



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE UÇAK VE
HELİKOPTER TASARIMLARINDA YÜKSEK
DAYANIMLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLI
METALLERİN LASER KAYNAĞININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Atınc ERYAVUZ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE UÇAK VE
HELİKOPTER TASARIMLARINDA YÜKSEK DAYANIMLI
ALÜMİNYUM ALAŞIMLI METALLERİN LASER
KAYNAĞININ İNCELENMESİ**

Ahmet Atıncı ERYAVUZ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÖZDEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

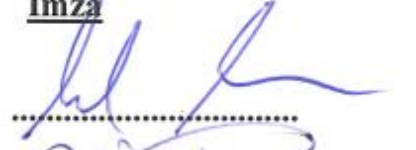
Ahmet Atınç Eryavuz tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Havacılık ve Uzay Sektöründe Uçak ve Helikopter Tasarımlarında Yüksek Dayanımlı Alüminyum Alaşımli Metallerin Laser Kaynağının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 06/09/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza


Jüri Başkanı

: Prof. Dr. Cemal Esen



Raportör Üye

: Prof. Dr. Hüseyin Özden



Üye

: Dr. Öğr. Üy. Ege Anıl Dicle



Üye

:

.....

Üye

:


.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Havacılık ve Uzay Sektöründe Uçak ve Helikopter Tasarımlarında Yüksek Dayanımlı Alüminyum Alaşımli Metallerin Laser Kaynağının İncelenmesi” başlıklı bu projenin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu proje çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu proje çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, proje çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir proje çalışması içinde sunmadığımı, bu projenin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

İzmir, 2019.09.08

Ahmet Atınc ERYAVUZ


ÖZET

HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE UÇAK VE HELİKOPTER TASARIMLARINDA YÜKSEK DAYANIMLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLI METALLERİN LASER KAYNAĞININ İNCELENMESİ

ERYAVUZ, Ahmet Atıncı

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÖZDEN

Ağustos 2019,40 sayfa

Savunma sanayinde havacılık ve uzay sektöründe uçak ve helikopter tasarımlarında kullanılan alüminyum alaşımlı metallerin laser kaynak yöntemlerin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Farklı parametrelerle hazırlanan ek malzemesiz laser kör kaynak dikişlerin ve laser alın ve bindirme kaynak dikişlerinin makro, mikro görüntüleri ve sertlik ölçümleri incelenmiştir. Araştırma sonuçları tez içinde çok sayıdaki şekil ve tablolarla gösterilerek yorumlanmıştır. Laser kör kaynak dikişlerinde kaynak sonrası hemen ortaya çıkan ve parametre kombinasyonları ile giderilemeyen çatlak gözenek oluşumları, laser bağlantılı kaynak dikişlerinde parametre kombinasyonları ile giderilmeğe çalışılmıştır. Kabul edilebilir dayanımda ve kalitede alın ve bindirme kaynak dikişlerin uygun parametre seçimleri ile elde edilmiştir. Araştırma sonuçları ile Laser kaynak yöntemlerin uçak ve helikopter yapımlarında güvenle uygulanacağı sonucuna varılmıştır. Çalışma bu Alüminyum alaşımlı hafif metallerin laser kaynağı alanındaki bilimsel çalışmalara katkı sağlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Uçak Ve Helikopter Tasarımları, Alüminyum, Laser Kaynağı, Kaynak Dikişleri, Araştırma

ABSTRACT**INVESTIGATION OF THE MACRO AND MICRO STRUCTURE OF MIXED ALUMINUM MATERIAL USING A LASER WELDED USED BY AVIATION**

ERYAVUZ Ahmet Atıncı

Master's thesis, Department of Mechanical Engineering
Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ÖZDEN

August 2019,40 pages

The applicability of laser welding methods of aluminum alloy metals used in aircraft and helicopter designs in aerospace sector in defense industry was investigated. Macro, micro images and hardness measurements of laser blind welding seams and laser butt and lap welding seams without additional material prepared with different parameters were examined. The results of the research were interpreted by showing the figures and tables in the thesis. In laser blind welded seams, cracked pore formations which are immediately visible after welding and cannot be removed by parameter combinations have been tried to be removed by laser combinations. Acceptable strength and quality are obtained by suitable parameter selection of weld and overlap weld seams. As a result of the research, it was concluded that laser welding methods can be applied safely in aircraft and helicopter construction. This study contributes to scientific studies in the field of laser welding of aluminum alloy light metals.

Key Words: Defense Industry, Aircraft And Helicopter Designs, Aluminum Laser Welding, Welding Seams, Research

ÖNSÖZ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de havacılık ve uzay sektörü, özellikle milli savaş uçak ve helikopterlerin insansız hava araçların yapımları teşvik edilmektedir. Dayanımdan ve güvenilirlikten ödün vermeden yakıt ve üretim tasarruflu daha hafif kaynak bağlantılı uçak ve helikopter tasarımların diğer bağlantı yöntemlerine alternatif olarak havacılık sektörüne katkı sağlaması amaçlı araştırma çalışmasıdır.

İZMİR, 06/08/2019

Ahmet Atıncı ERYAVUZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
KABUL ve ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. UÇAK VE HELİKOPTER TASARIMLARI, GENEL BİR DEĞERLENDİRME	3
2.1. Sektörde Kullanılan Malzemeler	4
2.2. Üretim Yöntemleri	6
2.3 Laser Kaynak Bağlantılı Tasarımlar	6

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

	<u>Sayfa</u>
3. LASER TEKNOLOJİSİ	8
3.1. Laser	8
3.2. Laser Makinaları	9
3.3. Laser Üretim Yöntemleri	10
3.4. Laser Kaynak Yöntemleri	11
3.5. Havacılık ve Uzay Sektöründe Laser Kaynak Yöntemlerin Değerlendirilmesi	11
3.6. Laser Kaynak Parametreleri	12
4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLI METALLERİN LASER KAYNAĞINDA TEKNOLOJİK GELİŞMELER	13
5. DENEYSEL, UYGULAMALI ARAŞTIRMALAR	15
5.1. Kaynaklı Numunelerin hazırlanması	15
5.2. Laser Kaynak Makina Sistemi	16
5.3. Deneyler	19
6. LASER KAYNAK DİKİŞLERİN İNCELENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ	28
6.1. Makro Yapılar	28
6.2. Mikro ve Sertlik Ölçümleri	30

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

	<u>Sayfa</u>
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	34
8. KAYNAKLAR	36
TEŞEKKÜR	39
ÖZGEÇMİŞ	40

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. San-Tez yönetim şeması	2
Şekil 2.1. Uçak, helikopter, İHA ve üretim faaliyetleri	4
Şekil 2.2. Uçak ve helikopter tasarımlarında şekil bağında dayalı mekanik bağlayıcılar ile malzeme bağına dayalı laser kaynak bağlantıların şekilsel bir karşılaştırılması	7
Şekil 3.1. Laser üretim makinalarının prensip yapısı	8
Şekil 3.2. Havacılık ve uzay sanayinde laser üretim yöntemleri	10
Şekil 3.3. Laser malzeme işleme yöntemlerin	11
Şekil 4.1. Uçaklarda kullanılan laser kaynak bağlantılı panel sayısı ve kaynak dikişlerinin uzunluğu	13
Şekil 5.1. Numunelerin kesilerek inceleme için hazırlanması	16
Şekil 5.2. Alüminyum kaynak numunelerin ve laser kör kaynak dikişlerin örnek görüntüleri, (Numunelerin ebatları (uzunluk genişlik kalınlık (20 mm x 10 mm x 5 mm)	16
Şekil 5.3. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kafası ve düzeneği	17
Şekil 5.4. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kafası ve düzeneği	17
Şekil 5.5. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kamerasının görüntüsü	17

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.6. Laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı laboratuvarı ve tutturma tertibatı odaklamış	18
Şekil 5.7. Laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı LMB Laser-Materialbearbeitungs firması	18
Şekil 5.8. Kör kaynak dikişlerimi ek malzemesiz AA 6061-T6 Malzeme	19
Şekil 5.9. Kör kaynak dikişlerimi ek malzemesiz AA 6061-T6 Malzeme Makro	20
Şekil 5.10. Bindirme kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüleri AA 6061-T6 Malzeme	20
Şekil 5.11. Bindirme kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden makro görüntüleri	21
Şekil 5.12. Alın kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüleri AA 6061-T6 Malzeme	22
Şekil 5.13. Alın kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden makro görüntüleri AA 6061-T6 Malzeme	22
Şekil 5.14. AA 7050-T7351 alın kaynak denemeleri	23
Şekil 5.15. AA 2024 Laser alın kaynak bağlantılı numunelere örnek fotoğrafın alttan görüntüsü.	23
Şekil 5.16. AA 2024 Laser alın kaynak dikişli numune üstten örnek görüntü	24

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.17. AA 2024 –T3 alın kaynak denemeleri numunlerin alttan üstten görüntüsü (gaz korumalı ve gaz korumasız)	24
Şekil 5.18. AA 2024 –T3 7050-T7351 alın kaynak denemeleri makro görüntüsü	25
Şekil 5.19. AA 5182 Kör dikiş için parametre denemeleri numunesi sağ taraf P: 4 kW,orta taraf P:3,25kW sol taraf P:2,5kW Koruyucu gaz debisi Argon 20 lt/dk. Laser kör kaynak dikişli numune üstten örnek görüntü	25
Şekil 5.20. AA 5182 Kör dikiş için parametre denemeleri numunesi sol taraf P: 4kW,sağ taraf P:2,5kW	26
Şekil 5.21. AA 5182 Laser kör kaynak dikişli numune altından örnek görüntü	26
Şekil 5.22. Alın kaynağı AA 5182 P:2,5 kW V:1,2 m/dk Zf:0 mm Ar:20 lt/dk	27
Şekil 6.1. Alın, bindirme ve kör kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüler AA 6061-T6 bakalite alınmış halleri	29
Şekil 6.2. Kör dikişlerin birbirinden farklı çatlak oluşumları ve nüfuziyet derinlikleri AA 6061-T6 Malzeme	29
Şekil 6.3. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme	30
Şekil 6.4. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme	30
Şekil 6.5. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme	31
Şekil 6.6. Vicker sertliğinin belirlenmesi	31

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.7. Alın Kaynak Makro yapı görüntüsü	32
Şekil 6.8. Ana Malzemenin mikro yapı görüntüsü	32
Şekil 6.9. Alın kaynağının mikro yapı görüntüsü	33
Şekil 6.10. Alın kaynağı ile ana malzeme birleşme noktası HAZ noktasının mikro yapı görüntüsü	33

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. EN AW 6061-T6 Malzeme özelliği	5
Tablo 2.2 EN AW 2024-T3 Malzeme özelliği	5
Tablo 2.3. EN AW 7050-T7451 Malzeme özelliği	5
Tablo 3.1. Laser kaynak parametreleri	12
Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal analizleri	15
Tablo 5.2. Kaynak Makinası Bilgisi	18
Tablo 5.3. Kör kaynak dikiş kaynak parametreleri (RUB LAT)	19
Tablo 5.4. Kör kaynak dikiş mikro vickers sonuçları	20
Tablo 5.5. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri(LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)	20
Tablo 5.6. Bindirme kaynak dikiş mikro vickers sonuçları	21
Tablo 5.7. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri (LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)	21
Tablo 5.8. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri (LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)	22
Tablo 5.9. IPG FLW D50 Kafa ile kaynak parametreleri	22
Tablo 5.10. Precitec YW50 Kafa ile kaynak parametreleri	23
Tablo 5.11. Alın kaynak dikiş kaynak mikro vickers değerleri	25

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>: Açıklama</u>
Pp	: Pals Gücü
Sf	: İlerleme hızı
Tp	: Pals uzunluğu
Fp	: Pals frekansı

1. GİRİŞ

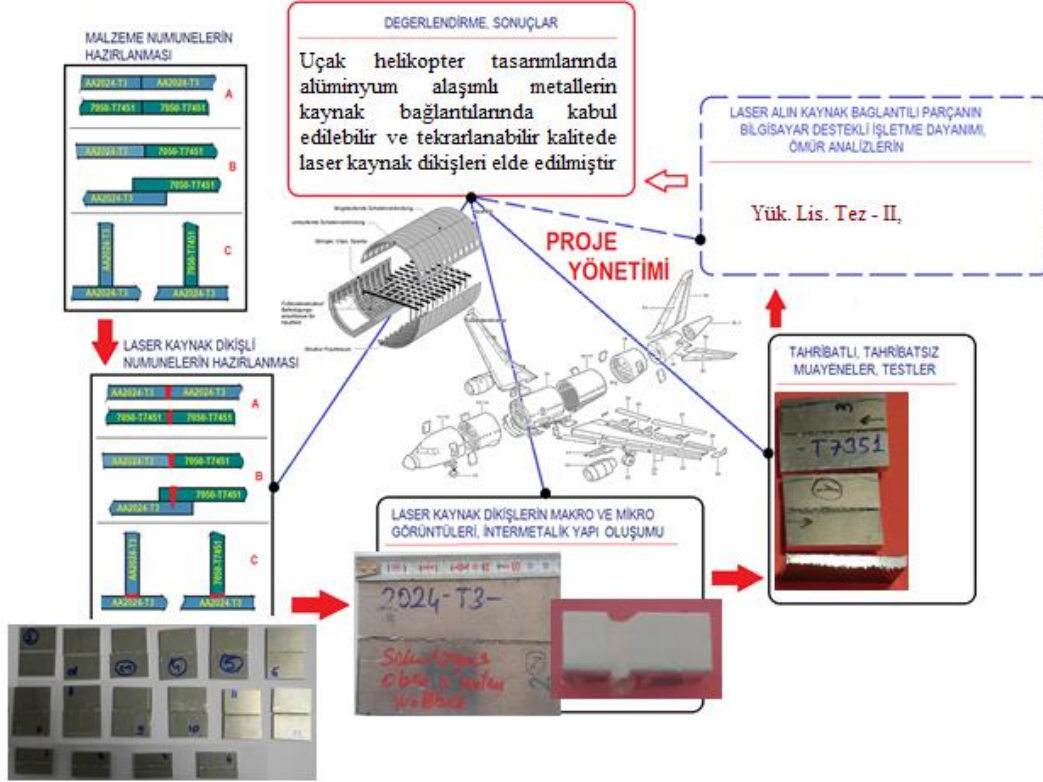
Dünyada olduğu gibi ülkemizde de havacılık ve uzay sektörü, özellikle milli savaş uçak ve helikopterlerin insansız hava araçların yapımları teşvik edilmektedir. Konu ile ilgili yurt genelinde ARGE Çalışmaları desteklenmektedir.

Yüksek Lisans Tez çalışması San-Tez Programı kapsamında hazırlanmıştır. **“Havacılık Ve Uzay Sanayinde AA 2024-T3 Ve AA 7050-T7451 Alaşımli Alüminyum Metallerin Birbirine Aynı Ve Karmalı Laser Kaynak Bağlantılarının Mekanik Ve Teknolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başıklık altında ve 48 sayfalık San-Tez proje önerisi olarak sunulmuştur (Şekil 1).**

Uçak ve helikopter tasarımlarında sürtünme bağlarına dayalı olarak uygulanmaya devam eden perçin, cıvata gibi mekanik bağlama yöntemleri; uzay ve havacılık sektöründe ekonomik ve teknik açıdan talepleri karşılamakta yeterli olmamaktadır. Alüminyum malzemelerine sonradan kazandırılan mekanik ve teknolojik özelliklerin ergitme kaynak ısısı ile büyük ölçüde değişmesi de söz konusu olduğundan uzay ve havacılık sektöründe genelde ergitme kaynak yöntemleri uygulanmamaktadır. Uzay ve havacılık sektöründe karşılaşılan bu ekonomik ve teknik sorunların ortadan kaldırılmasına laser kaynak yöntemlerinin kullanımı ile çalışılmaktadır. Uçak ve helikopter üretiminde birçok avantajı nedeniyle sahip olduğu mekanik birleştirme ile karşılaştırıldığında laser kaynak tercih edilmektedir.

Proje, Türkiye’ye laser teknolojisinin, laser üretim ve kaynak yöntemleri kazandırılması ile bu teknolojileri geliştirerek uygulanabilecek uzman kişilerin yetiştirilmesine yönelik orijinal bir çalışmadır. Firmanın hafif, enerji, yakıt, malzeme tasarruflu, daha kaliteli ekonomik ve düşük maliyetli uçak ve helikopter tasarımların ortaya çıkmasına vesile olacaktır, rekabet şansını artıracaktır.

Literatürde, uçak ve helikopter imalatında laser kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliği ve yüksek dayanımlı alüminyum alaşımli hafif metallerin, laser kaynak dikişli bağlantılarının mekanik ve teknolojik özellikleri hakkında özellikle Türkçe sözlü yeterli sayıda çalışmalara rastlanılmamaktadır. Proje bu alandaki bilimsel araştırmalara katkı sağlayacaktır.



Şekil 11.. Santez yönetim şeması

2. UÇAK VE HELİKOPTER TASARIMLARI, GENEL BİR DEĞERLENDİRME

Uzay ve Havacılık sektöründe, uygulanan mekanik birleştirme yavaş, ekstra güçlendirme elemanları kullanılması, yapısal ağırlığı artırması, açılan deliklerin işletme dayanımına olumsuz etkisi ile sızdırmazlık, yalıtkan malzemelerin kullanılması, otomasyona uygun olmaması ve gelişme potansiyellerinin bulunmaması gibi olumsuzluklara sahiptir (Özden ve Eryavuz, 2016).

Havacılık ve uzay sanayinde uçak ve helikopter yapımlarında karşılaşılan sorunlar önem sırası dikkate alınmadan aşağıdaki gibi belirtilebilir:

- Karmaşık yapıları,
- Değişik ve seri üretim kadar elemanların bulunması,
- Hibrit ve farklı özelliklerdeki malzemelerin birbirleri ile bağlanarak birleştirilmeleri,
- Mekanik bağlama yöntemlerinin gelişme potansiyelini tamamlamış olmaları, bağlama sorunlarında yetersiz kalmaları,
- Yerli ve yabancı kanunlara, yönetmeliklere ve belgelendirmeye uyulmaması,
- Dayanımdan ve güvenlikten ödün vermeden, ağırlıktan, malzemedan, enerjiden, yakıttan, üretim ve bakım onarım maliyetlerinden tasarruf baskıları (Özden ve Eryavuz, 2016).

Bu gibi teknik ve ekonomik problemlerin üstesinden gelmek için günümüzde önerilen klasik, geleneksel çözüm 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 (Kocik et al., 2006).



Şekil 2.1. Uçak, helikopter, İHA ve üretim faaliyetleri (İnter.)

2.1. Sektörde Kullanılan Malzemeler

Alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Tablo 2.1 Alüminyum alaşımların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri verilmektedir. Yüksek dayanımın dolayı tercih edilmektedir. T işareti ısıtma işlemi yapıldığını anlatır. Alaşımlı alüminyum hafif metaller yanında, Karbon Elyafı (Fiber) Kompozit malzemeler de kullanılmaktadır. Ergitme kaynak yöntemlerinin gerekse de konvansiyonel laser kaynak makinaları ile elde edilen kaynak bağlantılarında çatlak, gözenek oluşumları, alaşım elementlerin yanması, orijinal mekanik teknolojik özelliklerin aşırı değişmesi hataları oluşmaktadır. Bu nedenlerle günümüzde havacılık sektöründe mekanik birleştirme kullanılmaktadır. Bir seçenek olarak Laser kaynağı uçak helikopter elemanlarında mekanik birleştirmelere düşünülmektedir.

Tablo 2.1. EN AW 6061-T6 Malzeme özelliği

Kimyasal Bileşim									
Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,7	0,4-0,8	0,04-0,35	0,15	0,8-1,2	0,25	0,15-0,4	0,15	0,15	95,8-98,6
Mekanik Özellikler									
Temper	Akma Mukavemeti (MPa) Min-Maks			Çekme Mukavemeti (MPa) Min-Maks		Uzama (%)	Sertlik (Brinell)		
T6	276			310		17	95		

Kaynak: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6> (Erişim tarihi: 8.08.2019)

Tablo 2.2 EN AW 2024-T3 Malzeme özelliği

Kimyasal Bileşim									
Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	0,1	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	3,8-4,9	0,15	0,15	90,7-94,7
Mekanik Özellikler									
Temper	Akma Mukavemeti (MPa) Min-Maks			Çekme Mukavemeti (MPa) Min-Maks		Uzama (%)	Sertlik (Brinell)		
T3	345			483		18	120		

Kaynak: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T3> (Erişim tarihi: 8.08.2019)

Tablo 2.3. EN AW 7050-T7451 Malzeme özelliği

Kimyasal Bileşim									
Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,15	0,12	0,04	0,1	1,9-2,6	5,7-6,7	2-2,6	0,06	0,15	87,3-90,3
Mekanik Özellikler									
Temper	Akma Mukavemeti (MPa) Min-Maks			Çekme Mukavemeti (MPa) Min-Maks		Uzama (%)	Sertlik (Brinell)		
T7451	469			524		11	140		

Kaynak: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7050T745> (Erişim tarihi: 8.08.2019)

Karakteristik Özellikleri: Yüksek sertlik, korozyon dayanımı yüksek, orta zorlukta kaynak edilebilirlik

Uygulama Alanları Savunma Sanayi, Uçak Sanayi Demiryolu vagonlarında ağır yapılar Kamyon korkulukları Gemi inşa sektörü KöprülerAskeri köprüler Boru Taşımacılık Kazan imalatı Motorbotları Uzay uygulamaları Helikopter pervane kaplaması Perçin Kule

2.2. Üretim Yöntemleri

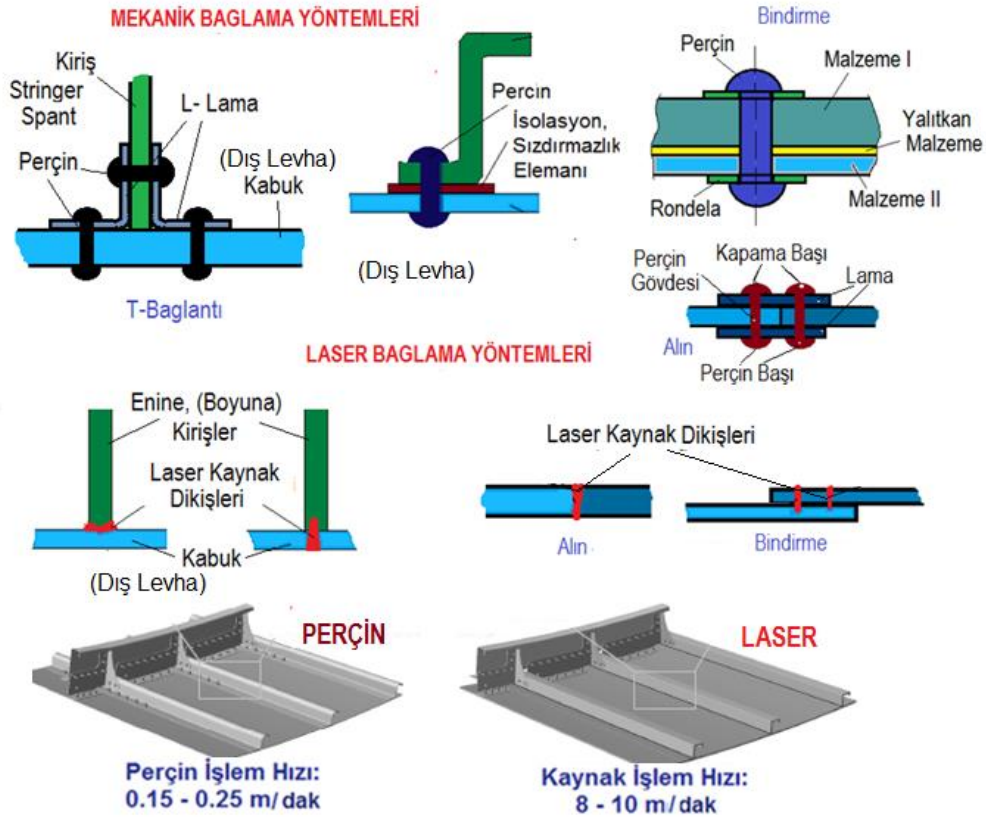
Uzay ve Havacılık sektöründe, uçak ve helikopter tasarımlarında yaygın olarak mekanik bağlama yöntemleri kullanılmaktadır. Malzeme bağına dayalı yapıştırma yöntemleri de kısıtlı olarak uygulanmaktadır. Yüksek dayanımlı alaşımli alüminyum malzemelerin kaynak kabiliyetleri düşüktür. Alaşımli alüminyum malzemelerine sonradan kazandırılan mekanik ve teknolojik özelliklerin özellikle ergitme kaynak ısısı ile büyük ölçüde değişmesi yani düşmesi söz konusudur. Bunun dışında yüksek ısı iletkenliği, ışını yansıtması, yüzeyde oluşan oksit tabakası (Al_2O_3) kaliteli ergitme kaynak bağlantılarının gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadırlar. Kaynak dikişlerinde soğuma sırasında çatlak oluşumu, gaz boşlukların, gözeneklerin ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır.

2.3. Laser Kaynak Bağlantılı Tasarımlar

Uçak ve helikopter yapımlarında çoğunlukla kullanılan yüksek dayanımlı alaşımli alüminyum hafif metallerin birleştirilmelerinde laser kaynak yöntemlerin uygulanması üzerinde bilimsel çalışmalar sürdürülmektedir. Yüksek dayanımlı alaşımli alüminyum malzemelerin kaynak kabiliyetleri düşüktür. Yüksek ısı iletkenliği, laser ışığı, ışını yansıtması, yüzeyde oluşan oksit tabakası (Al_2O_3) kaliteli kaynak bağlantılarının gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadırlar. Alaşımli alüminyum malzemelerine sonradan kazandırılan mekanik ve teknolojik özelliklerin kaynak ısısı ile büyük ölçüde değişmesi de söz konusudur. Kaynak dikişlerinde soğuma sırasında çatlak oluşumu, gaz boşlukların, gözeneklerin ortaya çıkması sorunlarına karşın, güvenilir alternatif çözüm arayışları devam etmektedir.

Proje çalışmasında; havacılık sektöründe uçak ve helikopter yapımında alüminyum alaşımli malzemelerin, (AA2024-T3 ve AA7050-T7451) birleştirilmesinde laser kaynak

yöntemlerinin uygulanabilirliği ile, köşe kaynak ve bindirme bağlantılarının mekanik ve teknolojik özelliklerinin incelenmesi dikkate alınmıştır (Özden ve Eryavuz, 2016). Laser kaynak numunelerin yüz görüntüleri değerlendirildikten sonra makro ve mikro içyapıları incelenecektir. Sertlik ölçümleri testleri uygulanacaktır. Bulunan değerler tablo, grafik şekillerle yorumlanıp değerlendirilecektir



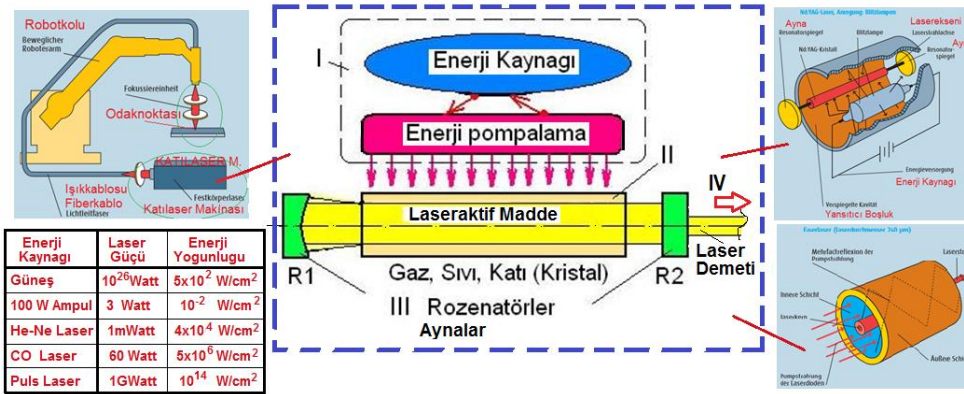
Şekil 2.2. Uçak ve helikopter tasarımlarında şekil bağında dayalı mekanik bağlayıcılar ile malzeme bağına dayalı laser kaynak bağlantıların şekilsel bir karşılaştırılması

3. LASER TEKNOLOJİSİ

3.1. Laser

Laser, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, İngilizce Sözlerinin baş harflerinden türetilmiştir (Özden ve Eryavuz, 2016). Örneğin bir el feneri düzensiz her yöne farklı dalga boyutlarında ışık yayarken, bir laser örneğin laser pointer, ışığı, ışını; aynı frekans dalgalı, tek renkli ve aynı yönde, birbirine paralel bir demet halinde büyük mesafelerde, kilometrelerce uzağa kayıpsız yaymaktadır.

Laser kalite tanımları, Laser tipine ve dalga boyuna göre farklılık gösterse de genellikle üretilen ışının odaklanabilirliği ve netlik değerleri dikkate alınmaktadır. Örneğin laser ışınının(ışığının) kaliteli olması ve enerji yoğunluğunun yüksek olması, laser odak noktasının keskin çapının küçük ve net olmasına bağlıdır[Özden, 2008a; Özden, 2007).



Şekil 3.1. Laser üretim makinalarının prensip yapısı (Özden, 2015c)

Yaygın kullanılan laser güç üniteleri dört ana bileşenden oluşmaktadır. Laser makinaları katı hal laserleri ve gaz laserleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Laserler bundan başka dalga boyu ve üretilen ışığın kalitesi gibi özelliklerine bağlı olarak birkaç kategoride toplanabilir. Bir diğer önemli farklılaşma da Işık emisyonudur:

- Sürekli dalga modu: Bu modda, bir laser ortam içinde sürekli olarak pompalanır,
- Sıralı yayma modu: Darbeli modda, kazanç ortamı kısa laser darbeleri üretmek için öbekler halinde pompalanır.

Güç, süre ve laser atımları frekanslı kaynak için önemli parametrelerdir. Farklı malzeme çeşitleri için laser cihazının farklı çalışma modları gereklidir. Uygun laser türü seçimi ile malzeme seçimi yakın koordinasyon içinde yapılmalıdır.

3.2. Laser Makinaları

Bkz Şekil 5.8, RUB’de diyod laser pompalı Nd:YAG laser makinası ve üç boyutlu bilgisayar destekli hareketli tezgah. Pulsalı laser kaynak yöntemi ile pulsparamsetelerin uygun kombinasyonu ile noktasal olarak ısı enerjisinin dozajı verilerek kabul edilebilir kalitede kaynak dikişlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır (Özden, 2015c).

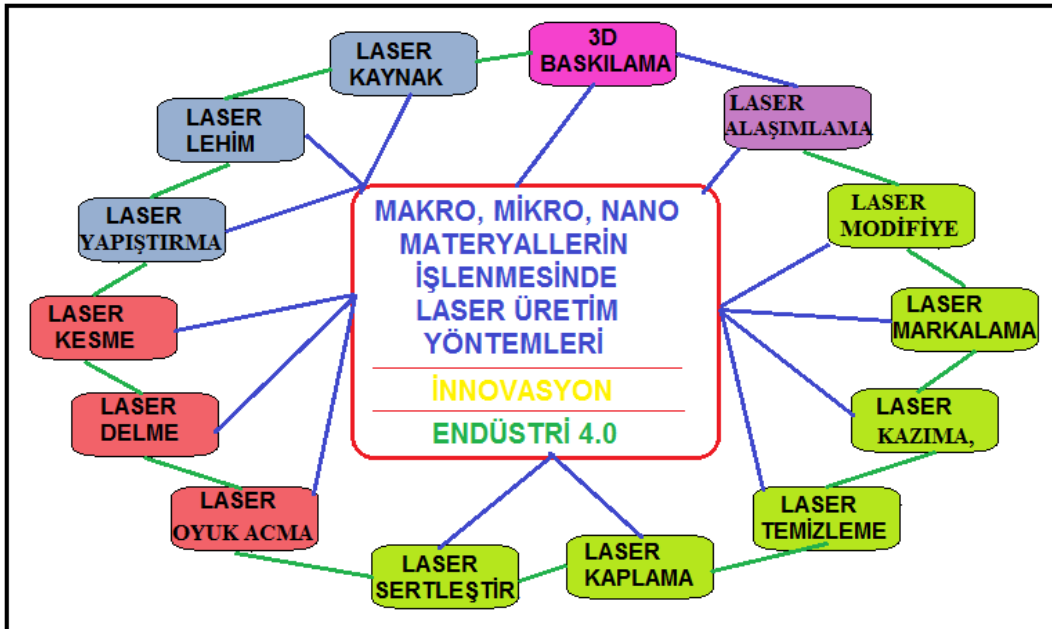
Piyasada olan gücü fazla laser makinalarının ortak özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Yüksek güç,
- Yüksek odaklı enerji yoğunluğu;
- İyi laser kalitesi, - Yüksek randıman,
- Bilgisayar destekli komutlara ve kontrole uygunluk,
- Kompakt yani yekpare yapı tarzı,
- Mevcut makine sistemlerine, üretim tezgâhlarına ve portallarına,
- Üretim bantlarına robotlara entegre olabilirliliği,
- Mobilite özellikleri,
- Uzun ömürlülük,
- Düşük maliyet,
- Sürekli ve impuls, (darbeli) işleme uygunluk (Özden, 2015; Özden, 2008b; <http://www.ipgphotonics.com/>)

3.3. Laser Üretim Yöntemleri

Havacılık ve uzay sanayinde, uçak ve helikopter yapımlarında malzemelerin işlenmesinde kullanılan imalat yöntemlerin başlıklalar altında bir sıralanması; (Kocik et al., 2006; Özden, 2008a; Özden, 2009; Özden, 2013; Özden, 2015a; Özden, 2015b; Özden, 2015c; Özden ve Eryavuz, 2016).

- Ayırma Talaş kaldırma yöntemleri; kesme, delme, oyuk kanal, diş, açma
- Birleştirme yöntemleri, laser kaynağı, laser lehim, laser yapıştırma
- Yüzey işlem yöntemleri, laser sertleştirme, laser kaplama, yüzey modifikasyonlama (Yüzey şekillendirme), Pürüzlendirme, Yüzey rodajlandırma, renklendirme
- Markalama,
- Laser ile sinterleme
- Laserle Alaşımlıma
- Laserle 3D baskı Yöntemleri



Şekil 3.2. Havacılık ve uzay sanayinde laser üretim yöntemleri (Özden, 2015b)

3.4. Laser Kaynak Yöntemleri

Odaklanmış laser ışınının enerji miktarına göre malzemelerin işlenmesinde üç yöntem kullanılmaktadır: (Şekil 3 de laserli malzeme işlem yöntemleri şematik şekilde gösterilmiştir.) Malzemenin İşlem noktasında, (odak noktasında) yoğunlaştırılan enerji miktarı $E_{\text{Laser}} = 10^3 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ arasında olabilmektedir. Ergitme kaynağında arkın 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. Örneğin; malzeme cinsine, yüzeyin parlaklığına, laserin cihaz gücüne ve laserin dalga boyuna, kullanılan işlem gazlarına, odak noktasının uzunluna, netliğine, dairesel çapının büyüklüğüne ve pozisyonuna ve bağlı olarak değişmektedir (Özden, 2007; Özden, 2008a)



Şekil 3.3. Laser malzeme işleme yöntemlerinin (Özden, 2015c)

3.5. Havacılık ve Uzay Sektöründe Laser Kaynak Yöntemlerinin Değerlendirilmesi



Laser kaynak dikişlerin yüksek kalitesi yanında çok yüksek işlem hızları, problemsiz erişilebilirlik, 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 yada çok zaman alıcı külfetli tasarımlar günümüzde laser kaynak yöntemleri ile kolaylıkla gerçekleştirilmektedirler (Özden, 2015c; Özden, 2013), (Bkz Şekil 6). Ergitme kaynak yöntemleri ile laser kaynak yöntemlerinin bir karşılaştırılması gösterilmektedir. Laser kaynak yöntemleri ile bir pasoda yüksek işlem hızları ile 20 mm kalınlığına kadar çelik parçalar kaynak ağzı açılmadan birleştirilmektedir. MIG/MAG, WIG (TIG) gibi ergitme kaynak yöntemleri ile aynı kalınlıktaki parçanın alın kaynağı için kaynak ağzının açılması daha sonra kök kaynağı ile başlanarak çok sayıdaki

kaynak pasoları ile tamamlanması gerekmektedir. Ergitme kaynak yöntemlerinde her paso için uygulanan farklı kaynak hızları, tek pasoda tamamlanan laser hızına nazaran çok düşüktür. Laser kaynak dikişlerinde ITAB bölgesi yok denecek kadar azdır.

3.6. Laser Kaynak Parametreleri

Laser kaynak bağlantılarının kalitesine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi laser, makine, parça ve malzeme parametreleri olarak dört gruba ayrılan, işlem parametreleridir. Laser parametrelerine Tablo 3.1’de laser kaynak parametreleri gösterilmektedir (Özden, 2009; Özden ve Eryavuz, 2016).

Tablo 3.1. Laser kaynak parametreleri .

Grup.	LASER KAYNAK PARAMETRELERİ
Laser Parametreleri	Laser tipi (CW Laser;  , Pulsu (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.
Makina Parametreleri	Laser demeti iletimi, (Fiber kablo, Ayna sistemi), Odak noktası çapı ve uzunluğu, Odak noktasının netliği, Odak noktasının pozisyonu, İşlem gazları (Koruyucu gaz), İşlem 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 yüzey durumu, Kaplama tipi ve kalınlığı,...
Malzeme Parametreleri	Malzemenin kimyasal yapısı (alaşım elementleri), Kaynak kabiliyeti, Aynı özellikteki malzemelerin birbiri ile kaynağı, Farklı özelliklere sahip malzemelerin karmalı kaynağı, Malzemenin fiziksel özellikleri, (Isıl iletkenlik, Absorpsiyon, Yansıtma Malzemenin yoğunluğu,) İç yapı,

Kaynak: (Özden, 2009)

4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLI METALLERİN LASER KAYNAĞINDA TEKNOLOJİK GELİŞMELER

Uçaklarda alaşımli alüminyum malzemelerin kaynağı ile ilgili bilimsel çalışmalar, denemeler 1970 yıllarında laserin endüstride kullanımı ile başlamıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ilerisi için umut verici olurken, uçaklarda mekanik bağlayıcılar yerine laser kaynak dikişli bağlantılara geçilememiştir. 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımli alüminyum metallerin birbirleri ile ve karmalı laser kaynak bağlantıları ile ilgili çalışmalar sürdürülmüştür. Laser alın, köşe ve bindirme bağlantılı kaynak dikişlerinde; çatlak oluşumun ve gözeneklerin giderilmesi, intermetalik yapının kontrolü sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için yürütülen bilimsel çalışmalarda farklı yöntemler, teknikler uygulanmıştır. Laser hybrid kaynağı denenmiştir, kaynak öncesi ve kaynak sırasında induksiyon tekniği ile parçalarının ısıtılması, kaynak kabiliyetini artıran alaşım malzemelerinin kullanımı, ek malzeme kullanımı gibi birçok olanaklar incelenmiştir (Tober ve Heinrich, 2001; Seefeld, 2002; Rötzer, 2004; Seefeld et al., 2004; Schumacher, 2005; Kocik et al., 2006; Gruss, 2008; Akkurt vd., 2012). (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Uçaklarda kullanılan laser kaynak bağlantılı panel sayısı ve kaynak dikişlerinin uzunluğu
(Kocik et al., 2006)

Yüksek dayanımlı hafif farklı metallere, CFK, GFK kompozit malzemelerin farklı karmalı uygulamaları uçak, helikopter tasarımlarında ağırlıktan ve maliyetten ve enerjiden çok daha fazla kazançlar beklenilmektedir. hafif alaşımli alüminyum metallere, CFK kompozitlerin aynı ve karmalı laser birleştirmelerine odaklı bilimsel araştırmalar yürütülmektedir. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin karmalı bağlantılarında karşılaşılan sorunların başında iç yapıdaki intermetalik oluşumdur. İntermetalik yapı bağlantının dayanımı düşürmektedir. (Tober ve Heinrich, 2001; Gruss, 2008; Çavuşoğlu ve Özden, 2011; Enz, 2012).

Havacılık ve uzay sektöründe, kabul edilebilir kalitede laser kaynak bağlantılı uçak ve helikopter tasarımlarında ortaya çıkan sorunların üstesinden; ışın kalitesi yüksek ve atımlı laser kaynak makinalarının kullanımı ve uygun parametre kombinasyonları seçimi giderilmesi araştırılmaktadır. Proje havacılık ve uzay sektöründe güvenli uygulanabilir laser kaynak bağlantıları ile ilgili yürütülen bilimsel çalışmalara katkı sağlayacaktır.

5. DENEYSEL, UYGULAMALI ARAŞTIRMALAR

Deneysel çalışmalar laser kaynaklı numuneler Berlin Teknik Üniversitesinde ve Bochum Ruhr Üniversitelerinde, Almanya’da Laser ARGE-Merkezlerinde hazırlanmıştır.

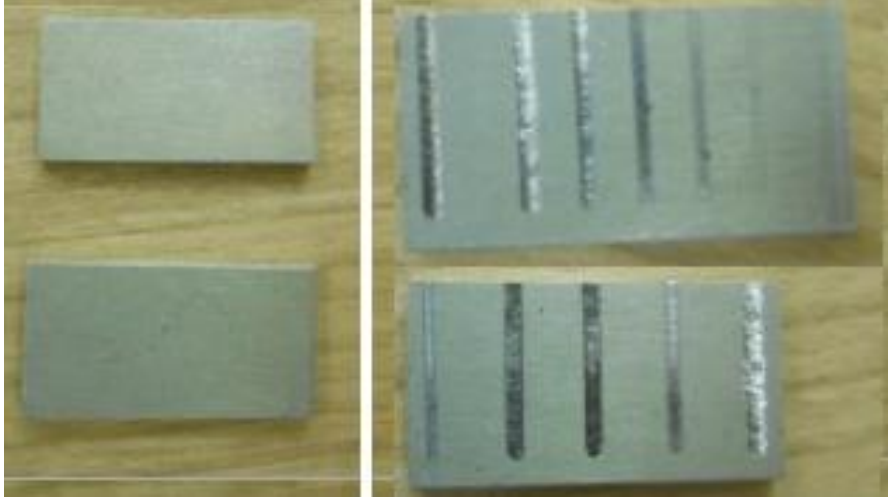
5.1. Kaynaklı Numunelerin Hazırlanması

Yüksek dayanımlı uçak ve helikopter yapımlarında yaygın kullanılan ve iki farklı firmanın tedarik ettikleri AL 2, 5, 6 ve 7 serisi malzemeler kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşenleri Tablo 5.1’te verilmiştir.

Laser kaynaklı numuneler farklı ebatlarda laser makine sistemine ait tutturma tertibatına ve laser makinasının gücüne göre hazırlanmıştır. Şekil 5.1, yer alan fotoğraflarda kaynak öncesi farklı ebatlarda numuneler görüntülemiştir. Alüminyum numunelerin yüzeyleri temizlenmiştir, kaynak öncesi hemen aseton ile silindikten sonra üzerlerine farklı laser parametreleriyle kaynak dikişleri çekilmiştir. Laser kaynak dikişli numunelere örnek fotoğraf görüntüleri; Şekil 5.2’de laser kör kaynak dikişli numuneler, Şekil 5.3’te Laser alın kaynak bağlantılı numuneler yer almaktadır. Laser kaynak parametreleri ile ilgili değerleri Tablo 6.1’de düzenlenmiştir. Önemli laser parametreleri numunelerin üzerinde yazılı olarak da bulunmaktadır. Parçalar testere kesilerek hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal analizleri

	Kimyasal Bileşim								
	Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Al
2024-T3	0,4	0,5	0,10	0,5	1,5	0,2	3,9	0,15	90,9
5182	0,21	0,18	0,001	0	5,8	0,01	0,02	0	93,8
6061-T6	0,5	0,5	0,05	0,10	0,9	0,2	0,16	0,15	95,9
7050-T7451	0,1	0,10	0,03	0,10	2,0	5,7	2,0	0,06	87,8



Şekil 5.1.. Numunelerin kesilerek inceleme için hazırlanması



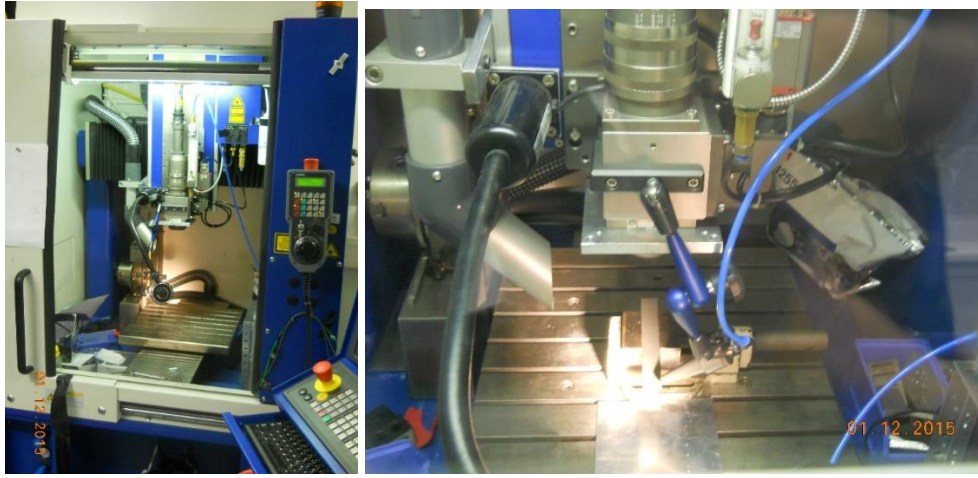
Şekil 5.2. Alüminyum kaynak Numunelerin ve laser kör kaynak dikişlerin örnek görüntüleri,
(Numunelerin ebatları (uzunluk genişlik kalınlık (20 mm x 10 mm x 5 mm)

5.2. Laser Kaynak Makine Sistemi

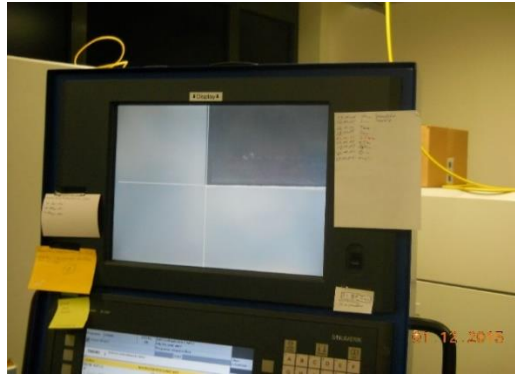
Resimleme 5.8'de Laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı RUHR Üniversitesi, Laser Kaynak laboratuvarı, Laser kaynak makinası, bilgisayar destekli üç boyutlu hareketli kaynak tezgâhı ile görülmektedir. Kaynak Makinası Pulsalı Nd:YAG-Laser: LASAG SLS 200 CL16, 1064 nm



Şekil 5.3. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kafası ve düzeneği



Şekil 5.4. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kafası ve düzeneği

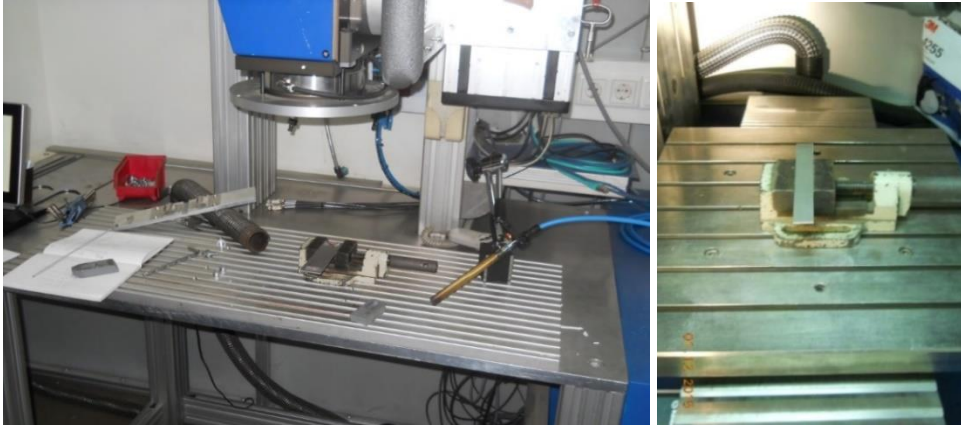


Şekil 5.5. RUB LASER laboratuvarındaki kaynak makinası kamerasının görüntüsü

LMB Laser-Materialbearbeitungs firmasındaki makinanın bilgisi

Tablo 5.2. Kaynak Makinası Bilgisi

MARKA:TRUMPF	MODEL:TruDisk 4002
Wavelength	1030 nm
Laser power	4000 W
Beam quality	8 mm•mrad
Min. diameter laser light cable	200 µm
Power stability at nominal power	± 1 %
Cooling water temperature range	5 °C - 25 °C
Dimensions	
Width	1600 mm
Height	1650 mm
Depth	950 mm



Şekil 5.6. Laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı laboratuvarı ve Tuturma tertibatı odaklanmış



Şekil 5.7. Laser kaynak dikişli numunelerin hazırlandığı LMB Laser-Materialbearbeitungs firması

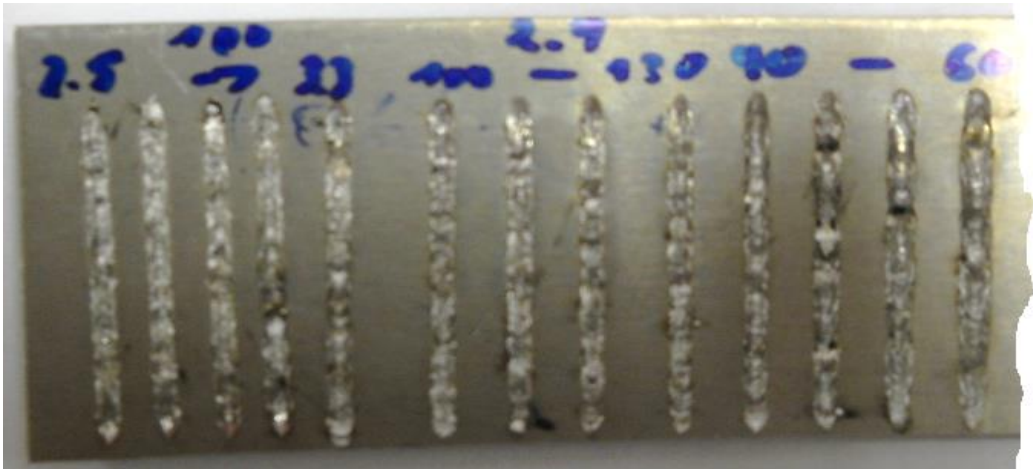
5.3. Deneyler

Deney 1: AA6051-T6 Laser Kır Kaynak Dikişi

RUHR Üniversitesi, Laser Kaynak laboratuvarında(LAT) bulunan, Laser kaynak makinası (bilgisayar destekli üç boyutlu hareketli kaynak tezgâhı Pulsu Nd:YAG-Laser: LASAG SLS 200 CL16, 1064 nm) ile parçalar kır kaynak dikişi aşağıdaki parametrelerle kaynatılmıştır.

Tablo 5.3. Kır kaynak dikişi kaynak parametreleri (RUB LAT)

NUMUNE SAYI	(P)GÜÇ	HIZ(mm/dk)	Frekans(Hz)
1	1000 W	4000	50
2	2000 W	4000	50
3	3000 W	4000	50
4	4000 W	4000	50
5	5000 W	4000	50
6	5000 W	2000	50
7	5000 W	2000	25
8	3000 W	1000	50
9	5000 W	100	50
10	5000 W	50	50
11	1000 W	50	50
12	1000 W	50	50



şekil 5.8. Kır kaynak dikiřlerini ek malzemesiz AA 6061-T6 Malzeme



Şekil 5.9. Kör kaynak dikişlerimi ek malzemesiz AA 6061-T6 Malzeme Makro

Tablo 5.4. Kör kaynak dikiş mikro vickers sonuçları

	Ana malzeme	kaynak		Ana malzeme	kaynak
1	98.7	64	7	98.6	66
2	98.7	65.6	8	98.6	72
3	98.7	68	9	98.7	61
4	98.5	60	10	98.7	62
5	98.7	65	11	98.7	57
6	98.7	68	12	98.7	61

Deney 2: AA6051-T6 Laser Bindirme Kaynak Dikişi

4 adet bindirme kaynak numunesi Iserlohn, Almanya lokasyonunda LMB Laser-Materialbearbeitungs firmasında TRUMPF marka MODEL:TruDisk 4002 Laser kaynak makinası ile aşağıdaki parametrelerle kaynatılmıştır.

Tablo 5.5. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri(LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)

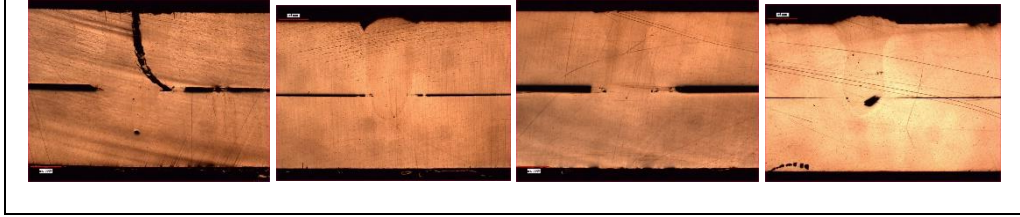
NUMUNE SAYI	GÜÇ	HIZ	KORUMA GAZI
1	2500 W	33 mm/s	YOK
2	2500 W	66 mm/s	YOK
3	2500 W	66 mm/s	Ar 12
4	2500 W	80 mm/s	Ar 12



Şekil 5.10. Bindirme kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüler AA 6061-T6 Malzeme

Tablo 5.6. Bindirme kaynak dikiş mikro vickers sonuçları

	Ana malzeme	kaynak
1	105	57
2	100	60
3	101	60
4	100	65



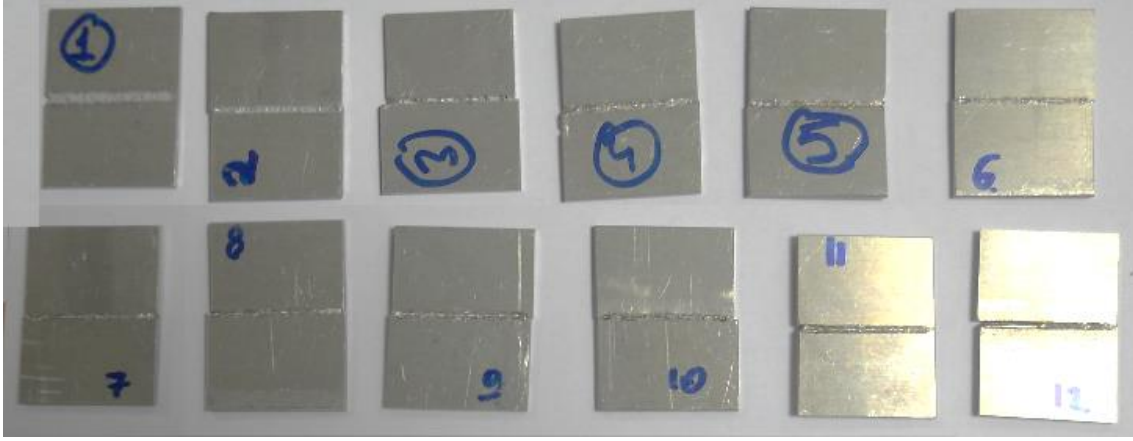
Şekil 5.11. Bindirme kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden makro görüntüler

Deney 3: AA6051-T6 Laser Alın Kaynak Dikişi

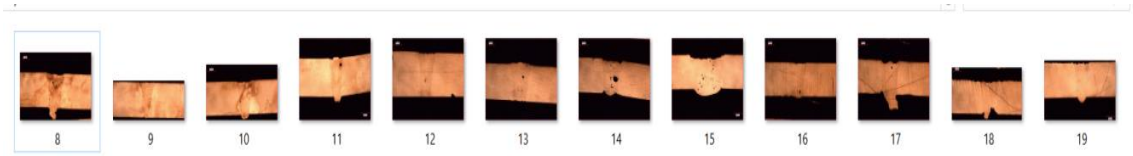
12 adet alın kaynak numunesi Iserlohn, Almanya lokasyonunda LMB Laser-Materialbearbeitungs firmasında TRUMPF marka MODEL:TruDisk 4002 Laser kaynak makinası ile aşağıdaki parametrelerle kaynatılmıştır.

Tablo 5.7. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri(LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)

NUMUNE SAYI	GÜÇ	HIZ	KORUMA GAZI
1	2500 W	100 mm/s	Ar 12
2	2500 W	120 mm/s	Ar 12
3	2700 W	120 mm/s	Ar 12
4	2900 W	120 mm/s	Ar 12
5	3100 W	120 mm/s	Ar 12
6	3300 W	120 mm/s	Ar 12
7	3500 W	120 mm/s	Ar 12
8	3700 W	120 mm/s	Ar 12
9	3700 W	120 mm/s	Ar 12
10	3900 W	120 mm/s	Ar 12
11	4000 W	120 mm/s	Ar 12
12	4000 W	100 mm/s	Ar 12



Şekil 5.12. Alın kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüler AA 6061-T6 Malzeme



Şekil 5.13. Alın kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden makro görüntüler AA 6061-T6 Malzeme

Tablo 5.8. Alın kaynak dikiş kaynak parametreleri(LMB Laser-Materialbearbeitungs firması)

	Ana malzeme	kaynak		Ana malzeme	kaynak
1	105	61	7	102	59
2	100	68	8	101	59
3	101	54	9	100	59
4	100	62	10	100	61
5	103	61	11	102	58
6	103	64	12	100	60

Deney 4: AA2024-T3 Laser Alın ve 7050-T7351 Laser Alın Kaynak Dikişi

6 adet alın kaynak numunesi Burbach, Almanya lokasyonunda IPG Laser GmbH firmasında aşağıdaki parametrelerle kaynatılmıştır.

Tablo 5.9. IPG FLW D50 Kafa ile kaynak parametreleri

Numune No	Laser Gücü(Kw)	Hız[m/dk]	Gaz debisi[lit/dk]	Odak Pozisyonu	Tel sürme hızı	Açı	Açıklamalar
1	4	3	0	-4	0	90	Koruyucu Gazsız Kaynak
2	5,5	3	25	-4	0	90	Salınım 300 Hz 0,2 genlik
3	5,5	2	25	-4	0	90	Salınım 300 Hz 0,2 genlik
4	5,5	3	25	-4	0	90	Koruyucu Gaz ile 2 no parametreleri ile Kaynak

Tablo 5.10. Precitec YW50 Kafa ile kaynak parametreleri

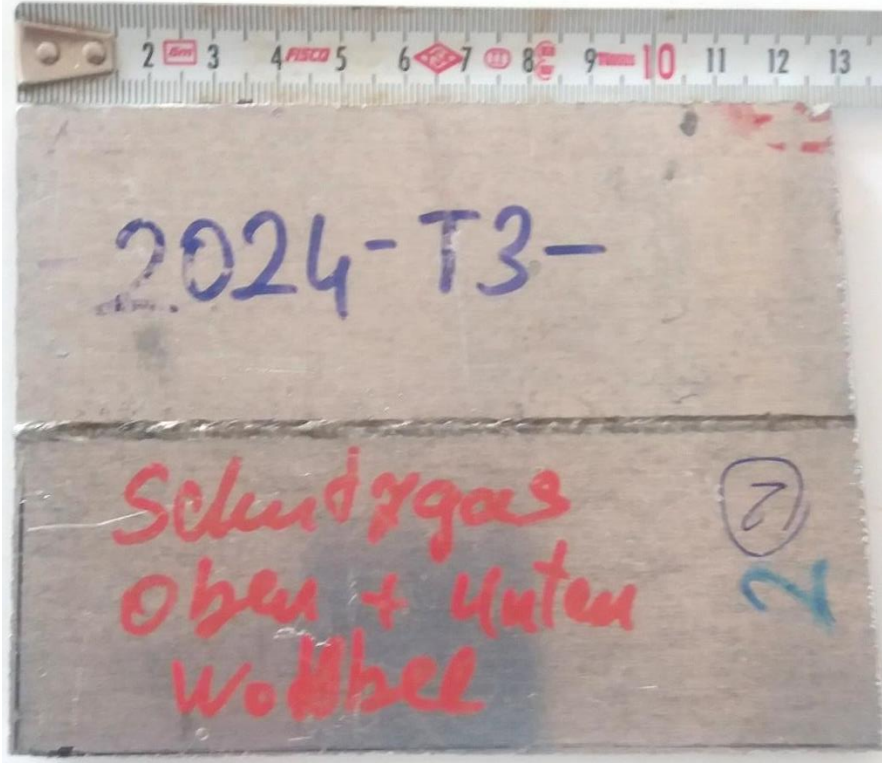
Numune No	Laser Gücü(Kw)	Hız[m/dk]	Gaz debisi[lit/dk]	Odak Pozisyonu	Tel sürme hızı	Açı	Açıklamalar
5	5,5	2	25	-4	2	90	Sadece üstten koruyucu gaz ile
6	5,5	2	0	-4	2	90	Koruyucu Gazsız Kaynak



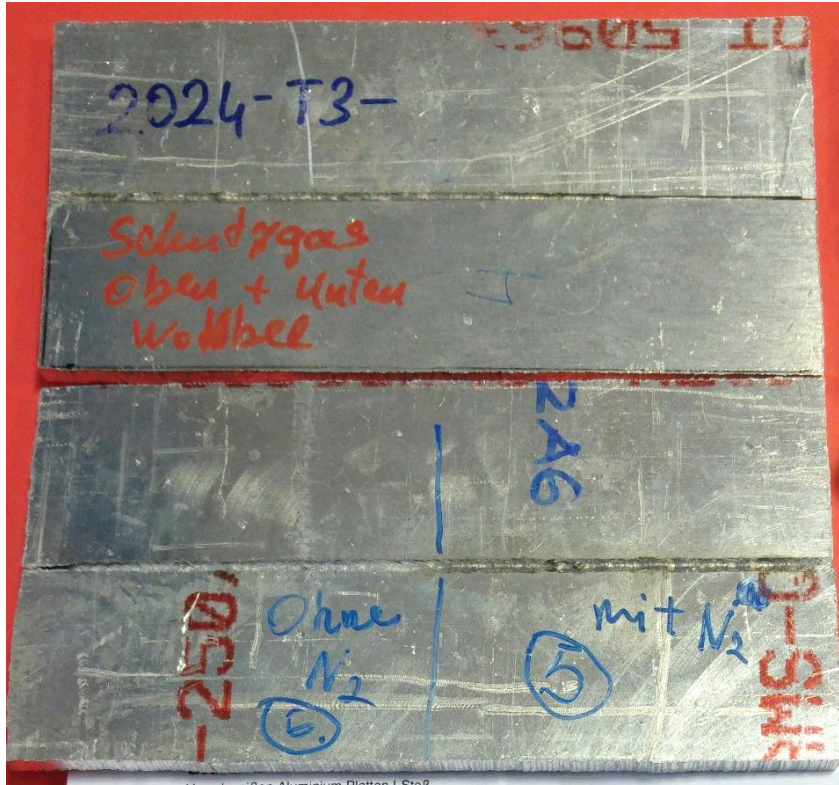
Şekil 5.14. AA 7050-T7351 alın kaynak denemeleri



Şekil 5.15. AA 2024 Laser alın kaynak bağlantılı numunelere örnek fotoğrafın alttan görüntüsü.



Şekil 5.16. AA 2024 Laser alın kaynak dikişli numune üstten örnek görüntü



Şekil 5.17. AA 2024-T3 alın kaynak denemeleri numunlerin alttan üstten görüntüsü (gaz korumalı ve gaz korumasız)

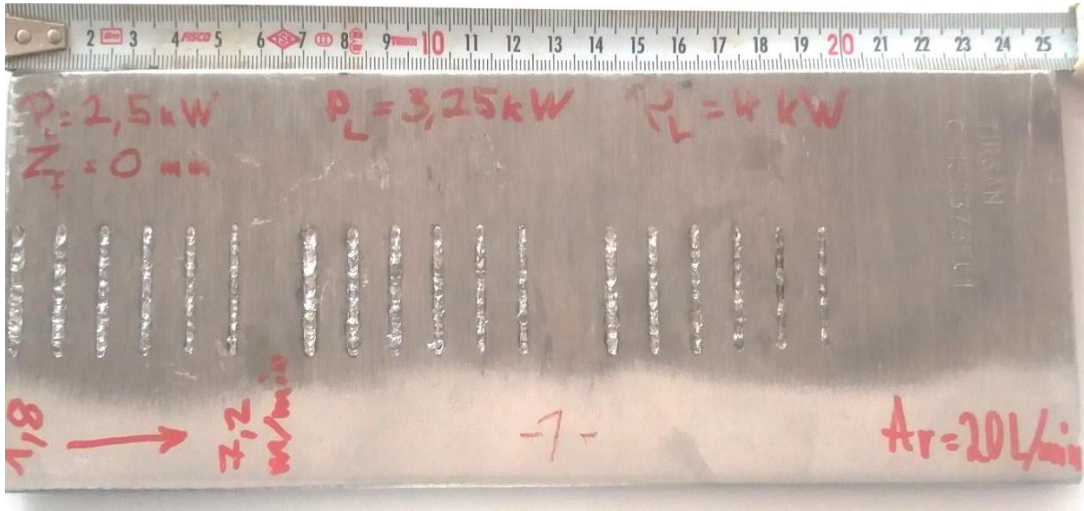


Şekil 5.18. AA 2024 –T3 7050-T7351 alın kaynak denemeleri makro görüntüsü

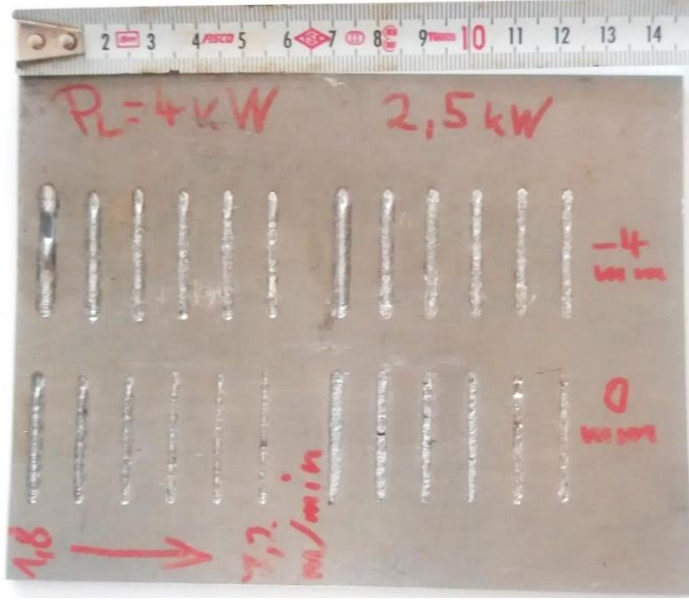
Tablo 5.11. Alın kaynak dikiş kaynak mikro vickers değerleri

	Ana malzeme	HAZ	kaynak
1	157	170	130
2	144	148	106
3	139	164	140
4	142	138	104
5	139	148	118
6	153	138	105

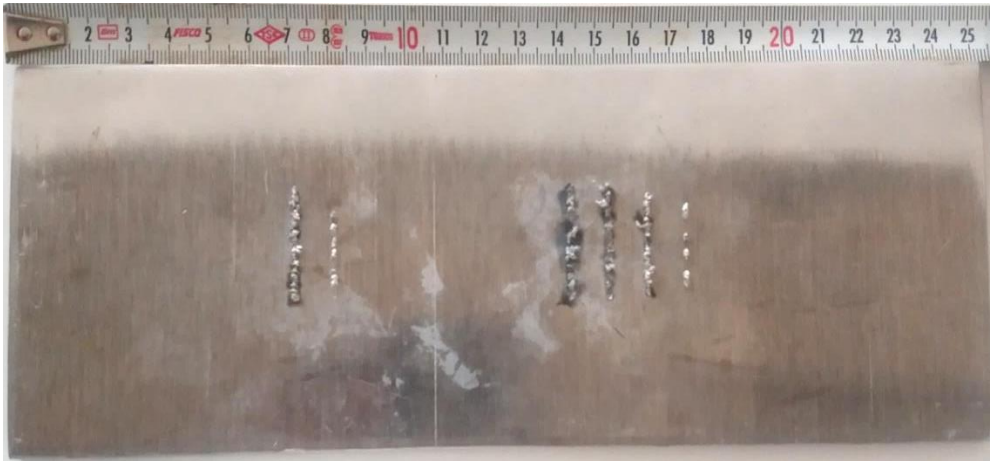
Deney 5: AA5182 Laser Kör Kaynak Dikişi



Şekil 5.19. AA 5182 Kör dikiş için parametre denemeleri numunesi sağ taraf P:4 kW,orta taraf P:3,25kW sol taraf P:2,5kW Korumucu gaz debisi Argon 20 lt/dk. Laser kör kaynak dikişli numune üstten örnek görüntü

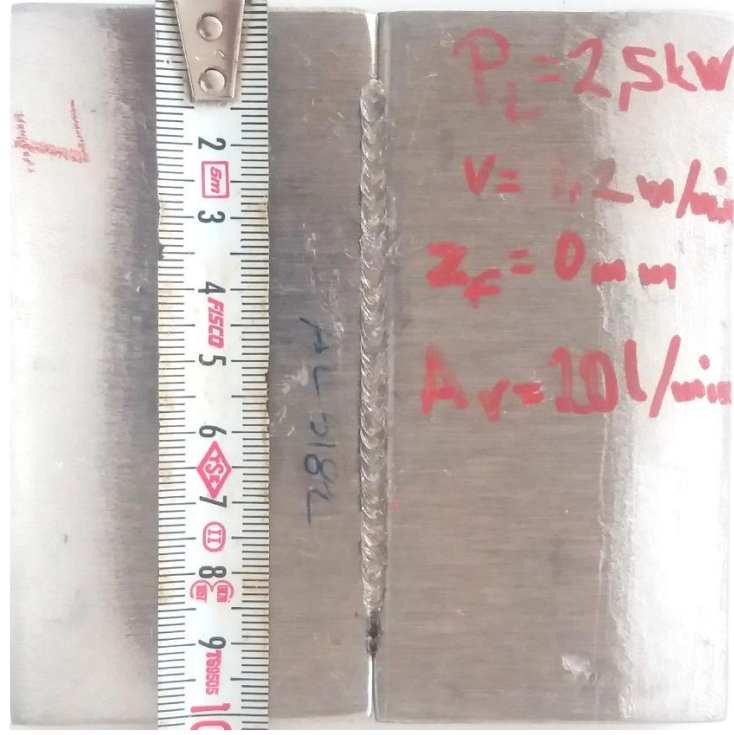


Şekil 5.20. AA 5182 Kör dikiş için parametre denemeleri numunesi sol taraf P:4kW,sağ taraf P:2,5kW



Şekil 5.21. AA 5182 Laser kör kaynak dikişli numune altından örnek görüntü

Deney 6: AA 5182 Laser alın kaynak dikişi



Şekil 5.22. Alın kaynağı AA 5182 P:2,5 kW V:1,2 m/dk Zf:0 mm Ar:20 lt/dk

6. LASER KAYNAK DİKİŞLERİN İNCELENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ

Sanayi projesi olarak hazırlanan çalışmadan, tezin amacına uygun olarak; hazırlanan laser kaynak dikişlerinin dış görünüşleri, makro ve mikro yapı özellikleri ve sertlik ölçümleri ve kaynak dikişlerin kimyasal analizi değerlendirilmiştir.

Laser kör kaynak dikişli ve alın bağlantılı kaynak dikişli numunelere bakıldığında birbirinden farklı oluşumlar ortaya çıkmıştır. Dikişlerde kayda değer düzgünsüzlüklerden ziyade farklı genişliklerde kaynak dikişleri Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 daha çok malzemeye aktarılan enerji miktarına yani laser gücüne ve işlem hızına göre şekillenmektedir. Geniş laser kaynak dikişlerinin nufuziyetinde derin olduğu arka yüzeydeki ısı izlerinden görülmektedir. Dış görünüşlerinde ani sapmalı aksenal düzgünsüzlüklere rastlanılmamaktadır. Laser gücüne ve hızına yani malzemeye aktarılan enerji dozajına bağlı olarak farklı genişliklerdedirler. Bazı kararmalar malzeme yüzeyine çöken odaklanan tozlardan kaynaklanmaktadır. Kaynak dikişlerindeki pullanma oluşumu da düzgün gözükmez. Dikişlerin yüzeyleri bir öncekilere kıyasla seçilen parametrelere göre düzgün olmayan pullanmalar ortaya çıkmaktadır, Buharlaşmaya varan ısı nedeniyle kaynak sırasında malzeme içindeki elementlerin ve yüzeyde oluşan oksit tabakasının buharlaşması ile ortaya çıkan sıvı malzemenin patlamalı şekilde dağılımları oluşmuştur. Bunun dışında bazı laser kaynak dikişlerinde çatlak izlerine de rastlanılmaktadır.

Alın kaynak bağlantılı kaynak dikişlerinde de uygulanan parametre kombinasyonlarına göre farklılıklar çıplakla gözle gözlenmektedir. Yanma olukları deneylerde kullanılan makine sisteminde sürekli dalga modu ile kaçınılmaz olmaktadır. Oluklar bağlantının her iki tarafında oluşması, kaynak banyosunun aniden buharlaşma sıcaklığına ulaşırken kenardaki soğuk metalin eriyerek yüksek sıcaklıktaki orta kısma akın etmesi ile yani sürekli bir sirkülasyon etkisi ile kenarlarda oluklar oluşurken kaynak dikişin ortası hafif tümsekleşmektedir. Kaynak dikişlerin arka yüzeylerinde ise kesikli sarkıklar meydana gelmektedir. Sarkıkların oluklara kıyasla dayanım açısından daha olumludur.

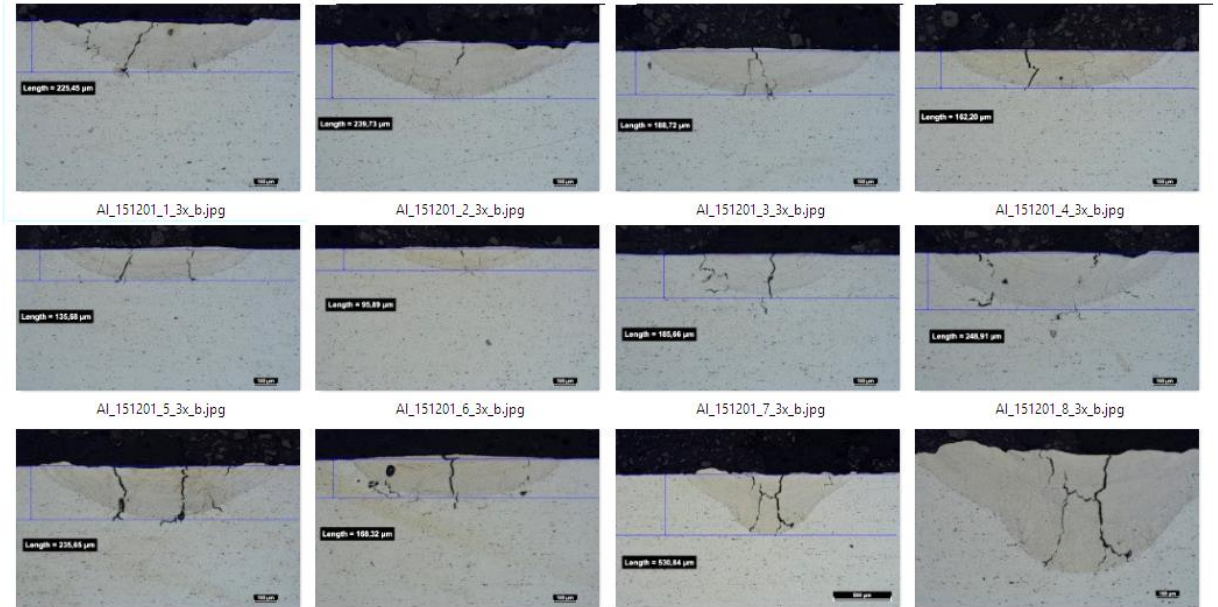
Bu olumsuzlukların giderilmesi için uygun parametre kombinasyonları ve laser makina sistemi dışında farklı yöntemler aklı gelmektedir. Örneğin; laser sonrası dolgu, kaplama kaynak dikişin çekilmesi veya ek malzeme kullanılması. Zararsız sarkmaların ise kaynak sonrası talaşlı bir yöntem ile tıraşlanması ile giderilebilir. Genelde laser kaynağı ile

noktasal kesikli ve sürekli enerji dozajı bu tip hataların giderilmesi mümkün olurken, bu gibi makine sistemlerin maliyeti hayli yüksektir, günümüzde belli ARGE- Merkezlerinde kullanımları bulunmaktadır.

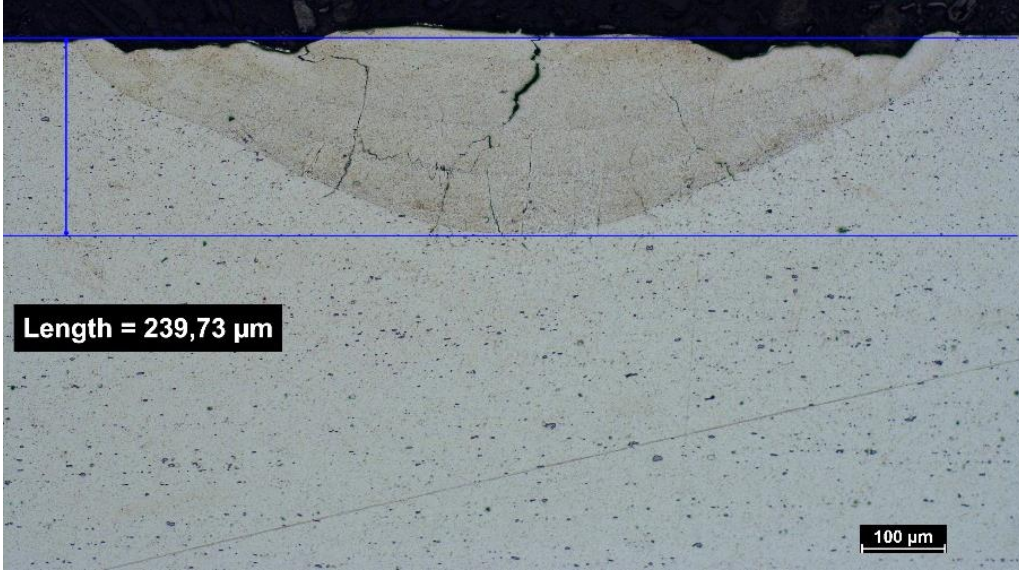


Şekil 6.1. Alın, bindirme ve kör kaynak bağlantılı laser kaynak dikişli numunelerden örnek görüntüler AA 6061-T6 bakalite alınmış halleri

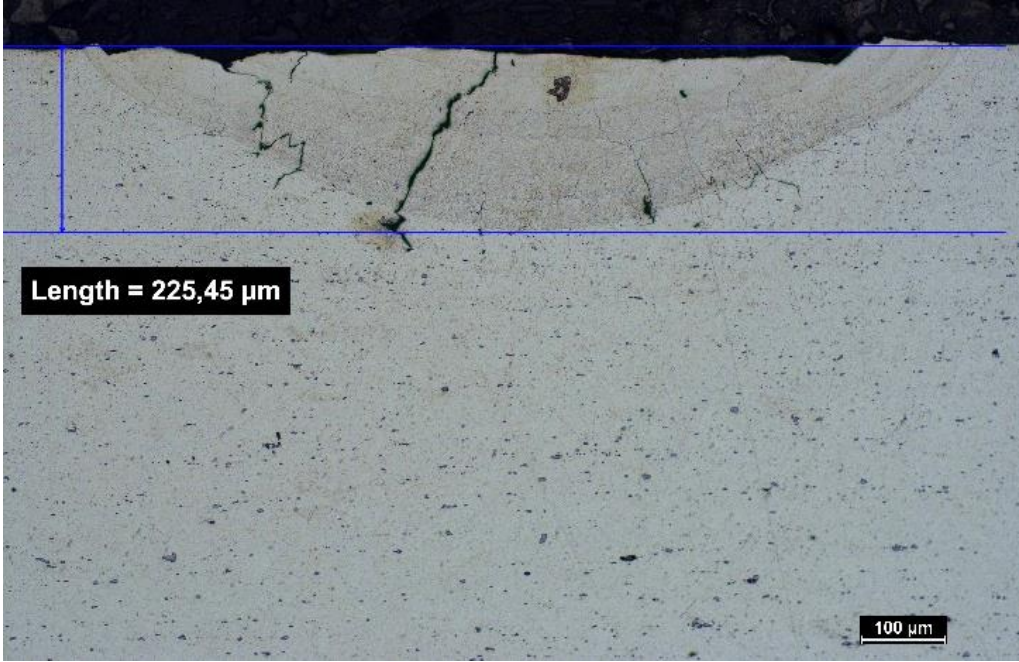
6.1. Makro Yapılar



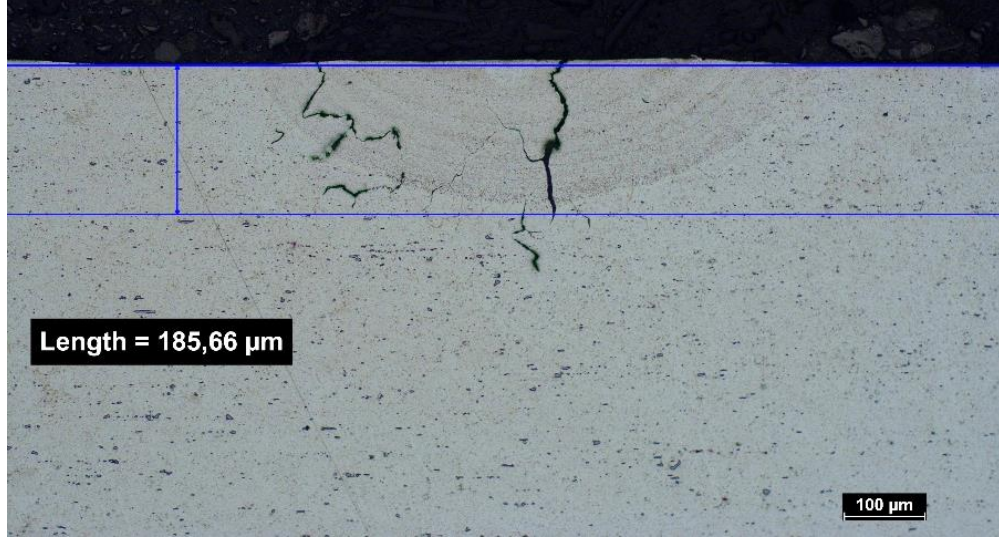
Şekil 6.2. Kör dikişlerin birbirinden farklı çatlak oluşumları ve nüfuziyet derinlikleri AA 6061-T6 Malzeme



Şekil 6.3. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme



Şekil 6.4. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme.

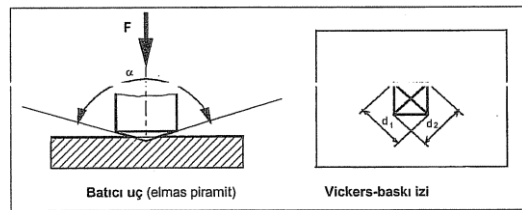


Şekil 6.5. Kör dikiş Makro yapı görüntüsü AA 6061-T6 Malzeme.

6.2. Mikro Yapı ve Sertlik Ölçümleri

Mikro Vickers Testi

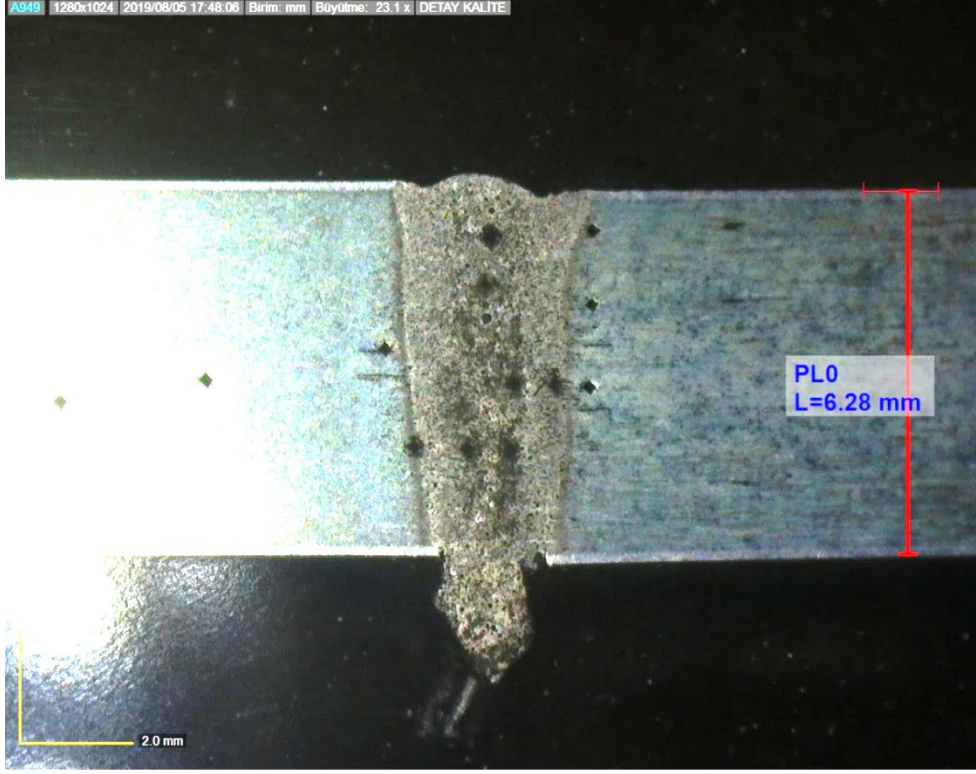
EN ISO 6507-1 e göre test Detay Kalite Mekanik Test Laboratuvarı İzmir'de yapılmıştır. Taban alanı kare şeklinde olan ve karşılıklı yüzeyleri arasında $\alpha=136^\circ$ açılı bulunan düzgün piramit şeklindeki elmas bir baticı uç numune yüzeyine bastırılır ve test yükü F kaldırıldıktan sonra numune yüzeyinde kalan izin d_1 ve d_2 köşegenleri ölçülür



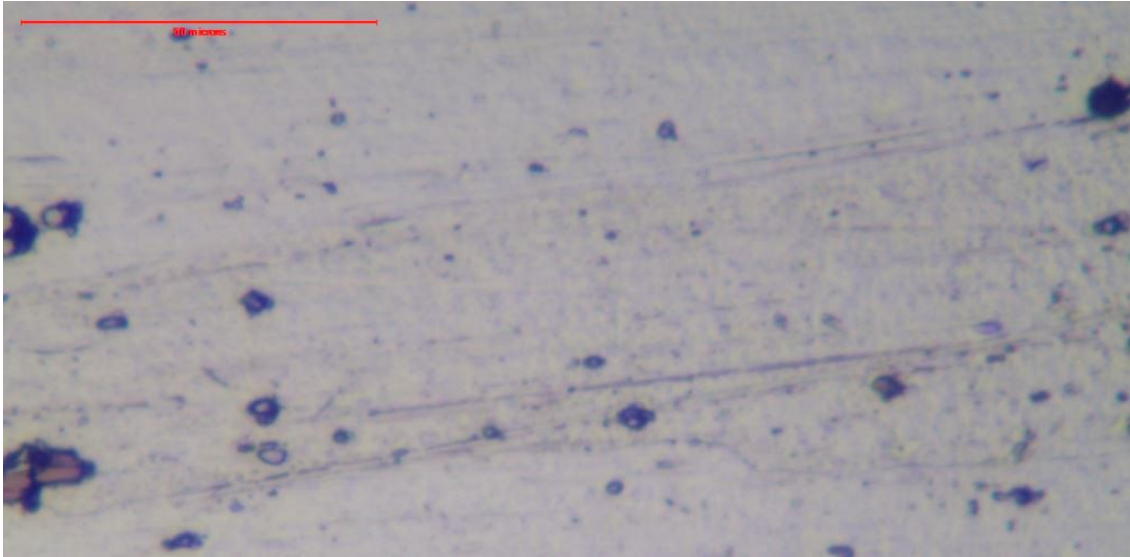
Şekil 6.6. Vicker sertliğinin belirlenmesi

Yöntem olarak Vickers yöntemi, yük olarak 4.903 N ve bekleme süresi olarak da 10sn seçilmiştir. Daha sonra numunenin yüzeyi temizlenerek tablaya yerleştirilmiştir. Tabla, numune baticı uca değme noktasına gelene kadar yükseltilmiştir. Daha sonra "start" butonuna basılarak deney başlatılmıştır. Bekleme süresi dolduktan sonra tabla aşağı indirilerek baticı ucun bağlı olduğu kol hareket ettirilerek numunenin üzerine 40x veya 10x lens getirilmiştir. Lensler kullanılarak numune üzerine bırakılmış olan iz analiz edilmiştir.

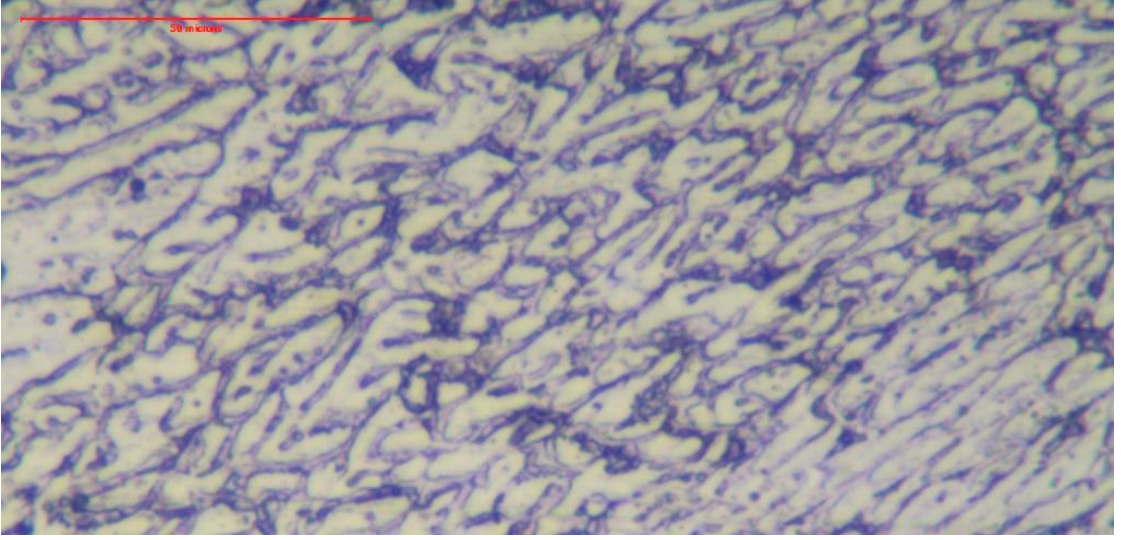
Bu analiz sonucunda köşegen uzunlukları belirlenerek malzemenin VHN değeri bulunmuştur.



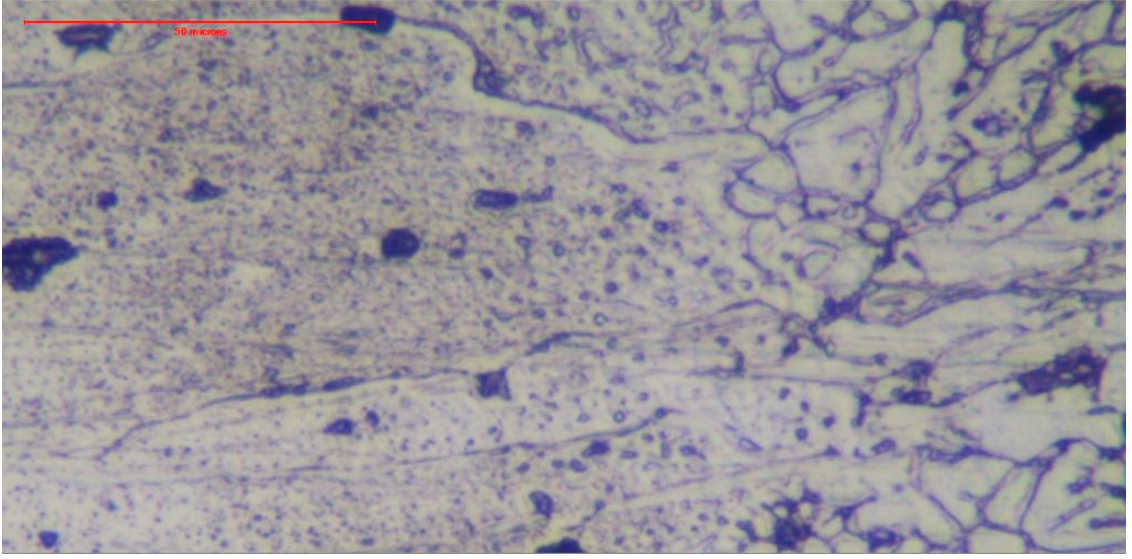
Şekil 6.7. Alın Kaynak Makro yapı görüntüsü



Şekil 6.8. Ana Malzemenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 6.9. Alın kaynağının mikro yapı görüntüsü



Şekil 6.10. Alın kaynağı ile ana malzeme birleşme noktası HAZ noktasının mikro yapı görüntüsü

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Uçak, helikopter yapılarında tercih edilen alüminyum alaşımlı yüksek dayanımlı hafif metallerin birleştirilmelerinde mekanik bağlayıcılar yerine laser kaynak bağlantılarının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çok sayıda laser kör kaynak dikişli ve laser alın ve bindirme kaynak dikişlilerin makro ve mikro yapıları, sertlik değerleri incelenmiştir. Projede uluslararası standartlara göre değerlendirme yapılmıştır. Laser kaynak dikişleri uygulamaları ile deneyim kazanmak, uygun parametreleri tespit etmek, güzel görüntülü kusursuz kaynak dikişleri elde etmek ve bunların içinden daha iyi olanları araştırılmıştır. Havacılık ve uzay sanayinde laser kaynak yöntemlerinin güvenli uygulanması, bilgi ve eksikliklerin giderilmesi konularında yürütülen ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmalara katkı da bulunmak projenin önemli amaçlarından biridir.
- Kör kaynak dikişlerin uygulanmasında sürekli çatlak oluşumları ile karşılaşmıştır. Uygun parametre kombinasyonları ile çatlak oluşumları giderilememiştir. Kimyasal analizlerinde, Silisyum oranının malzemede yüksek çıkması çatlak nedeni olarak tespit edilmiştir.
- Alın kaynağı ve bindirme kaynağı bağlantılarında çatlak ve gözenek oluşumların uygun parametre seçimleri ile giderilmesine çalışılmıştır. Laser kaynak bağlantılı dikişlerdeki sertlik ölçümlerinde beklenen normal değerlerdeydi, kaynak malzeme değerleri ana malzemedен düşük değerlerdeydiler.
- Laser kaynak bağlantılı dikişlerde makro görüntülerinde kaynak üstü ortası tümsekli yanları çökmeli ve kaynak altı sarkmalı tipik laser kaynak görüntüleri ortaya çıkmıştır. İncelenen mikro görüntülerde ise İTAB bölgesi, ana malzeme ve kaynak malzemelerin tane yapılarında bilenen çelik malzemelere kıyasla kayda değer şekilsel farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Laser kaynak malzemesinde hızlı soğuma nedeniyle iri tane oluşumu ortaya çıkmamıştır. Ana malzeme, İTAB- malzeme ve kaynak malzemelerinde mikro görüntülerinde, tane yapılarında ortaya çıkan farklılık bu çalışmanın amacı doğrultusunda göz ardı edilecek boyutlardadır. Laser alın kaynak bağlantılarının sertlik ölçümlerinde de benzeri sonuçlar elde edilmiştir. Üç farklı bölgede elde edilen sertlik değerlerin ortalaması birbirine yakındır. Kaynak dikişi malzemesin ve İTAB-Malzemesinin ortalama sertlik değerleri alüminyum ana malzemenin sertlik değerlerine yakın tespit edilmiştir. Alüminyum malzemelerine farklı işlem yöntemleri ile sonradan kazandırılan yüksek dayanım özelliklerin

korunması; laser kaynağı sırasında yüksek ısı nedeniyle kısmi yanması değişmesi ile açıklanabilir. Isıdan etkilenen bölge de (İTAB) yok denecek kadar belirsiz olduğu saptanmıştır. Makro ve mikro yapı ve sertlik ölçümlerin önemli sonucu; laser kaynak bağlantısının mekanik ve teknik özelliklerin özellikle dayanımının ana malzemeye yakın olduğu teyit edilmiştir.

- Geçmişteki eski tip laser makine sistemleri ile yapılan laser kaynak denemelerinde beklenen kaliteli güvenli bağlantılar elde edilmediği tespit edilmiştir. Fakat günümüzde yeni tip laser makina sistemleri ile yüksek kaliteli laser demeti ile geçmişte karşılaşılan sorunların üstesinden gelinebilmektedir. Ve yakın gelecekte laser üretim yöntemlerinin uçak ve helikopter yapımlarında klasik yöntemlerin yerini alacağı görüşü tez çalışması sonuçlarına göre kesinlik kazanmıştır.
- Uçak ve helikopter tasarımlarında laser kaynak alın bağlantılı yüksek dayanımlı hafif alüminyum metallerin kullanımı ile daha hafif, enerji tasarruflu ve düşük maliyetli tasarımların mümkün olduğu ve Türkiye’de rahatlıkla uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Dayanımdan ve güvenilirlikten ödün vermeden yakıt ve üretim tasarruflu daha hafif kaynak bağlantılı uçak ve helikopter tasarımların Türkiye’de kazandırılmasına katkı sağlamasına yönelik araştırma çalışmasıdır.
- Alüminyum alaşımlı yüksek dayanımlı hafif metallerin atımlı laser kaynak yöntemlerinin uygulanması ve laser kaynak dikişlerin metalürjik yapı özelliklerin daha detaylı incelenmesi bundan sonraki uygulamalı tez çalışmaların konusudur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkurt, A., Şık, A. ve Ovalı, İ., 2012, AA2024 Alüminyum Alaşımlarının Laser Kaynağında kaynak Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(1): 37-45 s.
- Çavuşoğlu, N. ve Özden, H., 2011, Otomobil Karoseri İmalatında Alüminyum ve Çelik Malzemelerin Laser Bindirme Kaynağı, *Kaynak Teknolojisi VIII. Ulusal Kongresi*, Ankara, Kasım 2011.
- Enz, J., 2012, Laserstrahlschweissen von hochfesten Aluminium Lithium –Legierungen, *HZG Report*, Geeshtacht.
- Gruss, H., 2008, Schweissgerechte Struktur- und Prozesstrategie im Flugzeugbau, Dissertation, Universität Magdeburg.
- “IPG Photonics: Products, application, high power welding with fiberlasers”
<http://www.ipgphotonics.com/> (Erişim tarihi: 8.04.2015)
- Kocik, R., Kaschel, S., Kreimeyer, M., Schumacher, J., Vollertsen, F., 2004, Development of a new joining technology for hybrid metal aircraft Structures, *Proc. ICALEO 2004, LIA Congress Proceedings* CD-ROM 597, LIA, Orlando FL, 2004.
- Kocik, R., Vugrin, T. and Seefeld, T., 2006, “Laserstrahlschweißen im Flugzeugbau: Stand und künftige Anwendungen” Airbus Deutschland GmbH, *Bremen BIAS Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH*, Bremen, Bremen, 13./14.09.2006.
- Önçağ, Ç., Özden, H., 2013, Mechanical and Technological Properties of Laser Welded Steel Wheel Rims, *Welding Journal*, 92(2): 38-43 p.
- Özden, H., 2007, Investigating fiber lasers for shipbuilding and marine construction, *Welding Journal*, 86 (5): 26-28 p.
- Özden, H., 2008a, Laser teknolojisindeki gelişmeler, endüstride kullanım alanları, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Sempozyumu*.
- Özden, H., 2008b. Sanayide kullanılan yüksek güçlü laser makineleri ve laser imalat yöntemleri, *Makine Tek.* 124: 152-160 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Özden, H., 2009, Otomotiv Sektöründe Laserli Multi Üretim Yöntemleri, Laserli İmalat, Ölçme ve Kalite Kontrol, *Mühendis ve Makine*, 50(596):38-43 s.
- Özden, H., 2013, Mechanical Fastening, Laser Welding, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi Eğitim, Semineri, TUSAŞ, Kazan –Ankara.
- Özden, H., 2015a, “Savunma Sanayinde Laser Teknolojisi Uygulamaları”, <http://www.dr-husso.blogspot.com.tr/2015/04/savunma-sanayinde-laserteknoloji-14.html>, (Erişim Tarihi: 14.08.2019).
- Özden, H., 2015b, Uzay ve havacılık sektöründe laser üretim yöntemleri, lasersilahları”, E.Ü.Makine Müh. Böl. (yayınlanmamış makale).
- Özden, H., 2015c, Laser Kaynağı, Yayınlanmamış Doktora Dersi Slaytları, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özden, H., Dorn, L. and Shrestha, S., 2004, Laserstrahlschweißen Im Schiffbau Und Meerestechnischen Anlagen, *Pamukkale Üniversitesi, International Malzeme Sempozyumu*, Nisan 2004.
- Özden, H. ve Eryavuz, A., 2016, Savunma sanayinde, uçak ve havacılık sektöründe laser kaynak yöntemlerinin değerlendirilmesi, *Engineer & The Machinery Magazine*, 57(673): 54-63 s.
- Rötzer, İ., 2004, Laserschweissen macht Flugzeuge leichter, Lasertechnik, Fraunhofer Magzien, 4(6).
- Schumacher, J., 2005, Laserstrahlschweissen im flugzeugbau neueste entwicklung der industriellen lasertechnik, *AirbusKongress in Bremen* 20.10.2005.
- Seefeld, T. (Eds.), 2002, Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends. Proc. LAF’02: 4. Laser-Anwenderforum 2002, Strahltechnik Band 19, BIAS Verlag, Bremen, 247-256
- Seefeld, T., Kreimeyer, M., Wagner, F. and Vollertsen, F., 2004. Fügen von Mischverbindungen – von der Prozeßentwicklung zur Anwendung, *Proc. VDI-Wissensforum Schweißen von Leichtmetallen*, Aachen, 14.-15.12.2004.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Tober, G., Heinrich, R., 2001, ZFP an der Laserstralgeschweisster Flugzeugrumpfschalen aus Aluminium, *DGZfP Jahrestagung*, 21-23 Mai.

Vollertsen, F., Schumacher, J., Schneider, K., Seefeld, T., 2004, Innovative welding strategies for the manufacture of large aircraft, *Proc. IIW intl. Conf. on Technical Trends and Future Prospectives of Welding Technology for Transportation, Land, Sea, Air and Space*, Osaka, Japan, 15-16 July, 231-247.

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T3> (Erişim tarihi:
8.08.2019)

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6> (Erişim tarihi:
8.08.2019)

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7050T745> (Erişim tarihi:
8.08.2019)

The Aluminum Joining Manual, 2015,

<http://foundrygate.com/upload/artigos/Aluminum%20Joining%20Manual.pdf> (Erişim Tarihi:
0.08.2019)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince, özellikle değerli görüş ve yorumlarından yararlandığım ve ilgisini asla esirgemeyen sayın Prof. Dr. Hüseyin ÖZDEN'e ve Bochum Ruhr Üniversitesinde Laser Araştırma Merkezinde tezle ilgili araştırmalarımı uygulama imkânını sağlayan Prof. Dr. Cemal Esen'e ve de eşim Arzu ya teşekkürlerimi sunarım.

İzmir

08 / 08 / 2019

Ahmet Atınç ERYAVUZ

ÖZGEÇMİŞ

1977 İzmir doğumlu Ahmet Atınç Eryavuz 2005 Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği mezunudur. 2006 yılında ODTÜ GSI SLV Münih ten Uluslararası kaynak mühendisliği diploması almıştır.Aynı zamanda tahribatsız muayene dalında TS EN ISO 9712 standartına göre 5 yöntemden seviye 3 tür(VT,MT,RT,UT,PT). Tez yazarı 3 rafineri projesi bitirmiş olup yerli yabancı özel şirketlerde kalite kontrol işlerinde çalışmış.NDT Basınçlı ekipmanlar yönetmeliği alanında eğitmenlikler ve denetimler yapmıştır.Tez yazarı ayrıca TS EN ISO 17020 standartına göre TÜRKAK teknik uzmanıdır. Yazar 2013 Ege Üniversitesi Fen bilimleri Enstütüsünde Yüksek Lisans Eğitimine başlamıştır.