



Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi

Ali Akın AKAY¹, Yakup KAYA^{2*}, Nizamettin KAHRAMAN²

¹Emek Boru Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ankara

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Karabük [*ykaya@karabuk.edu.tr](mailto:ykaya@karabuk.edu.tr)

27.12.2012 Geliş/Received, 26.01.2013 Kabul/Accepted

ÖZET

Bu çalışmada, petrol ve doğal gaz hatlarında kullanılan, X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel (S1 ve S2Mo) ve tozlar (LN761 ve P223) kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere, öncelikle yüzey ve yüzey altı kusurların belirlenebilmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden gözle ve radyografik muayeneye teknikleri uygulanmış, sonrasında kaynaklı bölgede tel-toz-ana malzeme kompozisyonlarını belirlemek için, spektral analiz çalışmaları yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin tokluk özelliklerini belirlemek amacıyla, çentik darbe testi yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde sertlik ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan gözle ve radyografik muayeneler sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Spektral analiz sonuçlarına göre, kaynak metali kimyasal bileşimi içerisindeki C oranının, ana malzemeden yüksek, ilave metalden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Çentik darbe test sonuçlarına göre, S2Mo teli ve P223 tozu ile birleştirilen numuneler, S1 teli ve LN 761 tozu kullanılan birleştirmelere göre daha iyi tokluk dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Yapılan sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden ölçülmüştür. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, tüm birleştirmelerde, ısı girdisi sabit olduğundan, kaynak metalleri, ITAB'lar ve kaynak ergime sınırına bitişik bölgelerin birbirlerine benzer görüntüler sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tozaltı ark kaynak, X60-X65-X70 çeliği, radyografik muayene, çentik darbe testi

Joining of materials with different properties through submerged arc welding process and destructive and non-destructive testing of the joints

ABSTRACT

In this study, X60, X65 and X70 steels used in petroleum and natural gas pipeline were joined with Submerged Arc Welding by using different type of welding fluxes (LN761 and P223) and wires (S1 and S2Mo). Initially, visual and radiographic inspection techniques were subjected to welded joints for determining surface and subsurface defects. After that, spectral analyses were carried out in order to determine the compositions of wire-flux-base metal on the joints. Impact toughness test were performed for determining toughness properties the joints. Furthermore, hardness and microstructure studies were also

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

carried out on the samples. As a result of the visual and radiographic inspection on the welded samples, there were no weld defects on joints were observed. It was clearly understood that carbon ratio in the compositions of weld metal higher than base metal but lower than filler metal in terms of spectral analyses results. According to impact toughness test results, the joints obtained by using S2Mo welding wire and P223 welding flux had better impact toughness value than the joints obtained by S1 welding wire and LN 761 welding flux. With respect to hardness test, the highest hardness values were measured on weld metal. When the microstructure images were examined, it is clearly understood that similar images for all the joints were shown adjacent zones to weld metals heat affected zones and welding boundary, due to heat input constant.

Keywords: Submerged arc welding, X60-X65-X70 steels, radiographic inspection, impact toughness test

1. GİRİŞ

Gelişmiş boru hattı sistemleri dünyanın her yerinde üretim alanlarından tüketicilere petrol, petrol ürünleri ve doğal gaz taşımaktadır. Uzak mesafelere petrol ve gaz ürünlerini taşımak için faydalanılabilmek en kolay ve en ucuz yolun boru hatlarını kullanmak olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Boru hatlarının uzunluğunun ve boru çaplarının artması kaynak teknolojisine olan ihtiyacı arttırmaktadır [1]. Gaz ve petrol iletim hatlarında çoğunlukla tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral veya düz dikişli borular kullanılmaktadır [1,2].

Tozaltı kaynağı, kaynak için gerekli ısının, eriyen elektrod (veya elektrodlar) ile iş parçası arasında oluşan ark (veya arklar) sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Ark bölgesi kaynak tozu tabakası ile kaynak metali ve kaynağa yakın ana metal de eriyen kaynak tozu (cüruf) ve kaynak dikişi tarafından korunur. Koruyucu görevi yapan kaynak tozu ayrıca kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deokside eder. Alaşımli çelikleri kaynak yaparken kullanılan kaynak tozlarında, kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu dengeleyen alaşım elementleri bulunabilir [2,3].

Bu çalışmada; petrol ve doğal gaz hatları için üretilmiş API 5L (American Petroleum Institute) standardında, X60, X65 ve X70 kalitesindeki çelik malzemeler, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı kimyasal kompozisyona sahip iki ayrı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemi tamamlanan numunelere, öncelikle gözle muayene ve radyografik muayene teknikleri uygulanmış, daha sonra ise spektral analiz çalışmaları yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin tokluk özelliklerini belirlemek amacıyla, çentik darbe testi yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde sertlik ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, API 5L standardında, petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan, düşük alaşımli, ince taneli, yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 malzemeler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir. Birleştirme işlemlerinde, S1 ve S2Mo (Tablo 2) olmak üzere iki farklı kaynak teli ile LN 761 ve P223 (Tablo 3) kaynak tozu kullanılmıştır.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri

Malzeme	Kimyasal Bileşim													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb	Fe
X60	0,065	0,191	1,260	0,009	0,005	0,032	0,011	0,034	0,013	0,039	0,019	0,045	0,044	Kalan
X65	0,073	0,161	1,265	0,011	0,005	0,100	0,013	0,077	0,019	0,036	0,017	0,037	0,042	
X70	0,074	0,188	1,413	0,009	0,003	0,172	0,169	<0,0001	0,012	0,027	0,012	0,044	0,034	

Tablo 2. Deneylerde kullanılan tellerin kimyasal analizleri

Kullanılan tel	Kimyasal Bileşim												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V	Fe
OE S1	0,075	0,56	0,05	0,007	0,003	0,08	0,02	0,009	0,05	0,001	0,002	0,02	Kalan
OE S2Mo	0,09	1,115	0,12	0,006	0,007	0,07	0,05	0,48	0,08	0,003	0,003	0,01	

Tablo 3. Deneilerde kullanılan kaynak tozlarının kimyasal kompozisyonu

Kullanılan toz	Kimyasal Bileşim (%)										
	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Metal Alaşımı		
LN 761	45	19	22	5	2	2	2	1	6 max		
	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	NaO	Metal Alaşımı
P 223	23	4	21	21	20	4	2	1	1	2	3 max.

500x175x14.3 mm boyutlarında kesilen X60, X65 ve X70 malzemelere 45° kaynak ağızı açılmıştır. Parçalar, aralarında 2 mm boşluk bırakılarak, örtülü elektrik ark kaynak yöntemi ile puntalanmıştır. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Kaynak esnasında, kaynaklı parçalara

verilen ısı girdisinin sabit olması için, tel ve tozlar hariç diğer kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Kaynak işlemlerinde bakır altlık kullanılmış ve birleştirilen numuneler, kaynak sonrasında açık havada soğumaya bırakılmıştır.

Tablo 4. Kaynak esnasında kullanılan kaynak parametreleri

Malzeme	Akımı (A)	Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Tel çapı (mm)	Akım tipi	İlave tel	Kaynak tozu	Isı girdisi (KJ/mm)
X60	800	29.5	15	4.0	DC +	S1	LN 761	9.44
X65								
X70								
X60	800	29.5	15	4.0	DC +	S2Mo	P 223	9.44
X65								
X70								

Kaynak işlemleri tamamlanan numunelerin, öncelikle uzman bir personel tarafından gözle muayenesi yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin tümü, radyografik teste tabi tutulmuştur. Parçaların radyografik muayenesinde, YXLON marka floroskopik muayene sistemi (Şekil 1) kullanılmıştır. Muayene, Emek Boru AŞ'de APL 5L normları gözetilerek, konu hakkında gerekli belgeye sahip (NDT Level 2)

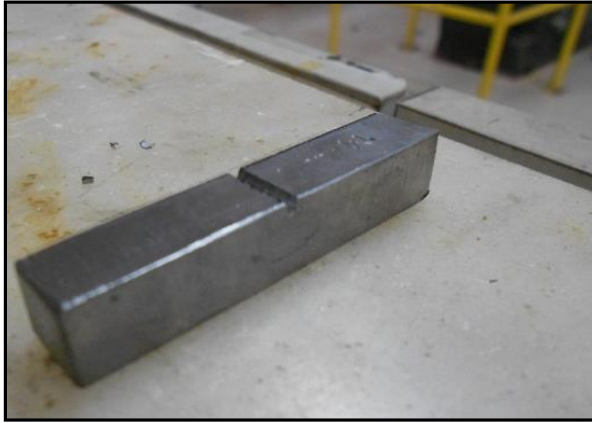
radyografik muayene uzmanı tarafından yapılmış ve değerlendirilmiştir. Tahribatsız muayenesi tamamlanan numunelerden, her parametreden 18 adet çentik darbe (9 adet ITAB ve 9 adet kaynak dikişi) test numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca sertlik ve mikroyapı çalışmaları ile elementel analiz çalışmaları için, her bir numuneden 1'er adet olmak üzere toplam 6 numune alınmıştır.



Şekil 1. Floroskopik muayene sistemi

Tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak yapılan birleştirmelerin kaynak metalinden elementel analizler yapılmış ve kaynak esnasında kullanılan tel ve toz kompozisyonunun kaynak metaline etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Çentik darbe

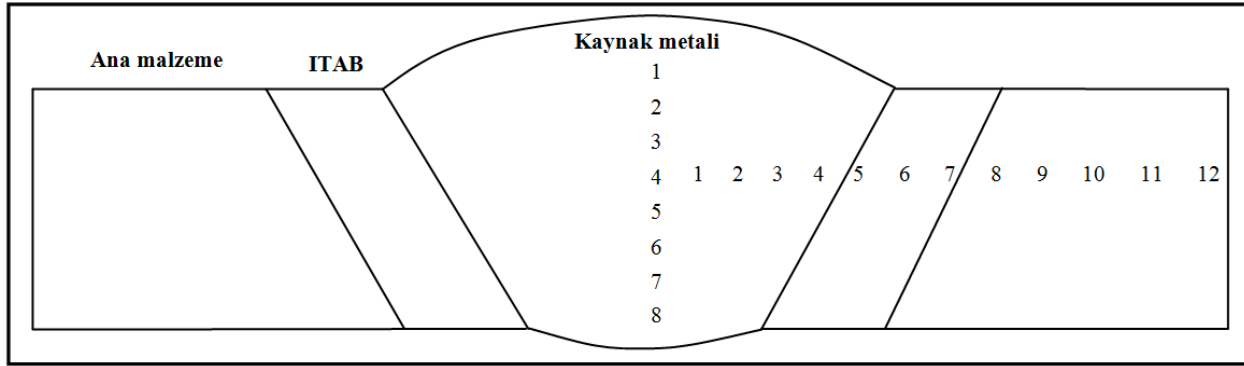
numuneleri charpy olarak 300 J, izod olarak 165 J test yapabilme kapasitesine sahip Heckert marka cihaz ile charpy yöntemi kullanılarak, -20°C, 0°C ve 20°C sıcaklarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de çentik darbe numune örneği ve deneyin yapıldığı cihaz verilmiştir.



Şekil 2. Çentik darbe numune örneği ve cihazın görüntüsü

Sertlik deneyleri, Struers marka Duramin A300 model, Vickers, Brinell, Rockwell cinsinden makro ve mikro ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçme işleminde Vickers sertlik ölçme metodu kullanılmış ve ölçme esnasında 10 kg yük

uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin sertlik ölçümleri, kaynak metali, ITAB ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde, kaynak kesitinden gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri çift yönlü olarak (kaynak metali ve kaynak bölgesi), Şekil 3'de gösterilen noktalardan alınmıştır.



Mikroyapı fotoğrafları için alınan numuneler standart metalografik numune hazırlanma kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, 3 mikron elmas solüsyonu ile parlatılmış daha sonra % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Numunelerin mikro yapıların görüntülenmesinde Leica DFC320 dijital kamera bağlantılı Leica DM4000M optik mikroskop kullanılmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Gözle Muayene

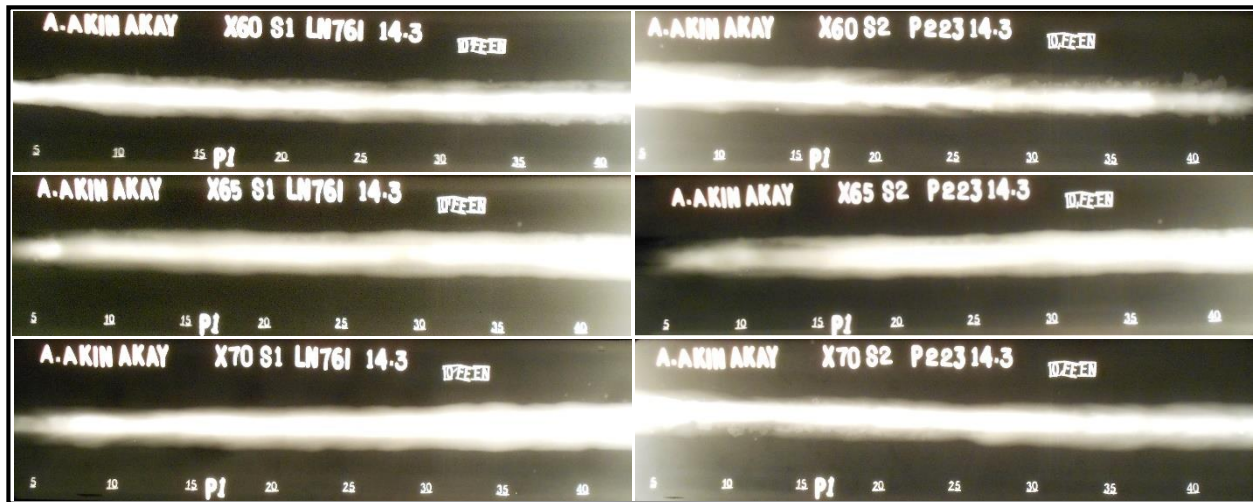
Tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak yapılan birleştirmeler, yüzey kusurlarının tespiti için gözle muayeneye tabi tutulmuşlardır. Gözle

muayene işlemleri, standartlar için gerekli şartları sağlayan bir ortamda ve uzman bir personel tarafından

yapılmıştır. Muayene sonucunda, kaynak yüzeyinde çatlak, yetersiz nüfuziyet ve kökte çökme gibi kaynak hatalarının bulunmadığı tespit edilmiştir. Kaynaklarda, kısmen yanma oluklarının oluştuğu, ancak bu hataların kabul standardının izin verdiği sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir.

3.2. Radyografik Muayene

Şekil 4'te radyografik film görüntüleri verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5'de radyografik muayene protokolü (film parametreleri) ve tüm numuneler için hazırlanmış NDT uzman raporu verilmiştir. Radyografik muayene sonucunda, tozaltı ark kaynağında oluşabilecek nüfuziyet yetersizliği, yanma olukları, gözenek oluşumu, kalıntılar, çatlaklar vb. hatalar gözlemlenmemiş ve gözetilen normlar dâhilinde kabul edilmiştir.



Şekil 4. Radyografik filmler

Emek Boru Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.		RADIOGRAPHIC INSPECTION PROTOCOL RADYOGRAFİK MUAYENE PROTOKOLÜ		a)
Test Piece... : PLAKA		Test Specification : EN 1435 Test Standartları		Date/Tarih: 25.03.2012
Material : X60,X65,X70		Test Class : Class - A		
Welding Process: SAW		Dimensions : 500X350X14,30 mm		
Welding Joint: Kavnak Sekli		Test Area : Kaynak Dikişi + Haz Bölgesi		
Kavnak Metodu		Test Kapsamı		
TEST TEKNİĞİNE AİT BİLGİLER				
Film Type: D 5	Calculation of Exposure Duration: Pozlama Süresinin Hesaplanması			
Radiation Type: X-Ray	Poz Değeri: Çizelgeden alınan			
Focus Dimensions: Odak Boyutları (d) 0,4 mm.	tan 20° = 240 / fmin			
Test Arrangement: Çekim Düzenlemesi Fig.1				
Radiation Angle: Normal	DFU = 2 x FFD x tan 20° = 509,5 mm			
Ineface Energy: 230 kV.				
Film Class/Type/Packing: C 4 / D 5 / PVC				
Screen Type/Thickness: Ekran Tipi/Kalınlık Pb / 0,125 mm.				
fmin...: 17,6 mm				
Source-to-Object Distance: 700 mm				
E kv i mA 160 kV 4 mA				
Activite GBq				
Duration of Exposure: Pozlama Süresi 12,5 dk.				
Picturization Number: Çekim Sayısı 6				
IQI / Image Quality Indicators: IQI Konumu (FF/N) Place of IQI 6 Fe 12				
Evaluation Area / Değerlendirilebilir Alan Calculated / Actual (Hesaplanan/Elde Edilen) 509,5 mm. / Uygun				
Density / Yoğunluk (D): Calculated / Actual (Hesaplanan/Elde Edilen) 2,3 / 2,3				
Image Quality Number / Görüntü Kalite Numarası (IQN) Calculated / Actual (Hesaplanan/Elde Edilen) W 11 / W 12				
Retest / Çekimin Tekrarlanması Gerekli mi? Hayır				
Yes / Evet No / Hayır				
Test Place: YER EMEK BORU A.Ş.	Inspector: Testi Yapan	Approved: Onay		

Emek Boru Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.		RADIOGRAPHIC INSPECTION CERTIFICATE RADYOGRAFİK MUAYENE SERTİFİKASI		b)											
Customer / Müşteri : PLAKA	Order No / Sipariş No :														
Dimensions / Boyutları : 500X350X14,30 mm	Test Class / Test Sınıfı : Class A	Test Standard / Çekim Standartı : TS 6127 EN 1435													
Material / Malzeme : X60,X65,X70	IQI / IQN : 6 Fe 12	Test Arrangement / Çekim Tekniği : Fig. 1													
Focus / Odak : 0,4x0,4 mm	Welding Process / Kaynak Yöntemi : SAW	Exposure Time / Poz Süresi : 12,50 dk													
Equipment / Ekipman : MGC 41	Film Size / Film Boyutu : 10 x 48 cm	Acceptance Standardı / Kabul Standartı : ISO 3183 / API 5L													
Pipe No / Boru No	Film No / Film No	Welder No / Kaynakçı No	Dimensions / Boyutlar	Aa	Ab	Ad	Ba	Bb	C	D	E	F	H	Rating / Sonuç	Remarks / Açıklamalar
	P1													Kabul	
	P2													Kabul	
	P3													Kabul	
	P4													Kabul	
	P5													Kabul	
	P6													Kabul	
Aa : Porosity / Gözenek		C : Lack of Fusion / Yetersiz Erime													
Ab : Elongated Cavity / Gaz Kanalı		D : Lack of Penetration / Kök Hatası													
Ad : Clustered Porosity / Toplu Gözenek		E : Crack / Çatlak													
Ba : Slag / Curuf		F : Undercut / Yanma Oluşu													
Bb : Slag Line / Sıralı Curuf		H : Inclusion / Metalik Kalıntı													

Şekil 5. Radyografik muayene a) protokolü b) sertifikası

3.3. Kimyasal Analiz

Kaynaklı numunelerdeki, kaynak dikişinden alınan spektral analiz sonuçları Tablo 5'de verilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının daha anlaşılabilir olması açısından, elementlerden sadece C (karbon) ve Mn (mangan) için ayrı ayrı grafikler çizilmiştir. Şekil 6.a'da C

elementinin, kaynak metali içerisindeki miktarı, Şekil 6.b'de ise Mn elementinin kaynak metali içerisindeki miktarını göstermektedir.

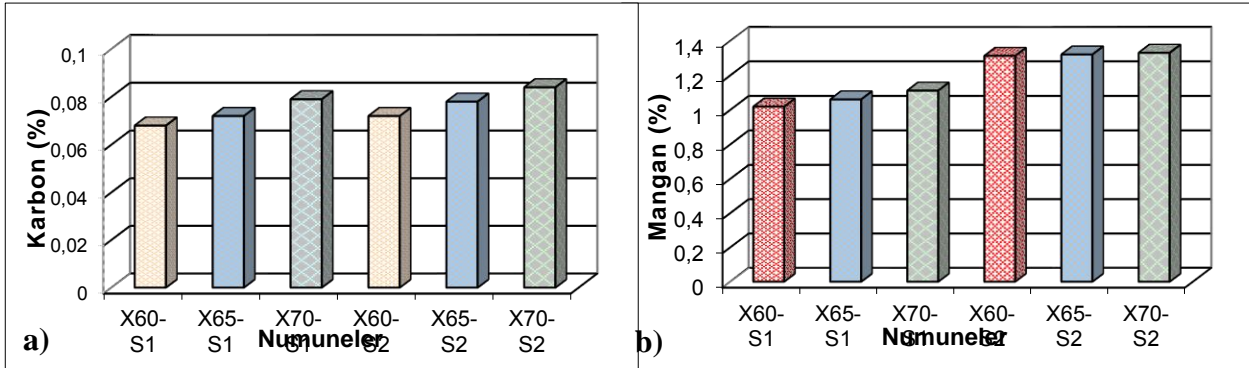
Analiz sonuçlarına göre % C oranı genel olarak ana malzemeye göre kaynak metalinde artmıştır. X60 malzemede C oranı % 0.065, S1 ilave metalinde C oranı

% 0,075 iken, kaynak sonrasında bu bileşim % 0,068 olarak ölçülmüştür. Buradan, kaynak metal kimyasal bileşimi içerisindeki C oranının, ana malzemeden yüksek, ilave metalden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Kaynak metalinin, ana malzeme ile ilave metalin karışımından oluştuğu düşünüldüğünde, bulunan sonuç ile beklenen sonucun, uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Aynı durum, X65 ve X70 malzemelerin kaynak metalleri içinde geçerlidir. Kaynak metalinde içerisindeki Mn oranı incelendiğinde % 1,019 olduğu görülmektedir. Mn oranı X60 ana malzemede % 1,26 (Tablo1), ilave metalde ise % 0,56 olarak verilmiştir (Tablo 2). Bu durumda, C için geçerli olan durum, Mn için de geçerli olmuştur.

% Mn oranı ise S1 teli ve LN 761 tozu kullanılan numunelerde azalma, S2Mo teli ve P223 tozu kullanılan numuneler de ise artma eğilimi göstermiştir. Kullanılan tellerin kimyasal yapısındaki % Mn oranları Tablo 2’de görüldüğü gibi farklılık göstermektedir. S2Mo teli % Mn açısından S1 teline göre oldukça zengin bir bileşime sahiptir. Ayrıca P223 tozunun kaynak metaline, LN 761 tozuna nazaran çok daha yüksek oranlarda Mn elementini ihtiva ettiği bilinmektedir. Göze çarpan bir diğer element ise Mo’dur. S2Mo telinin yüksek oranda Mo elementi içermesi, kullanıldığı kaynaklı birleştirmelerin kimyasal bileşiminde % Mo oranını önemli ölçüde arttırmıştır.

Tablo 5. Kaynak dikişinden alınan kimyasal bileşim analizleri (Ağırlıkça %)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb	Fe
X60-S1	0,068	1,019	0,231	0,009	0,007	0,022	0,014	0,020	0,064	0,008	0,005	0,024	0,015	Kalan
X65-S1	0,074	1,061	0,273	0,011	0,007	0,062	0,025	0,044	0,062	0,010	0,006	0,020	0,016	
X70-S1	0,079	1,112	0,223	0,010	0,006	0,095	0,106	0,002	0,041	0,005	0,003	0,023	0,011	
X60-S2Mo	0,072	1,313	0,261	0,015	0,007	0,021	0,027	0,204	0,054	0,014	0,006	0,027	0,019	
X65-S2Mo	0,078	1,321	0,228	0,015	0,006	0,025	0,030	0,195	0,060	0,012	0,005	0,019	0,014	
X70-S2Mo	0,084	1,331	0,234	0,016	0,007	0,026	0,033	0,198	0,062	0,012	0,005	0,020	0,016	

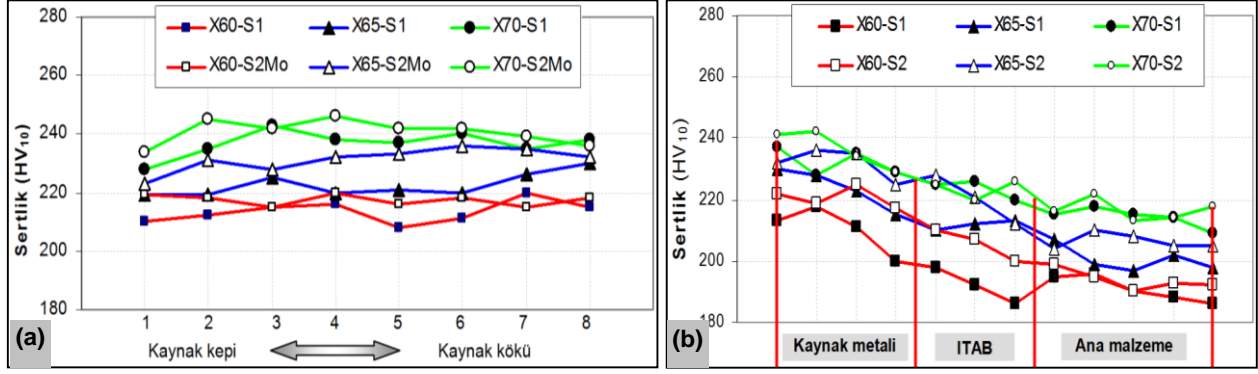


Şekil 6. Kaynak metalindeki a) % C oranı b) % Mn oranı grafiği (ağırlıkça %)

3.4. Sertlik Testi

Düşük karbonlu, az alaşımlı çeliklerin kaynağında ITAB’da çatlamaya karşı emniyet için sertliğin 350 HV sertlik değerini geçmemesi tavsiye edilmektedir. Tüm kaynaklı numunelerden, bu kritik değer altında sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri, Şekil 3’de belirtilen noktalardan alınmıştır. Şekil 7’deki kaynaklı numunelerin sertlik grafikleri incelendiğinde, genel olarak kaynak metalinin ITAB ve ana malzemeden daha

sert olduğu görülmektedir. Ana malzemede en yüksek sertlik X70 malzemesinde 222 HV olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik ise X60 malzemesinde 186 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ise en yüksek sertlik değeri S2Mo teli ile kaynatılan X70 malzemesinde 246 HV, en düşük sertlik değeri ise S1 teli ile kaynatılan X60 malzemesinde 200 HV olarak ölçülmüştür. Tablo 5’de, kaynak metalinden ölçülen % C oranının, ana malzemeye ait olan ITAB ve ana malzemeden yüksek olması bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 7. Kaynaklı numunelerden alınan sertlik ölçüm sonuçları a) dikey doğrultuda ve b) yatay doğrultuda

Literatürde [1,4-6], tozaltı ark kaynağı ile yapılan çalışmalarda, ark kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğunu ve onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiğini belirtmişlerdir. Kılınçer [7], farklı karbon oranına sahip çelikleri tozaltı ark kaynağı ile birleştirmiş ve % 0,22'den az karbon oranına sahip kaynaklı bağlantıların en sert bölgesinin kaynak metali olduğunu ve kaynak metalinden ana malzemeye doğru gidildikçe sertliğin azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca, kaynaklı numunelerdeki kaynak metalinin sertliğinin ana malzemeden daha yüksek olması, kaynak esnasında kullanılan ilave metaldeki karbon ve diğer alaşım elementlerinin oranıyla ilişkilidir. ITAB'dan ölçülen sertlik değerlerinin, ana malzemeden daha yüksek

olmasının sebebi ise bu bölgede meydana gelen tane irileşmesidir.

3.5. Çentik Darbe Testi

Çentik darbe testi, tozaltı ark kaynağı ile farklı tel ve tozlar kullanılarak birleştirilmiş numunelerin, hem kaynak metallere, hem de ITAB'larının üç farklı ortam sıcaklığında tokluk değerlerini belirlemek için yapılmıştır. Tablo 6'da test yapılan üç deney sonucunun ortalamalarını tablo olarak, Şekil 8'de ise tabloda verilen değerler neticesinde oluşturulan grafikleri göstermektedir. Ana malzemelerden oda sıcaklığında ölçülen tokluk değerleri X60=213 J, X65=226 J ve X70=215 J'dür.

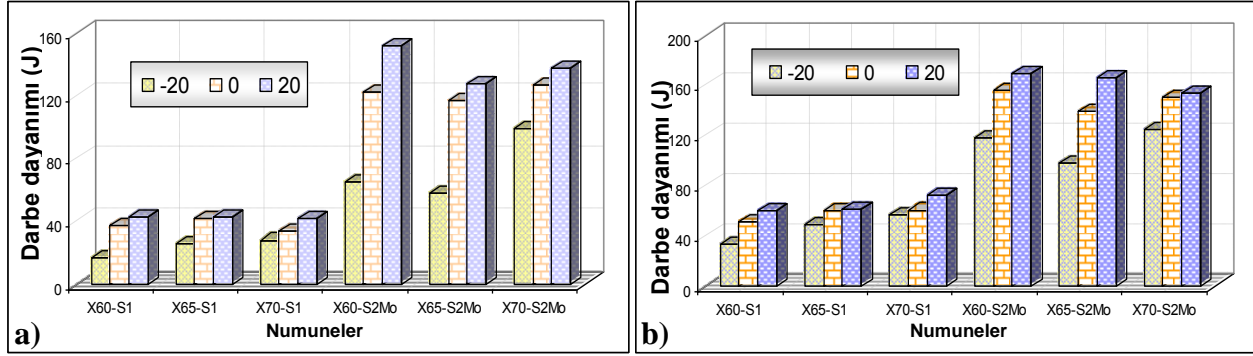
Tablo 6. Kaynak metali ve ITAB'dan ölçülen tokluk değerleri (J)

KAYNAK METALİ				ITAB			
Numuneler	Sıcaklıklar (°C)			Numuneler	Sıcaklıklar (°C)		
	-20	0	20		-20	0	20
X60-S1	17	37	43	X60-S1	34	52	60
X65-S1	26	42	43	X65-S1	49	60	62
X70-S1	28	34	42	X70-S1	57	61	73
X60-S2Mo	65	123	152	X60-S2Mo	118	156	170
X65-S2Mo	58	117	128	X65-S2Mo	98	140	166
X70-S2Mo	99	127	138	X70-S2Mo	125	151	154

Tablo 6 incelendiğinde, en yüksek tokluk değerlerinin oda sıcaklığında (20°C), en düşük tokluk değerlerinin ise -20°C'de ölçüldüğü görülmektedir. Genel olarak sıcaklık düştükçe malzemelerin darbe direncinin de düştüğü bilinmektedir. Malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak, darbe direncindeki düşme, aniden olabileceği gibi belirli bir sıcaklık aralığında da olabilmektedir.

Kurt [8], DH 36 gemi sacını farklı kaynak yöntemleriyle (elektrik ark, MIG-MAG ve tozaltı) birleştirmiş ve bağlantı dayanımlarını, çentik darbe testiyle, farklı sıcaklık ortamlarında (-40°C, -20°C, 0°C, 20°C, 40°C) belirlemeye çalışmıştır. Çalışmalar sonucunda, darbe deney test sıcaklığın düşmesiyle, tüm yöntemlerde

tokluk değerlerinin düştüğünü rapor etmiştir. Kaçar ve Kökemli [9], düşük karbonlu çelik çiftleri, klasik GMAK yöntemiyle argon koruyucu gazı kullanarak ve kontrollü atmosfer ünitesinde aynı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirmişler ve bağlantıların mekanik ve metalurjik özellikleri araştırmışlardır. Çalışma sonucunda altı farklı sıcaklıkta (-100°C, -50°C, 0°C, 25°C, 50°C, 100°C) çentik darbe testleri yapılmış ve sıcaklığın azalmasıyla, kaynak metallere ölçülen darbe tokluklarının düştüğünü rapor etmişlerdir.



Şekil 8. Çentik darbe test grafikleri a)Kaynak metali b) ITAB

Grafikler incelendiğinde, S2Mo teli ve P223 tozu kullanılarak birleştirilen numunelerden alınan değerler, S1 teli ve LN 761 tozu kullanılarak birleştirilen numunelerden alınan değerlerden daha yüksek bulunmuştur. Çentik darbe test sonuçlarında S2Mo tel ve P223 toz kullanılan kaynaklı numunelerin değerlerinin yüksek çıkmasının sebeplerinden birisi de P223 tozunun bazik karakterli olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. P223 tozunun bazik karakterli olması, kaynak esnasında kaynak banyosundaki serbest haldeki oksijen elementini yüksek oranda redüklemesini sağlamaktadır [10]. LN 761 tozu ise rutil karakterli olması sebebiyle oksijen elementini P223 tozu kadar redükleyememektedir. Bilindiği üzere oksijen elementi kaynaklı bölgede istenmeyen bir elementtir. Oksijen elementinin kaynaklı bölgede yüzde oran olarak düşük olması çentik darbe dayanımını arttırmaktadır. Durgutlu vd. yaptıkları çalışmada, tozaltı ark kaynağı ile düşük karbonlu çelik malzemeleri farklı özelliğe sahip kaynak tozları ile birleştirmiş, yapılan birleştirmelerin incelenmesi sonucunda en iyi tokluk değerlerinin P223 tozu ile kaynaklanmış numunelerde olduğu saptanmıştır [5].

Çentik darbe test sonuçları incelendiğinde, en yüksek çentik darbe enerjilerini ana malzeme gösterirken, bunu sırayla ITAB ve kaynak metalinin takip ettiği görülmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki, ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinden ölçülen tokluk değerleri, aynı bölgelerden ölçülen sertlik değerleriyle paralellik göstermektedir. Yani sertlik arttıkça, tokluk azalmaktadır. Çetinkaya [11] yaptığı bir çalışmada, sertliğin artmasıyla tokluğun azaldığını rapor etmektedir. Burada kaynak metalinden elde edilen çentik darbe mukavemetleri ITAB'den elde edilen değerlerden daha düşük bulunmuştur. Düşük karbonlu çeliklerin kaynağında ITAB'nin kırılma davranışları üzerine yapılan bir çalışmada [12] ITAB'daki iri taneli bölgenin tokluğunun, kaynak metalinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ITAB'ın sertliğinin kaynak metali sertliğinden düşük olmasının bu sonucu doğruladığı belirtilmiştir.

Kaya ve arkadaşları [4], tozaltı ark kaynağı ile birleştirilen farklı kalınlıktaki Grade A gemi saclarının mekanik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada ITAB'ın tokluğunun kaynak metalinden daha yüksek olduğu ve ITAB'ın sertliğinin kaynak metalinden daha düşük olmasının bu sonucu doğruladığını belirtmişlerdir. Elde edilen çentik darbe sonuçları, sertlik sonuçları ile kıyaslandığında, sertliğin yüksek olduğu kaynak metallere tokluk değerleri düşük, sertliğin düşük olduğu ITAB'da ise tokluk değerleri yüksek çıkmıştır. Ayrıca çalışmada, özellikle tozaltı ark kaynağı gibi yüksek ısı girdisine sahip bir yöntemde, kaynak metali gevrek bir davranış gösterirken, ITAB'ın, kaynak metaline nazaran daha tok yapıda olduğu vurgulanmıştır.

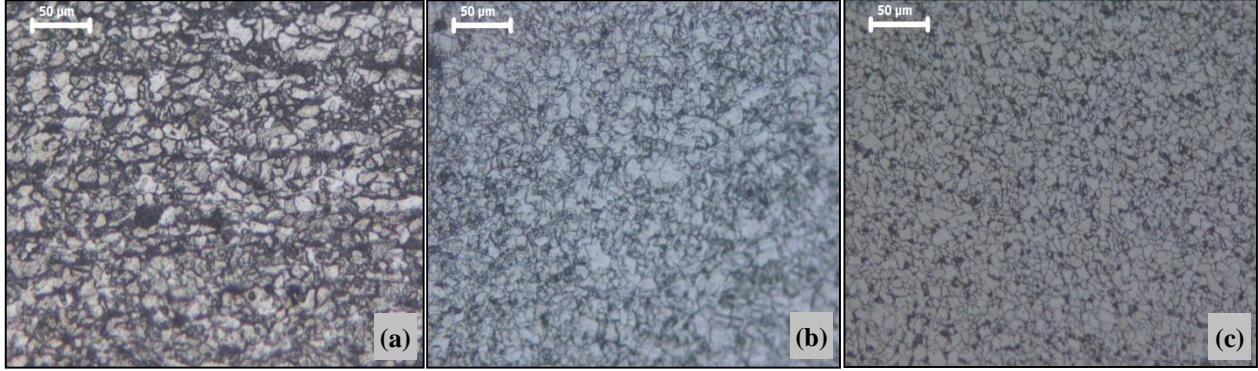
Karbon miktarı malzeme sertliğini artırıcı mekanizmaların en önemlilerinden biridir. Karbon miktarı arttıkça malzemenin sertliği artar, çentik darbe dayanımı ise düşer [1]. Kimyasal analiz sonuçlarından da anlaşılacağı üzere kaynak metalinde karbon oranı ana malzemeye göre artmıştır. Bu da kaynak metalinde sertliğin artmasına ve çentik darbe dayanımının ITAB'a göre düşük olmasına neden olmuştur. Tozaltı kaynak metalinde tokluğun yüksek olması için mangan oranının %1,2'den fazla olması gerektiği önerilmektedir. Bu oranın üzerine çıktığında asiküler ferrit hacim oranı arttığından tokluk artmaktadır. Tokluktaki artış manganın optimum değerine ulaşmasına kadar devam etmektedir [10]. S1 tel ve LN 761 toz kullanılan numunelerde ana malzemeye göre % Mn oranı azalmış ve S2Mo tel ve P223 toz kullanılan numunelerde ise % Mn oranı artmıştır (Tablo 5). S2Mo tel kullanılan numunelerde tokluğun yüksek çıkmasının sebeplerinden birinin de kaynak metali bileşimindeki yüksek % Mn oranı olduğu düşünülmektedir.

Molibdenin örtülü elektrot kaynak metaline ilave edilmesinin ana amacı, kaynak mukavemetini arttırmaktır. Molibden östenit dönüşümünü önler ve dönüşüm sıcaklığını biraz düşürür. Molibden karbürlerin çökmesi östenit tane sınırlarında ferrit

dönüşümünü engeller. Bu nedenle asiküler ferrit hacim oranında artışa sebep olur [10]. Tablo 5’de kaynak metalinden alınan kimyasal analiz sonuçlarında S2Mo tel kullanılan numunelerde % Mo oranının, S1 tel kullanılan numunelerden fazla olduğu görülmektedir. Sonuç olarak % Mo oranının, S2Mo teli kullanılan numunelerde yüksek olması asiküler ferrit hacim oranında artışa ve darbe çentik testlerinde yüksek tokluk elde edilmesine neden olmuştur.

3.6. Mikroyapı İncelemeleri

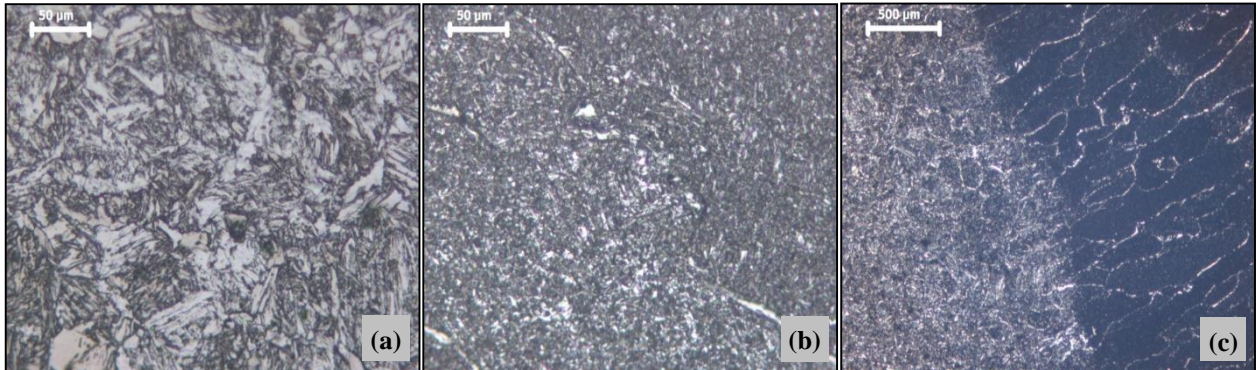
Şekil 9’da kaynak işlemlerinde kullanılan ana malzemelerin (X60, X65 ve X70) mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Ana malzeme mikro yapı fotoğraflarına bakıldığında malzemelerin tipik eş eksenli, perlit ve ferritten oluşan, ince taneli bir yapıya sahip olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, kaynak için seçilen malzemelerden X70 malzemesi en ince tane yapısına sahip iken, bu malzemeyi sırasıyla X65 ve X60 malzemeleri takip etmektedir.



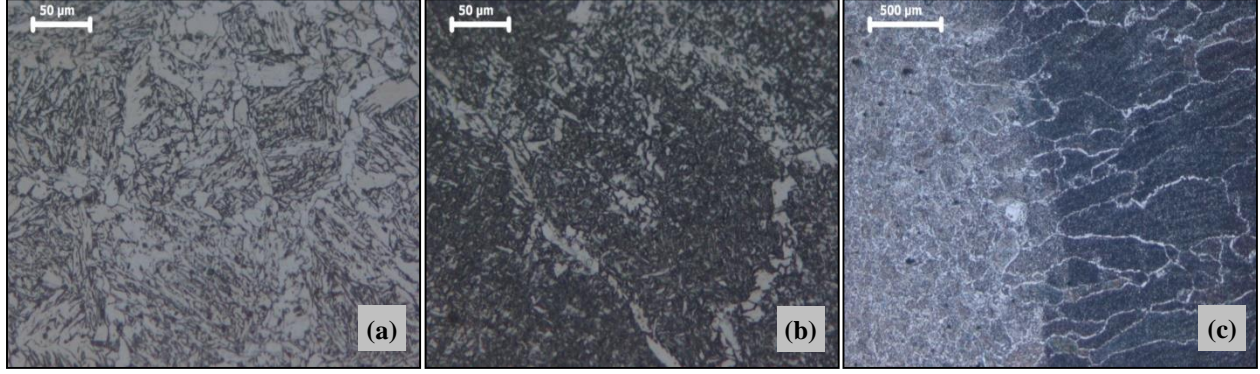
Şekil 9. Ana malzeme mikro yapı görüntüleri a) X60, b) X65 ve c) X70

Şekil 10-15’de ITAB, kaynak metal ve ITAB-kaynak metal geçiş bölgelerinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde, tüm birleştirmelerde kaynak metalleri, ITAB’lar ve kaynak ergime sınırına bitişik bölgelerin birbirlerine benzer görüntüler sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, tel ve toz bileşimi etkileri hariç, tüm numunelerdeki ısı girdisi sabit olduğundan, gerek kaynak metalleri, gerekse ITAB tane boyutlarının birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin (a) ve (b) kodlu ITAB ve kaynak metal görüntüleri

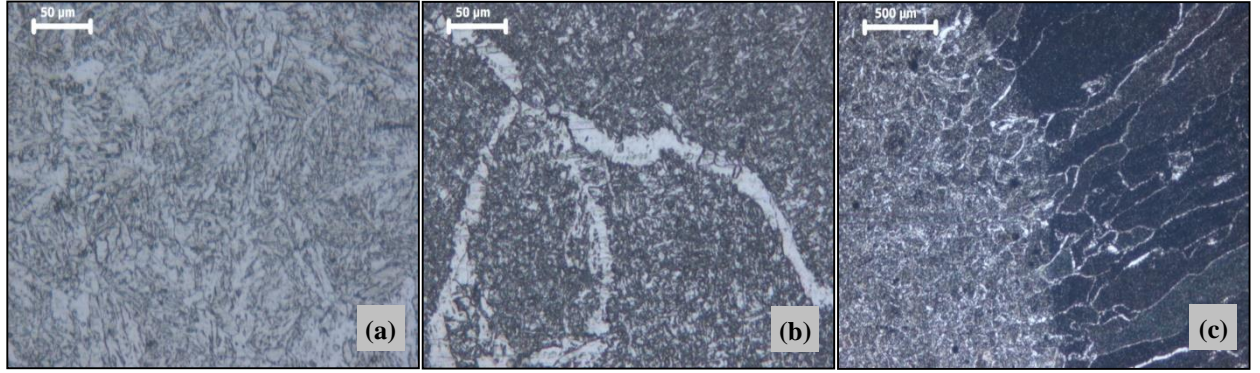
incelendiğinde kaynak metaline doğru incelen ferritik ve perlitik yapılar görülmektedir. Görülen beyaz alanlar “ferrit”, siyah olarak görülen alanlar ise ince taneli “perlitik” yapılarıdır. Ayrıca (a) ve (b) kodlu ITAB ve kaynak metal mikroyapı fotoğraflarında değişik oranlarda görülen ötektoid öncesi ferrit fazı, tane sınırlarında uzun ve/veya geniş boyutlarda widmanstatten yapılar ile tane içi widmanstatten yapılar görülmektedir.



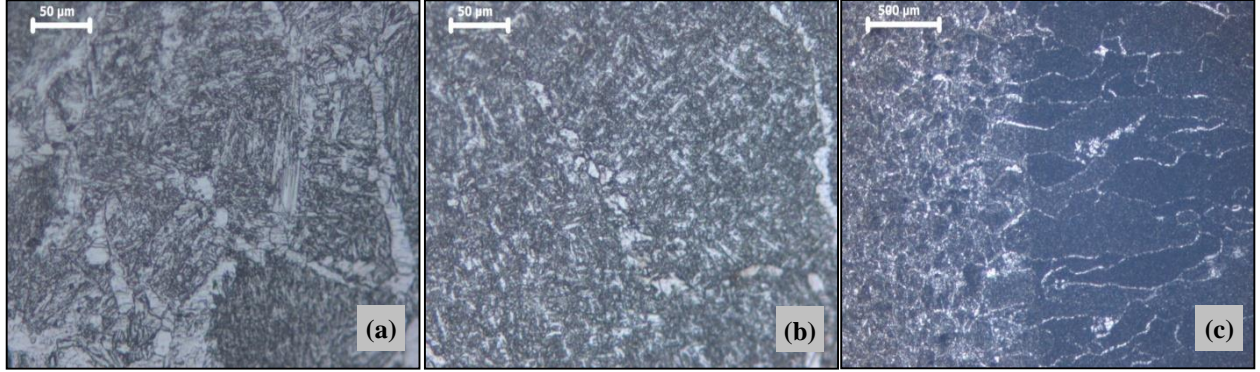
Şekil 10. X60-S1 numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metal c) ITAB-kaynak metal geçiş bölgesi



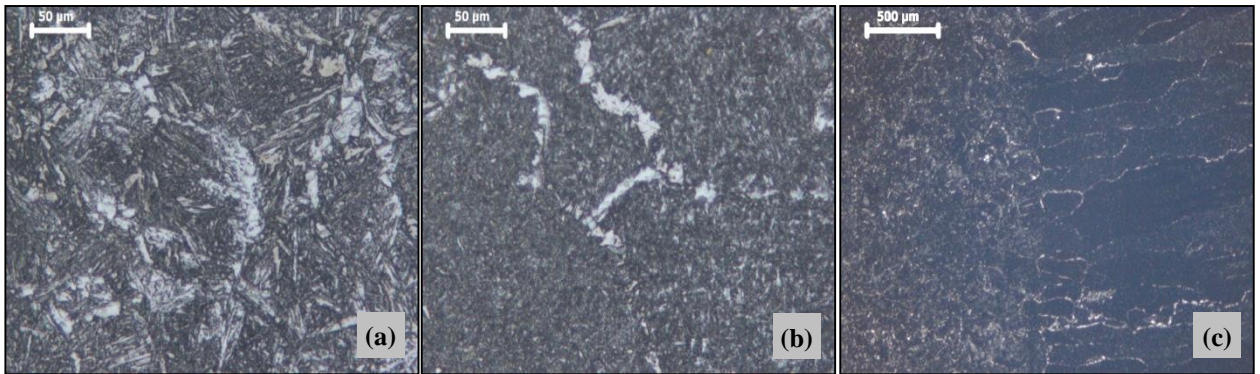
Şekil 11. X65-S1 numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metali c) ITAB–kaynak metali geçiş bölgesi



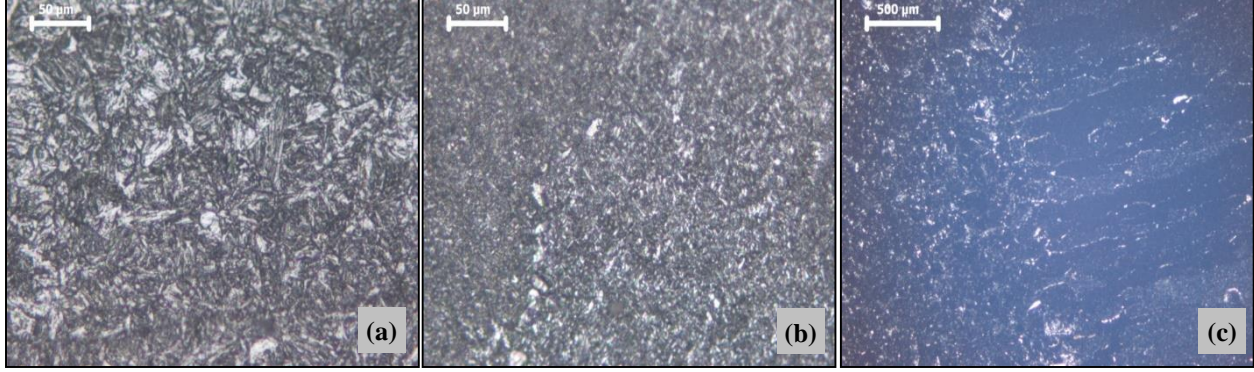
Şekil 12. X70-S1 numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metali c) ITAB–kaynak metali geçiş bölgesi



Şekil 13. X60-S2Mo numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metali c) ITAB–kaynak metali geçiş bölgesi



Şekil 14. X65-S2Mo numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metali c) ITAB–kaynak metali geçiş bölgesi



Şekil 15. X70-S2Mo numunenin mikro yapı fotoğrafları a) ITAB b) kaynak metali c) ITAB-kaynak metali geçiş bölgesi

Numunelerin (c) kodlu mikroyapı görüntüleri genel olarak incelendiğinde, ısı tesiri altında kalan bölgede, tane boyutunun büyüdüğü, kolonsal formda olduğu ve ana metale doğru uzadığı görülmektedir. Literatürde [5], tozaltı ark kaynak yönteminde düşük hızlarda kaba ve kolonsal taneler elde edilirken, yüksek hızlarda daha düzensiz ve ince yapılı taneler elde edilmesinden söz edilmiştir. Ayrıca yapılan araştırmalarda [13,14], yüksek enerji girişinin soğumayı ve katılaşmayı yeterince yavaşlattığı, bu durumda oluşan yapıların daha fazla kabalaşmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bütün numunelerde kaynak hızı 15 cm/dk olduğu için kaynak metalinde kaba ve kolonsal taneler oluşmuştur. Ayrıca kaynak metalinde oluşan tanelerin kaynak metali merkezine doğru yönlendikleri görülmektedir. Literatürde [10], düşük karbonlu ve düşük alaşımlı kaynak metalinde soğuma hızına bağlı olarak oluşan yapılar, tane sınırı ferriti, widmanstatten ferrit, asiküler ferrit ve perlit olabileceği belirtilmektedir. Çalışma sonucunda ağırlıklı olarak kaynak metalinde asiküler ferrit ve perlit taneleri olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çeliklerin, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve toz çeşitleri kullanılarak birleştirildiği bu çalışma sonucunda;

- 1) Kaynaklı numunelere gözle yapılan muayene sonucunda, kaynak yüzey hatalarına (eksik veya fazla kaynak kepi, kökte çökme vb) rastlanılmamıştır.
- 2) Radyografik muayene sonucunda, kaynak bölgesinde, çatlak, gözenek, gaz boşluğu vb kaynak hatalarının bulunmadığı tespit edilmiştir.
- 3) Çentik darbe testlerinde, kaynak metali tokluk değerleri, ITAB tokluk değerlerinden düşük bulunmuştur.

- 4) Kaynak metaline ilave edilen Mn elementinin, çentik darbe dayanımını yüksek ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır.
- 5) API 5L standardındaki X60, X65 ve X70 malzemelerinin petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanımı için -20 °C, 0 °C ve 20 °C sıcaklıklarında çalışma şartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.
- 6) Tüm numunelerde sertlik değerleri, ana malzemeden kaynak metaline doğru artış göstermektedir.
- 7) Tüm birleştirmelerde, ısı girdisi sabit olduğundan, kaynak metalleri, ITAB'lar ve kaynak ergime sınırına bitişik bölgelerin birbirlerine benzer mikroyapılar sergilemiştir.
- 8) Tozaltı ark kaynağı ile gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde kaynak esnasında kullanılan, S2Mo ve P223 tel-toz kombinasyonunun, S1 ve LN 761 tel-toz kombinasyonundan, mekanik özellik bakımından daha üstün olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] ADA, H., Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların Tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2006.
- [2] AKAY, A. A., Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 2012.
- [3] ERENGİN, A., Ark esaslı kaynak yöntemleriyle yapılan uygulamalarda, kutuplama durumu ile ilave malzeme-ergime verimi ilişkisinin incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009.
- [4] KAYA, Y., KAHRAMAN, N., DURGUTLU, A., GÜLENC, B., Ferritik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilebilirliğinin araştırılması,

International Iron & Steel Symposium, 2-4 Nisan 2012, 779-788, Karabük, Türkiye.

[5] DURGUTLU., A, KAHRAMAN., N, GÜLENÇ, B., Tozaltı ark kaynağında kaynak tozunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi, 10, 11, 1-8, 2002.

[6] ASARKAYA, M., Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 54-86, 2006.

[7] KILINÇER, S., Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1998.

[8] KURT, K., DH 36 gemi sacının farklı kaynak yöntemleri ile mekanik özelliklerinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 21-32, 2008.

[9] KAÇAR, R., KÖKEMLİ, K., Effect of controlled atmosphere on the Mig-Mag arc weldment properties, Materials & Design, 26, 6, 508-516, 2005.

[10] YÜKLER, İ., Kaynak Metali, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Matbaası, İstanbul, 52-64, 1994.

[11] ÇETİNKAYA, C., Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12, 2, 279-293, 1999.

[12] KİM, J. H., OH, Y. J., HWANG, II S., KİM, D. J., KİM, JEONG T., Fracture behavior of heat-affected zone in low alloy steels, Journal of Nuclear Materials, 299, 132-139, 2001.

[13] EROĞLU, M., AKSOY M., Enerji girişinin kaynak metali mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi, Bilim Günleri Bildiriler Kitabı Makine Mühendisleri Odası, Denizli, 434-439, 1999.

[14] KILINÇER, S., KAHRAMAN, N., AISI 409 ve Ç1010 çeliğin östenitik elektrod kullanılarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24, 1, 23-31, 2009.