



YÜKSEK BASINÇLI SICAK PROSES GEÇİŞ HATLARINDA BAĞLANTI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Serdar MERCAN¹, Arslan KAPTAN^{2*}

¹ Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Mechatronic Engineering, 58140, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 58140, Sivas, Türkiye

Özet: Günümüzde önemi artan rafinerilerin ana bölümlerinin başında sıcak proses geçiş hatları (SPG) yer almaktadır. SPG'ler rafinerilerde ham petrol vakum distilasyon ünitesi ve diğer ünitelerde bulunan vakum hatları olarak da isimlendirilen hatlardır. SPG hatlarında meydana gelebilecek hatalar insan ve çevre üzerinde olumsuz etkilerin oluşacağı büyük endüstriyel kazalara neden olmaktadır. Bu hatlarda sızdırmazlığın sağlanması, ısıl genleşme problemlerinin önüne geçilebilmesi ve ekonomik bir bağlantı yöntemi olduğu için birleştirme işlemlerinde kaynak yöntemleri tercih edilmektedir. SPG hatlarında ortalama 14 MPa basınç altında ve yaklaşık 640 °C sıcaklıktan 30 °C sıcaklığa kadar akışkan transferinin sağlandığı fırın giriş çıkış hatları yer almaktadır. Fırın içinde SS 316L paslanmaz çelik, fırın dışında ASTM A106 Grade B düşük karbonlu çelik kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında fırın giriş-çıkış hatlarında TİG kaynak yöntemi ile birleştirilen bağlantılar incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen parametrelerin hangilerinin en güvenli kaynak bağlantılarını meydana getirdiği imalatçılar tarafından belirsizliğini korumaktadır. Bu çalışmada deneyler yapılarak en güvenli kaynak parametreleri tespit edilmiştir. En iyi sonuçlar; eğme deneyinde kaynak bölgesinde çatlak oluşmaması ve 678 MPa çekme mukavemeti ile S6 nolu numuneden elde edilmiştir. S6 nolu numune kök, sıcak, dolgu ve kapak pasolarının sırasıyla 90, 150, 165 ve 170 A akımda gerçekleştirilen numunedir.

Anahtar kelimeler: Sıcak proses hatları, TİG, SS 316L, A106 Grade B, Mikroyapı, Mekanik özellikler

Investigation of Connection Microstructure and Mechanical Properties in High Pressure Hot Process Transition Lines

Abstract: Hot process transition lines (HPTLs) are among the most important parts of refineries, with their increasing importance today. HPTLs are also known as vacuum lines located in the crude oil vacuum distillation unit and other units within refineries. Failures in HPT lines can lead to major industrial accidents that can have adverse effects on humans and the environment. Welding is preferred in joining processes in these lines because it ensures leak-tightness, prevents thermal expansion problems, and is an economical joining method. HPT lines include furnace inlet and outlet lines, where fluid transfer occurs from approximately 640°C to 30°C under an average pressure of 14 MPa. SS 316L stainless steel is used inside the furnace, and ASTM A106 Grade B low-carbon steel is used outside the furnace. In this study, joints joined by TIG welding in furnace inlet and outlet lines were investigated. It remains unclear by manufacturers which of the frequently preferred parameters in industrial applications create the safest welded joints. In this study, the safest welding parameters were determined through experiments. The best results were; No cracks were formed in the weld area in the bending test and a tensile strength of 678 MPa was obtained from sample S6. Sample S6 is the sample in which the root, hot, filler and cover passes were performed at 90, 150, 165 and 170 A currents, respectively.

Keywords: Hot process lines, TIG, SS 316L, A106 Grade B, Microstructure, Mechanical properties

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 58140, Sivas, Türkiye

E mail: akaptan@cumhuriyet.edu.tr (A. KAPTAN)

Serdar MERCAN  <https://orcid.org/0000-0002-1225-8290>

Arslan KAPTAN  <https://orcid.org/0000-0002-2431-9329>

Gönderi: 14 Nisan 2025

Kabul: 19 Eylül 2025

Yayınlanma: 15 Kasım 2025

Received: April 14, 2025

Accepted: September 19, 2025

Published: November 15, 2024

Cite as: Mercan S, Kaptan A. 2025. Investigation of connection microstructure and mechanical properties in high pressure hot process transition lines BSJ Eng Sci, 8(6): 1748-1758.

1. Giriş

Küresel ekonominin, petrol ve doğal gazı dayalı endüstrilere bağımlılığı nedeniyle rafineriler gittikçe artan bir şekilde ilgi görmektedir. Rafineriler ham petrolü destekleyici birimler ve tesisler yardımıyla ürünlere dönüştüren işleme birimlerinin kombinasyonundan oluşan endüstriyel tesislerdir. Bu tesislerde petrol ürünlerinin üretimi için hammaddeler

farklı damıtma bölümlerinde işlenir. Rafineriler; temel üretim bölümleri, proses üniteleri ve yardımcı tesis birimlerinden oluşmaktadır. Tipik bir rafineri, servis yollarıyla ayrılan, yedi ayrı alanda yer alan 16 proses ünitesinden oluşmaktadır. Birimler, ham petrolün damıtıldığı ve farklı hidrokarbon türlerinin nihai ürünlere yükseltildiği ana rafineri proses adımlarına karşılık gelir. Bu nedenle rafineri, farklı birimler ve



alanlar arasındaki büyük akışkan transferiyle karakterize edilir (Brau vd., 2013; Svensson vd., 2020). Her bir proses ünitesinin arasında akışkan transferi için kilometrelerce boru hattına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hatlarda meydana gelebilecek hatalar insan ve çevre üzerinde olumsuz etkilerin oluşacağı büyük kazalara neden olmaktadır (Doğan, 2015). Hatların güvenliğinin sağlanması ile büyük endüstriyel kazalar önlenabilir. Rafinerilerin ana bölümlerinin başında yer alan ham petrol ve vakum distilasyon ünitesi ve diğer ünitelerde bulunan vakum hatları olarak da isimlendirilen, sıcak proses geçiş (SPG) hatlarının birbiri ile bağlantılarında kaynak hataları endüstriyel kaza tehlikesini arttırmaktadır. Bu nedenle ilgili hatlarda yapılacak kaynaklı bağlantılar, proses güvenliğini sağlamalı ve kaza risklerini ortadan kaldırmalıdır. Bağlantı hatları arasındaki yüksek sıcaklık farkları, farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzeme türlerinin birleştirilmek zorunda kalınması ise SPG hatlarında yapılacak kaynaklı bağlantıların imalatını daha zor ve karmaşık bir hale getirmektedir. SPG hatlarından biri de rafine tesislerinde kullanılan yüksek basınçlı hatlarının bağlı olduğu fırın giriş-çıkış bağlantılarıdır. Fırın içi ve dışındaki sıcaklık değerleri ortalama 640 °C ile 30 °C arasındadır ve sistem oldukça yüksek ısı farklılığı altındadır çalışmaktadır. Çalışma basıncı ise ~14 MPa'dır. Fırın içinde yüksek sıcaklıklara dayanan SS 316L paslanmaz çelik malzeme türü kullanılırken, mühendislik ekonomisinin bir gereği olarak fırın dışında ASTM A106 Grade B düşük karbonlu çelik türü kullanılmaktadır. Bu malzemelerin en yaygın kullanıldığı alanlar, gazların veya sıvıların yüksek sıcaklık ve basınçlarda taşındığı rafinerilerde ve diğer petrokimya tesislerindedir.

Tesis büyüklüğüne bağlı olarak fırın bölgesinde ortalama 255 metrelik hat boyunca SS 316L paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Bu hattın 30 metrelik kısmı fırın içinde yanma odası bölgesindedir. 25 metrelik kısmı ise fırın dışındaki SPG hattını oluşturan boru çevresinin izolasyonlu olarak döşendiği hattır. Geri kalan 200 metrelik hat ise izolasyonsuz olarak tesis edilmiştir. Bu mesafeden sonra hat içi akışkan sıcaklığının 30 °C'ye düşmesi, fırın içi ve yakın çevresine göre nispeten daha düşük sıcaklığa ulaştığı için hattın devamında düşük karbonlu A106 Grade B malzemesi kaynakla birleştirilerek kullanılmaktadır. Bu iki malzeme çiftinin birleştirilmesinde Tungsten İnert Gaz (TİG) kaynak yöntemi kullanılmaktadır. TİG kaynağı yüksek kalitede kaynak metali elde etmek için kullanılan (Wu vd., 1997) tükenmeyen bir tungsten elektrod ve arkın bir soy gaz (Juang ve Tarng, 2002) veya karışımları tarafından korunduğu (Modenesi vd., 2000) yüksek kaliteli kaynak dikişlerinin elde edildiği önemli bir ark kaynak yöntemidir. Ancak uygulamada paslanmaz çeliklerde gaz karışımları yerine sadece argon gazı tercih edilmektedir. Bu kaynak yönteminde genel olarak tek bir kaynak teli kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve diğer birçok demir dışı metaller gibi kaynak yapılması zor olan metallerin

birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır (Althouse vd., 1992). Balaji vd. basınçlı hat borularının imalatında kullanılan SS 316L malzemenin TİG kaynağı ile çeşitli parametrelerle birleştirilmesi sonucunda en iyi sonucu 110 A akım, 60 derecelik eğim açısı ve 0.7 l/dk. gaz akış hızı kullanıldığında 575 MPa maksimum çekme gerilmesi ile elde etmişlerdir (Balaji vd., 2012). Gadewar vd. (2010) SS 304 çeliğini kaynak akımı, gaz akışı ve iş parçası kalınlığı gibi proses parametrelerine göre TİG kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirildiğini bildirmişlerdir. Juang ve Tarng çalışmalarında paslanmaz çeliğin TİG kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin kaynak havuzunun geometrisini optimize etmek için istatistiksel analiz de kullanarak proses seçimini gerçekleştirmişlerdir (Juang ve Tarng, 2002). Yingsamphancharoen vd. ASTM A106 Grade B kaynaklı boruların kaynak akımına göre mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri incelenmişlerdir (Yingsamphancharoen vd., 2016). Abdul Khadeer vd. (2020) ASTM A106 Grade B (karbon çeliği) borular ve sıcak haddelenmiş AISI 4140 malzemelerinin sürtünme kaynağı performansını araştırmışlardır. Malzeme tasarrufu ve maliyet düşürme ihtiyacı iki farklı çelik malzeme arasındaki bağlantıların gerekli olduğu alanlarda kaynak işlemini zorunlu kılmıştır. Paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık ve aşındırıcı etkilere maruz bölgelerde kullanılırken, düşük sıcaklıklarda düşük karbonlu çelik kullanılarak hibrit kaynak yöntemleri de uygulanmaktadır (Chen vd., 2019).

Bu çalışma kapsamında rafinerilerde, yüksek basınç altında çalışan SPG hatlarında TİG kaynak yönteminde farklı parametreler kullanılarak yapılan birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Söz konusu birleştirilen hatlarda SS 316L paslanmaz çelik ve ASTM A106 Grade B düşük karbonlu çelik malzemeler kullanılmaktadır. Bu hatların güvenli bağlantısının yapılması; uygun olmayan parametrelerle kaynak uygulanması nedeniyle meydana gelebilecek endüstriyel kazalara karşı önleyici faaliyet olarak bir yönüyle başta can güvenliği olmak üzere çevre ve mal güvenliği açısından, diğer yönüyle de üretim sürecinin aksamaması bakımından önemlidir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Malzeme

Rafinerilerde kullanılan SPG hatlarının bağlı olduğu fırın giriş-çıkış bağlantılarında A106 Grade B dikişsiz çelik boru ile SS 316L paslanmaz çelik malzemeler birleştirilerek kullanılmıştır. Fırın içinde yüksek sıcaklık ve korozyona karşı dirençli, yüksek mukavemet ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip olmasından dolayı SS 316L paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Kullanılan malzemelere ait cidar kalınlığı 6,02 mm, anma ölçüsü 101,6 mm (4") olan yüksek sıcaklık hizmetinde kullanılan ana malzemelere ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de, mekanik özellikler ise Tablo 2'de görülmektedir.

Kaynaklı birleştirme işlemleri 1 kök paso, 1 sıcak paso, 2 dolgu pasosu ve son olarak 2 kapak pasosu olmak üzere

toplamda 6 pasoda, tamamı saha uygulamalarında yapıldığı gibi el ile yapılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda akım ve ısı girişinin çok hassas kontrolünün sağlandığı, cüruf oluşturmayan ve paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde yaygın kullanılan TİG kaynak yöntemi seçilmiştir. TİG kaynağı 25-225 A değerleri arasında akım verebilen Redresör tipi CEMONT

marka T 301 model TİG kaynak makinesi ile DC (-) akım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TİG kaynak yönteminde %99,9 saflıkta Argon gazı kullanılmıştır. Kaynak işlemlerinin tamamı ASME/AWS SFA/5.4 ve ASME/AWS SFA/5.11 standart sınıflandırmaya uygun olarak kimyasal bileşimi Tablo 3’de verilen 309 kodlu dolgu teli ile yapılmıştır.

Tablo 1. SS 316L ve ASTM A106 Grade B ana malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar (%)

Malzeme	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Al	Zn	S	P
SS 316L	Bal (69,33)	16,37	9,84	2,07	1,63	0,30	0,23	0,13	0,09	0,01	-	-	-
A106 Grade B	Bal (96,67)	0,09	0,03	-	0,44	1,53	0,15	0,23	-	-	0,55	0,23	0,08

Tablo 2. SS 316 L ve ASTM A106 Grade B ana malzemeye ait mekanik özellikler (Abdul Khadeer vd, 2020; Anonymous, 2024. Material Property Data. Metal & Alloy Comp)

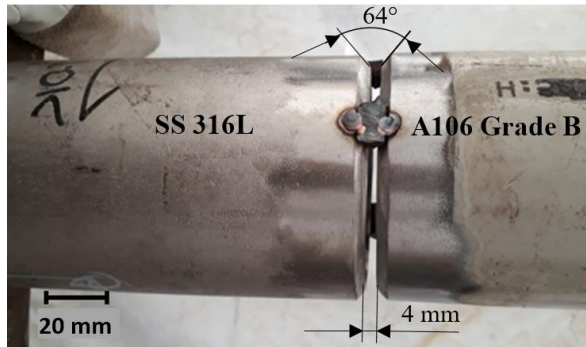
Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV)
SS 316L	8	205	515	40-60	193	150-200
A106 Grade B	7,85	240	415	20-30	190	150-180

Tablo 3. TİG kaynağı dolgu teli kimyasal bileşimi (%)

Malzeme	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Zn	Sn	Co	Cu
309	60,71	22,75	18,33	1,51	0,77	0,15	0,12	0,09	0,06

2.2. Kaynak Prosesi

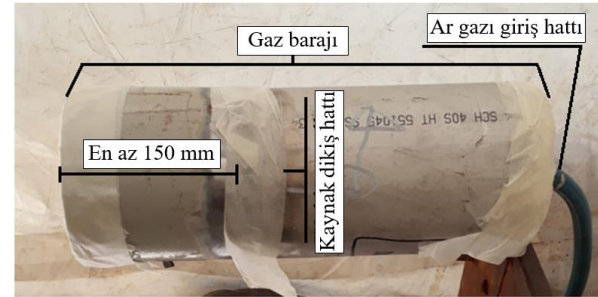
Numunelere endüstride kullanılan kaynak tekniğine uygun olarak 32° açılı kaynak ağız açma işleminden sonra, yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynakta önce birleştirilecek parçaların arası malzeme kalınlığı ve kaynak ağız geometrileri gibi parametrelere bağlı olarak ASME B31.3-2016 standart direktifi doğrultusunda 4 mm boşluk olacak şekilde bırakılarak tek tarafından kısa punta kaynağı ile numuneler sabitlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kaynak ağızı açılmış numuneler, 4 mm boşluklu puntalanan numuneler.

TİG kaynak işlemlerinde her iki boru içindeki oksijeni Ar yardımı ile uzaklaştırmak amacıyla boru içinde suda eriyen kâğıt bant yardımı ile baraj kurulmuştur (Şekil 2). Baraj, endüstriyel uygulamalara uygun olarak kaynak ağzından 150 mm geride konumlandırılmıştır. Kök ve sıcak paso sonrasında Ar gazı kapatılmış ve 4 paso daha

kaynak işlemi yapılarak kaynak tamamlanmıştır.

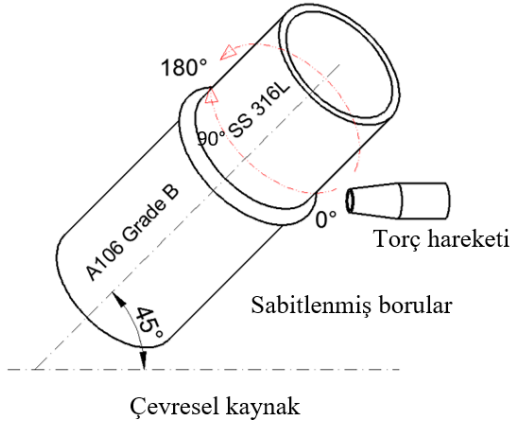


Şekil 2. Kök paso için gaz barajı.

Tüm deneylerin rafineri sahasındaki uygulamada yapılanlarla eş özellikte olmasına önem gösterilmiştir. Kaynaklar ASME standardına uygun olarak Şekil 3’ te şematik olarak gösterilen ASME 6G (EN J L045- Down / H L045 Up) kaynak pozisyonunda yapılmıştır. Kaynak işlemleri; Şekil 3 de “0°” ile gösterilen boru alt kısmından yukarı yönlü 180° boyunca (saatin dönüş yönünde) yapılmış, geri kalan 180°’lik kısım için “0°” noktasından tekrar başlanarak (saatin dönüş yönünün tersine) tamamlanmıştır. Her pasoda numune kaburga kısmı olarak adlandırılan (90° noktasında) kaynak akım değerleri Tablo 4’ de verilen değerlerde artırılmıştır. Birleştirme işlemleri, Tablo 4’de verilen parametreler dâhilinde; 6G kaynak pozisyonunda tamamlanmıştır. Kaynak işlemleri 0,12 lt/dk. gaz basıncı ile 55-170 A aralığında yapılmıştır.

Kaynak işlemleri toplamda 6 paso olarak

tamamlanmıştır. Kapak pasosu (5. ve 6. Paso) iki sıra olarak çekilmiştir. Kapak paso genişlikleri tel çapı olan 2,4 mm' nin yaklaşık 3 katıdır. Kapak pasosu olarak çekilen ikinci bindirme pasosu kapak pasosunu yaklaşık %50 üzerinde olacak şekilde tamamlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. 6G kaynak pozisyonu.

Tablo 4. Kaynak parametreleri

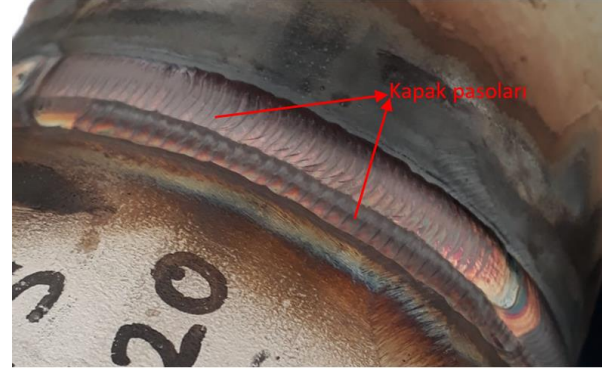
No	AKIM (A)				Akım Tipi	Gaz Basıncı (l/dk.)
	Kök (I. Paso)	Sıcak (II. Paso)	Dolgu (III-IV. Paso)	Kapak (V-VI. Paso)		
S1	55	100	115	120	DC (-)	0,12
S2	60	105	120	125		
S3	70	115	130	135		
S4	75	120	135	140		
S5	80	140	155	160		
S6	90	150	165	170		

2.3. Test İşlemleri

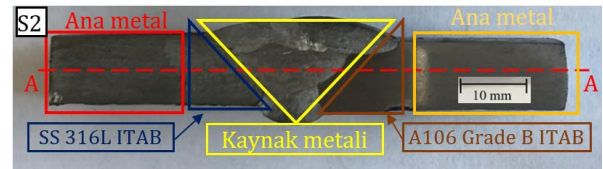
2.3.1. Mikroyapı incelemeleri

Kaynaklı bağlantıların bütünlüğünü ve yüzey kusurlarını tespit etmek amacıyla her bir numuneye gözle muayene yapılmıştır. Numuneler üzerindeki çatlaklar, gözenekler, erime hataları ve sıçrama gibi yüzeyel kusurlar belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri ve mikrosertlik ölçümlerinde kullanılmak üzere metalografi numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinden Şekil 5'de görüldüğü gibi 50x20 mm ölçülerinde kesitler alınmıştır. Standart yöntemlerle 200-1200 mesh aralığındaki zımpara daha sonra sırasıyla 3 µm ve 1 µm elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Malzemelerin mikroyapı görüntüsünün ortaya çıkarılması için ASTM A106 Grade B tarafı %2 nital (susuz metanol içinde nitrik asit) (Clover vd., 2005) ile SS 316L tarafı ise 10 ml HNO₃, 20 ml HCl ve 30 ml su (Morsiya vd., 2021) kullanılarak hazırlanan çözelti kullanılmıştır. 12V gerilim altında 2A akım şiddetinde 15 s süre ile elektrolitik dağlama işlemi yapılmıştır. Şekil 5'de hazırlanan S2 nolu mikroyapı numunesi gösterilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntüleri TESCAN Mira 3 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazından elde edilmiştir.



Şekil 4. Kapak pasoları.



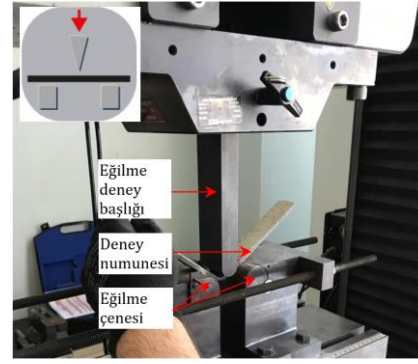
Şekil 5. S3 nolu mikroyapı inceleme numunesi.

Her bir numunede ana malzeme, ısıdan etkilenen bölge ve kaynak metalı arasında sertlik farklarını belirlemek için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde; mikroyapı tespit süreci ile kaynak işlemi sırasında oluşan mikroyapısal değişiklikler, özellikle kaynak bölgesinde oluşabilecek kırılma fazların tespiti ve çatlak oluşumunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri INSTRON WOLPERT marka cihaz ile HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri konik elmas uç ile 1 kg yük uygulanarak elde edilmiştir. Sertlik değerleri Şekil 5'te gösterilen kaynak metalı, ITAB ve ana metalı temsil edecek şekilde sertlik ölçüm hattı olarak verilen numune yatay eksenı boyunca kaynak metalı simetri eksenine dik yönde (A-A eksenı boyunca) alınmıştır. Her bir ölçüm 1 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

2.3.2. Mekanik testler

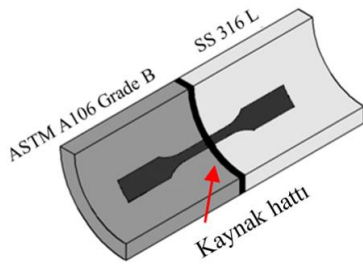
Her bir numune için eğme testleri uygulanmıştır. Numunelerin plastik davranışları eğme deneyi ile tespit

edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan eğme deney numuneleri ise ASME SEC IX:2019 standartlarına uygun, soğutma sıvısı kullanılarak freze tezgâhında hazırlanmıştır. Eğme testleri 16,18x150 mm ölçülerindeki numuneler ile Instron MFL SYSTEM 989 L3619 model cihaz kullanılarak 1 mm/dk. ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Mandrelin temas noktası kaynağın ortasına gelecek şekilde hizalanarak eğme deney cihazına yerleştirilmiştir. Kapak ve kök pasolarını değerlendirebilmek için eğme işlemleri birbirine zıt yönde gerçekleştirilmiştir. Kapak ve kök olmak üzere iki farklı yönde eğme deneyi yapılmıştır. Kapak deneyinde baskı uygulayan mandrel kök kaynağına temas ederken en yüksek çekme gerilmesi kapak kaynağında meydana gelecek şekilde deneyler düzenlenmiştir (Şekil 6). Numunelerden birisine kapak pasosu maksimum çekme, kök pasosu maksimum basma olacak şekilde diğerine ise kapak pasosu maksimum basma, kök pasosu maksimum çekme olacak şekilde kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 6. Kök paso eğme testinin uygulanması.

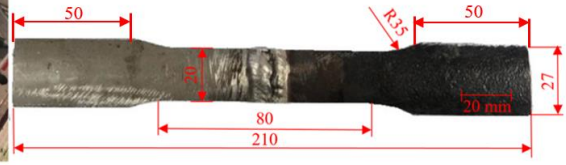
Çekme testleri ASME SEC IX:2019 standardına uygun hazırlanan numuneler WEW1000D Model universal test cihazında 3 MPa/dk. ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.a'da çekme test numunesinin şematik görünümü, Şekil 7.b'de kaynaklı birleştirilmiş borulardan çekme numunelerinin merkezi kaynak metalinin merkezine gelecek şekilde kesme işlemleri tamamlanmıştır. Şekil 7.c'de ise elde edilen numune gösterilmiştir.



(a)



(b)



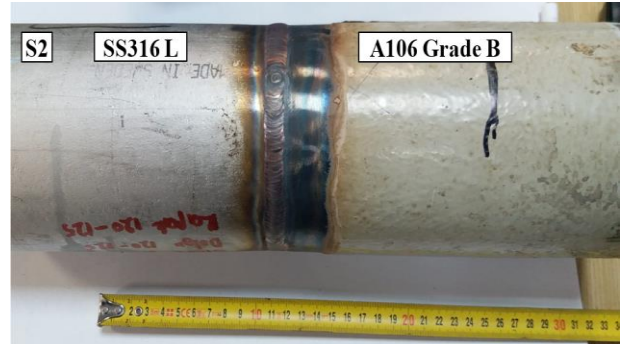
(c)

Şekil 7. Deney numunelerinin hazırlanması (a) Şematik (b) İşleme (c) Çekme deney numunesi.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Makro Değerlendirme

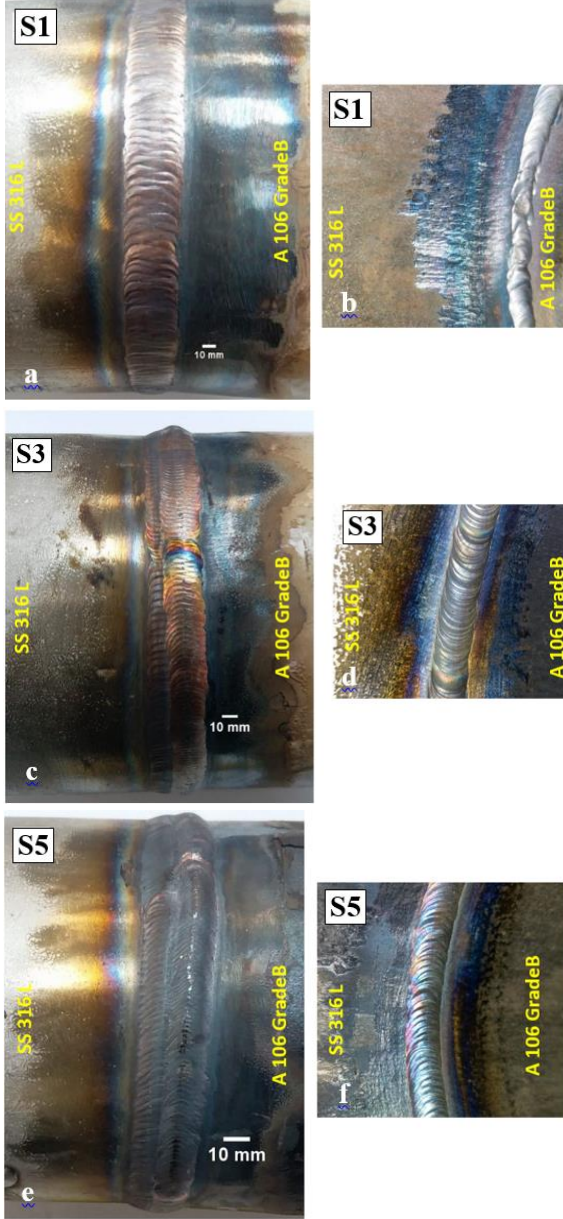
Boru şeklindeki iki malzemenin kaynatılması ile elde edilen S2 nolu numuneye ait makro fotoğraf Şekil 8'de gösterilmiştir. Ana metalin iç ve dış yüzeyinde kaynak penetrasyonu sağlandığı görülmüştür. Bu nedenle yeterli kaynak mukavemetinin elde edilebileceği düşünülmüştür. Yeterli penetrasyon kaynak havuzunun geometrisinin daha iyi kalitede kaynak karakteristiğine sahip olmasını sağlamıştır (Juang ve Tarng, 2002). Gözle yapılan kontrollerde numunelerin tamamında herhangi bir çatlak olmadığı görülmüştür. Numuneler incelendiğinde cüruf, yanma oluğu ve sıçrama gibi kaynak hataları görülmemiştir.



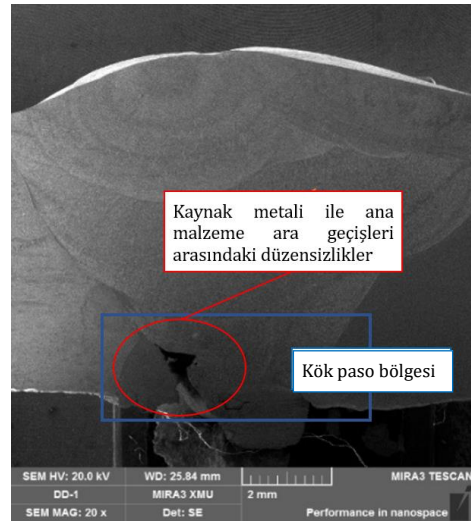
Şekil 8. S2 nolu numune makro fotoğrafı.

Şekil 9'da S1, S3 ve S5 nolu numunelere ait fotoğraflarda kaynak pasoları ve kök pasoları birlikte gösterilmiştir. Diğer numunelere göre düşük akım ile birleştirilen S1 nolu numune yetersiz nüfuziyet ve kök paso kaynaklı çentik etkisi oluşturabilecek şekilde düzensizlikler olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9.b). Bu durum artan kaynak akımı ile tamamen ortadan kalkmıştır. Diğer numunelerde kök pasonun çok daha düzenli bir forma kavuştuğu tespit edilmiştir (Şekil 9.d, f). Nüfuziyetin daha detaylı incelenmesi amacı ile tüm

numunelerde farklı bölgelerden kesitler alınmıştır. Diğer numunelere göre nispeten daha düşük akım ile birleştirilen S1 ve S2 nolu numunelerinden S1 no'lu numuneye ait SEM görüntüsü incelendiğinde Şekil 10'da işaretlendiği gibi nüfuziyetin yetersiz olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Bu durum düşük akım nedeni ile yeterli ergimenin sağlanamamasından kaynaklanmıştır.



Şekil 9. Numunelere ait kaynak dikişleri kapak pasoları (a, c, e), kök pasoları (b, d, f).



Şekil 10. Nüfuziyetin yetersiz olduğu bölgeler (S1 nolu numune kesiti).

3.2. Mikroyapı İncelemeleri

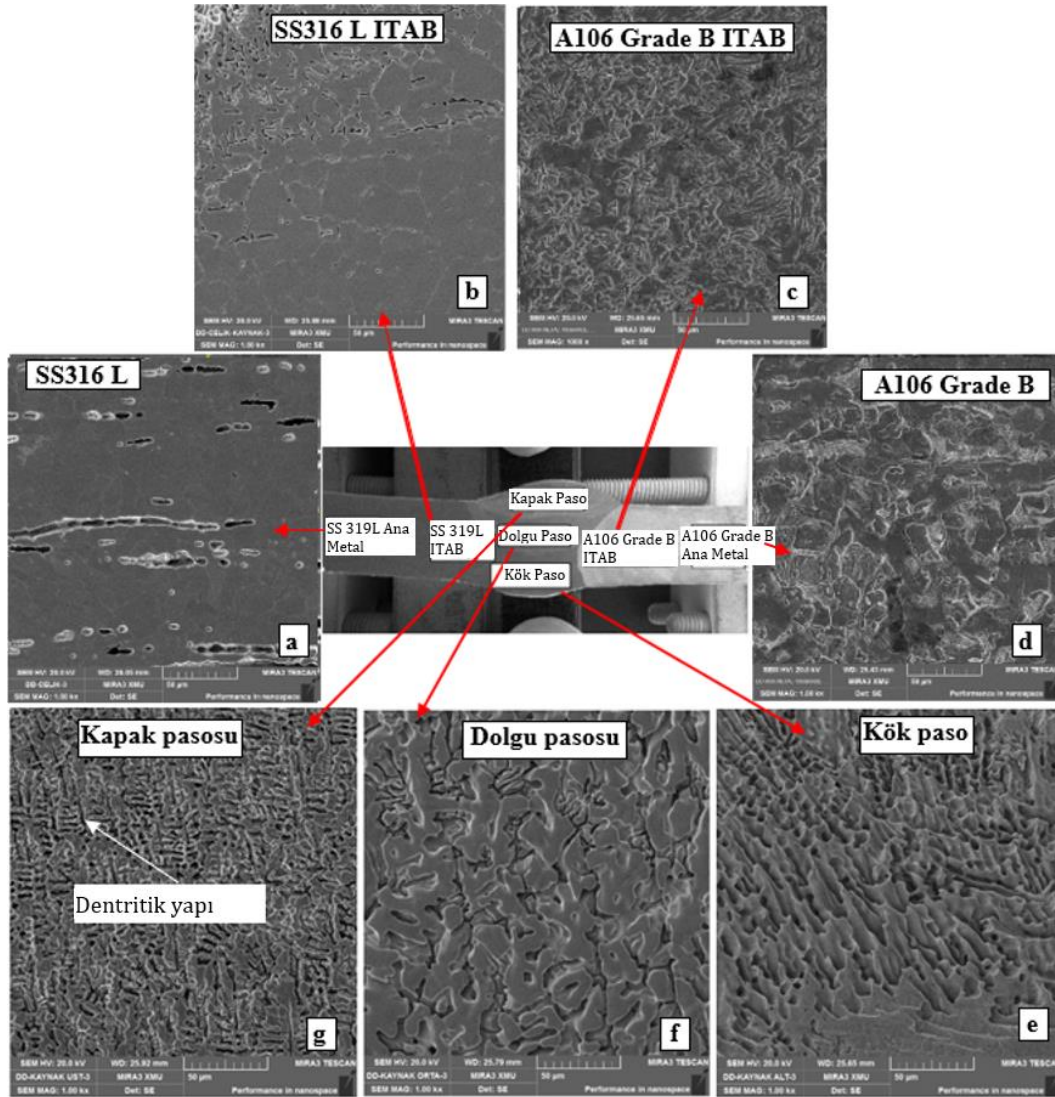
TİG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş S5 nolu numunede SS 316L paslanmaz çelik ile A106 Grade B karbon çeliği arasındaki mikroyapı farklılıklarını ve kaynak bölgesindeki morfolojik özellikleri gösteren SEM görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. SS 316L homojen fazda bir yapıya sahip olan ana metalin (Şekil 11.a) ITAB bölgesinde de homojen bir yapıda olduğu görülmektedir. Çatlak, boşluk ve gözenek gibi yapısal kusurlara rastlanmamıştır. ITAB'de tanelerin genel olarak daha ince olduğu tespit edilmiştir (Şekil 11.b). Ana malzeme üzerinde görülen karbür çökeltileri veya sigma fazına benzer yapıların ITAB bölgesinde ana malzemeye oranla daha küçük ve daha az sayıda olduğu görülmüştür. A106 Grade B ferritik-perlitik bir mikroyapıya sahip olup (Şekil 11.d) ITAB bölgesinde ferritik ve perlitik yapıların tamamen iç içe geçerek daha homojen ve çok daha ince taneli bir yapı oluşturduğu ve ferrit fazının ana metale oranla ısı etkisi sonucunda genişlediği görülmektedir (Şekil 11.c).

Kaynak metali, SS 316L çeliği ve A106 Grade B ile dolgu metalinden gelen elementlerin karışımıyla oluşmuş bir yapıdır. Kök, dolgu ve kapak pasolarının tamamen homojen yapılarda oldukları görülmüştür (Şekil 11.g, f, e). Kök pasodaki gözenekli yapı dolgu pasosunda daha homojen ve iri tanelere bırakırken kapak pasolarında soğuma hızına bağlı olarak dendritik bir katılaşma yapısı tespit edilmiştir. Dendrit büyümesi, katılaşma sırasındaki termal gradyan ve element difüzyonuna bağlı olarak yönelmiştir. Erime bölgesinde daha yüksek bir soğutma hızı, martenzitik yapıların oluşumunu teşvik edecektir. Bu nedenle kapak pasosundaki soğuma hızının yüksek olması dendritik yapının yoğunluğunun temel sebebi olmuştur. Xu vd. (2017) mikroyapının kaynaklarda gelişen soğuma hızları ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir. Şekil 11'de kaynak banyosu ve ITAB'taki soğuma hızları arasındaki farklılık ve kimyasal bileşimleri arasındaki farklılıklar mikroyapının tamamen birbirinden farklı olmasına neden olmuştur.

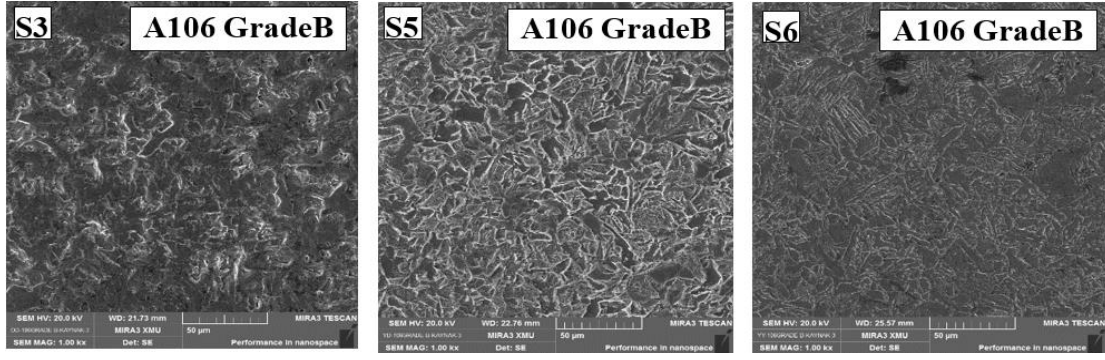
Çekme test sonuçlarına göre birleştirilen numunelerin A

106 Grade B malzemesi tarafından hasara uğradığı görülmüştür. Bu nedenle birleştirmelerin bu kısmının kritik olduğu değerlendirilmiştir. Şekil 12’de S3, S5 ve S6 nolu numunelere ait A106 Grade B ana malzeme ITAB tarafından alınan SEM fotoğrafları verilmiştir. Numunelerin kendi içinde her birinin homojen mikro yapıya sahip olduğu görülmektedir. Değişen akım değerlerine bağlı olarak her numunenin kaynak bölgesinde ve ITAB’da oluşan yapısal farklılıklar net olarak görülmektedir. Kaynak akımının artması ile birlikte tanelerin ITAB bölgesinde daha ince bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni; akım arttıkça daha büyük bir ergiyik havuzu oluşmuş ve sıvı fazın hacmi de artmıştır. Her bir numunede sıvı faz hacminin farklı olması nedeni ile katılaşma davranışı farklılık göstermektedir. Akım arttıkça termal gradyan artmış ve katılaşma hızı değişmiştir. Buna bağlı olarak daha ince taneli bir yapı meydana geldiği düşünülmektedir. Şekil 13’te S2 ve S6 nolu numunelerde A106 Grade B

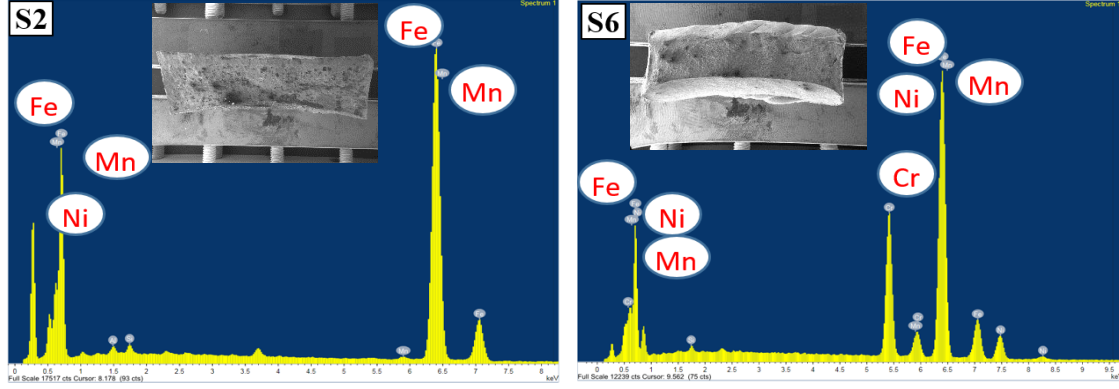
tarafında ait kaynak banyosuna yakın ITAB’tan alınan EDX analiz sonuçları verilmiştir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin mikro yapının oluşumu ve kaynaklardaki kimyasal bileşimin dağılımı ile belirlendiği bilinmektedir. Bununla birlikte kaynak metali içindeki faz dağılımı ve tane yapısı, dolgu malzemesinin bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Akım değeri ile birlikte artan sıcaklık değerleri difüzyon miktarlarını değiştirmiştir. Artan akım değeri ile birlikte Cr difüzyonunun kaynak bölgesinde arttığı görülmektedir. Cr ve Ni konsantrasyonları artmış, dolgu telinin alaşım elementleri kaynak bölgesine daha iyi geçtiği tespit edilmiştir. Wu vd. (2015) eriyik havuzlarında gelişen termal gradyanlar tarafından belirlenen difüzyon proseslerinin kaynaklar arasında farklı derecelerde makro ayrışmaya neden olacağını bildirmiştir. Genel olarak, kaynaklarda gözlenen düşük Cr ve Ni element içeriği, martensitik ve lathy ferrit yapıların oluşumunu arttırmaktadır.



Şekil 11. S1 nolu numune kaynak bölgesi SEM görüntüleri.



Şekil 12. S3, S5 ve S6 nolu numunelere ait A 106 Grade B malzeme ITAB SEM görüntüleri.



Şekil 13. S2 ve S6 nolu numunelere ait A106 Grade B malzemesi kırık yüzey EDX analizi.

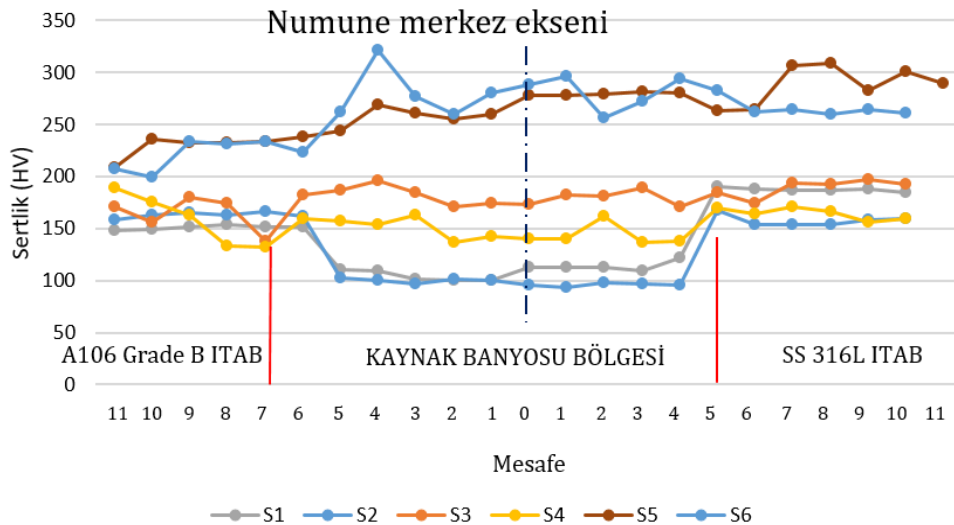
3.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin kaynak bölgelerinden (Şekil 5, A-A ekseninden) elde edilen sertlik değerleri Şekil 14'te görülmektedir. Şekil 14 incelendiğinde, S6 nolu numunenin en yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Kaynakta ısı girdisinin artmasına bağlı olarak sertlikteki artış belirgin olarak görülmektedir. Bu durum diğer numunelere göre daha iyi ergime ve alaşım elementlerinin difüzyonun daha iyi olması sonucu oluşan mikroyapıdan kaynaklanmaktadır (Şekil 12, 13).

Özellikle S3, S4, S5 ve S6 nolu numunelerde kaynaklı numunelerden yapılan ölçümlerde ITAB'ın dışına çıktığında elde edilen sertlik değerlerinin orijinal

malzemelerden ölçülen sertlik değerleri ile yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.

Kaynak esnasında uygulanan ısı girdisi; ark gerilimi, ark akımı ve kaynak hızı tarafından belirlenmektedir (Gourd, 1995). Kaynak akımındaki artış ısı girdisinde artışa neden olmaktadır. Isı girdisi miktarı ise ITAB'ın genişlemesine neden olmaktadır. Nakata vd. (2002) TiG kaynağı ile paslanmaz çelik levhaları birleştirmişler ve kaynak tekniğinde düşük ısı girdisinin, ana malzemelerin gerilme bölgelerinin ve ITAB'ın azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 14'te görüldüğü gibi artan ısı girdisine bağlı olarak S5 ve S6 nolu numunelerde ITAB'ın daha geniş olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 14. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.

3.4. Eğme Test Sonuçları

180°'lik eğme testleri sonucunda tüm numunelerin birleşme bölgelerinde kaynak detayında görüldüğü gibi herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Şekil 15'de eğme deneyi uygulanmış S1, S2, S3 ve S5 nolu numuneler için kapak, S1, S2, S4 ve S6 nolu numuneler için kök pasolar gözükmemektedir. Farklı parametrelerle yapılmış kaynakların tamamının eğme testinde başarılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 15. Eğme testi tamamlanan numuneler.

3.5. Çekme Test Sonuçları

Çekme deney sonucu hasara uğrayan numunelere ait makro fotoğraflar Şekil 16'da verilmiştir. Numunelerin tamamında hasar A106 Grade B tarafında meydana gelmiştir. Hasarın oluştuğu bölgeler ITAB üzerindedir.

Test sonuçlarına göre elde edilen çekme dayanımı değerleri Şekil 17'de verilmiştir. Tüm numunelerde elde edilen çekme değerlerinin ana malzeme A 106 Grade B'den daha yüksek olduğu görülmektedir.

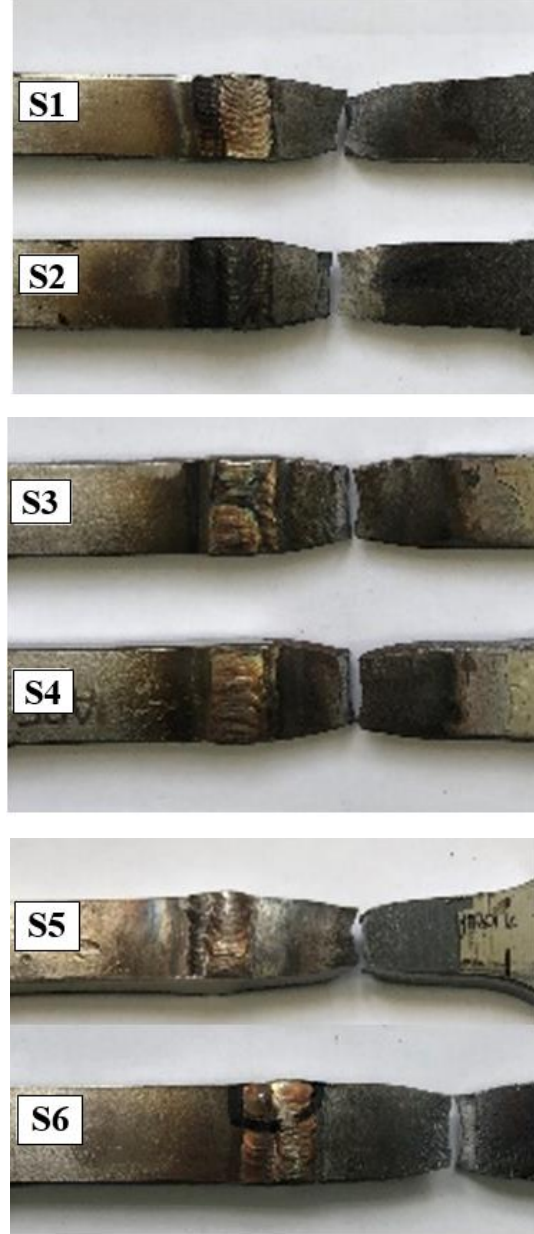
S1 ve S2 nolu numunelerde ana malzeme mekanik özelliklerine çok yakın değerler elde edilmiş olsa da artan sıcaklığa bağlı olarak daha ince taneli bir yapı elde edilmiş (Şekil 11) ve mekanik özellikler net bir şekilde artmıştır. Ancak S1 ve S2 nolu numunelerde mekanik özelliklerinin zayıf olmasının yeterli ergimenin sağlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 10).

S6 nolu en yüksek akım değeri kullanılarak birleştirilen numune olup en yüksek mekanik özelliklere sahip numunedir. S6 nolu numunede erime ve nufuziyet daha yüksek olması bu sonucun temel nedenleri arasındadır.

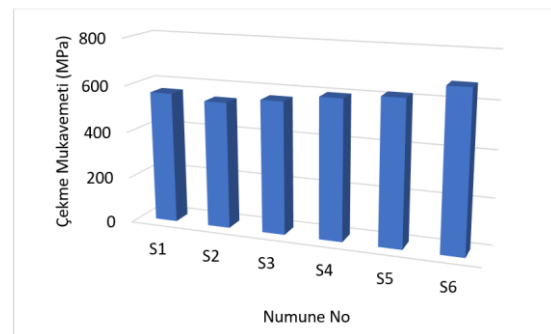
TİG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülen % uzama ve % kesit daralmalarının ana malzemelerdeki değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, kaynak esnasında malzemelere uygulanan ısı girdisidir. Isı miktarının değişiminden dolayı her bir numunede farklı değerler elde edilmiştir. % uzama değerleri ısı girdisine bağlı olarak S1, S2, S3 ve S4 nolu numunelerde yaklaşık aynı değerlerde iken S5 ve S6 nolu numunelerde artan ısı değeri ile birlikte artmıştır. Bu durum Şekil 12'de görülen her bir numunenin kaynak bölgesi ve ITAB da ki mikroyapısal farklılıkları nedeni ile ortaya çıkmıştır ve her bir bağlantının mekanik özelliklerinin farklı olmasının temel nedeni olmuştur.

Şekil 18'de üç farklı numunenin çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Numunelerde düzensiz kırılma hatları ve farklı çatlak oluşum bölgeleri gözlemlenmektedir. S1 ve S5

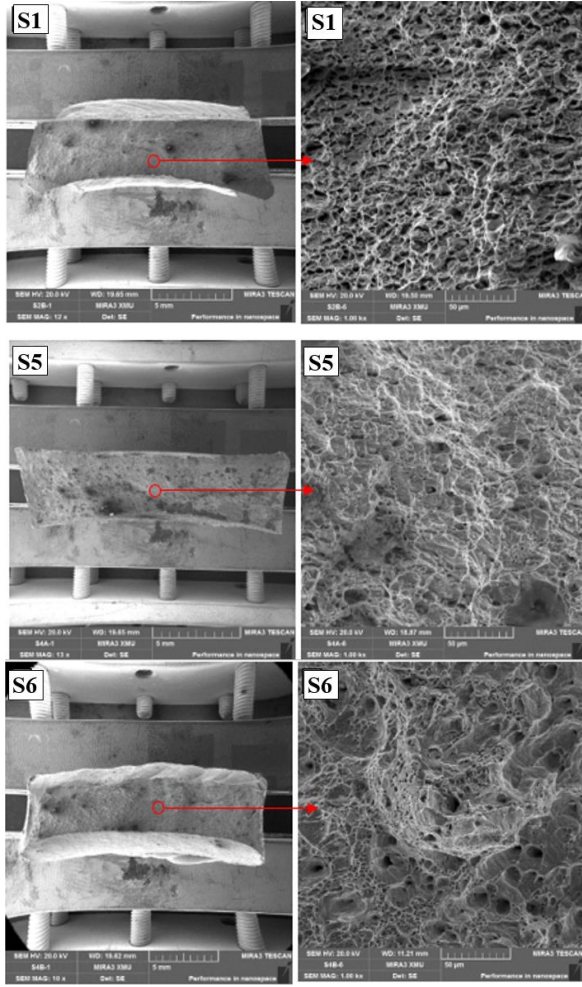
numunelerinde bazı bölgelerde gevrek kırılma (ani kopma) izlerine işaret eden düzlemsel çatlak propagasyonları gözlemlenmiştir. S6 numunesinde ise boyun vererek sünek bir formda kopmanın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 16. Kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.



Şekil 17. Çekme deney sonuçları.



Şekil 18. S1, S5 ve S6 nolu numunelere ait SEM görüntüleri.

4. Sonuçlar

Yüksek basınçlı sıcak proses geçiş hatlarında bağlantı mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan TIG kaynak uygulamaları sonucunda, yüksek basınçlı SPG hatlarında istenilen dayanım elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar;

Kaynak akımının S1 nolu numunede olduğu gibi düşük seçilmesi durumunda; kaynak formunun istenilen biçimde olmadığı ve nüfuziyetin yetersiz olduğu görülmüştür. Bu durumun mekanik özelliklerin diğer numunelere kıyasla daha düşük olmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

ITAB bölgesinde A106 Grade B malzeme mikroyapısında meydana gelen tane küçülmesi mekanik özelliklerin artmasını sağlamıştır.

En yüksek mekanik özellikler S6 nolu numune ile 678 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer ana malzeme çekme mukavemetinin üzerindedir. Bu durum yüksek ısı girdisi nedeni ile oluşan mikroyapı değişimi, element geçişleri ve erimenin yeterli olması sonucunda ortaya çıkmıştır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.M.	A.K.
K	60	40
T	900	10
Y	20	800
VTI	60	40
VAY	90	10
KT	50	50
YZ	60	40
KI	70	30
GR	50	50
PY	60	40
FA	30	70

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Teşekkür

Yazarlar Tuv Austria Sıla Kalite Kontrol Muayene Gözetim ve Denetim Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti, Tahribatlı Test Laboratuvarına test süreçlerinin tamamı için verdikleri destek ve sonsuz hoşgörülerini için teşekkür eder.

Kaynaklar

- Abdul Khadeer SK, Kumar BR, Kumar AS. 2020. Evaluation of friction welded dissimilar pipe joints between AISI 4140 and ASTM A 106 Grade B steels used in deep exploration drilling. J Manuf Process, 56: 197-205.
- Althouse AD, Turnquist CH, Bowditch WA, Bowditch KE. 1992. Gas tungsten arc welding, modern welding, The Goodheart-Wilcox Company Inc, A.B.D., 327-328.
- Anonymous. 2024. Material property data. Metal & Alloy Comp. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2e483c6b9ffc4efda0dc0afdc63a09c8&ckck=1> (accessed date: 25 December 2024).
- Balaji C, Kumar SA, Sathish R. 2012. Evaluation of mechanical properties of SS316L weldments using tungsten inert gas welding. Int J Eng Sci Technol, 4(5): 2053.
- Brau JF, Morandin M, Berntsson T. 2013. Hydrogen for oil refining via biomass indirect steam gasification: energy and environmental targets. Clean Technol Environ Policy. 15(3): 501-512.
- Chen HC, Ng FL, Du Z. 2019. Hybrid laser-TIG welding of dissimilar ferrous steels: 10 mm thick low carbon steel to 304

- austenitic stainless steel. *J Man Process*, 47: 324-336.
- Clover D, Kinsella B, Pejic B, De Marco R. 2005. The influence of microstructure on the corrosion rate of various carbon steels. *J Appl Electrochem*, 35: 139-149.
- Doğan B. 2015. Process safety in oil refineries: Semi-quantitative Hazop in Vacuum Distillation Column Case. MSc thesis, Yıldırım Beyazıt University, Institute of Health Sciences, Occupational Health and Safety, Ankara, Türkiye pp: 15.
- Gadewar SP, Swaminadhan P, Harkare MG, Gawande SH. 2010, Experimental investigation of weld characteristics for a single pass TIG welding with SS304. *Int J Eng Sci Technol*, 2(8): 3676-3686.
- Gourd ML. 1995. Principles of welding technology. In: British Library Cataloguing in Publication Data, London, UK, pp: 30-32.
- Juang SC, Tarng YS. 2002. Process parameter selection for optimising the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel, *J Mater Process Technol*, 122(1): 33-37.
- Modenesi PJ, Apolinario ER, Pereira IM. 2000. TIG welding with single-component fluxes, *J Mater Process Technol*, 99: 260-265.
- Morsiya C, Sutaria M, Patel S. 2021. Influence of the heat treatment on the surface bioactivity of investment cast SS 316L. *Mater Today Proc*, 38: 2878-2884.
- Nakata K, Oishi M, Koshiishi M, Hashimoto T, Anzai H, Saito Y, Kono W. 2002. Re-Weldability of Neutron-Irradiated stainless steels studied by multi-pass TIG Welding, *J Nucl Mater*, 307-311: 1578-1583.
- Svensson E, Morandin M, Harvey S, Papadokonstantakis S. 2020. Studying the role of system aggregation in energy targeting: A case study of a swedish oil refinery. *Energies*, 13(4): 958
- Wu C S, Ushi M, Tanaka M. 1997. Analysis of the TIG welding arc behavior, *Comput Mater Sci*, 7(3): 308-314.
- Wu Y, Cai Y, Sun D, Zhu J, Wu Y. 2015. Microstructure and properties of high-power laser welding of SUS304 to SA553 for cryogenic applications. *J Mater Process Technol*, 225: 56-66.
- Xu H, Xu MJ, Yu C, Lu H, Wei X, Chen JM, Xu JJ. 2017. Effect of the microstructure in unmixed zone on corrosion behavior of 439 tube/308L tube-sheet welding joint. *J Mater Process Technol*, 240: 162-167.
- Yingsamphancharoen T, Srisuwan N, Rodchanarowan A. 2016. The electrochemical investigation of the corrosion rates of welded pipe ASTM A106 grade B. *Metals*, 6(9): 207.