



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanmasında dolgu metali türünün metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi

Determination of the effect of filler metal type on metallurgical and mechanical properties in welding of QStE 420 TM steel by MAG welding method

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa HARMAN¹, Hakan ADA², Cemil ÇETİNKAYA³

ORCID¹: 0000-0001-6045-0570

ORCID²: 0000-0002-0412-5789

ORCID³: 0000-0002-0298-1143

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Harman M., Ada H. ve Çetinkaya C., "QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanmasında dolgu metali türünün metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 23(2): 321-332, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.550032

QStE 420 TM Çeliğinin MAG Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanmasında Dolgu Metali Türünün Metalürjik ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa HARMAN¹, Hakan ADA^{2*}, Cemil ÇETİNKAYA³

¹Çankırı Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu, Türkiye

²Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.04.2019 ; Kabul/Accepted : 15.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada; savunma sanayi, otomotiv sanayi gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan ince taneli ve mikro alaşımlı yapıya sahip QStE 420 TM kalitesindeki çelik sac plaka malzeme, metal aktif gaz kaynağı yönteminde masif ve özlü tel kullanılarak ayrı ayrı birleştirilmiştir. Farklı dolgu tellerinin kaynak bölgesi (ana malzeme, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali) üzerinde oluşturduğu mekanik ve metalürjik etkiler; çekme, eğme, çentik - darbe, sertlik testleri ve makro grafik, mikro grafik muayeneler yapılarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda; seçilen kaynak parametrelerinin, kaynaklı birleştirmelerin kendinden beklenen mekanik ve metalürjik özellikleri sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: QStE 420 TM, MAG kaynağı, makro yapı, mikro yapı, özlü tel.

Determination of the Effect of Filler Metal Type on Metallurgical and Mechanical Properties in Welding of QStE 420 TM Steel by MAG Welding Method

ABSTRACT

In this study; QStE 420 TM steel sheet plate material with fine grained and micro alloy structure, which is widely used in sectors such as defense industry and automotive industry, has been welded separately by massive and fluxed cored filler wire in metal active gas welding method. The mechanical and metallurgical effects of different filler wires on the weld zone (main metal, heat affected zone and weld metal) were investigated by tensile, guided bend, notch impact, hardness measurement tests and macro graphic, micro graphic examinations. As a result of the tests performed; it was observed that the selected welding parameters provided the expected mechanical and metallurgical properties of welded joints.

Keywords: QStE 420 TM, MAG Welding, macrostructure, microstructure, cored wire.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek mekanik özellikler, plastik deformasyon kabiliyeti, hafiflik ve aynı zamanda kolay kaynaklanabilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle ince taneli yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (YMDA): mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece daha hafif ve daha güçlü konstrüksiyonlar üretilebilmektedir [1]. YMDA çeliklerinin, akma mukavemeti 360 N/mm²'den fazla olup, günümüzde ekonomik açıdan gittikçe yaygınlaşan bir kullanım alanı bulunmaktadır.

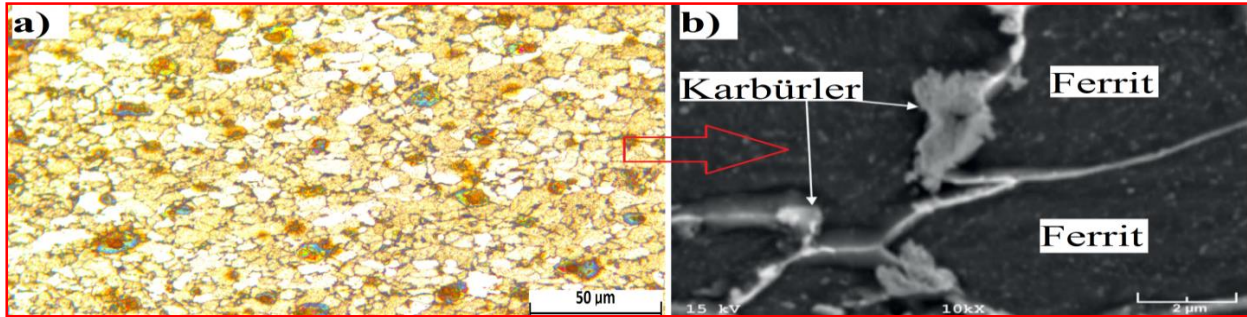
YMDA çelikleri geniş bir alanda özellikle yük taşıyıcı sistemlerde olmak üzere ince cidar kalınlığının verdiği hafiflik ve iyi şekil verilebilirlik özelliği ile konvansiyonel çeliklerin yerini almıştır. Özellikle otomobil sektöründe yaygın bir kullanım ağı olan bu çeliklere ait tipik uygulamalar; çekme kancaları,

endüstriyel silolar, araç koltuğu bileşenleri şeklindedir [2]. YMDA çelikleri savunma sanayi, taşımacılık ve gemicilik sektörü ile uluslararası boğaz köprüleri gibi önemli yapılarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. ABD'de yapı çeliklerinin dayanımının yetersizliği sebebiyle geliştirilen ve 70'li yıllardan sonra hız kazanan mikro alaşımlama çalışmaları ile geliştirilen YMDA çeliklerine; aşınmaya, korozyona, darbeye dayanıklılık gibi çok geniş özellikler kazandırılmıştır. YMDA çelikleri piyasada ve literatürde mikro alaşımlı çelikler (micro alloyed steel): yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA - high strength low alloys steel): Z StE çelikleri veya ZE çelikleri olarak da adlandırılmaktadır [3]. YMDA çelikleri standartlarda ve piyasada düşük mukavemetten yüksek mukavemete doğru 3 grup altında üretilmektedir. Bu gruplar; 1- Normalizasyon haddelemesi yapılmış çelikler (S420N, S460N): 2- Termo mekanik şekillendirilmiş çelikler (S420M, S460M): 3- Su verilmiş ve temperlenmiş (ıslah edilmiş) ince taneli yapı çelikleri (S460Q, S690Q, S960Q) şeklindedir [4].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: mustafa.harman18@gmail.com

QStE 420 TM çeliği YMDA çelik grubundan olup, içerdiği tane inceltici elementler (V, Ti, Nb) sayesinde, yüksek dayanıma sahip bir malzemedir [3]. Şekil 1.a'da QStE 420 TM çeliğinde tane içi ve tane sınırlarında çok küçük boyutlarda bulunan karbürler, nitrürler ve karbonitrürler 1100°C'ye kadar çözeltiyeye geçmeden azotu nitrür şeklinde tane sınırlarında bağlayarak, tane büyümesine engel olmak suretiyle mukavemeti yükseltip tok bir malzeme grubunun ortaya çıkmasını sağlarlar [5]. Yine YMDA çeliklerinde, yapı içerisinde oluşan mikro karbürler, tane sınırları veya tane içlerinde çökerek, heterojen çekirdeklenme yoluyla yeni faz ve tanelere sahip yapıları ortaya koyabilir [6]. Çeliklerde bulunma formlarına göre literatürde 5 sınıfa ayrılan karbürlerden (M_2C , M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, MC) bazıları temperleme sıcaklığında çözülürken, bazılarının ise östenitleme süresince bile çözülmeden kalabildiği görülmüştür [7].

Ayrıca bir başka YMDA çeliğinin (S315MC) Şekil 1.b'de verilen detaylı SEM fotoğrafında; tane sınırlarında mikro karbürlerle aşırı doymuş östenitin ferrite dönüşümü sonrası dışarı attığı fazla karbürlerin tane sınırlarında kümelenmesi (aglomerasyon) görülmektedir [2,8]. Tane sınırı karbürleri, topaklanmış (aglomerasyon) karbürler ve büyük noktasal karbürlerin maruz kaldığı östenitleme sıcaklığı ve zamanı arttıkça östenit içinde daha ince dağılımlı karbürler elde edilmekte ve bu karbürler hızlı soğumanın ardından östenitin dönüştüğü faz içinde çökelmektedirler. Östenitin içinde karbür çözünmesi maksimuma ulaştığında, çözünme durmakta ve bu sefer doymuş östenit içindeki fazla karbürler yüksek sıcaklıkta uzun bekleme süresi boyunca östenit tane sınırlarında biraraya gelerek kümelenmektedir [2,6,8,9].



Şekil 1. a) QStE420TM çeliği mikro yapısı, b) YMDA çeliği detaylı SEM fotoğrafı [2] (a) Micro structure of QStE 420 TM steel, b) Detailed SEM photograph of YMDA steel)

Termomekanik haddeme ile üretilen, yüksek mukavemetli ve ince taneli QStE 420 TM çeliğinde, kaynak sonrası yüksek mukavemet ve mekanik özelliklerin sürdürülebilir olması için teknik kuralların tümüne uyulması gerekmektedir [4]. QStE 420 TM çeliklerinden imal edilecek makine, konstrüksiyon, silah, araç ve teçhizat gibi ürünlerden gereken düzeyde mukavemet, uygun geometrik boyut ve toleranslarda olma, en az süreksizliklere sahip olma ve hafiflik gibi bir takım özellikler beklenmektedir. Günümüzde kaynak işlemlerinin hâlâ çoğunlukla elle veya ancak kısmen mekanize şekilde uygulanması nedeniyle ürünlerin kalitesi, diğer bir imalat yönteminde olmadığı kadar kaynakçıya ve onun maharetine bağlıdır. Bu maharetin devamlı olarak yapılan işin kalitesine yansıtılabilmesi gerekmektedir. Kaynakçıların yeterlilikleri zaman içerisinde ölçülmesine rağmen, her zaman sabit sonuçları elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden insan faktörünün minimum seviyeye indirilmesi zorunludur [10].

QStE 420 TM çeliğinin birleştirildiği imalat işlerinde genel olarak, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik özellikleri, kimyasal kompozisyonu ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (mukavemet ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulabilmesi, kaynak yöntem parametrelerinin doğruluğunun yöntem testleri ile doğrulanması, işletme açısından kaynakta sürdürülebilir kalite güvence sisteminin kurulabilmesi

için önemlidir. Böylece fire verilmeden konstrüksiyon veya üründe kaynağa bağlı olarak ortaya çıkan belirli hataların (yüksek ısı girdisi, çatlama, çarpılma, iç gerilme, vb.) önüne geçilebileceği gibi, aynı zamanda güvenilirlik sağlanarak, üretim hızı artırılmış olacaktır. Ayrıca kaynak akım şiddetinin yüksek tutulmasına bağlı gereksiz ısı girdisinin neden olduğu çarpılmalar, ana malzemede dayanım kayıpları ve gereğinden fazla metal yığılma oranı ile çalışma nedeniyle ürünün kullanılamaz duruma gelmesi, verimliliğin düşmesi ve maliyetlerin artması gibi olumsuzluklar da engellenmiş olacaktır.

YMDA çelikleri alanında günümüze kadar yapılan çalışmalarda ergitmeli ve ergitmesiz kaynak yöntemlerinde kaynaklı bölgeler üzerinde mekanik ve mikro yapısal incelemeler ile kaynaklanabilirliğin laboratuvar ortamında test edildiği kaynak termal çevrim simülatörleri (Smitweld, Gleeble, Thermorestor) [11,12] ile yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır.

YMDA çelikleri kaynağı alanında en çok tercih edilen MIG/MAG kaynağı elektrik ark kaynağına göre daha hızlıdır, dikiş kalitesi daha yüksektir, daha az kaynakçı becerisine ihtiyaç duyar, daha az maliyetlidir (seri imalatta daha az dolgu metali harcanması gibi); birim uzunluğa daha az ısı girdisi uygular [13]. Kaynakçının dikişin kalitesine etkisini ortadan kaldırarak, gaz altı kaynak yöntemiyle kaynak işlemi hızlanmıştır [14]. MIG/MAG yarı otomatik kaynak makinesinde bulunan iç ayar mekanizması sayesinde sabit gerilimde, tel sürme

hızı artırıldığında orantılı olarak akım şiddeti de artar [15]. Kaynakçı yalnızca kaynak hızını, kaynak doğrultusunu ve torcun pozisyonunu ayarlar [13].

Öztlü tel elektrotla ark kaynağını diğer kaynak yöntemlerinden ayıran özellik MIG/MAG yarı otomatik kaynak makinası ile uygulanıyor olması ve cüruf bileşenlerinin tel elektrot içinden kaynak bölgesine geçmesidir. Bu sayede açık arazide, hava cereyanı olan atölyelerde dahi gaz koruması olmadan da gaz altı kaynağı yapılabilmektedir [16]. YMDA çeliklerinin özellikle saha uygulamalarında (Boğaz köprüleri, raylı demir yolu inşaatları, yüksek konstrüksiyonlar v.b) öztlü telle kaynak uygulamaları büyük avantajlar sağlamaktadır [16]. MIG/MAG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında; yüksek kaynak hızları, öztlü tellerde yüksek metal transfer oranı, yüksek verim ve yüksek kaynak kalitesi vermektedir [15,17].

Bu çalışmada, hem literatüre katkı sunmak hem de bahsedilen eksiklikleri ortadan kaldırmak için, QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yönteminde farklı iki ilave

metalde ortaya çıkan metalürjik ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. MAG kaynak metodu kullanılarak, 8 mm parça kalınlığında masif ve öztlü ilave teller ile iki farklı ısı girdisi, koruyucu gaz ve paso sıralamasında yapılan kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve metalürjik özelliklerinin belirlenmesi için uluslararası standartlarca belirlenmiş kurallar referans alınmıştır. Kaynaklı birleştirmelerden elde edilen numuneler tahribatlı muayenelerden sonra elde edilen sonuçlar ile birlikte değerlendirilerek ilave metal türünün kaynak metaline ve ana malzemeye olan etkileri detaylı incelenmiştir [18].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada ince taneli yüksek mukavemetli termomekanik haddelenmiş QStE 420 TM yapı çeliğine birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan QStE 420 TM çeliğinin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. QStE 420 TM malzeme kimyasal analizi ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of QStE 420 TM material)

Kimyasal analiz								
Element (% Ağırlık değerleri)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	0,0659	0,0165	1,33	0,0167	0,0056	0,0403	0,0041	0,0334
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	0,0298	0,0112	0,0204	0,0392	0,0146	0,0052	<0,0050	0,0015
	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb	Se
	0,0109	<0,0010	0,0012	0,004	0,0006	0,0042	<0,0010	<0,0020
Ta	B	Zn	La	N	Fe	Te		
<0,0070	0,00087	0,0028	<0,00030	0,0056	98,3	<0,0010		
Mekanik özellikler								
Akma Mukavemeti (MPa)			Kopma Mukavemeti (MPa)		Minimum Toplam Uzama (%)		Darbe Enerjisi (0 °C) Ortalama (Joule)	
≥420			480-620		19		202	

QStE 420 TM malzemenin genel olarak savunma sanayi başta olmak üzere makine imalat sektörü ve MAG kaynağı uygulamalarında en çok tercih edilen 8 mm kesit kalınlık çalışmamızda tercih edilmiştir. Çizelge 1’de kimyasal analizi ve mekanik özellikleri verilen QStE 420 TM çeliği MAG kaynak yöntemiyle 1,2 mm tel çapında masif ve öztlü tel kullanılarak birleştirilmiştir. MAG kaynağında masif tel olarak MG 182 (AWS/ASME SFA-5.28 ER110S-G): öztlü tel olarak ise FCW 140 (AWS/ASME SFA-5.29 E81T1-Ni1C) ilave metal kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kullanılan MG 182 ve FCW 140 ilave telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Çizelge 2 ve 3’te sırasıyla verilmiştir. Üretici firmadan alınan tavsiyeler

[19,20] ve endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım şekilleri dikkate alındığında [21] kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik ve metalürjik özellikler elde edilebilmesi için, MAG kaynağında masif tel birleştirmesinde [22] M21 kodlu karışım gazı (%82 Ar, 18 CO₂): öztlü tel birleştirmesinde [23] ise C1 kodlu %100 CO₂ gazı kullanılmıştır. Ayrıca %100 CO₂ gazı ve karışım gazı (%82 Ar, 18 CO₂) kullanılarak yapılmış öztlü tele ait kaynaklı uygulamalar karşılaştırıldığında; %100 CO₂ gazının metal transfer oranını, kaynak kalitesini ve verimliliğini artırdığı görülmüştür [24]. Yukarıdaki nedenlere bağlı olarak bu çalışmada koruyucu gaz türü, kullanılan ilave metalin türüne (masif veya öztlü tel) göre değişmektedir.

Çizelge 2. AWS/ASME SFA-5.28. ER110S-G kodlu dolgu teli kimyasal analizi ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME FA.5.28. ER110S-G coded filler wire)

Kimyasal analiz						
Element (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	0,09	0,55	1,55	0,25	1,35	0,25
Mekanik özellikler						
Test Şekli	Koruyucu Gaz	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)	Çentik Darbe Dayanımı ISO-V (J)	
Kaynak Sonrası	M21	≥690	≥770	≥17	20°C → ≥100	-60°C → ≥47

Çizelge 3. AWS/ASME SFA-5.29. E81T1-Ni1C kodlu toz özlü dolgu teli kimyasal analiz ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME SFA-5.29. E81T1-Ni1C coded flux cored filler wire)

Kimyasal analiz					
Element (%)	C	Si	Mn	Ni	
	0,04	0,4	1,2	1	
Mekanik özellikler					
Test Şekli	Koruyucu Gaz	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)	Çentik Darbe Dayanımı ISO-V (J)
Kaynak sonrası	C1	≥500	600-680	20	-40°C → ≥50

2.2. Metod (Method)

DeneySEL çalışmalarında; birleştirme metodu olarak endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan MAG kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak işlemleri Makina ve Kimya Endüstrisi (MKE) fabrikalarında bulunan Gedik marka DP 500 model MIG/MAG kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir.

8 mm kalınlığındaki QStE 420 TM ana malzemeden üretilen plakalar 150 x 350 mm ebatlarında kesilerek kaynak işlemine hazırlanmıştır. Kaynak ağız hazırlığında kaynak kök yüksekliği ve geometrisi önem arz etmektedir. Kaynak ağız hazırlama esnasında mekanik metodlarla açılan kaynak ağızlarında kalan çapak veya keskin uç, köşe, kenar gibi yapıların alınması veya bunlara pah kırılması, radius çekilmesi gerekmektedir. Aksi halde bu yapılar kaynak ısısı altında ergimek yerine yanacak ve kaynak metalinden çıkamayan bu oksit kalıntıları kaynaktan beklenen mukavemeti almamıza engel olacağından [25] kaynak ağız hazırlığı Şekil 2.b'de

görülen ölçülere göre yapılmış ve kaynak işlemi esnasında endüstriyel fırçalar ve temizlik ekipmanları kullanılmıştır.

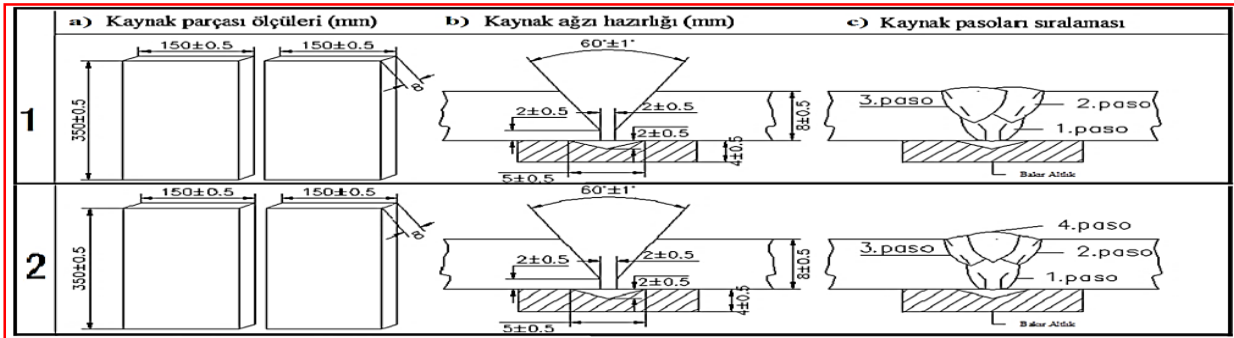
Kaynaklı birleştirme aşamasında; QStE 420 TM çeliği için TS EN 10025-6+A1 [26] standardına göre metalürjik özellikler ve SEW 088:1993 [27] standardında göre bilimsel veriler ile kaynaklanabilirlik tavsiyeleri referans alınmıştır. Kaynak esnasında TS EN ISO 15614-1 [28], kaynak prosedürü deneyi kuralları ile TS EN 9606-1 [29] kaynakçı yeterlilik sınavı kapsamında yapılan birleştirmelerde kaynak işlemi esnasında bir noktada kaynağa ara verilip tekrar devam edilmiştir. Çizelge 4'teki kaynak parametreleri EN ISO 14731'e [30] uygun şekilde hazırlanmış ve bu parametrelere göre kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parçası ölçüleri, kaynak ağız geometrisi ve paso sıralaması ise her bir kaynak metodu için ayrı ayrı Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 4. Deneylere göre kaynak parametreleri (Welding parameters according to the experiments)

Deney No	Paso no	Tel sür. hızı m/dk.	Akım şid. (Amp.)	Gerilim (Volt)	Kaynak hızı (mm/sn.)	Isı girdisi / kJ/mm	Ort. Isı girdisi / kJ/mm
1	1	5,1	177	24,5	4,48	0,78	0,66
	2	5,1	155	23,7	4,86	0,61	
	3	5,9	155	23,7	4,86	0,61	
2	1	7	175	27	3,95	1,08	0,84
	2	7	175	27	6,16	0,69	
	3	7	175	27	6,00	0,69	
	4	7	175	27	4,76	0,89	

Aynı çaptaki özlü telin masif tele oranla daha yüksek metal yığıma oranına sahip olduğu ve buna bağlı olarak daha yüksek tel sürme hızı, akım şiddeti gerektirdiği bilinmektedir [17]. Bu sebepten 2. deneyde 4 paso

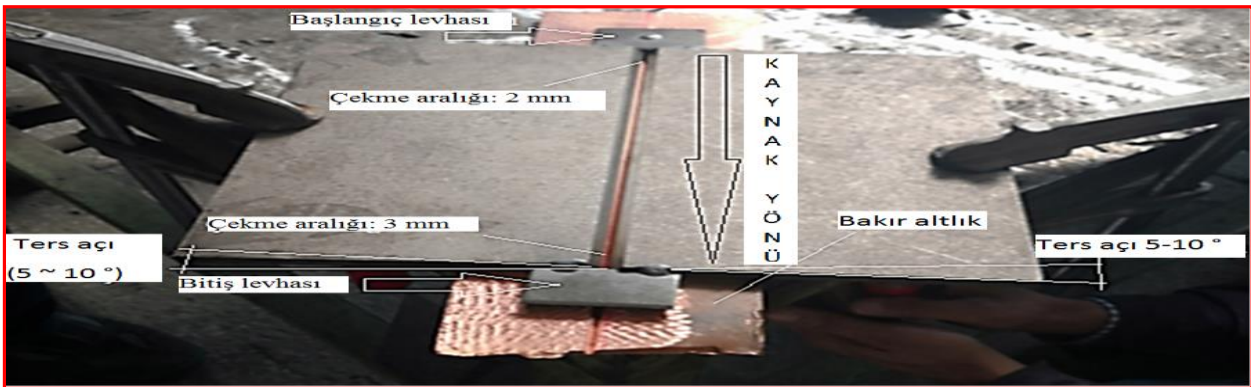
kaynak dikişi ile çizgisel paso tekniği korunarak birleştirme işlemi yapılmış ve buna bağlı olarak Çizelge 4'te görülen tel sürme hızı, akım şiddeti gibi parametreler 1. deneye göre farklılık göstermiştir.



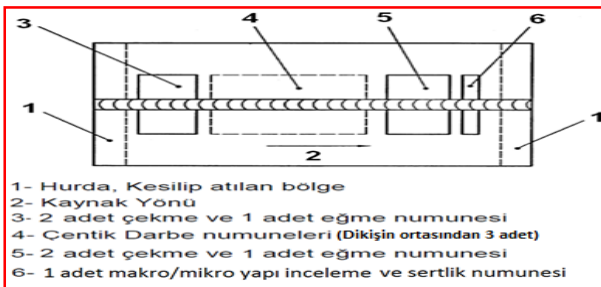
Şekil 2. a. Kaynak parçası ölçüleri, b. Ağız tasarımı, c. Pasoların sıralaması (a.Dimension of weld piece, b.Joint design c.Sequence of passes)

Test parçaları TS EN ISO 15614-1 [28] standardına göre 150 x 350 mm ölçülerinde, kaynak ağızında ısıdan etkilenmiş bölge oluşturmayan su jeti yönteminde kesildikten sonra talaşlı imalatta 30° kaynak ağızı ve Şekil 2.a ve b'de verilen ölçülere işlenmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde Şekil 2.c'de ki paso sıralamasına

uygun kaynak işlemine geçebilmek için, test plakaları işkenceler yardımıyla ve 4 mm kalınlıkta bakır altlıkla kök tarafı desteklenmiş biçimde Şekil 3'te gösterilen şekilde bağlanarak Çizelge 4'te belirlenen parametreler dâhilinde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Kaynak işlemi için hazırlanan test parçaları (Test parts prepared for welding process)



Şekil 4. Test numunelerinin plakadan çıkarılan yerleri (Test specimens removed from the plate) [28]

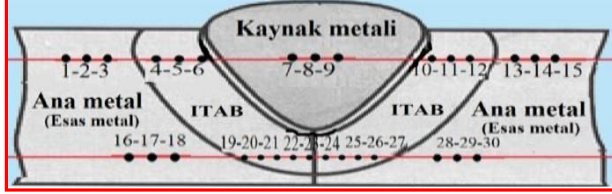
Kaynaklı birleştirmelerde minimum ön ısıtma sıcaklığı 100°C ve pasolararası maksimum sıcaklık 200°C olacak şekilde uygulanmıştır. QStE 420 TM kalite test parçalarının kaynak dikişinin birim uzunluğuna daha az ısı girdisi uygulaması için metal aktif gaz kaynağı (MAG) birleştirme metodu olarak tercih edilmiştir. Standartta uygun olarak test parçalarından Şekil 4'te gösterilen bölgelerden 4'er adet çekme numunesi, 3'er adet (2 set) çentik darbe numunesi, 2'şer adet eğme numunesi ve 1'er adet sertlik ve makro-mikro yapı inceleme numunesi olmak üzere 26 adet numune su jeti ile kesilerek çıkarılmıştır [28] [31].

Makro yapı, mikro yapı ve makrosertlik incelemeleri için numune hazırlama işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında, yapısal inceleme işlemleri ile makrosertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri ise MKE laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Birleştirmelerin makrosertlik davranışlarını kontrol etmek, makro ve mikro yapı analizlerini yapmak için metalografik test numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, TS EN ISO 17639 [32] standardı ve metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra ise sırayla 6, 3 ve 1 µm'lik keçe ve uygun solüsyonlar ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler % 5 Nital (5 ml HNO₃, 95 ml Etil alkol) çözeltisiyle dağlanmış. Dağlanan numunelerin makro - mikro yapı analizleri ve makrosertlik test işlemleri, Qness makro - makro sertlik ölçme ve makro yapı, mikro yapı görüntü alma cihazında gerçekleştirilmiştir.

Sertlik uygulamaları TS EN ISO 9015-2011 [33] standardına göre 10 kg'lık yük ile Vickers cinsinden ölçümlerle belirlenmiştir. Şekil 5'te şematik görüntüsü verilen bölgelerde kep ve kök yüzeylerinin 2 mm kadar

altından 3 tane ana malzemeden, 3 tane ITAB'dan, 3 tane de kaynak metalinden olmak üzere simetrik olarak toplamda 30 noktadan Vickers (HV₁₀) makro sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, cihazda bulunan 10 kg'lık yük uygulayan taban alanı kare şeklinde olan ve karşılıklı yüzeyleri arasında 136° açı bulunan düzgün piramit şeklindeki elmas batıcı uç yardımıyla yapılmıştır [33].



Şekil 5. Sertlik ölçüm bölgelerinin şematik örneği (Schematic illustration of hardness measurement zones)

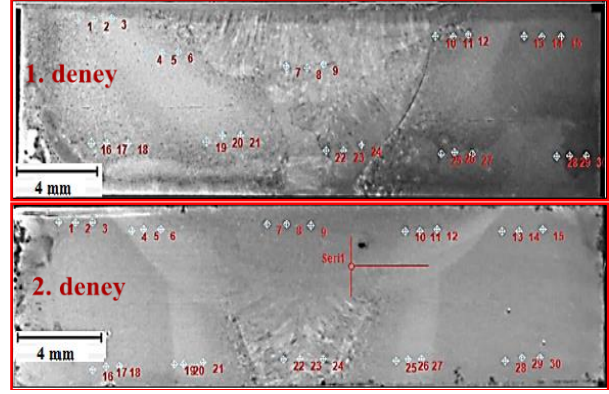
Çekme numuneleri TS EN 4136 [34] standardına göre hazırlanarak 150 kN çekme kapasiteli Instron marka çekme cihazında test edilmiştir. Deneylerde maksimum akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine bakılarak, ortalama değerler belirlenmiştir.

Eğme testlerinde, TS EN ISO 5173:2010/A1 [35] standardı kurallarına göre hazırlanan 240 mm uzunluğundaki numuneler yine aynı cihazda 16 mm çapında eğme mandreli kullanılarak, 90 mm mesnet merkezleri arası açıklıkta, 5 mm/dk deformasyon hızında, 180° açığa kadar kök eğme (root bend) ve kep eğme (face bend) gerçekleştirilmiştir.

Çentik - darbe testleri için numunelere TS EN ISO 9016:2012 [36] standardına göre 2 mm derinlikli 45° açılı, 0,25 mm V çentik açıldıktan sonra sıvı azot banyosu içerisinde 0 °C sıcaklıkta 5 dakika kadar bekletildikten sonra, numunenin ısınmasına zaman bırakmadan teste başlanmıştır. Çentik darbe testlerinde 300 joule enerji ölçebilen çarpma hızı 5.5 m/s olan Galdabini marka cihaz kullanılmıştır.

3. DENEYSSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

TS EN ISO 17639 [32] standart metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kaynak test plakalarından Şekil 3'te 6 numara ile gösterilen alandan çıkarılan numuneler, makro yapı, mikro yapı ve makro sertlik incelemelerine tabi tutulmuştur. Makrosertlik ölçümlerini de ifade eden makroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Makro yapı fotoğraflarında homojen ve ince tane yapıyla ana malzeme, geçiş bölgesinin karakteristik özelliklerini gösteren ITAB ve sütünsal tane yapısına sahip kaynak metali bölgeleri net olarak görülmektedir.

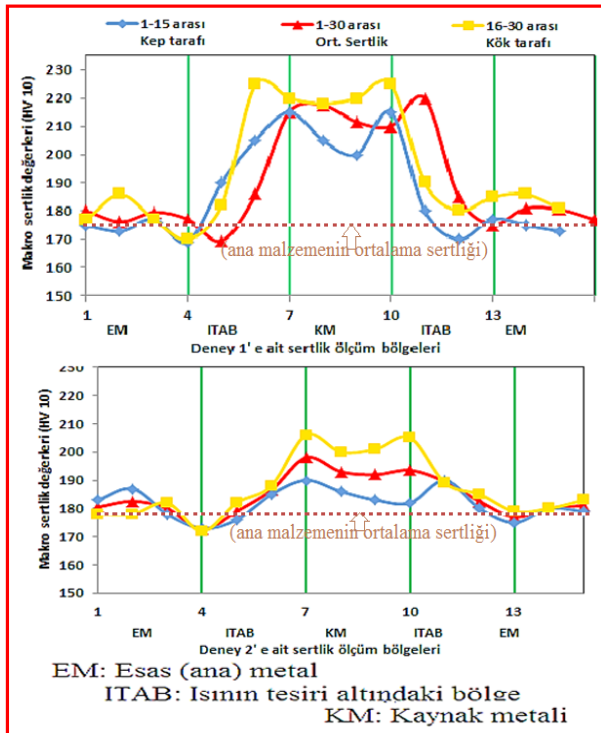


Şekil 6. Kaynaklı birleştirmelerin makrografi görüntüleri (Macrographic images of welded joints)

1. deneye ait fotoğraf 3 pasonun yer aldığı 2 dikiş katmanından, 2. deneye ait fotoğraf ise 4 pasonun yer aldığı 2 katmandan oluşmaktadır. 1.deneyde ortalama ITAB genişliği yaklaşık 3,5 mm iken 2.deneyde 4 mm'dir. Her iki makro yapıda bulunan ITAB genişliklerinin ısı girdisi (kJ/mm) ile orantılı olarak aşağıdan yukarı doğru genişlediği görülmektedir. 2. deneyde kök pasoda, 1. deneyde ise yüzeye yakın pasolarda hızlı soğumaya bağlı olarak görülen dendritik katılma dikkat çekmektedir.

2. deneyde pasolar arasında kep yüzeyinin 1 mm kadar aşağısında yaklaşık 0,2 mm çapında gözenek süreksizliği görülmekte olup, bu süreksizlik TS EN 6520-1 metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması standardında [15] belirtilen bir hata boyutunda değildir. Her iki deneyde de; aynı ana iki metalin veya farklı metallerin kaynaklandığı durumlarda ilave metal kullanılarak yapılan katılma türlerinden "epitaksiyel olmayan katılma" yani homojen veya heterojen olarak ayrılan katılma görülmektedir [37]. Bu durumda ergime çizgisinde (Bkz. Şekil 8-9'da kaynak bölgesi şematik resminde 2 numara) heterojen bölgelerde ana metalle ilave metalin taneleri etkileşmekte, rastgele yönelme ile karşılaştıkları ana metal tanesinin spesifik büyüme yönü oryantasyonuna uyum sağlayarak epitaksiyel olmayan bir katılma oluşturmaktadır [37]. 2. deneyde ıslah pasosunun (Bkz. Şekil 2.c'de 4.paso) alttaki pasolara yaptığı normalizasyon etkisi ile taneler 1. deneydeki döküm katılmasına benzer yapıdan çıkarak, normalizasyon işlemi uygulanmış ince tane yapısına geçmiştir [15].

Makro yapı fotoğraflarında meydana gelen kaynak metalindeki katılmalarda ve ITAB'da soğuma esnasında meydana gelen faz dönüşümleri sonucunda Şekil 5'te görülen farklı sertlik ölçüm bölgeleri oluşmuştur. Şekil 5'te görülen ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden 3'er adet olmak üzere, kep ve kök yüzeyinin 2 mm kadar derinliğinde bir hat üzerinde toplamda 30 noktadan yapılan makro sertlik değerlerine ait sertlik profili grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Vickers sertlik profillerine ait grafikler (Charts of the Vickers hardness profiles)

Şekil 7’de her iki deneyde de ana malzeme (EM – esas metal) sertliği ortalama 175 Vickers olarak ölçülmüştür. Kaynak telinin kimyasal kompozisyonu ve uygulanan ısı girdilerinin farklılık göstermesi nedeniyle her iki deney için kaynak bölgelerinde farklı sertlik değerleri oluştuğu Şekil 7’de görülmektedir. 1. deneyde kaynak metalinde sertlik ortalama 220 Vickers civarında iken, 2. deneyde 190 Vickers civarında ortalama sertlik değeri elde edilmiştir.

Her iki deneyde de en yüksek sertlik değerleri ITAB’ın ergime hattına yakın kısmında oluşmaktadır [11,12, 43]. Bu nokta aynı zamanda östenitin karbonca en zengin olduğu noktadır ve bu noktada gerçekleşen faz dönüşümü sert ve kırılğan martenzit fazının oluşmasını sağlayacak kadar hızlıdır [15, 38]. Bu noktadan sonra hem kaynak metalini hem de ITAB yönünde sertlik azalmaktadır. ITAB’ta sertlik düşüşü ve oluşan fazlar sürekli soğuma diyagramları ile açıklanırken kaynak metalinde meydana gelen sertleşme ve katılaşma ilave telin kimyasal bileşiminin etkili olduğu döküm yapısındaki katılaşma şartları ile açıklanabilir [39]. 1. deneyde kullanılan MG182 telin kimyasal kompozisyonundaki Mn (%1,55): Cr %0,25): Mo (%0,25) elementlerinin karbon eşdeğerliliğini artıran yöndeki etkisi sonucu kaynak metalinde ortalama sertlik ana malzemenin sertlik değerinin 45 Vickers üzerindedir[40, 41].

Deneylerde en düşük sertlik değeri ise ITAB’dan ana malzemeye geçiş [42] kısmında oluşmuştur. TSTE 420 çeliği kullanılarak Smitweld TCS 1405 simulator’ünde ITAB’da maksimum sertliğin 780°C’de elde edildiği bilinmektedir [11, 12]. Ayrıca API-5L X65 ve

S460G2+M çeliklerinin sürtünme kaynağı çalışmasına [42] ait sertlik profilinde de en düşük sertlik değerlerinin ITAB’dan ana malzemeye geçiş bölgesinde elde edildiği görülmüştür. Kök ve kep düzleminin 2 mm kadar altından alınan sertlik ölçümlerinde ise kaynak bölgelerinde kök düzlemi altından alınan sertlik değerlerinin iç bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak 2.deneyde kapak pasosunun (Islah pasosu) alttaki pasolara uyguladığı normalizasyon etkisinin kök pasosunun bir kısmında hissedilmemesidir.

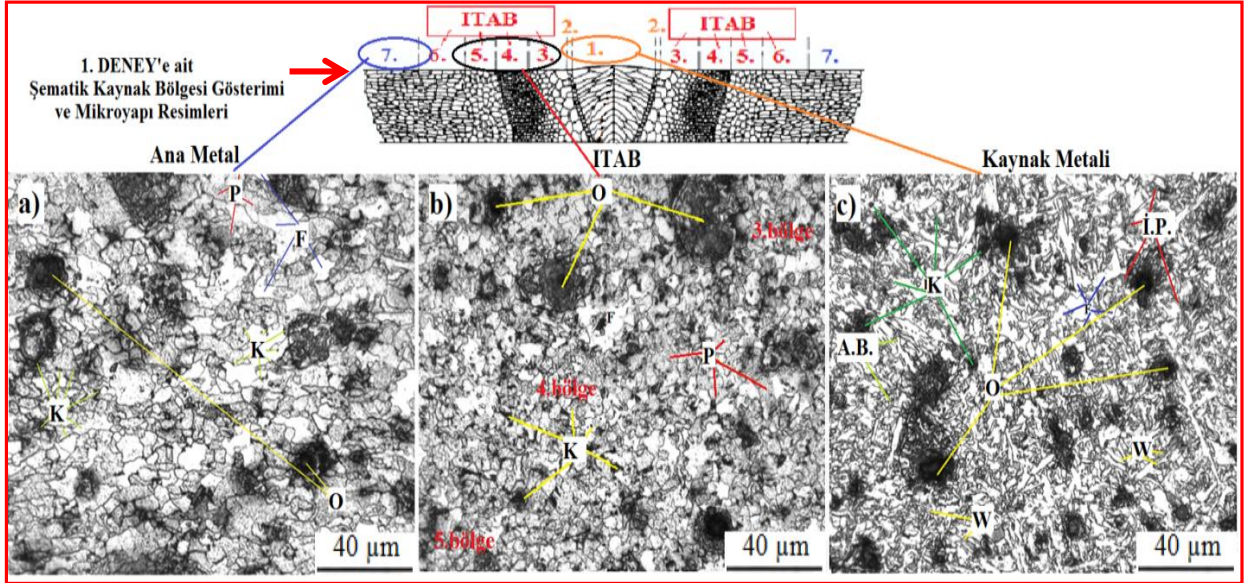
1.deneyde ıslah pasosunun olmaması ve kaba taneli östenit fazının [43] yüksek östenit sıcaklıklarından soğumasına bağlı olarak yayıncı ve yayıncısız dönüşümler [38] sonucu ince taneli çeşitli fazlara dönüşmesi ile kaynak bölgesinde sertliğin ergime sınırında yükseldikten sonra ITAB yönünde hızla azaldığı kaynak metalini bölgede ise kaynak metalinin yüksek karbon eşdeğerliliğine bağlı olarak az bir düşüşle sabit kaldığı görülmüştür [15, 38, 39].

Sonuç olarak MG182 tel ile yapılan birleştirme işleminde, FCW 140 ile yapılan birleştirme işlemine göre kaynak metalini bölgede daha fazla sertlik artışı görülmüştür.

Şekil 8-9’da deney numunelerinin kaynak bölgelerine ait ölçekli mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 8.a’da tanelerin ince ve homojen dağıldığı, ferrit (F) ve ağırlıklı perlitik (P) [44,45] yapılar ile yer yer tane içlerinde ve tane sınırlarında mikro alaşım elementlerine ait literatürde daha önceden yapılmış çalışmalarda karbür, nitür ve karbonitür (K) olduğu bilinen yapılar ile tane sınırlarında ise Mn, Al, Si elementlerine ait olduğu bilinen oksitler (O) [9] görülmektedir [2, 5, 6, 8].

Şekil 8.b’de Ferrit (F) çoğunluklu, ana malzemeden daha ince tane yapısında perlitik (P) [44, 45] yapı görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda karşılaşılan, tane içlerini ve tane sınırlarını kaplayan iğneleme etkisi gösteren mikro alaşım elementi karbürler (K) [3] ve ısının etkisiyle büyüme fırsatı yakalamış yapıda, istenmeyen oksitler (O) [9] bu çalışmada da görülmektedir. Tanelerin resimde sol alt köşeden yani iri taneli ITAB bölgesinden (5. bölge): sağ üst köşeye yani ince taneli ITAB’a (3. bölge) [16] doğru ısı akış gradyanının tersi yönde büyüdüğü görülmektedir[2, 5, 6, 9].

Şekil 8.c’de Ferrit (F) tane sınırlarında Widmanstatten ferrit (W): ince perlit (İ.P): alt beyrit (A.B) yapısı [44] [45] görülmektedir. Östenit fazından ferrit fazına dönüşüm sonrası fazla karbürlerin (K) [9] tane sınırlarında toplanmış halde çöktüğü görülmektedir. Literatürde tane sınırlarında oksit (O) oluşturan Al elementine ait inklüzyonların [9] yüzeye çıkamayıp tane sınırlarında çöktüğü bilinmektedir. Ferritin (F) ince perlit (İ.P.) [45] tanelerinin etrafını sararak süneklik sağladığı düşünülmektedir [2, 5, 6, 9, 16].



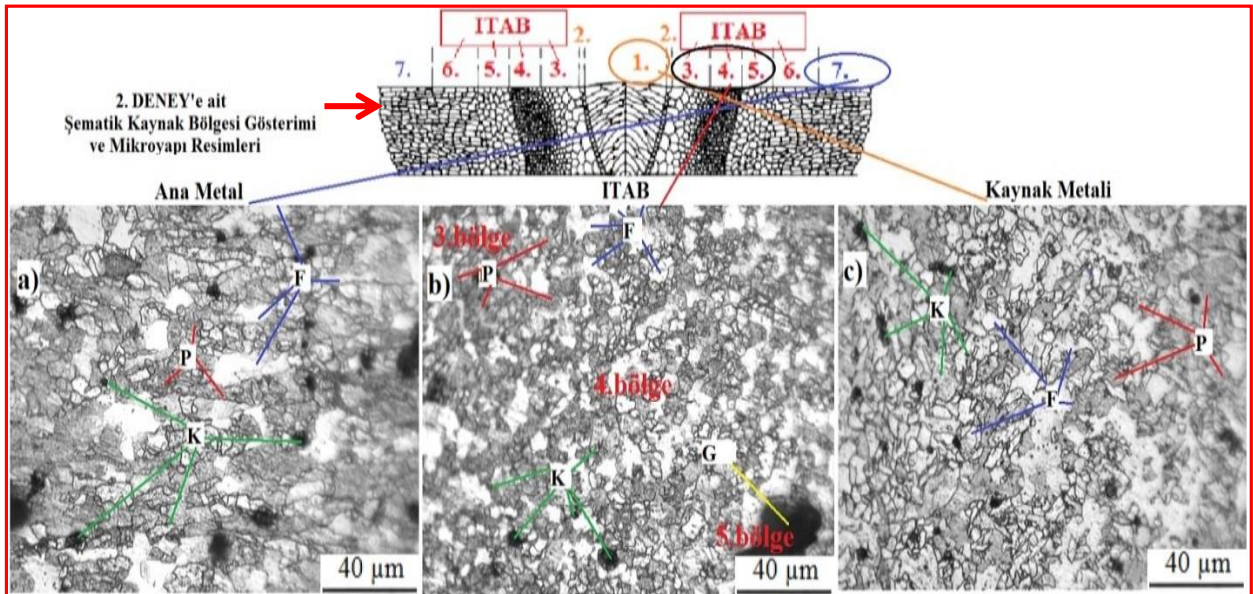
Şekil 8. Deney 1'e ait a-Ana metal, b- ITAB, c- Kaynak metali mikro yapı fotoğrafları (Micro structure photos a)Base metal, b)HAZ, c)Weld metal of experiment 1)

Şekil9.a'da ısıdan etkilenmemiş yassı tanelerin olduğu yapı içinde dağılmış mikro alaşım elementi karbürlerinin tane içlerinde ve tane sınırlarında mikron boyutunda toplanmadan çökelmiş [3], perlit (P) ve ferritten (F) [44, 45] ibaret yapı görülmektedir. Şekil 9.b'de normalizasyon ısıl işlemi ekisiyle incelmış tane yapısında bulunan ITAB görülmektedir [15, 38].

Daha önceki çalışmalarda karşılaşılan tane sınırlarında bulunan iri karbür kümelenmeleri (K) bu kez tane içlerinde noktasal homojen dağılımlı karbürler (K) olarak görülmektedir [2, 5, 6, 9, 16]. 5. bölgede TS EN ISO 6520-1 standardında bir süreksizlik olarak

değerlendirilen 30 µm boyutunda gözenek (G) [9] farkedilmektedir. Şekil 9.c'de Ferritik (F) yapının ısı akış yönünün tersine (yüze doğru) yönlenecek uzadığı, perlitten (P) [44, 45] oluşan mikro yapı görülmektedir.

Birim uzunluğa uygulanan ısı girdisinin çoklu çizgisel paso yoluyla azaltılması ve ıslah pasosunun etkisi sonucu mikro karbürlerin östenitten ferrite dönüşüm süresince tane içinde homojen şekilde çökerek dağıldığı, bazı iri karbür çökeltilerinin (K) [6, 9] ise tane sınırlarında çözülmeden kaldığı görülmektedir [2, 5, 16, 45].



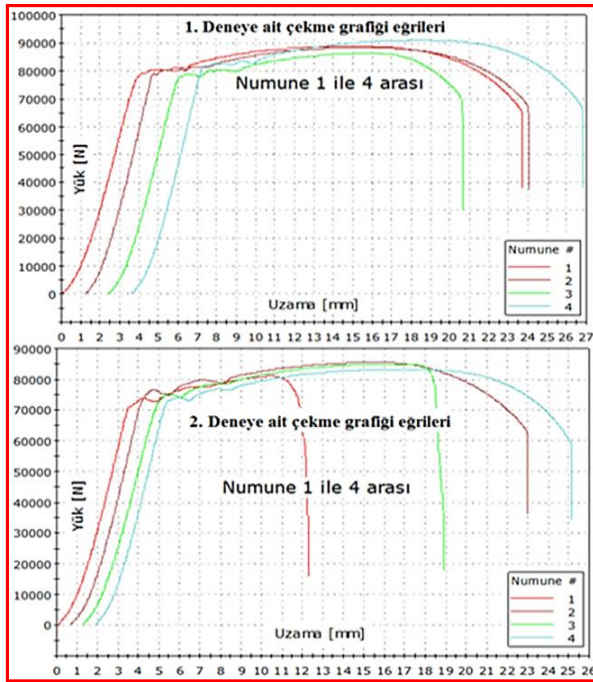
Şekil 9. Deney 2'ye ait a- Ana metal, b- ITAB, c- Kaynak metali mikro yapı fotoğrafları (Micro structure photos a)Base metal, b)HAZ, c)Weld metal of experiment 2)

Kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyinden elde edilen sonuçların grafiği Şekil 10’da, test sonuçları ise Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Çekme testi sonuçları (Tensile test results)

Deney no	Akma muk.	Çekme muk.	Uzama	Kesit Alanı	Son boy	Kopma bölgesi
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm ²]	mm	
1.1	514,3	578,7	21,8	153,5	109,7	Ana malzeme
1.2	510,9	570,8	20,9	154,7	108,9	
1.3	516,4	570,8	16,4	151,2	104,8	
1.4	515,6	573,4	20,4	158,5	108,4	
Ort.	514,3	573,4	19,9	155,6	109,0	
2.1	481,2	540,3	9,4	150,1	98,5	Ana malzeme
2.2	500,0	563,4	19,1	151,7	107,2	
2.3	484,9	555,9	14,9	152,8	103,4	
2.4	495,4	561,2	21,3	148,4	109,2	
Ort.	493,4	560,2	18,4	151,0	106,6	

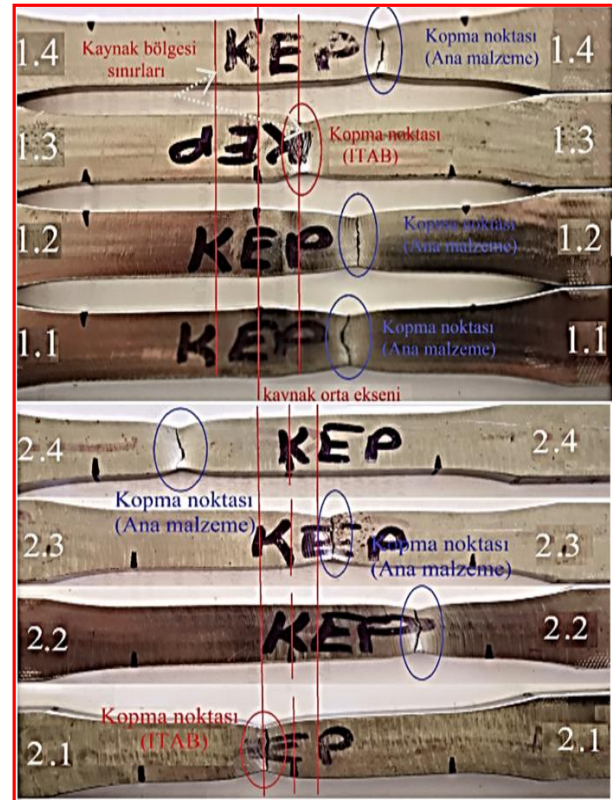
2.1 numaralı numuneden ölçülen % 9,4 süneklik değerinin “duraklama noktasına” denk gelmiş olabileceği nedeniyle ortalamaya dahil edilmemiştir.



Şekil 10. Gerilme-uzama eğrileri (Stress Elongation Curves)

Bu sonuçlar; statik zorlamalarda kaynak bölgesinin dayanımının ana metale göre daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. Kopmanın ana malzemeden olması kaynak parametrelerinin doğru seçildiğine işaret etmektedir. Şekil 11’de numunelerin kopma bölgelerine ait detaylı fotoğraflar incelendiğinde; her iki deneyde de birer numunenin ITAB’dan koptuğu, diğer numunelerin ise ana malzemeden koptuğu gözlemlenmiştir. Kaynaklı test parçalarına ait gerçekleşen deneylerin dikişlerinde 1 kez duraklama yapıp tekrar kaynağa devam edildiğinden, 4 numuneden birinin, duraklama

1 ve 2 numaralı birleştirmelerden ayrı ayrı alınan 4 numuneye ait çekme teste sonrası görüntüleri ise Şekil 11’de verilmiştir. Ana malzemenin TS EN 10025-6+A1 standardına göre katalog değerleri incelendiğinde 420 MPa minimum akma mukavemeti, 550 MPa (480 – 620 MPa arası) çekme mukavemeti, % uzama değeri ise minimum % 19 olarak verilmektedir [26]. Şekil 11 ve Çizelge 5’ten görüleceği üzere; 1. ve 2. deneyde numunelerin çoğunlukla ana malzemeden koptuğu, kaynak metalinden herhangi bir kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. 1. deney için yapılan çekme testlerinde; akma mukavemeti 514,3 MPa, maksimum çekme mukavemeti 573,4 MPa, yüzde uzama değeri ise % 19,9 olarak tespit edilmiştir. 2. Deneyden elde edilen sonuçlarda ise akma mukavemetinin 493,4 MPa, maksimum çekme mukavemetinin 560,2 MPa, yüzde uzama değerinin ise % 18,4 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Çekme testi numuneleri (Tensile test sample)

yapılan bu noktaya denk gelmiş olabileceği ve genelde bu tür noktalarda MAG kaynağında soğuk birleşme hatası TAB’dan kopmasına izin verilmektedir [29]. Numunelerin ana malzeme akma ve çekme mukavemetine oranla daha yüksek mukavemet değerleri olma ihtimali bulunduğundan, 1’er adet numunenin sergilemesinin sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi esnasında deformasyona karşı gösterdiği direnç nedeniyledir. Kaynak bölgesinin deformasyona karşı direnç göstermesi nedeniyle kaynak işlemi mukavemeti arttırmıştır [46].

Çizelge 6'da 0°C'de uygulanan çentik darbe testi sonuçlarına göre her iki deneyden elde edilen tokluk enerjisi değerleri ana malzemenin değerlerinden (0°C'de 202 Joule) daha yüksektir.

Çizelge 6. Çentik darbe testi sonuçları (Notch impact test results)

Deney no:		1			2		
Kırılma enerjisi değerleri	Numune no:	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
	Kaynak Metali	267	247	227	176	229	203
		Ortalama: 247			Ortalama: 203		
	Numune no:	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
ITAB	215	246	223	234	186	210	
		Ortalama: 228			Ortalama: 210		

Çizelge 6'daki sonuçlar incelendiğinde masif tel ile yapılan deneyden elde edilen ortalama çentik - darbe enerjisi 247 Joule (Kaynak metali): 228 Joule (ITAB): özlü tel ile yapılan deneyden elde edilen çentik - darbe enerjisi ise 203 Joule (Kaynak metali): 210 Joule (ITAB) olarak ölçülmüştür.

Bu değerlerin oluşmasında yine kullanılan ilave tel türünün farkı ortaya çıkmaktadır. Masif tel ile birleştirilen 1 numaralı deneyde Mn oranının % 1,55 olması tokluk değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır [40, 41]. Özlü tel kullanılan 2. deneyde kaynak metalinde tokluk değerinin ana malzemenin yüksek çıkması kullanılan Ni elementinin tane inceltici ve östenit stabilize edici etkisi [40, 41]. ile ıslah pasosunun alttaki pasolara uyguladığı normalizasyon ısıl işlemi sayesinde yükselmiştir [15]. Özlü tele ait kaynak metali mikroyapısında artan tane sınırı uzunluğu sayesinde ani kırılmaya karşı gösterilen direnç (çentik darbe enerjisi) yükselmiştir [11, 12, 47, 48].

Kılavuzlu bükme testlerine (eğme testi) ait sonuçlar ise Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7. Eğme testi sonuçları (Bending test results)



Şekil 12. Eğme numuneleri (Bending test samples)

Çizelge 7'de verilen eğme testi sonuçları ile Şekil 12'de verilen eğilmiş numune görüntülerine bakıldığında kaynaklı birleştirmelerde herhangi bir hatanın olmadığı, 180° bükme işleminin kusursuz bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 12'de kep ve kök yüzeyleri ile kenarlarında test sonucunda herhangi bir yırtılmanın olmadığı ve birleştirmelerin iyi bir özellik sergilediği görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- ✓ Yüksek akım yoğunluğuna sahip özlü tel ile yapılan birleştirmenin makroyapı fotoğrafı, düşük akım

yoğunluğuna sahip masif tel ile yapılan birleştirmenin makroyapı fotoğrafına göre daha iyi derinlemesine nüfuziyet, daha iyi yan duvar ergimesi, daha homojen ve geniş bir ITAB yapısı sergilemektedir.

- ✓ Sertlik alınan noktalar, bu noktaların makroyapıları ve ölçüm yapılan bölgelere uygulanan ısı girdileri birlikte değerlendirildiğinde; yüksek ısı girdisi uygulanan pasolarda yava soğuma oranına bağlı olarak kaba taneli yapılar oluşurken, düşük ısı girdisi uygulanan pasolarda hızlı soğuma oranına bağlı olarak ince taneli yapılar oluşmaktadır. Hızlı soğuma sonucu oluşan martenzit fazı mukavemeti artırsada tokluk ve sünekliği düşürmektedir. Bu olumsuzluk ve kaynak metali ile ITAB arasındaki yükselen sertlik farkı ıslah pasosu ile azaltılabilmektedir.
- ✓ Mikro karbürlerin östenit ve ferrit fazlarında sınırlı çözünürlüğü nedeniyle noktasal boyutta ve homojen biçimde ferrit, ince perlit fazlarında çökeltme sağlamaları özlü telle yapılan birleşmelerde mekanik özellikler açısından daha ince ve homojen bir tane yapısı oluşturmuştur. Masif telin kullanıldığı mikroyapı fotoğraflarında ise mikro karbürler daha çok aglomerasyon (fiziksel topaklanma) yaparak çökeltme gerçekleştirmiştir. Islah pasosunun olmaması nedeniyle karbürler, yeterli derecede normalizasyon görmediğinden noktasal biçimde çökelmek yerine, topaklanmış biçimde çökelmiştir.
- ✓ Her iki deneyde de ana malzemenin çekme mukavemetinden daha yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Ana malzemenin mukavemetinden daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edilmesinde; ilave metalin (Mn ve diğer alaşım elementleri) kompozisyonunun, mikro karbürlerin homojen çökeltmesinin, ince tane yapısının v.b metalurjik özelliklerin etkisi bulunmaktadır.
- ✓ Çentik darbe testi sonuçlarında Mn kaynak metalinde yüksek tokluk sağlarken, daha ince tane yapısına sahip masif telin kullanıldığı 1. deneyin ITAB mikroyapısında da yüksek tokluk enerjisi elde edilmiştir.
- ✓ Eğme deney sonuçlarında kep ve kök yüzeylerinde herhangi bir yırtılmanın oluşmaması birleştirmelerin çatlağa neden olacak boyutta gözenek ya da herhangi bir kalıntı içermediğini göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] https://www.tatasteleurope.com/static_files/Downloads/General%20Industry%20Strip/Strip%20Products/English/Tata%20Steel%20-%20YMPRESS%20S420MC%20-%20data%20sheet.pdf
- [2] Aktarer, S.M., Küçükömeroğlu, T., "The microstructure and mechanical properties of FSPed HSLA steel", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 75(2): 55-60, (2016).

- [3] Taş, Z., “Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde metalürjik mukavemet artırma”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2): 97-101, (2012).
- [4] <http://www.e-mep.com/wp-content/uploads/2017/02/Yüksek-Mukavemetli-Düşük-Alaşımlı-Çeliklerin-Kaynagi-Ozlem-Karaman.pdf>
- [5] Kurt, H., “*Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgenin Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi*”, **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- [6] Yalçın, M. “*İnce Taneli Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgenin Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi*”. **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, (2008).
- [7] N. Mebarki, N. Lamesle, P. Delagnes, D. Levaillant, C. Delmas, F., “Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties Of A 5%Cr Hotwork Tool Steel”, **6th International Tooling Conference**, France, 737-754.
- [8] J.G.Silva, F., Santos, J., Gouveia, R., “Dissolution Of Grain Boundary Carbides By The Effect Of Solution Annealing Heat Treatment and Aging Treatment On Heat-Resistant Cast Steel”, *Hk30. Metals*, 7 (251): 1-12, (2017).
- [9] Kendirci, M. F., “İnce Taneli Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgelerin Isıl İşlem Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, (2008).
- [10] Dündar, B., “Tozaltı Kaynak Yönteminde Altlık Olarak Kullanılan Kaynak Yöntemlerinden Kaynak Yeterliliklerinin ve Maliyetlerinin Karşılaştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [11] Dunder, M., Vuherer, T., Samardžić, I., “Weldability of Microalloyed High Strength Steels TStE 420 and S960 QL”, *Metalurgija*, 53 (3): 335-338, (2014).
- [12] Samardžić, I., Čikić, A., Dunder, M., “Accelerated Weldability Investigation Of Tste 420 Steel By Weld Thermal Cycle Simulation”, *Metalurgija*, 52 (4): 461-464, (2013).
- [13] Akın, A., “Gazaltı Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi**, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [14] Anık, S., “Kaynak Teknolojisi El Kitabı”, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, 1983, İstanbul, (2015).
- [15] Elektronik Kitap, “Uluslararası Kaynak Mühendisliği Eğitim Notları”, **O.D.T.Ü. K.T.M.-GSI-SLV-TR**, Ankara, (2013).
- [16] Kalkan, İ., “Yüksek mukavemetli çeliklerde çok pasolu kaynağının mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2018.
- [17] <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>
- [18] Savaşkan, T., “Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi”, **Celpler Matbaacılık**, 347-350 Trabzon, (2015).
- [19] <https://www.magmaweld.com.tr/urunorlikon/cb362c17-13ae-4848-bc7e-a03a1a70f380/fcw-140>
- [20] <https://www.magmaweld.com.tr/urunorlikon/404fd18e-8fdc-477d-82b1-7910f9f86e87/mg-182>
- [21] <http://www.gedik kaynak.com.tr/urun/geka-elcor-r-81-ni-ozlu-kaynak-teli>
- [22] <https://weldingmart.com/lincoln-superarc-la-100-aws-er100s-g-er110s-g>
- [23] [https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_Flux-CoredWires-Gas-Shielded-UltraCore-UltraCore81Ni1C-H\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_Flux-CoredWires-Gas-Shielded-UltraCore-UltraCore81Ni1C-H(LincolnElectric))
- [24] <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/shielding-gas-for-flux-cored-welding.aspx>
- [25] Komaç, E., “Teknik Eğitim El kitabı”, **Askaynak**, 6-8, Kocaeli, (2009).
- [26] TS EN 10025-6+A1, “Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 6: Suverilmiş ve Temperlenmiş Durumdaki Yüksek Akma Dayanımlı Yapı Çeliklerinden İmal Edilmiş Yassı Mamullerin Teknik Teslim Şartları”, (2013).
- [27] SEW088:1993, “Weldable Fine Grained Steels; Guidelines For Processing, Particular For Fusion Welding”, (1993).
- [28] TS EN 15614-1, “Metalik Malzemeler İçin Kaynak Prosedürlerinin Şartnamesi ve Vasıflandırılması - Kaynak Prosedürü Deneyi - Bölüm 1: Çeliklerin Gaz ve Ark Kaynağı”, (2017).
- [29] TS EN 9606-1, “Kaynakçıların Yeterlilik Sınavı-Ergitme Kaynağı - Bölüm 1: Çelikler”, (2017).
- [30] TS EN 14731, “Kaynak koordinasyonu - Görevler ve sorumluluklar”, (2010).
- [31] Akkurt, A., “Su jeti ile kesme sistemleri ve uygulama alanlarının değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 7(2): 129-139. (2004).
- [32] TS EN 17639, “Metalik Malzemelerdeki Kaynaklarda Tahribatlı Muayene - Kaynakların Makroskopik ve Mikroskopik Muayenesi”, (2014).
- [33] TS EN 9015-1, “Metalik Malzemelerdeki Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Sertlik Deneyi-Bölüm 1: Ark Kaynaklı Birleştirmelerde Sertlik Deneyi”, (2011).
- [34] TS EN 4136, “Metalik Malzemelerin Kaynakları Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Enine Çekme Deneyi”, (2013).
- [35] TS EN 5173:2010/A1, “Metalik Malzemelerde Kaynak Dikişleri Üzerinde Tahribatlı Muayeneler- Eğme Deneyleri”, (2012).
- [36] TS EN 9016:2012, “Metalik Malzemelerde Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler - Vurma Deneyleri”, (2012).
- [37] <https://nptel.ac.in/courses/112101005/modules/lec4-3/1.3.html>
- [38] D. Callister, W., G. Rethwisch, D., “Malzeme bilimi ve mühendisliği 8. basımdan çeviri”, **Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic.Ltd.Şti**, Ankara, 343-390, (2014).
- [39] Kang, B.Y., Kim, H.J., Hwang, S.K., “Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals”, *ISIJ International*, 40 (12): 1237-1245, (2000).
- [40] Zhang, Z., Farrar, R.A., “Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals”, *Welding Research Supplement*, 183-196, (1997).
- [41] Tüzünalp, K.K., “Yönlü Katılma” **Basılmamış Ders Notları**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Fakültesi, Ankara, (2017).
- [42] Faes K., Maas F., De Waele W., De Baets P., Verstraete M., Delbaere D., Van Der Donckt E., “Weldability of Micro-Alloyed High-Strength Pipeline Steels Using a New Friction Welding Variant”, **The 2nd South-East European IIW International Congress**, Sofia, Bulgaria, (2010).

- [43] <http://www.engineeringenotes.com/metallurgy/steel/austenitic-grain-size-of-steel-metallurgy/25901>
- [44] <https://docplayer.biz.tr/13903329-Mikroyapisal-goruntuleme-ve-tani.html>
- [45] Dong, H., Hao, X., Deng, D., “Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Joint”, *Springer Science+Business Media*, 3, 138-146, (2014).
- [46] Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J., “Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel”, *Materials Science and Engineering (A)*: (592): 28–39, (2014).
- [47] Popović, O., Prokić, C., Burzić, R.M., Milutinović, Z., “The Effect of Heat Input on the Weld Metal Toughness of Surface Welded Joint”, *14th International Research/Expert Conference*, Mediterranean Cruise, 61-64, (2010).
- [48] Türker, M., “The Effect of Welding Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of HSLA S960QL Type Steel with Submerged Arc Welding”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (3): 673-682, (2017).