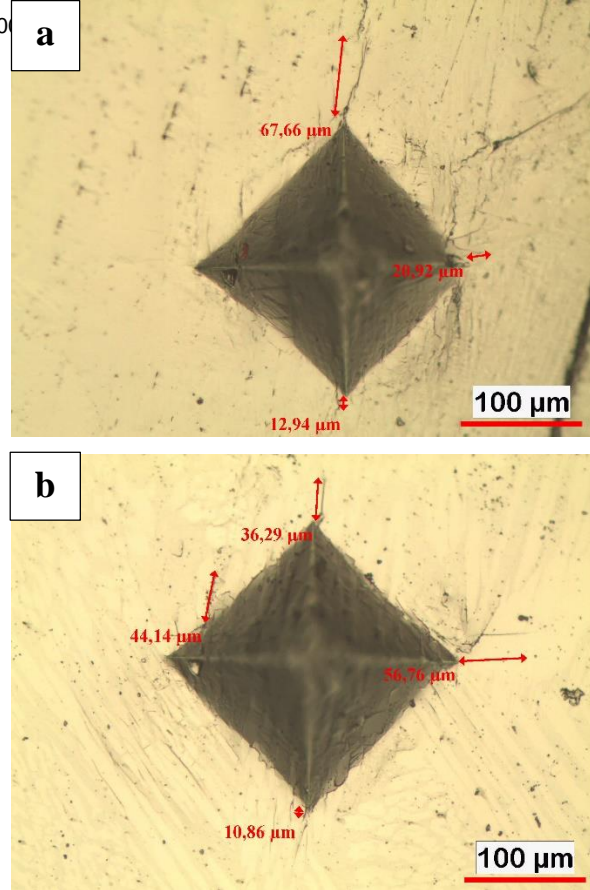
Kaplama tabakasının yüzeyinden altlığa kadar mikro sertliğin değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. FeCr içeren kaplamaların ortalama makro sertliği 662 ± 18 HV₂₀ iken FeB içeren kaplamaların makro sertliği ise 766 ± 25 HV₂₀ dir. FeCr içeren kaplamalarda karbür yoğunluğunun fazla olmasından dolayı (Şekil 6.b) mikro sertlik ölçümlerinde FeB içeren kaplamaya göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum alınan ölçümlerin doğrudan karbürlere denk gelmesiyle açıklanabilir. FeB içeren kaplamanın mikro sertliğinin diğer kaplamaya göre daha düşük elde edilmesinin sebebi ise mikroyapısında görüldüğü gibi (Şekil 6.a) sert faz oranının diğer kaplamadan oldukça düşük olmasıdır.



Şekil 7. Kaplamalara ait sertlik değerleri

İki kaplamanın da aynı sertlik değişim eğilimine sahip olduğu görülmüştür. Kaplama sertliği altlık tabakaya doğru azalma eğilimi sergilemiştir. Kaplama tabakasının değişen mikrosertliği, mikro yapısı ile ilgilidir. Altlık malzemesine yakın bölgede mikrosertlikte düşüş meydana geldiği gözlenmiştir. Özellikle krom içeren B numunesinde sertlik düşüşü daha belirgindir. Mikroyapı incelemelerine bakıldığında B numunesinin altlık malzeme/kaplama ara yüzeyinde primer karbür oluşmadığı ve sekonder karbürlerin daha seyrek bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak sertliğin ani olarak düştüğü tespit edilmiştir. Bor içeren A numunesinde ise altlık malzeme/kaplama ara yüzeyinde nano boyutta yapılanmış sekonder borür/matris ötektiklerinin oluşması, sertlikte kayda değer bir düşüşün önüne geçmiştir. Genel bir ifade ile altlık malzeme/kaplama ara yüzeyinde meydana gelen sertlik düşüşünün temel sebebi seyrelmedir (Srikarun *et al.* 2019; Srikarun *et al.* 2021). Kaplamaların yaklaşık 45° de α -Fe fazına ait yarı yükseklikteki tam genişlik değerleri incelendiğinde, bor içeren A numunesinin 0,69808 olan FWHM değerinin krom içeren B numunesine göre (FWHM: 0,54097) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. A numunesinin sekonder faz morfolojisi sebebiyle demir esaslı matrisin kafes yapısını daha fazla distorsiyona uğrattığı düşünülmektedir. Buna bağlı olarak A kaplamasının toklukta ödün vermeden yüksek makro sertliğe sahip olduğu görülmüştür. Oh ve ark., artan dislokasyon yoğunluğunun FWHM değerini artırdığını tespit etmiştir (Oh *et al.* 2017).

Kafes distorsiyonlarındaki artış dislokasyon yoğunlukları ile ilişkilendirilebilir. Buna karşın krom içeren B numunesinde krom karbür fazlarının nispeten yüksek oranda olması ve sekonder karbür yapısı nedeniyle makro sertlik ölçümü sırasında karbürlerin kırılmasıyla sertliğin beklenenden düşük çıktığı sonucuna varılmıştır. B numunesinin mikro sertlik dağılımı A numunesine göre daha yüksek değer aralığında iken makro sertliğin daha düşük olması bu durumla açıklanmıştır.



Şekil 8. İndentasyon izlerinin ve çatlakların temsili mikrografları a)FeCr b)FeB

FeB ve FeCr içeren numuneler aynı yükleme koşulları altında batıcı uç izinin bazı köşelerinden çatlama göstermişlerdir. Bu çatlaklar kendi içlerinde eğrimsellikler gösterse de Şekil 8 de gösterildiği gibi iz boyunca çatlak uzunluğunun iz düşümü alınarak ölçülmüş (Lin 2015) ve ortaya çıkan kırılma toklukları değerleri sırasıyla $13,5 \pm 2,8$ MPaVm ve $8,28 \pm 0,8$ MPaVm olarak hesaplanmıştır.

FeCr numunesinde elde edilen çatlakların boyları FeB içeren A numunesinde elde edilen çatlaklara göre daha fazladır. Bunun sebebi yapıda bulunan kaba taneli primer sert fazlar ve karmaşık şekilli,

keskin köşeler barındıran sekonder fazlardır. FeB içeren A numunesinde elde edilen sert faz oranı her ne kadar FeCr içeren B numunesiyle benzerlik gösterse de A numunesinin mikroyapısında da görüldüğü gibi sekonder sert fazlar ayrı parçacıklar halinde değildir ve matris fazı ile katmanlı bir yapı oluşturmuştur.

FeB içeren A numunesinin nano boyutlara sahip ağı yapıdaki (petek ve balık kılıcı benzeri görüntü) sekonder fazlarının çatlak ilerlemesini engellediği düşünülmektedir. Wang vd. (Wang *et al.* 2013). sekonder faz içeren bileşiklerin, çatlak ilerlemesi üzerinde pozitif bir önleyici etkiye sahip olduğunu öne sürmüştür. Bununla birlikte mevcut sekonder fazların morfolojisi de kırılma tokluğu açısından göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür. Birbirinden ayrı keskin köşeler içeren sekonder fazlar yük altında gerilme yığılmalarının meydana gelebileceği noktalar oluşturabilir (Şekil 3.d). Buna karşın, birbiri ile bağlantılı halde ve matris ile ince kanallar şeklinde ötektik oluşturan ağı yapıda sekonder fazların çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olduğu, bu çalışmada elde edilen bulgularla desteklenmiştir. Benzer şekilde, Gramajo ve ark., M7 BC3 karbür fazının artan miktarı ve boyutunun kırılma tokluğu açısından kaplamayı dezavantajlı hale getirdiğini ifade etmiştir (Gramajo *et al.* 2020). Dolayısıyla Krom içeren B numunesinde ayrı sekonder fazların boyutunun A numunesinde meydana gelen ağı sekonder fazlara kıyasla daha büyük olması sebebiyle B numunesinde kırılma tokluğunu düşürdüğü tespit edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmanın amacı, FeB ve FeCr içeren sert dolgu kaplamaların mikroyapısını ve kırılma tokluğunu incelemektir. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kaplamalarda meydana gelen primer fazlar krom ve bor içeriğine göre farklı morfolojik yapıya sahiptirler.
2. Kaplamada yer alan sert fazların oranı sertlik ölçümlerinde önem arz etmektedir. Sert faz (karbür/börür) oranının artması mikro sertlik ölçümlerinde sert fazdan ölçüm alınma ihtimalini arttırmaktadır. Ayrıca altlık

malzeme/kaplama ara yüzeyinde meydana gelen seyrelme miktarı mikroyapının dolayısıyla mikro sertliğin ani değişim miktarını da etkilemektedir.

3. Kaplamaların α -Fe fazına ait FWHM değerleri dislokasyon yoğunluğunu belirlemektedir. Buna göre FWHM değeri daha yüksek olan numune daha fazla kafes çarpılmasına sahip olduğu için makro sertlik değeri yüksek çıkmaktadır.
4. Yapıda hesaplanan kırılma tokluğu ile sert fazların mikroyapısı ile arasında bir ilişki vardır. Ayrı yapıda keskin köşeler içeren sekonder fazlar, indentasyon sırasında oluşan çatlakların ilerlemesine neden olurken; ağı yapıya sahip sekonder faz yapısı, çatlakların ilerlemesine engel oluşturmaktadır. Bor içerikli sert dolgu kaplamaların bu anlamda sertlikten ödün vermeden kırılma tokluğunu geliştirebileceği görülmüştür.

5. Kaynaklar

- Ahn, D. G., 2013. Hardfacing Technologies for Improvement of Wear Characteristics of Hot Working Tools: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (7), 1271–1283.
- Aoudia, K., Retraint, D., Verdy, C., Langlade, C., Creus, J., & Sanchette, F., 2020. Enhancement of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of HVOF-Sprayed NiCrBSi Coatings Through Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Journal of Thermal Spray Technology*, 29, 2065-2079.
- Cardoso, A., Assunção, E., Pires, I., 2022. Study of a hardfacing flux-cored wire for arc directed energy deposition applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 3431–3442.
- Celik, O. N., 2013. Microstructure and Wear Properties of WC Particle Reinforced Composite Coating on Ti6Al4V Alloy Produced by the Plasma Transferred Arc Method. *Applied Surface Science*, 274, 334–40.
- Coronado, J. J., 2011. Effect of $(Fe,Cr)_7C_3$ Carbide Orientation on Abrasion Wear Resistance and Fracture Toughness. *Wear*, 270 (3–4), 287–93.

- Coronado, J.J., Holman F. C, Adolfo L. G., 2009. The Effects of Welding Processes on Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits. *Tribology International*, 42 (5), 745–749.
- Correa, E. O., Alcântara, N. G., Tecco, D. G., Kumar, R. V., 2007. The Relationship between the Microstructure and Abrasive Resistance of a Hardfacing Alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V System. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 38 (8), 1671–1680.
- Doğan, Ö N., Hawk J. A., 1995. Effect of Carbide Orientation on Abrasion of High Cr White Cast Iron. *Wear*, 189 (1–2), 136–142.
- Durmuş, H., Çömez, N., Gül, C. Yurddaşkal, M, Yurddaşkal, M., 2018. Wear Performance of Fe-Cr-C-B Hardfacing Coatings: Dry Sand/Rubber Wheel Test and Ball-on-Disc Test. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 77, 37–43.
- Garbade, R. R., Dhokey, N. B., 2021. Overview on Hardfacing Processes, Materials and Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1017 (1), 012033.
- Gramajo, J., Gualco, A., Svoboda, H., 2020. Study of the Welding Procedure in Nanostructured Super-Hard Fe-(Cr, Mo, W)- (C, B) Hardfacing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 88, 105178.
- Hou, Q. Y., He, Y. Z., Zhang, Q. A. Gao, J. S., 2007. Influence of Molybdenum on the Microstructure and Wear Resistance of Nickel-Based Alloy Coating Obtained by Plasma Transferred Arc Process. *Materials & Design*, 28 (6), 1982–1987.
- Kravchenko, I. N., Kartsev, S. V., Kuznetsov, Y. A., 2021. Method for Protecting Plasma-Jet Hard-Facing by Gas Powder Flow. *Refractories and Industrial Ceramics*, 61 (5), 518–527.
- Krzysztof, D., Józwick, J., Barszcz, M., Gauda, K., 2019. Wear Characteristics of Hardfacing Coatings Obtained by Tungsten Inert Gas Method. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 13 (4), 8–14.
- Lin, C. M., 2015. Functional Composite Metal for WC-Dispersed 304L Stainless Steel Matrix Composite with Alloying by Direct Laser: Microstructure, Hardness and Fracture Toughness. *Vacuum*, 121, 96–104.
- Majumdar, J. D., Chandra, B. R., Nath, A. K., Manna, I., 2006. In Situ Dispersion of Titanium Boride on Aluminium by Laser Composite Surfacing for Improved Wear Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 201 (3–4), 1236–1242.
- Moradkhani, A., Baharvandi, H., Tajdari, M., Latifi, H., Martikainen, J., 2013. Determination of Fracture Toughness Using the Area of Micro-Crack Tracks Left in Brittle Materials by Vickers Indentation Test. *Journal of Advanced Ceramics*, 2 (1), 87–102.
- Nikolić, R. R., Marković, S., Arsić, D., Lazić, V., Hadzima, B., Ulewicz, R., 2021. Influence of Different Hard-Facing Procedures on Quality of Surfaces of Regenerated Gears. *Production Engineering Archives*, 27 (4), 257–264.
- Oh, S. T., Woo, K., Kim, J. H., Kwak, S. M., 2017. The Effect of Al and V on Microstructure and Transformation of β Phase during Solution Treatments of Cast Ti-6Al-4V Alloy. *Korean Journal of Metals and Materials*, 55 (3), 150–55.
- Patel, R. V., Wanare, S. P., Kalyankar, V. D., 2021. Investigations on Wear Behaviour of AISI 4140 Hot Strip Mill Roller Hardfaced with Martensitic Stainless Steel by Submerged Arc Welding Process. *Tribology in Industry*, 43 (5), 373-385.
- Rokanopoulou, A., Skarvelis, P., Papadimitriou, G. D., 2014. Microstructure and Wear Properties of the Surface of 2205 Duplex Stainless Steel Reinforced with Al₂O₃ Particles by the Plasma Transferred Arc Technique. *Surface and Coatings Technology*, 254, 376–81.
- Singh, S., Kumar, R., Goel, P., Singh, H., 2022. Analysis of Wear and Hardness during Surface Hardfacing of Alloy Steel by Thermal Spraying, Electric Arc and TIG Welding. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1599–1605.
- Shoushtari, M.T., 2019. Investigation on Composition and Microstructural Morphology of the Fe-B-C Hardfacing Layers. *Journal of Environmental Friendly Materials*, 3(1), 1-7.
- Srikarun, B., Muangjunburee, P., 2018. The Effect of Iron-Based Hardfacing with Chromium Powder Addition

onto Low Carbon Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5 (3), 9272–9280.

Srikarun, B., Oo, H. Z., Muangjunburee, P., 2021. Influence of Different Welding Processes on Microstructure, Hardness, and Wear Behavior of Martensitic Hardfaced Cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30 (12), 8984–8995.

Srikarun, B., Oo, H. Z., Petchsang, S., Muangjunburee, P., 2019. The Effects of Dilution and Choice of Added Powder on Hardfacing Deposited by Submerged Arc Welding. *Wear*, 424–425, 246–254.

Srimath, N., Sathyabalan, P., 2020. Characterization of Stainless Steel 410 L Weld Bead for Plasma Transferred Arc Hardfaced Valve Seat Rings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 764 (1), 012056.

Wang, D., Zhao, J., Zhou, Y., Chen, X., Li, A., Gong, Z., 2013. Extended Finite Element Modeling of Crack Propagation in Ceramic Tool Materials by Considering the Microstructural Features. *Computational Materials Science*, 77, 236–244.

Yang, J., Yang, Y., Zhou, Y., Qi, X., Gao, Y., Ren, X., 2013. Microstructure and wear properties of Fe-2 wt-% Cr-X wt-% W-0.67 wt-% C hardfacing layer. *Welding Journal*, 92 (8), 225-230.