

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402

ŞUBAT/FEBRUARY 2016 SAYI/NUMBER : 673



tmmob makina mühendisleri odası aylık yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendisimakina

makale

30

ORBİTAL TİG KAYNAK YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLMİŞ DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN MEKANİK, METALURJİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ
MECHANICAL, METALLURGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF DUPLEX STAINLESS STEEL WELDED BY ORBITAL GTAW
Umut SÖNMEZ, Niyazi ÇAVUŞOĞLU, Vural CEYHUN

39

KAYNAKLI ÇELİK YAPILARDA TAMİR KAYNAĞI VE PROSEDÜRÜ
IN WELDING STEEL STRUCTURES REPAIR WELDING AND PROCEDURE
Onur ÖZKİRAZ, Mehmet ZEYBEK, İbrahim ERTÜRK

48

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI UYGULAMALARI
RESISTANCE SPOT WELDING APPLICATIONS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY
Emre DORUK, Murat PAKDİL, Gürel ÇAM, İsmail DURGUN, Utku Can KUMRU

54

SAVUNMA SANAYİNDE, UÇAK VE HAVACILIK SEKTÖRÜNDE LASER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ
LASER WELDING APPLICATIONS FOR AIRCRAFT AND AVIATION SECTOR IN THE DEFENSE INDUSTRY
Hüseyin ÖZDEN, Atıncı ERYAVUZ

ORBİTAL TİG KAYNAK YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLMİŞ DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN MEKANİK, METALURJİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ*

Umut Sönmez

Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
usonmez1979@gmail.com

Niyazi Çavuşoğlu**

Dr.,
Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
niyazi.cavusoglu@ege.edu.tr

Vural Ceyhun

Prof. Dr.,
Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
vural.ceyhun@ege.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, özellikle kimya, petrol ve doğalgaz, gemi inşa, ilaç, gıda sanayi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan dubleks paslanmaz çelik boruların orbital TIG kaynağı çalışılmıştır. Kaynak işlemlerinde iki farklı elektrot kullanılmıştır. Kullanılan dubleks paslanmaz çelik borular üç farklı kaynak parametresi kullanılarak kaynak edilmiştir. Koruyucu ve kök koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanılmıştır. Kaynak parçaları alın alına kaynak edilmiştir. Kaynak edilen numunelerin çekme, sertlik ve korozyon testleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde EDX analizi ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dubleks paslanmaz çelik, orbital kaynak, taneler arası korozyon

MECHANICAL, METALLURGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF DUPLEX STAINLESS STEEL WELDED BY ORBITAL GTAW

ABSTRACT

In this study, the orbital TIG welding of duplex stainless steel pipes used widely in areas such as the chemical, petroleum, natural gas pipeline, ship building, pharmaceuticals and food industry has been studied. Two types of welding wire were used in welding process. Duplex stainless steel used were welded using three different welding parameters. Pure argon gas were used as shielding gas. Welding parts were welded butt joint. Tensile test, hardness test and corrosion test were applied on to welded samples. In addition, EDX analysis and microstructure were also carried out on samples.

Keywords: Duplex stainless steel, orbital welding, intergranular corrosion

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 02.02.2016

* 20-21 Kasım 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara'da düzenlenen Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Sönmez, U., Çavuşoğlu, N., Ceyhun, V. 2016. "Orbital TIG Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilmiş Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik, Metalurjik ve Korozyon Özellikleri," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 673, s. 30-38.

1. GİRİŞ

Paslanmaz çeliklerin mükemmel korozyon dayanımları, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri ve estetik görünüşleri bu malzemeye geniş bir kullanım alanı açmaktadır. Günümüzde sayıları gittikçe artan bir malzeme grubu olarak yer almakta ve yeni türleri üretilmektedir. Genel olarak yassı mamul, çubuk, boru ve döküm parça olarak üretilmektedir [1]. Paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır. Fakat kullanıldıkları yapıların bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanılabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca, paslanmaz çeliklerin kullanıldığı sistemde yapılacak ömür analizlerinde fiyat açısından kullanımının daha ekonomik olduğu görülecektir [2].

Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Bu çelikler ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir. Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilir. Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekiştirilir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısı işlemleri ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür. Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebilir. Bu yüzeylerin görünümü ve kalitesi, bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir. Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar [1].

Paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımının yüksek olmasının sebebi, içeriğindeki kromdan kaynaklanmaktadır. Çeliğin içerisinde bulunan krom, yeterli miktarda bulunduğu demir içerisinde çözünür ve alaşım yaptığı metal yüzeyinde ince, görünmez, yapışkan ve yeniden oluşabilen korozyona dirençli pasif bir oksit tabakası oluşturur. Bu oksit tabakasının oluşması için alaşım içerisindeki krom miktarının %10,5 üzerinde olması gerekmektedir. Korozyona dayanıklı olan bu oksit tabakası her korozif ortamda yeteri kadar dirençli olmaz. Bu yüzden, değişik ortamlarda kullanılmak üzere, değişik mekanik özelliklere sahip paslanmaz çelikler elde etmek için molibden nikel ve azot gibi bileşenler içeren alaşımlar yapılmaktadır. Paslanmaz çelik türüne göre değişen bu alaşım elementleriyle oluşturulan paslanmaz çelik ailesi oldukça geniş bir kimyasal bileşim aralığına sahiptir. Paslanmaz çelikler, mutfak eşyaları, banyo küvetleri, inşaat malzemeleri, eşanjörler, kimyasal tankerler, ısıya dayanıklı aletler, bıçaklar, maki-

ne parçaları, petrol rafinerisi parçaları, cıvata, somun, pompa şaftları, çatal, kaşık, endüstriyel fırın parçaları, yakıt ve özel boru hatları, uçak egzoz boruları, kazanlar, otomobil parçaları (silecek, egzoz, susturucu vb.), tıbbi aletler gibi birçok ekipmanın kullanıldığı kimya, gıda ve gemi inşa sanayinde, yapı-inşaat sektöründe, petrol, tekstil, kağıt ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır.

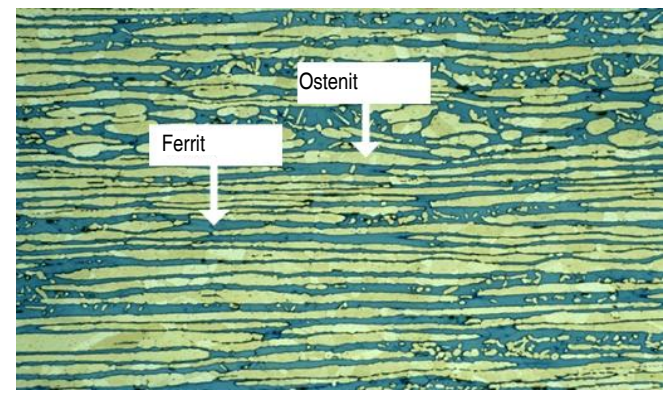
Paslanmaz çelikler mikro yapılarındaki fazlara göre değerlendirilmektedir. Paslanmaz çeliklerin içerisindeki fazlar ferrit, ostenit ve martenzittir. Paslanmaz çelikler 5 ana gruba ayrılmaktadır:

1. Ferritik paslanmaz çelikler
2. Martenzitik paslanmaz çelikler
3. Ostenitik paslanmaz çelikler
4. Ferritik-Ostenitik paslanmaz çelikler (dubleks/çift fazlı)
5. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler

2. FERRİTİK-OSTENİTİK (DUBLEKS) PASLANMAZ ÇELİKLER

İşlenmiş ilk dubleks paslanmaz çelikler, İsveç'teki sülfür kağıt endüstrisinde kullanılmak üzere yaklaşık 80 yıl önce geliştirilmiştir. Dubleks alaşımları esas olarak taneler arası korozyonların, klor içeren sıvıların ve diğer kimyasal likit ürünlerin sebebiyet verdiği korozyon etkilerinden kurtulmak amacıyla üretilmiştir. Dubleks çeliklerin kullanımı son beş yıldan bu yana giderek artmıştır. İlk nesil dubleks paslanmaz çelikleri iyi bir performans karakteristiği sağlamıştır. Ancak, kaynak edilebilme koşullarında bazı sınırlamalar ortaya çıkmıştır. Ancak 1968'lerde dubleks paslanmaz çeliklerde Cr ve Ni içeriklerinde değişiklikler yapılarak ferrit miktarı düşürülmüş, bu çeliklere alaşım elementi olarak azot eklenmesiyle beraber kaynak edilebilirliği iyileştirilmiştir. 1970'lerden sonra, denizlerdeki kıyı gaz ve petrol/yağ üretim tesislerindeki artış, klorlu deniz suyunda korozif dayanımı ve mekanik özellikleri yüksek, işlenebilirliği iyi ikinci nesil dubleks paslanmaz çeliklerin ortaya çıkarılıp geliştirilmelerine öncülük etmiştir [3].

Dubleks paslanmaz çeliklerin, diğer paslanmaz çelik türlerine göre sağladığı en önemli üstünlük, yüksek mekanik özellikleri sayesinde kullanım yerinde diğer paslanmaz çeliklere göre daha ince kesitli parça kullanımına olanak sağlamasıdır. Sınırlamaları ise kaynak sonrası ısıdan etkilenmiş bölgede oluşan ferritik yapı nedeniyle oyuk korozyon dayanımının düşmesi ve ısı yaşlanma sonucunda oluşan gevreklik nedeniyle kullanım sıcaklıklarının 260-300°C ile sınırlanmasıdır [4]. Dubleks paslanmaz çelikler, normal oda sıcaklığında genelde eşit miktarda %50 ostenit ve %50 ferrit içerir. Dubleks malzemenin iç yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Dupleks Paslanmaz Çeliğin İç Yapısı (Ferrit, koyu ve ostenit ise açık renkle gösterilmiştir.) [5]

2.1 Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

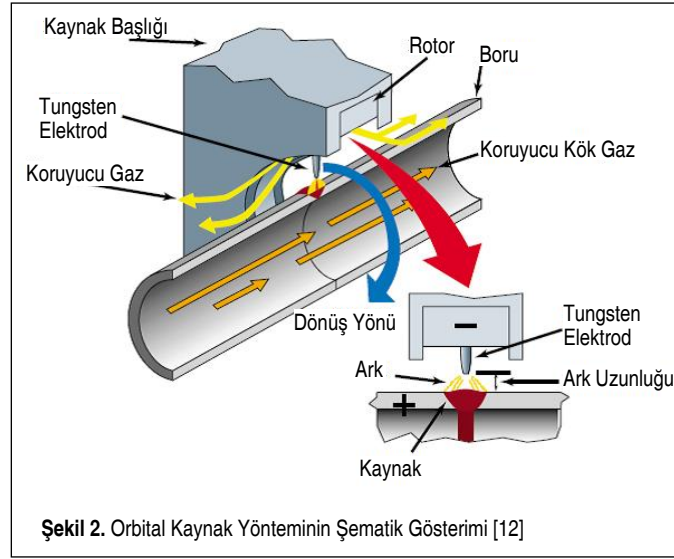
Kaynaklı birleştirme yöntemi metal malzemeler için önemli bir üretim yöntemidir. Dolayısıyla, metal malzemelerin yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için kaynak kabiliyeti çok önemli olmaktadır. Paslanmaz çelikler genel olarak kaynaklanabilir metal malzemelerdir ve farklı birçok kaynak yöntemiyle kaynak edilebilmektedir. Ancak, yine de hatasız kaynak edilebilmeleri için her kaynak yöntemi için uyulması gereken prosedürler bulunmaktadır.

Çoğu durumda kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve kaynak metali (KM) mikro yapısının esas metale (EM) göre önemli miktarda değişmesine neden olmaktadır. Bu da istenen faz dengesinde değişikliklerin, metallar arası elementlerin, tane büyümesinin, alaşım veya katışık elementlerinin ayrılması veya diğer bazı reaksiyonların oluşmasına yol açmaktadır [6].

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti genellikle ferritik paslanmaz çeliklerden daha iyi; fakat ostenitik paslanmaz çeliklerden daha kötüdür. Kaynak metalinde ferrit/ostenit dengesinin sağlanması gerekmektedir. Isıdan etkilenmiş bölgede ferrit miktarının artması beklenmelidir. Bu açıdan, çok düşük ısı girdisi ve buna bağlı olarak hızlı soğumalardan kaçınılmalı ve IEB'de ostenit fazının oluşumuna izin verilmelidir [2]. Çok yüksek soğuma hızlarında yüksek ferrit miktarı, nitrür çökelmeleri ve sonuçta düşük tokluk ve düşük korozyon direnci ile karşılaşılır. Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağı alaşım içeriklerine bağlı olarak kontrollü bir ısı girdisi ile yapılmalıdır.

2.2 Orbital TIG Kaynak Yöntemi

Orbital TIG kaynak yöntemi ilk olarak 1960'lı yıllarda uzay havacılık alanında hidrolik devrelerin bağlantısında birleştirme yöntemi olarak kullanılmıştır. 1990'lı yıllardan sonra mikro-işlemci teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak daha yaygın ve tercih edilir hale gelmiştir. Kaynak makinesi ve

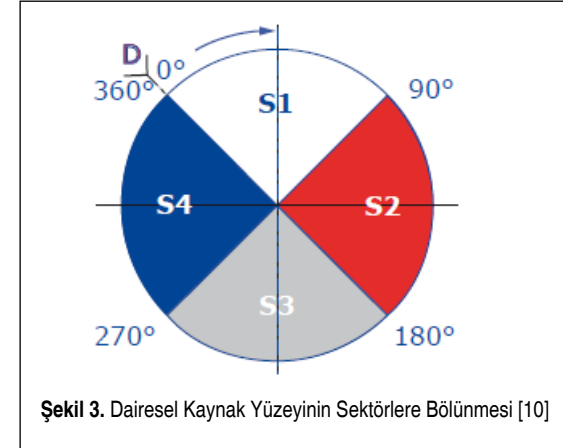


Şekil 2. Orbital Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi [12]

elektrik motoruyla hareket eden tungsten elektrodun bağlı olduğu torç bilgisayar kontrollü sistem ile kaynak parametrelerinin ayarlanmasına ve daha sonra ihtiyaç halinde tekrar kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Normalde kapalı tip kaynak başlıkları, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak bölgesini koruyan çember ile birlikte mükemmel bir hizalamayla 1,6 mm ile 152 mm çapında, maksimum 3,9 mm et kalınlığında boruların kaynağında kullanılır. Daha büyük çap ve et kalınlıklarında açık tip başlıklar tercih edilir [7].

Orbital kaynak yöntemi özellikle boruların yüksek kaliteli kaynağında TIG kaynağı ile birlikte tercih edilmektedir. Orbital denmesinin sebebi, kaynak edilecek boruların dairesel olarak hareket eden başlık içerisinde yer alan elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark tarafından kaynak edilmesi nedeniyledir [8, 9]. Özellikle boruların, flanş, fitting ve valflerin birbirleriyle kaynağında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan ark vasıtasıyla ısı iletimi sağlanmakta ve gerekirse ilave kaynak elektrodu kullanılarak kaynak yapılmaktadır [10]. Kaynak edilecek borular aynı hizaya getirilerek sabitlenir. Küçük DC motor vasıtasıyla tungsten elektrot kaynak edilecek yüzeylerde dairesel şekilde hareket ettirilir. Oksijenin kapalı kaynak başlığı içerisinde elektrot ve kaynak metalini oksidasyona maruz bırakmasını engellemek amacıyla koruyucu gaz (özellikle argon) doldurulur. Ark uzunluğu sabit kalır ve tel besleme ile ark voltajının kontrolüne ihtiyaç duyulmaz [11]. Şekil 2'de orbital TIG yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

Orbital TIG kaynağında kaynak akımı, ark uzunluğu, ilerleme hızı gibi kaynak parametreleri ayarlanabilir ve tekrar edilebilir olduğundan dolayı boruların birleştirilmelerinde kaliteli, tutarlı ve sürekli olarak aynı tip kaynaklar elde edilebilmektedir [13]. Bununla birlikte, yüksek üretim hızı, düşük çarpılma, ısı girdisinin kontrolüyle daha dar IEB oluşması yöntemin



Şekil 3. Dairesel Kaynak Yüzeyinin Sektörlere Bölünmesi [10]

diğer avantajları arasında sayılabilir [14]. Manuel kaynakta kaynakçı çok tecrübeli olsa dahi insan faktörü dolayısıyla hata yapılması olmaktadır.

Orbital kaynakta kaynak edilecek dairesel alan sektörlere bölünmektedir. Genellikle 4 sektöre bölünerek kaynak işlemi yapılır. Bölünen bu sektörler Şekil 3'te görülmektedir. Boruların

Tablo 1. Ana Malzemenin Kimyasal Bileşim Oranları

Kimyasal Bileşim (%)									
Cr	Ni	Mn	C	Mo	Si	P	S	N	Fe
22,31	5,26	0,76	0,017	3,15	0,49	0,023	0,0007	0,17	-

Tablo 2. Kaynak Parametrelerinin Gösterimi

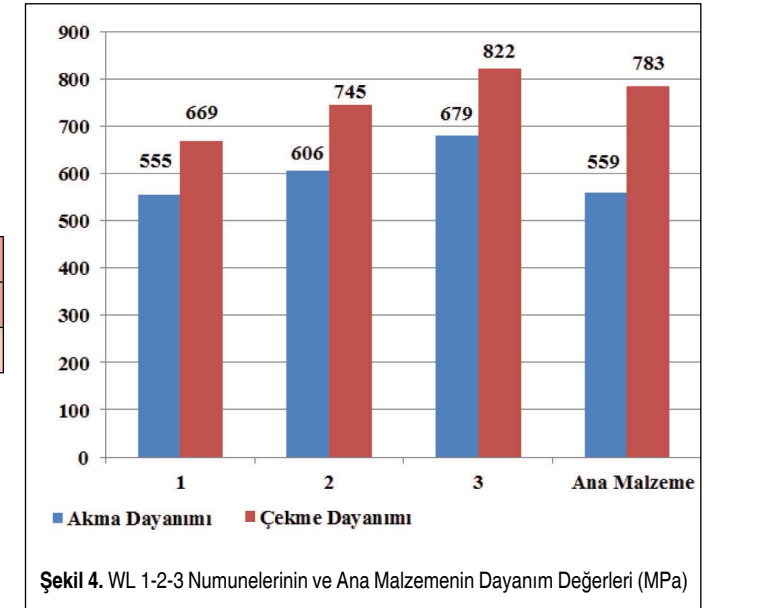
	Kaynak parametreleri	1. 2. 3.		
		1.	2.	3.
1. Bölge	Koruyucu Gaz Debisi (m ³ /s)	25	30	32
	Kök Koruyucu Gaz Debisi (m ³ /s)	15	15	17
	Son Süpürme Zamanı (s)	20	20	20
2. Bölge	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
	Yüksek Akım (A)	42,3	44,5	43,6
	Düşük Akım (A)	19,1	20,0	19,6
3. Bölge	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18
	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
	Yüksek Akım (A)	43,2	45,4	42,1
4. Bölge	Düşük Akım (A)	19,4	20,4	19,1
	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18
	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
Ana Malzeme	Yüksek Akım (A)	41,5	44,1	43,2
	Düşük Akım (A)	18,7	20,0	19,6
	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18

kaynağında aynı anda çok farklı pozisyonlar söz konusudur. Bu nedenle, ergiyen ve katılaşılan kaynak metalinin kontrolü önemlidir ve darbeli akım kullanılmasını zorunlu kılar [10].

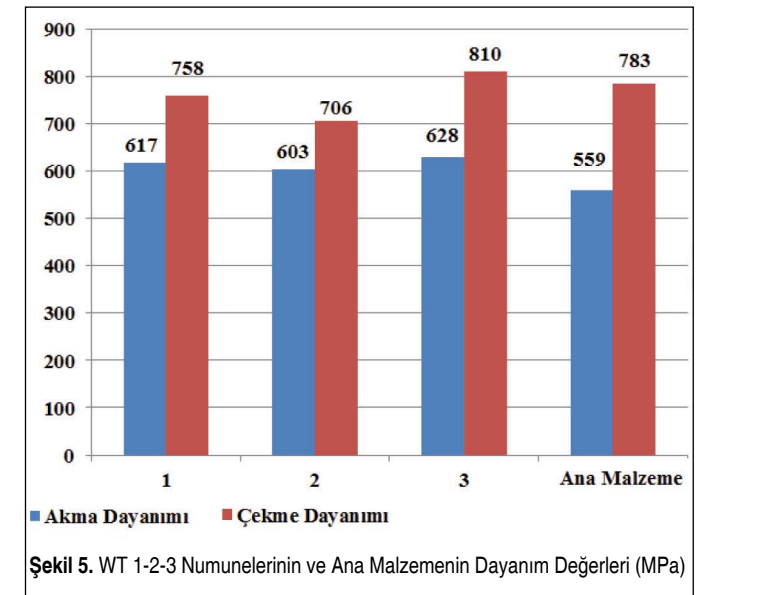
Paslanmaz çelik boruların kaynağında içerdikleri krom ve karbonun borunun iç yüzeyinde oksijen ile birleşerek krom karbür oluşturmasını engellemek amacıyla borunun iç hacmi koruyucu gaz ile beslenir [15].

3. DENEYSEL ÇALIŞIMLAR

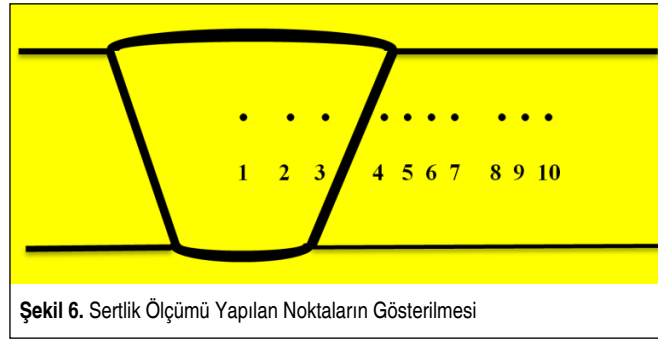
Bu çalışmada, 150 mm uzunluk, 1 mm et kalınlığı ve 25 mm çapında dupleks paslanmaz çelik borular (UNS 31803 ve EN 1.4462) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.



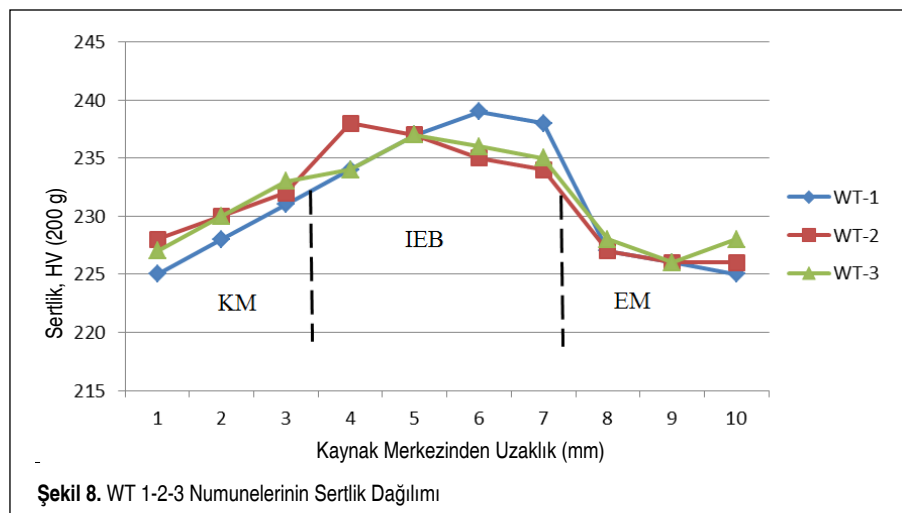
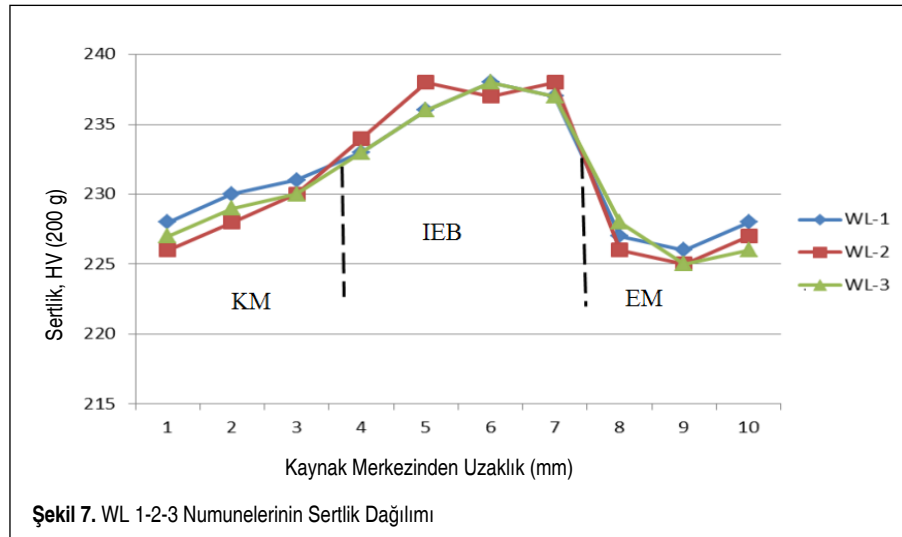
Şekil 4. WL 1-2-3 Numunelerinin ve Ana Malzemenin Dayanım Değerleri (MPa)



Şekil 5. WT 1-2-3 Numunelerinin ve Ana Malzemenin Dayanım Değerleri (MPa)



Kaynak işlemleri, üç farklı kaynak parametresi ile WL-20 (%2 seryum içeren, 30° uç geometrisi) ve WT-40 elektrot (%3,80 ile 4,20 toryum içeren, 30° uç geometrisi) kullanılarak saf argon gaz ortamında alın altına orbital TIG kaynak makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak edilen numunelere çekme, sertlik ve korozyon testi (EN ISO 3651-1) uygulanmış, SEM-EDX analizi ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Kaynak parametreleri ile WL ve WT elektrot



isimleri birleştirilerek numuneler isimlendirilmiştir. Her bir elektrot için Tablo 2'de belirtilen kaynak parametreleriyle kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinin her aşamasında kaynak voltajı 20 V olarak alınmıştır.

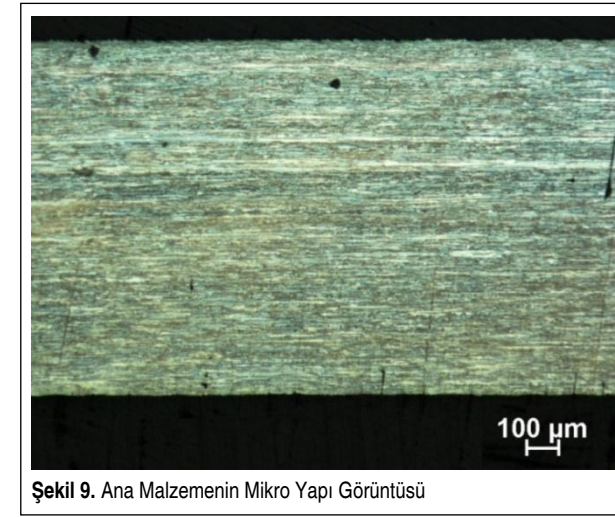
3.1 Çekme Testleri

Kaynaklı numunelerin çekme deneyleri TS EN ISO 4136: 2012 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri kaynak yönüne dik gelecek konumda tel erozyon ile kesilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

Çekme testleri incelendiğinde, kaynaklı birleştirilmiş numunelere ait akma dayanımı değerlerinin ana malzemeninkinden yüksek olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı değerlerinin ise ana malzemeye kıyasla, 1 ve 2 no'lu numunelerde düşük 3 no'lu numunelerde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, tüm numunelerde yüzde uzama değerlerinin ana malzemeye kıyasla daha düşük (%3-4 kadar) kaldığı görülmüştür. Tüm kaynaklı numuneler IEB'den kırılmıştır. Bu tespitlere göre, kaynak işlemi esnasında, yüksek tepe sıcaklığı (~1350 °C) ve yüksek soğuma hızlarına maruz kalan IEB'nin sahip olduğu göreceli ferritik tane iriliği, ferrit tane sınırları içerisinde oluşması muhtemel olan karbürler ve ferrit/ostenit dengesinin (kısmen ferritik ağırlıklı yapı) hepsi birlikte göz önüne alındığında, kaynaklı birleştirmelerin süneklik değerleri üzerinde kuvvetli olumsuz etkileri olduğu değerlendirilmiştir. İlave dolgu malzemesi kullanılmadan yapılan dupleks malzemelerin kaynağında ferrit/ostenit dengesi, akma ve çekme dayanımlarından çok süneklik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Westin [16] yaptığı çalışmada, dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında artan ferrit içeriğinin sünekliği azalttığını bildirmiştir.

3.2 Sertlik Testleri

Kaynaklı parçalardan hazırlanan numunelere 0,2 kg (HV0.2) yük uygulanarak vickers sertlik testleri yapılmıştır. Sertlik ölçümü yapılacak test noktaları için kaynak metalini (KM), ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve esas metali (EM) kapsayacak şekilde 1 mm aralıklarla Şekil 6'da gösterildiği gibi 10 nokta belirlenmiştir.



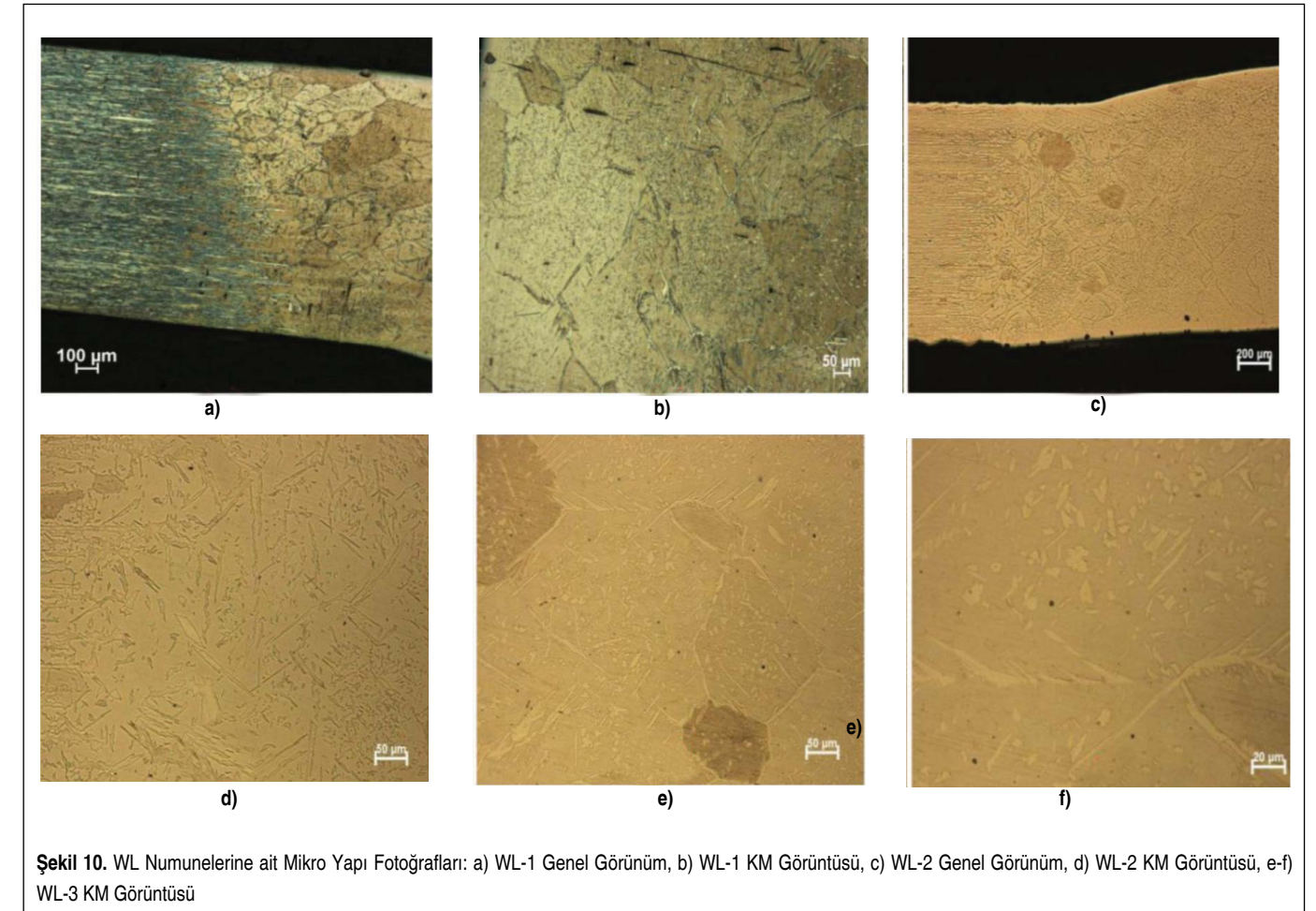
Belirtilen bölgeler için tespit edilen sertlik dağılımları Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.

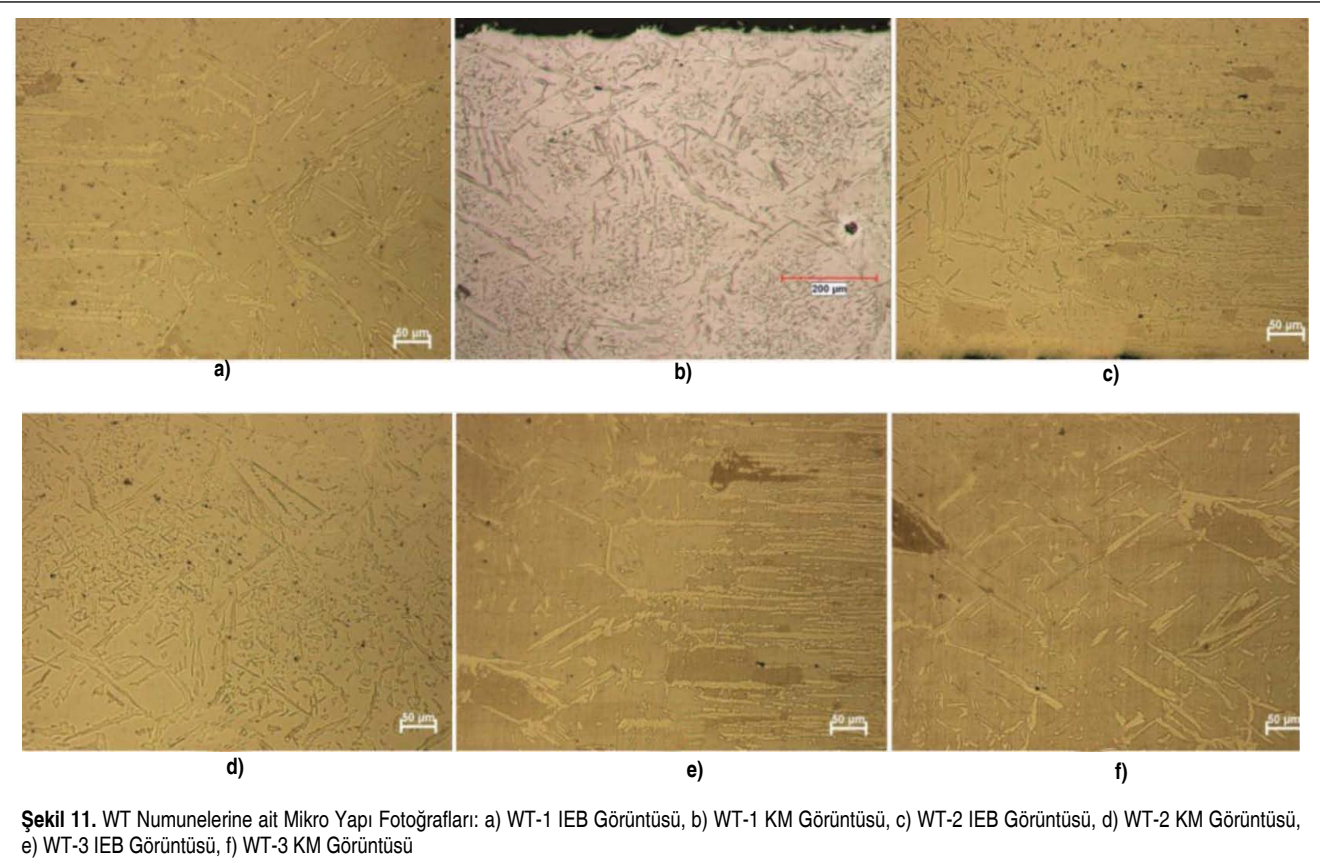
Sertlik değerleri incelendiğinde, tüm numunelerde esas metalin sertlik ortalaması 226 HV, kaynak metalini ve ısıdan etkilenmiş bölgede ise sertlikler sırasıyla 230 HV ve 235 HV ola-

rak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, WL ve WT kaynaklı numunelerinin EM, KM ve IEB'deki sertlik dağılımlarında önemli değişimler gözlenmemiştir. IEB'nin sertlik değerlerinin yüksek çıkması yüksek ısı girdisi ve yüksek soğuma hızları nedeniyle olduğu değerlendirilmektedir. Literatür incelemelerinde, ince et kalınlığına sahip numunelerin sertlik değerlerindeki artışın, kaynak işlemi esnasında IEB'nin maruz kaldığı yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma sonucunda bölgenin ferrit içeriğindeki artış ve artık gerilmeler ile ilişkili olabileceği bildirilmiştir [16].

3.3 Mikro Yapı İncelemeleri

Kaynaklı parçalardan et kalınlığı kesitinde hazırlanan numuneler, zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından Kalling's çözeltisi (5 g CuCl₂, 100 ml HCl, 100 ml Etanol) ile dağlanmış. Dağlanmış olan numunelerin kaynak metalini ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) mikro yapıları değerlendirilmiştir. Şekil 9'da ana malzemenin mikro yapı resmi görülmektedir. Şekil 10'da WL numunelerine ait mikro yapı resimleri ve Şekil 11'de WT numunelerine ait mikro yapı resimleri gösterilmiştir.





Şekil 11. WT Numunelerine ait Mikro Yapı Fotoğrafları: a) WT-1 IEB Görüntüsü, b) WT-1 KM Görüntüsü, c) WT-2 IEB Görüntüsü, d) WT-2 KM Görüntüsü, e) WT-3 IEB Görüntüsü, f) WT-3 KM Görüntüsü

Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde, dupleks çeliğin sıcak işleme (hot finished) üretilmesi neticesinde ostenit ve ferrit tanelerinin işlem yönünde (haddeleme) uzayıp şekil aldıkları görülmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında, öncelikle yapı tamamen ferritik katılaşma gösterir. Katılaşma süresince ostenit oluşumu gözlenmez. Fakat, sıcaklık azaldıkça katı-katı dönüşümüyle ferrit fazından ostenit çöker. Soğuma hızlarının IEB'ye nazaran daha yavaş olduğu kaynak metali içerisinde ve tane sınırlarında allotromorf ve Widmanstätten plakaları halinde oluşan ostenit oranının fazla olduğu görülmektedir.

Tüm numunelerde IEB genişliğinin göreceli olarak birbirine yakın olduğu görülebilir. IEB'ye bitişik bölgede oluşan görece iri tanelerin, ostenitin yüksek sıcaklık altında çözünüp ferrite dönüşmesi neticesinde oluştuğu söylenebilir. IEB'de ferritik katılaşma esnasında meydana gelen tane büyümesine bağlı olarak ferrit miktarında artış ve ferrit tane sınırlarında ostenit oluşumu görülmektedir.

Dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonunun yüksek mekanik özellikler ve korozyon dayanımını sağlaması açısından kaynak işlemi gibi ısı işlemler sonucunda yapılarının eşit miktarda ostenit ve ferrit içermesi beklenmektedir. Ferrit ve ostenit içeriğini belirlemek için parlatılarak dağlanmış numunelerde EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ana

Tablo 3. WL Numunelerine ait EDX Sonuçlarının Gösterimi

Analiz Bölgeleri	Elementler (%)					Numune Adları
	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	
Ana Malzeme	20,66	4,66	2,59	60,91	1,62	2205
Kaynak Metali	20,48	4,64	2,98	60,71	1,62	WL-1
	21,26	4,70	2,86	62,13	1,61	WL-2
	20,89	4,64	2,85	61,03	1,65	WL-3

Tablo 4. WT Numunelerine ait EDX Sonuçlarının Gösterimi

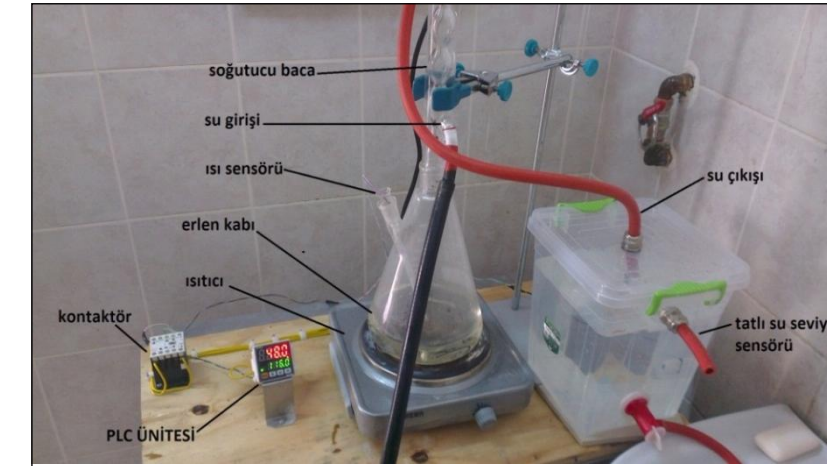
Analiz Bölgeleri	Elementler (%)					Numune Adları
	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	
Ana Malzeme	20,66	4,66	2,59	60,91	1,62	2205
Kaynak Metali	20,86	4,85	3,04	60,69	1,51	WT-1
	21,56	4,88	2,58	63,47	1,61	WT-2
	20,89	4,71	3,11	61,34	1,60	WT-3

metal ve kaynak metali kısımlarında ana alaşım elementleri olan demir, krom, nikel, molibden ve mangan içeriklerine ait EDX analizi sonuçları Tablo 3 ve 4'te yer almaktadır.

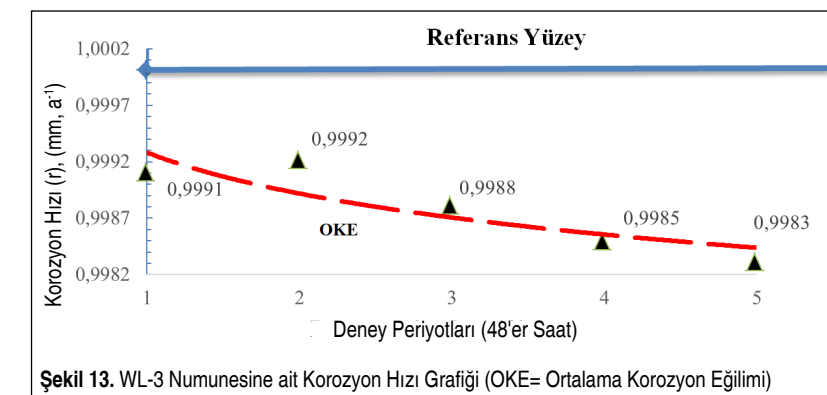
EDX analizi sonucunda, tüm numunelerin kaynak metalindeki kimyasal kompozisyonlarının esas metale yakın olduğu görülmektedir. Cr ve Mo (ferrit yapıcı) elementlerinin miktarları ana malzemeden yüksek, ostenit yapıcı Ni miktarının yüksek, Mn miktarının ise çok az düşük ve yakın olduğu belirlenmiştir. Kaynak metalindeki yüksek ısı girdisi ve soğuma hızına bağlı olarak dengeli bir ostenit/ferrit dağılımı oluştuğu söylenebilir.

3.4 Korozyon Testleri

Taneler arası korozyon deneyi (TS 3156 EN ISO 3651-1), tercihi olarak taneler arasında oluşturulan korozyon deneyini anlatır. Ostenitik ve dupleks paslanmaz çelikler 500-1000°C arası sıcaklıkta sabit tutulacak olursa böyle bir etkiye maruz kalır. Taneler arası korozyona karşı hassasiyet, kaynak işlemi sonucunda meydana gelir. Nitrik asit ortamında taneler arası korozyon, krom karbürlerin çökmesi, molibden içeren çeliklerde sigma fazı gibi metaller arası bileşiklerin çökmesi veya safsızlık elementlerinin tane sınırlarında ayrışması ile ilgili olabilir. Taneler arası korozyon deneyi ileri derecede yükseltgen ortamlarda kullanılması düşünülen (örneğin nitrik asit ortamında) borulara uygulanır.



Şekil 12. Hazırlanan Korozyon Test Düzeneğinin Gösterilmesi



Şekil 13. WL-3 Numunesine ait Korozyon Hızı Grafiği (OKE= Ortalama Korozyon Eğilimi)

Tablo 5. Numunelerin Deney Dönemlerindeki Korozyon Hızı

Deney periyotları	Numunelerin Korozyon Hızı (mm.a ⁻¹)					
	WL-1	WL-2	WL-3	WT-1	WT-2	WT-3
1	0,0010	0,0007	0,0009	0,0008	0,0009	0,0029
2	0,0071	0,0005	0,0008	0,0007	0,0006	0,0059
3	0,0010	0,0008	0,0012	0,0014	0,0015	0,0082
4	0,0012	0,0013	0,0015	0,0021	0,0017	0,0036
5	0,0017	0,0018	0,0017	0,0036	0,0012	0,0028

Tablo 6. Deney Sonu- Başlangıç Ağırlıkları Esas Alınarak Hesaplanan Korozyon Hızı Değerleri

Numune Adı	Numunelerin Korozyon Hızı (mm.a ⁻¹)
WL-1	0,0057
WL-2	0,0052
WL-3	0,0063
WT-1	0,0089
WT-2	0,0062
WT-3	0,0023

1200 mesh zımpara ile yüzeyleri ve kenarları zımparalanarak mekanik tufalı giderilen numuneler Şekil 12'de gösterilen 2 lt'lik 7 soğutucu erlen kabında %65'lik nitrik asidin içerisinde 48 saatlik dönemler halinde 5 defa kaynatılmıştır. Hazırlanan deney sistemi doğruluk, güvenilirlik sağlamak açısından nitrik asidin sıcaklığını kaynama sıcaklığına (123 °C) yakın 117 °C de sabit tutabilmesi ve su kesintisi durumunda sistemin devreden çıkartılabilmesi özelliklerine sahip olacak şekilde elektronik kontrollü olarak tasarlanmıştır. Kullanılan sistem Şekil 12'de görülmektedir.

Her dönem sonunda oluşan kütle kaybını belirlemek için hassas terazi kullanılmıştır. Nitrik asit çözeltisinin kimyasal reaksiyon etkileri, her deney periyodunun sonunda ve toplam deney süresinin sonunda ölçülen kütle kaybıyla belirlenmiştir. Kütle kaybı belirlenirken her defasında cihaz kalibre edilmiş, her ölçüm 5'er defa yapılmış ve standart sapma göz önüne alınarak ortalama değerleri hesap edilmiştir. Deney dönemlerindeki korozyon hızı ve deney sonu-başlangıç ağırlıklarına göre korozyon hızları Tablo 5 ve 6'da yer almaktadır.

WL-3 numunesine ait elde edilen korozyon hızı Şekil 13'te verilmiştir.

Korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin korozyon hızlarının referans yüzeyi ile aralarında bulunan alanın çok yakın olduğunu görmekteyiz. Aynı zamanda elde edilen korozyon

hızları, KM ve IEB'de kaynak işlemi sonucunda nitrik asit içerisinde taneler arası korozyona karşı hassasiyeti oluşturan krom karbürlerin ve nitrürlerin çökmesi, sigma fazı gibi metallar arası bileşiklerin çökmesi veya safsızlık elementlerinin tane sınırlarında ayrışması durumlarının yoğun/aşırı olmadığını göstermektedir.

4. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada, dupleks paslanmaz çelik boruların Orbital TIG kaynağında kaynak parametrelerinin, kaynaklı birleştirmenin dayanım, mikro yapı ve korozyon özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- EDX analizi sonucunda, tüm numunelerin kaynak metalindeki kimyasal kompozisyonlarının esas metale yakın olduğu görülmüştür.
- Sertlik değerleri incelendiğinde, tüm numunelerde esas metalin sertlik ortalaması 226 HV, kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölgelerde ise sertlikler sırasıyla 230 HV ve 235 HV olarak tespit edilmiştir.
- Tüm numuneler IEB'den kopmuştur. Tüm numunelerde, EM'in uzama değerlerine (%30) kıyasla çok düşük uzama değerleri (%3-4 kadar) elde edilmiştir.
- Tüm numunelerde kaynak metali içerisinde, ferrit tane sınırlarında ostenit oluşumu, Widmanstätten plakalarının oluşumu ve ferrit taneleri içerisinde ostenit oluşumu görülmüştür.
- Korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin korozyon hızlarının referans yüzeyi ile aralarında bulunan alanın çok yakın olduğunu görmekteyiz. Bu duruma göre, orbital kaynak yöntemi ile birleştirilen dupleks paslanmaz çelik boruların yeterli korozif dayanımı sağladıkları tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

1. **Aran, A., Temel, M. A.** 2004. Paslanmaz Çelikler-Yassı Mammuller, Üretimi-Kullanımı-Standartları, Sarıtaş Teknik Yayın, no: 1, İstanbul.
2. **Kaluc, E., Taban, E.** 2007. Paslanmaz Çelikler, Geliştirilen Yeni Türleri ve Kaynak Edilebilirlikleri, MMO/461, TMMOB MMO Yayın, İstanbul.

3. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_3rd_Edition.pdf, son erişim tarihi: 22.08.2015.
4. **Ciofu, F., Nioata, A., Dobrota, D.** 2010. "Welds in the Duplex Stainless Steel," Fascicle of Management and Technological Engineering, vol. 19.
5. <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, son erişim tarihi: 22.08.2015.
6. **Emel, T.** 2007. "Yapısal Uygulamalar İçin Geliştirilen Modifiye 12 Cr Ferritik Paslanmaz Çeliğinin Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti," Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
7. **Mannion, B., Heinzmann, J.** 1999. "Orbital Tube Welding," Flow Control. December 1999.
8. **Wilsdorf, R., Pistor, R., Sixsmith, J. J., Jin, H.** 2006. "Welding Aluminum Pipe and Tube with Variable Polarity," Welding Journal, vol. 85, no. 4, p. 42-43.
9. **Emmerson, J.** 2000. "Orbital Narrow Gap MCW Pipe Welding," Welding-Metal Fabrication, vol. 68, no. 8, p. 9-11.
10. <http://www.polysoude.com/orbital-welding>, son erişim tarihi: 29.01.2016.
11. **Garcia, J. A. O., Lima, G. L., Pereira, W. D. B., Guimarães, V. A., Neto, C. M., Paranhos, R. P. R.** 2010. "Characterization of Titanium Welded Joints by the Orbital Gas Tungsten Arc Welding Process For Aerospace Application," Journal of Aerospace Technology and Management, São José dos Campos, vol. 2, no. 2, p. 211-218.
12. **Benway, E. A.** 2009. "What to Look for in Orbital Welding Training Programs," Penton's Welding Magazine, vol. 82, no. 5, p. 18-22.
13. **Benway, E. A.** 2000. "Advancements in Automatic Orbital Welding Expand its Use, Provide Welders with More Option," Industrial Maintenance-Plant Operation, vol. 61, no. 7, p. 22.
14. **Harris, I. D.** 2011. "Welding Advances in Tube And Pipe Applications," Welding Journal, vol. 90, no. 6, p. 58-63.
15. **Purnell, S.** 2003. "How to Achieve a Clean Process Line in Stainless Steel Pipes," World Pumps, vol. 2003, no. 447, p. 17-18, 20-21.
16. **Westin, E. M.** 2010. "Microstructure and Properties of Welds in The Lean Duplex Stainless Steel LDX 2101," Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

KAYNAKLI ÇELİK YAPILARDA TAMİR KAYNAĞI VE PROSEDÜRÜ*

Onur Özkiraz

TMMOB

Makina Mühendisleri Odası,
Ankara Şube, Ankara
onur.ozkiraz@mno.org.tr,

Mehmet Zeybek

Kaynak Uzm.,

Hidromek A.Ş.

Kaynaklı İmalat Yöneticisi
mehmet.zeybek@hidromek.com.tr

İbrahim Ertürk**

Dr.,

Gedik Kaynak A.Ş. Teknik Danışmanı
iberturk06@gmail.com

ÖZ

Büyük maliyetlerle hazırlanan kaynaklı yapıların birçok fonksiyonu birden yapması sırasında; dinamik, statik yüklere ve korozyona karşı uzun süre çalışma ömrünü sürdürmesi gerekmektedir. Buna mukabil, zaman içerisinde oluşabilecek anormal zorlamalar hatalı üretilen kaynaklı yapının çalışma ömrünü kısaltacağı gibi, telafisi mümkün olmayan can ve mal kayıplarına da yol açabilmektedir. Bu nedenle, kaynaklı yapıdaki hataların (düzensizliklerin) üretim esnasında ya da yapı servise alınmadan önce tespit edilerek tamir edilmesi (giderilmesi) gerekmektedir. Bu çalışmada, hataların giderilmesinde en etkili ve ekonomik yöntem olan kaynak ile tamir üzerinde durulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, prosedür, hata, tamir, muayene

IN WELDING STEEL STRUCTURES REPAIR WELDING AND PROCEDURE

ABSTRACT

The structures which are prepared with high cost welding processes must continue its working life despite corrosion and static and dynamic loads while doing a lot of functions at the same time. Therefore, extreme stresses which may be occur in time may shorten the life of the welded structure which has produced wrongly, also it may cause dramatic life and property losses. Because of that, the faults in welded structures must be identified and repaired while producing or before structure is taken to service. The most efficient and economic method about correcting these faults is to repair by welding.

Keywords: Welding, procedure, fault, repair, examination

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 02.02.2016

* 20-21 Kasım 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara'da düzenlenen Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Özkiraz, O., Zeybek, M., Ertürk, İ. 2016. "Kaynaklı Çelik Yapılarda Tamir Kaynağı ve Prosedürü," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 673, s. 39-47.

1. GİRİŞ

Tamir kaynağı; çelik yapıların (konstrüksiyonun) imalatı ya da çalışması esnasında oluşan hataları gidermek için yapılan kaynak işlemidir veya lokal olarak aşınan kısımların doldurulmasında kullanılan dolgu kaynağı yöntemidir. Yapıda küçük ya da büyük hataların meydana gelmesi, üretim aşamasında verim düşüklüğünden başlayıp konstrüksiyonun devreden çıkmasıyla sonuçlanacak olayları yaratabilir. Bu nedenle, kaynaklı birleştirmelerdeki hatalardan dolayı ortaya çıkan işletme dışı zamanın mümkün olduğunca kısa tutulması ve tamirattan sonra da daha önceki performansını sisteme kazandırıp, çalışma ömrünü uzatması işletmeye önemli ölçüde ekonomi sağlaması demektir. Bundan dolayı da kaynaklı imalatta çalışan mühendis ve teknik elemanların, malzemelerin kırılma mekaniği konusunda bilgi sahibi olmaları gerekir.

1.1 Kırılma Mekaniği

Kaynaklı çelik yapıların kullanım imkanları, parçaların şekil değişimi ya da kırılma riskleri sebebiyle sınırlandırılmıştır. Verilen bir malzeme için bu malzemenin üretimi aşamasında hem kırılmaya eğilimli olduğunu hem de kırılmanın fiziksel sebeplerini anlamak önemlidir. Hatanın incelenmesi ve ortaya konması en önemli problemlerden biridir. Bu araştırma malzeme laboratuvarlarında neden mekanik deneylerin çok büyük yer tuttuğunu açıklar. Buna rağmen deney makinalarında verilen neticeler bir çatlağın nasıl doğduğunu bilinen metal ya da kaynaklı yapı içinde nasıl ilerlediğini bilmek için yeterli değildir. Zira bu sonuçlar aynı zamanda kırılma denemelerinin neticeleri ile de karşılaştırılmaktadır. Kırık yüzeyin incelenmesi, gözle, büyüteç ile makroskobik olarak adlandırılabilir. Bu malzeme ile metal ve alaşımlarının homojen olarak birleştirilmesi, kırık pozisyonu, geometrisi, parlaklığı, renklenmesi, kırılma tipleri ve kırılmanın oluşum nedenleri ile ilgili bilgiler vermektedir. Bu konuda uzman olan kişi, çalışma esnasında kırılmış bir parçanın kırığında oluşan hata türünü, mekanik, ısı ve kimyasal olarak değerlendirir. Kalıntı gerilim dağılımına ait gevrekleştirici faktörleri araştırır. Kırılma incelmeye yardımcı olan bu bilgiler, tasarım, imalat ya da kullanım hatalarının belirlenmesine yardımcı olur. Kırılma mekaniğinden, imalat endüstrisinde içinde hata bulunan bir parçanın gevrek kırılma riskinin belirlenmesinde ya da ani kırılma sebebinin analizinde faydalıdır.

1.2 Kırılmaya Neden Olan Hata Türleri

Birçok hatanın oluşumu değişik zamanlarda ve değişik sebeplerden olabilir. Bu hatalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Ham Malzemenin İşlenmesi Sırasında Oluşan Hatalar

- Gerilim çatlakları

- Gaz boşlukları
- Cüruf kalıntıları
- Kendini çekme boşlukları
- Toplanmalar

Üretim Esnasında Oluşabilen Hatalar

- İşlem hataları
- Kaynak hataları
- Kalıntı gerilim çatlakları
- Isıl işlem hataları

Yapının Çalışma Sürecinde Oluşabilecek Hatalar

- Yorulma
- Gerilme korozyonu
- Sürünme ve sünme
- Korozyon yorulması

2. KAYNAK HATALARI VE OLUŞUM NEDENLERİ

2.1 Tanımlar

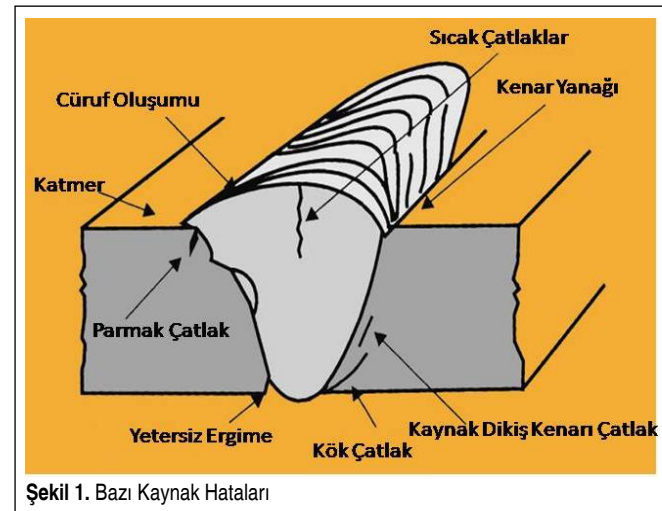
Kalite: Bir ürünün veya hizmetin belirlenen ya da olabilecek ihtiyaçları karşılama kabiliyetine dayanan özelliklerin toplamıdır.

Düzensizlik: Şartname, talimat ya da teknik spesifikasyonlarda olması istenen ölçü veya şekillerden meydana gelen sapmalardır.

Hata: Tolerans dışına çıkan düzensizlikler hata olarak kabul edilir.

2.2 Kaynak İşlemi Sırasında Oluşan Hatalar

Kaynaklı yapının oluşturulması için, parçaların imalatı ve



Şekil 1. Bazı Kaynak Hataları

Tanım	Kaynak Kesiti	Radyogram Röntgen (İç Yapı)
Kurt Oyuğu Gözeneği		
Doğrusal Cüruf Oluşumu		
Gaz Kalıntıları (Gözenek)		
Doğrusal Gözenek		
Kemer Duvar Erime Eksikliği		
Geçiş Çalışmada Erime Eksikliği		
Boyuna Çatlak		
Enine Çatlak		
Çatlak		

Şekil 2. Kaynak Hatalarının Radyografik Görüntüleri

montajında çeşitli yöntemler kullanılmakta ve bunların kullanımları sırasında belirli bölgelerde gerilmeler oluşmaktadır. Örneğin kaynak işlemleri sırasında oluşan gerilmeler kaynak yönteminin ve kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, kaynak dolgu metalinin uygun olmaması, kaynakçının kalifiye olmaması, kaynak koşullarının uygun olmaması vb. nedenlerden dolayı Şekil 1'de görülen kaynak hatalarından bazıları oluşabilmektedir.

2.2.1 Çatlaklar

Kaynak işlemi sırasında oluşan gerilmeler sıcak ve soğuk çatlakları meydana getirirler.

Sıcak Çatlaklar

Sıvı → katı faz bölgesinde (yaklaşık 1200 °C'de) katılaşma esnasında ya da hemen sonra, tane sınırlarını takiben ilerleyen kaynak dikişi boyunca ve ITAB bölgesinde oluşmaktadır.

Soğuk Çatlaklar

Kaynak metalinin gerilmelerden dolayı kendisini çekmesi ve bu çekmenin engellenmesi sonucunda meydana gelir. Tane içi ve taneler arasında ilerler. Genellikle yüksek karbonlu, alaşımsız ve düşük alaşımlı yüksek dayanıklı çeliklerde görülebilir. Bunlar, esas metal sertleşmeye duyarlı ise kaynak dikişinin soğuması sırasında ya da hidrojenin difüze olması nedeniyle, ITAB'da kaynak dikişine 1-2 mm mesafede dikiş boyunca tane içi ve taneler arasında ilerleyerek veya yüksek dayanımlı yapı çeliklerinde kaynak dikişinden başlayıp esas malzemeye tane içi kırılma şeklinde intikal eden çatlak tipidir.

Süneklik Düşmesi (Gevrekleşme) Çatlakları

Örnek olarak austenitik çeliklerin soğutulması sırasında kırılma davranış göstermesi, çatlakların oluşumuna neden olur. İç gerilmelerin yardımı ile de oluşan bu çatlaklar büyür.

Yeniden Kristalleşme veya Gerilim Giderme Çatlakları

Kaynak sonrası ısıtma işlemi sırasında meydana gelebilir. Çökelmiş olan karbür, nitrür ve benzeri maddeler, ısıtma işlemi metal içinde yayılır. Bu da metalin dayanımını artırır, bu durumun önlenmesi tane sınırlarının kayması ile olur ki bu da çatlakların oluşumuna yol açabilir.

Krater Çatlakları

Bu çatlaklar boylamasına, enlemesine ve yıldız çatlaklar olarak isimlendirilir. Kraterin zayıf olmasından meydana gelebilir. Kaynak sonunda elektrotu henüz kaldırmadan 10 mm geri hareket ile krater dolgusu güçlendirilir ise çatlaklar önenebilir.

Katmanlaşma Çatlakları

Kaynak bölgesinde esas metalin içinde yüzeye paralel olarak görülebilir. Nedenleri ise ITAB bölgesinde metal asıllı olmayan, oksitlerin, silikatların, sülfürlerin hadde yönünde uzamış şekiller almasıyla görülür.

Gerilim Korozyon Çatlaması

Kaynak bölgesi ile aşındırıcı bir çözelti temas halinde ve bu bölgede yüksek gerilme mevcut ise korozyon çatlakları söz konusudur. Burada aşındırıcı madde korozyonu artıracak, gerilmelerde çatlama hızlandıracaktır. Önlenmesi için malzeme-deki gerilmeleri azaltmak gerekir.

Grafitleşme Çatlakları

Kaynaklı yapı (konstrüksiyon), kullanım sırasında devamlı ısınmaya ya da soğumaya maruz kalır ise karbürler ayrışarak çelik içinde grafit dönüşür. Grafit çökeltileri yumuşak bir faz olduğundan bu bölgelerde çatlaklar başlar ve bu çatlaklar da büyür. Önlenmesi için çeliğe molibden (Mo) ilave edilir. Molibden grafitleşmeyi önleyici bir elementtir. Çünkü molibden, molibden karbür (MoC) oluşturur. Bu da demir karbürden (Fe₂C) zor çözünür. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda molibdenli çeliklerin kullanılması tavsiye edilir. Bu çeliklerin kaynağı için de aynı bileşimi veren elektrotlar kullanılmalıdır.

Balgözü Oluşumu

Genelde bu çatlaklar hidrojenin malzemeyi gevrekleştirme neticesinde ortaya çıkar. Kaynak dikişinde önce, parlak bir gözenek ve gözenekten başlayan çatlaklar şeklinde görülür ya da metalin akma sınırını geçen iç gerilmelerden meydana gelir. Önlenmesi için malzeme, yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılmalı veya kaynak sonrası ısıtma tabii tutulmalıdır.

Segregasyon Oluşumu

Kaynak metalinin ve ilave metalin ergimesi sırasında, alaşım elementlerinin eşit dağılmayı ya da dokunun homojen olmaması olayıdır. Bu durum, iç gerilmelere ve çatlamalara yol açar.

2.3 Gözenekler ve Önlenmesi

- Kaynak ağzı bölgesinin, oksit, boya, gres yağı ve rutubetten temizlenmesi,

- Kaynak metalinin yeteri kadar ergimiş halde tutularak gazların çıkışını sağlamak,
- Kaynak elektrotunun örtüsündeki rutubeti azaltmak,
- Kaynak esnasında ark boyunu kısa tutmak,
- Düşük karbonlu ve manganlı; fakat yüksek fosfor içeren çeliklerin kaynağında düşük hidrojen içeren (bazik örtülü) elektrot kullanmak,
- Kaynak metalindeki sülfür miktarını düşük tutmak,
- Dolgu metalinin temiz olmasına özen göstermek gerekir.

2.4 Nüfuziyet Azlığı

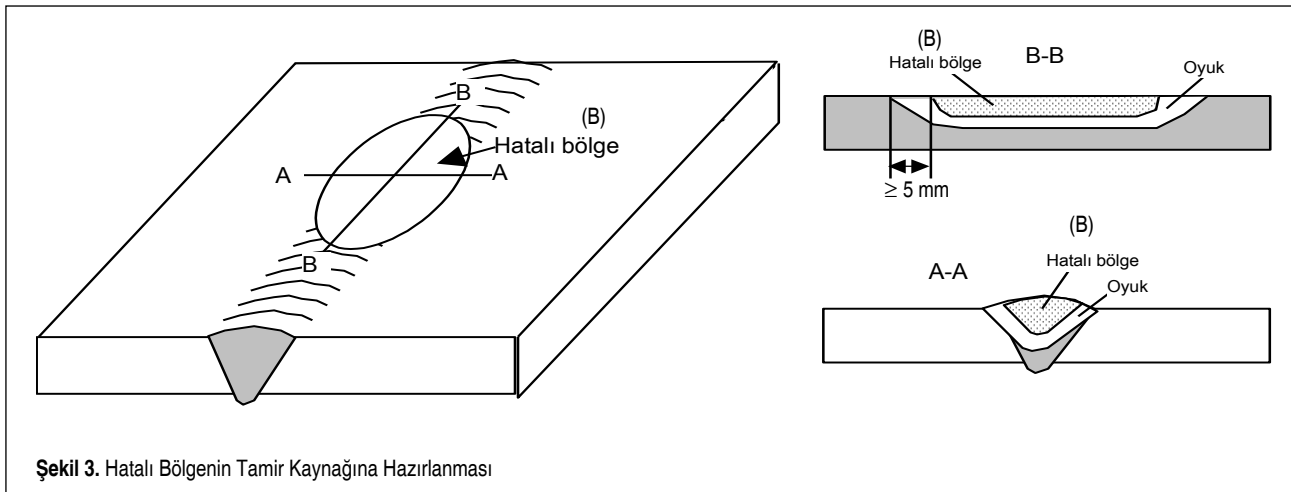
Esas metal ile kaynak metali arasında ya da kaynak metalinin pasoları arasında oluşur. Bu hataların kaynak anında önlenmesi için uygun akım şiddeti ve kısa ark boyu ile çalışmak önemlidir. Fazla düşük akım şiddeti yetersiz birleşme meydana getirebileceği gibi, yüksek akım şiddeti de elektrodun çabuk ergimesine yol açar. Neticede aynı hata oluşur. Kaynak kesitindeki birleşme azlığı, statik ve dinamik zorlamalarda büyük oranda kaynak bağlantısının dayanımını düşürür. Bu hatayı yok etmek için kaynak dikişinin hatalı kısımlarını tamir kaynağı yöntemi ile temizleyip kaynak etmek gerekir. Nedenleri;

- Kaynak metali ile esas metalin yüzeyleri arasındaki ergime yetersizliğinden,
- Kaynak pasoları arasındaki ergime yetersizliğinden,
- Kök paso ile esas metal arasındaki ergime yetersizliğinden olur.

3. TAMİR KAYNAĞI VE PROSEDÜRÜ

3.1 Hataların tamiri

Tamir kaynağına başlamadan önce tamir prosedürü hazırlanarak onaylatılmalı ve kayda alınmalıdır.



Şekil 3. Hatalı Bölgenin Tamir Kaynağına Hazırlanması

Tamir kaynağı prosedürü aşağıdaki hususları içermelidir:

- Hatalı bölgenin daha önce tamir kaynağı yapıp yapılmadığının bilinmesi
- Hatalı bölgeyi tespit etme yöntemi
- Çatlak uzaklaştırma yöntemi
- Kaynak kanalı (oyuğu) açıldıktan sonra çatlakların ya da hatanın tam olarak uzaklaştırıldığından emin olmak için, manyetik partikül testi ya da penetrant testi ile kontrol edilmesi
- Ön ısıtma ve nüfuz edebilecek ısı gereksinimleri
- Kaynak işlemi sonrası ısıtma işlem gereksinimleri
- Tahribatsız muayene gereksinimleri

3.2 Uygulanacak Kaynak Prosesleri

Kaynak pozisyonuna, malzeme kalınlığına ve kaynak bölgesine ulaşılabilirliğine dikkat edilerek en iyi ergitme verimi olan aşağıdaki kaynak proseslerinden biri seçilebilir.

- Örtülü elektrot ark kaynağı (atelye ve şantiye ortamında her kaynak pozisyonunda)
- MAG kaynağı, özlü tel ile MAG kaynağı (kapalı ortamda düz ve yatay pozisyonda)
- TIG kaynağı (kapalı ortamlarda ve her pozisyonda)
- Oksi-gaz kaynağı (başka imkanların olmadığı durumlarda)

3.3 Dolgu Metali Kullanarak Tamir

- Kaynak dikişinin özellikleri, esas malzemenin özelliklerine uygun olmalıdır.
- Hatalı bölge, iki uçtan, en az 5 mm'lik bir bölgeyi kapsayacak kadar Şekil 3'te B-B kesitinde görüldüğü gibi ve Tablo 2'deki proseslerden biri ile yanılarak temizlenmelidir.
- Yarma işlemi sırasında hatanın tam olarak giderildiğinden

Tablo 1. İç Kaynak Hatları ve Düzeltici Faaliyetler

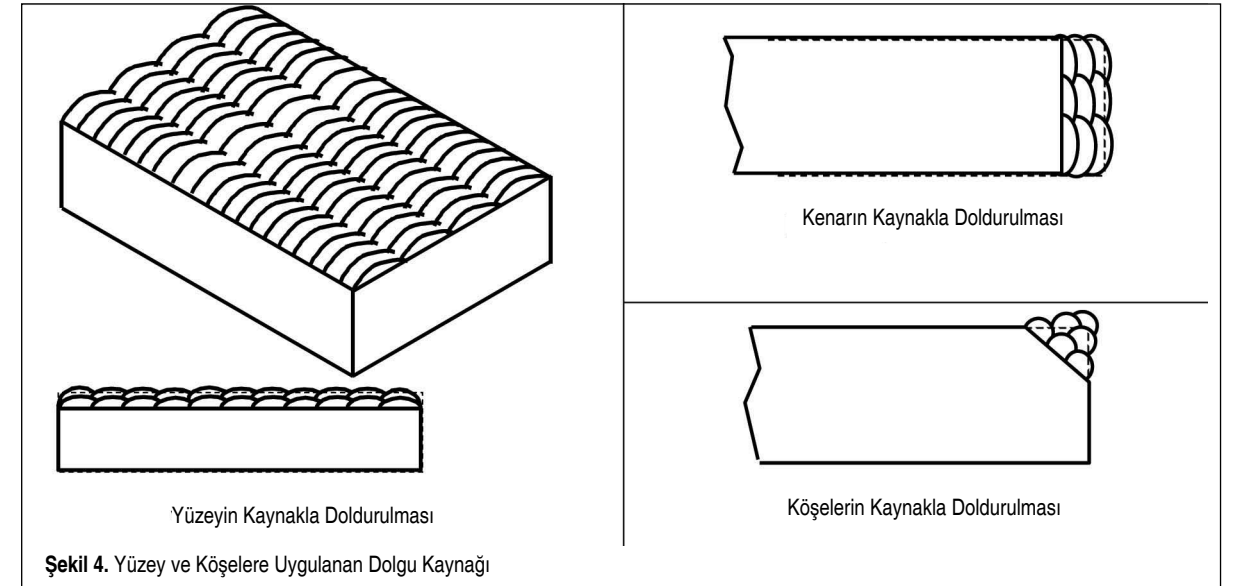
Hat Grubu	Hata Tanımı	Düzeltici Faaliyet
İç Kaynak Hataları	<ul style="list-style-type: none"> • Çatlaklar • Birleşme hataları • Gözenekler • Yetersiz nüfuziyet • Katı Kalıntılar 	Tablo 2'deki prosedürlerden biri uygulanarak hatalı bölge oyulur, kaynakla doldurulur ve taşlanır.

- emin olmak için sıvı penetrant ya da manyetik partikül testi ile kontrol edilmelidir.
- Açılan oluğun kök yarıçapı en az 3 mm, oluk açısı en az 50° olmalıdır.
- Hatalı bölge, daha sonra uygulanacak olan tahribatsız muayene yöntemine ve kaynak işlemine izin verecek şekilde oyulmalıdır.
- Oyulan bölge, kaynak ile doldurulmalıdır.
- Kaynak ile doldurulan bölge, gerekir ise taşlanarak ya da mekanik işlemler ile istenilen şekle getirilir.
- Eğer hata tüm kalınlığı kapsıyorsa, hatalı bölge kesilir, kaynak mühendisi ya da imalat yetkilisinin onayına göre sabit ya da sökülebilir kaynak altlığı kullanılarak kesilen bölge kaynakla doldurulur. İşlenerek orijinal boyut ve ölçülere getirilir.

3.4 Aşınan Yüzey ve Kenarların Doldurulması

Kullanım sırasında aşınan ya da eksik olduğu tespit edilen makina parçalarının yüzey ve köşelerinin doldurulması işlemdir.

- Doldurulacak yüzey, mekanik ya da kimyasal yöntemlerle temizlenir.
- Yüzey ya da eksik köşe kaynak ile doldurulur.



Şekil 4. Yüzey ve Köşelere Uygulanan Dolgu Kaynağı

- Mekanik yöntemlerle ya da taşıyarak kaynak yüzeyi olması gereken ölçüye gelinceye kadar işlenir.

3.5 Yarma ve Oyma İşleminde Kullanılan Prosesler

Yarma veya oyma işlemi, kaynaklı imalatın tamirinin vazgeçilmez bir parçasıdır.

3.5.1 Yarma ve Oyma İşlemi

- Çift taraflı kaynaklarda kök bölgesinde tam nüfuziyeti ve röntgen kalitesini garantilemek için tersten yarma (Şekil 5),
- Punta kaynaklarının ya da geçici kaynakların giderilmesi,
- Köşe ve alın birleştirmelerinde kaynak hataları (Şekil 6),
- Hatalı bölgelerin tamir kaynağına hazırlanması (Şekil 7),
- Geçici olarak kaynatılan parçaların temizlenmesi,
- Aşırı bombelerin giderilmesi için uygulanır.

Yarma ve oyma işlemi için kullanılan prosesleri iki grupta incelemek yerinde olur.

Mekanik Yarma

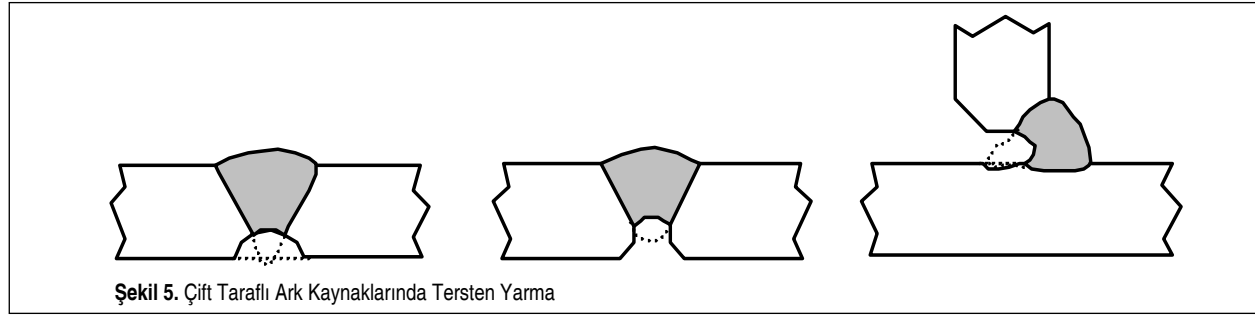
Mekanik yarma işlemlerinde en yaygın kullanılan yöntem taşlamadır. Diğer yöntemlere (frezleme vb.) özel durumlarda başvurulur.

Termik Yarma

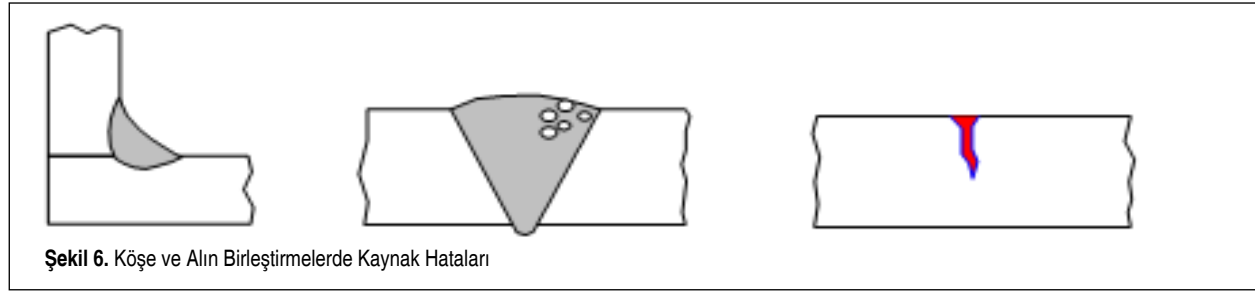
Termik yarma işleminde aşağıdaki prosesler uygulanır:

- Oksi gaz alevi ile yarma
- Örtülü elektrot arkı ile yarma
- Karbon elektrot arkı ile yarma
- Plazma arkı ile yarma

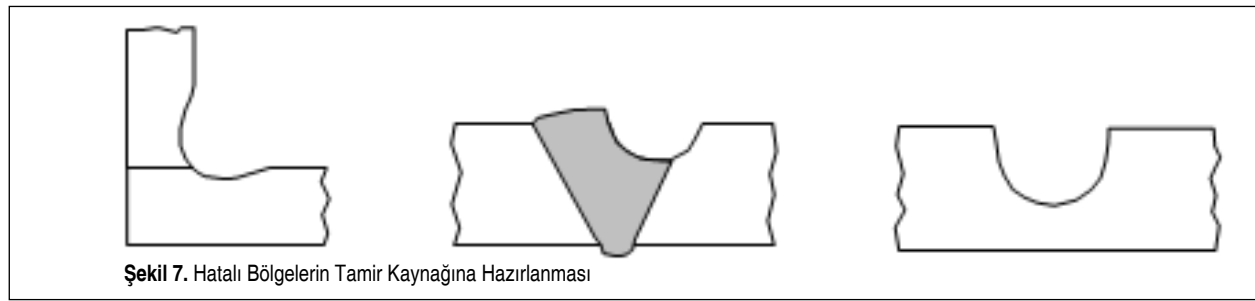
Mekanik yarma prosesinde, çatlakların ve gözeneklerin üzerleri sıvanarak kapanabilir. Ancak termik proseslerde tabanda-



Şekil 5. Çift Taraflı Ark Kaynaklarında Tersten Yarma



Şekil 6. Köşe ve Alın Birleştirmelerde Kaynak Hataları



Şekil 7. Hatalı Bölgelerin Tamir Kaynağına Hazırlanması

ki hatalar daha net görülür. Ayrıca köşelere ve dar yerlere daha kolay yanaşılabilir. Termik yarma işlemleri mekanik yarma işlemlerine göre daha hızlıdır. Buna karşın termik yarma işlemlerinde ısı girdisi daha fazladır, yalnız her termik proses her malzemeye uygulanmayabilir.

3.5.2 Termik Yarma ve Oyma Prosesleri

Termik yarma proseslerinde malzemenin hatalı bölgesi ısıtılarak ergitilir veya oksitlenir. Ergimiş madde ve oksitler üflenerek uzaklaştırılır. Uygulama amaçları ve uygulandıkları malzemeler Tablo 2'de verilmiştir.

Oksi-Gaz Alevi ile Yarma

Alevle yarma, çeliği oksitlemek üzere, oksijen ve yanıcı gazla ihtiyaç vardır. Özel düzeneklerde (kesme üfleçlerinde) %50 oksijen %50 asetilen oranında yakılarak nötr alev ile çelikler önce 900-1000 C° civarlarında ısıtılarak kesme ya da oluk açmaya hazır hale getirilir. Isıtılan bölgeye basınçlı saf oksijen üflenerek çeliğin yanması sağlanır. Yanma sonucunda sıvı halde oluşan cüruf ve oksitler jet hızındaki basınçlı oksijen ile hatalı bölgeden uzaklaştırılır.

Oksijen jetindeki oksijen miktarı, açılan oyuğun derinliğini

ve genişliğini belirler, tipik bir yarma ve oluk açma işlemine ait parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

Isıtıcı alev ve oksijen jeti doğru ayarlandığında, oyuğun şekli, derinliği, yüzey kalitesi ve cürufun uzaklaştırılabilirliği açısından oksijen-asetilen ile yarma işlemi, karbonelektrot ile yarma işlemine göre daha iyidir.

Çalışma Tekniği: Oyuğun derinliği torçun hızı ve açısı tarafından belirlenir. Daha derin bir oyuk elde etmek için torç dikleştirilir ve hızı düşürülür. Sığ bir oyuk elde etmek için torç yatık hale getirilir ve hızı artırılır. Oyuğu genişletmek için torça zik-zak hareketi yaptırılır. Oyuğun profili, nozulun büyüklüğüne ve çalışma parametrelerine bağlıdır. Eğer kesme oksijeninin basıncı düşük olursa, alev bir çeşit yıkama etkisi yapar ve oyuğun dibinde düzgün tırtıllar oluşur. Kesme oksijeninin basıncı yüksek olursa, kesme işlemi sıvı metalin önünde gerçekleşir. Bu durum özellikle dar oyuklarda yarma işleminin durmasına yol açabilir.

Karbon Elektrot ile Yarma

Karbon elektrotla parça arasında bir ark oluşturulur. Ergiyen sıvı metal, elektrota paralel olan basınçlı hava ile oyuktan uzaklaştırılır. Prosesin uygulanması kolaydır. Sistemde elle

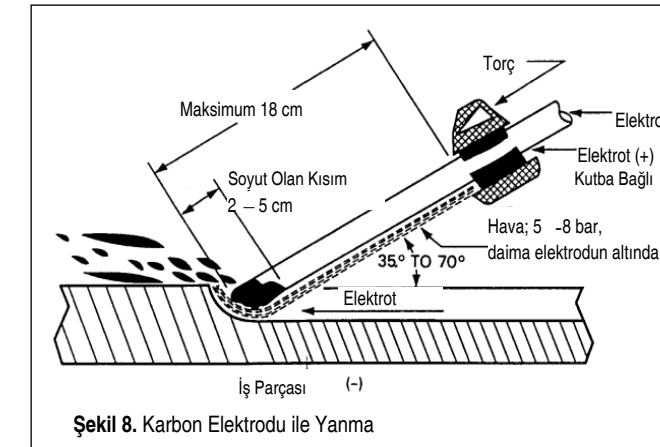
Tablo 2. Yarma ve Oyma Prosesleri Ve Uygulandığı Metaller

Proses	Proses İşlemleri		Metaller
	Birincil	İkincil	
Oksi-Gaz Alevi	Yarma	Kaynak ağzı açma Pah kırma	Düşük karbonlu çelikler, karbon-mangan (yapı) çelikleri, basınçlı kap çelikleri (C ≤ %0.35), düşük alaşımlı çelikler (Cr ≤ %5), dökme demir (400-500 °C'ye ön ısıtma yaparak)
Karbon Elektrodla	Yarma	Kaynak ağzı açma Pah kırma	Düşük karbonlu çelikler, karbon-mangan (yapı) çelikleri, basınçlı kap çelikleri (C≤%0.35), düşük ve yüksek alaşımlı çelikler, dökme demir, nikel esaslı alaşımlar, bakır ve bakır alaşımları, bakır-nikel alaşımları, alüminyum
Çubuk Elektrodla	Yarma	Kaynak ağzı açma Pah kırma	Düşük karbonlu çelikler, karbon-mangan (yapı) çelikleri, basınçlı kap çelikleri, düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, dökme demir, nikel esaslı alaşımlar
Plazma Arkı	Yarma	Kaynak ağzı açma Pah kırma	Alüminyum, paslanmaz çelikler

Açıklama: Bütün prosesler kesme amaçlı kullanılabilir. Yarma işleminde önce bazı metallerde ön ısıtma gerekebilir veya gerekmez.

ark kaynak makinası kullanılır, özel havalı karbon pensesine ihtiyaç vardır. Çalışma hızı yüksektir ve oyuk profili kolay kontrol edilir. Dezavantajı, hava jetinin sıvı metali çok uzaklara fırlatması, yüksek akım (2000 A'e kadar) ve yüksek hava basıncına (5-7 psi kadar) ihtiyaç duyulması nedeniyle çok gürültü olmasıdır.

Çalışma Tekniği: Yarma işlemi, karbon elektrotlarının ucunu parça yüzeyine değdirip arkı oluşturmakla başlar. Örtülü elektrotla kaynaktan farklı olarak ark boyunu oluşturmak için elektrotu geri çekmeye gerek yoktur. Elektrotun altındaki sıvı metal, hava jetiyle hemen uzaklaştırılır. Sıvı metalin etkili bir şekilde giderilmesi için hava jetinin ark bölgesine yöneltilmiş olması ve elektrot ucunun alt tarafını süpürmesi gerekir.



Şekil 8. Karbon Elektrodu ile Yanma

Tablo 3. Elle Uygulanan Oksi-Asetilen Aleviyle Yarma İşleminde Çalışma Parametreleri

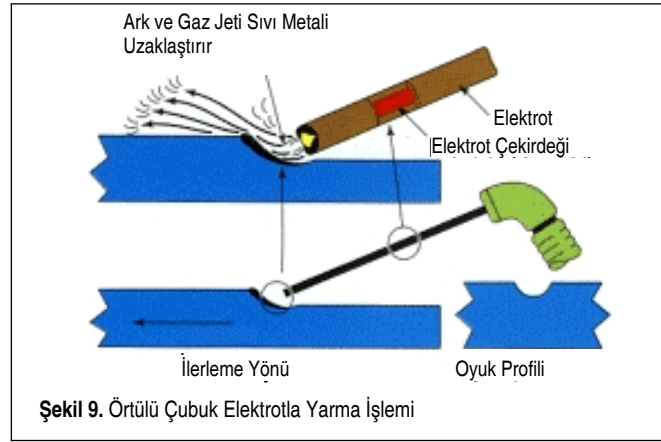
Meme Delik Çapı (mm)	Oyuğun Boyutları		Gaz Basıncı		Gaz Tüketimi			Yarma Hızı (mm/dak)
	Eni (mm)	Derinliği (mm)	Asetilen (Bar)	Oksijen (Bar)	Asetilen (Litre/dak)	Ön Isıtma (Litre/dak)	Oksijen (Litre/dak)	
3	6-8	3-9	0.48	4.2	15	22	62	600
5	8-10	6-12	0.48	5.2	29	31	158	1000
6.5	10-13	10-13	0.55	5.5	36	43	276	1200

Açılan oyuk yüzeyi daha sonra yapılacak tamir kaynağı işlemi için oksitlerden temizlenmiş olmalıdır. Eğer karbon kirlenmesi riski var ise oyuk yüzeyi taşlanmalıdır. Ayrıca yarma işlemi sırasında çatlak riskinin yüksek olduğu düşük alaşımlı yüksek dayançlı çeliklerde karbon elektrotla yardıktan sonra taşlama yapılmalıdır. Elektrotun yüzeyindeki bakır, yarma işlemi sırasında sıvı metale karışır. Eğer sıvı metal oyuğun yüzeyinden tam olarak giderilmemiş ise bakır yüzeyde kalır ve daha sonra kaynak yapıldığında çatlamaya neden olabilir. Bu nedenle, yüzeye yapışmış olan sıvı metaller (oksitler) tamir kaynağı öncesi taşlanarak temizlenmelidir.

Örtülü Çubuk Elektrot ile Yarma

Örtülü elektrotla ark kaynağında olduğu gibi, ark elektrot ile iş parçası arasında meydana gelir. Çubuk elektrotla yarma işleminde kaynaktan farklı olarak güçlü bir ark kuvveti ve gaz jeti oluşturmak amacıyla kalın örtülü kesme ve oluk açma elektrotu kullanılır. Yarma işleminde temiz bir yüzey elde edebilmek için sıvı metal ark bölgesinden hızla uzaklaştırılır. Yalnız dışarıdan bir gaz ya da hava jeti uygulanmadığı için oyuğun yüzeyi, oksijen-asetilen ya da elektrotla yarma işleminde olduğu kadar temiz olmayabilir.

Genel amaçlı uygulamalarda yarma işleminden sonra yüzeyin taşlanmasına gerek yoktur; ancak paslanmaz çeliklerde yüzeyde daha yüksek karbonlu bir tabaka kaldığı için bu tabakanın taşlanarak giderilmesi gerekir.



Şekil 9. Örtülü Çubuk Elektrotla Yarma İşlemi

Çalışma Tekniği: Örtülü elektrot parçaya 75°'lik bir açıyla tutularak ark oluşturulur. Ark oluşturulduğunda elektrot parçaya 15-20° açı yapacak şekilde hemen geri doğru yatırılır. Elektrotun ucu hareket yönünü gösterecek şekilde hafifçe ileri doğru hareket ettirilir. Daha sonra geri çekilerek elektrodun örtüsünden çıkan gaz jetinin ergimiş olan metali uzaklaştırması sağlanır. Elektrot bu şekilde ileri geri hareket ettirilerek yarma işlemine devam edilir.

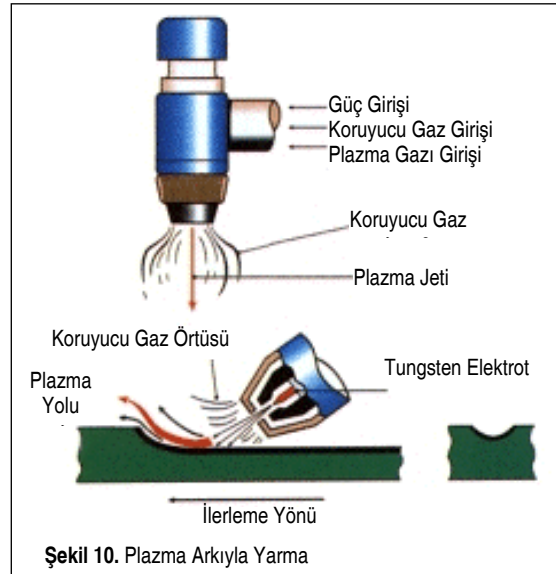
Açılan oyukun derinliğinin ve genişliğinin sabit olması gerekir. Elektrot açısı 20°'nin üzerine çıkarsa, nüfuziyetin artması nedeniyle ergimiş cüruf ve sıvı metal miktarı artar. Nüfuziyetin artması durumunda yarma işleminin kontrolü zorlaşır ve yüzey profili kötüleşir.

Plazma Arkıyla Yarma

Plazma arkıyla yarma, plazma ark proseslerinin bir varyasyonudur. Plazma arkı, tungsten elektrodla parça arasında oluşur. İnce delikli bakır bir nozulla ark daraltılarak yoğun bir plazma elde edilir. Elektrod nozulun gerisinde tutularak, plazma oluşturan gaz diğer gazlardan ayrı tutularak oluşan sıvı metal kanaldan uzaklaştırılır.

Plazma arkının, sıcaklığı ve gücü, akım ve plazma gazının akışının hızı tarafından belirlenir. Bu sayede, oyukun boyu ve şekli hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Parça yüzeyindeki hatalar kolayca temizlenebilir. Yarma işlemi sırasında ışığın ve sıcak metalin etkilerinden korunmak için normal önlemler alınır. Diğer yarma proseslerinden farklı olarak, oluşan du-man metal artıkları ve oksit kalıntıları daha uzağa gider.

Makina ve Ekipmanı: Yarma işleminde kullanılacak olan makinanın boşa çalışma voltajının 100 voltun üzerinde olması gerekir. Torç, artı; yapılacak olan hatalı parça eksi kutba bağlanır. Yarma için kullanılan plazma torcu, kesme için kullanılan torç ile aynıdır. Soğutma tipi suyla ya da havaylıdır, tek veya çift gazla çalışacak şekildedir. Argon ya da argon karışımlarından tungsten elektrot kullanılır. Plazma gazı olarak hava kullanıldığında oksidasyona dirençli olması için hafniyum uçlu bakır elektrodlar kullanılmalıdır.



Şekil 10. Plazma Arkıyla Yarma

Çalışma Tekniği: Yarma işlemi sırasında torç, kontrollü bir hızla ileri doğru itilir. Her 200-250 mm'de bir plazma jeti oyukunun derinliğini ya da genişliğini değiştirecek şekilde yeniden ayarlanır veya aynı koşullarda yarmaya devam edilir. Temelde proses parametreleri; akım, gaz debisi ve yarma hızıdır.

Torçun parçaya olan mesafesinin ve parçayla yaptığı açının, ilerleme hızına, oyuk profiline ve yüzey kalitesine önemli bir etkisi vardır. Torçun parçadan uzaklığı normalde 20 mm, parçayla açısı geri doğru yatık konumda 40-45° olmalıdır. Tek pasolu bir yarma sırasında yaklaşık 6 mm derinliğinde bir oyuk elde edilebilir.

Nozulun içine çapak birikmesini önlemek için torcun parçaya olan mesafesinin 12 mm'den az olmaması, 25 mm'den de fazla olmaması gerekir. Aksi halde arkın ve gazların kuvvetleri azaldığı için derinlik azalır. Torcun açısı arttıkça da oyuk derinliği artar, genişliği azalır.

4. SONUÇ

Metallerde en yaygın birleştirme yöntemi olan ergitme kaynağının kalitesini; kaynak hataları, kaynak iç gerilmeleri ve kaynak bölgesinin iç yapısı da belirlemektedir. Kaynak kalitesinin kaynak öncesi ve sonrası işlemler ya da önlemler ile kontrol altına alınması ile kaynaklı çelik yapıların ani kırılma eğilimini azaltmak mümkündür. Her şeyden önce, kaynak bölgesi ve HAZ bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıkların ardından hızlı soğumalar malzemede önemli sertlikler ve iç gerilmelere neden olur. Bu durum kısmen ısı işlemlerle giderilebilirse de tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle, imalat sırasında ya da imalat sonrası oluşan hataların giderilmesi için tamir kaynağı devreye girer.

Hataların ortaya çıktığı anlaşıldığında; tamir kaynağından sorumlu olan teknik elemanın deneyimlerinin ışığı altında aşağıdaki bilgiler araştırılır:

• Hatalı elemanın kaynak ile tamir edilip edilemeyeceği,

- Hatalı elemanın kaynak ile tamirinden başka kolay, hızlı ve daha ekonomik bir tamir yönteminin bulunup bulunmadığı,
- Hatalı elemanın bulunduğu yerden sökülerek mi yoksa sökülmeden mi kaynak yapılabileceği,
- Hatalı elemanın kaynak yapıldıktan sonra kullanılabilirlik veriminin ve ömrünün ne olacağı sorularına cevap bulunması gerekir. Ancak bu soruların cevapları alındıktan sonra tamir kaynağının süresi ve kalitesi hakkında kesin karara varılabilir. Tamir kaynağında uygulama aşamasına gelinebilmesi için aşağıdaki temel adımları tamamlamak gerekir:
- Hatalı ve aşınmış olan bölge ile ilgili gerekli bilginin sağlanması,
- Tamir kaynağının teknolojik ve ekonomik maliyeti ile hatalı elemanın kaynaktan sonra kullanılabilirliği hakkında tahmin yapılması,
- Yukardan gelen bilgilerden faydalanarak gerekli kaynak proseslerinin tanımlanıp, kaynağın nasıl yapılabileceğinin tespit edilmesi,
- Tespit edilen bilgi ve kaynak parametrelerinin yardımı ile tamir kaynağının teknik elemanlar gözetiminde, deneyimli kaynakçılar tarafından yapılması sağlanmalıdır.

5. ÖNERİLER

- Yarma ve oluk açma işlemine çatlakların bitiminden sonra en az 5 mm daha devam ediniz.
- Çatlak boyu esas malzemenin kenarına kadar uzamış ise ya da kenara olan mesafesi 50 mm'den az kalmış ise yarma ve oluk açma işlemine kenara kadar devam ediniz.
- Tamir kaynağı öncesi oyulan kenara ~30 mm genişliğinde bir girdi çıktı parçası puntalayınız. Çünkü tamir kaynağının başlama bitiş hataları bu parça üzerinde kalacaktır. Tamir işlemlerinden sonra bu parçayı kırıp punta kalıntılarını taşlama taşı ile temizleyiniz.
- Yarma ve oluk açma işleminde keskin köşelerden kaçınınız. Çünkü keskin köşeler ısı işlem ve kaynak esnasında verilen ısı enerjisinin etkisinden dolayı çatlama riskini artırır.
- Yarma ya da oluk açma işleminden sonra, çatlakın ya da hatanın tam olarak uzaklaştırıldığından emin olmak için, manyetik partikül testi ya da sıvı penetrant testi uygulayınız.
- Kaynak ile tamiri hatalı bölgede en fazla iki defa uygulayınız.
- Isı girdisinden dolayı sertleşmeye hassas çeliklerden yapılmış yapı elemanlarındaki kaynak dikişi ağız hazırlığında kaynaklanacak yüzeylerdeki sertleşmenin (çatlak tehlikesi) önüne geçmek için ön tav uygulayınız.

- Karbon elektrot ile yapılan yarma ya da oluk açma işleminden sonra, oyuk yüzeyine sıvı karbon ve bakır kalıntılarını taşlama taşı ile temizleyiniz.
- Yapı malzemesinin içerdiği mikro alaşım elementleri ve oluşturdukları iç yapı dolayısıyla kaynak sonrası, sıcak ve soğuk çatlak riskinden dolayı ön tav ve pasolar arası sıcaklıklara özen gösteriniz.

KAYNAKÇA

1. Ertürk, İ. 1995. "İleri Kaynak Teknikleri Ders Notları," G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ders Notları, Ankara.
2. Ertürk, İ. 1989. Oksi-Asetilen Kaynağı, T.C. Devlet Bakanlığı Yayını Yayın No: 38, Başbakanlık Basım Evi, Ankara.
3. Ertürk, İ. 2000. "İş Makinalarında Tamir Bakım Kaynağı," İş Makinaları Mühendisleri Birliği, Ankara.
4. Zeybek, M. 2010. "Metal Malzemelerdeki Hataların Tamiri," Basılmamış Seminer Notu, Ankara.
5. Dikicioğlu, A., Vural, M. 1993. "Sert Dolgu Kaynağı ile Tamir Bakım," İTÜ, Makina Fakültesi, İstanbul.
6. Toprakoğlu, B. 1996. "Kaynak Dikişlerinde Rastlanan Hatalar ve Önleme Yolları," Mühendis Makina, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayını, Kaynak Özel Sayısı 436, Ankara.
7. Kaluç, E., Sarı, N., Aytaç, Y. 1996. "WSTE İnce Taneli Yapı Çeliğinin Örtülü Elektrot İle Ark Kaynağında Gerilimleri Azaltma Tavının İTAB Tokluğuna Etkisi," Mühendis ve Makine, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayını, Kaynak Özel Sayısı 440, Ankara.
8. Anık, S., Oğur, A., Vural, M. 1996. Termik Kesme Teknolojisi, Gedik Eğitim Vakfı Yayını, Yayın No: 2, İstanbul.
9. Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M. 1994. "Kaynaklı Elektrodlardaki Hatalar ve Kaliteye Etkisi," Metal ve Kaynak Dergisi, sayı 57, İstanbul.
10. Anonim, 1998. "Tamir Kaynakları," ODTÜ, Kaynak Mühendisliği, Ders Notları, Ankara.
11. Anık, S. 1991. Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Holding Yayını, Gayrettepe, İstanbul.
12. Tülbentçi, K., Kaluç, E. "Kazı Makinalarında Aşınan Parçaların Kaynakla Tamirinin Teknoloji ve Ekonomik Önemi," Kaynak Dünyası, sayı 91 (2).
13. Wirtz, H., Hess, H. 1969. "Schützende Oberflächen durch Schweißen und Metallspritzen," Band 56.
14. Ertürk, İ. 2014. "Kaynaklı Çelik Yapılarda Kalite Sorunları ve Standartlar," Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, 21-23 Mayıs 2014, C.B.Ü, Manisa-Türkiye.
15. Özden, N. 1985. Kaynağın Isıl İşlemi, Aliğa/İzmir.
16. Oğuz, B. 1987. Karbonlu ve Alaşımli Çeliklerin Kaynağı, Metalurji-Uygulama, Oerlikon Kaynak Elektrodları A.Ş., İstanbul.
17. Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E. 1991. Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayını, İstanbul.

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI UYGULAMALARI*

Emre Doruk**

TOFAŞ AR-GE
emre.doruk@tofas.com.tr

Murat Pakdil

Abant İzzet Baysal Üniversitesi,
Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Bolu
muratpakdil@ibu.edu.tr

Gürel Çam

İskenderun Teknik Üniversitesi,
Makina Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü
İskenderun-Hatay
gurelcam@gmail.com

İsmail Durgun

TOFAŞ AR-GE, Bursa
ismail.durgun@tofas.com.tr

Utku Can Kumru

TOFAŞ AR-GE, Bursa
utku.kumru@tofas.com.tr

ÖZ

Otomotiv sektöründe farklı ve aynı türdeki çelik sacların birleştirilmesinde sıklıkla kaynak işlemi kullanılmaktadır. Bu birleştirme işleminde en yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemi ise elektrik direnç nokta (punta) kaynağıdır. Bir otomobilde ortalama 3000 ila 6000 arasında punta kaynağı bulunmaktadır. Punta kaynağının avantajları; nispeten temiz ve çevreci bir proses, otomasyona uygun ve kolay uygulanabilir bir yöntem olması, dolgu metaline ihtiyacın olmaması, kazalara ve yaralanmalara neden olabilecek açık alevin bulunmaması ve kaynak işleminin uzman operatör gerektirmemesi şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada, araç gövdesi üzerinde manuel ve robotik otomasyonlarla gerçekleştirilen punta kaynak uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir. Punta kaynak işleminde kullanılan farklı elektrotlar, bunların soğutulması, bakımları ve ömürleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, seri üretimde punta kaynak kalitesini arttırmak için yapılan kaynak parametrelerinin optimizasyonu da ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak teknolojileri, otomotiv sektörü, direnç nokta kaynağı, kaynak edilebilirlik

RESISTANCE SPOT WELDING APPLICATIONS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

Welding process is often used in joining of similar and dissimilar steel sheets in the automotive industry. In these joining applications, resistance spot welding is the most commonly used welding method. There are on average around 3000 or 6000 spot welds in a car. The advantages of resistance spot welding are as follows: it is a relative clean and environmentally friendly process, suitable for automation and readily applicable, does not require filler metal, produce open flame that can cause accidents and injury, and require an expert operator. This study provides information about manual and robotic spot welding applications which are performed on the vehicle body. It focusses on different types of spot welding electrodes used, their cooling methods, maintenance and life-cycles. In addition, spot welding optimization which is used for increasing weld quality during mass production is mentioned.

Keywords: Welding technologies, automotive sector, resistance spot welding, weldability

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 02.02.2016

* 20-21 Kasım 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara'da düzenlenen Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., Kumru, U. C., 2016. "Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Uygulamaları," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 673, s. 48-53.

1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv sektöründe güvenlik standartlarının iyileştirilmesi ve araç hafifletme çalışmaları, araştırmacıları farklı malzemelere, dolayısıyla farklı imalat yöntemlerine yöneltmiştir. Araç üretim evrelerinin en önemli basamaklarından biri olan gövde imalatında birleştirme yöntemleri sürekli değişmekte ve gelişmektedir. Araç imalatında yeni bir birleştirme yöntemi olmasa da hala en önemli birleştirme yöntemi elektrik direnç nokta kaynak (punta kaynağı) yöntemidir. Günümüzde üretilen sedan araç gövdelerinde ortalama 4.000 ile 6.000 arasında nokta kaynağı uygulanmaktadır. Tablo 1'de çeşitli markalara ait araçlardaki nokta kaynak sayıları gösterilmektedir [1, 2, 3]. Diğer kaynak yöntemlerine göre araç gövdesinin oluşturulmasında %85 oranında direnç nokta kaynağı kullanılır.

Günümüzde araç üretim bantlarında nokta kaynağı ağırlıklı olarak robotik uygulamalarla gerçekleştirilmektedir. Üretim

Tablo 1. Çeşitli Markalara ait Araçlardaki Nokta Kaynak Sayıları

Araç Modeli	Nokta Kaynak Adedi
Alfa Romeo Giulietta	3676
Volvo S60	3966
Citroen C4	3938
Saab 9-5 Sedan	4250
Honda CR-Z	4254
Opel Meriva	4533
Ford Grand C-MAX	5011
Fiat Linea	5031
Renault Latitude	5208
VW Sharan	5600
BMW 5 Series	5800

bantlarının bazı bölümlerinde de manuel nokta kaynak uygulamaları mevcuttur. Şekil 1'de robotik nokta kaynak uygulaması görülmektedir.

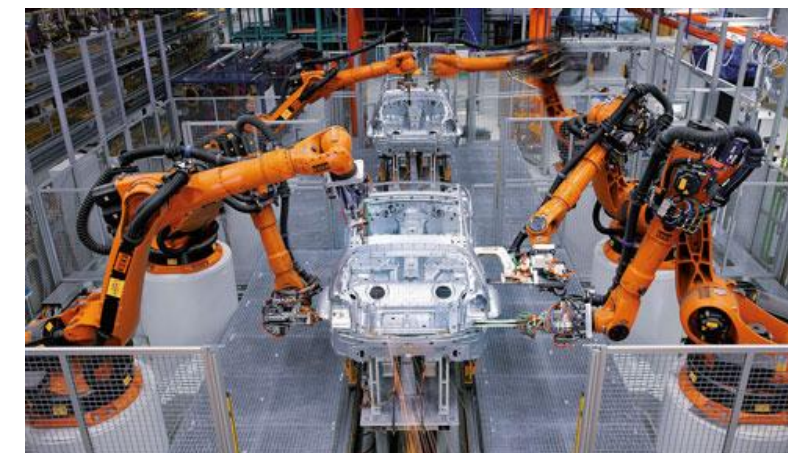
Araç üreticileri özellikle istenilen güvenlik kriterlerini sağlama için nokta kaynaklarının optimum sayısının tespiti ve uygulamadaki kontrolleri için çok sayıda faaliyet gerçekleştirirler. Oluşan bilgi birikimi yanında, sanal analiz sonuçları da nokta kaynak sayısının tespiti için önemli girdiler oluşturur. Her bir kaynak noktası ilave bir maliyet gerektirdiği için optimum nokta kaynak sayısının bulunması önemlidir.

Araç geliştirme çalışmaları ile birlikte nokta kaynak uygulama parametreleri de geliştirilmeye başlanır. Nokta kaynak sayısına ve istenilen üretim sayısına göre gerekli olan aparatlar ve atölye yerleşimi belirlenir. Her bir nokta kaynağının hangi saclar (malzeme, kaplama, kalınlık) arasında gerçekleşeceği bilgisine göre parametre değerleri belirlenir. Belirlenen bu parametre değerleri ile geliştirme sürecindeki prototip ve diğer test araçlarının üretimleri gerçekleştirilir. Araçlar ile gerçekleştirilen testler ile de parametrelerin doğrulanması sağlanmış olur. Seri üretime geçildiğinde de araç gövdesi üretim hatlarında nokta kaynak kalitesinin kontrolünde en yaygın olarak ultrasonik test yöntemi kullanılır. Özellikle güvenlikle ilgili bölgelerdeki nokta kaynakları her vardiya da kontrol edilir. Yine belirli periyodlarda tahribatlı testler ile nokta kaynak kontrolü de yapılır.

OTOMOBİL ÜRETİMİ VE DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Otomotiv sektöründe araç imalat süreci incelendiğinde, temelde 3 ana aşama mevcuttur. Bunlar;

- **Gövde:** Metal parçaların birleştirilmesi ile ana gövdenin oluşturulması
- **Boya:** Metalik gövdenin boyanması
- **Montaj:** Plastik, metal, elektrik-elektronik donanım, motor, şanzıman vb. parçaların gövdeye montajı



Şekil 1. Robotik Nokta Kaynak Uygulaması [4-5]



Özellikle gövde imalatında kullanılan kaynak bağlantılarından beklenen özellikler kısaca şu şekilde açıklanabilir [6]:

- Yapısal karakteristikler
 - ✓ Mekanik dayanım
 - ✓ Yorulma dayanımı
 - ✓ Eğilme, burulma, rijitlik
- Korozyon Dayanımı
- Sızdırmazlık
- Estetik

2.1 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Direnç Nokta Kaynağı Parametrelerinin Belirlenmesi

Şekil 2’de, TOFAŞ’ta direnç nokta kaynağında kullanılan kaynak yapılabilir geometriler ve izin verilen kalınlık oranları gösterilmektedir. Özel durumlarda şekilde belirtilen kalınlık oranları düşürülebilmektedir. Üç sac parçalı birleştirmelerde, en ince sac ortada konumlandırılmalıdır. Birleştirmelerde tek bir sacın minimum kalınlığı 0,6 mm, maksimum toplam sac

kalınlığı ise 6 mm’dir. Ancak istisnai durumlarda toplam 10 mm kalınlığa çıkmak mümkündür. Parametreleri belirtilen standarda uygun olmayan saclar da kaynak yapılabilir; fakat daha uzun ve daha kompleks işlemlere ihtiyaç duyulur.

Kaynak ile birleştirilecek parçalar fonksiyonel bir sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Bu sınıflandırma, kaynak bölgesine gelen yük dağılımına ve kullanım ve/veya görünüm açısına göre yapılmaktadır. TOFAŞ’ta kullanılan sac kalınlığı ve çekirdek çapı oranları ise Tablo 2’de gösterilmektedir.

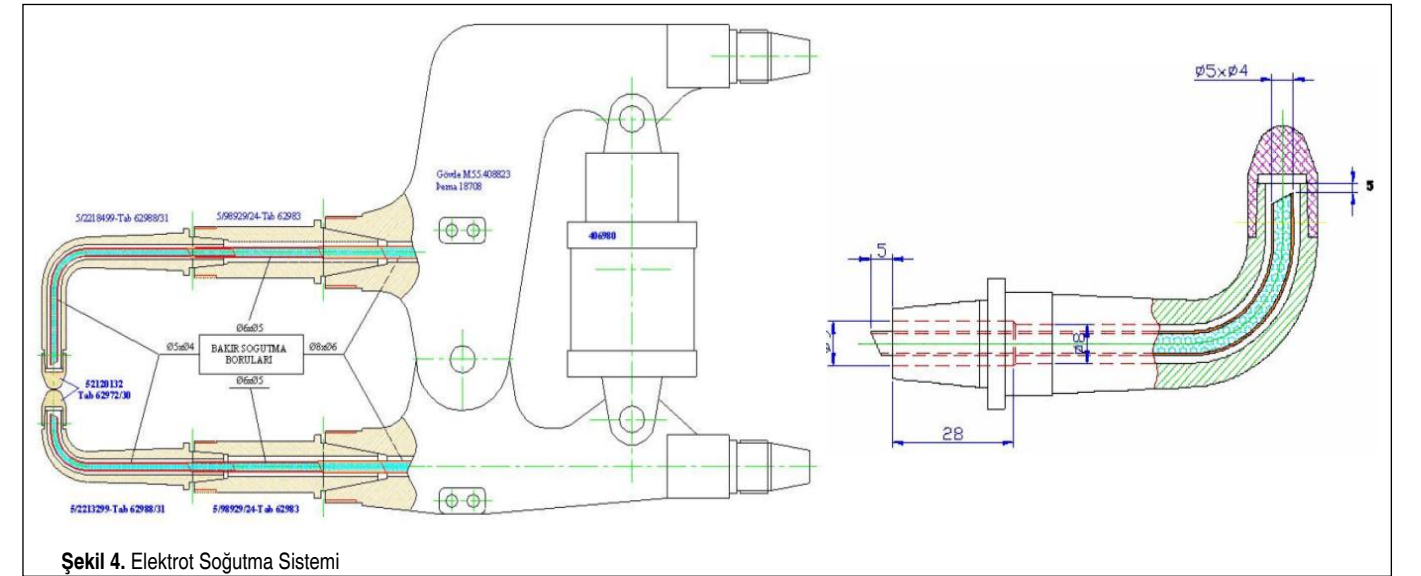
Punta kaynak kalitesi açısından her operasyonun ilgili pense-sinde uygun elektrot kullanılmalıdır. Tablo 3’te elektrot ucu seçimi ile ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 3. Elektrot Ucu Seçim Tablosu

Sac Kalınlığı	Elektrot Çeşidi
1.5 mm’ye kadar	Z-trode
0.6 mm ve altındaki saclar	N-trode
1.5 mm ve üzerindeki saclar	N-trode



Şekil 3. Elektrot Tipleri: a) Z-Trode (Φ6 mm), b) N-Trode (Φ8 mm)



Şekil 4. Elektrot Soğutma Sistemi

1	2	3	4	5
A B C	A B C	A B C	A B C	A B C
A = B = C	A < B < C A/C ≥ 1/2	B < A < C A/C ≥ 1/2	C < A < B C/B ≥ 1/2	A = B < C A/C ≥ 1/2
6	7	8	9	10
A B C	A B C	A B C	A B	A B
A < B = C A/C ≥ 1/2	A = C < B A/B ≥ 1/2	B < A = C	A = B	A < B A/B ≥ 1/3.2

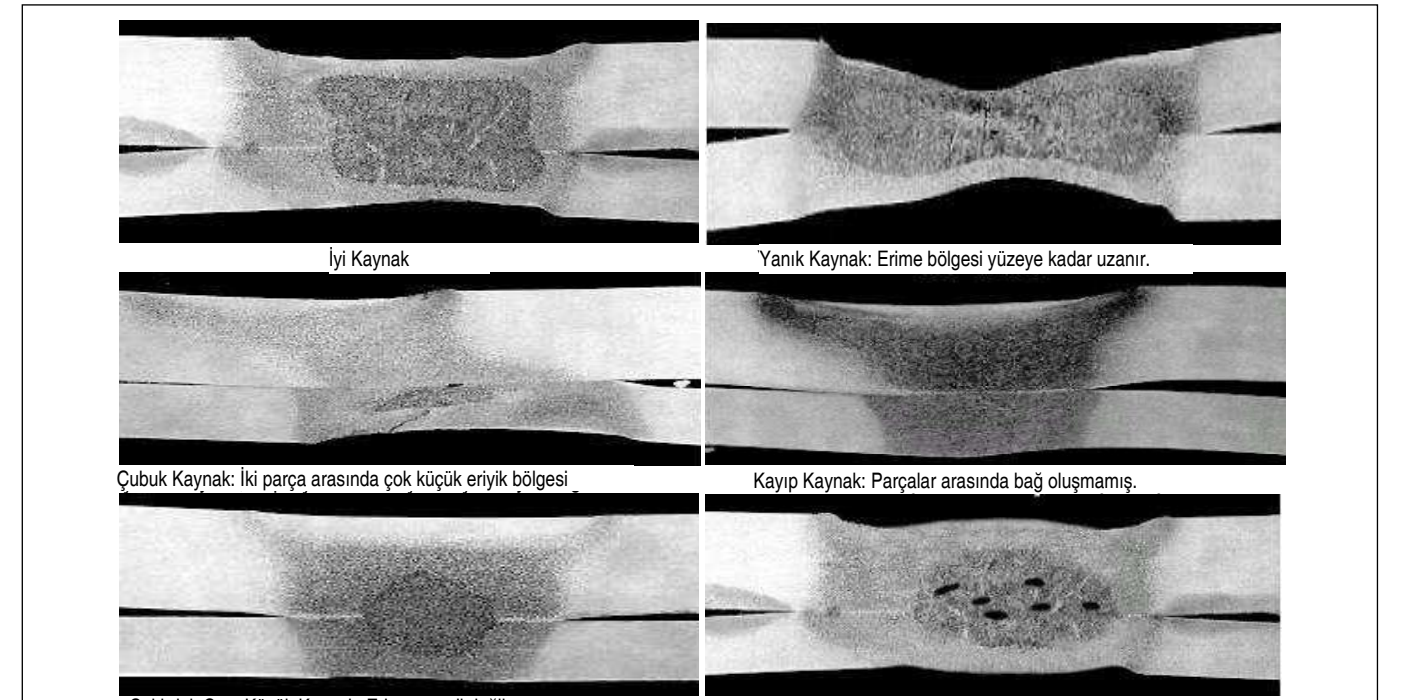
Şekil 2. Direnç Nokta Kaynağı Standart Kalınlık Oranları

Tablo 2. Sac Kalınlığı ve Çekirdek Çapı

Sac Kalınlığı (mm)	Minimum Çekirdek Çapı (mm)	Optimum Çekirdek Çapı (mm)
0.7	3.5	4.6
0.8	3.8	4.9
0.9	4	5.2
1	4.2	5.5
1.2	4.6	6
1.5	5.2	6.7
1.8	5.7	7.4

Gövde imalatında %95 oranında Z-trode (Φ6 mm) ve N-trode (Φ8 mm) elektrotlar kullanılmaktadır. Z-trode tipi elektrotlar görünüm itibariyle daha sivri tiptedir, N-trode ise uç kısmı Z-trode elektroda göre daha düzdür. Şekil 3’te Z-trode ve N-trode elektrot uçları görülmektedir.

Günümüzde kullanılan bu elektrotlara çeşitli kaplamalar, ısı işlemleri ve kroyojenik işlemler uygulanarak aşınma ömürlerinin artırılması sağlanmaktadır. Bu çalışmalar rekabetin çok fazla olduğu otomotiv sektöründe çok önemlidir. Ortalama bir araçta 4000-6000 arasında punta kaynak olduğu düşünülürse, bu uçların ömürlerinin artırılması ciddi maliyet indirimleri sağlamaktadır.



Şekil 5. Uygulama Parametreleri Değişimine Bağlı Olarak Farklı Kalitede Gerçekleşen Nokta Kaynak Çeşitleri [7]

2.2 Elektrot Soğutma Sistemleri

Elektrotların soğutulması işlemi, kaynaklama esnasında elektrot üzerinde oluşan yüksek sıcaklığın malzeme iç yapısını bozmasını, elektrodun kullanım ömrünü uzatması ve kaynak kalitesini arttırması için yapılmaktadır. Etkili bir soğutma için soğutma suyunun debisi, debisinin minimum 3 lt/dak olması istenmektedir. Soğutma borusunun elektroda mesafesi ise 5 mm olmalıdır. Şekil 4'te elektrot soğutma sistemi geometrik ölçüleri gösterilmektedir [6].

2.3 Kaynak Kalitesinin İzlenmesi

Şekil 5'te görüldüğü gibi, uygulama sırasında proseste meydana gelen değişiklikler nokta kaynağından beklenen performansın elde edilmesini engellemektedir. Bu nedenle, proses parametrelerinin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir. Araç üreticileri belirledikleri periyotlar ile bu kontrol işlemlerini gerçekleştirirler. Fakat istenilen sonucun elde edilmediğinden emin olmak için de nokta kaynaklarının istenilen özelliklerde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini kontrol altında tutmak istemektedirler.

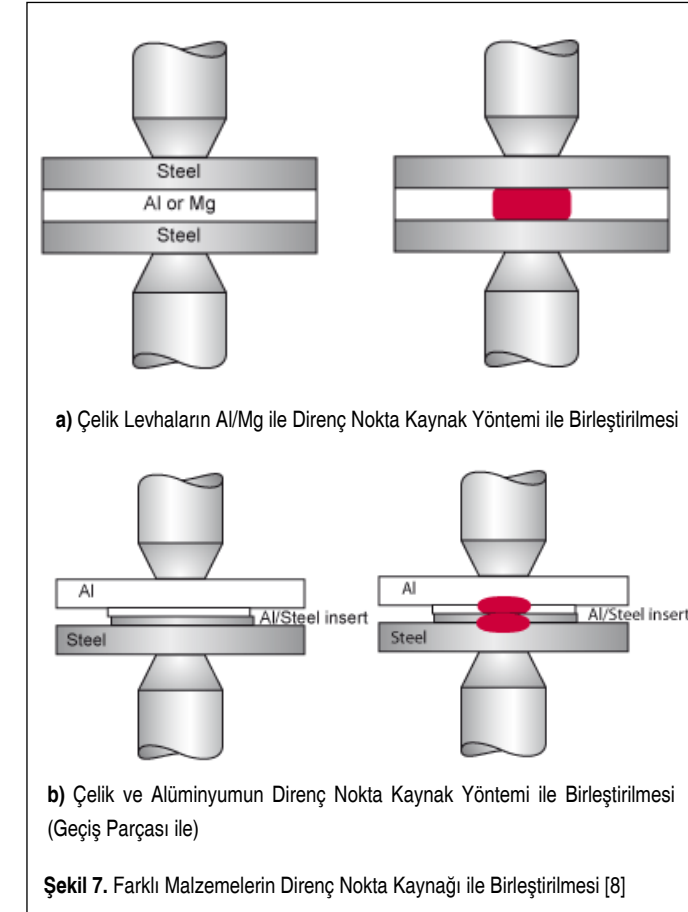
Şekil 6'da gösterildiği gibi, nokta kaynak kalitesini ölçme yöntemlerinden birisi de tahribatlı kontroldür. Tahribatlı kontrol sonucunda, nokta kaynağının gerçekleştiği kaynak çekirdek çapı ve iki parçanın kopma şekli bize kaynak kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Eğer uygun parametreler kullanılmış ve uygun bir işçilik yapılmış ise başarılı bir nokta kaynağı elde edilebilir. Fakat elektrotlar sac parçalara dik tutulmamış ise deformasyonlu nokta kaynağı, elektrotlar arasında istenilenden fazla bir kuvvet uygulanmış ise kuv-

vet yükselmeli nokta kaynağı ve kaynak sırasında elektrotun iletken bir yüzeye teması söz konusu ise şasele nokta kaynağı elde edilir. İstenilmeyen bu kaynaklarda nokta kaynağının çekirdek çapı küçük olduğundan kaynak kopabilir. Bu yöntem, genellikle parametreler belirlendikten sonra parametrelerin başarılarından emin olmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, araç üreticileri belirli periyotlar ile üretim hattından aldıkları komple bir araç gövdesine tahribatlı kontrol uygulayarak nokta kaynak kontrol işlemlerini gerçekleştirirler. Fakat takdir edilmelidir ki bu yöntem, hem pahalı hem de zaman alıcı bir yöntemdir. Dolayısıyla, günde binden fazla araç üretimi gerçekleştiren firmalarda hem ucuz hem de kolay uygulanabilmesi nedeni ile tahribatsız bir yöntem olan ultrasonik kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Böylece bir uygunsuzluk yakalandığında, geriye dönüp önlem almak ve çok az sayıda hatalı üretimi yakalayarak müşteriye gitmeden düzeltmek mümkün olmaktadır.

Nokta kaynağının kalitesi hakkında bir tahminde bulunabilmek için bilinmesi gereken en önemli şey kaynak çekirdeğinin üç boyutlu ölçüleridir [3]. Ultrasonik kontrol yönteminde kaynak çekirdeğinin bu ölçüleri, kaynak çekirdeği içerisinde ana metale dik ilerleyen ultrasonik dalgalara ait yankıların ses mesafesi ve zayıflama özellikleri ölçülerek belirlenebilir. Tipik bir ultrasonik nokta kaynağı test sistemi iki ana elemandan oluşur; bir normal prop ve bir ultrasonik test cihazı. Bununla birlikte, hem prop hem de ultrasonik test cihazı standart ultrasonik testler için gerekli olmayan bazı ek özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin kullanılan prop, test edilecek malzeme kalınlığına uygun frekans ve kristal çapına; ultrasonik test cihazı ise yüksek çözünürlüklü bir ekrana sahip olmalıdır.

3. FARKLI MALZEMELERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

Otomotiv sektöründe, farklı malzemelerden ve kalınlıklardan oluşan karışım kombinasyonlarının birleştirilmesi gerekebilmektedir. Buna örnek olarak, derin çekme çelikleri ile krom-nikel-çelikleri veya kaplamalı çelik saclar ve alüminyum/



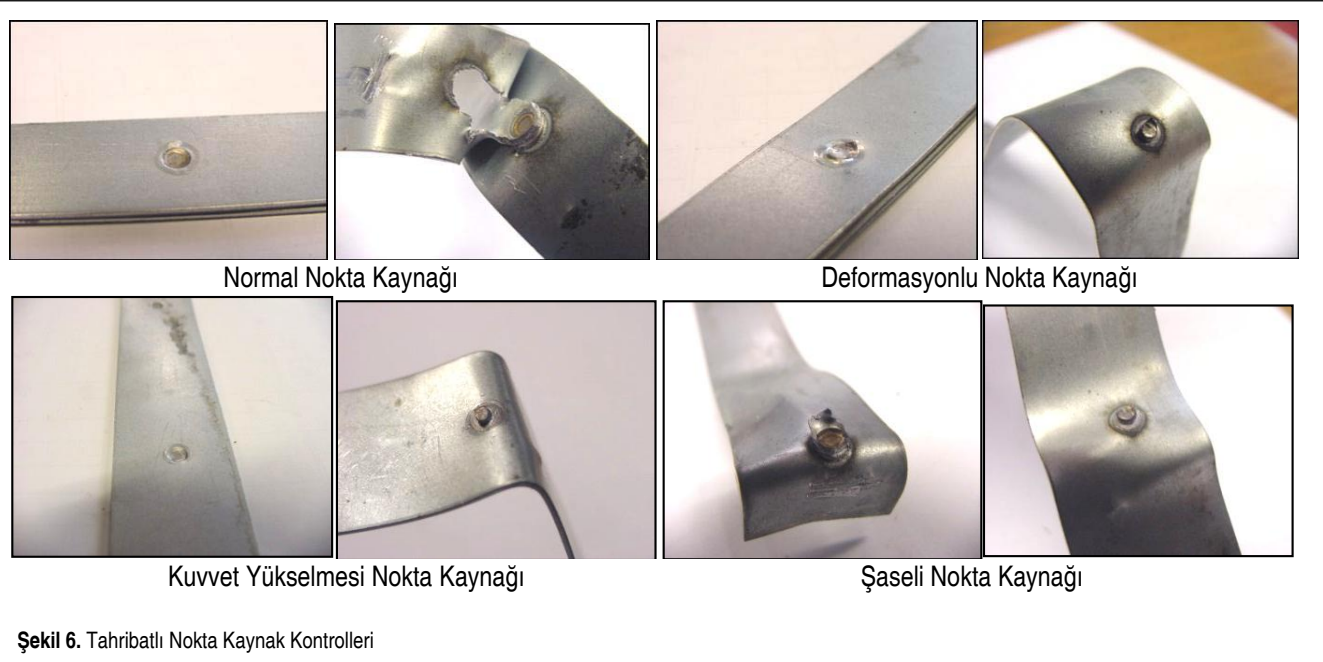
alüminyum alaşımları gösterilebilir. Bunun yanı sıra, yüksek alaşımlı çelik ve magnezyum birleştirmeleri üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Çeliği alüminyum veya magnezyuma kaynatmak, konvansiyonel direnç nokta kaynağı ekipmanları ile gerçekleştirilebilmektedir. Nitrojen bakımından zenginleştirilmiş tabaka, çelik ile Al/Mg arasında oluşacak intermetalik fazları engelleyerek birleştirilmeyi (kaynak edilebilirliği) mümkün kılar. Kaynak bölgesi mukavemeti alüminyum/alüminyum birleştirmelerinkine kadar sağlamdır. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise birleştirilecek çelik-alüminyum arasına bir geçiş parçası koymaktır. Şekil 7'de farklı malzemelerin direnç nokta kaynağı ile birleştirilmeleri gösterilmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv sektöründeki araç gövde imalatında en önemli birleştirme yöntemi olarak kullanılan direnç nokta kaynağı tartışılmıştır. Araç başına 4000 ila 6000 adet arasında nokta kaynağının bulunduğu düşünüldüğünde bu yöntemin önemi daha da artmaktadır. Araştırmacılar nokta kaynak optimizasyonu ile modal analiz yapmak suretiyle, burulmaya direnç, güvenlik ve yorulma gibi kaynak performans kriterlerini kontrol altında tutarak araçta uygulanan nokta kaynak adedini düşürmek istemektedirler. Ayrıca, direnç nokta kaynağı farklı malzemelerin birleştirilmesinde de bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmada, punta kaynak işleminde kullanılan farklı elektrotlar, bunların soğutulması, ömürleri, seri üretimde punta kaynak kalitesini tespit etmek ve arttırmak için TOFAŞ özelinde yapılan işlemler de ele alınmıştır.

KAYNAKÇA

1. Donders, S., Brughmans, M., Hermans, L., Tzannetakakis, N. 2005. "The Effect of Spot Weld Failure on Dynamic Vehicle Performance," IMAC-XXIII, the 23rd International Modal Analysis Conference, 31 January-3 February 2005, Orlando.
2. Geißler, G., Hahn, T. 2011. "Process Development for Multi-Disciplinary Spot Weld Optimization With CAX-LOCO, LS-OPT and ANSA," 8th European Users Conference, 23-24 May 2011, Strasbourg, France.
3. Sonat, M., Doyum, A. B. 1999. "Direnç Punto Kaynaklarının Ultrasonik Muayenesi," Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, TMMOB MMO, 11-14 Kasım 1999, Ankara, s. 97-106.
4. <https://www.robots.com/articles/viewing/flexible-spot-welding-with-the-motoman-vs50-robot>, son erişim tarihi: 11.10.2015.
5. <https://www.oelcheck.de/en/knowledge-from-a-z/lubricants-on-duty/industrie/kuka-all-that-moves-in-automation.html>, son erişim tarihi: 11.10.2015.
6. Ünlükal, E. 2007. "Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Arttırılması," Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
7. Buckley, J., Servent, R. 2008. "Improvements in Ultrasonic Inspection of Resistance Spot Welds," The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT, 21-22 October 2008, Tehran, Iran.
8. European Aluminium Association. 2015. EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, Version 2015, Joining Dissimilar Materials.



Şekil 6. Tahribatlı Nokta Kaynak Kontrolleri

SAVUNMA SANAYİNDE, UÇAK VE HAVACILIK SEKTÖRÜNDE LASER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ*

Hüseyin Özden**

Doç. Dr.

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü,
Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı
huseyin.ozden@ege.edu.tr

Atınc Eryavuz

Makina Mühendisleri Odası,
İzmir Şube, İzmir
atinc.eryavuz@mmo.org.tr

ÖZ

Laser Üretim Yöntemleri çok sayıdaki üstünlükleri nedeniyle savunma sanayinde konvansiyonel üretim yöntemlerinin yerine tercih edilmektedir. Kara, deniz, hava askeri silahların, makinaların, cihazların yapımlarında laser üretim yöntemleri, özellikle laser kaynağının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Teknik ve ekonomik açıdan daha elverişli askeri araç ve gereç tasarımlarının gerçekleştirilmesi, laser kaynak yöntemlerinin uygulanması ile günümüzde mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, savunma sanayinde, uçak ve havacılık sektöründe yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinin uygulanabilirlik, enerji sarfiyatı, hız ve kalite açısından bir karşılaştırması yapılmaktadır. Savunma sanayinde, laser kaynak yöntemlerinin kaynak dikişlerin üstünlükleri tartışmaya sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Savunma sanayi, laser teknolojisi, laser üretim yöntemleri, laser kaynağı, değerlendirme

LASER WELDING APPLICATIONS FOR AIRCRAFT AND AVIATION SECTOR IN THE DEFENSE INDUSTRY

ABSTRACT

Rapid positive developments observed in laser technology increases usage of laser production methods in many work branches of defence industry. Today low weight and low cost military designs with energy and material saving are made ready for use without compromising rigidity, durability and security. In the paper compiled by taking advantage of obtained info and experiences laser technology applications will be mentioned in military structures of defence industry.

Keywords: Industry, laser technology, laser production methods, laser welding, application

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 27.01.2016

Kabul tarihi : 03.02.2016

* 20-21 Kasım 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara'da düzenlenen Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Özden, H., Eryavuz, A. 2016. "Savunma Sanayinde, Uçak ve Havacılık Sektöründe Laser Kaynak Yöntemlerinin Değerlendirilmesi," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 673, s. 54-63.

1. GİRİŞ

Savunma sanayi, havacılık ve uzay sektöründe uçak, helikopter yapımları (Şekil 1) ile ilgili sorunların başında:

- Çok karmaşık yapıları ve çok sayıda ve farklı elemanların bulunması,
- Yüksek dayanımlı, alaşım alüminyum hafif metallerin ve CFK, GFK gibi kompozit ve hibrit malzemelerin kullanılması (birleştirme, bağlama sorunları),
- Ulusal ve uluslararası geçerli yasa ve yönetmeliklerin, katı kuralların, ciddi sertifikasyonların dikkate alınması,
- Düşük üretim, bakım ve onarım maliyetli, enerji tasarruflu, ağırlığın azaltılması gibi talepler,
- Yüksek emniyet ve güvenilirlik gelmektedir.

Bu gibi teknik ve ekonomik problemlerin üstesinden gelmek için günümüzde önerilen klasik, geleneksel çözüm yöntemleri, konvansiyonel üretim yöntemleri doğal olarak yetersiz kalmaktadırlar. Bunun da bir nedeni, zamanın mühendislik problemlerine çözüm arayışlarında, geleneksel çözüm yöntemlerinin tercih edilmesinden kaynaklanmaktadır. "Her sanayi devrin, zamanın kendine has problemlerine; o devrin, o zamanın teknolojik imkânları ile en uygun çözümler bulunur" tespiti göz ardı edilmemelidir. Diğer önemli bir husus ise; serbest piyasada sürdürülebilirlik rekabet için yeni teknolojileri kullanımdan daha önemlisi, yeni teknolojileri AR-GE faaliyetlerine önem vererek bizzat geliştirip üretmek bu suretle dışa teknolojik bağımlılığı azaltmaktadır.

Havacılık ve uzay sektöründe karşılaşılan birçok teknik ve ekonomik sorunun üstesinden gelmek amacıyla günümüzün laser teknolojik imkânları değerlendirilmektedir. Savunma sanayinde kullanılan laserler hakkında ve laser üretim yöntemleri ile ilgili çok sayıda bilimsel yayın çalışmaları bulunmaktadır [1-24].

Proje çalışması; havacılık ve uzay sanayinde uçak ve helikopter yapımında çoğunlukla kullanılan alüminyum alaşım malzemelerin (AA2024-T3 ve AA7050-T7451) kendi içinde

ve birbirleri arasında birleştirilmelerinde laser kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliğinin ve T-kaynak ve laser bindirme kaynak bağlantılarının mekanik ve teknolojik özelliklerin incelenmesi üzerinedir. Proje ile ilgili olarak genel bir literatür değerlendirmesi, laser kaynağı uygulamalarında karşılaşılabilecek sorunlar ve olası çözüm önerileri çalışmada sunulmaktadır.

2. SAVUNMA SANAYİNDE LASER ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Laser teknolojisinin savunma sanayinde uygulamaları dört ayrı grupta ele alınmaktadır:

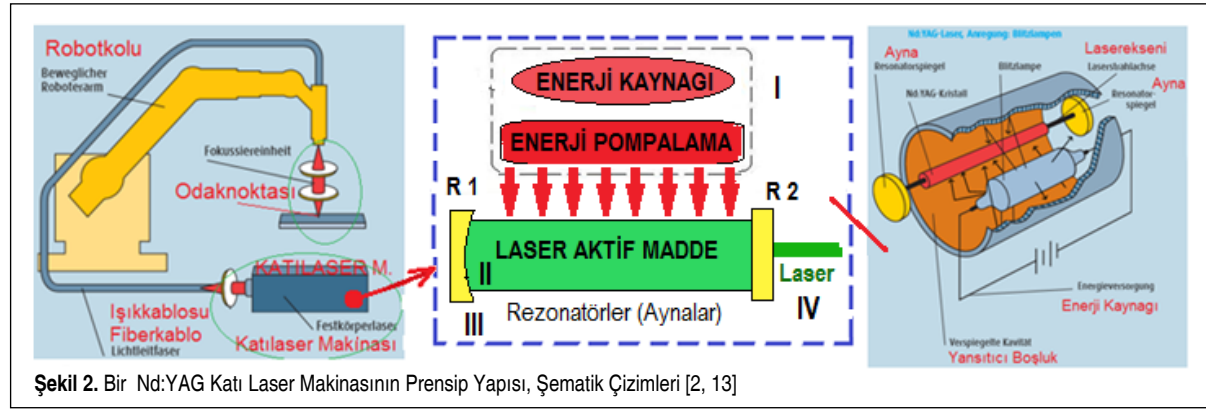
1. Laser takviyeli konvansiyonel kimyasal patlayıcı ateşli silahların geliştirilmesinde (Laser Cihazları)
2. Askeri kontrol, gözetleme, ölçme, analizlerin uygulanmasında (Laser Cihazları)
3. Dolaylı olarak askeri silahların, araç, gereçlerin üretim süreçlerinde (Laser Üretim Yöntemleri)
4. Doğrudan kalıcı ya da geçici imha edici laser silahların yapımlarında (Laser Silahı)

Laser imalat yöntemlerinin; kaliteli ve çok yüksek işlem hızları gibi çok sayıdaki olumlu özellikleri nedeniyle, laser teknolojisi savunma sanayinin birçok sektöründe kullanım alanı bulmaktadır [1-17]. Örneğin;

- Askeri konvansiyonel silahların, basit tabanca, tüfek... kompleks yapıdaki roket, kıtalar arası füzelerin yapımlarında,
- Askeri makinaların parçalarının, cihazlarının, sistemlerin imalatında,
- Askeri kara taşıtlarının, tankların, jiplerin, kamyonların vb. üretiminde,
- Askeri deniz gemilerinin, süratli botların, hücumbotların, çıkarma, mayın gemilerin inşaatında,
- Askeri havacılıkta; uçak, helikopter, insansız hava araçlarında, helikopterlerin, uzay araçlarının yapımında,



Şekil 1. Havacılık Sektöründe, Uçak ve Helikopter Görüntüleri ve Üretim Faaliyetleri [24]



Şekil 2. Bir Nd:YAG Katı Laser Makinasının Prensi Yapısı, Şematik Çizimleri [2, 13]

- Mikro teknikte, elektronik sanayinde laser bağlama yöntemlerinde, bilhassa laser lehim yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Laser bağlama yöntemleri her türlü malzemelerin ve farklı özellikte malzemelerin birbirlerine birleştirilmelerinde kolaylıkla ve ekonomik olarak uygulanmaktadır.

2.1 Laser

Laser, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation'dan radyasyon sakınımlarıyla ışığın kuvvetlendirilmesi sözcüklerinin baş harfleri alınarak dilimize uyarlanmıştır. Laser bir ışın, aynı zamanda çıplak gözle fark edilebilen bir ışık kaynağıdır. Bir lamba ışığı her tarafa, farklı dalga boylarında düzensiz ışık yayarken; laser ışığı ışını, aynı frekans dalgalı, tek renkli ve aynı yönde, birbirine paralel bir demet halinde kayıpsız yayılmaktadır. Yaygın kullanılan laser enerji üretim sistemleri genelde dört temel bileşenden, kısmi, alt sistemlerden oluşmaktadır. Bir katı Nd:YAG laser makinasının prensip yapısı Şekil 2'de şematik olarak görülmektedir [2, 3, 13].

- Laser Aktif Madde:** laser ışınının ortaya çıkmasını sağlayan maddedir. Örneğin laser aktif maddeler; Er, Nd, Yt, Tm, Pr, vb. Bu maddeler katı kristal (Nd:YAG), gaz (CO₂) veya sıvı halde (renkli bir eriyik, boyalı sıvı laserleri) olabilmektedir.
- Enerji Kaynağı, Enerji Pompalama:** Laser aktif madde atomlarının, moleküllerinin tahrik edilmesi, alt enerji seviyelerinden üst enerji seviyelerine ulaşmaları için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Üst enerji seviyelerine ulaşan atomlar, moleküller kendiliklerinden spontan alt enerji seviyelerine düşerken ışık saçarlar. Laser aktif maddeye pompalanan enerji, devir daimi kaldığı sürece, ışık, ışın üretimi süreklilik kazanır. Elektrik enerjisi, doğru akım, ışık, ışın, ısı enerjileri, (Kripton Lambası, Flaş Lambası), atom enerjisi, kimyasal reaksiyon enerjisi, direkt güneş enerjisi, diyod laser enerjisi gibi enerjiler, laser üretiminde pompalama enerjisi olarak kullanılmaktadır.

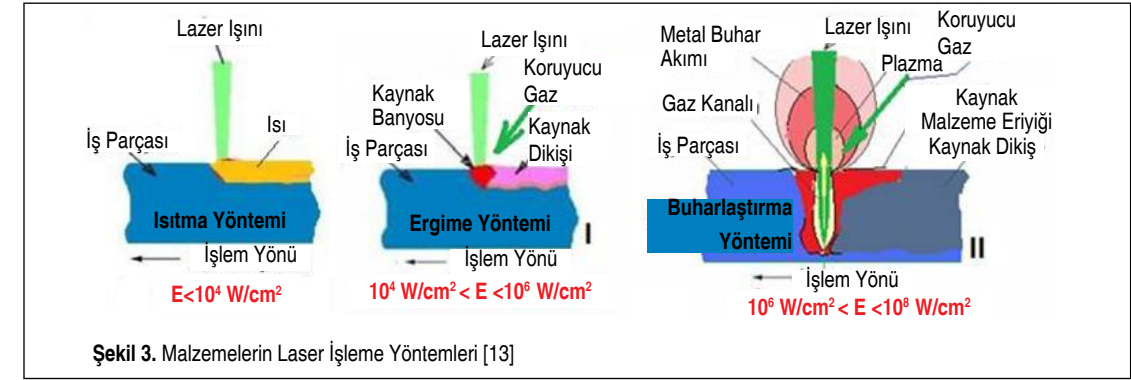
III. Resonatörler (Yansıtıcı Aynalar): İki farklı aynadan oluşan bir optik sistemdir. Laser aktif maddenin arkasında ışınları yansıtıcı bir ayna sistemi (R1) bulunmaktadır. Laser ışını güç ölçümleri için ışın, ışık geçirgenliği %0,5 ile %1 olan ayna kullanılmaktadır. Önde ise kısmi geçirgen (ışın, ışık geçirgenliği %15-50) olan bir ayna sistemi (R2) bulunmaktadır. Resonatör; laser ışınlarının bir kısmını laser aktif maddesine, aktif ortama geri yansıtarak devamlı yoğunlaştırılmış bir ışık demeti şeklinde ve yayılma eksenine paralel yayılmalarını sağlamaktadır. Foton sayısı, ışık şiddeti belli değerlere ulaştığında kısmi geçirgen aynadan dışarı çıkar.

IV. Laser Işın Demetinin İletilmesi: Ön resonatörden çıkan laser demeti laser tipine göre ayna, mercek sistemleri ile veya optik kablosu ya da laser kablosu (10 mm çaplı fiber optik kablo) yardımıyla kayıpsız operasyon noktasına, iş parçasına iletilmektedir. Laser ışınlarının optik kablosu ile iletimi laser ışınının dalga boyuna göre değişmektedir. Örneğin dalga boyu $\lambda=1060 \text{ nm}=1.06 \mu\text{m}$ olan Nd:YAG-laserin iletiminde optik kablosu kullanılırken; dalga boyu, $\lambda=10600 \text{ nm}=10.6 \mu\text{m}$ CO₂ laserin iletimi ayna sistemleri ile gerçekleşmektedir.

Laserlerin tiplerine, dalga boylarına göre farklı laser kalite tanımları bulunmaktadır. Genelde üretilen ışının odaklanabilir ve netlik değerleri ile ifade edilmektedir. Laser odak noktasının keskin çapı ne kadar küçükse ve netse, laser ışını ışığı o nispette kalitelidir, enerji yoğunluğu o nispette yüksektir. Dalga boyu $\lambda=1070 \text{ nm}=1.06 \mu\text{m}$ olan maksimal çıkış gücü $P=21 \text{ kW}$ olan bir fiber laser makinasının laser ışın kalitesi, $BPP=11 \text{ mm} \times \text{mrad}$ olarak verilmektedir.

2.2 Malzemelerin İşlenmesindeki Ana Prensi

Malzemenin işlem noktasında (odak noktasında) yoğunlaştırılan enerji miktarı $E_{\text{Laser}}=10^3 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ arasında olabilmektedir. Ergitme kaynağında arkin enerji yoğunluğu yaklaşık, $E_{\text{Ark}}=2 \times 10^2 - 5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ arasında değişmektedir. Malzemenin, işlenen parçanın yüzeyi üzerinde pozisyonu önemli parametrelerden biridir. İşlenen parçanın üzerinde



Şekil 3. Malzemelerin Laser İşleme Yöntemleri [13]

birkaç milim üstünde ya da sanal olarak malzemenin içinde olacak şekilde ayarlanabilir. Enerjinin büyük kısmı malzeme tarafından emilir, bir kısmı da malzeme dışına yansıtılır, yayılır. Etkif olarak kullanılan laser enerji yoğunluk oranı, işlem parametrelerine, laser parametrelerine bağlı olarak değişir. [13]. Odaklanmış laser ışınının enerji miktarına göre malzemelerin işlenmesinde üç yöntem kullanılmaktadır. Şekil 3'te enerji yoğunluğuna göre malzemelerin laser işleme yöntemleri şematik şekilde gösterilmiştir.

I. Isıtma Yöntemi: Güç yoğunluğu ($E < 10^4 \text{ W/cm}^2$, ısıtma, ısı ve yüzey işlemler, şekillendirme...)

II. Ergitme (Sıvılaştırma) Yöntemi: Güç yoğunluğu ($10^4 \text{ W/cm}^2 < E < 10^6 \text{ W/cm}^2$, ergitme kaynağı, ısı ve yüzey işlemleri...)

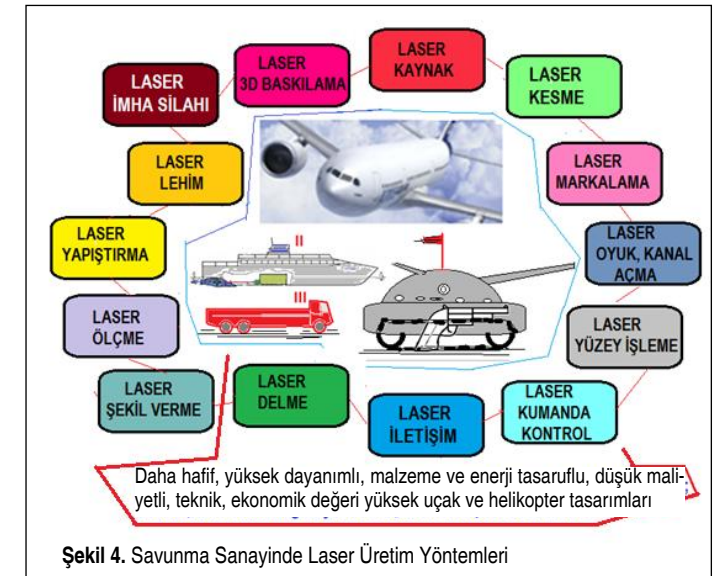
III. Buharlaştırma Yöntemi (Anahtar Deliği Yöntemi, Derin Nüfuziyet Yöntemi): Güç yoğunluğu ($10^6 \text{ W/cm}^2 < E < 10^8 \text{ W/cm}^2$, kaynak, kesme, delme, teknik yüzey işlemleri)

2.3 Savunma Sanayinde Laser Üretim Yöntemleri

Endüstride mal ve hizmet üretimlerinde laser, çok amaçlı, temassız bir takım, araç- gereç, silah olarak tanımlanmaktadır. Otomotiv sektöründe geçmişte laser kesme ile başlayan uygulama, günümüzde laser kesme, delme, kanal, oyuk açma, yüzey işlemleri ile geniş bir kullanım yelpazesine ulaşmıştır. Benzeri gelişme, savunma sanayinde, silah sanayinde, askeri araç gereçlerin, uçakların, gemilerin kara taşıtların yapımlarında, malzemelerin işlenmesinde gözlenmektedir. Savunma sanayinde laser üretim yöntemlerinin bir sınıflandırılması Şekil 4'te şematik olarak gösterilmektedir. Kesme ve delmede, kaynağa kullanılan laser demeti mercek ayna sistemi ile doğrudan imha laser silahlarının üretiminde kullanılmaktadır. İletişimde, bilgi veri depolama, analiz etme gibi üretim sistemlerinde laserlerin kullanımları bulunmaktadır. Laser üretim yöntemlerinin başlıkları, önem sırası dikkate alınmadan aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Laserli ayırma, kesme, delme, oyuk kanal, diş açma ve talaş kaldırma yöntemleri

- Laserle birleştirme yöntemleri (laser kaynağı, laser lehim, laser yapıştırma)
- Laser yüzey işlemleri, sertleştirme, kaplama, yüzey modifiye, temizleme
- Yüzey şekillendirme, renklendirme
- Markalama
- Malzeme buharlaştırma (malzeme tıraşlama, eksiltme)
- Laserle plastik şekil verme, laserli dökme
- Malzeme iç yapı özelliklerinin laserle değiştirilmesi
- Laser alaşımlama
- Laser taramalı sinterleme yöntemi, 3D Baskı yöntemleri



Şekil 4. Savunma Sanayinde Laser Üretim Yöntemleri

2.4 Sanayide Kullanılan Yeni Tip Yüksek Güçlü Laser Makinaları

Diyot Pompalı Nd:YAG Katı Laser Makinaları, CO₂ Gas Laser Makinaları, Fiber Laser Makinaları, Diyet Laser Makinaları endüstride kullanılan yüksek güçlü laser makinalarıdır. Yüksek verim (Elektrik prizinden alınan enerjinin %25'i faydalı işte kullanılırken, eski tip Nd:YAG katı laser makinalarında verim %3'ü geçmez.), kaliteli laser ışın ve mobilite nedeniyle fiber laser makinaları günümüzde önerilmektedir.

Diyot laser makinalarının verimi %60'a varmaktadır; boyutları diğer laser makinalarına göre çok küçüktür, kompakt ve robust, (sağlam ve rijit) bir yapıya sahiptir ve maliyetleri düşüktür. Diyet laser makinalarının önemli olumsuzluklarından biri, güç artıçta odak noktasının çapı artarak ışın kalitesinin, enerji yoğunluğunun düşmesidir. Diyet laser makinaları, cihazları geliştirme safhasının henüz başlangıcında sayılırlar. Diyet laser makinaları, geleceğin laser makinaları olarak değerlendirilmektedirler [18].

2.5 Sanayide Kullanılan Yeni Tip Yüksek Güçlü Laser Makinalarının Ortak Özelliklerinin Sıralanması

- Yüksek güç (P=10 kW – P=50kW) imalat işlemlerinde 2-10 kW'lık çıkış gücündeki laser makinaları yeterli olmaktadır. (Güç artıçta, işlem hızı, kaynak malzeme nufuziyeti artmaktadır. Ayrıca, bir laser makinasından birden fazla fiber kablo ile paralel birçok işlem yapılabilmektedir.)
- Yüksek odaksal enerji yoğunluğu ($10^6 \text{ W/cm}^2 < E < 10^{12} \text{ W/cm}^2$)
- Yüksek randıman ve iyi laser ışın kalitesi

- Bilgisayar destekli komutlara ve kontrole uygunluk
- Kompakt, yani yekpare yapı tarzı
- Mevcut makina sistemlerine, üretim tezgâhlarına, bantlarına ve robotlara entegre olabilirliği
- Mobilite özellikleri, uzun ömürlülük

Şekil 5'te laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı Berlin Teknik Üniversitesi, Fraunhofer Enstitüsü Laser Kaynak laboratuvarı, laser kaynak makinası, bilgisayar destekli üç boyutlu hareketli kaynak tezgâhi ile görülmektedir.

2.6 Laser Parametreleri

Laser kaynak bağlantılarının kalitesini etkileyen çok sayıda faktör, parametre bulunmaktadır. İşlem, laser, parça ve malzeme parametreleri olarak dört gruba ayrılabilir. Laser parametrelerine ait önemli büyüklükler, sembol ve birimleri ile birlikte; laser maksimal çıkış gücü, P [kW]; nominal laser gücü, P [kW]; laser dalga boyu, λ [μm] veya [nm]; laser enerji yoğunluğu, E [W/cm^2] veya E [kW/mm^2], pulslu laserde ise puls tepe enerjisi, [Joule]; puls süresi [ms], puls frekansı, puls formu, ışın kalitesi BPP [mmxmrad] The Beam Parameter

Tablo 1. Laser Kaynak Parametreleri [13]

Grup	Laser Kaynak Parametreleri
Laser Parametreleri	Laser tipi (CW laser; pulslu (atımlı) laser, ————— maksimal laser gücü, nominal laser gücü, puls süresi, puls frekansı, puls enerjisi, maksimal enerji yoğunluğu, puls formu, laser dalga boyu, laser ışın kalitesi)
Makine Parametreleri	Laser demeti iletimi, (fiber kablo, ayna sistemi), odak noktası çapı ve uzunluğu, odak noktasının netliği, odak noktasının yozisyonu, işlem gazları (koruyucu gaz), işlem hızı (kaynak hızı) laser pençeri...
Parça Parametreleri	Birleştirme tipi (alın, köşe, bindirme...), parça boyutları (kalınlık), kaynak pozisyonu (ü, w, s, f... kaynağı), kaynak ağızı, parça yüzeyi durumu, kaplama tipi ve kalınlığı...
Malzeme Parametreleri	Malzemenin kimyasal yapısı (alaşım elementleri), kaynak kabileyeti, aynı özellikteki malzemelerin birbiri ile kaynağı, farklı özelliklere sahip malzemelerin karmalı kaynağı, malzemenin fiziksel özellikleri (ısı iletkenlik, absorpsiyon, yansıtma malzemenin yoğunluğu) iç yapı

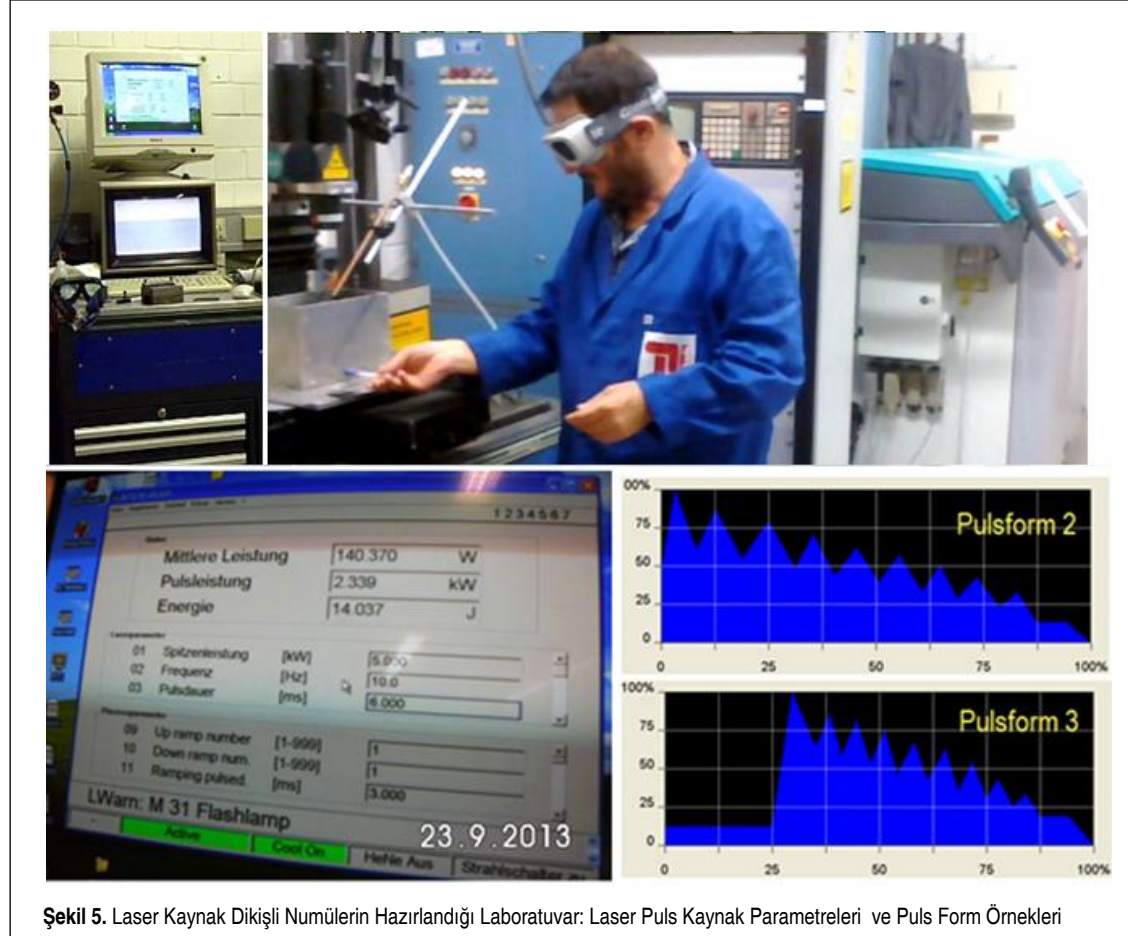
Product, BPP değeri ne kadar küçükse laser kalitesi o nispete kalitelidir. Odak noktasının parçadaki pozisyonu (üzerinde-altında-üstünde) ve ışın demetin eğimidir. Kaynak hızı v_k [m/dak] ve koruyucu gaz (Ar, He, Ar ve He, Ar ve CO_2 ... gibi) diğer önemli parametrelerdir. Tablo 1'de laser kaynak parametreleri gösterilmektedir [13].

3. SAVUNMA SANAYİNDE, HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE LASER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

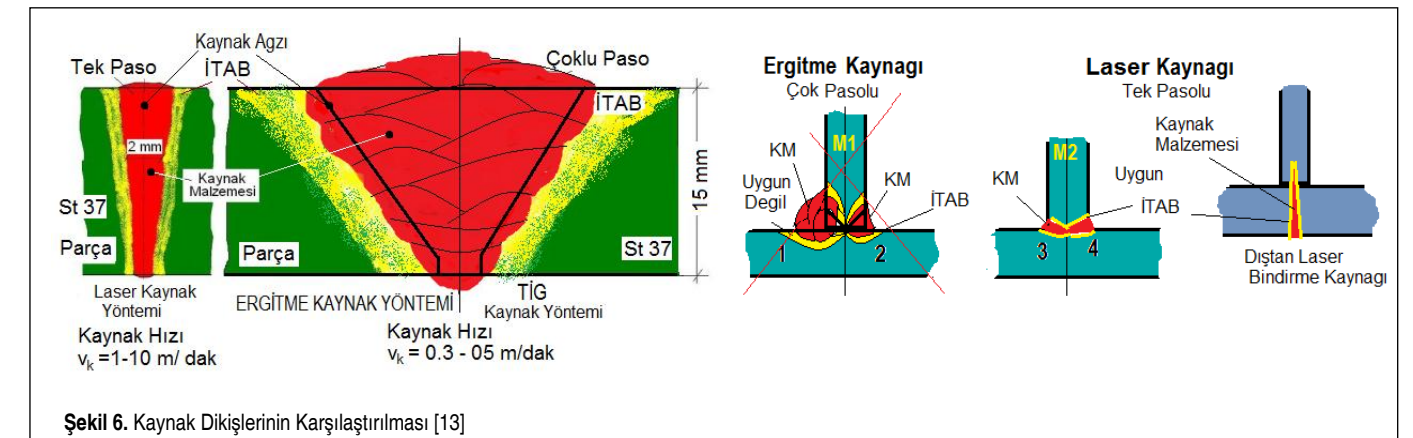
Laser kaynak dikişlerinin yüksek kalitesi yanında çok yüksek işlem hızları, problemsiz erişebilirlik, otomasyona ve mevcut üretim portallarına, robotlara uygunluğu gibi birçok üstünlükleri bulunmaktadır. Her şeyden evvel geçmişte konvansiyonel ergitme yöntemlerle teknik ve/veya maliyet açısından mümkün olmayan ya da çok zaman alıcı külfetli tasarımlar günümüzde laser kaynak yöntemleri ile kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.

Laser kaynak yöntemlerinin ergitme kaynak yöntemlerine kıyasla başlıca üstünlükleri şunlardır:

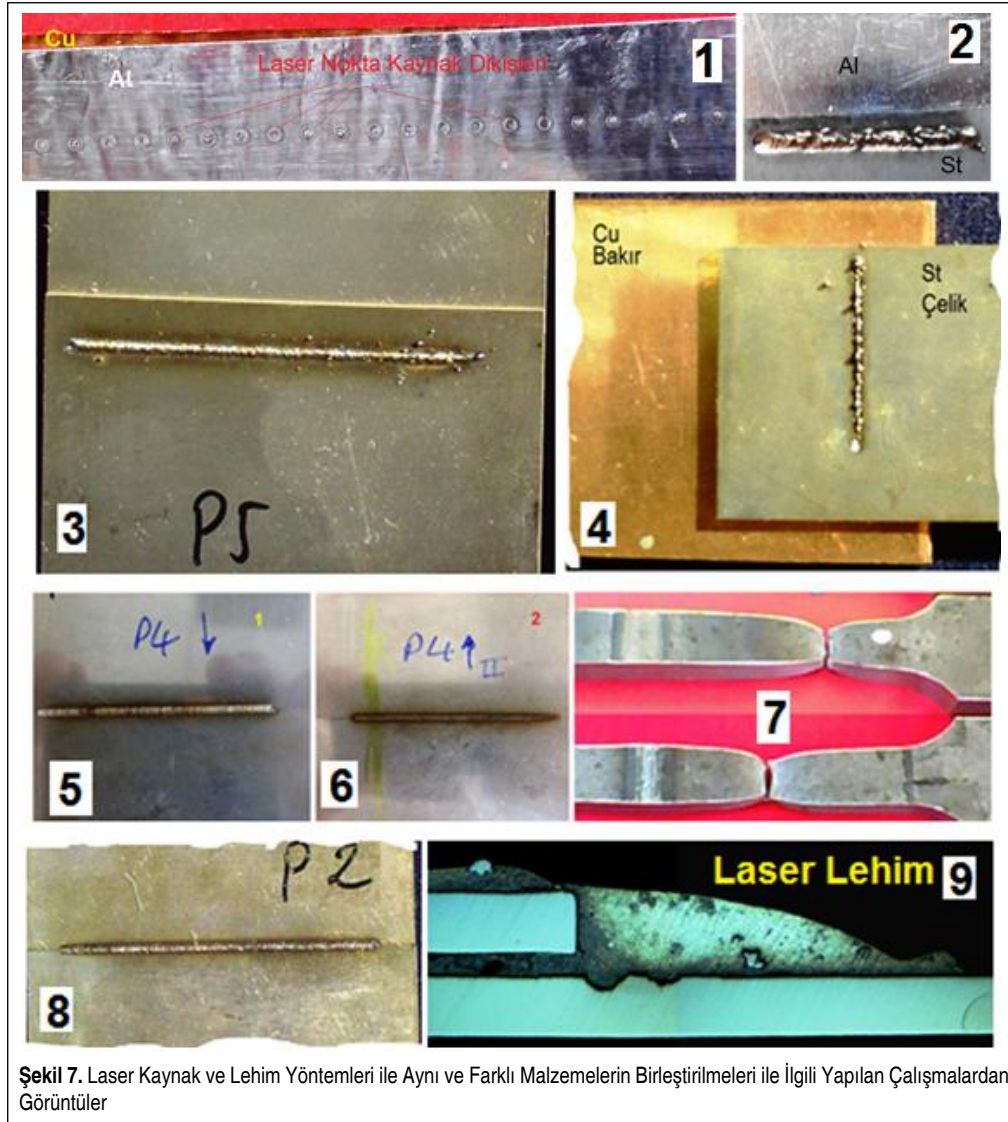
- Laser kaynak yöntemleri ile bir pasoda yüksek işlem hızları ile 20 mm kalınlığına kadar çelik parçalar kaynak ağızı açılmadan birleştirilmektedir (Şekil 6). MIG/MAG, WIG (TIG) gibi ergitme kaynak yöntemleri ile aynı kalınlıktaki parçanın alın kaynağı için kaynak ağızının açılması, daha sonra kök kaynağı ile başlanarak çok sayıda kaynak pasoları ile tamamlanması gerekmektedir (Şekil 6).
- Ergitme kaynak yöntemlerinde her paso için uygulanan farklı kaynak hızları, tek pasoda tamamlanan laser hızına nazaran çok düşüktür.
- Laser kaynak dikişlerinde İTAB bölgesi yok denecek kadar azdır, dolayısıyla artık gerilmeler yoktur.
- Laser kaynağının önemli üstünlüklerinden biri de kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve ısıl işlemlere çoğu kez gerek duyulmamasıdır.
- Test sonuçlarıyla, laser kaynak bağlantılarının daha mukavim olduğu teyit edilmiştir.
- Laser kaynak yöntemleri çok amaçlı kullanılır. Aynı laser pençeri (laser kafası) ile delme, kesme, kaynak lehim, yapıştırma, markalama, yüzey işlemleri bilgisayar destekli uygulanabilmektedir.



Şekil 5. Laser Kaynak Dikişli Numunelerin Hazırlanmış Laboratuvar: Laser Puls Kaynak Parametreleri ve Puls Form Örnekleri



Şekil 6. Kaynak Dikişlerinin Karşılaştırılması [13]



Şekil 7. Laser Kaynak ve Lehim Yöntemleri ile Aynı ve Farklı Malzemelerin Birleştirilmeleri ile İlgili Yapılan Çalışmalardan Görüntüler

Şekil 7'de, laser kaynak ve laser lehim bağlantılı numuneler gösterilmektedir. Aynı ve farklı özellikteki malzemeler alın ve bindirme yöntemleri ile farklı parametre araştırmaları için birleştirilmişlerdir. İnce levhaların birleştirilmelerinde, özellikle kayma gerilmelerin ön plana çıktığı bağlantılarında lehim ve nokta kaynak bağlantıları tercih edilmektedir.

4. HAVACILIK VE UZAY YAPILARINDA KULLANILAN HAFİF MALZEMELER

Havacılık ve uzay sektöründe çoğunlukla yüksek dayanımlı hafif malzemeler (alaşımli alüminyum metalleri plastikler, CFK, GFK gibi kompozitler) kullanılmaktadır. Uçak ve helikopter konstrüksiyonlarında 2XXX, 7XXX, 8XXX serisi ısı işleme tabi tutulmuş, sertleştirilmiş, çöktürülmüş, yaşlandırılmış, yüksek dayanımlı alaşımli alüminyum metaller kullanılmaktadır. AA2024-T3 (AlCuMg) "duralüminyum" olarak

da bilinen Al-metalin ana alaşım malzemesi Cu'dur. Cu alaşım elementi metalin kaynak kabiliyetini olumsuz etkilemektedir. Uçakların, hava araçların dış gövdesinde kullanılmaktadır. 7074-T7451, 7475-T7351 serisi alüminyum-çinko alaşımli hafif metalin içerisinde Cu, Mg, Cr, Zr bulunmaktadır. Yüksek dayanımın söz konusu olduğu uçak, helikopter parçalarının tasarımında tercih edilmektedir. T sembolleri alaşımli malzemelerin ısı işleme tabi tutulduğunu ifade etmektedir. [1, 3, 4, 6, 20-23]. Bu malzemelerin dışında, laser kaynak kabiliyeti iyileştirilmiş yüksek dayanımlı alüminyum alaşımli malzemeler örneğin, Alüminyum ve Litium AA2198, AA2196, Al-Mg-Si-Cu (6010-6013) kullanılmaktadır. 6010 serisinin 2024 serisine kıyasla %3 daha hafifi, akma sınırı %12 daha fazla, ve daha ucuz ve bunun yanında kaynak kabiliyeti daha iyidir. Uçaklarda dış gövdenin kaplanmasında tercih edilmektedir. Al-Li alaşımli 2198 serisi dış gövde ve stringer, yani enine boyuna kuşaklarda takviye elemanların

da kullanılmaktadır. 2196 serisi daha çok stringer malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde laser kabiliyeti yüksek alüminyum alaşımli yüksek dayanımlı malzemelerin geliştirilmesi için çalışılmaktadır.

Alaşımli alüminyum hafif metaller yanında, özellikle yaklaşık on yıldır, Karbon Elyafı (Faser) Kompozit malzemelerin, (CFK) havacılık ve uzay sektöründe gelişerek yaygınlaşan bir kullanım alanı bulunmaktadır.

Platik malzemelerin ve CFK, GFK malzemelerin işlenmesinde laser üretim yöntemleri ile iyi sonuçlar alınmaktadır. Genel olarak bu malzemelerin kaynak kabiliyetleri düşüktür, problemlidir. Ergitme kaynak yöntemleri ve eski tip laser kaynak makineleri ile elde edilen kaynak bağlantılarında çatlak, gözenek oluşumları, alaşım elementlerinin yanması, orijinal mekanik teknolojik özelliklerin aşırı değişmesi gibi hatalar çıkmaktadır. [20, 22, 23]. Bu nedenle günümüzde halen havacılık sektöründe mekanik bağlama yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat mekanik bağlayıcılar; daha hafif, yakıt tasarruflu, düşük maliyetli uçak tasarımlarının geliştirilmesini engellemektedir. Gelişme potansiyelini tamamlamış ve uçak helikopter yapılarında sorunlu olan mekanik bağlayıcılara alternatif olarak laser kaynağı değerlendirilmektedir.

5. UÇAK VE HAVACILIK SEKTÖRÜNDE MEKANİK BAĞLAMA YÖNTEMLERİ İLE LASER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Savunma sanayinde uzay ve havacılık sektöründe, halen uygulanan perçin civata gibi şekil bağına dayalı mekanik bağlama yöntemleri, günümüzün teknik ve ekonomik taleplerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Mekanik bağlama yöntemlerinin; zaman alıcı olmaları, ek takviye elemanların kullanılması, yapısal ağırlığı artırması, açılan deliklerin işletme dayanımına olumsuz etkisi ve sızdırmazlık, yalıtkan elemanlarının kullanılması, otomasyona uygun olmaması, gelişme potansiyellerinin bulunmaması gibi çok sayıda olumsuzlukları bulunmaktadır. Alüminyum alaşımli levhalar ve CFK'dan üretilen uçak yapılarında kullanılan yeni karmalı malzemelerin işlenmesi, perçin deliklerinin açılma-

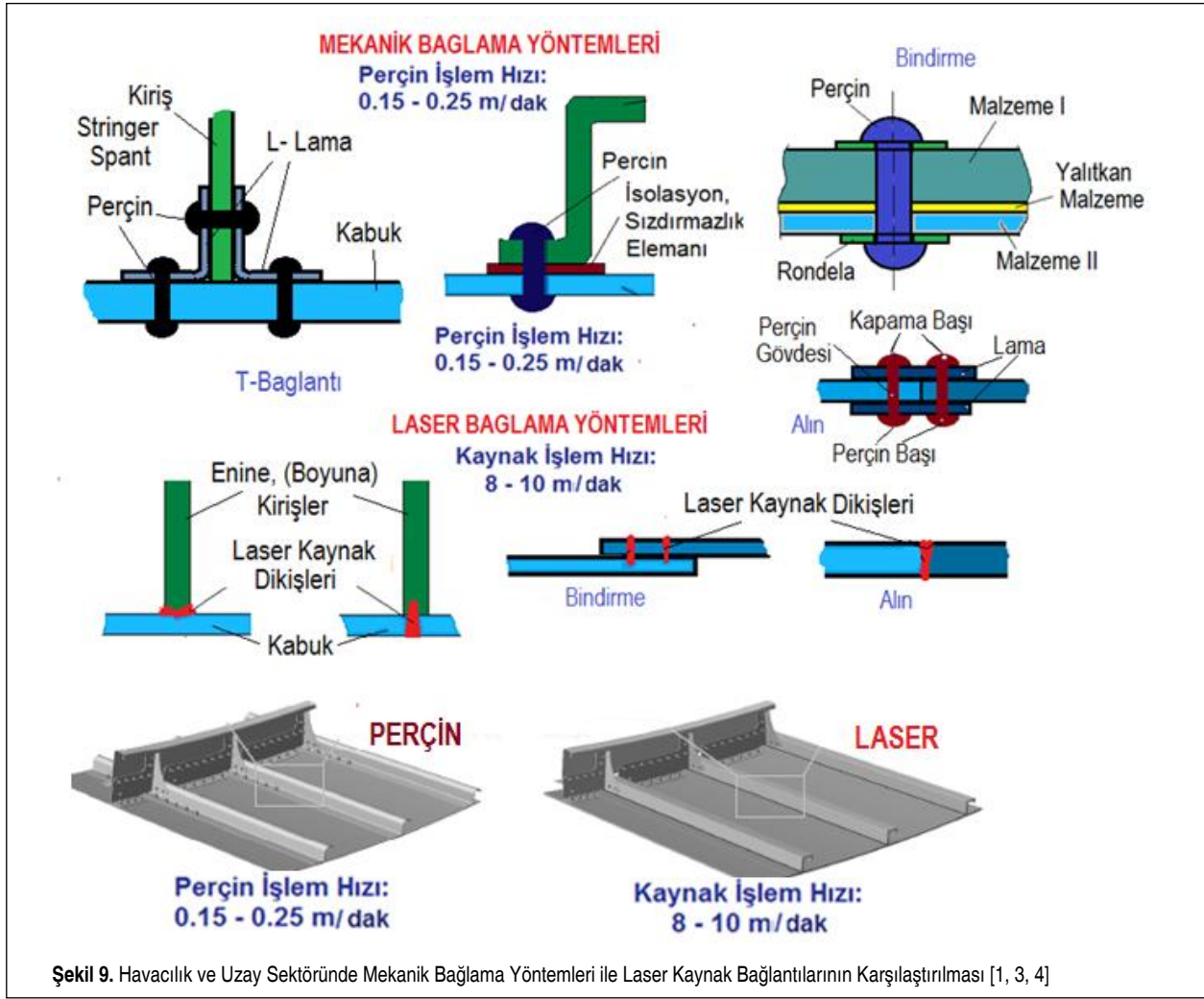
sında problemlidir. Laser üretim yöntemlerinin kullanımı ile uzay ve havacılık sektöründe bu gibi teknik ve ekonomik sorunların aşılmasına çalışılmaktadır. Laser kaynak yöntemleri; çok sayıda artıları nedeniyle uçak, helikopter imalatında aynı ve farklı kimyasal özelliklere sahip yüksek dayanımlı hafif malzemelerin birleştirilmelerinde geleneksel mekanik bağlama yöntemlerine alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Laser kaynak bağlantıları ile ilgili bilimsel araştırmalar, eskiye nazaran daha yoğun bir şekilde sürdürülüyor. Yürütülen bilimsel çalışmalar sonucu elde edilen bilgi, tecrübeler dayalı olarak uçak ve helikopter yapılarında kullanılan laser kaynak dikişli parçaların sayısında, laser kaynak dikişlerinin uzunluğunda büyük artışlar olmaktadır (Şekil 8) [1].

Havacılık ve uzay sektöründe, uçak ve helikopter yapılarında perçin, civata gibi mekanik bağlayıcılar yerine laser kaynak dikişlerinin tercih edilmesi ile % 20'lere varan ağırlıktan, bir o kadar da işçilikten ve yakıttan tasarruf edilmektedir. Savunma sanayinde, havacılık sektöründe mekanik bağlayıcılarla laser kaynak bağlantılarının şekilsel bir karşılaştırılması Şekil 9'da şematik olarak gösterilmektedir. Dış örtüsünün geleneksel perçin, mekanik bağlayıcılar ile bağlanması ile uçak gövdesinin dış yüzeyinin hava sürtünmesini artırarak yakıt harcamalarını artırmaktadır. Laser kaynak bağlantılı gövde tasarımı ile sürtünme giderilerek hava aracının performansı artacaktır. Şekil bağına, sürtünme kuvveti bağına dayalı mekanik bağlama yöntemleri, tasarımların ağırlığını artırdığı gibi, birleştirilen parçaların işletme dayanımını düşürmekte, işletme ömrünü azaltmaktadır. Bunun yanında, mekanik bağlama yöntemlerinde ihmal edilmemesi gereken çok sayıda işleme süreçleri bulunmaktadır (örneğin delik açma, delik yüzeyin pürüzlüğünü gidermek, tolerans değerlerini aşmamak, gövdenin yerine göre yalıtkan ve sızdırmazlık elemanlarının takılması, kapama başının ya da somunun takılması gibi). Bu işlem adımlarının otomasyonu imkânsızlaşmaktadır. Daha hafif, işletme dayanımı yüksek, daha güvenli ve düşük maliyetli tasarımlar için ve benzeri sorunların üstesinden gelmek için laser üretim yöntemlerinin havacılık ve uzay sektöründe uygulanması gerekmektedir.



Şekil 8. Uçaklarda Kullanılan Laser Kaynak Bağlantılı Panel Sayısı ve Kaynak Dikişlerinin Uzunluğu [1]



Şekil 9. Havacılık ve Uzay Sektöründe Mekanik Bağlama Yöntemleri ile Laser Kaynak Bağlantılarının Karşılaştırılması [1, 3, 4]

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Havacılık ve uzay sanayinde, uçak ve helikopter tasarımlarında yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlı malzemelerin laser kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri konulu yeterli çalışmalara literatürde rastlanılmamaktadır. Daha evvel eski tip laser makinaları ile denenmiş çalışmalarda beklenen kaliteli kaynak dikişlerin elde edilemediği, çatlak oluşumları ve gaz boşluklarının ortaya çıktığı görülmektedir.
- Yeni tip laser kaynak makinaları ile iyi sonuçlara ulaşılabacağı öngörülmektedir. Pulsu laser kaynağının kullanımıyla, kontrollü enerji dozajı sayesinde çatlak ve gaz boşlukları oluşumun girdirilmesine çalışılmaktadır. Proje çalışması, bu alandaki bilimsel çalışmalara katkı sağlayacak orijinal bir çalışmadır. Aynı zamanda laser kaynak yöntemlerinin Türkiye'ye kazandırılmasına ve teknolojileri uygulayacak, geliştirecek uzman personellerin yetiştirilmesine yöneliktir.

- Teknik-ekonomik değeri daha yüksek uçak ve helikopter tasarımları için laser üretim yöntemlerinin, özellikle laser kaynak, laser delme, laser kesme gibi yöntemlerin uygulanması olmazsa olmazdır.
- Laser gibi yeni teknolojilerin Türkiye'de savunma sanayinde, farklı iş kollarında uygulanması ve geliştirilmesi ülkemiz çıkarınadır. Her sanayi devrin, zamanın kendine has problemlerine; o devrin, o zamanın teknolojik imkânları ile en uygun çözümler bulunur.
- Dışarıya olan teknolojik ve ekonomik bağımlılığı azaltmak için, yeni teknolojilerin bizzat geliştirip üretilmesi ülkemizde öncelikli hedef olmalıdır. Bunun için de üniversiteler bünyesinde sanayicilerle, devlet kurumlarıyla işbirliğine gidilerek katma değeri yüksek endüstriyel mal ve hizmet ürünlerine yönelik projeler ciddi şekilde yürütülmelidir. Türkiye, laser konulu AR-GE projelerini ve üniversitelerimizde laser merkezlerin, laser laboratuvarların kurulmasını öncelikli olarak desteklenmelidir.

KAYNAKÇA

- Kocik, R., Vugrin, T., Seefeld, T. 2006. "Laserstrahlschweißen im Flugzeugbau: Stand und Künftige Anwendungen," Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends Beiträge zum 5. Laser-Anwender Forum, 13-14 September 2006, Bremen.
- Özden, H. 2015. "Savunma Sanayinde Laser Teknolojisi Uygulamaları," 1. Savunma Sanayi Sempozyumu, Kırıkkale Üniversitesi, 9-10 Nisan 2015, Kırıkkale.
- Özden, H. 2015. "Uzay ve Havacılık Sektöründe Laser Üretim Yöntemleri, Laser Silahları," EÜ, Makine Mühendisliği Bölümü, Yayınlanmamış Makale.
- Özden, H. 2013. "Mechanical Fastening, Laser Welding," Eğitim Semineri, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, TUSAŞ, Kazan -Ankara.
- Rötzer, İ. 2004. "Laserschweissen Macht Flugzeuge Leichter," Lasertechnik, Fraunhofer Magzien, vol. 4.
- G. Sepold, Seefeld, T. (Ed). 2002. In Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends, Strahltechnik, Band 19, BIAS, Bremen, p. 247-256.
- Vollertsen, F., Schumacher, J., Schneider, K., Seefeld, T. 2004. "Innovative Welding Strategies for the Manufacture of Large Aircraft," Proc. IIW Intl. Conference on Technical Trends and Future Perspectives of Welding Technology for Transportation, Land, Sea, Air and Space, 15-16 July 2004, Osaka, Japan, p. 231-247.
- Kocik, R., Kaschel, S., Kreimeyer, M., Schumacher, J., Vollertsen, F. 2004. "Development of a New Joining Technology for Hybrid Metal Aircraft Structures," Proc. ICALEO, LIA Congress Proceedings CD-ROM 597, LIA, 4-7 October 2004, Orlando FL.
- Schumacher, J. 2005. "Laserstrahlschweissen im Flugzeugbau," Neueste Entwicklung der Industriellen Lasertechnik, Airbus, Kongress, 20 Oktober 2005, Bremen.
- Seefeld, T., Kreimeyer, M., Wagner, F., Vollertsen, F. 2004. "Fügen von Mischverbindungen – von der Prozeßentwicklung zur Anwendung," Proc. VDI-Wissensforum Schweißen von Leichtmetallen, 14-15 Dezember 2004, Aachen.
- Özden, H. 2008. "Laser Teknolojisindeki Gelişmeler, Endüstride Kullanım Alanları," Çukurova Üniversitesi 30. Yıl Sempozyum, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, 16-17 Ekim 2008, Adana.
- Özden, H. 2015. "Laser Kaynağı," Yayınlanmamış Doktora Dersi Slaytları, EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Özden, H. 2009. "Otomotiv Sektöründe Lazerli Multi Üretim Yöntemleri, Lazerli İmalat, Ölçme ve Kalite Kontrol," Mühendis ve Makine, cilt 50, sayı 596, s. 38-43.
- Özden, H., Dorn, L., Shrestha, S. 2004. "Laserstrahlschweißen im Schiffbau und Meerestechnischen Anlagen," Pamukkale Üniversitesi, International Malzeme Sempozyumu, 14-16 Nisan 2004, Denizli.
- Cavusoglu, N., Özden, H. 2011. "Otomobil Karoseri İmalatında Alüminyum ve Çelik Malzemelerin Laser Bindirme Kaynağı," Kaynak Teknolojisi VIII. Ulusal Kongresi ve Sergisi, MMO Ankara Şube, 18-19 Kasım 2011, Ankara.
- Öncag, Ç., Özden, H. 2013. "Mechanical and Technological Properties of Laser Welded Steel Wheel Rims," Welding Journal, vol. 92 (2), p. 38-43.
- Özden, H. 2007. "Investigating Fiber Lasers for Ship Building and Marine Construction," Welding Journal, vol. 86 (5), p. 26-28.
- Özden, H. 2008. "Sanayide Kullanılan Yüksek Güçlü Lazer Makineleri ve Lazer İmalat Yöntemleri," Makine Tek. sayı 124, s.152-160.
- IPG Photonics. "Products, Application, High Power Welding With Fiberlasers," <http://www.ipgphotonics.com/>, son erişim tarihi: 8.04.2015.
- Akkurt, A., Şık, A., Ovalı, İ. 2012. "AA2024 Alüminyum Alaşımlarının Laser Kaynağında Kaynak Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi," PÜ, Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt 18, sayı 1, s. 37-45.
- Tober, G., Heinrich, R. 2001. "ZFP an der Laserstrahlschweisser Flugzeugrumpfschalen aus Aluminium," DGZFP Jahrestagung.
- Enz, J. 2012. Laserstrahlschweissen von Hochfesten Aluminium Lithium -Legierungen, HZG Report 2012-2, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Hamburg.
- Gruss, H. 2008. "Schweissgerechte Struktur- und Prozesstrategie im Flugzeugbau," Doktoringenieur Dissertation, Universität Magdeburg, Dresden.
- <https://www.google.de/search?q=flugzeugbau&safe=strict&biw=1572&bih=835&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKewiPYDytNnKAhVGkCwKHCGrC0gQsAQIJQ&dpr=0.75>, son erişim tarihi: 8.09.2015.