

GAZİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Improving Ballistic Properties of Low Alloy Steels by Surfacing Welding

Ugur Ozdemir^a, Mustafa Sozeri^b, Tayfun Fındık^c

Submitted: 26.04.2022 Revised: 15.06.2022 Accepted: 27.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705019

ABSTRACT

Keywords: hardfacing, surfacing welding, ballistic, ballistic protection, hardness

^a Gazi University,
 Technology Faculty,
 Dept. of Metallurgical and Materials
 Engineering
 06560 - Ankara, Türkiye
 Orcid: 0000-0003-0521-4617
 e mail: uozdemir@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
 Technology Faculty,
 Dept. of Metallurgical and Materials
 Engineering
 06560 - Ankara, Türkiye
 Orcid: 0000-0002-2494-3260

Technology Faculty,
 Dept. of Metallurgical and Materials
 Engineering
 06560 - ANKARA, Türkiye
 Orcid: 0000-0003-2057-4864

*Corresponding author:
 uozdemir@gazi.edu.tr

While many methods were used in the development of armor materials, welding was preferred in this study. Although welding is a process that mainly used for the purpose of joining two parts, it has become one of the methods that directly affect and improve the properties of the parts today. Surfacing is a type of welding method that covering surface of worn or produced metal parts with hardfacing electrodes to increase wear resistance, service life or other properties. In this study, the properties of S355JR low alloy steel plate were increased by hardfacing electrodes and its ballistic performance and hardness properties were investigated. Electric arc welding (SMAW) was done manually with a 4 mm diameter Fe-Cr-C based covered electrodes. Welding process was done in the form of double pass, by rotating 90 degrees between layers. The alloying elements contained in the hardfacing electrode have increased the hardness and ballistic properties of the material. For this reason, in this study, it is aimed to develop a replacement product for the armors used today while reducing weight, and to reuse the armor steels by using the specified welding consumable for repair purposes. After hardfacing, the hardness values increased approximately 8 times. In ballistic performance, it has absorbed the kinetic energy of the bullet at 820 m/s, which is suitable for protection at NATO STANAG III, EN 1522 FB7, VPAM 9 levels.

Düşük Alaşımli Çeliklere Kaynakla Kaplama Yapılarak Balistik Özellik Kazandırılması

ÖZ

Zırh malzemelerinin geliştirilme sinde birçok yöntem kullanılırken, bu çalışmada kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak yöntemi, esas olarak iki parçayı birleştirme amacıyla kullanılsa da günümüzde sadece birleştirme yöntemi olmaktan çıkmış parça özelliklerini direkt etkileyen yöntemler arasına girmiştir. Kaplama kaynağı, sert dolgu elektrotları ile aşınmış ya da üretilen metal parçaların yüzeyinin kaplanarak aşınma dayanımı, çalışma ömrü ya da diğer özellikleri artırılması suretiyle uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada, S355JR düşük alaşımli çelik plakanın özellikleri geliştirilerek balistik performansı ve sertlik özellikleri incelenmiştir. S355JR plakanın özelliklerini geliştirmek için elektrik ark kaynağı ile kaplama işlemi uygulanmıştır. Elektrik ark kaynağı, 4 mm çapında Fe-Cr-C esaslı örtülü elektrot ile elle yapılmıştır. Kaynak işlemi çift paso şeklinde yapılmış, pasolar arası 90 derece döndürülerek yapılmıştır. Elektrik ark kaynağında elektrot elementleri malzemenin mekanik özelliklerini artırmıştır. Bu nedenle bu çalışmada ağırlık düşürülürken günümüzde kullanılan zırhlara hem ikame ürün geliştirilmek istenmiş hem de zırhlar isabet aldıktan sonra tamiri mümkün olmadığı için tamir amaçlı bu elektrotlardan yararlanılarak tekrar kullanılması hedeflenmiştir. Sert dolgu kaplama sonrası, kaynak bölgesinin sertlik değeri yaklaşık 8 kat artış göstermiştir. Yapılan balistik testte ise, numune NATO STANAG III, EN 1522 FB7, VPAM 9 seviyelerinde korumaya uygun olduğu 810 m/s hızdaki mermi kinetik enerjisini absorbe etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sert dolgu, kaplama kaynağı, balistik, balistik koruma, sertlik

1. Giriş (Introduction)

İnsanlar günümüze kadar malzemeleri çeşitli biçimlerde kendi hayatlarını kolaylaştırmak üzere kullanmışlar ve bunları çeşitlendirmişlerdir. Özellikle silahlanmanın arttığı dönemden itibaren savunma amaçlı üretilen malzeme sayısından ciddi bir artış olmuştur. Savunma amacıyla kullanılan malzemelere zırh malzemeleri denilmiştir. Zırh malzemeleri pek çok malzemedan yapılsa da araçlarda yoğun olarak zırh çelikleri kullanılmaktadır. Zırh çelikleri düşük karbon değerine sahiptir. Karbon değerinin % 0.3'ten düşük olması ve sıcak haddeleme sonrası yapılan ısıl işleme oluşan martenzit fazından dolayı yüksek sertlik ve darbe dayanımı ile beraber iyi kaynaklanabilirlik sergilemektedir [1]. Kaynakla birleştirilen zırh çeliklerinde, birleştirme bölgesinde mukavemet düşüşleri ve balistik performansında azalmalar yaşanmaktadır. Zırh malzemelerinde koruyuculuk seviyesi zırhın kullanım alanıyla beraber hangi mermi tipine karşı direnç gösterdiğiyle alakalıdır. Bunlar; NIJ (National Institute of Justice), NATO STANAG (Standardization Agreements) ve European Standard (ISO EN) şeklinde sıralanabilir. NIJ standartları koruma seviyeleri III ve IV 7,62x51 mm AP mermiye karşı direnç göstermektedir [2]. Cronin, Kinsley ve Allen zırh üretimindeki ilk etkeni malzeme seçimi olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bunu da genellikle, normleştirilmiş şekilde bazı zırh malzemelerinin performanslarının karşılaştırılarak seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [3]. Son yıllarda yaygınlaşan yöntemlerden birisi de sert dolgu kaynak sarf malzemeleri ile kaplama yapmaktır. Kaynak esas olarak iki malzemenin birleştirmesine dayansa da kaynak elektrotunun özellikleri sadece kaynak bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Amaç malzemenin yüke ve aşınmaya maruz kaldığı bölgelerin kaynak elektrotları ile kaplanarak mekanik özelliklerini geliştirerek malzemenin servis ömrünü uzatmaktır [4-7].

Elektrik ark kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine göre müdahalesi daha kolay bir yöntemdir. Oluşturulan elektrotların kimyasal bileşimi istenilen ölçülerde ayarlanabilir ve istenilen özellikler malzemeye aktarılır. Bir elektrotun verimliliği, örtüde kullanılan metal tozlarının oranının yükseltilmesiyle önemli ölçüde geliştirilebilir [8,9]. Verimlilik arttıkça kaynakla malzeme üretme süreci kaplama kaynağıyla ileri bir boyuta taşınmıştır. Kaplama kaynağı, bakım sırasında veya yeni ekipman imalatı sırasında temas halinde olan yüzeylerin korozyona dayanıklı, aşınma ve diğer özelliklerini geliştirmek için sert dolgu elektrotları ile kaynaklanması işlemidir. Bu işlem, tarım, madencilik, çelik, kağıt, gıda işleme ve kimya dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde uygulanmaktadır [10-12]. Sert dolgu ile yapılan çalışmalar aşınma üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Liu ve arkadaşları düşük karbonlu çelik plaka üzerine sert dolgu kaplaması uygulamış ve oluşan karbürlerin östenit fazından sertliklerinin yüksek olduğunu ve karbürlerin aşınma direncini artırdığını söylemişlerdir [13]. Bendikiene ve arkadaşları S355 çelik plakası üzerine Cr_3C_2 yapısı oluşturarak Ni ile pekiştirmek amacıyla çeşitli kaynak yöntemleri ile yapıyı oluşturmuşlar. Sonuç olarak Cr_3C_2 yapısı kaynak yöntemine bağlı olarak sertlikte 1.2-2.8 kat artış sağlamıştır [14]. Kumar ve Shanmugam Inconel 625 ile Ni, Mo, Cr ve Nb elementleri ile kaynak kaplaması elde etmişlerdir. Sonuçta esas malzemedan sert kaplamaya doğru sertlik artışını gözlemlemişlerdir [15]. Farklı malzemeler ve farklı tekniklerle yapılan sert dolgu kaplamasından yapılan çalışmalar gösteriyor ki sertlik artışı ile mekanik özellikler artmıştır. Sertlik artışı yapıda oluşan karbürlerden meydana gelmiştir [16,17]. Carrington ve arkadaşları ve Pawar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada oluşan MC, M_7C_3 , M_3C_2 , $M_{23}C_6$ karbür yapılarının malzemelerin mekanik özelliklerini artırdığını gözlemlemişlerdir [18,19]. Balakrishnan ve arkadaşları AISI 4340 ıslah çeliğinin üzerine östenitik paslanmaz çelik ve FeCr alaşımlı sert dolgu elektrotları ile iki sıra kaplama yaparak balistik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Östenitik paslanmaz çelik katmanı ana malzemeyle olan kimyasal seyrelmeyi %67'ye kadar tölere etmesi ve kaynak bölgesinin tokluğunu artırması sebebiyle yararlı bulunmuştur [20].

Bu çalışmalardan yola çıkarak sert dolgu elektrotları aşınma, sertlik ve korozyon gibi alanlarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda balistik alanında araştırmaların çok az olması nedeniyle bu alanda çalışma gereksinimi duyulmuştur. Daha önceki çalışmalarda kaynak ağızı açılarak sert dolgu alaşımlarının balistik performansı incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, sadece birleştirme amacıyla değil aynı zamanda sert dolgu elektrotları ile balistik zırh malzemeleri üretilmesi ve tamir amacıyla kullanılabilmesini sağlamaktır. Çünkü zırhlarda isabet aldıktan sonra tekrar kullanılmamaktadır. Aynı zamanda zırhlar için bir diğer önemli parametre ağırlıktır, mümkün olan en düşük ağırlıkta koruyucu seviyeye göre maksimum fayda sağlanmalıdır. 7.62x51 mm AP (armor piercing) merminin test koşullarına göre 820 ± 10 m/s hızda durdurmasını sağlanması amacıyla çift pasolu sert dolgu elektrotu ile S355JR kaplanmış ve test edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada sert dolgunun uygulanacağı düşük alaşımlı çelik altlık S355JR'nin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Elle elektrik ark kaynağında S355JR çelik plaka üzerine yapılacak olan sert dolgu elektrotunun kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir.

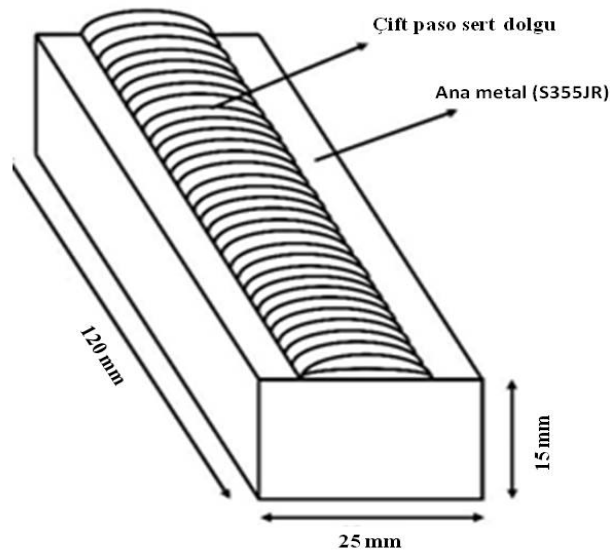
Tablo 1. S355JR malzemenin ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of S355JR material %wt.)

Çelik Adı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
S355JR	0.11	0.15	0.64	0.02	0.03	0.21	0.07	0.08	Kalan

Tablo 2. Sert dolgu elektrotunun ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of the hardfacing electrode %wt.)

Elektrot Kodu	Sınıfı (EN/ISO)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
Fe 14	EN 14700: E Fe 14	4.03	1.65	0.60	29.04	0.23	Kalan

Mikroyapı ve sertlik analizleri için önce 120x25x15 mm S355JR çelik parça kaynaklanmıştır. Elektrik ark kaynağı ile çelik parça üzerine çift paso sert dolgu kaplama yapılmıştır. Şekil 1'de malzemenin kaynaklama işleminin şematik gösterimi yer almaktadır. Dolgu işlemi Ø4.0 mm. Fe 14 elektrot ile 150 A akımda, 27 V voltajda ve 3.5 mm/s hızda yapılmıştır. Kaynak işlemi sonrası malzemeye herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

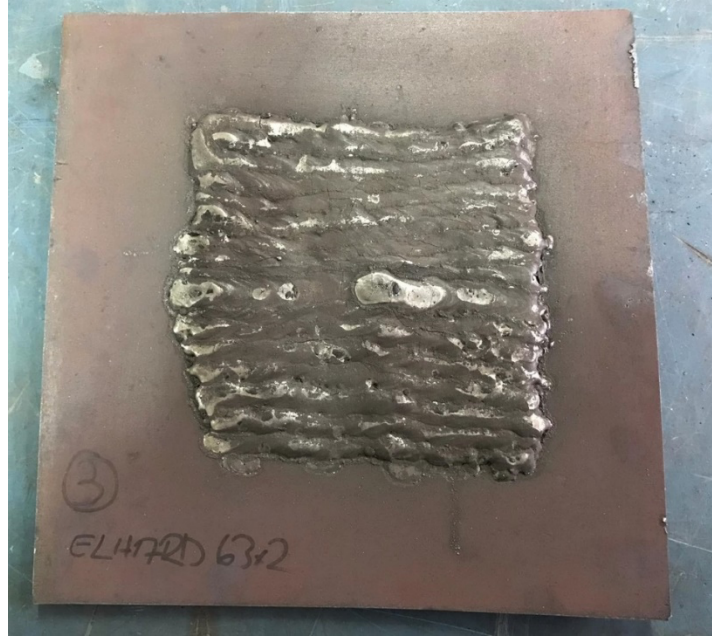


Şekil 1. Kaynaklanan numunenin şematik gösterimi (Schematic illustration of the welded sample)

Kaynaklanan malzemeden mikroyapı ve sertlik için numune alınmıştır. Malzeme tel erozyon (Wire EDM) yöntemi ile kesilmiş ve bakalite alındıktan sonra zımparalama ve 1 µm'ye kadar elmas süspansiyonda parlatılmıştır. SEM analizleri için dağlama işlemi Aqua Regia 3:1 oranında çözeltisi (1) kullanılmış, optik mikroskop incelemeleri için ise Oksalik asit ile elektrolitik dağlama yapılmıştır.

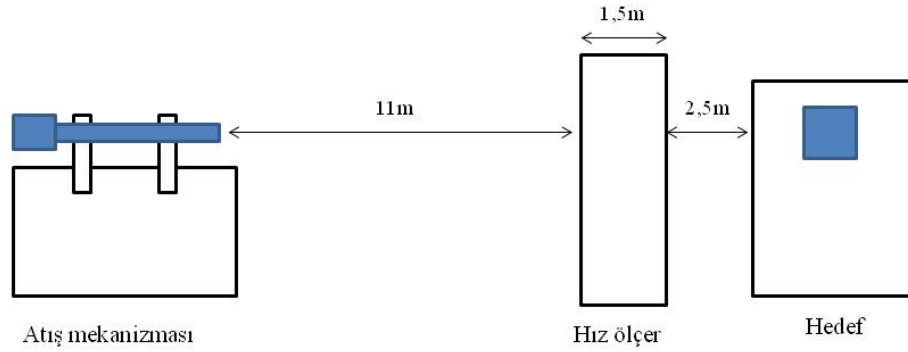


Mikroyapı incelemelerinde Jeol JSM 6060LV SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve Leica DM4000 optik mikroskop kullanılmıştır. Sertlik testleri HRC ve HV olmak üzere iki tipte uygulanmıştır. Enine kesit alınmış sertlik numuneleri üzerinde, en üst kaynak pasosundan esas metale doğru 0,5 mm aralıklarla HV1 sertlik ölçümleri yapılmıştır. Balistik test için ise, 300x300 mm boyutunda S355JR plakanın merkezine 100x120 mm boyutunda sert dolgu elektrotu ile kaplama uygulanmıştır. Balistik test için ortası sert dolgu ile kaplanmış S355JR plaka Şekil 2'de verilmiştir. Yüksek ısı girdisi nedeniyle ana malzemede oluşacak çarpılmayı en aza indirmek için pasolararası sıcaklık 250 °C'nin altında tutulmuştur.



Şekil 2. Balistik test için ortası 2 kat sert dolgu elektrodu ile kaplanmış S355JR plaka (S355JR plate surfaced with 2 layers of hardfacing electrodes in the middle for ballistic testing)

Balistik testin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Numuneye 3 atış gerçekleştirilmiştir. Hedef noktalar arası mesafe 5-6 mm arasındadır. Mermi tipi, çelik bilyalı 7,62x51 mm M61 tipi AP zırh delici mermidir. Hedef mekanizmadan 15 m uzaklıkta olup, hedefin 2,5 m önünde merminin hızını ölçen düzenek yerleştirilmiştir. Kafes biçimindeki bu yapı, merminin kafese giriş ve çıkışı arasındaki mesafeyi kat ettiği süreyi tayin ederek mermi hızını hesaplamaktadır. Balistik testte ortam sıcaklığı 21 °C ve ortamın nemi %48 olarak ölçülmüştür.

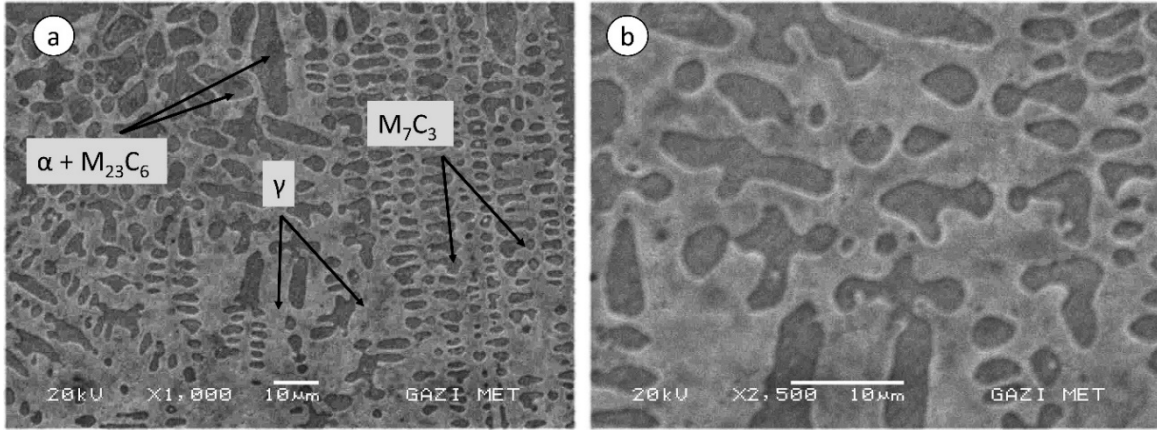


Şekil 3. Balistik test şematik gösterimi (Schematic illustration of ballistic testing)

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

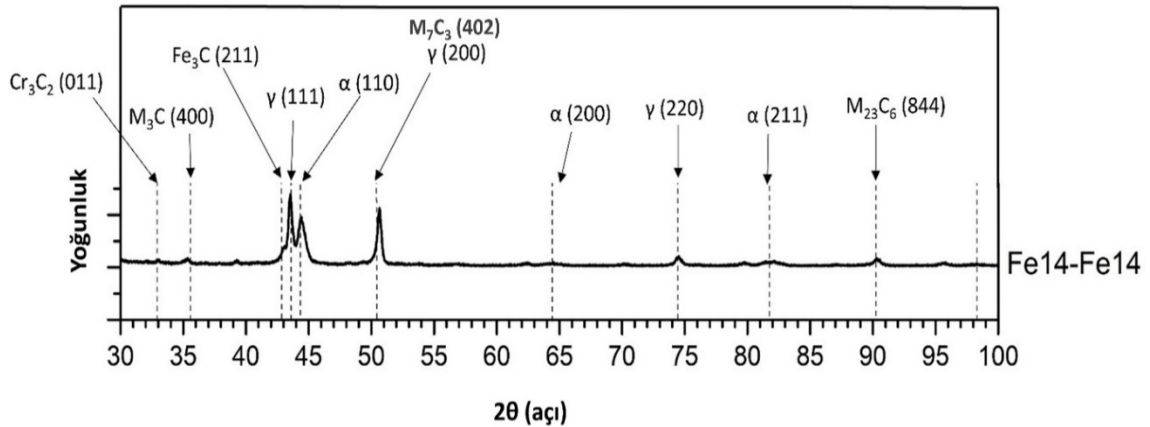
3.1. Mikroyapı görüntüleri (Microstructure images)

Fe14 kodlu elektrot içeriğinde krom ve karbon elementinden dolayı yapı hiper ötektiktir. Fe14 elektrotun yapısında %4,03 C bulunduğu için yapıda zengin karbür içeriğine rastlanmaktadır. Oluşan Fe₃C yapıları birincil karbürleri oluştururken α fazına dağılmış şekilde ikincil M₇C₃ karbürleri görülmüştür. M₂₃C₆ karbürleri ikincil karbür olarak M₇C₃ yapısından sonra oluşmuşlardır. Mikroyapıda dentritik yapı oluşumları gözükmemektedir.



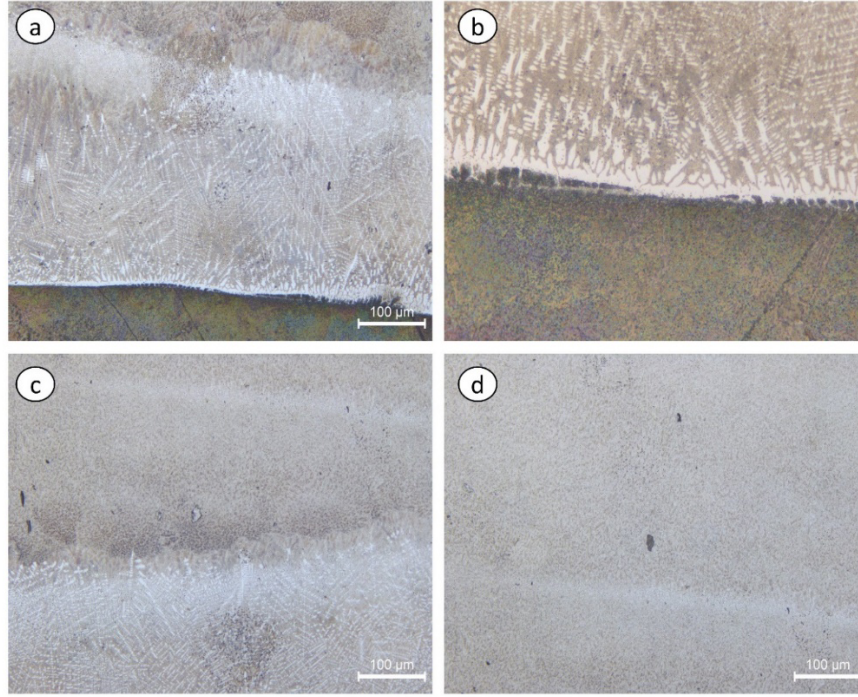
Şekil 4. Fe14 sert dolgusu ile yapılan kaplama kaynağına ait mikroyapı görüntüleri a) X1000 b) X2500 (Microstructure images of the surfacing weld made with Fe14 hardfacing a) X1000 b) X2500)

Soğuma diyagramında Fe-Cr-C sıvısı monotektik reaksiyon ile $L \rightarrow L_1 + M_7C_3$ dönüşür. Devam eden ötektik reaksiyonda $L_1 \rightarrow \gamma + M_7C_3$ ve karbürlerin büyümesi östenit fazıyla engellenir. Bu dönüşüm sonrası östenit fazı bu sıcaklıkta kararsızdır. Oda sıcaklığına kadar soğuduğunda α , karbür ve γ fazı bulunur [21]. FeCrC yapıları tipik olarak sert dolguda %8-35 Cr ve %2-5 C içeriğine sahiptirler. %0-20 Cr içerikli bileşikler ötektikaltı, %20-24 Cr ötektik ve %24 üzeri Cr içerikli yapılar ötektiküstü olarak tanımlanır [22]. Yapının ötektiküstü olması ile beraber yapıda birincil ve ikincil oluşan karbürlerden bahsedilebilir. Yapıda oluşan M_3C karbürleri varken Cr oranı artarsa $M_{23}C_6$ karbür oluşumunu tetikler ve yapıda $M_{23}C_6$ karbürleri gözükür. M_3C karbürlerinin oluşması için gereken kimyasal kompozisyon oranı maksimum %10 Cr ve %4 C olmalıdır [23]. $M_{23}C_6$ karbürleri ana faz içinde dağılmış halde bulunur. $M_{23}C_6$ yapısı elektrotun kimyasal bileşimi göz önüne alındığında $(Cr, Fe)_{23}C_6$ bileşimlerinde bulunduğu düşünülmekte, diğer çalışmalar tarafından bu öngörü desteklenmiştir [24,25]. Mikroyapıda bulunan fazları tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır. Şekil 5' de numuneye ait XRD analizi yer almaktadır. Tamamlanan dönüşüm sonrası yapıda görülen karbür yapıları M_7C_3 ve $M_{23}C_6$; fazlar ise, östenit ve ferrittir.



Şekil 5. Fe14 - Fe14 kaynak metalinin XRD analizi (XRD analysis of Fe14 - Fe14 weld metal)

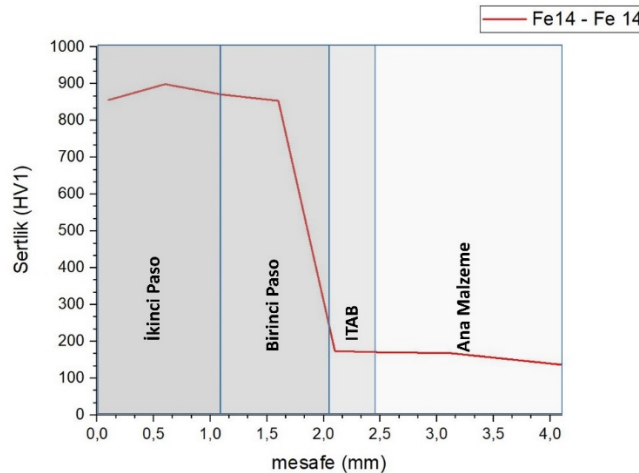
Şekil 6' da numuneye ait mikroyapılar verilmiştir. Numunede kaynaklı birleştirmeye bağlı dentritik oluşumlar gözlemlenmektedir. Ana metalden uzayan beyaz bölgeler östenit fazıdır (Şekil 6.b). İki paso arası arayüzey oluşumu aynı elektrot olmasına rağmen gözlemlenmiştir. İlk pasoda ana metale geçişler olduğu ve ikinci pasoda beraber yapının ötektiküstü olduğu karbürlerin yapı içerisinde dağıldığı Şekil 6' da ikinci pasoda görülmüştür. Ayrıca oluşan karbürlerin M_7C_3 yoğunlukta olduğu XRD sonuçları ile Şekil 5'de vurgulanmıştır.



Şekil 6. Fe14 – Fe14 kaynaklı numunesine ait mikroyapı görüntüleri a) çift paso beraber görünüşü b) ilk paso c) ara-yüzey d) ikinci paso (Microstructure images of Fe14 – Fe14 welded sample a) double-pass view b) first pass c) interface d) second pass)

3.2. Sertlik (Hardness)

Çalışmada kullanılan S355JR ana malzemenin sertlik değeri 130HV ölçülmüştür. Fe14 kodlu elektrot ile yapılan kaplama bölgesinden alınan sertlik değerlerinde ilk paso için 60,8 HRC ve ikinci paso için 62,5 HRC ölçülmüştür. Malzemenin en sert bölgeleri üst katman olurken sertlik düşüşü ana malzemeye doğru devam etmektedir. İlk pasonun ana malzemeyi de ergitmesiyle oluşan kimyasal seyrelme, sertliğin ilk pasoda düşük çıkmasına yol açmıştır. İlk pasonun üzerine atılan ikinci pasoda ana malzeme ile olan metalürjik etkileşim ve buna bağlı olarak seyrelmenin de azalmasıyla sertlik değeri yükselmiştir. Özellikle ısının tesiri altında kalan bölgede sertlik düşüşü bariz bir şekilde gözlemlenmektedir. Malzemenin HV sertlik değeri Şekil 7’de verilmiştir. HV sertlik değeri 840 ile 900 HV arasında ölçülmüştür. HRC ile kıyaslama yapıldığında yaklaşık olarak 62,5 HRC sertlik değeri yaklaşık 810 HV sertlik değerine karşılık gelmektedir. Alınan sertlik değerindeki fark mikrosertlik ölçüm ucunun karbüre denk gelmesine bağlıdır. Birinci pasodaki sertlik ikinci pasoya göre daha düşüktür. Bu sertlik farkı, numune yüzeyinde ikinci bir ITAB bölgesi oluşmasından ve birinci pasoda elektrotun kimyasal bileşimindeki elementler ana metale ve ITAB’ a difüze olmasından dolayı gerçekleşmiştir (Şekil 6). Kaplama kaynağı sonrası yüzey sertlik değeri, S355JR malzemeye göre yaklaşık 8 kat artış göstermiştir.



Şekil 7. İki kat Fe14 elektrot ile kaplanmış S355JR çeliğin kesit alanından alınan sertlik grafiği (Hardness graph from the cross-sectional area of S355JR steel surfaced with two layers of Fe14 electrodes)

Sertlik malzemenin soğuma sırasındaki hiperötektik reaksiyonlarla beraber oluşan metal karbürleriyle artmaktadır. Das ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FeCrC tipi elektrotların bu çalışmada kullanılan elektrot ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Sertlik artışının kromlu karbür yapılarından ve yapıda oluşan martenzitten kaynaklandığını söylemişlerdir. Sonuç olarak yapının sertlik artışının 5-6 kat artış gösterdiği sonucuna varılmıştır [26]. Karbürlü yapı çeşitleri (MC, M3C, M7C3 ve M23C6) soğuma çeşitlerine göre oluşsa da hepsi malzemenin sertlik değerini artırıcı etki ettiğini vurgulanmıştır [26-28].

3.3. Balistik test (Ballistic test)

Şekil 8'da Fe14 çift paso kaplama kaynağına ait balistik sonuçlar verilmiştir. Çift paso kaplama kaynağında 1.mermi 800 m/s, 2. mermi 844 m/s ve 3. mermi 822 m/s hızlarında atılmıştır. Birinci ve ikinci mermi arası mesafe 55 mm ve ikinci ve üçüncü mermi arası mesafe 63 mm olarak ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü mermiler yapıyı deforme edip geçerken 1. mermiyi yapı içerisinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 6'de e-h fotoğraflarına bakılarak 2.merminin oluşturduğu ön ve arka yüzey görüntüsünde çekirdeğin yapı içerisinde kaldığı ancak yapının arka yüzeyinden delindiği görülebilir. Birinci mermideki deformasyon minimum seviyede iken, özellikle ikinci mermide kaynak bölgesindeki çatlaklar ilerlemiş ve yapıdan kopmalar ve ayrılmalar meydana gelmiştir (Şekil 8-e).



Şekil 8. Fe14-Fe14 kaplanmış test numunesinin balistik test sonuçları a) malzemenin ön görünüşü b) kaynak bölgesi görünümü c) arka yüzey görünümü d-e-f) sırasıyla 1,2 ve 3. Merminin ön yüzeyde yaptığı etkiler g,h,i) sırasıyla 1,2 ve 3.merminin arka yüzeyde yaptığı etkiler (Ballistic test results of the Fe14-Fe14 surfaced test sample a) front view of the material b) weld zone view c) back surface view d-e-f) the effects of the 1st, 2nd and 3rd bullets on the front surface, respectively g,h,i) the effects of the 1st, 2nd and 3rd bullets on the rear surface, respectively)

European Standard, EN 1522 FB7, VPAM 9 ve NATO STANAG seviye III 7,62x51 mm AP mermilere göre düzenlenmiş balistik testtir. Testte kullanılan çelik bilyalı 7, 62x51 mm M61 tipi AP mermi yukarıda verilen hızlarda atılmıştır. Standartlara göz atıldığında mermi hızının ± 820 m/s olması gerekmektedir [29]. Yukarıda verilen değerler temel alındığında ortalama 810 m/s hızda kinetik enerjisi absorbe

edebildiği söylenebilir ve bu seviye için koruyuculuk özelliğini sağladığı söylenebilir. ARMOX ve RAMOR serisi zırhlar bu koruma seviyesi için kullanılmaktadır. ARMOX için bu seviyelerde korumada minimum kalınlık; ARMOX 500 14,5 mm, ARMOX 600 12 mm ve ARMOX Advanced 10 mm' dir. RAMOR için FB7 seviyesinde korumada kalınlık; RAMOR 500 14,5 mm ve RAMOR 550 13 mm' dir [30].

Balistik malzemelerde koruyuculuk merminin kinetik enerjisinin sönümlenmesi ile bulunur. Mermi ilk hızından kinetik enerji hesaplanır. Plakaya merminin ilk çarptığı hızın kinetik enerjisi sıfırlanıncaya kadar devam eder. Kinetik enerji (2) formülü ile hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Merminin 800 m/s hızdaki kinetik enerjisi 3104×10^3 joule hesaplanmıştır. Son durumdaki kinetik enerjiyi başlangıçtaki kinetik enerjiden çıkararak deformasyon enerjisi bulunur. Bu hızdaki deformasyon enerjisi kinetik enerjisine eşittir. Mermi plakada kaldığı için son hızı 0 m/s' dir. 820 m/s hızındaki merminin plakaya ilk çarptığı hız sonucu plakadan ayrılmalar ve kopmalar meydana gelir. Bu durumda merminin kinetik enerjisi bağlı deformasyonu (4) formüle göre hesaplanır.

$$Vr = \frac{MV}{M+m} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{[(m/M+m)]Mv^2}{2} \quad (4)$$

$$\frac{M_0V_0^2}{2} = \frac{(M_{rp}+m)V_r^2}{2} + \frac{(M_0-M_{rp})V_0^2}{2} + E_f + W_s \quad (5)$$

M_0 : Merminin çarpışma öncesi kütlesi,

M_{rp} : Merminin çarpışma sonrası kütlesi,

m : Plaktan kopan parçanın kütlesi,

V_r : Merminin ve plaktan kopan parçanın ağırlık merkezlerinin çarpışma sonrasındaki hızları,

I : Plaktaki kayma gerilmelerinden dolayı plağa aktarılan impuls,

E_f : Serbest m kütlesi ve mermi çarpışmasından oluşan elastoplastik deformasyon enerjisi,

W_s : m kütlesinin plak tarafından sınırlandırılması halinde ortaya çıkan elastoplastik deformasyon enerjisidir.

820 m/s hızla giden merminin kinetik enerjisi 3261×10^3 jouledir. Elastoplastik deformasyon enerjisi 3257×10^3 tür. Arada kalan enerji 4×10^3 joule ise, parçadan kopan kütlelerin ve merminin son kütlelerinin kinetik enerjisi toplamıdır. Senthil ve arkadaşları alaşımız çeliklerin 7.62 mm. AP mermi karşısındaki balistik performansını deneysel ve numerik olarak inceledikleri çalışmalarında, dik açıyla ve 820 m/s hızla hedefe gelen merminin plakayı delerek, deneysel ve numerik olarak sırasıyla 661 m/s ve 658 m/s kalıntı hızla hedeften ayrıldığını belirtmişlerdir [31,32]. Bu çalışmada kullanılan elektrot ile yapılan sert dolgu kaynağının, yapı çeliğinin balistik özelliğini oldukça artırdığı görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Suggestions)

- 1) Fe14 sert dolgu elektrotu S355JR gibi düşük alaşımli çeliklere uygulandığında mekanik özelliklerini geliştirir.
- 2) Fe14 sert dolgu elektrotu ile yapılan çalışmada, mikroyapıda karbürlerin ortaya çıktığı ve bu karbürlerin yapıda sertlik artışı meydana getirdiği gözlenmiştir. Sertlik değeri, S355JR plakanın sertlik değerinin yaklaşık 8 katına çıkmıştır.
- 3) Fe14 sert dolgu elektrotu ile kaplanan S355JR çeliği 10 mm kalınlık ile muadillerinden daha düşük kalınlıkta balistik teste tabii tutulmuştur ve muadillerine benzer performans göstermiştir.
- 4) Fe14 sert dolgu elektrotu EN 1522 FB7, VPAM 9 ve NATO STANAG III seviye test için uygun bulunmuş ve 800-820 m/s hız aralığında merminin kinetik enerjisini absorbe edebileceği görülmüştür.
- 5) Fe14 sert dolgu elektrotu ile yapı çelikleri kaplanarak yüksek balistik dayanım elde edilebilir. Ayrıca

zırh çelikleri de bu alışımdaki elektrotlar ile tamir edilebilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAP) Birimi tarafından 6381 nolu proje koduyla desteklenmiştir. Destekleri için Gazi Üniversitesi BAP birimine, kaynak sarf malzemeleri için Gedik Kaynak'a ve balistik testler için CES Kompozit'e teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] I. G. Crouch, Ed., *Armour Steels: The Science of Armour Materials*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. (Editor). doi:10.1016/B978-0-08-100704-4.00002-5
- [2] X. Chen, Ed., *Failure mechanisms and engineering of ballistic materials: Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Glossop: Woodhead Publishing, 2016. (Editor). doi:10.1016/B978-1-78242-461-1.00009-1
- [3] A. Bhatnagar, Ed., *Lightweight Ballistic Composites: Testing of armor systems*, 2nd Edition, Duxford: Woodhead Publishing, 2016, pp. 311-326. (Editor). doi:10.1016/B978-0-08-100406-7.00010-6
- [4] R. Singh, *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. doi:10.1016/B978-0-12-391916-8.00015-7
- [5] O. Ivanov, P. Prysyazhnyuk, L. Shlapak, S. Marynenko, L. Bodrova and H. Kramar, "Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current," *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 223-230, February 2022. doi:10.1016/j.prostr.2022.01.028
- [6] S. Balaguru, M. Abid and M. Gupta, "Investigations on different hardfacing processes for High temperature applications of Ni-Cr-B-Si alloy hardfaced on austenitic stainless steel components," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 10062-10072, September–October 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.010
- [7] Y. Wu, T. Schmitt, E. Bousser, F. Khelfaoui, V. Najarian, J.E. Klemberg-Sapieha and M. Brochu, "Effects of interfacial microstructure on mechanical properties of Stellite-hardfaced coating during long-term aging," *Surface and Coatings Technology*, vol. 398, 125989, September 2020. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125989
- [8] D.Sun, Y. Zhang, Y. Liu, X. Gu and H. Li, "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes," *Materials & Design*, vol. 109, pp. 596-608, November 2016. doi:10.1016/j.matdes.2016.07.076
- [9] K. Weman, *Welding Processes Handbook: Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes*. 2nd Edition, Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, pp. 151-156. doi:10.1533/9780857095183.151
- [10] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gómez, "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits," *Tribology International*, vol. 42, no. 5, pp. 745–749, May 2009. doi:10.1016/j.triboint.2008.10.012
- [11] H. Rojacz, C. Katsich, M. Kirchgaßner, R. Kirchmayer, E. Badisch, "Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys," *Wear*, vol. 492–493, 204183, March 2022. doi:10.1016/j.wear.2021.204183
- [12] V.E. Buchanan, "Solidification and microstructural characterisation of iron–chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying," *Surface & Coatings Technology*, vol. 203, no. 23, pp. 3638-3646. August 2009. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.05.051
- [13] S. Liu, Z. Shi, X. Xing, X. Ren, Y. Zhou and Q. Yang, "Effect of Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy," *Materials Today Communications*, vol. 24, 101232, September 2020. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101232
- [14] R. Bendikiene, A. Ciuplys, R. Sertvytis, A. Surzhenkov, D. Tkachivskyi, M. Viljus, R. Traksmas, M. Antonov and P. Kulu, "Wear behaviour of Cr₃C₂-Ni cermet reinforced hardfacings," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7068-7078. 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.042
- [15] N.P. Kumar, and N.S. Shanmugam, "Some studies on nickel based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process," *Wear*, vol. 456–457, 203394, September 2020. doi:10.1016/j.wear.2020.203394
- [16] J. Gramajo, A. Gualco and H. Svoboda, "Study of the welding procedure in nanostructured super-hard Fe- (Cr, Mo, W) - (C, B) hardfacing," *International Journal Refractory Metals Hard Materials*, vol. 88, 105178, April 2020. doi:10.1016/j.ijrmhm.2020.105178

- [17] J. Gou, Y. Wang, Y. Zhang, C. Wang and G. Wang, "Dry sliding wear behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloy modified with nano-CeO₂ and its mechanisms of modification," *Wear*, vol. 484-485, 203756, November 2021. doi:10.1016/j.wear.2021.203756
- [18] S. Pawara, A.K. Jhab, and G. Mukhopadhyaya, "Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys," *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 78, pp. 288-295, January 2019. doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.10.014
- [19] M.J. Carrington, D.G. McCartney, P.H. Shipway and D.A. Stewart, "Microstructure formation in the powder HIPed hardfacing alloy Tristelle 5183 (Fe-21%Cr-10%Ni-7.5%Nb-5%Si-2%C in wt%)," *Materials Characterization*, vol. 184, 111688, February 2022. doi:10.1016/j.matchar.2021.111688
- [20] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G.M. Reddy, "Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel welds," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 59-68, 2013. doi:10.1016/j.matdes.2012.06.010
- [21] V.E. Buchanan, "Solidification and microstructural characterisation of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying," *Surface & Coatings Technology*, vol. 203, no. 23, pp. 3638-3646, August 2009. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.05.051
- [22] A. Jilleh, N. Babu, V. Thota, A. Anis, M.K. Harun and M.K. Talari, "Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel," *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. doi:10.1016/j.jallcom.2020.157472
- [23] C.-M. Lin, C.-M. Chang, J.-H. Chen, C.-C. Hsieh, and W. Wu, "Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding (GTAW)," *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 7, pp. 2590-2596, December 2010. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.10.004
- [24] H.-H. Lu et al., "The effects of martensitic transformation and (Fe, Cr)₂₃C₆ precipitation on the properties of transformable ferritic stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 754, pp. 502-511, April 2019. doi:10.1016/j.msea.2019.03.110
- [25] C.-M. Lin, C.-M. Chang, J.-H. Chen, and W. Wu, "Hardness, toughness and cracking systems of primary (Cr,Fe)₂₃C₆ and (Cr,Fe)₇C₃ carbides in high-carbon Cr-based alloys by indentation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 18-19, pp. 5038-5043, July 2010. doi:10.1016/j.msea.2010.04.073
- [26] B. Das, K. Sawrav, S.B. Singh, and P.P. Bandyopadhyay, "Tribological behaviour of the hardfacing alloys utilised to fabricate the wear parts of an excavator bucket," *Transactions of the IMF*, vol. 99, no. 3, pp. 153-161, January 2018. doi:10.1080/00202967.2021.1861854
- [27] J. Lentz, A. Röttger and W. Theisen, "Hardness and modulus of Fe₂B, Fe₃(C,B), and Fe₂₃(C,B)₆ borides and carboborides in the Fe-C-B system," *Materials Characterization*, vol. 135, pp.192-202, January 2018. doi:10.1016/j.matchar.2017.11.012
- [28] Gorunov, A.I., "Investigation of M₇C₃, M₂₃C₆ and M₃C carbides synthesized on austenitic stainless steel and carbon fibers using laser metal deposition," *Surface and Coatings Technology*, vol. 401, 126294, January 2018. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126294
- [29] G. İ. Ögünç, "The importance of national ballistic resistant equipment standards and national ballistic test centre," *Güvenlik Bilimleri Dergisi IDEF Özel Sayı*, pp. 95-120, April 2019, doi:10.28956/gbd.551767
- [30] SSAB, "Ramor protection steels," *ssab.com*, 2016 [Online]. Available: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/armox/702-en-ssab--ramor---protection-steels.pdf>. [Accessed: June 17, 2022]
- [31] K. Senthil, M. Iqbal, and N.K. Gupta, "Ballistic resistance of mild steel plates of various thicknesses against 7.62 AP projectiles," *International Journal of Protective Structures*, vol. 8, 2017. doi:10.1177/2041419617700007
- [32] M.A. Iqbal, K. Senthil, P. Bhargava and N.K. Gupta, "The characterization and ballistic evaluation of mild steel," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 78, pp. 98-113, 2015. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.12.006.

This is an open access article under the CC-BY license

