



S355J2 yapı çeliklerinin toz altı ark kaynağında dolgu metalinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi

Abdullah Varol^{a,b}, Mehmet Safa Bozan^{a,c}, Ozan Çoban^{d,e,*} ve Uğur Gürol^a

^a İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kartal, İstanbul, 34100 Türkiye

^b Arçelik A.Ş. Çamaşır Makinası İşletmesi, Tuzla, İstanbul, 34100 Türkiye

^c Gedik Eğitim Vakfı, Gedik Test Merkezi, Pendik, İstanbul, 34100 Türkiye

^d İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik Meslek Yüksekokulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kaynak Teknolojisi Programı, Pendik, İstanbul, 34100 Türkiye

^e İstanbul Gedik Üniversitesi, İGÜN Kaynak Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Pendik, İstanbul, 34100 Türkiye

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 6 Ocak 2024

Düzeltilme 9 Mayıs 2024

Kabul 22 Mayıs 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Toz altı ark kaynağı

Yapı çelikleri

Elektrot seçimi

Mikro yapı

Darbe dayanımı

ÖZET

Bu çalışmada 20 mm kalınlığa sahip S355J2 yapı çeliğine EN ISO 14171-A standardına göre üretilmiş GeKa S1, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri kullanılarak toz altı ark kaynağı yöntemi ile alın kaynağı prosesi gerçekleştirilmiştir. X kaynak ağız geometrisi ve 60° kaynak ağız açısı ile EN ISO 147174 standardına uygun olarak üretilmiş alüminat bazik Eliflux BFPP (SAAB66ACH5) tozu kullanılarak kaynak işlemleri uygulanmıştır. Kaynak prosesi sonrasında tahribatsız muayene, makro yapı incelemesi, mikroyapı incelemesi ile mikrosertlik, eğme, çekme ve -20 °C'de kaynak metali ve ısılan etkilenmiş bölge (IEB)'den çentik darbe testleri gerçekleştirilerek kaynaklı yapılar karakterize edilmiştir. Farklı dolgu metalleri kullanılarak elde edilen kaynaklı yapıların özellikleri kıyaslanarak kullanım alanında beklenen performansa yönelik olarak dolgu metali seçimi için mikroyapı – mekanik özellik ilişkisi kurulmuştur. Elde edilen sonuçlar S1 dolgu metali ile yapılan kaynakların kaynak bölgesinden; S2Si ve S3Mo dolgu metalinde ana malzemeden kopuşunu göstermiştir. Her üç kaynağa da akma ve çekme dayanımı ve %uzama değerlerinde bariz bir farklılık gözlenmemiştir. Fakat S1'e kıyasla S3Mo kullanımı nedeniyle kaynak metali ve IEB'deki çentik darbe dayanımında sırasıyla %15 ve %166, mikrosertlikte %37 ve %8'lik artış sağlanmıştır. Sonuç olarak denizcilik endüstrisinde kullanılan yapı çeliklerinin kaynak uygulamalarında S2Si ve S3Mo dolgu metallerinin kullanımının mikroyapı ve mekanik özellikler açısından uygun olduğu fakat maliyet/performans açısından değerlendirildiğinde ise S2Si teli kullanımının, düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gereksiniminin arttığı kritik uygulamalarda ise S3Mo dolgu metali kullanımının daha uygun olacağı ortaya konulmuştur.

The influence of filler wire on microstructure and mechanical properties is submerged arc welding of S355J2 structural steel

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 Jan 2024

Received in revised form 9 May 2024

Accepted 22 May 2024

Available online

Keywords:

Submerged arc welding

Structural steel

Filler choice

Microstructure

Impact toughness

ABSTRACT

In this study, butt welding process was carried out on 20 mm thick S355J2 structural steel by submerged arc welding method using GeKa S1, S2Si and S3Mo filler wires produced according to EN ISO 14171-A standard. Welding processes were carried out using aluminate basic Eliflux BFPP (SAAB166ACH5) powder produced in accordance with EN ISO 147174 standard. Welded structures were characterized by performing non-destructive testing, macro and microstructural investigations, and microhardness, tensile test, bending test and Charpy impact test on the weld metal and the heat affected zone (HAZ) at -20 °C. By comparing the properties of welded structures obtained using different fillers, the microstructure - mechanical property relationship has been established for filler metal selection for the expected performance in the field of use. The results showed that the welds made using S1 filler metal fractured from the weld area, and the welds made using S2Si and S3Mo filler metal fractured from the base material. No obvious difference was observed in the yield and tensile strength and % elongation values in all three welds. However, due to the use of S3Mo, compared to S1, an increase of 15% and 166% in the impact toughness of the weld metal and in the HAZ, and a 37% and 8% increase in microhardness, respectively, was achieved. As a result, in welding applications of structural steels used in the marine industry, the use of S2Si and S3Mo filler metals is suitable in terms of microstructure and mechanical properties. However, when evaluated in terms of cost-effectiveness, the use of S2Si wire is more appropriate, while in critical applications where the requirement for high impact toughness increases at low temperatures, the use of S3Mo filler metal is more suitable.

I. GİRİŞ

Yapı çelikleri sahip oldukları üstün mekanik özellikler ve görece düşük maliyetlerinin yanı sıra yüksek kaynak kabiliyetlerinden dolayı endüstriyel anlamda en geniş kullanım alanı bulan çelikler arasında yer almaktadır. Yeterli seviyede mukavemetlerinin yanı sıra yüksek sünekliğe sahiptirler [1, 2]. Bu çeliklerin kaynak kabiliyetleri yüksek olmasına rağmen özellikle denizcilik endüstrisi gibi kalın parçaların kullanıldığı ve düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gerektiren alanlarda kaynak uygulamaları günümüzde çokça çalışılan bir konudur. Çünkü kalın plakaların yüksek biriktirme oranı ve tatmin edici mekanik özellikler sağlayacak şekilde kaynaklanmaları genellikle çok pasolu uygulamalarla mümkündür. Ancak endüstriyel anlamda büyük hız kaybettiren bu uygulamanın geliştirilmesi için son dönemlerde yüksek kök nüfuziyeti sağlayan lazer kaynak ve lazer hibrit kaynak yöntemleri geliştirilmiştir [3, 4]. Ancak bu yöntemlerde özellikle lazer kaynağında yüksek ısı enerjisinin dar bir bölgeye yoğunlaştırılması sonucunda dar bir kaynak dikişi ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) elde edilmekte ve bu bölgelerde sertlik artışı olmaktadır [5-9]. Bu da bazı çeliklerde, özellikle de Çeş değeri yeteri kadar yüksek olan türlerde, kaynak dikişi ve/veya IEB'de aşırı gevrekleşmeye yol açabilmektedir. Örneğin Gook ve ark. [10] 30 mm kalınlığındaki düşük karbonlu düşük alaşımlı çeliğe lazer kaynağı ve toz altı ark kaynağı ile 2 pasolu birleştirme işlemi uygulamışlardır. Toz altı ark kaynağı ile atılan pasonun kenarında kalan IEB'de 260 HV sertlik elde edilirken lazer kaynağı kenarındaki IEB'de sertlik değeri 304 HV'e ulaşmıştır. Bunun yanı sıra, her ne kadar yüksek biriktirme oranından dolayı büyük miktarlarda kaynak uygulamasında lazer ve lazer hibrit kaynak yöntemleri maliyet anlamında avantaj sağlasa da yüksek yatırım maliyeti ve bahsedilen metalürjik sebeplerden dolayı farklı çözümlerin geliştirilmesi gerekliliği aşikardır ve bu konuda kaynak teknolojilerinde gelişimler sağlanmalıdır.

Yüksek et kalınlığına sahip malzemelerin kaynak prosesleri için geliştirilmiş yöntemlerden bir tanesi Toz Altı Ark Kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde kaynak prosesi sırasında kaynak torcunun hemen önünden veya torcun içerisinde elektrotun etrafından şarj edilen tozun etkisiyle ark sütunu ve kaynak dikişi hem dış etkenlere karşı korunmakta hem de ısı kaybı önlenerek yüksek ısı girdisi elde edilebilmektedir. Yüksek akım uygulaması ve enerji verimliliğinin yanı sıra hem tozun hem de cürufun kaynak dikişini örtmesi sonucunda yavaş soğuma sağlanması nedeniyle yüksek akım değerlerinde dahi gevrekleşmeye sebep olan fazların oluşumu engellenebilmektedir. Böylelikle kalın parçaların düşük paso sayısı ile kaynak edilebilmesi mümkün kılınmakta ve hem yüksek biriktirme oranları hem de iyi mekanik özelliklere sahip kaynaklı yapı eldesi sağlanabilmektedir [11]. Toz altı ark kaynağı yönteminin sağladığı avantajlar yüksek kaynak gücü ve kaynak hızı, derin nüfuziyet, enerji verimliliği, elektrot ekonomisi, pürüzsüz kaynak dikişi görünümü, kaynakçının kaynak dikişi kalitesini etkilememesi (otomasyon nedeniyle), yüksek ark stabilitesi, özel koruyucu ekipmana ihtiyaç duyulmaması şeklinde özetlenebilir [12].

Ergiyen elektrotlu diğer kaynak yöntemlerinde de olduğu gibi toz altı ark kaynağında da en önemli parametre kullanılan dolgu metalidir. Gerçekleştirilen bu çalışmada yüksek et kalınlığına sahip (20 mm) ve endüstriyel anlamda Dünya'da en çok kullanılan çelik türünden biri olan S355J2 yapı çeliğinin toz altı ark kaynağı yöntemiyle kaynak proseslerinde TS EN ISO 14171-A standardı kapsamındaki dolgu metallerinin (S1, S2Si ve S3Mo) kaynaklı yapının özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Tahribatsız muayene, makro yapı incelemesi, mikroyapısal karakterizasyon, mikrosertlik testi, çekme testi, çentik darbe testi (kaynak metali ve IEB için) ve

eğme testi yöntemleriyle elde edilen sonuçlar ayrı ayrı sunulmuştur. Böylelikle endüstriyel kaynaklı imalat teknolojilerine yönelik bilgi sunulması hedeflenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Deneyel çalışmalarda kullanılan 20 mm kalınlığa sahip S355J2 yapı çeliğinin ve GeKa tarafından üretilmiş olan TS EN ISO 14171-A standardı kapsamındaki dolgu metallerinin (S1, S2Si ve S3Mo) kimyasal bileşimi ve Eş. 1'e göre hesaplanan karbon eşdeğerleri (C_{es}) Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneyel çalışmalarda kullanılan ana malzeme ve dolgu metallerinin kimyasal içerikleri

Malzeme / Dolgu Metali	Kimyasal İçerik (%, ağı.)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Cu	C_{es}
S355 J2 Çeliği	0,17	0,55	1,60	-	-	-	-	0,025	0,025	0,55	0,45
S1	0,11	0,19	1,16	0,021	0,022	0,001	0,003	0,008	0,004	0,040	0,31
S2Si	0,11	0,29	1,41	0,046	0,054	0,001	0,004	0,010	0,004	0,037	0,36
S3Mo	0,12	0,23	1,52	0,029	0,029	0,192	0,004	0,013	0,005	0,049	0,42

$$C_{es} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (1)$$

S355J2 yapı çeliğinin çekme testi sonucunda belirlenen mekanik özellikleri ile dolgu metallerinin üreticisi tarafından beyan edilen mekanik özellikler (çentik darbe dayanımı için minimum değerlerdir) Tablo 2'de verilmiştir. Kaynak uygulamalarında dolgu metali seçiminde en önemli faktör uyumsuzluk faktörü (mismatch factor) olarak belirtilen "M" değeridir ve kaynak metalinin akma dayanımının ana malzemenin akma dayanımına oranıdır [13]. Kaynak metalinin akma dayanımı, tüm kaynak metal biriktirme (all-weld metal deposit) olarak ifade edilen ve tamamen kaynak metali bölgesinden olacak şekilde numune alınarak belirlenen değerdir ve elektrot üreticisi tarafından beyan edilir. Yüksek mukavemetli zırh çeliklerinin kaynak uygulamaları veya benzer olmayan ferritik-östenitik gibi kaynak uygulamaları dışında bu değer 1'den büyük olması ($M > 1$) istenir ve buna overmatch tasarım adı verilir. Yani kullanılan dolgu metalinin oluşturduğu kaynak metali bölgesinden test yapılarak belirlenen mukavemet değerinin ana malzemenin mukavemet değerinden yüksek olması tercih edilir. Tablo 2'de verilen değerlere göre hesaplanan M değerleri (aralıklı değerler farklı parametreler için elde edilebilecek değer aralıkları olup hesaplamalarda ortalama değerler kullanılmıştır) S1,S2Si ve S3Mo için sırasıyla 0,97 – 1,11 – 1,37 şeklindedir. Yani S355J2 çeliğinin S1 dolgu metali kullanılarak kaynak edilmesi undermatch bir tasarımdır ve kaynaklı yapının mukavemetinin ana malzemenin düşük olması beklenir.

Tablo 2. Deneyel çalışmalarda kullanılan ana malzeme ve dolgu metallerinin mekanik özellikleri

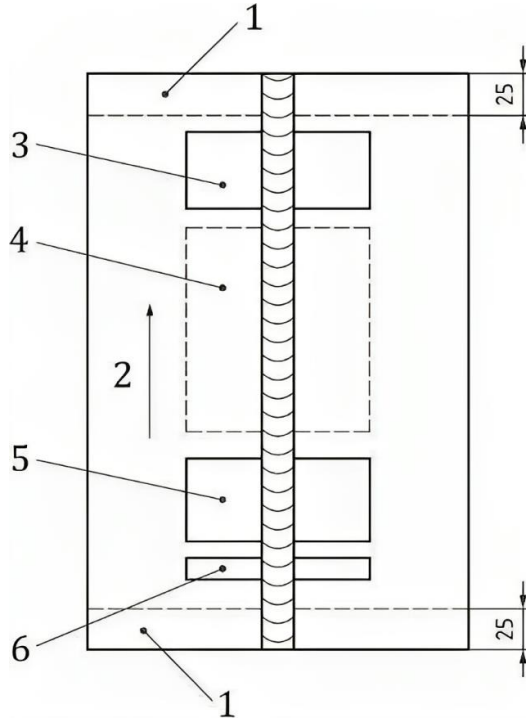
Malzeme / Dolgu Metali	Mekanik Özellikler			Çentik Darbe Dayanımı	
	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	$^{\circ}C$	J
S355J2 Çeliği	389	597	27	-20	35
S1	360-395	460-480	24-30	-30	47
S2Si	420-450	510-550	23-29	-30	70
S3Mo	530-540	620-630	25-27	-40	50-65

Toz altı kaynak işlemi öncesinde plakaların köşelerine punta atılmış ve plakalar sabitleştirilmiştir. 20mm et kalınlığındaki plakalara TS EN ISO 9692-2 standardına uygun olacak şekilde 4 mm genişliğinde ve 60° açılıya sahip "X" kaynak ağızı açılmıştır. Tüm kullanılan kaynak tellerinde (S1, S2Si, S3Mo) EN ISO 14174 standardına uygun ELİFLUX BFPP kaynak tozu kullanılmıştır. Kaynak parametreleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Kaynak parametreleri

Parametre	Değer/İfade
Birleştirme Türü	Alın Kaynağı
Kaynak Pozisyonu	PA
Ana Malzeme	S355J2
Dolgu Metalleri	S1 / S2Si / S3Mo
Toz Türü (TS EN ISO 14174)	SA AB 1 66 AC H5
Ön Isıtma	130 °C
Akım (A)	700
Gerilim (V)	27
Kaynak Hızı (cm/min)	45
Isı Girdisi (kJ/mm)	2,394

Belirtilen parametrelerle kaynak proseslerinin uygulanması sonrasında öncelikli olarak tahribatsız muayene yöntemlerinden görsel muayene, sıvı penetrant muayenesi ve radyografik muayene gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız muayene sonrasında tüm plakalarda mekanik testler için sulu şerit testere kullanılarak numune alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama işlemleri Şekil 1'de gösterildiği gibi, TS EN ISO 15614-1 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. TS EN ISO 15614-1 standartlarına göre kaynaklı plakadan numune alma bölgeleri (1: Atılan bölge, 2: Kaynak yönü, 3 ve 5: Çekme ve Eğme Test numuneleri, 4: Çentik Darbe Test numuneleri, 6: Makro inceleme ve Mikrosertlik test numuneleri)

Her bir kaynaklı malzemeden iki adet çekme testi numunesi alınmıştır. Çekme deneyi işlemleri Zwick/Roell Z600 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir kaynaklı malzemeden dört adet eğme testi numunesi alınmıştır. Numunelerin iki tanesine kök bölgesinden kuvvet uygulayarak eğme işlemi yapılmıştır. Geriye kalan ikisine ise kep bölgesinden eğme işlemi yapılmıştır. Testler MOHR & FEDERHAFF AG cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Altı adet çentik darbe numunesi alınmıştır. Numunelerin 3 tanesi kaynak diğer üç tanesi ise IEB bölgesinden alınmıştır. Çentik darbe testi öncesinde numuneler $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiş ve hemen ardından deneye tabi tutulmuştur. Testler Zwick/Roell RKP 300 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Makro yapı analizleri TS EN ISO 5817 standartlarına göre Nikon SMZ745T Makro Cihazı ile yapılmıştır. Makro ve mikroyapı incelemeleri için sırasıyla Nital10 ve Nital3 dağlayıcı kullanılmıştır. Mikrosertlik testleri Emcotest DuraScan 70 G5 cihazı kullanılarak HV5 (5 kgf) metodu ile ve 1 mm aralıklarla ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kaynak prosesleri sonrasında karakterizasyon işlemleri sırasıyla tahribatsız muayene, makro yapı inceleme, mikroyapısal karakterizasyon, mikrosertlik, çekme testi, çentik darbe testi ve eğme testi şeklinde gerçekleştirilmiştir ve bulgular bu başlıklar altında sunulmuştur.

3.1 Tahribatsız Muayene

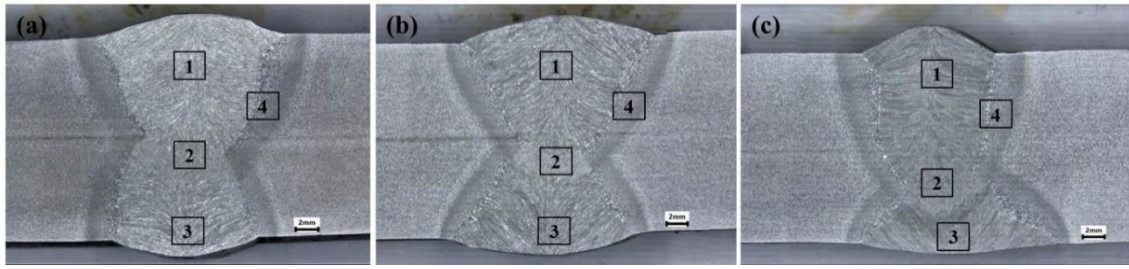
Radyografik muayene sonuçları Şekil 2'de sunulmuştur. S1 ve S2Si kaynak teli ile birleştirilen malzemelerde herhangi bir kusura rastlanmamıştır. S3Mo kaynak teli ile birleştirilmiş olan numunelerde 10-15 ve 20-25 aralığında yanma oluğu (501) hatası tespit edilmiştir.



Şekil 2. Radyografik muayene sonuçları (a) S1, (b) S2Si, (c) S3Mo

3.2 Makro ve Mikroyapı İnceleme

Kaynaklanmış plakaların Şekil 2’de belirtilen bölgesinden alınan makro inceleme numunelerinden elde edilen kaynak dikiş kesitinin alındığı makro yapı inceleme sonuçları Şekil 3’te verilmiştir. Buna göre gözenek, cüruf kalıntısı, ergime noksanlığı, pasolar arası ergime noksanlığı ya da birleşme hatası, yanma oluğu vb. kusurların bulunmadığı, TS EN ISO 5817 standardına göre doğrusal kaçıklık, aşırı kaynak metali gibi kusurların da B sınıfında dahi kabul edilebilir ölçülerde olduğu tespit edilmiştir. Yalnızca ana malzemenin üretiminden kaynaklanan laminer çatlak görülmektedir.

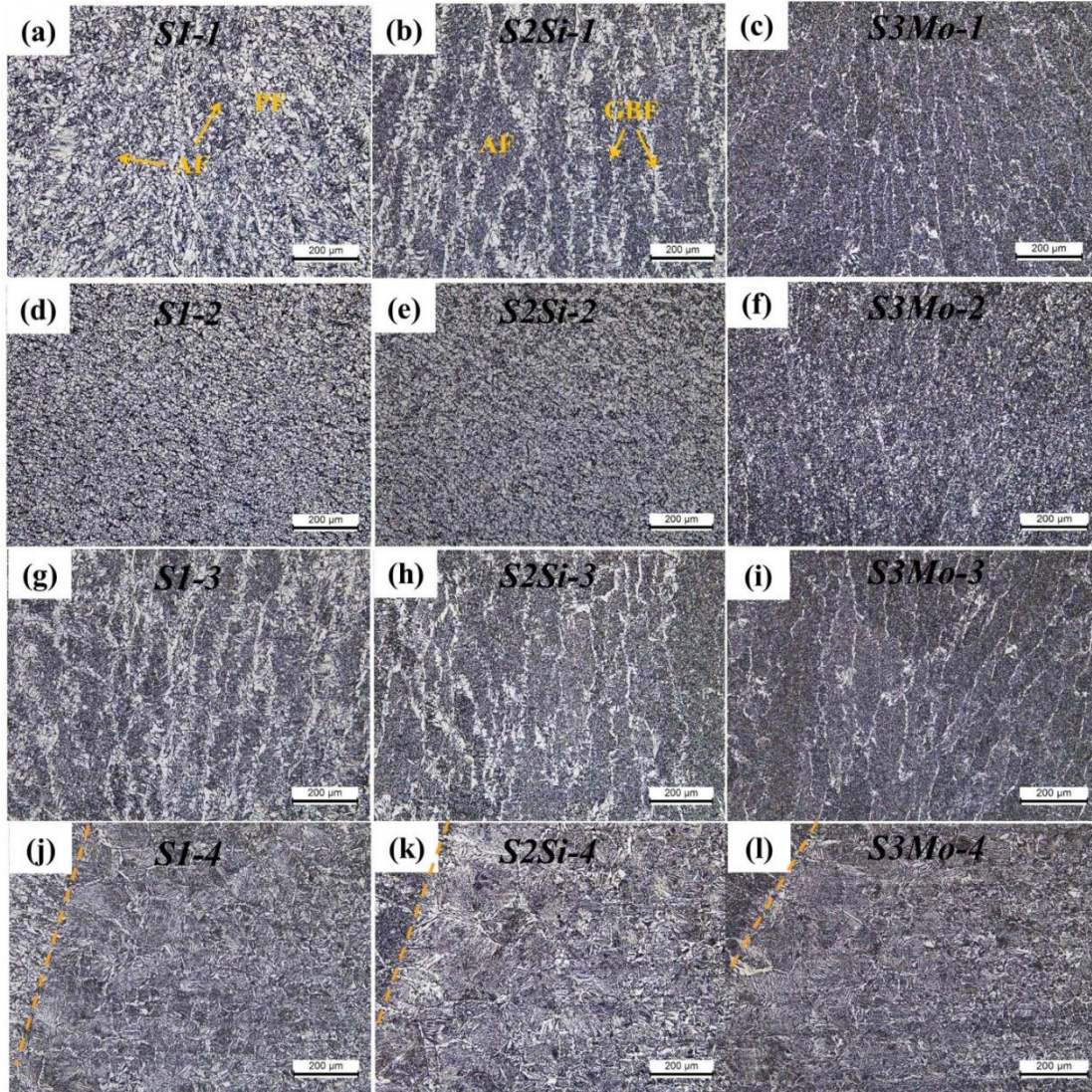


Şekil 3. Makro yapı görüntüleri (a) S1, (b) S2Si, (c) S3Mo

Makro yapılar üzerinde numaralandırılmış olan bölgelerden mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla kep pasonun ortası, kök ve kep paso orta bölgesi (kök pasonun üzerine kep pasonun bindiği bölge), kök pasonun ortası ve IEB bölgeleri 1, 2, 3 ve 4 şeklinde numaralandırılmış ve kıyaslanabilmesi açısından her bir dolgu metali için elde edilen mikroyapılar bölgeler özelinde Şekil 4’te sunulmuştur.

“1” numaralı bölge olan kep paso orta kısmının mikroyapıları kıyaslandığında S1 dolgu metali kullanıldığında (Şekil 4a) yapının baskın şekilde poligonal ferrit (PF)’ten oluştuğu ve az miktarda asiküler ferrit (AF)’in oluştuğu (koyu renkli görülen bölgelerde) görülmektedir. Asiküler ferrit kaynak metali bölgesinde östenit taneleri içerisinde hızlı soğuma sonucunda oluşan bir ferrit türüdür. Asiküler ferritin ince ve kenetli morfolojisinden dolayı çatlak ilerlemesine maksimum direnç gösterdiği ve bu nedenle hem mukavemet hem de darbe dayanımı anlamında olumlu özellikler oluşturduğu yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur [14-19]. S2 dolgu metali kullanıldığında ise (Şekil 4b) yapının baskın şekilde asiküler ferritten oluştuğu ve tane içinde poligonal ferritin neredeyse hiç oluşmadığı, kolonsal tane sınırlarında tane sınırı ferritlerinin (GBF) oluştuğu görülmektedir. Poligonal ferritlerin hem tane sınırında hem de tane içinde yer aldığı ve aşırı yüksek sıcaklıktan aşırı hızlı soğuma sonucunda tane sınırlarından tane içine doğru oluşan iğnesel görünümlü Widmanstatten ferrit (WF) fazının oluşmadığı tespit edilmiştir. Widmanstatten tipi ferritlerin darbe dayanımını düşürdüğü iyi bilinmektedir [15, 16, 19]. Benzer şekilde, lazer kaynaklı ve sürtünme karıştırma kaynaklı yapı çeliklerinin kaynak bölgesinde ve ferritik çeliklerin de soğuma hızına bağlı olarak oluşan martenzitik ve beynitik yapıların da bu bölgenin tokluğunu düşürdüğü rapor edilmiştir [20-26]. S3Mo dolgu metali kullanımında (Şekil 4c) S2Si dolgu metali kullanımına kıyasla (Şekil 4b) asiküler ferrit miktarının çok daha fazla arttığı ve tane sınırı ferritlerinin küçüldüğü ve büyük oranda azaldığı tespit edilmiştir. Alaşım elementlerinin asiküler ferrit oranını artırdığı bazı çalışmalarla ortaya koyulmuştur [16-18]. Bu çalışmada da görülmüştür ki dolgu metalinde molibden varlığı asiküler ferrit oranını artırmaktadır. S1’e kıyasla S2Si kullanımında asiküler ferrit oranının

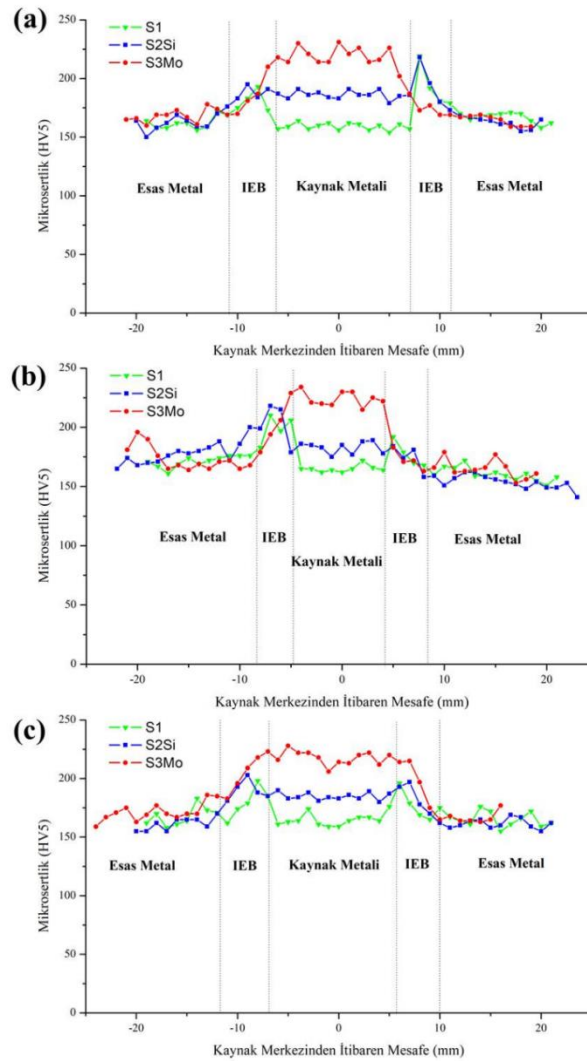
artışında Mn'n önemli bir etken olduğu söylenebilir. Mn'n asiküler ferriti artırdığı birçok çalışmada ortaya koyulmuştur [16, 18]. "2" numaralı bölge olan kök ve kep pasoların orta bölgesinin mikroyapıları kıyaslandığında S1 (Şekil 4d) ve S2Si (Şekil 4e) dolgu metali kullanımında oluşan mikroyapılarda önemli bir fark oluşmadığı ve yapıların eş eksenli tane yapısında ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Ancak S3Mo dolgu metali kullanımında (Şekil 4f) yapının çok ince taneli poligonal ferrit ve asiküler ferritten oluştuğu tespit edilmiştir. "3" numaralı bölge olan kök paso bölgelerinin mikroyapıları kıyaslandığında "1" numaralı bölge olan kep pasodakine benzer bir durumun söz konusu olduğu, S2Si'de asiküler ferritin artarak tane sınırı ferritinin azaldığı ve S3Mo'da asiküler ferritin çok daha fazla arttığı görülmektedir. S1 ve S2Si dolgu metalleri için kep paso ile kıyaslandığında asiküler ferritin arttığı ve poligonal ferritin azaldığı görülmektedir. Bu da kök pasoda daha hızlı bir soğumanın gerçekleştiğine işaret etmektedir. "4" numaralı bölge olan IEB mikroyapıları kıyaslandığında kesikli çizgi ile gösterilen füzyon hattının sağında yer alan IEB'de iri taneli bölge oluşumu söz konusudur. Bu bölgede yüksek sıcaklık etkisi ile taneler irileşmiştir. Bariz bir fark olmasa da tane irileşmesinin en yüksek olduğu dolgu metalinin S2Si olduğu görülmektedir. S3Mo'da iri taneli bölgenin daha dar olduğu ve dar bir aralıkta tanelerin incelendiği görülmektedir.



Şekil 4. Mikroyapılar (a),(d),(g),(j) S1, (b),(e),(h),(k) S2Si, ve (c),(f),(i),(l) S3Mo; (a),(b),(c) 1 numaralı bölge, (d),(e),(f) 2 numaralı bölge, (g),(h),(i) 3 numaralı bölge, ve (j),(k),(l) 4 numaralı bölge (IEB).

3.3 Mikrosertlik Testi

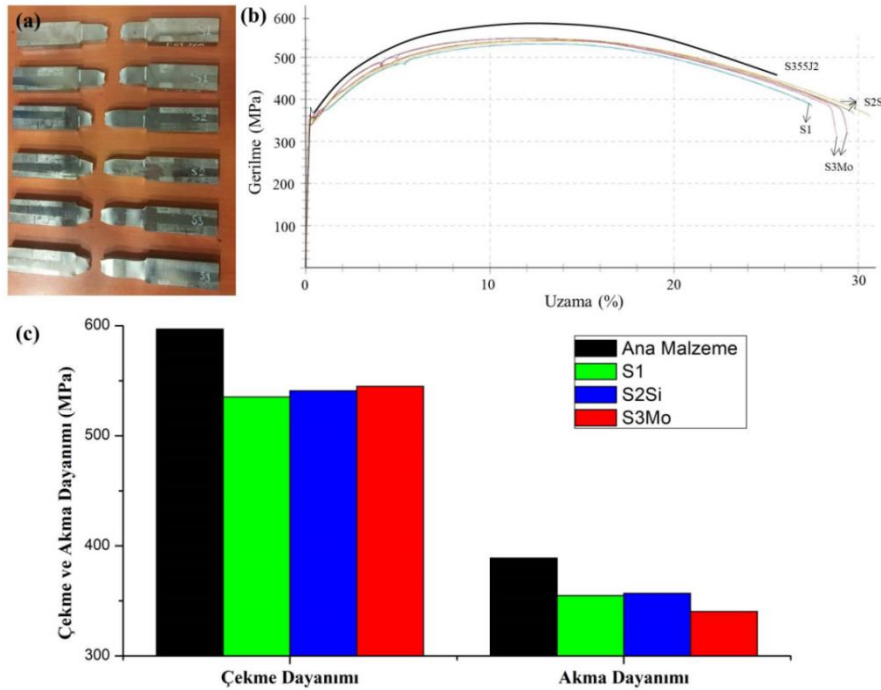
Esas metal, IEB ve kaynak metali bölgelerini içine alacak şekilde kaynak makro kesitinin üst, orta ve alt kısmından 1'er mm aralıklarla HV5 sertlik testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 5a,b,c'de sunulmuştur. Kaynak metali bölgesi için tüm kısımlarda S1, S2Si ve S3Mo dolgu metali kullanıldığında sertlikler ortalama olarak sırasıyla 155 HV, 185 HV ve 225 HV şeklindedir. S1 ve S2Si dolgu metali kullanımında IEB'de sertlikler önemli ölçüde yükselmiştir. Buna karşın S3Mo kullanımında üst ve orta kısımlarda IEB sertlikleri diğer dolgu metallerine göre daha düşük elde edilirken alt kısımda (yani kök pası bölgesinde) daha yüksek oranda seyrelme olduğu için [27] IEB sertlikleri daha yüksektir. Yani S3Mo'daki alaşım elementlerinin migrasyonu sonucunda IEB sertliklerindeki ani düşüş kök bölgesinde ortadan kalkmış ve sertliklerdeki düşüş hızı azalarak IEB sertliklerinin biraz daha yüksek olmasını sağlamıştır. Üst kısımda IEB'de sertliklerin aşırı yükselmiş olduğu bölgelerde gevrekleşmenin de yüksek olabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4j-l'de verilmiş olan mikroyapılardan da görüleceği üzere S1 ve S2Si kullanımında tane irileşmesi meydana gelmiş ve bunun yanı sıra martenzitik yapı oluşmuştur. Bu durum sertlik testine de yansımış ve aynı zamanda IEB darbe dayanımının düşük olacağı öngörüsünü oluşturmuştur.



Şekil 5. Mikrosertlik test sonuçları (a) üst kısım, (b) orta kısım, (c) alt kısım

3.4 Çekme Testi

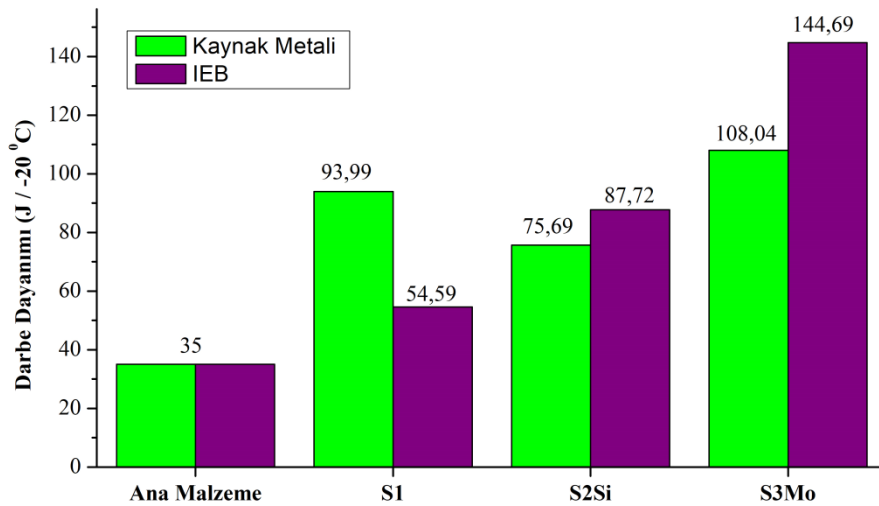
S355J2 ana malzeme ve S1, S2Si ve S3Mo dolgu metali kullanılarak elde edilen kaynaklı yapılarda yapılan çekme testi sonucunda Şekil 6'a'dan görüleceği üzere S1 dolgu metali kullanıldığında kırılma kaynak metalinden gerçekleşirken diğer dolgu tellerinde kırılma ana malzemeden gerçekleşmiştir. Bunun nedeni S1 dolgu teli ile kaynak bölgesinde mukavemet değerinin ana metal mukavemetinden düşük olmasıdır. Benzer durum kaynak bölgesinde undermatch tasarım ($M < 1$) ile gerçekleştirilen söz konusu kaynaklı bağlantılarda da rapor edilmiştir [28, 29]. Şekil 6b,c'de verilen çekme testi sonucundan görüleceği üzere tüm dolgu telleri için akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri birbirine ve esas metalin değerlerine oldukça yakındır. Kaynaklı yapının çekme dayanımının esas malzemenin çekme dayanımına oranı birleştirme verimliliği olarak ifade edilmektedir. S1, S2Si ve S3Mo dolgu metali kullanımı için birleştirme verimleri sırasıyla % 89,67, % 90,60 ve % 91,26 olarak elde edilmiştir. Olafsson ve ark. [30] 20 mm kalınlıkta ve 551 MPa çekme dayanımına sahip S55J2+N çeliğine ortalama 1,95 kJ/mm ısı girdisi ile toz altı ark kaynağı uygulamışlar ve kaynaklı yapının çekme dayanımını 534 MPa olarak belirlemişlerdir. Yani birleştirme verimini % 96,9 olarak tespit etmişlerdir. Çeliğin normalize edilmiş olması birleştirme veriminin yüksek çıkmasında etken olabilir ancak genel anlamda literatür verilerine yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bir başka çalışmada McGrath ve ark. [31] 76 mm kalınlığa sahip C-Mn çeliğine, bizim çalışmamıza benzer şekilde ancak farklı içeriklerde olacak şekilde, alaşımsız (S1'e eşdeğer), silisyumlu (S2Si'ye eşdeğer) ve molibdenli (S3Mo'ya eşdeğer) dolgu metalleri ile 2,2 kJ/mm ısı girdisinde çok pasolu toz altı ark kaynağı prosesi uygulamışlardır ve çekme dayanımlarını sırasıyla 510, 575 ve 535 MPa olarak belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise bu değerler sırasıyla 535, 540 ve 544 MPa şeklindedir. Kopma uzaması değerleri ise sırayla %30, %30 ve %27 şeklinde iken mevcut çalışmada bu değerler sırayla %27,84, %29,83 ve %29,21 şeklindedir. Literatür ile uyumlu sonuçlar elde edildiği bu sonuçlardan da görülmektedir.



Şekil 6. Çekme testi sonuçları (a) kırılma bölgelerinin görüntüsü, (b) Gerilme - % Uzama diyagramları, (c) Çekme ve akma dayanımlarının karşılaştırılması

3.5 Çentik Darbe ve Eğme Testi

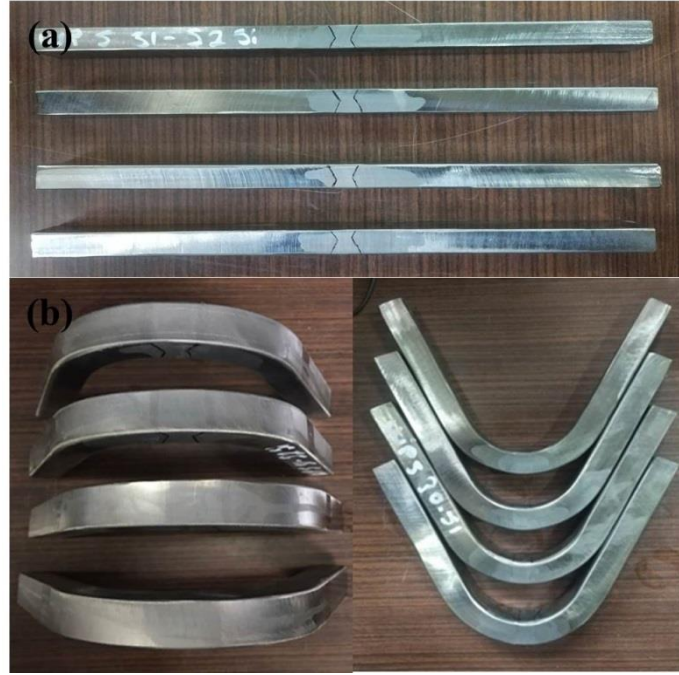
Kaynak metali bölgesinden ve ayrıca IEB'den çentik açarak -20°C 'de gerçekleştirilen çentik darbe testi sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre tüm dolgu metalleri için hem kaynak metali hem de IEB darbe dayanımı değerleri ana malzemeden çok daha yüksek elde edilmiştir. Bu da kaynaklı yapıların kendisinden beklenen performansı sergileyebileceğini ve doğru kaynak prosedürleri uygulandığını göstermiştir. S1 dolgu metali kullanımında IEB darbe dayanımında önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle IEB'de oluşan iri taneli ve martenzitik yapı ile ilişkilendirilebilir. S2Si ve S3Mo dolgu metali kullanımında ise kaynak metaline göre IEB'de daha yüksek darbe dayanımları elde edilmiştir. Kaynak metalinde asiküler ferrit oluşumu ve IEB'de normalizasyon tav etkisi ile ince taneli yapı eldesi genel olarak darbe dayanımlarının artmasını sağlamıştır. S1 kaynak metali darbe dayanımının S2Si kaynak metali darbe dayanımından yüksek olması dikkat çekicidir. Şekil 4g ve Şekil 4h'ta sunulan mikroyapılar kıyaslandığında; kök bölgesinde S2Si'de biraz daha fazla AF ve daha az GBF (tane sınırı ferriti) olmasına rağmen, özellikle kep bölgesinde (Şekil 4a ve Şekil 4b) S2Si'de PF yerine GBF oluşumu artmıştır. Bu da çatlakın üzerinden ilerlemesi için teşvik edici bir fazdır [32, 33] ve bu nedenle S1'e kıyasla, AF miktarının artmasına rağmen, darbe dayanımının daha düşük olarak elde edilmesine sebep olmuş olabilir. Genel anlamda literatür çalışmaları ile kıyaslamak amacıyla; çekme testi sonuçlarında açıklanan ve McGrath ve ark. [31] tarafından gerçekleştirilen çalışmada S1, S2Si ve S3Mo'ya eşdeğer olarak nitelendirilebilecek dolgu metalleri için darbe dayanımı değerleri (-20°C için) sırasıyla 105, 75 ve 110 J olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler ise Şekil 7'de görüldüğü üzere (kaynak metali için) 93,99, 75,69 ve 108,04 J şeklindedir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. McGrath ve ark. darbe dayanımı anlamında S1'e eşdeğer telin S2Si'ye eşdeğer tele göre daha iyi sonuç verdiğini raporlamışlardır ancak IEB darbe dayanımı o çalışmada incelenmemiştir. IEB darbe dayanımı da değerlendirildiğinde S2Si'nin daha iyi sonuç verdiği bu çalışmada görülmektedir.



Şekil 7. Çentik darbe testi sonuçları

Farklı dolgu metalleri kullanımı ile elde edilen kaynaklı yapılarda hem kök hem de kep bölgesinde maksimum deformasyonun oluşacağı şekilde eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Eğme testi sonucunda numunelerin

görünümü Şekil 8’de sunulmuştur. Buna göre tüm numunelerde maksimum açı değerine kadar gerçekleştirilen test sonucunda hem kök hem de kep bölgesinde herhangi bir çatlak oluşumunun gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Bu durum elde edilen kaynaklı yapıların, özellikle kaynak dikişinin, oldukça iyi bir sünekliğe sahip olduğunu göstermektedir. Sonuçlar çekme testi sonucunda elde edilen kopma uzama sonuçları ile uyum göstermektedir. Her 3 dolgu metali kullanımı için de kaynaklı yapıların çok iyi deformasyon kabiliyetine sahip olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 8. Eğme testi numuneleri görünümü (a) test öncesi, (b) test sonrası

IV. SONUÇLAR

20 mm kalınlığa sahip S355J2 yapı çeliğine toz altı ark kaynağı prosesi ile alın kaynak uygulamasında dolgu metalinin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada tahribatsız muayene, makro yapı incelemesi, mikroyapısal karakterizasyon, mikrosertlik testi, çekme testi, çentik darbe testi (kaynak metali ve IEB için) ve eğme testi yöntemleriyle elde edilen sonuçlar göstermiştir ki:

- S1, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri 20 mm kalınlıktaki plakaların kaynağı için 2,4 kJ/mm ısı girdisi değeri için oldukça uygun dolgu metalleridir. Tüm dolgu metalleri için TS EN ISO 5817 standardının B sınıfına göre değerlendirme sonucunda kaynaklı yapıların kusur içermediği tespit edilmiştir.
- Her 3 dolgu metali için de gerçekleştirilen mekanik test sonuçları ortaya koymuştur ki belirtilen parametrelerde toz altı ark kaynağı prosesi tatmin edici mekanik özelliklerin eldesini sağlamıştır. Kaynaklı yapıların mekanik özellikleri mukavemet anlamında S1, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri için sırasıyla %89,67, %90,60 ve %91,26 birleştirme verimliliği (joint efficiency) sağlandığı belirlenmiştir.
- Süneklik anlamında ana malzemenin kopma uzamasından yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca eğme testi sonucunda da herhangi bir çatlak oluşumu gerçekleşmediği belirlenmiştir.

- Tokluk anlamında ise ana malzemenin darbe dayanımının oldukça üzerinde değerlerin (hem kaynak metali hem IEB için) elde edildiği ortaya koyulmuştur. Mikroyapısında içerdiği yüksek oranda asiküler ferritten dolayı en yüksek darbe dayanımı S3Mo dolgu metali kullanımında elde edilmiştir. Bunun yanı sıra kaynak metali bölgesinde en yüksek sertlik değerlerinin de bu dolgu metali kullanımında elde edildiği tespit edilmiştir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde; denizcilik sektöründeki kaynak uygulamalarında S2Si ve S3Mo dolgu malzemelerinin kullanılmasının mikroyapı ve mekanik değerlendirmeler açısından uygun olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, maliyet etkinliği değerlendirilirken S2Si tel kullanımının daha ekonomik bir seçim olduğu açıktır. Ancak özellikle düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gereksiniminin arttığı kritik uygulamalarda S3Mo dolgu metalinin çok iyi performans vereceği ortaya koyulmuştur.

TEŞEKKÜR

Gerçekleştirilen bu çalışmada kaynak proseslerinin uygulanmasında desteğini esirgemeyen Gedik Kaynak A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Wang B, Hu SJ, Sun L, Freiheit T (2020) Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *J Manuf Syst* 56: 373-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>
2. Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF (2021) Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Prog Mater Sci* 115: 100706. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100706>
3. Bunaziv I, Dörum C, Nielsen SE, Suikkanen P, Ren X, Nyhus B, Ericsson M, Akselsen OM (2020) Laser-arc hybrid welding of 12- and 15-mm thick structural steel. *Int J Adv Manuf Technol* 107: 2649–2669. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05192-2>
4. Turichin G, Kuznetsov M, Pozdnyakov A, Gook S, Gumenyuk A, Rethmeier M (2018) Influence of heat input and preheating on the cooling rate, microstructure and mechanical properties at the hybrid laser-arc welding of API 5L X80 steel. *Procedia CIRP*, 74, 748–751. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.018>
5. Çam G, Erim S, Yeni Ç, Koçak M (1999) Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Weld J* 78(6): 193s-201s.
6. Özdemir O, Çam G, Çimenoğlu H, Koçak M (2012) Investigation into mechanical properties of high strength steel plates welded with low temperature transformation (LTT) electrodes. *Int J Surf Sci Eng* 6(1-2): 157-173. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2012.046851>.
7. Çam G, Koçak M, Dos Santos JF (1999) Developments in laser welding of metallic materials and characterization of the joints. *Weld World* 43(2): 13-26.
8. Riekehr S, Çam G, Dos Santos JF, Koçak M, Klein RM, Fischer R (1998) Investigation on Fracture Toughness of Laser Beam Welded Steels', *Proc. of 7th European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'98, September 21-23, 1998, Hannover, Germany*, ed. B.L. Mordike, pub. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, pp. 405-411.
9. Koçak M, Çam G, Kim YJ, Dos Santos JF (1999) Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Joints', *Proc. of the 5th Int. Conf. on Trends in Welding Research, June 1-5, 1998, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA*, ed: J.M. Vitek, S.A. David, J.A. Johnson, H.B. Smart, and T. DebRoy, ASM Int., Materials Park, OH, USA, pp. 805-815.
10. Gook S, Midik A, Biegler M, Gumenyuk A, Rethmeier M (2022) Joining 30 mm Thick Shipbuilding Steel Plates EH36 Using a Process Combination of Hybrid Laser Arc Welding and Submerged Arc Welding. *J Manuf Mater Process*, 6(4): 84. <https://doi.org/10.3390/jmmp6040084>
11. Wiczorska A, Domzalski R (2021) The Influence Of Submerged Arc Welding Conditions On The Properties Of S355jr Structural Steel Joints, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 12(12): 19-29. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/E32PV>

12. Zhou B, Pychynski T, Reischl M, Kharlamov E, Mikut R (2022) Machine learning with domain knowledge for predictive quality monitoring in resistance spot welding. *J Intell Manuf Spec Equip* 33(4): 1139-1163. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01892-y>
13. Koçak, M. (2010). Structural integrity of welded structures: Process - property – performance (3P) relationship. Paper presented at the 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding, Istanbul, Turkey.
14. Svensson LE, and Grefot B (1990) Microstructure and impact toughness of C-Mn weld metals. *Weld Res Suppl* 69(12): 454–461.
15. Jorge JC, Souza LF, Rebello JM (2001) The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits. *Mater Charact* 47: 195-205.
16. Evans GM, and Bailey N (1997) *Metallurgy of Basic Weld Metal*, Cambridge, Abington Publishing.
17. Wang HH, Tong Z, Evans GM (2018) Systematic role of Mn and Ti on microstructure and impact properties of reheated C-Mn weld metals, in Conference: Intermediate meeting of IIW Sub.Comm.2C, Doc.II-C-549-18, Genoa.
18. Abson DJ (2018) Acicular ferrite and bainite in C–Mn and low alloy steel arc weld metals, *Sci Technol Weld Join* 23(8): 635–648. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1461992>.
19. Gürol U, Çoban O, Coşar İC, Koçak M (2022) Effect of the notch location on the Charpy-V toughness results for robotic flux-cored arc welded multipass joints. *Mater Test* 64(9): 1278-1289. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0113>
20. Dos Santos J, Cam G, Torster F, Insfran A, Riekehr S, Ventzke V, Kocak M (2000) Properties of power beam welded steels, Al- and Ti-alloys: Significance of strength mismatch. *Weld World* 44 (6): 42-64.
21. Cam G, Yeni C, Erim S, Ventzke V, Koçak M (1998) Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints, *Sci Technol Weld Join* 3(4): 177-189.
22. Kucukomeroglu T, Aktarer SM, Ipekoglu G, Çam G (2019) Investigation of mechanical and microstructural properties of friction stir welded dual phase (DP) steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 629, 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/629/1/012010>
23. Kucukomeroglu T, Aktarer SM, Ipekoglu G, Çam G (2018) Mechanical properties of friction stir welded St 37 and St 44 steel joints. *Materials Testing*, 60(12), 1163-1170. <https://doi.org/10.3139/120.111266>
24. Kucukomeroglu T, Aktarer SM, Ipekoglu G, Cam G (2018) Microstructure and mechanical properties of friction stir welded St52 steel joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25 (12): 1457-1464. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1700-x>
25. Serindag HT, and Cam G (2021) Microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded AISI 430/AISI 304 dissimilar stainless steels butt joints. *Journal of Physics: Conference Series*, 1777, 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1777/1/012047>
26. Senol M, and Cam G (2023) Investigation into microstructures and properties of AISI 430 ferritic steel butt joints fabricated by GMAW. *Int J Press Vessels Pip* 202: 104926. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104926>
27. Sailender M, Suresh R, Reddy GC, Venkatesh S (2020) Prediction and comparison of the dilution and heat affected zone in submerged arc welding (SAW) of low carbon alloy steel joints. *Measurement* 150: 107084, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107084>
28. Ipekoğlu G., Cam G. (2019) Formation of weld defects in cold metal transfer arc welded 7075-T6 plates and its effect on joint performance. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 629:012007. <https://doi.org/10.1088/1757899X/629/1/012007>
29. Cam G., Kocak M., Dobi D., Heikinheimo L., Siren M. (1997) Fracture behaviour of diffusion bonded bimaterial Ti-Al joints. *Sci Technol Weld Join*. 2 (3):95-101. <https://doi.org/10.1179/stw.1997.2.3.95>
30. Ólafsson ÓM, Jensen JJ, Berggreen C (2016) Experimental investigation of the thickness effect for large as-welded SAW S355 steel specimens. In U. Dam Nielsen, & J. Juncher Jensen (Eds.), *Proceedings of the 13th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS'2016)* Technical University of Denmark.
31. Mcgrath JT, Chandel RS, Orr RF, Gianetto JA (1988) Microstructure/Mechanical Property Relationships in Thick-Section C-Mn Narrow-Groove Welds. *Weld J* 67: 196-201.
32. Miyamoto G, Karube Y, Furuhashi T (2016) Formation of grain boundary ferrite in eutectoid and hypereutectoid pearlitic steels, *Acta Mater* 103: 370-381, ISSN 1359-6454. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.032>.
33. Song HY, Evans GM, Babu SS (2014) Effect of microstructural heterogeneities on scatter of toughness in multi-pass weld metal of C–Mn steels. *Sci Technol Weld Join* 19(5): 376–384. <https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000194>