



**TİTANYUM ALAŞIMLARINDA PLASTİK ŞEKİL
VERME ÖNCESİ VE SONRASI LAZER KAYNAK
İŞLEMİNİN MEKANİK VE BOYUTSAL DAVRANIŞLAR
ÜZERİNE ETKİSİ
Sami SEVİNÇ**



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİTANYUM ALAŞIMLARINDA PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ VE
SONRASI LAZER KAYNAK İŞLEMİNİN MEKANİK VE BOYUTSAL
DAVRANIŞLAR ÜZERİNE ETKİSİ**

Sami SEVİNÇ
ORCID No: 0000-0001-8226-3426

Doç. Dr. Rukiye ERTAN
ORCID No: 0000-0002-9631-4607
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Sami SEVİNÇ tarafından hazırlanan “TİTANYUM ALAŞIMLARINDA PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ VE SONRASI LAZER KAYNAK İŞLEMİNİN MEKANİK VE BOYUTSAL DAVRANIŞLAR ÜZERİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Başkan : Doç. Dr. Rukiye ERTAN
ORCID No: 0000-0002-9631-4607
Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN
ORCID No: 0000-0002-7746-2014
Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üy. Selçuk KARAGÖZ
ORCID No: 0000-0002-1987-5750
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

..!.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/09/2019



Sami SEVİNÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM ALAŞIMLARINDA PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ VE SONRASI
LAZER KAYNAK İŞLEMİNİN MEKANİK VE BOYUTSAL DAVRANIŞLAR
ÜZERİNE ETKİSİ

Sami SEVİNÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Bu çalışmada; %98,9 saflıktaki Titanyum Grade 2 ile alaşımlı Titanyum Grade 5 (Ti-6Al-4V) titanyum sac malzemelere (25x33x1 mm) oda sıcaklığında, 500 ° C ve 850 ° C de olmak üzere farklı sıcaklıklarda plastik şekil verilmiştir. Plastik şekil verme işlemi saclar iki farklı gruba ayrılarak yapılmıştır; Birinci grup saclar önce giyotin ile ortadan ikiye ayrılmış, daha sonra Nd: YAG lazer ile kesilen yerlerden kaynatılmış, sonrasında fırında ısıtılmış ve son olarak da plastik şekil verilmiştir. İkinci grup saclar ise, önce fırında ısıtılmış, sonra plastik şekil verilmiş, daha sonra giyotin ile ortadan ikiye ayrılmış ve son olarak Nd: YAG lazer ile kesilen yerlerden kaynatılmıştır. Oda sıcaklığında plastik şekil verilecek parçalar ısıtma işlemine tabi tutulmamıştır. Kaynak işlemlerinde aynı tip parçalar birbiriyle kaynatıldığı gibi farklı Grade sahip olan malzemelerde birbiriyle kaynatılmıştır.

Yapılan bu işlemler sonucunda farklı sıcaklıklarda ısıtılmış, kaynak ile birleştirilmiş Titanyum Grade 2 ve Titanyum Grade 5 parçalar elde edilmiştir. Kaynak işlemi, hazırlanan iş parçalarının yarısına plastik şekil verme öncesi, diğer yarısına ise plastik şekil verme sonrası yapılmıştır. Tüm iş Parçaları 3d tarama yöntemi ile taranmış ve cad ortamına aktarılarak nominal parçaya göre meydana gelen atıklığı ölçülmüş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. İş parçaları üzerinden ASTM E8 e göre numuneler hazırlanıp çekme testleri yapılmış ve sonuçları kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer kaynak, titanyum plastik şekil verme, Nd:YAG Lazer, **2019, viii + 71 Sayfa.**

ABSTRACT

MSc Thesis

MECHANICAL AND DIMENSIONAL EFFECT OF LASER WELDING PROCESS PERFORMED BEFORE AND AFTER PLASTIC FORMING ON TITANIUM ALLOYS

Sami SEVİNÇ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Rukiye ERTAN

In this study; 98.9% purity of Grade 2 and alloyed Grade 5 (Ti-6Al-4V) titanium sheet materials (25x33x1 mm) were plastically formed at different temperatures like 25 ° C, 500 ° C and 850 ° C. Plastic forming process was made by dividing the sheets into two different groups; The first group of sheets were firstly cut into two parts by guillotine, as the second step they were joined by laser welding method, then heat treated and finally plastic shaped. The second group of sheets were first heat-treated, then plastically shaped, then cut into two parts with the guillotine and finally laser welded. Heat treatment wasn't applied to the parts which would be plastically shaped at room temperature. In welding processes, the same type of parts are welded to each other as well as to different grade materials.

As a result of these processes, parts of Grade 2 and Grade 5 were heat treated and welded together. One-Half these parts were welded before plastic forming and the other half parts are welded after plastic forming. To see the spring back rate, All parts were scanned by 3d scanning method and transferred to CAD environment in order to measure deviation from the nominal part and also to compare them to each other.

Additionally, all samples complying with ASTM E8 standard have been prepared and tensile tests were performed. Again the results have been compared to each other.

As a conclusion of all these analyzes, we have questioned if welding of heat treated titanium materials should be done before plastic forming or after.

Key words: Laser Welding, Titanium plastic forming, Nd: YAG lazer **2019, viii + 71 pages.**

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, yönlendirmeleriyle çalışmalarımı kolaylaştıran hocam Sayın Doç. Dr. Rukiye ERTAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, AİLEME. Özellikle her zaman bana destek ve yardımcı olan eşim Ece SEVİNÇ' e teşekkürlerimi sunarım.

Deney parçaların hazırlanması sırasında, her türlü desteği ve yardımı sağlayan Lazermark Endüstriyel Lazer Sistemleri ve Akarsu su jeti kesim firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince bana kolaylık sağlayan firmam OYAK RENAULT' a ve amirlerime, deney ve analizler sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen İsmail YÜKSELENTÜRK' e, Muharrem YETİŞ' e ve Mehmet GÜNGÖR' e teşekkürlerimi sunarım.

Sami SEVİNÇ
12/09/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1 Titanyumun Genel Özellikleri.....	2
2.2 Titanyum Alaşımları ve Metalürjisi	3
2.2.1 α Titanyum Alaşımları	5
2.2.2 β Titanyum Alaşımları	6
2.2.3 $\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları	7
2.3 Titanyum ve Alaşımlarının Oksidasyonu	8
2.3.1 Titanyumun Korozyon Davranışı.....	9
2.3.2 Titanyum ve Alaşımlarının Korozyon Direncine Ortamın Etkisi	11
2.4 Titanyum ve Alaşımlarının Kaynak ve Şekillendirilebilme Kabiliyeti.....	11
2.4.1 Titanyum ve Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri	12
2.5 Titanyumun Şekillendirme Kabiliyeti.....	32
2.6 Titanyumun Talaşlı İmalat ve Kesme Yeteneği.....	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM	36
3.1 Kullanılan Materyaller	36
3.2 Çalışmalarda Kullanılacak İmalat Yöntemleri.....	37
3.2.1 Kesme Prosesi	38
3.2.2 İş Parçalarının Isıtılması.....	39
3.2.3 Kaynak Prosesi.....	39
3.2.4 Plastik Şekil Verme Prosesi	42
3.3 Yapılan Test ve Analizler	43
3.3.1 Çekme Testi	44
3.3.2 Mikro Sertlik Testi	45
3.3.3 Üç Boyutlu Tarama	45
4- BULGULAR.....	47
4.1 Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirilmeler	47
4.1.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçaların Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler	47
4.1.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçaların Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler	50
4.2 Mikro Sertlik Test Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	53
4.2.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçaların Mikro Sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler	54
4.2.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçaların Mikro sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler	55
4.3 Üç Boyutlu Tarama İle Nominal Parçaya Göre Sapmaların Kontrol Edilmesi	57
4.3.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçalarda Sapmalarının Kontrolü.....	58
4.3.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçalarda Sapmalarının Kontrolü.....	62
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
KAYNAKLAR	70



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
C	Celsius
Cm	Santimetre
eV	Elektro Volt
Fe	Demir
G	Gram
Hv	Vickers Sertlik birimi
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
Kgf	Kilogram kuvvet
lt/dak	Litre / dakika
Mg	Magnezyum
Mo	Molibden
Mpa	Mega pascal
Ms	Mili saniye
N	Newton
Si	Silisyum
Sn	Kalay
Ti	Titanyum
V	Volt
W	Watt
wt%	Kütlece Yüzde
Zr	Zirkonyum

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
AWS	Amerikan Kaynak Topluluğu
CO2	Karbondioksit
CP- Tİ	Ticari saf Titanyum
DIN	Alman Norm Enstitüsü
Fz	Füzyon Bölgesi
HAZ	Heat Affected Zone (ısı tesiri altındaki bölge)
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hekzegonal Sıkı Paket
IEB	Isıdan Etkilenmiş Bölge
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
Nd: YAG	Neodim Doped Yttrium Aluminum Garne
P.Ş.V	Plastik Şekil Verme

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Raptor F-22 Savaş uçağı üzerindeki titanyum kısımlar.....	2
Şekil 2.2. α ve β Titanyum kafes yapıları	3
Şekil 2.3. Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramı üzerine olan etkisi.	5
Şekil 2.4. Ti-Al faz diyagramı.....	7
Şekil 2.5. Zamana bağlı oluşan oksit film kalınlığı	8
Şekil 2.6. Termal oksidasyon uygulanmış CP-Ti kesitinin optik mikroyapı fotoğrafı	9
Şekil 2.7. Farklı sıcaklık ve sürelerde termal oksidasyon işlemi yapılmış saf titanyuma ait renkler	10
Şekil. 2.8. Farklı koruyucu gaz miktarları ile korunmuş kaynak dikişleri.....	13
Şekil 2.9. Argon gazı ile korunan (solda) ve korunmayan (sağda) kaynak dikişi	13
Şekil 2.10. TIG Kaynağı şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.11. ER Tİ 2 İlave telinin mukavemet değerleri, kullanıldığı yerler ve özellikleri	16
Şekil 2.12. Lazer İle kaynak işlemi esnasında oluşan bölgeler	17
Şekil 2.13. Lazer kaynağının çalışma prensibi.....	17
Şekil 2.14. Lazerle yapılan işlemlerin endüstrideki dağılımları	18
Şekil 2.15. Nd:YAG Lazerinin kar ortamı ve geri besleme sistemleri	19
Şekil 2.16. Nd:YAG lazer kovuğu	20
Şekil 2.17. İletim lazer kaynağı	22
Şekil 2.18. Lazer Nüfuziyet Kaynağı.....	23
Şekil 2.19. Bir lazer ışının metal yüzeyinde meydana getirdiği fiziksel durumlar	24
Şekil 2.20. Lazer kaynaklı Ti-6Al-4V alaşımının kaynak bölgesindeki sertlik değerleri	25
Şekil 2.21. Dikiş kaynağının oluşumu	26
Şekil 2.22. Ti alaşımlarının farklı tepe güçlerinde 1 mm spot çapındaki kaynak nüfuziyeti	27
Şekil 2.23. Ti Alaşımlarının farklı tepe güçlerinde 1 mm spot çapındaki kaynak derinlikleri.....	27
Şekil 2.24. 260 V Enerjide farklı spot çapları için kaynak derinlikleri.....	28
Şekil 2.25. Lazer atım süresinin değişiminin kaynak çapına olan etkisi	29
Şekil 2.26. Lazer ışının odak mesafesi ve odak noktasının gösterimi	30
Şekil 2.27. Farklı mesafelerden odaklanmış lazer ışın demetinin kaynak dikişlerine olan Etkisi	30
Şekil 2.28. Farklı odak mesafelerinin kaynak nüfuziyetine olan etkileri.....	31
Şekil 2.29. Farklı kaynak hızlarında füzyon ve ITAB (HAZ) genişlikleri	32
Şekil 2.30. Kaynak penetrasyonu üzerinde ITAB ve füzyon bölgeleri şeması.....	32
Şekil 3.1. Titanyum Grade 2 Grade 5 sac tabakalar.....	37
Şekil 3.2. Çalışma yapılacak birinci ve ikinci grup parçalara yapılacak imalat işlemleri	38
Şekil 3.3. Isıl işlem fırını.....	39
Şekil 3.4. Ti-6Al-4V Çift taraflı yapılmış lazer kaynağı Optik mikroskop görüntüsü ...	40
Şekil 3.5. Nd:YAG Lazer Kaynak Makine Ekranı	41
Şekil 3.6. Koruyucu gaz kullanımı.....	42
Şekil 3.7. İş Parçalarının basıldığı kalıbın ölçüleri	42
Şekil 3.8. Basılı parça ve basma kuvveti.....	43
Şekil 3.9. Çekme numune ölçüleri ve numunelerin hazırlanması.....	44

Şekil 3.10. Hazırlanan çekme numuneleri	44
Şekil 3.11. Mikro sertlik testi için bakalite alınmış numuneler	45
Şekil 3.12. Faro 3 boyutlu tarama cihazı	46
Şekil 4.1. Kaynak parametre teyidi için çekme testi yapılan numune	47
Şekil 4.2. Çekme testi kopan numune	48
Şekil 4.3. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları oda sıcaklığında	49
Şekil 4.4. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 500 ° C....	49
Şekil 4.5. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 850 ° C....	50
Şekil 4.6. Çekme öncesi ve sonrası çekme numuneleri	51
Şekil 4.7. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları oda sıcaklığında	51
Şekil 4.8. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 500 ° C ..	52
Şekil 4.9. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 850 ° C ..	52
Şekil 4.10. Plastik şekil verme öncesi ve sonrası kaynaklanan iş parçalarının çekme test sonuçlarının karşılaştırılması	53
Şekil 4.11. Birinci grup parçalar mikro sertlik değerleri	55
Şekil 4.12. İkinci grup parçalar mikro sertlik değerleri	56
Şekil 4.13. Tüm iş parçalarının sertlik değerlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 4.14. Yüzeyle Bölünmüş Numune ve Referans Alınamayan Numune.....	58
Şekil 4.15. Taranan İş parçasının 3/1'lik Kısmı ve Bu Kısımdan Alınan Kesit ile Nominal Parçanın Kesiştirilmesi.....	58
Şekil 4.16. Oda sıcaklığında hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça ile karşılaştırılması	59
Şekil 4.17. 500 ° C Hazırlanan İş Parçasının Kulak Açılarının Nominal Parça ile Karşılaştırılması	60
Şekil 4.18. 850 ° C Hazırlanan İş Parçasının Kulak Açılarının Nominal Parça ile Karşılaştırılması	60
Şekil 4.19. Nominal parça ile üst üste bindirilmiş birinci grup iş parçaları.....	61
Şekil 4.20. Nominal parça kesiti ile üst üste bindirilmiş birinci grup iş parçalarının kesiti	61
Şekil 4.21. Burulmanın meydana geldiği iş parçası.....	62
Şekil 4.22. Oda sıcaklığında hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması	63
Şekil 4.23. 500 ° C hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması	64
Şekil 4.24. 850 ° C hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması	64
Şekil 4.25. Nominal parça ile üst üste bindirilmiş ikinci grup iş parçaları	65
Şekil 4.26. Nominal parça kesiti ile üst üste bindirilmiş ikinci grup iş parçalarının kesitleri.....	65
Şekil 4.27. Kaynak yüzeyleri paralel olmayan parçalara	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Titanyum elementinin özellikleri.....	3
Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin kristal yapı üzerine dengeleyici etkileri	4
Çizelge 2.3. Ticari ve yarı ticari titanyum sınıfları ve alaşımları.....	6
Çizelge 2.4. Kaynak dikiş rengi ve kalite kontrol değerlendirmesi	14
Çizelge 2.5. Lazerlerin kullanım alanları	19
Çizelge 2.6. Metal malzemelerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları	24
Çizelge 2.7. Kaliteli kaynak için parametreler	26
Çizelge 2.8. Farklı malzemeler için şekil verme sıcaklığı	34
Çizelge 3.1. Kullanılan Titanyum Grade 2 ve Grade 5 malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri.....	36
Çizelge 3.3. Çalışma yapılacak birinci ve ikinci grup parçaların özet gösterimi.....	38
Çizelge 3.4. Sıma SWA 300 ND: Yag lazer kaynak makinesinin teknik özellikleri	40
Çizelge 3.5. Lazer kaynak parametreleri.....	41
Çizelge 3.6. Tablalı hidrolik presin özellikleri.....	43
Çizelge 4.1. Birinci grup parçaların nominale göre kulak açıları	59
Çizelge 4.2. İkinci grup parçaların nominale göre kulak açıları	63
Çizelge 4.3. Birinci ve ikinci grup iş parçalarının kulak açıları.....	66

1.GİRİŞ

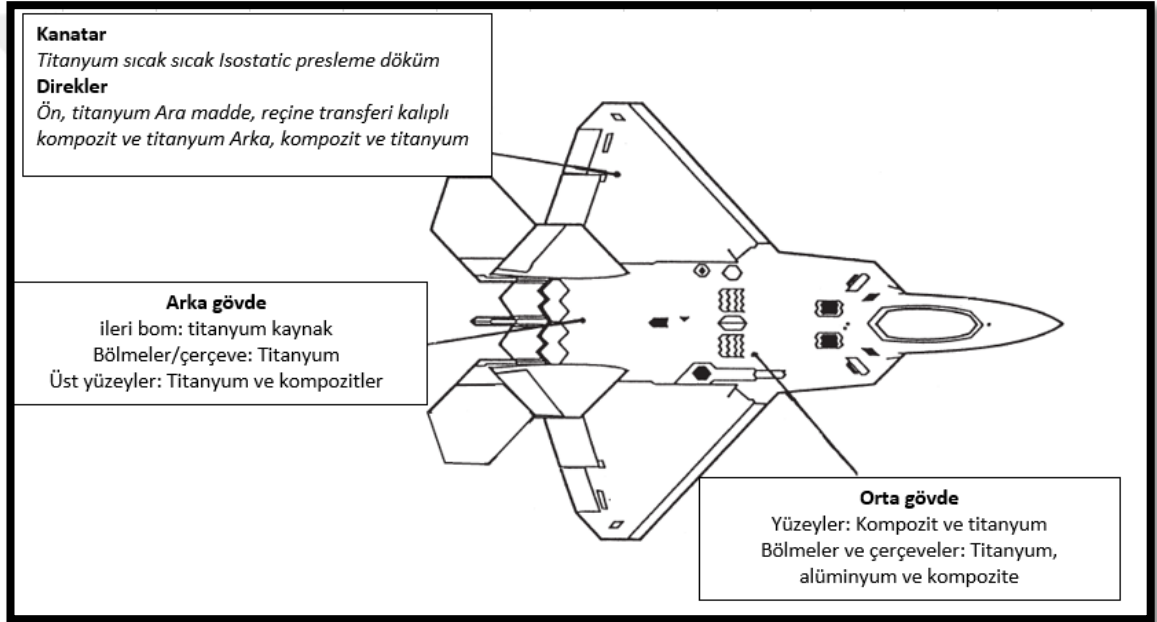
Titanyum, ağırlığına göre üstün mukavemet özelliği, yüksek sıcaklık ve korozyon direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı gibi özelliklerinden dolayı başta havacılık olmak üzere, uzay, nükleer, savunma, petrokimya ve biyomedikal endüstrisinin uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. Havacılık ve uzay endüstrisinde türbin pervanelerinde, kompresör kanatlarında, Uçak gövdeleri ve uzay kapsüllerinde gövde malzemesi olarak, iniş takımlarında, pervanelerde, hidrolik sistemlerde, tercih edilmektedir. Biyolojik uyumluluğu nedeniyle yapay diz, kalça protezleri, diş implantı gibi medikal uygulamalarda da tercih edilmektedir.

Malzeme mühendisliğindeki ilerlemelerin maliyetlere olan etkisi günümüz rekabet koşullarında göz önünde bulundurulduğunda, araştırmalar titanyum malzemelerin mineral halden bitmiş ürün oluncaya kadar ki tüm proseslerini de daha iyi anlamayı ve tanımayı amaçlar, sadece yeni bir malzeme geliştirmeyi değil aynı zamanda halı hazırda malzemeleri geliştirmeyi de hedefler.

Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda ısıtılmış, Titanyum Grade 2 ve Grade 5 malzemelerin birbirlerine plastik şekil verme öncesi veya sonrası kaynaklanmasının mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, kaynak işleminin plastik şekil verme öncesi veya sonrası yapılmasının mekanik özelliklerin değişiminde bir farklılığa neden olmadığı, plastik şekil verme öncesi kaynaklanan numunelerde ısıtma prosesinden dolayı burulmalar meydana gelmiştir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yer kürede metaller arasında demir (Fe), Alüminyum (Al), ve magnezyum (mg) un ardından en çok bulunan dördüncü metal titanyumdur, element olarak bakıldığında ise bulunma miktarına göre dokuz numarada yer alır. Titanyum üstün mekanik özellikleri nedeniyle havacılık sektörü başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Havacılık sektöründeki kullanım alanları oldukça geniştir, Şekil 2.1’de F-22 raptor gelişmiş savaş uçağının bazı bölgelerindeki titanyum kullanımı görülmektedir (Anonim 2010 (a)).



Şekil 2.1. Raptor F-22 Savaş uçağı üzerindeki titanyum kısımlar (Anonim 2010 (a) ‘dan değiştirilerek alınmıştır)

2.1 Titanyumun Genel Özellikleri

Titanyum elementinin Rutil (TiO_2) ve ilmenit ($FeTiO_3$) olmak üzere bilinen iki cevheri vardır. En fazla TiO_2 şeklinde Titanyum (%97-98), rutil cevherinde bulunmaktadır. Titanyum bir geçiş elementidir, periyodik tabloda dört numaralı grupta ve periyotta bulunur, atom numarası 22’dir, atom ağırlığı 47.87 g/mol’dur. 4.51 g/cm³ ‘lük yoğunluğu

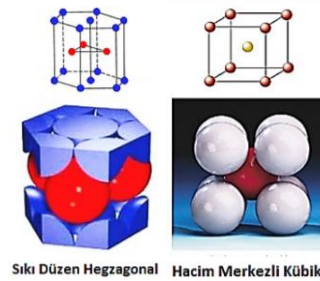
ile çeliğin ve süper alaşımların %60 'ı kadardır. Titanyum element haldeki özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir (Kilerci 2011).

Çizelge 2.1. Titanyum elementinin özellikleri (Kilerci 2011 'den değiştirilerek alınmıştır)

Yoğunluk	4.51 g/cm ³
Renk	Koyu Gri
Ergime Noktası	1668 ° C
Kaynama Noktası	1725 ° C
Isıl İletkenlik	11.4 W/m.K
Özgül Isı (25 ° C)	0.5223 kJ/kg. K
Sertlik	70- 74 HRB
Çekme Dayanımı	240 Mpa
Poisson's Oranı	0.361

2.2 Titanyum Alaşımları ve Metalürjisi

Saf titanyum 883 ° C üzerine ısıtıldığında kafes yapısı α hekzagonal sıkı paket (hcp) den, β hacim merkezli kübik yapıya (bcc) allotropik dönüşüm gerçekleştiriyor (Pederson 2012). α titanyumundan β titanyumuna allotropik dönüşüm sıcaklığı aynı zamanda β dönüşüm sıcaklığı olarak adlandırılır (Kumar ve Sinha 2018). Şekil 2.2' 'de α ve β yapılarının kafes yapıları gösterilmiştir.

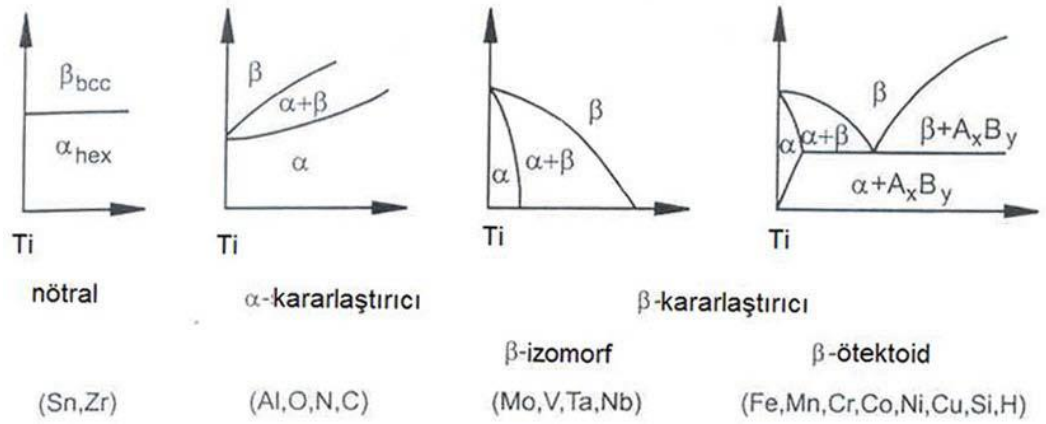


Şekil 2.2. α ve β Titanyum kafes yapıları

Titanyum içerisinde çözünen basit ve çoğu ara yer alaşım elementleri α ve β geçiş sıcaklığını yükselterek α 'ı dengede tutarken, geçiş metalleri ve soy metaller α ve β geçiş sıcaklığını düşürerek β ' ı dengede tutar ya da alaşım elementleri katı çözeltili sertleşmesi gibi davranarak geçiş sıcaklığından etkilenmeyebilir. Ara yer elementleri olan hidrojen, nitrojen, karbon ve özellikle oksijen güçlü bir alfa – dengeleyici etkiye sahip ve geçiş sıcaklığını yükseltirken, beta dengeleyici etkiye sahip hidrojen ise geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Ara yer elementlerinin artışı mukavemetin yüksek derecede artmasına neden olur fakat aynı anda gevreklik riskini de arttırdığından süneklilikte keskin bir düşüşü neden olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bazı alaşımların kristal yapı üzerine dengeleyici etkileri Çizelge 2.2' de gösterilmiştir (Pederson 2012). Ayrıca bu alaşımların farklı sıcaklıklarda faz yapısı üzerine etkisi de Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin kristal yapı üzerine dengeleyici etkileri (Pederson 2012 'den değiştirilerek alınmıştır)

Alaşım elementi	Kütlece yüzde wt%	Yapı üzerine etkisi
Alüminyum	2 ile 7	Alfa dengeleyici
Kalay	2 ile 6	Alfa dengeleyici
Vanadyum	2 ile 20	Beta dengeleyici
Molibden	2 ile 20	Beta dengeleyici
Krom	2 ile 12	Beta dengeleyici
Bakır	2 ile 6	Beta dengeleyici
Zirkonyum	2 ile 8	Alfa beta mukavemet artırıcı
Silikon	0.2 ile 1	Sürünme direncini artırıcı



Şekil 2.3. Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramı üzerine olan etkisi (Balaban 2007 'den değiştirilerek alınmıştır).

2.2.1 α Titanyum Alaşımları

Kalay ve alüminyum gibi α dengeleyicilerinin, her ikisini aynı anda veya farklı miktarlarda tek tek ihtiva eden titanyum alaşımları ve saf titanyum normal sıcaklıkta hcp kristal yapıdadır, bu alaşımlara örnek olarak ticari bir alaşım olan Ti5Al – 2.5 Sn verilebilir. Alfa alaşımları, alaşımız titanyum olan saf titanyuma benzerlikler göstermektedirler, fark olarak 300 °C'ye kadar üstün çekme mukavemetine sahip oldukları söylenebilir. Genellikle soğuk çalışma ortamlarında tercih edilirler (Ensarioğlu ve Çakır 2005). α yapısı içerisinde miktar olarak az β fazı bulunması durumunda bu alaşımlar yakın alfa alaşımları olarak tanımlanmaktadır. Yakın α alaşımları içerisinde β dengeleyici elementlerden vanadyum ve molibden yüzde 1 – 2 oranında bulunabilir. Yine bu alaşımlara, dayanımlarını düşürmeden alüminyum içerikleri azaltmak için kalay ve zirkonyum da ilave edilebilir. 0,5Mo-0,25Si- Ti-8Al-1Mo-1V- Ti-6Al-5Zr alaşımları yakın alfa alaşımları olarak örnek gösterilebilir.

Yakın α alaşımları, α alaşımlarıyla aynı özellikler göstermektedir, 400 °C- 500 °C aralıklarında yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. 8Al-1Mo-1V, yakın alfa alaşımı orijinal olarak jet motorlarının kompresör kısmında orta ve yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılmıştır. İyi kaynaklına bilirlik, iyi sürünme direnci, tokluk, yüksek dayanım, üstün korozyon

direnci ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir (Kaya 2010, Anonim 2014 (b), Kumar ve Sinha 2018). Alaşımli olan titanyumlara göre mukavemet daha düşüktür. Ticari ve yarı ticari titanyum sınıfları ve alaşımlarını özet olarak Çizelge 2.3’de görülebilir.

Çizelge 2.3. Ticari ve yarı ticari titanyum sınıfları ve alaşımları

Tamm	Kopma Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Safhk limitleri, wt%					Nominal kompozisyon				
	MPA	ksi	MPA	ksi	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer
Alaşımız														
ASTM Gr.2	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	...
ASTM Gr.3	450	65	380	55	0.05	0.08	0.015	0.30	0.35	...	...	...	...	...
ASTM Gr.4	550	80	480	70	0.05	0.08	0.015	0.50	0.40	...	...	...	...	...
ASTM Gr.7	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	0.2Pd
ASTM Gr. 11	240	35	170	25	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	...	...	...	...	0.2Pd
α ve yakın α alaşımları														
Ti-0.3-Mo-0.8Ni	480	70	380	55	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	...	...	...	0.3	0.8Ni
Ti-5Al-2.5Sn	790	115	760	110	0.05	0.08	0.02	0.50	0.20	5	2.5	...	...	...
Ti-5Al-2.5Sn-ELI	690	100	620	90	0.07	0.08	0.0125	0.25	0.12	5	2.5	...	...	...
Ti-8Al-1Mo-1V	900	130	830	120	0.05	0.08	0.015	0.30	0.12	8	...	...	...	1V
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	130	830	120	0.05	0.05	0.0125	0.25	0.15	6	2	4	2	0.08Si
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	790	115	690	100	0.02	0.03	0.0125	0.12	0.10	6	...	...	1	2Nb, 1Ta
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo	1000	145	900	130	0.04	0.04	0.008	0.12	0.17	2,25	11	5	1	0.2Si
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si	1030	149	910	132	0.03	0.08	0.006	0.05	0.15	5,8	4	3,5	0,5	0.7Nb, 0.35Si
α-β alaşımları														
Ti-6Al-4V	900	130	830	120	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20	6	...	...	...	4V
Ti-6Al-4V-ELI(a)	830	120	760	110	0.05	0.08	0.0125	0.25	0.13	6	...	...	...	4V
Ti-6Al-6V-2Sn(a)	1030	150	970	140	0.04	0.05	0.015	1.0	0.20	6	2	...	...	0.75Cu, 6V
Ti-8Mn(a)	860	125	760	110	0.05	0.08	0.015	0.50	0.20	...	...	...	...	8.0Mn
Ti-7Al-4Mo(a)	1030	150	970	140	0.05	0.10	0.013	0.30	0.20	7.0	...	...	4.0	...
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo(b)	1170	170	1100	160	0.04	0.04	0.0125	0.15	0.15	6	2	4	6	...
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(b)(c)	1125	163	1055	153	0.04	0.05	0.0125	0.30	0.13	5	2	2	4	4Cr
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr(c)	1030	150	970	140	0.03	0.05	0.0125	0.25	0.14	5,7	2	2	2	2Cr, 0.25Si
Ti-3Al-2.5V (d)	620	90	520	75	0.015	0.05	0.015	0.30	0.12	3	...	...	...	2.5V
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	1100	160	960	139	(e)	0.02	0.0125	0.20	(e)	4	2	...	4	0.5Si
β Alaşımları														
Ti-10V-2Fe-3Al(a)(c)	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.015	2.5	0.16	3	...	...	...	10V
Ti-13V-11Cr-3Al(b)	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.025	0.35	0.17	3	...	...	...	11.0Cr, 13.0V
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al(b)(c)	1170	170	1100	160	0.03	0.05	0.015	2.5	0.17	3	...	...	8.0	8.0V
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(a)(c)	900	130	830	120	0.03	0.05	0.20	0.25	0.12	3	...	4	4	6Cr, 8V
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn(a)	690	100	620	90	0.05	0.10	0.020	0.35	0.18	...	4.5	6.0	11.5	...
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	1000 (b)	145 (b)	965(b)	140(b)	0.05	0.05	0.015	0.25	0.13	3	3	...	...	15V, 3Cr
	1241 (f)	180(f)	1172(f)	170(f)										
Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si	862	125	793	115	0.05	0.05	0.015	0.25	0.13	3	...	...	15	2.7Nb, 0.2Si

a) Tavlama için verilen mukavemet özellikleri çözeltiye alma ve yaşlandırma ile artırılabilir. (b) Çözeltiye alma ve yaşlandırma koşulları için verilen mukavemet özellikleri; Alaşım tavlama koşulunda normal uygulanmamıştır. Yarı ticari alaşımlar; mekanik özellikleri ve kompozisyon limitleri tedarikçiler ile görüşmelere bağlıdır. (d) Boru alaşımları; Mukavemeti artırmak için soğuk çekilebilir. (e) O₂ + 2N₂ = 0.27%. Karışımı. (f) Alternatif bir yaşlandırma sıcaklığında çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmıştır.

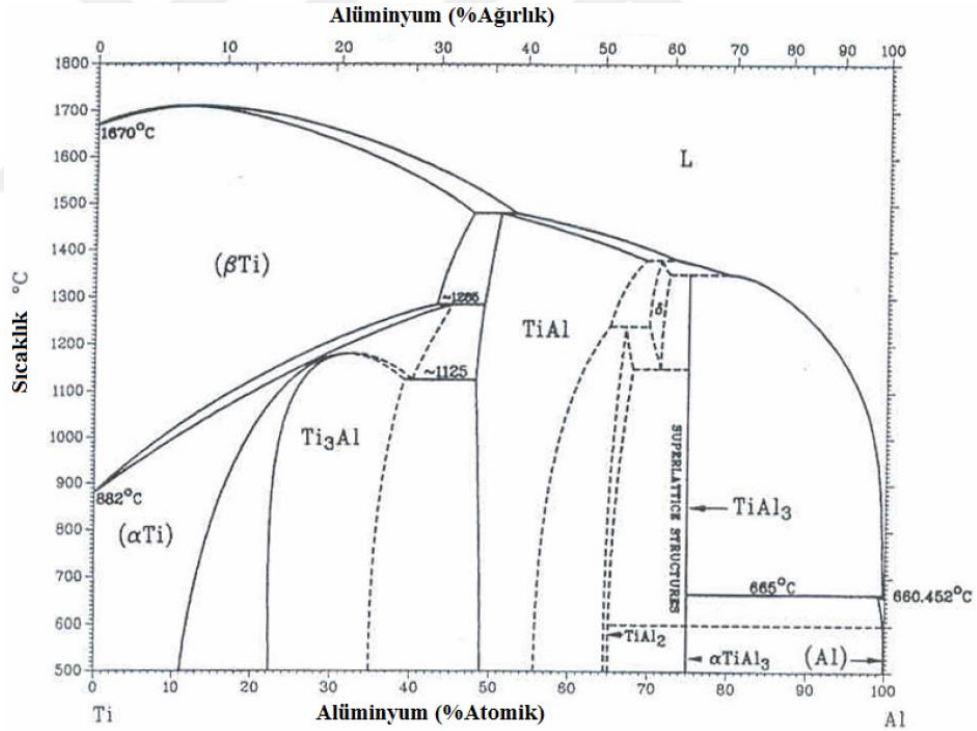
2.2.2 β Titanyum Alaşımları

Periyodik cetvelde geçiş metalleri olarak tanımlanan elementler β fazını yani hacim merkezli kübik yapıyı oda sıcaklığında dengeli halde tutar. Tüm β alaşımları, vanadyum, niyobyum, tantal (geçiş metali grubu 5) ve molibden (geçiş metali grubu 6) elementlerin

birinin veya birden çoğunun aynı anda eklendiği β izomorf formlarını içerir. Az sıklıkla alaşıma eklenen (Re) renyum (Ta) tantal bu elementlere dahil edilebilir (Pederson 2002, Anonim 2014 (b)).

2.2.3 $\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları

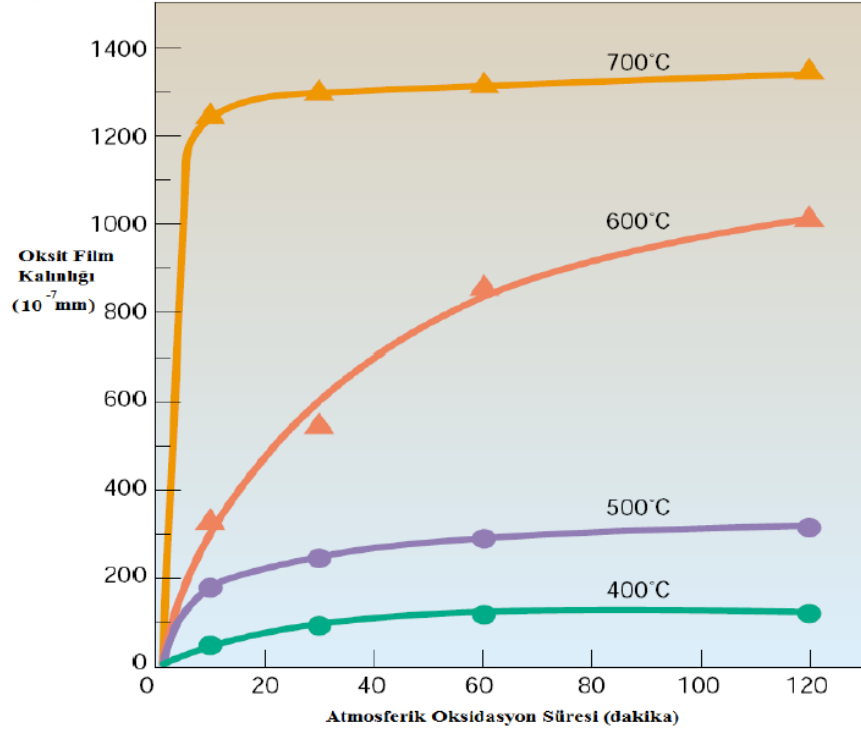
Endüstride oldukça fazla tercih edilen $\alpha + \beta$ titanyum alaşımlarıdır. İçerisinde bulunan β fazı %5 ila %40 aralığındadır. Ti-6Al-4V alaşımı, $\alpha + \beta$ titanyum alaşımının en tanınmış ve fazlaca kullanılanıdır. Bu alaşım içerisinde Ti_3Al çökeltilerini engellemek amacıyla Alüminyumun kullanım oranı %6 ile sınırlandırılmıştır. Şekil 2.4 incelendiğinde alüminyumun alaşım içerisinde yüzde olarak artmasıyla Ti_3Al yapısının meydana gelmeye başladığını görülebilir (Pederson 2002, Kumar ve Sinha 2018).



Şekil 2.4. Ti-Al faz diyagramı (Balaban 2007)

2.3 Titanyum ve Alaşımlarının Oksidasyonu

Özellikle CP- Tİ saf titanyum olmak üzere titanyum ve alaşımları reaktif malzeme olmasından kaynaklı oda sıcaklığında dahi yüzeyi üzerinde oksit tabakası oluşturmaktadır. Nanometre mertebesindeki kalınlıklarda olan bu film tabakası, metali, yüzeyde oluşabilecek istenmeyen reaksiyonlara karşı koruma sağlar. Titanyum ve alaşımlarının atmosfer ile reaksiyona girmesiyle üzerinde oluşan oksit katmanından dolayı, son bir yüzey işlemi uygulanmaz. Şekil 2.5’de atmosferik oksidasyona maruz kalan titanyum bir malzemede zamanla oluşan oksidasyon kalınlığı verilmiştir.

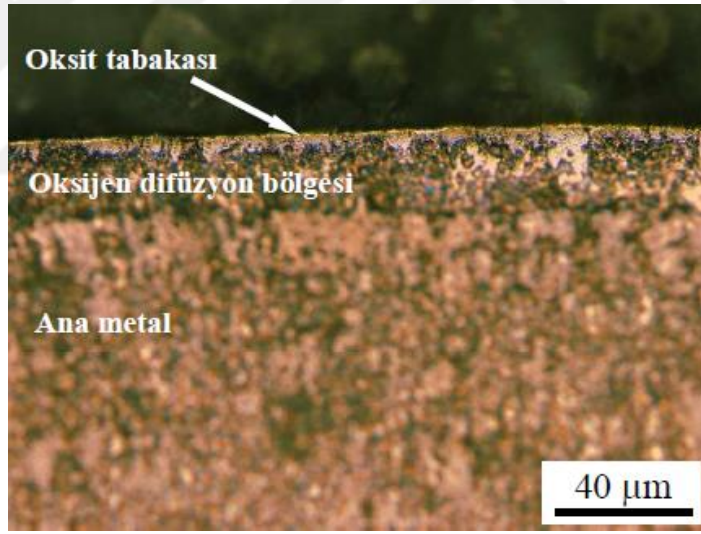


Şekil 2.5. Zamana bağlı oluşan oksit film kalınlığı (Kıral 2012)

Şekil 2.5’de sunulan grafikte, ortamdaki sıcaklığının artmasıyla oluşan oksit film tabakasının oluşma zamanı azalmaktadır. Ayrıca, ortamın sıcaklığının artmasıyla (süre değişmeden) sabit oksit film tabakası kalınlışmaktadır.

200 °C üzeri sıcaklarda uygulanan oksidasyon işlemi metalin yüzeyinde amorf yapıdan kristalin yapıya dönüşen ve kalınlığı buna göre artan oksit film tabakası oluşturur. Yüksek sıcaklıklarda, metal yüzeyinde oksit tabakası oluşurken ara yüzey bölgede Oksijen çözünmeye devam eder. Titanyum %30 lara kadar oksijen çözebilir.

Ti – O faz diyagramına göre oksijenin α fazındaki çözünürlüğü β fazına göre daha fazladır (İçdem 2007, Kıral 2012). Termal oksidasyon uygulanmış bir numune ile uygulanmamış bir numune karşılaştırıldığında, Termal oksidasyon, akma ve çekme dayanımı ile süneklik (kopma uzaması ve kesit daralması) değerlerinde önemli bir değişime neden olmamış ancak yüzey mikro sertliğini 2,5 kat artırmıştır. Sertliğin bu derece fazla yükselmesinin sebebi olarak oksit tabakası ve hemen altında bulunan oksijen difüzyon bölgesinin oluşmasından kaynaklandığını varsayılmaktadır. Şekil 2.6'da Termal oksidasyon uygulanmış CP-Ti kesitinin optik mikroyapısı verilmektedir (Cingi ve ark. 2007).



Şekil 2.6. Termal oksidasyon uygulanmış CP-Ti kesitinin optik mikroyapı fotoğrafı (Cingi ve ark. 2007)

2.3.1 Titanyumun Korozyon Davranışı

Titanyum iyi mekanik özelliklerinden dolayı bir birçok endüstri alanında tercih edilmektedir. Ayrıca titanyum malzemesi korozyon karşısında yüksek bir dayanım

gösterir. Bu malzeme doğal olarak çok reaktif bir metaldir ve havaya, nemli bir yere ya da redükleyici bir ortama bırakıldıklarında metalin yüzeyinde sürekli ve karalı olan bir koruyucu film tabakası meydana gelir. Bu tabaka metalin korozyona karşı olan dayanımını yükseltmektedir. Saf titanyum deniz suyu, vücut sıvısı ve doğal çevre ortamlarında korozyona karşı yüksek direnç gösterirler. Yapılan bir çalışmada deniz suyunda 18 yıl tutulan titanyum parçasının sadece yüzeyi üzerinde renginin değiştiği gözlenmiştir (İçdem 2007). Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde Termal oksidasyona uğramış saf titanyumun yüzeyinde meydana gelen renk değişiklikler Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

°C \ min	10	30	60	120
400				
450				
500				
550				
600				
650				
700				

Şekil 2.7. Farklı sıcaklık ve sürelerde termal oksidasyon işlemi yapılmış saf titanyuma ait renkler (Kıral 2012)

2.3.2 Titanyum ve Alaşımlarının Korozyon Direncine Ortamın Etkisi

370 °C ‘deki sıcaklıklara kadar titanyum, oksijen ve havanın korozyon etkisine çok iyi bir dayanım gösterirler. 370 °C ve 450 °C sıcaklıkları arasında titanyum yüzeyi üzerinde düşük bir suratla oluşan renkli bir oksit tabakası oluşur. 650 °C sıcaklıkların üzerine çıkıldığında titanyum, uzun süreli oksidasyon dayanımını terk ederek metal içindeki artan oksijen difüzyonu nedeniyle gevrekleşir. Titanyum saf su ve vücut içerisindeki sıvılara da çok iyi bir dayanım göstermektedir. 300 °C ‘ye kadar su ve su- buharı titanyuma tesir etmemektedir. Su buharının içinde olan sülfit, demir ve manganez oksit, klorür ve sülfat gibi kirletici maddeler ve kirlenmeyi gidermek için yapılan klorlama da titanyumun suya karşı olan korozif özelliğini etkilemez (İçdem 2007).

2.4 Titanyum ve Alaşımlarının Kaynak ve şekillendirilebilme Kabiliyeti

Metal materyalin kaynak edilmesi için gerekli hazırlık, kaynak sırasında zen gösterilmesi gereken şartlar ve kaynaktan sonra tatbik ve kontrol edilecekler minimum derecede ise o malzeme için kaynak yeteneği yüksektir denilebilir. Kaynak için öncelikle, genleşme katsayısı, ergime sıcaklığı, sertlik, korozyon direnci ve malzemenin fiziksel kimyasal özellikleri ilk etapta iyi bir görüş vermektedir. Malzemenin temizliği, kaynak ađđı açılması kaynak öncesi hazırlıklar olarak bilinmelidir.

Kaynak esnasında zen gerektiren şartları saymak gerekirse, Kaynak yapılan bölgenin temizliği, sıcaklık ve nem durumu, hangi kaynak yöntem veya yöntemlerinin seçileceği, koruyucu gazın cinsi, ısı girişinin kontrol altında olmasının gerekliliği ve işlem basamakları geildik gereken temizlik veya apak temizleme olarak söylenebilir.

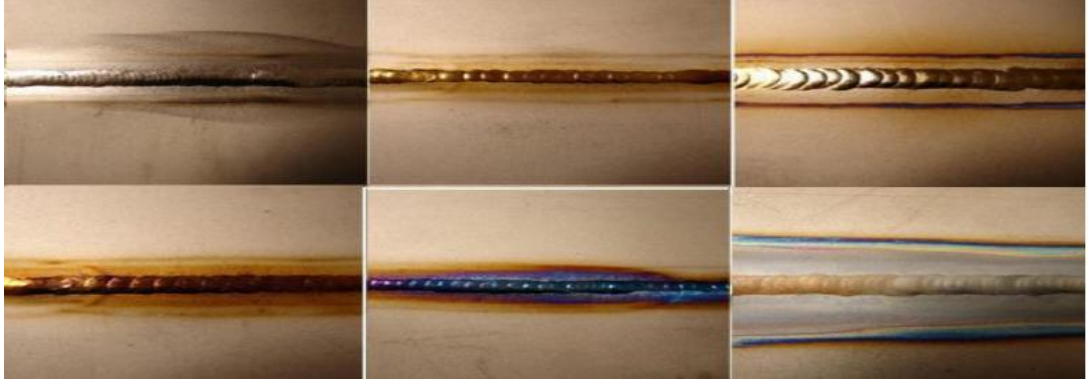
Titanyumun şekillendirilmesi güçtür (oda sıcaklığında) ve şekillendirildikten sonra önceki durumuna dönmeye (elastiklik) yüksek oranda meyillidir. Yırılma isteği bir başka istenmeyen özelliğidir. Bundan dolayı 595 – 815 °C sıcaklıkları arasında şekil verilmesi doğru bir seçimdir. Sıcak şekillendirme, titanyumu şekillenmesi için hazır duruma

getirmekte ve titanyum malzeme içerisinde meydana gelen iç gerilmeleri giderebilmekte ve eski haline dönme isteğini azaltmaktadır (Kıral 2012).

2.4.1 Titanyum ve Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri

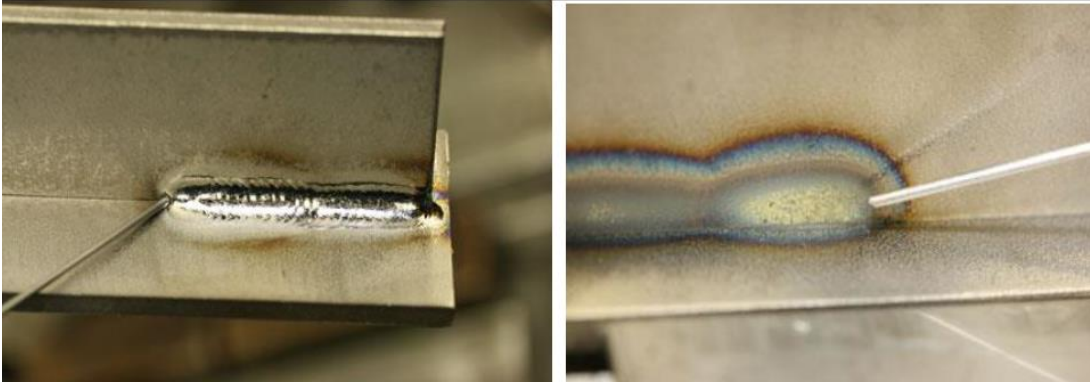
Titanyum kaynak yeteneği bakımından iyi özellikler göstermektedir. Kaynak dikiş bölgesi ve kaynak bölgesinde malzemenin mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı çok az değişir. Uluslararası ASTM titanyum için 31 değişik kaynak yönetimi belirlemiştir. Farklı mekanik ve kimyasal özellik gösteren titanyum ve alaşımlarının kaynak yöntemleri paslanmaz çelikler ile benzerlik göstermektedir. Titanyum alaşımları düşük ısı yayılımını engelleyen düşük termal iletkenliğe ve kaynak sırasında gerilmelerin ortaya çıkmasını engelleyen düşük ısıl genleşme katsayısına sahiptir (Kumar ve Sinha 2018). Bu gazların yüksek saflıkta olmalıdır (%99,998 saflıkta – DIN EN 439'a göre). Şekil 2.8' de farklı koruyucu gaz miktarları ile yapılmış kaynak çizgileri görülmektedir (Kıral 2012).

Titanyumun ısı iletkenliği düşük olmasından dolayı, kaynak çizgisi uzun süre yüksek ısıya maruz kalmakta ve ısı tesiri altında kalan bölgenin genişliği azalmaktadır. Sıcaklıktaki düşme yavaş ve kademeli olması tane iriliğinde önemli bir faktör olduğundan, soğuma zamanının artması tane büyümesine sebep olur. Bu yüzden soğumayı süratlendirmek için kaynak alanındaki ısı bölgesi kısa bir mesafede tutulmalı ve kaynak süratli bir şekilde yapılmaya çalışılmalıdır (Şirin ve ark. 1997, Kaya 2010, Kıral 2012).



Şekil 2.8. Farklı koruyucu gaz miktarları ile korunmuş kaynak dikişleri (Kıral 2012)

Şekil 2.9'da Argon gazı ile korunan ve korunmayan bölge arasındaki renk farkının kaynak dikişi üzerine etkisi görülebilir (Şirin ve ark. 1997, Kıral 2012).



Şekil 2.9. Argon gazı ile korunan (solda) ve korunmayan (sağda) kaynak dikişi (Kıral 2012)

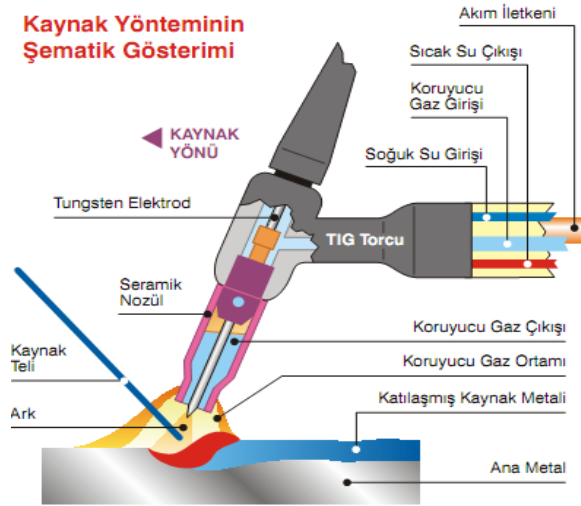
Kaynak dikişi üzerindeki rengin kaynak kalitesini belirlemede önemli bir faktör olduğu belirtilmiş, Çizelge 2.4'de renklendirmeler ve kalite uygunluğu verilmiştir.

Çizelge 2.4. Kaynak dikiş rengi ve kalite kontrol değerlendirmesi (Kıral 2012)

Kaynak Rengi	Kalite Kontrol Değerlendirmesi
Parlak Gümüş Rengi	Kabul
Gümüş Rengi	Kabul
Açık Pembe	Kabul
Koyu Pembe	Kabul
Bronz	Kabul
Kahverengi	Kabul
Eflatun	Ret
Koyu Mavi	Ret
Açık Mavi	Ret
Yeşil	Ret
Gri	Ret
Beyaz	Ret


TIG kaynak yöntemi (Tungsten Inert Gas)

Bitmeyen elektrot (wolfram veya tungsten), gerekli hallerde ilave metal, Argon veya Helyum gazlarının koruyucu gaz olarak tercih edildiği bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kaynak akımının artmasıyla malzemeye verilen ısı artacağından bu artış da ITAB'ın genişlemesine sebep olacaktır (Kilerci 2011). Titanyum kaynatılırken karşılama en büyük sorun sıcaklığın yükselmesiyle titanyum metali yapısında bulunan azot, oksijen ve hidrojenin çözülmesidir. Bu çözünme sertlikte artışa neden olmaktadır. Şekil 2.10'da TIG kaynak şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. TIG Kaynağı şematik gösterimi (Anonim 2014 (b))

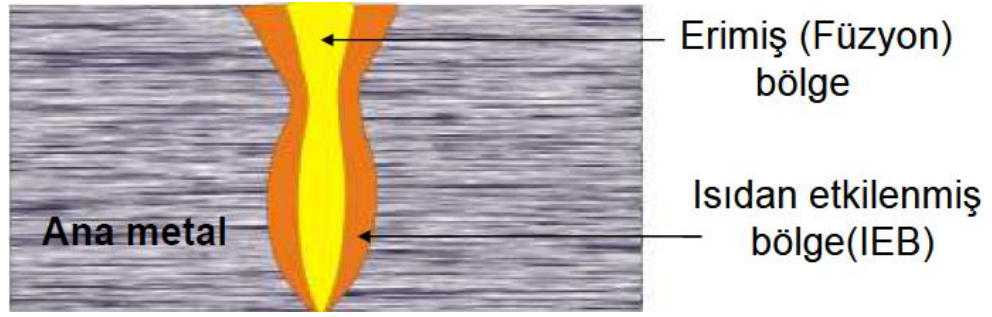
Tıg kaynağı sırasında koruyucu gaz olarak argon, helyum veya bunların karışımı kullanılmalıdır. Bu gazların saflık derecelerinin yüksek olması gerekiyor. Kalınlıkları düşük sac parçalarda argon gazı, kalın parçalarda ise derin nüfuziyeti sağlamasından dolayı helyum gazı kullanılır. Argon gazının iyonizasyon enerjisi $15,78 \text{ eV}$ tur, helyum gazının ise $24,58 \text{ eV}$ tur. Yani helyum gazı ile oluşan ark daha yüksek enerjiye sahip bir ısı kaynağı olmaktadır. Argon havaya göre daha ağırdır bu sebeple yatay şekilde iyi kaynak muhafazası sağlar. Helyum gazı ise havaya oranla daha az ağır olduğundan 90 derecelik açıyla yapılan kaynaklarda daha iyi koruma sağlar (Oğuz 1990). Titanyumun Tıg kaynağında ilave metal kullanılan durumlar olabilmekte, ilave metalin kimyasal içeriği ana metalinkine eşittir. AWS A5.16- 70 standartlarında beş tanesi alaşımsız kalan dokuz tanesi alaşımlı olmak üzere on dört tane ilave metal belirtilmiştir. Şekil 2.11 'de AWS A5.16- 70 ER Tİ ilave telinin mekanik değerleri, kullanıldığı yerler ve özellikleri belirtilmiştir (Anonim 2018).

Normları :		Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi %(Tipik):	
AWS A5.16	: ER Ti 2	C max < 0.03	Fe < 0.025
		H < 0.008	Ti kalan
Mekanik Değerler : _____			
Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Sertlik (HB)	Uzama (L _o =5d _o)(%)
275	395 - 540	180	20 J
Kullanıldığı Yerler ve Özellikleri : _____			
Saf titanyum ve titanyum alaşımlarının kaynağında kullanılan orta dayanımlı ve uzaması yüksek olan TIG kaynak telidir.			
TIG kaynağında koruyucu gaz olarak saf argon kullanılır. DIN/EN 26848 standardına göre %1 toryum alaşımlı kırmızı renkli (WT 20) tungsten uçlar ile kullanılabilir.			
Kaynak Pozisyonları: _____			
			

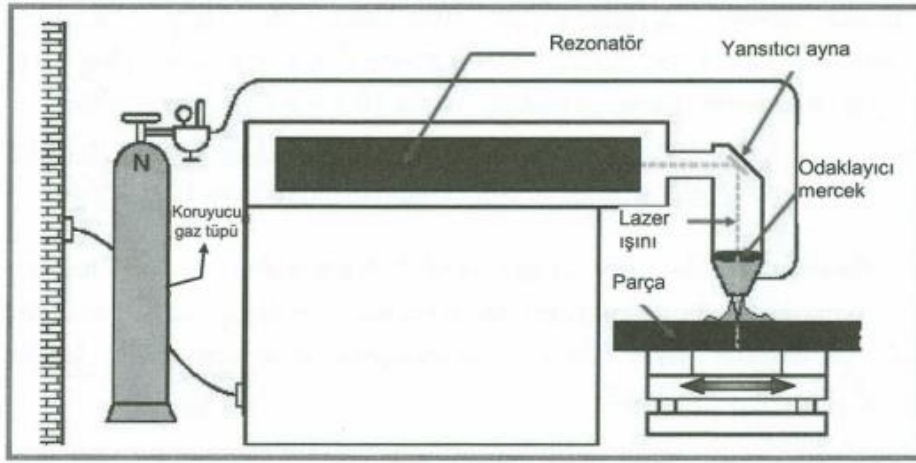
Şekil 2.11. ER Tİ 2 İlave telinin mukavemet değerleri, kullanıldığı yerler ve özellikleri (Anonim 2018)

Lazer Kaynak Yöntemi

Işınlandırmanın uyarılmış yayımı ile ışığın kuvvetlendirilmesi ile yapılan ergitme kaynak işlemidir. Laser, İngilizcedeki Light Amplification by Stimulated Emission of Radition kelimelerinin baş harflerinin birleşmesiyle meydana gelmiş dilimize de Lazer olarak geçmiş bir kavramdır. Lazer kaynak işleminin ana prensibi: kaynak yapılan metalin birbirine değen yüzeylerinin eritilmesi ve bu yüzeylerin soğumaya bırakılmasıyla gerçekleşen bir füzyon işlemidir, Lazerle kaynak yapılırken değişik yapıda üç alan meydana gelir, esas malzeme: kaynağı yapılmakta olan bu malzeme yapı olarak bir değişikliğe uğramaz, ikinci alan füzyon alanıdır (erimiş metal) ve son bölge olarak ısıdan etkilenmiş bölge (IEB), (Şekil 2.12), (Akman 2006, Anonim 2014 (b), Anonim 2016 (b)). Şekil 2.13. de lazer kaynağının çalışma prensibi tasvir edilmiştir.



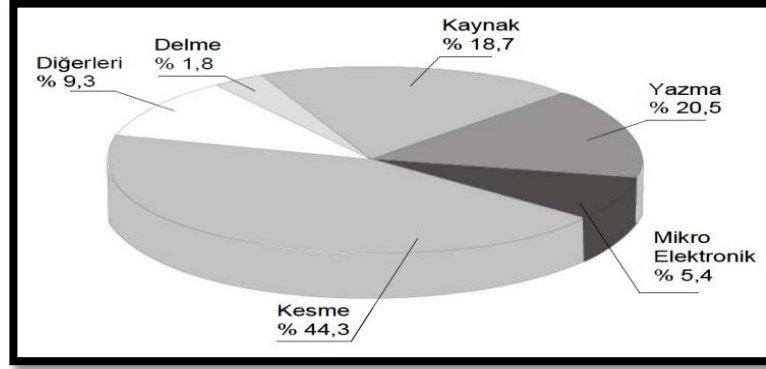
Şekil 2.12. Lazer ile kaynak işlemi esnasında oluşan bölgeler (Akman 2006 ‘dan değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.13. Lazer kaynağının çalışma prensibi (Anonim 2014 (b))

Lazerler kaynak işlemlerinin yanı sıra delme, markalama, yüzey işleme, kaplama alanlarında da kullanılmaktadır. Şekil 2.14’de lazerlerin endüstrideki kullanım amaçlarına göre yüzdelik dilimlerde gösterilmiştir.

Şekil 2.14. Lazerle yapılan işlemlerin endüstrideki dağılımları (Anonim 2015)

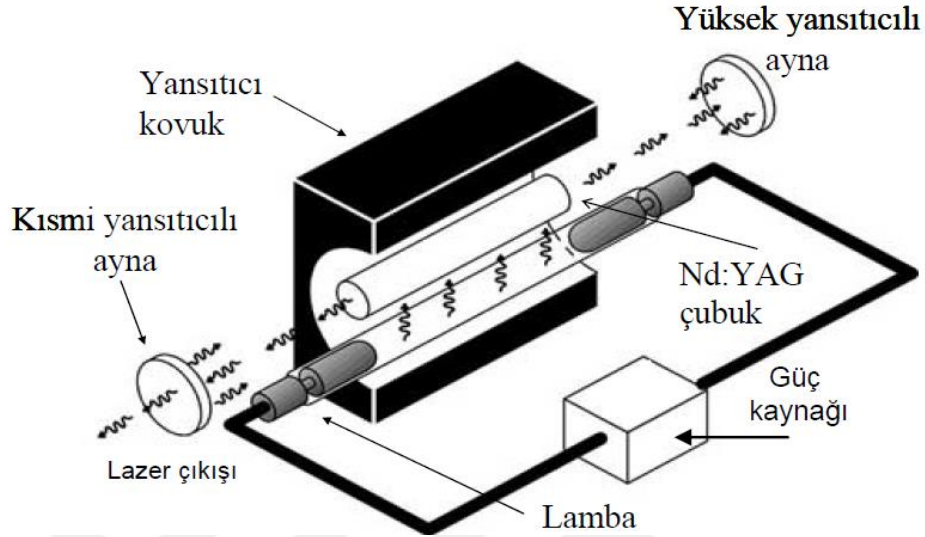


Otomobil ve uzay sanayinde metal plakaların belirli bir mesafeden bir araya getirmek için ergitme kaynağı olarak lazer kullanılıyor. Farklı yöntemlere kıyasla lazer organik/inorganik, aynı ve farklı metallerin yüksek kesinlikte kaynatılmasında kullanılır (Akman 2006). Yönlülük ve randıman açısından elektron demet kaynağı ile karşılaştırılabilir. Ancak elektron demet kaynağı için sürekli bir vakum ortamının olması gerekliliği lazer kaynağını daha fazla tercih edilmesine neden oluyor. Kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında lazerin avantajları diğer kaynak tekniklere göre kaynak genişliğinin küçük olması, yüksek verimlilikte hızlı kaynak yapması, metalde daha az eğilmeye neden olması, ısıdan etkilenmiş bölgenin çok az olması ve Al/Mg gibi alaşımların kaynağında da kullanılabilmesi açısından lazerler kaynak işlemlerinde çok fazla tercih edilirler (Akman 2006).

Lazerin Çalışma Prensibi

Lazer, farklı yöntemlerde kazanılan elektromanyetik ışınımı kuvvetlendiren ve morötesi Bölgeden kızıl ötesi bölgeye kadar geniş bir alanda ışıma verebilen bir alettir. Lazer ışını elde etmek için kazanç ortamı (ışının kuvvetlendirilmesini sağlayan), enerji kaynağı (ortamı uyaran) ve geri besleme (doygunluğa ulaşmak için) olmak üzere üç şart gerekli ve yeterlidir. Sık kullanılan bir Nd:YAG lazerinin kar ortamı ve geri besleme sistemleri şekil 2.15’ de görülmektedir. Flaş lambaları ile pompalanan kristal içinde demet oluşmaya başlar ve aynalar yardımı ile geri besleme sağlanır. Lazer demeti belli- kazanç

değerine ulaştığında kısmi geçirgen ayna yardımıyla lazer çıktısı alınmaya başlar (Zhang ve ark. 1995, Akman 2006).



Şekil 2.15. Nd:YAG Lazerinin kar ortamı ve geri besleme sistemleri (Akman 2006'dan değiştirilerek alınmıştır)

Lazer Teknolojisinin Kullanıldığı Alanlar

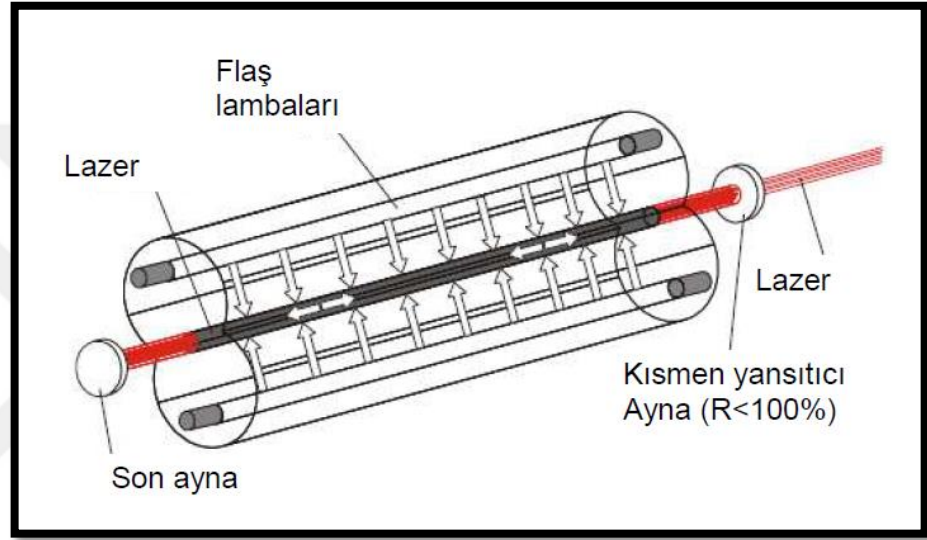
Son yıllarda lazer alanındaki teknolojilerinin artması ile birlikte lazerin kullanım alanlarında da ciddi artışlar meydana geldi. Çizelge 2.5'de lazerlerin kullanım alanları şematize edilmiştir (Akman 2006, Kilerci 2011).

Çizelge 2.5. Lazerlerin kullanım alanları (Kilerci 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

LAZERLERİN UYGULAMA ALANLARI							
	Düşük Şiddetli Lazer				Yüksek Şiddetli Lazer		
İletişim	Metalurji	Doküman	Eğlence	Askeri	Kimyasal	Medikal	Isı Kaynağı
Optik	Holografi Ölçümü	Bilgi Tarama	Lazer Gösterileri	Hedef Belirleme	Spektroskopi	Tümör	Kesme
Fiber	Denetim	Ve Depolama	Pointerlar	ve Gözlem	İzotop Ayırma	Terapi	Delme
Telekomünikasyon	interferometri	Baskı	Audio	Atomik Füzyon	Foto-Kimyasal	Deri, diş	Kaynak
Bilgi Depolama			Akustik Kayıt		Kaplama	ve göz cerrahisi	Kaplama
ve hesaplama					Kirlilik Kontrolü	Dermatoloji	Yüzey İşleme

Nd: YAG Lazeri

En çok tercih edilen katı-hal lazerleridir. Kristal olarak $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG, Yttrium Aliminyum Garnet) kullanılır. Nd: YAG lazerleri sürekli veya atımlı olarak çalışabilirler ve hem lamba hem de AlGaAs yarı iletken lazerleri ile pompalanabilirler. Şekil 2.16' da gösterilen Nd yağ kovuğunda iki adet flaş lamba kullanılmıştır. Arzu edilen enerjiyi elde edilmek için elips ve lambaların adetleri yükseltilebilir.



Şekil 2.16. Nd:YAG lazer kovuğu (Akman 2006)

Lazer İle Kaynak Yöntemleri

İletimle ve derinlemesine olmak üzere iki tip kaynak yöntemi vardır. İnce kalınlıktaki sacların kaynatılmasında iletimle kaynak daha kalın (kaynak nüfuziyetinin daha derin olması istenen yerler için ise derinlemesine kaynak yöntemi tercih edilir. İletimle ve derinlemesine kaynak çeşitlerinin birbirilerinden ayırt edici özelliği, birinde kaynak esnasında kaynak havuzunun kapalı (iletimle), diğerinde ise açık olması ve lazer ışın demetinin kaynak yapılan malzemedeki derine inmesidir (Zhang ve ark. 1995, Akman 2006, Anonim 2014 (b)).

İletim Metoduyla Kaynak Yöntemi

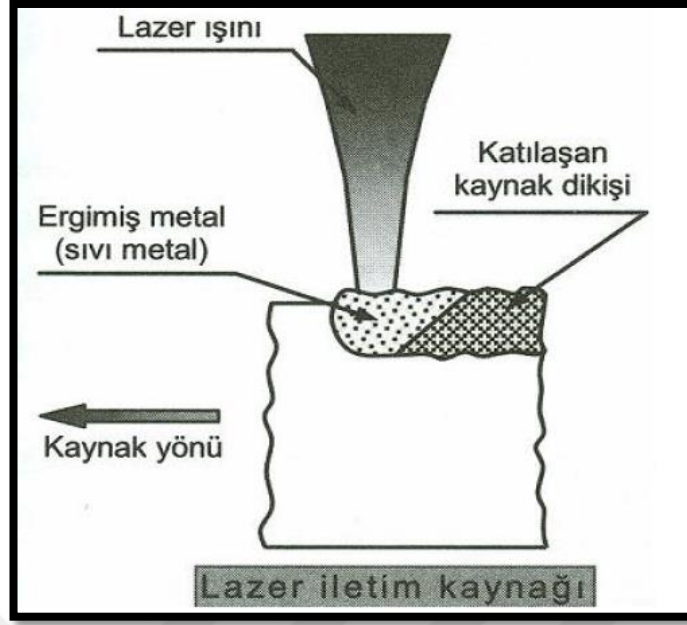
İletimle kaynak metodu fazla kaynak derinliğine ihtiyaç duyulmayan, ince kesitli metal malzemelerin birbirlerine kaynatılmasında tercih edilen bir metottur. Lazer ışın demeti merkezleme ekipmanları kullanılarak (mercekler, küresel aynalar) malzeme üstüne düşürülür. Genel itibariyle odak malzemenin üstüne veya içerisine olacak biçimde pozisyonlanır. Malzemenin üstüne gelen ışın demetinden bir miktar ışın malzeme tarafından soğurulurken belirli miktar ışın da geri yansır.

Metal malzemeler başta olmak üzere, malzemelerin çoğunun içerisine ışık geçişi olmaz. Soğurulan enerji malzeme yüzeyi üzerinde depo edilir ısı iletkenliğe bağlı olarak dağılır. İletim ile kaynak metodu lazer enerjisinin metali kaynatmadığı ergitebildiği durumlarda kullanılır. En yüksek kaynak derinliğine metalin yüzey sıcaklığının, kaynama sıcaklığının bir miktar altındaki sıcaklıklara çıkmasıyla ulaşılabilmektedir. Atımlı tip lazer kaynaklarda, kaynak derinliği kullanılarak 2.1 ve 2.2 eşitliklerine tabi şekilde lazerin tepe enerjisine ilave edilen metal yüzeyine düşürülen lazer ışın demetinin çapı ile de kontrol edilir. Çapın kontrolü lazer gücünün genişçe bir bölgeye yayılma bakımından ehemmiyetli bir ayardır (Zhang ve ark. 1995, Akman 2006). Şekil 2.17’de İletim lazer kaynağı gösterilmiştir.

$$I = \frac{P}{D} \quad (\text{W/cm}^2) \quad (2.1)$$

$$P = \frac{E}{t_a} \quad (\text{J/s}) \quad (2.2)$$

I: Lazer şiddeti, P: Tepe gücü, D: Lazer demet çapı E: atım enerjisi, t_a : Atım süresi
Soğurulan güç lokal sıcaklığın artmasına sebep olur. Yeteri güce varıldığında metal ergir ve ışın demeti hareketlendiğinde eriyik metalde soğuma başlayarak katılaşma olur, böylece birleşme sağlanmış olur, kaynak işlemi böylelikle gerçekleşmiş olur. İletim ile kaynaklama prosesi esnasında eriyik malzemeyle atmosferle temas sebebiyle eriyik malzeme üzerinde oksit oluşur. İstenmeyen oksit tabakasını oluşmasını engellemek için koruyucu gazlar kullanılır (Anonim 2016 (a)).

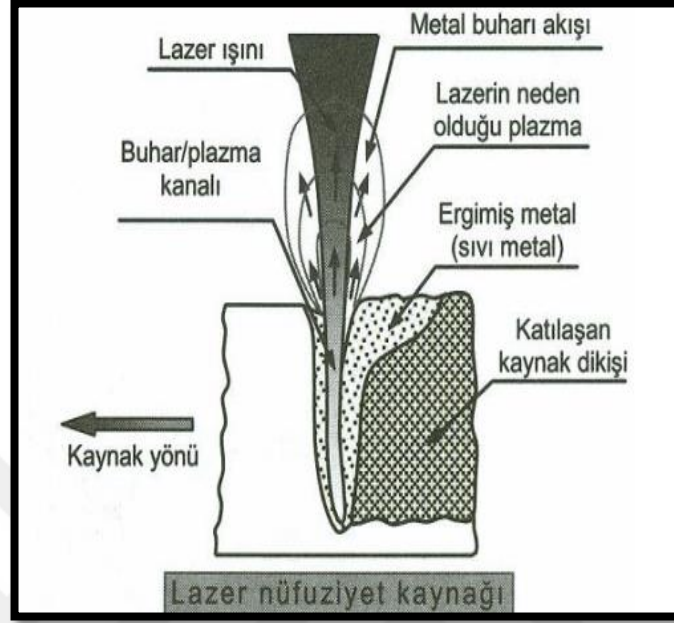


Şekil 2.17. İletim lazer kaynağı (Anonim 2016 (a))

Anahtar Deliği Kaynak (derin nüfuz kaynağı)

Enerji yoğunluğu yeterli (10^6 W/ cm ²) lazer ışın demeti metal yüzeyine pozisyonlandığında yüzeyi çabuk biçimde eritmek suretiyle buharlaşma başlatır. Buhar basıncının ve buharlaşmanın tesiriyle eriyiğin içerisinde kanal (buharın boşalması için anahtar deliği) meydana gelir. Erimiş olan metalin ve etrafını saran katı metalden meydana çıkmış buhar kanalının çapı lazerin metal üzerindeki pozisyonlanmış olan odak çapıyla aynıdır. Erimiş metalin üzerindeki gerilim, yer kütlelerinin çekimi ve buhar basıncı arasındaki kararlı bir dengelenme sonucunda anahtar deliği açık olarak durmaktadır (Akman 2006). Derin nüfuz kaynağında, buharlaşmış metal ile lazer ışın demetinin reaksiyonu buharlaşan metalin iyonlaşmasına ve bir tanesi anahtar delik bölgesi içerisinde diğeri anahtar delik bölgesinin üstünde olan iki değişik alanda plazma meydana gelmesine sebep olur (Zhang ve ark. 1995, Anonim 2014 (b)). Odak bölümünün ısı hasarlarından kollamak amacıyla lazer ışın demetine paralel ekseninde belirli bir debide koruyucu gaz püskürtülür. Koruyucu gaz odak bölümünü ısı hasarından koruduğu gibi

kaynak esnasında, kaynak bölgesinin hava ile temas edip oksit oluşmasını engeller (Akman 2006). Şekil 2.18’de lazer nüfuziyet kaynağı gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Lazer Nüfuziyet Kaynağı (Anonim 2014 (b))

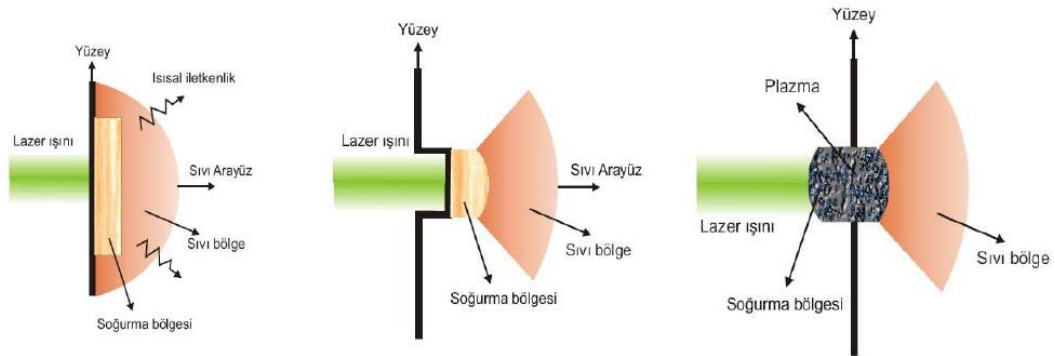
Lazer Kaynak İşleminde Meydana Gelen Fiziksel Durumlar

Gerçekleşen en önemli durum lazer gücünü malzemenin emmesi, soğurmasıdır. Bu soğurma malzeme içerisinde ısıya dönerek, eritme kaynak işleminin gerçekleşmesine neden olur. Sırasıyla iletim, erime ve buharlaşma diğer gerçekleşen fiziksel olaylardır. Soğurma: metal malzemenin lazer ışın demetini soğurmasına dalga boyuna, iletkenlik benzeri elektriksel durumlarına, lazer ışın demetinin metal üzerine gelme açısına, polarizasyona ve pozisyonlanma kuvvetine bağlı kalmaktadır. Bir kısım metal malzemelerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Metal malzemelerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları (Akman 2006).

Metal	Nd:YAG Lazeri	CO2 Lazeri
Alüminyum	0.06	0.02
Bakır	0.05	0.015
Demir	0.1	0.03
Nikel	0.15	0.05
Titanyum	0.26	0.08
Çinko	0.16	0.03
Karbon Çelik	0.09	0.03
Paslanmaz Çelik	0.31	0.09

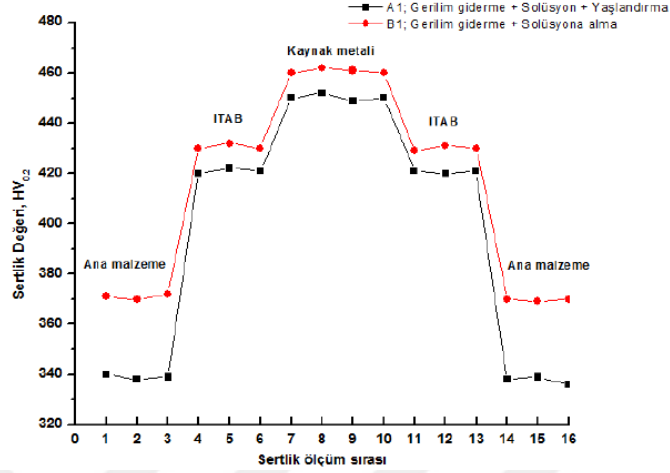
Kaynak yapılan yüzey üzerinde absorbe edilen lazer gücü ısı iletimi vasıtasıyla hedefe nüfuz eder. Hedef metal erimeye başladığında malzeme içerisinde likit bir ara-yüzey meydana gelir. Metal malzemede buharlaşma ve delik oluşumu başlar, bu işlem ışımanın devamı sayesinde olur. Fakat Işıma gücü yeterli miktarda olur ise, buharlaşmanın olduğu metalin içindeki soğurma ışığı geçirmeyen bir plazmanın (veya iyonlaşmış gaz) meydana çıkmasına neden olur. Bir lazer ışının metal yüzey üzerinde meydana getirdiği fiziksel durumlar: Erime, buharlaşma ve plazma oluşumudur (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Bir lazer ışının metal yüzeyinde meydana getirdiği fiziksel durumlar (Akman 2006)

Lazer kaynak, geleneksel usullerle karşılaştırıldığında şiddetli enerjisi olmasından dolayı, ısı girişi düşük, katılaşmanın hızlı olduğu ve kaynaklı birleştirmelerde yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği bir kaynak işlemi olarak bilinmektedir. Lazer yöntemiyle kaynaklanmış örneklerle ait sertlik değerleri Şekil 2.20 incelendiğinde, kaynak metalinin

ve ısı tesiri altındaki bölgenin sertliğinin ana metalden daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir (Köse ve Karaca 2018).

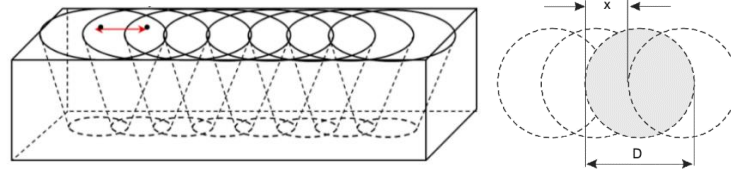


Şekil 2.20. Lazer kaynaklı Ti-6Al-4V alaşımının kaynak bölgesindeki sertlik değerleri (Köse ve Karaca 2018)

Şekil 2.19 incelendiğinde sertliğin en fazla olduğu bölgenin kaynak metali olduğu görülüyor. Kaynak bölgesinin daha ince yapılı olması nedeniyle ısı tesiri altındaki bölgeye kıyasla daha sert olduğu görülmektedir.

Lazer Parametrelerinin Kaynak Dikişini Olan Etkileri

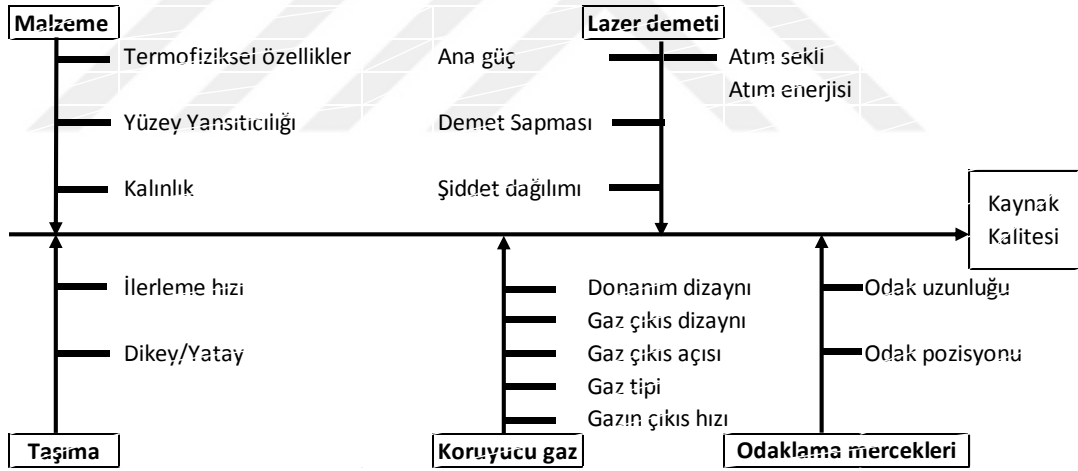
Nd: YAG atımlı lazerlerin kullanımı dikiş kaynağında son teknolojilerden biridir, birçok endüstri alanında kullanımı gittikçe artmaktadır. Şekil 2.21’de atımlı lazer ile yapılan kaynak dikişi işleminin şematik gösterimi gösterildiği gibi, lazer atımlarının malzeme yüzeylerinde üst üste getirildiği kaynak alanında eriyik (ya da dikiş) meydana getirmesiyle oluşur (Janasekaran ve ark. 2016).



Şekil 2.21. Dikiş kaynağının oluşumu (D: Lazer spot genişliği, x üst üste binmiş bölge)

Dikiş kaynağının kalitesi büyük ölçüde lazerin atım enerjisine ve süresine, şekline, frekansına, odak genişliğine ve kaynağın hızına bağlı olarak değişir. Son teknoloji lazerlerde atım tekrarlama oranı Khz frekans olarak kontrol edilebilmektedir, bu durum ısı aktarımını yüksek keskinlikle kontrol etmeyi imkân verir. Bunlara ilave olarak eriyik havuzun şekli ve ebatları, kaynamanın başladığı süre, anahtar deliği kontrolleri de kaliteli bir kaynak için gerekli olan diğer etkenlerdir. Kaynağın kaliteli olmasını etkileyen parametrik bilgiler Çizelge 2.7’ de şematik olarak gösterilmiştir.

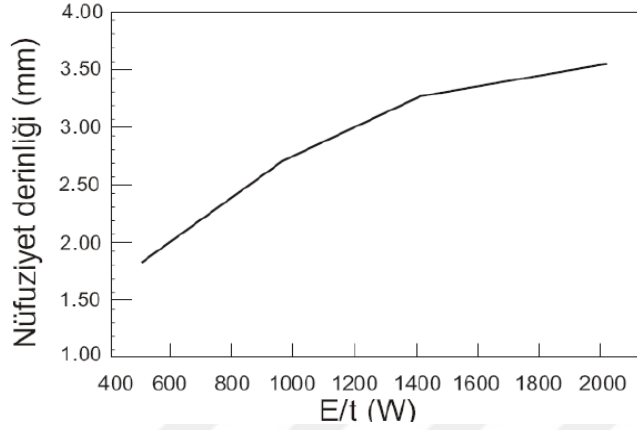
Çizelge 2.7. Kaliteli kaynak için parametreler (Akman 2006)



Atımın Gücü

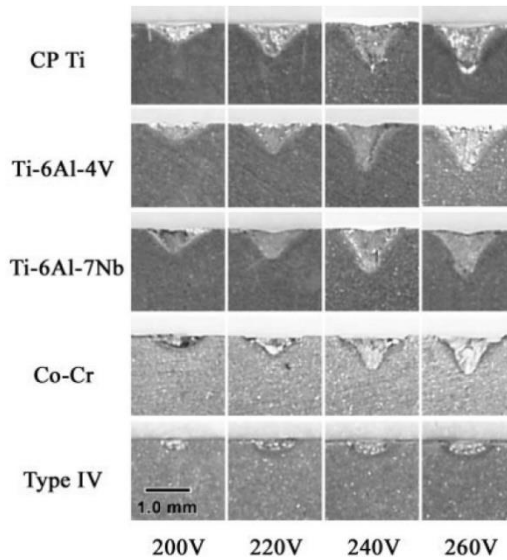
Kaynak yapılacak malzemede yüksek güç yoğunluğu, derin nüfuziyet kaynağı (Anahtar deliği) ve oluşan kaynağın kontrolü için tepe gücü önem derecesi yüksektir. Şekil 2.22’deki grafikte, 4ms atım süreli Nd:YAG lazerinin kullanıldığı 2124 Alüminyum alaşımların kaynak işlemi sırasında tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi görülmektedir, Şekil 2.22’de Atım süresi 4ms olan Nd:YAG lazeriyle yapılan 2124

Alüminyum alaşımlarının kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi görülebilmektedir (Akman 2006,Anonim 2016 (a)).



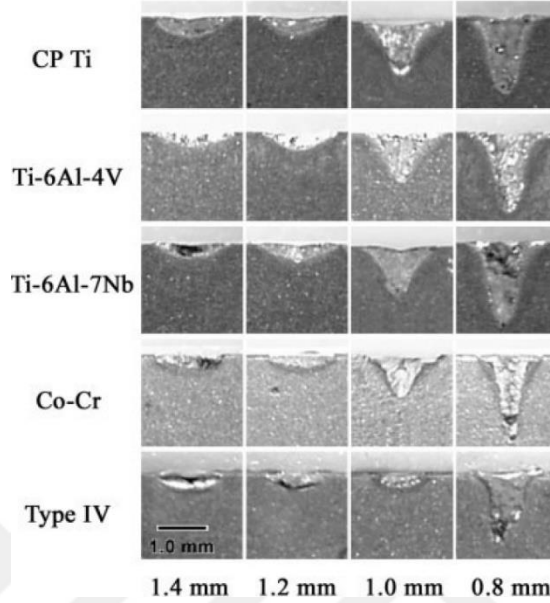
Şekil 2.22. Ti alaşımlarının farklı tepe güçlerinde 1 mm spot çapındaki kaynak nüfuziyeti (Akman 2006)

Tepe gücünün kaynak derinliğine olan etkisi değişik alaşımlarda da gözlenmektedir (Şekil 2.23). Süresi uzun olmayan bir lazer atımı ile derin nüfuziyetli bir kaynak mümkündür. Fakat gereksiz bir kuvvet ise çatlak ve gözenek gibi kaynak problemlerine sebep olur (Baba ve Watanabe 2004).



Şekil 2.23. Ti Alaşımlarının farklı tepe güçlerinde 1 mm spot çapındaki kaynak derinlikleri (Baba ve Watanabe 2004)

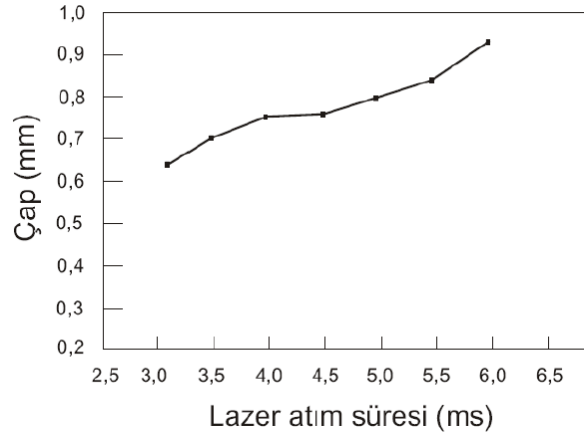
260 V enerji altında 0.8 – 1.4 mm spot çap aralığındaki nüfuziyetler Şekil 2.24’de gösterilmektedir (Baba ve Watanabe 2004).



Şekil 2.24. 260 V Enerjide farklı spot çapları için kaynak derinlikleri (Baba ve Watanabe 2004).

Lazer Atım Zamanı

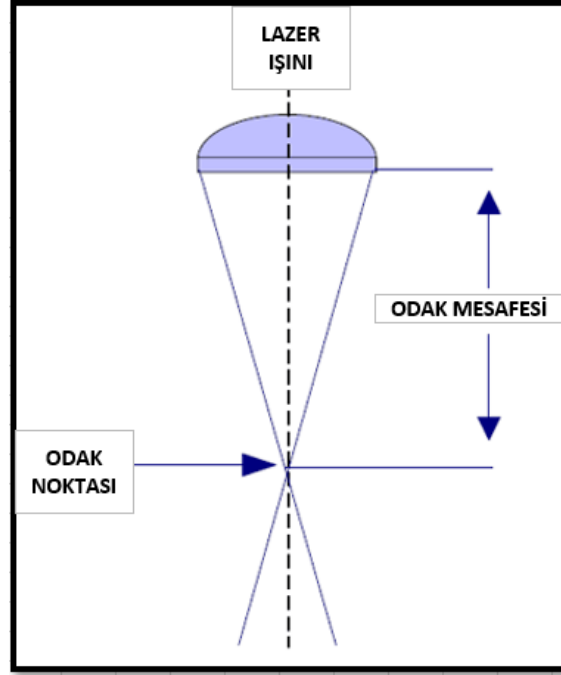
Kaynak kalitesi için bir başka önemli parametre olan lazer atım süresinin yükseltilmesiyle (tepe gücü sabit olacak); her atıma denk gelen gücün arttığı denklem 2.1 de görülüyor. Bununla beraber lazer ışın demeti ile malzeme metalinin reaktivitesinin süresi artar ve yayılmış bir eriyik bölgesi oluşur. 1.25 kW’lık tepe enerjisindeki Nd: YAG lazeri ile kalınlık ölçüsü 0,1 mm olan bakır levha malzemelerin kaynaklanmasında, atım mesafesindeki artmanın kaynağın enine olan etkisi Şekil 2.25’ de gösterilmektedir.



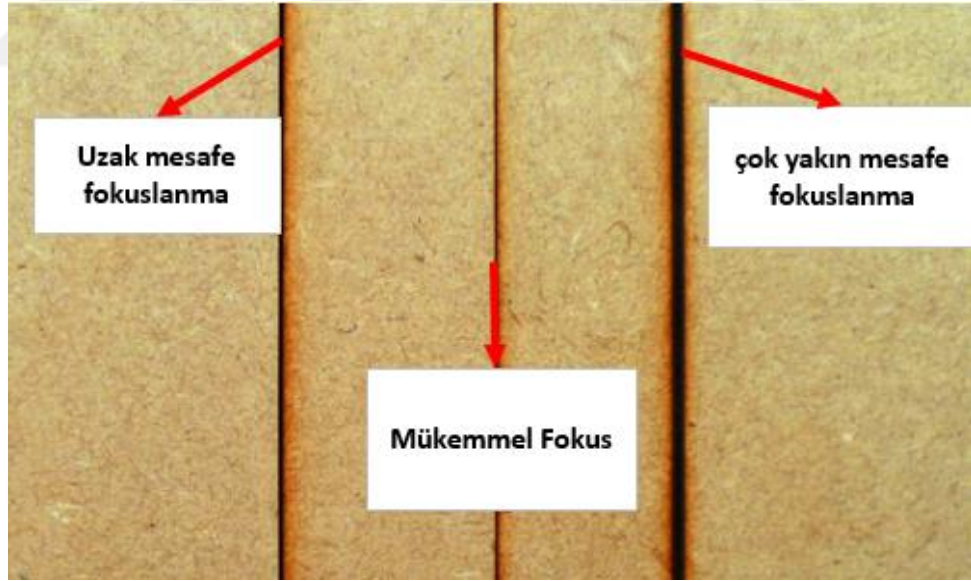
Şekil 2.25. Lazer atım süresinin değişiminin kaynak çapına olan etkisi (Akman 2006)

Atımın odak konumu

Lazer ışını metal malzemenin üzerine veya altına pozisyonlanabilir. Lazer ışını malzeme üstünde bir noktaya pozisyonlandıktan itibaren açılmaya başlar, açılma metal üstüne düştü anda sahip olduğu enerjinin büyük bir kısmı yansımalar nedeniyle yitirilmekte ve bu nedenle iyi bir kaynak nüfuziyeti sağlanamamaktadır. Atımın odak konumu belirlenirken malzemenin kalınlığı önemli bir rol oynar, genel olarak bu kalınlığın üçte biri oranında lazer demetinin odaklanması gerekir. Şekil 2.26 'de lazer ışınının odak mesafesi ve odak noktasının tasvir edilmesi, Şekil 2.27'de ise farklı mesafelerden odaklanmış lazer ışın demetinin parça üzerindeki kaynak dikişleri ve Şekil 2.28' de farklı odak mesafelerinin kaynak nüfuziyeti üzerine etkileri görülmektedir (Akman 2006 ve Anonim 2015).

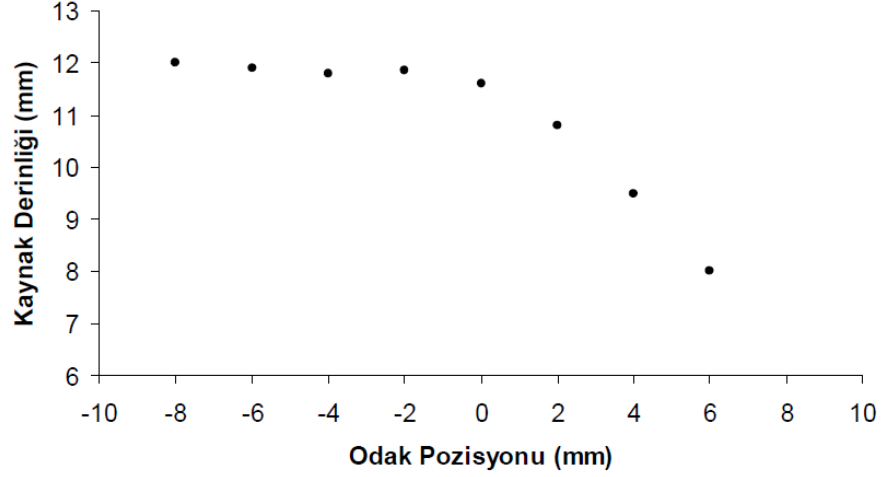


Şekil 2.26. Lazer ışının odak mesafesi ve odak noktasının gösterimi (Anonim 2016 (a) 'dan değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.27. Farklı mesafelerden odaklanmış lazer ışın demetinin kaynak dikişlerine olan Etkisi (Anonim 2015 'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.28. Farklı odak mesafelerinin kaynak nüfuziyetine olan etkileri (Akman 2006)

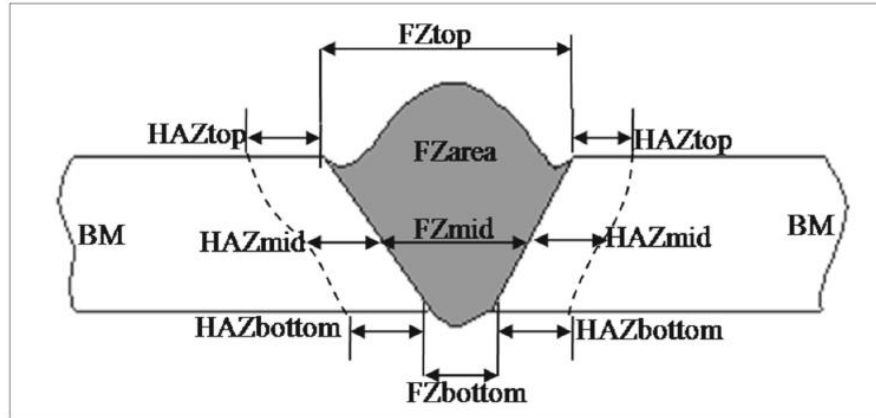
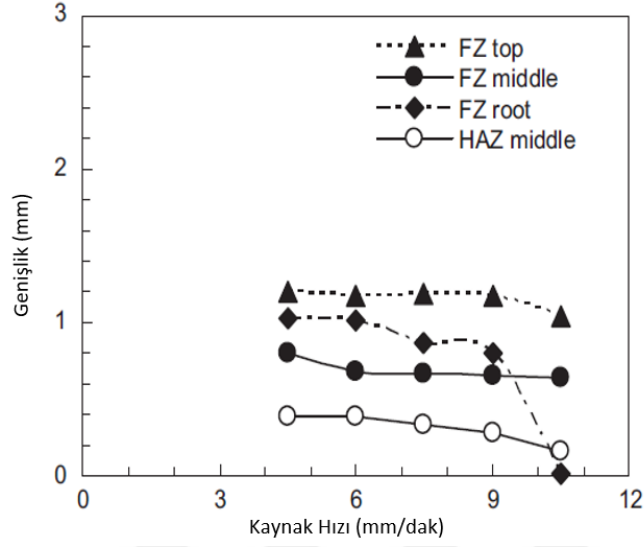


Atımın Frekansı ve Hızı

Lazerde kaynak işlemi “overlap” beneklerin üst üste binmesi işlemi ile gerçekleşir. Beneklerin üst üste binmesi kaynağın kalitesinde önemli bir parametredir. İçeriği magnezyum olan bir malzemeye lazer kaynak işlemi %75 lik üst üste binme yüzdesiyle uygulanmış ve çekme dayanımının bu oranda en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Atım zamanının sabit olan kaynaklamada, üst üste gelme yüzdesinin belirlenen ayarda kalsın diye kaynağın hızıyla frekansı bağlı duruma getirilir. Yüksek süratlerde kaynak tercih edilecekse frekansında buna paralel büyük oranda olmalıdır. Kaynağın, frekansı ve hızı arasında önemli ve hassas bir denge vardır.

Kaynak Hızı; 1 mm kalınlığındaki Titanyum Grade 5 Ti-6Al-4V titanyum alaşım sac parçaya, diğer parametreler aynı kalarak farklı kaynak hızlarında yapılan test ve bu hızlara göre oluşan füzyon ve ITAB genişlikleri Şekil 2.29’ da verilmiştir. Şekil 2.30’ da çizelgede bahsi geçen parametreler kaynak dikişi üzerinde gösterilmiştir (Cao ve Jahazi 2009, Kumar ve Sinha 2018).

Şekil 2.29. Farklı kaynak hızlarında füzyon ve ITAB (HAZ) genişlikleri



Şekil 2.30. Kaynak penetrasyonu üzerinde ITAB ve füzyon bölgeleri şeması

2.5 Titanyumun Şekillendirme Kabiliyeti

Titanyum yüksek sıcaklıklarda sürünme meyillidir. Bu sebeple, sürünme şekillendirilmesi, malzeme şekillendirme sıcaklığında yük altında yapılmaktadır ve yüksek derecedeki önceki şekline geri dönme meyilli problemi aşılabılır. Çoğu Titanyum ve alaşımları soy gaz koruyucunun sağlandığı 900 – 955 °C ‘deki sıcaklıklara çıkarıldığında süperplastisite göstermekte ve %1000'lere varan uzama bölgesel incelmeler görünmeden ve kırılma olmadan yakalanabilmektedir. Ti1, Ti2, Ti2Pd, Ti

Gr1, Titanyum Grade 7 Titanyumlar tercihen soğuk şekillendirilebilirler. Şekil verebilme, Yüzdesi %2 – 5 aralığındaysa, 200 – 350 °C civarında ön sıcaklık verilmesi istenir. Şekil verme yüzdesi %5’i aşmış ise, 300 – 350 °C sıcaklık aralığında önden sıcaklık verilmesi istenir. Şekil verme yüzdesinin %5’i aştığı durumlarda, yumuşatma tavlama tercih edilmesi uygun olur. Malzemeye soğuk olarak şekil verme esnasında, Krom-Nikel Çelik malzemeler için olan takımlar kullanılması uygundur. Şekillendirmeye başlanılmadan, metal malzeme üzerinin temiz ve metalik parlak duruma getirebilir. Yüzey üzerinde partikül, yağ, kir ve oksitlenme partikülleri bulunmamalı ve oksidasyonların temizlenmesi gerekir. Artıklar (taşlamadan kalan) ve kum partikülleri onaylanabilir değildir. Titanyumlar, soğuk şekillendirme ve preslenme hususlarındaki kabiliyetlerinden dolayı presleme için seçilirler. Önden sıcaklık vermeyle sıcak olarak yapılacak şekil verme alfa ve alfa-beta alaşımlarına uygulanır. Bu alaşımların soğuk şekillendirme becerileri yeterli değildir ve yüksek elastiklikliğe sahiptirler. Normalizasyon işlemi yapılmış beta alaşımlara soğuk şekillendirme yapılabilir. Şekillendirilmiş beta fazlı alaşımlarına da yaşlandırma ısı işlemi uygulanabilir. Isıl işlem sonrası sertlik da 1300 – 1500 Mpa ‘a yükselmektedir.

Titanyum ve alaşımlarının, bükmeyle ve preslemeyle şekillendirmede ehemmiyet gösterilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibidir, şekillendirme sonrası eski hallerine dönme meyillerinin sertliğin yükselmesiyle arttığı bilinmektedir bu sebeple bu meyilli düşürmek için malzemeyi gerekli olandan daha fazla bir açıyla bükme, bir miktar geri yaylanma olsa bile bitmiş iş parçasının nominal değerler arasında kalmasını sağlar. Bir diğer yöntem ise iş parçasının et kalınlığına uygun kalıpların kullanılması ve iş parçası tamamen kalıbın duvarlarına oturana kadar kalıpta bekletilmesidir (Kıral 2012).

Yapılan bir çalışmada ütüleme zamanındaki artışın elastik gerilimlerin azalmasına kalıcı gerilimlerin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Bu durumun da kalıcı şeklin oluşmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır (Önel ve Karaağaç 2017).

Tercih edilecek olan bükme yönüne dikkat edilerek malzemenin sac tabakadan çıkarılmasına özen gösterilmelidir. Beta fazlarında antizotropikliğin fazla bulunduğundan

kesim yönüne mutlak suretle dikkat edilmesi gerekmemektedir. Farklı malzemeler için şekil verme sıcaklığı Çizelge 2.8’ de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Farklı malzemeler için şekil verme sıcaklığı (Sarı: Normal Şekil Verme, Kırmızı: Ağır Şekil Verme)

Malzeme		Şekil Verme Sıcaklığı °C								
		0	100	200	300	400	500	600	700	800
Ticari Saflıkta Titanyum										
Alfa Alaşımı	Ti-5Al-2.5Sn									
Alfa Alaşımı	Ti-8Al-1Mo-1V									
Alfa- Beta Alaşımı	Ti-6Al-4V									
Beta Alaşımı	Ti-15Mo-5Zr-3Al									

2.6 Titanyumun Talaşlı İmalat ve Kesme Yeteneği

Titanyum yapı itibari ile güçlü reaktif bir yapı, düşük ısı iletkenlik katsayısı ve sıcaklığın artmasıyla yüksek sertlik dayanımı olan bir malzemedir. Talaşlı üretim sırasında ilerleme hızlarının yüksek olmamasına, düşük pasalarda ilerlenmemesine, soğutma sıvısı ile işleme yapılmasına, devamlı olarak işleme takımlarının keskin olarak kullanılmasına ve işlenecek malzemenin sıkı olacak şekilde tezgâha bağlı olması hususlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Özellikle, taşlama prosesinde çok özenli davranılmalıdır, çünkü taşlama sonrası iş parçasının kırılma direnci yüksek oranda düşebilir.

Titanyumun işlenmesi, paslanmaz çelikler ile aynı hatta daha da basit olduğu söylenebilir. Bu özellikleri problemsiz talaşlı üretim ve yüzey parlatma işlemlerine müsaade eder. Alaşimsız saf ve Alfa fazlı Titanyumlar farklı talaşlı imalat işlemlerine sokulabilir. Beta fazlı alaşımların işlenebilirliği zordur. Aradaki alfa ve beta fazlı alaşımlarının talaşlı imalat işlemi saf ve alfa arasındadır.

Titanyum esaslı metal saclar; sac makası (giyotin) ile kesilebilir. Ancak, kesimde dikkat edilmesi gereken husus sac makaslarının çekme dayanımının minimum titanyumun çekme dayanımı ile aynı olmasıdır. Sac makası kullanarak yapılan kesimlerde çapak oluşumunu engellemek adına bıçaklar arasındaki boşluklar azaltılabilir. Tavsiye edilen boşluk, paslanmaz çeliklerde yüzde on iken, bu değer titanyumlar için yüzde beştir.

Plazma, lazer veya oksiasetlen ile kesme de mümkündür, bu tür kesmelerde dikkat edilmesi gereken en önemli husus termal kesmeler sırasında ITAB bölgeleri oluşmakta ve malzemenin mikro yapısında ve mukavemet özelliklerinde değişiklik olduğudur. Termal kesme yapılan malzemenin kullanılacağı yerde istenilen mukavemet özellikleri belirlenirken bu hususta dikkate alınmalıdır. Son olarak malzemeyi yüksek basınçlı su ile, su jetiyle, kesmek de mümkündür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Materyaller

Çalışmalarda, Gr 2 Cp –Ti 2.sınıf yüksek saflıkta ve Ti-6Al-4V olmak üzere iki farklı titanyum malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler kalınlıkları 0,9 mm olan sac tabakalardan enleri 12,5 ve 25 cm, boyları 33 cm olacak şekilde, dikdörtgen parçalar haline sac makası ile kesilerek getirilmiştir. Bu işlem sonrası plastik şekil verme öncesi kaynak işlemleri için kullanılmak üzere 0,9 mm x 125 mm x 330 mm saclardan 12 adet Titanyum Grade 2, 12 adet Titanyum Grade 5, plastik şekil verme sonrası kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere 0,9 mm x 250 mm x 330 mm ölçülü saclardan 6 adet Titanyum Grade 2, 6 adet Titanyum Grade 5 titanyum malzemeler hazırlanmıştır.

Titanyum Grade 2 ve Titanyum Grade 5 malzemelerin ayırt edici özelliklerinden biri olan sertlik değerleri yapılacak çalışmalar esnasında parça karışmalarını engellemek ve çeşitliliği doğru yönetebilmek adına sertlik ölçüm cihazında ölçülmüş ve değerler parçaların üzerine yazılmıştır. Çizelge 3.1’de kullanılan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir (Anonim 2016 (b), Anonim 2017). Çizelge 3.2’ de ise hazırlanan iş parçalarının şematik gösterimi verilmiştir.

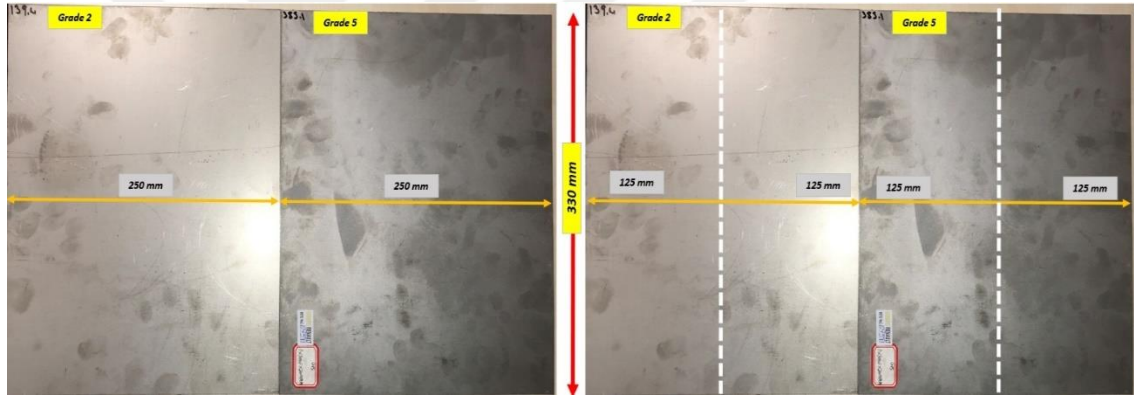
Çizelge 3.1. Kullanılan Titanyum Grade 2 ve Grade 5 malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri

Tamm	Kopma Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Yoğunluk	Erime Noktası	Genleşme Katsayısı	Rijitlik Modülü	Elastikiyet Modülü	Saflık limitleri, wt%					Nominal kompozisyon				
	MPA	ksi	MPA	ksi						N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer
Alaşsız																			
ASTM Gr.2	340	50	280	40	4.51 g/cm ³	1670°C	8.6 µm/m °C (20 – 100 °C)	40 – 45 kN/mm ²	105 – 120 kN/mm ²	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	...
α-β alaşımları																			
Ti-6Al-4V	900	130	830	120	4.42 g/cm ³	1650°C	9.0 µm/m °C (20 – 100°C)	40 – 44 kN/mm ²	105 – 120 kN/mm ²	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20	6	...	...	...	4V

** Ti-6Al-4V → Grade 5

Çizelge 3.2. Titanyum sac tabakalarının iş parçası haline getirilmesinin şematik gösterimi

PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ KAYNAK	PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ KAYNAK	PLASTİK ŞEKİL VERME SONRASI KAYNAK	PLASTİK ŞEKİL VERME SONRASI KAYNAK
1 2 3 3	2 3 1 1	1 2 3 3	2 3 1 1
4 5 6 6	5 6 4 4	4 5 6 6	5 6 4 4
7 8 9 9	8 9 7 7	7 8 9 9	8 9 7 7
50 CM	50 CM	50 CM	50 CM
GRADE 2 1. TABAKA	GRADE 5 1. TABAKA	GRADE 2 2. TABAKA	GRADE 5 2. TABAKA



Şekil 3.1. Titanyum Grade 2 Grade 5 sac tabakalar

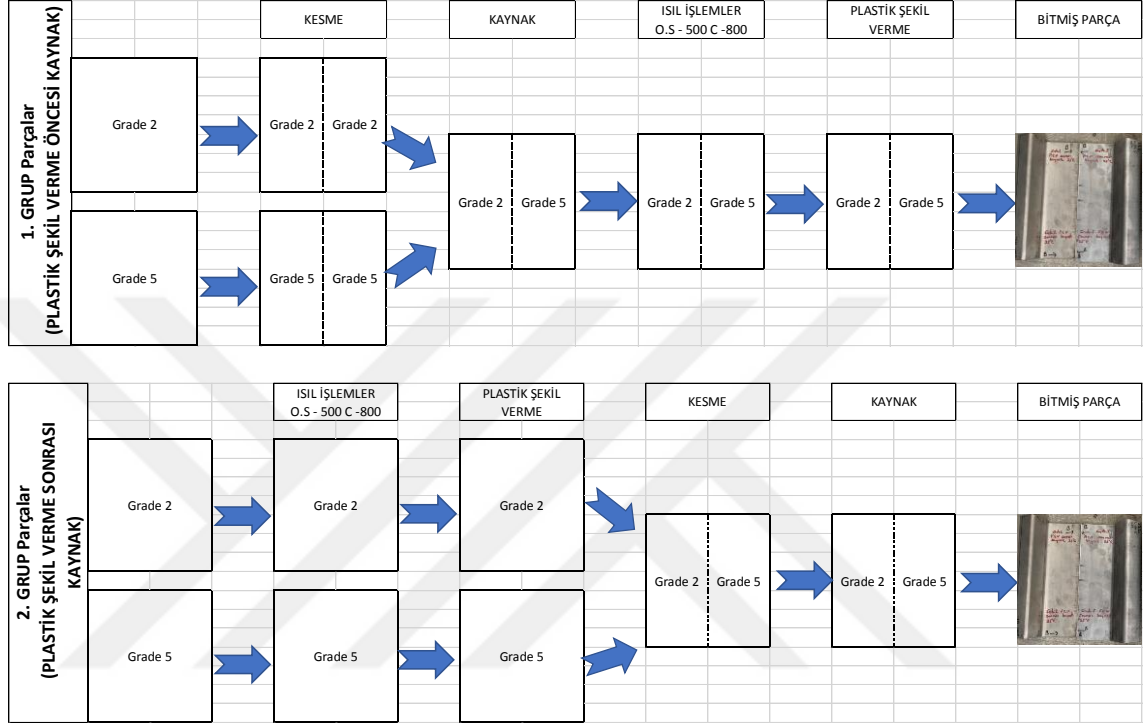
3.2 Çalışmalarda Kullanılacak İmalat Yöntemleri

İki gruba ayrılan numunelerin analiz edilmek üzere hazır hale gelmesi için; kesme, kaynak, fırında ısıtma ve plastik şekil verme işlemlerine tabi tutulmuştur. Plastik şekil verme öncesi kaynak edilecek parçalara birinci grup, plastik şekil verme sonrası kaynak edilecek parçalara ise ikinci grup parçalar denilmiştir.

Birinci ve ikinci grup parçalara yapılan işlemleri gösteren özet aşağıdaki gibidir (Çizelge 3.3). Şekil 3.2 'de gruplara göre yapılacak imalat işlemlerinin de gösterimi yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Çalışma yapılacak birinci ve ikinci grup parçaların özet gösterimi

Sıra	PLASTİK ŞEKİL VERME ÖNCESİ KAYNAK (1. Grup)	PLASTİK ŞEKİL VERME SONRASI KAYNAK (2. Grup)
Oda	1. GRADE 2 / GRADE 5 Ortadan kesme => Kaynak => Pres => Analiz	GRADE 2 / GRADE 3 Pres => Ortadan kesme => Kaynak => Analiz
500 C	2. GRADE 2 / GRADE 5 Ortadan kesme => Kaynak => 500 ısıtma => Pres => Analiz	GRADE 2 / GRADE 3 500 ısıtma => pres => ortadan kesme => Kaynak => Analiz
850 C	3. GRADE 2 / GRADE 5 Ortadan kesme => Kaynak => 850 ısıtma => Pres => Analiz	GRADE 2 / GRADE 3 850 ısıtma => pres => ortadan kesme => Kaynak => Analiz



Şekil 3.2. Çalışma yapılacak birinci ve ikinci grup parçalara yapılacak imalat işlemleri

3.2.1 Kesme Prosesi

Sac parçaların kesilmesi için CK TDF 1320x1,2 mm Ayak pedallı Caka makası kullanılmıştır. Parçaların kesimleri yapılırken homojen olması planlanan kaynak dikişinin incelenebilmesi, hazırlanan kaynaklı numunelerden yeterli analiz parçası elde edilmesi, ana malzeme, ısıdan etkilenen bölge ve kaynak nüfuziyetinin kolaylıkla analiz edilebilmesi ve sertlik deneylerine olanak verecek incelenebilmesi hususları göz önüne hazırlamalar yapılmıştır. Levha – levha tipi kaynak yapılacağı için kesilen saclarda kaynak yüzeylerinin temiz ve paralel olmasına dikkat edilmiştir ayrıca kesim sonrası oluşan çapaklar çapak alma aletiyle temizlenmiştir.

3.2.2 İş Parçalarının Isıtılması

Titanyum Grade 2 ve Grade 5 malzemelerin farklı sıcaklıklarda farklı mekanik davranışlar gerçekleştirdiği ve faz yapısında değişimler olduğu bilinmektedir. Bu davranışları inceleyebilmek adına parçalar 1100 – 1300 C° sıcaklıklara kadar ısıtma yapabilen 75 litrelik Şekil 3.3’deki Nevola marka fırında ısıtılmıştır. 500 ° C ve 850 ° C’ de ısıtılan örnekler beşer dakika süreyle bu sıcaklıklara maruz bırakılmışlar ve hemen ardından plastik şekil verme işlemi için yan taraftaki hidrolik prese gönderilmiştir.

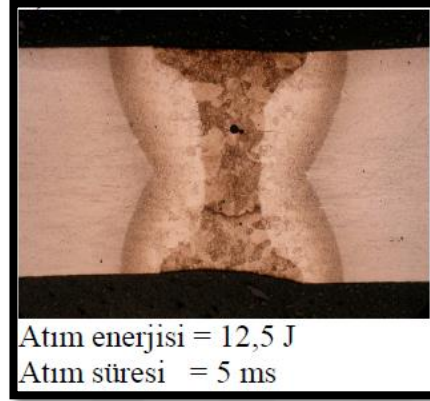


Şekil 3.3. Isıl işlem fırını

3.2.3 Kaynak Prosesi

Yapılan literatür çalışmalarında diğer kaynak tiplerine oran ile en sağlam ve kaynak nüfuziyetinin en iyi sağlandığı kaynak yöntemi olarak lazer kaynak yöntemi belirlenmiştir (Akman 2006, Cao ve Jahazi 2009, Kilerci 2011, Kıral 2012, Anonim 2016 (a)). Lazer kaynak kadar olmasa da yine de iyi bir kaynaklı bağlantı sağlayan TIG kaynak yöntemi, ilave tel gerekliliği, bu telin yüksek maliyetli olması ve lazere göre uygulanmasının daha manuel olması gibi dezavantajları nedeniyle- tercih edilmemiştir. Lazer kaynak prosesinde, nüfuziyetin daha iyi sağlanması için iki taraftan kaynak

yapılmıştır. Şekil 3.4’ de 12,5 joule atım enerjisi ve 5 ms atım süresi ile çift taraflı yapılan bir lazer kaynağı örneği gösterilmiştir (Akman 2006).



Şekil 3.4. Ti-6Al-4V Çift taraflı yapılmış lazer kaynağı Optik mikroskop görüntüsü

İş parçaların lazer ile kaynak edilmesi için Lazer-mark firması bünyesinde bulunan Sıma SWA 300 ND: YAG lazer kaynak makinesi kullanılmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Sıma SWA 300 ND: Yag lazer kaynak makinesinin teknik özellikleri (Xue ve ark. 2019 ‘dan değiştirilerek alınmıştır)

Ortalama Güç	300 W
Tepe Gücü	12 kW
Atım Enerjisi	150 J
Atım Frekansı	0- 100 Hz
Atım Süresi	0,3- 25 ms
Spot Çapı	0,6- 2 mm
Lazer Işın Aktarımı	Fiber-coupled
Fokus Optiği	120 mm
Vision sistemi	Leica binocular
Hareket Hızı	0- 20 mm/s
X ekseni Strok	300 mm
Y ekseni Strok	150 mm
Z ekseni Strok	500 mm
Soğutma	Air / aria

Lazer kaynak için belirlenen makine parametreleri Çizelge 3.5’de belirtilmiştir. Ayrıca, parametrelerin gözüktüğü makine ekranı da şekil 3.5’deki gibidir.

Çizelge 3.5. Lazer kaynak parametreleri

<i>Model</i>	<i>SWA 300</i>
Ortalama Güç	300 W
Tepe Gücü	12 kW
Atım Enerjisi	30,6 J
Atım Frekansı	8.5 Hz
Atım Süresi	3.6 ms
Spot Çapı	1.3 mm
Lazer Işın Aktarımı	Fiber-coupled
Fokus Optiği	Operatör kontrollü
Hareket Hızı	Operatör kontrollü
Üst üste binme oranı	75%



Şekil 3.5. Nd:YAG Lazer Kaynak Makine Ekranı

Koruyucu Gazın Belirlenmesi ve Parametre Edilmesi

Havanın kaynak bölgesine girmesinin engellemesi ve kaynak bölgesinin, kaynak dikişinin havanın olumsuz etkilerinden korunması amacıyla koruyucu gaz olarak yüksek saflıkta argon gazı tercih edilmiştir. Argon ince sacların kaynağında etkili olurken,

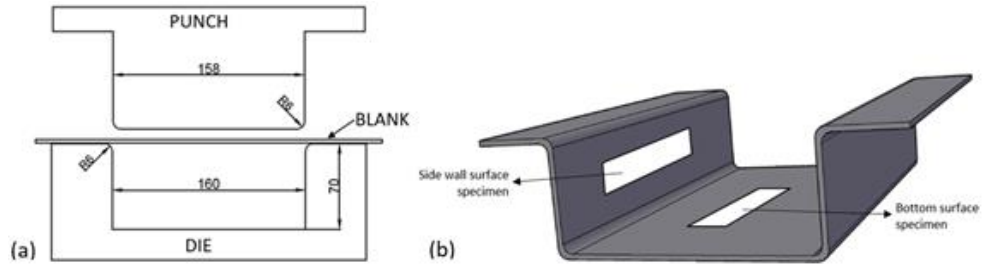
helyum derin nüfuziyet kabiliyetinden dolayı kalın parçaların kaynağında kullanılır. 10 lt/dak, 120 barda yüksek saflıkta argon gazı otuz derecelik açıyla kaynak bölgesine verilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Koruyucu gaz kullanımı

3.2.4 Plastik Şekil Verme Prosesi

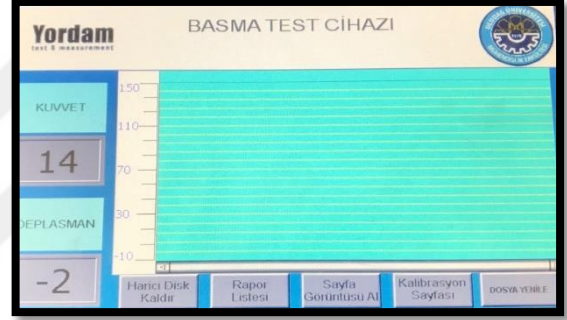
İş parçalarına, Çizelge 3.6'da özellikleri verilen tablalı atölye hidrolik presinde, Şekil 3.7'de ölçüleri verilen kalıp kullanılarak şekil verilmiştir. Parçalar 14 N kuvvet altında ve -2'lik deplasmanda 30 saniye bekletilmiştir Şekil 3.8.



Şekil 3.7. İş Parçalarının basıldığı kalıbın ölçüleri

Çizelge 3.6. Tablalı hidrolik presin özellikleri

Model	HDT/150 ton
Kapasite (ton)	150
Tablo boyu	1000x600
Strok (mm)	400
Üretim boyu (mm)	600
Motor Gücü (KW)	5.5
Pompa (lt)	15
Silindir Hızı(mm/s)	6
Dönme Hızı(mm/s)	10
Üretim Hızı (mm/a)	7
Uzunluk (mm)	1000
Genişlik (mm)	1400
Ağırlık (kg)	2400



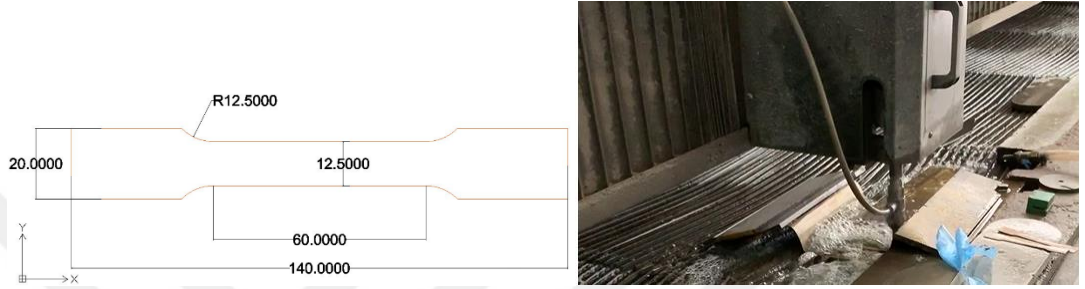
Şekil 3.8. Basılı parça ve basma kuvveti

3.3 Yapılan Test ve Analizler

Farklı etaplarda mekanik ve ısıtma işlemlerine tutulan malzemeler üzerinde meydana gelen değişiklikleri belirleyebilmek ve yorum yapabilmek üzere birtakım testler ve analizler yapılmıştır. Yapılan testler sırasıyla çekme testi, Mikro sertlik testi ve 3d tarama ile atıklık kontrolü.

3.3.1 Çekme Testi

Yapılacak çekme testi için her bir iş parçasından 3'er adet olmak üzere toplam 18 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numuneler ASTM E8 standartlarına göre hazırlanmış ve Robjet markalı 3 eksenli cnc su jeti ile Akar su jeti firmasında kesilmiştir Şekil 3.9. Hazırlanmış olan çekme numunelerinin görüntüsü (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Çekme numune ölçüleri ve numunelerin hazırlanması

P. Ş.V sonrası kaynak işlemi	Numune 1 25 C grade 2 (A) + Grade 5 (B)	
	Numune 2 500 C grade 2 (C) + Grade 5 (D)	
	Numune 3 850 C grade 2 (E) + Grade 5 (F)	
P. Ş.V öncesi kaynak işlemi	Numune 4 25 C grade 2 (G) + Grade 5 (H)	
	Numune 5 500 C grade 2 (J) + Grade 5 (K)	
	Numune 6 850 C grade 2 (L) + Grade 5 (M)	

Şekil 3.10. Hazırlanan çekme numuneleri

3.3.2 Mikro Sertlik Testi

Çalışmalarda kaynak bölgesi, ITAB ve iki farklı kompozisyonu bulunan titanyum malzemelerin birbirine kaynaklanmasının sertlik üzerinde meydana getirdiği değişikliği görmek amacıyla mikro sertlik testleri yapılmıştır. Test için Emco Test sertlik cihazı (model: N3A15-187.5 Kgf) kullanılmıştır. Testlerin yapılabilmesi için 6 adet numune, kaynak dikişi ortada olacak şekilde 5 mm eninde ve 25 mm uzunluğunda olarak hazırlanmıştır. Numuneler 35 mm çapında bakalite alınarak, sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, kaynak dikişini merkez kabul ederek, dikişin 10 mm sol tarafından başlayarak 10 mm sağ tarafına kadar gidilmiştir. Sertlik ölçümleri 20 mm kısımda 1 mm 'lik adımlar ile 10 kg yük uygulayarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11' de bakalite alınmış parçaları görülmektedir.



Şekil 3.11. Mikro sertlik testi için bakalite alınmış numuneler

3.3.3 Üç Boyutlu Tarama

Tüm parçalar Faro firmasının üç boyutlu tarama cihazı ile taranmış ve taranan veriler Catia V5 programına aktarılarak nominal parça ile iş parçaları arasındaki atıklıklar ölçümlenilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.12).

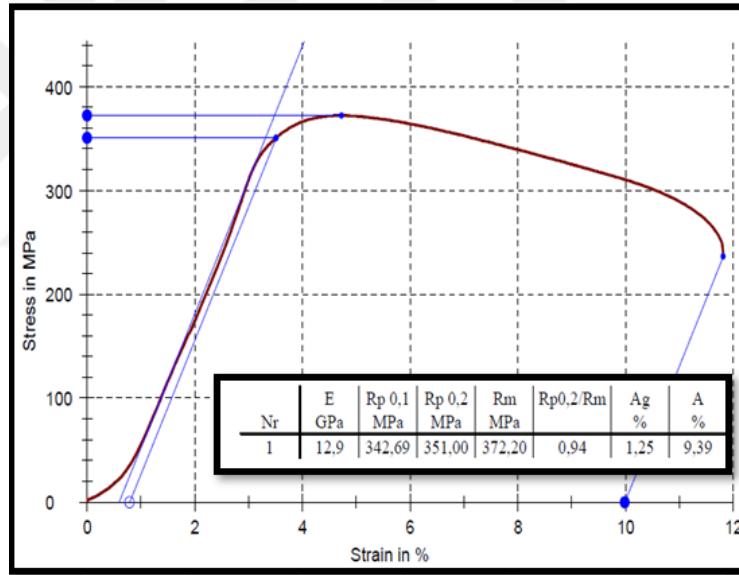


Şekil 3.12. Faro 3 boyutlu tarama cihazı

4- BULGULAR

4.1 Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

Belirlenen kaynak parametrelerinin doğrulunu teyit etmek amacıyla ikinci grup parçalardan 850 °C deki iş parçasından bir çekme numunesi çıkarılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre kaynak parametrelerinin doğruluğu teyit edilmiş ve ilgili parametreler ile diğer parçaların kaynaklanmasına devam edilmiştir (Şekil 4.1). Ancak işlemler sonucu, çekme testine tabi tutulan altı iş parçasına ait toplamda on sekiz adet numuneden 16 tanesi kaynak noktasından kopmuştur. Kopmaların nedeni olarak kaynak nüfuziyetinin parça et kalınlığı boyunca sağlanamaması olarak yorumlanmıştır. Bu duruma neden olabilecek hususlar devam eden konularda tartışılmıştır.

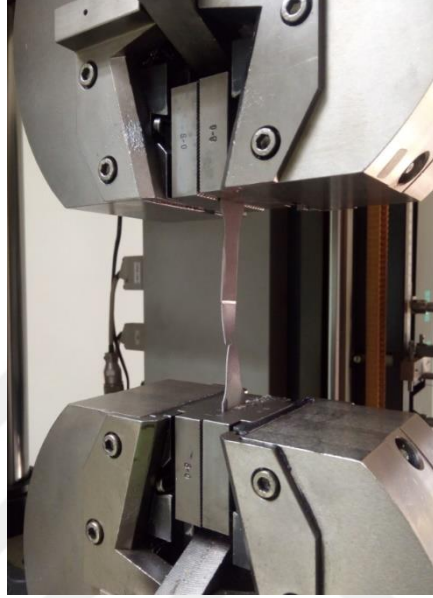


Şekil 4.1. Kaynak parametre teyidi için çekme testi yapılan numune

4.1.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçaların Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirmeler

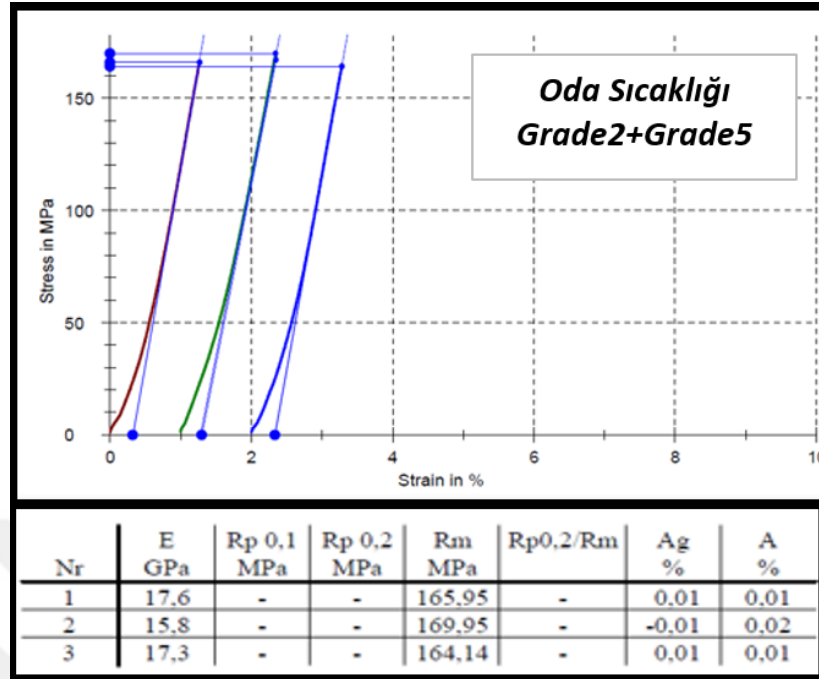
Plastik şekil verme öncesi kaynak yapılan parçaların çekme testi sonuçları Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 5.5'deki gibidir. Hatırlanacağı üzere plastik şekil verme öncesi kaynak yapılan parçaların imalat prosesleri Şekil 3.2'de birinci grup parçalar olarak verilmişti.

Birinci grup parçalardan hazırlanan dokuz adet çekme numunesinden yedi tanesi çekme testi sırasında kaynak dikişinden kopmuştur. Kaynak bölgesinden kopmayan 850 °C 'deki iki örnekte ise kopma beklendiği gibi, mukavemeti Titanyum Grade 5 (Ti-6Al-4V) 'ten daha düşük olan Titanyum Grade 2' de gerçekleşmiştir (Şekil 4.2).

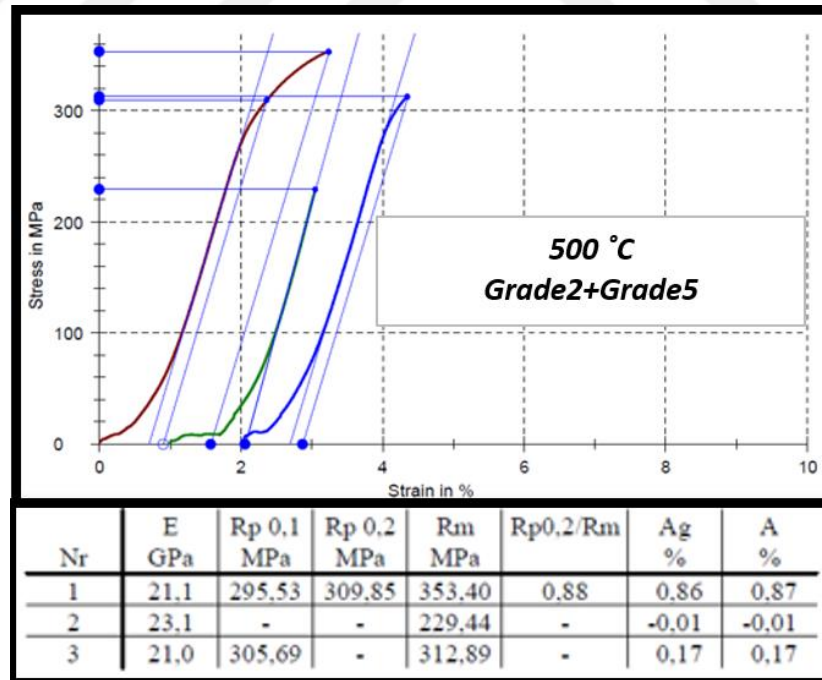


Şekil 4.2. Çekme testi kopan numune

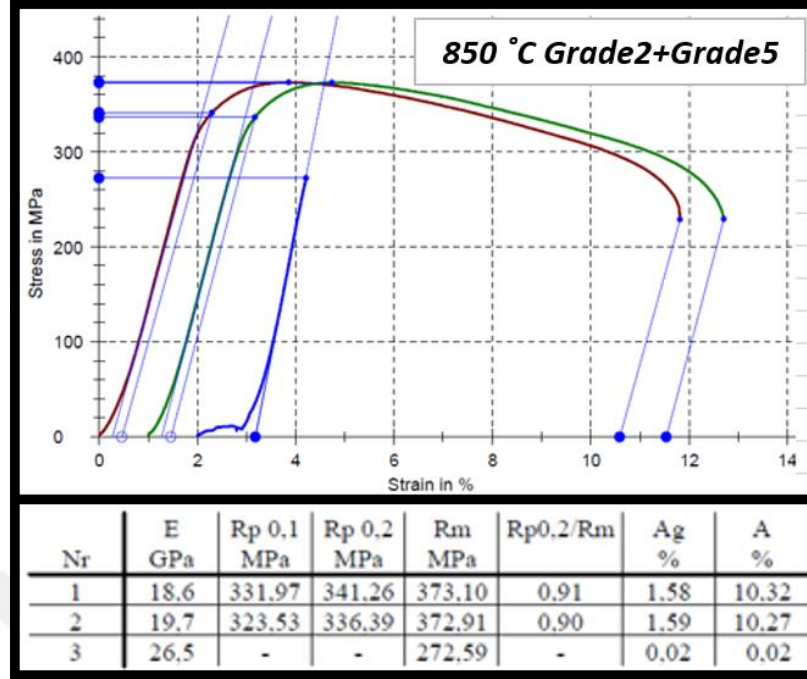
Kaynak bölgesinden kopmayan parçalar incelendiğinde 850 °C akma mukavemetinin 341 MPa, çekme mukavemetinin ise 373 Mpa' a kadar çıktığı görülüyor. Bu değerler nominal değerler ile karşılaştırıldığında Titanyum Grade 2 için daha iyi değerlerin elde edildiği söylenebilir. Bu iyileşmenin Grade 5 titanyum ile kaynaklanmasından elde edilen kompozitlikten mi yoksa ısıtmadan mı meydana geldiğini teyit etmek için aynı şartlarda bir Grade 2 üretilip çekme testi yapıp sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir.



Şekil 4.3. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları oda sıcaklığında



Şekil 4.4. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 500 ° C



Şekil 4.5. Plastik şekil verme öncesi kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 850 ° C

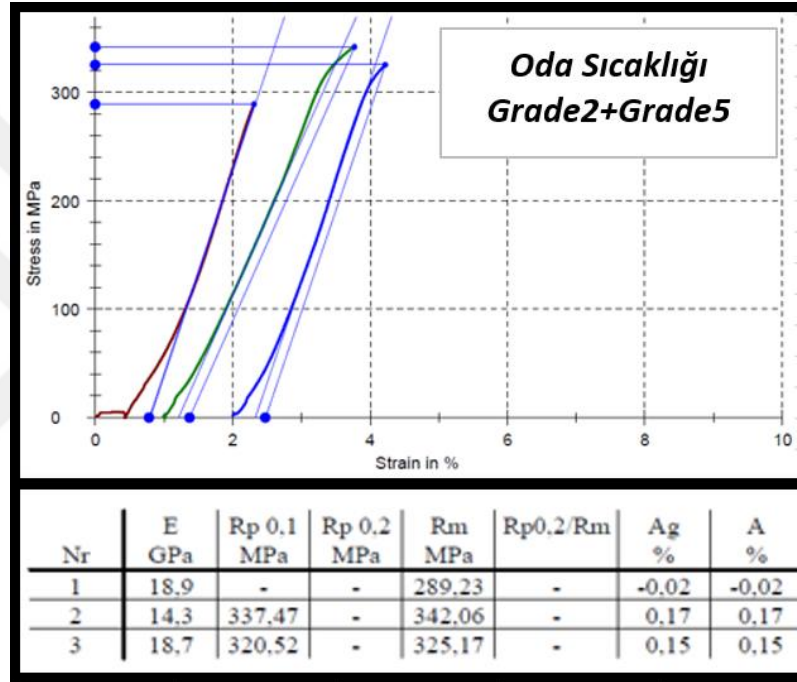
4.1.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçaların Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler

Plastik şekil verme sonrası kaynak yapılan parçaların çekme testi sonuçları Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki gibidir. Plastik şekil verme öncesi kaynak yapılan parçaların imalat prosesleri Şekil 3.2'de ikinci grup parçalar olarak verilmişti. Bu grupta hazırlanan dokuz numunenin tümü farklı aşamalarda kaynak dikişinden kopmuştur (Şekil 4.6). Kopmanın nedeni olarak kaynak nüfuziyetinin parça et kalınlığı boyunca sağlanamaması söylenebilir. Belli iş parçalarında nüfuziyetin iyi olması nedeniyle kopmalar daha geç gerçekleşmiştir hatta kaynak parametrelerinin doğrulunu teyit etmek için bu grupta bulunan ve 850 °C'de hazırlanan iş parçasından alınan başka bir numunede yapılan çekme testinde kaynak bölgesinden kopma olmamıştır (Şekil 4.1).

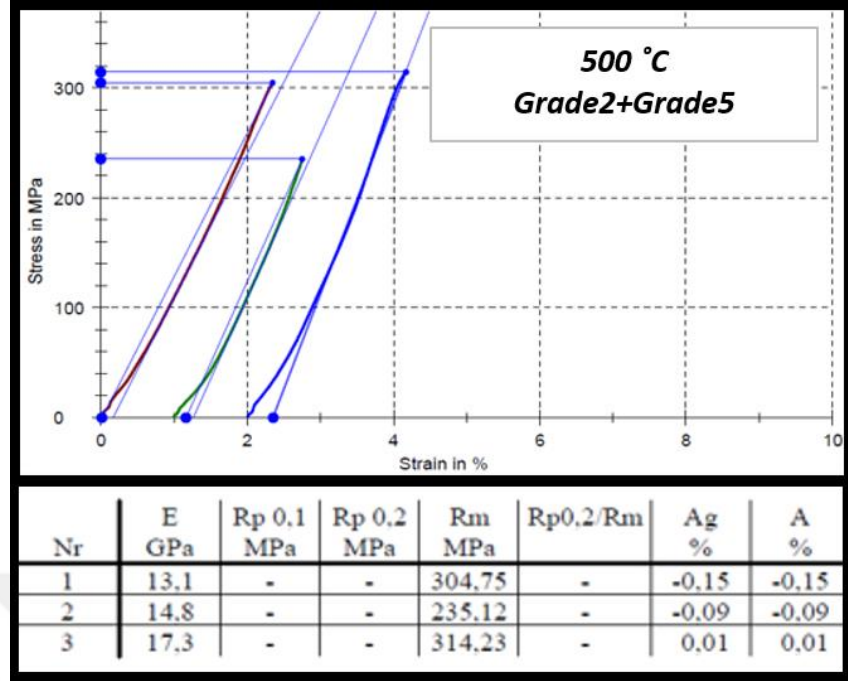


Şekil 4.6. Çekme öncesi ve sonrası çekme numuneleri

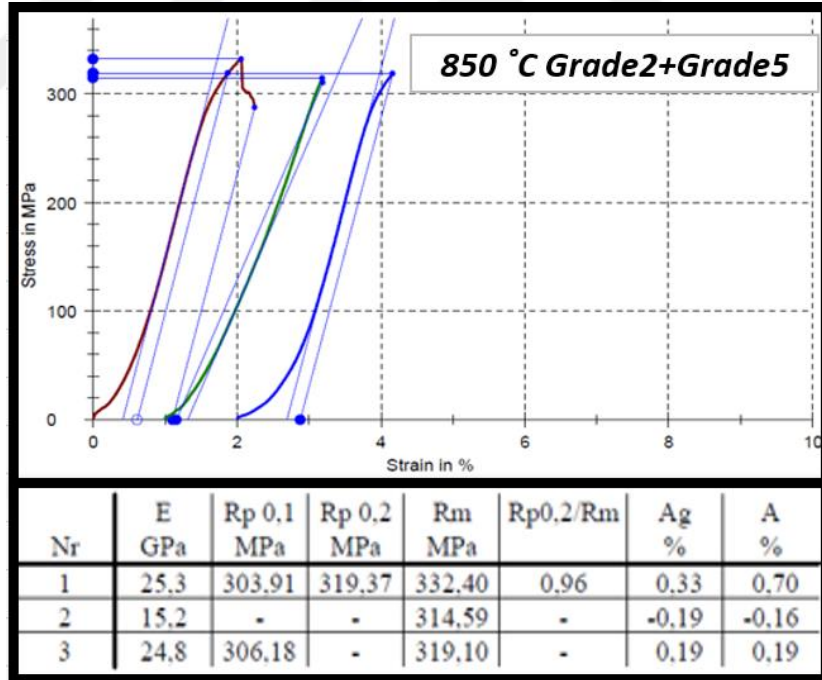
Sonuçlar incelendiğinde ikinci gruptaki en sağlıksız kaynağın 500 °C deki iş parçalarında olduğu söylenebilir. Diğerlerine göre 850 °C deki kaynaklar nispeten daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.7. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları oda sıcaklığında

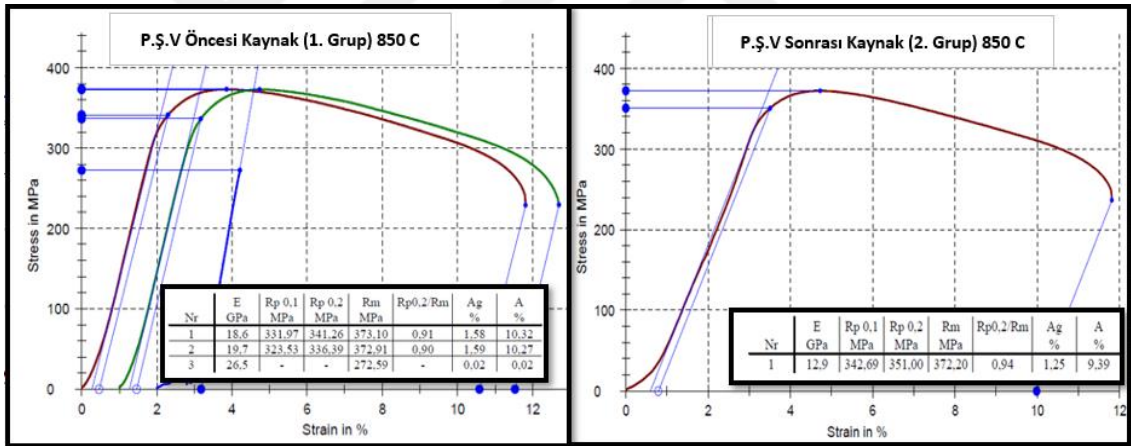


Şekil 4.8. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 500 ° C



Şekil 4.9. Plastik şekil verme sonrası kaynaklı parçalar çekme test sonuçları 850 ° C

Lazer Kaynak parametrelerinin doğrulunun teyidi için çekme testine tabi tutulan ikinci grup 850 °C deki iş parçasının çekme test sonuçları, kaynak bölgesinden kopma olmadığı için değerlendirilebilir ve birinci grup 850 °C teki kaynak bölgesinden kopmayanlar ile karşılaştırılabilir. Bu parçanın sonuçları incelendiğinde Titanyum Grade 2 için nominale göre daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.1). Bu iyileşmenin Titanyum Grade 5 titanyum ile kaynaklanmasından elde edilen kompozitlikten mi yoksa ısıtma işleminden mi meydana geldiğini teyit etmek için aynı şartlarda bir Titanyum Grade 2 üretilip çekme testi yapıp sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir. Aynı şekilde kopmanın olmadığı ikinci grup parça ile kopma olmayan birinci grup parçaları karşılaştırıldığında mukavemet değerlerinde önemli bir farklılık gözlenmemektedir (Şekil 4.10). Bu durumda, plastik şekil değiştirmenin kaynak prosesinden önce veya sonra yapılmasının parçanın mukavemet değerlerinde önemli bir farklılık yaratmadığı söylenebilir.



Şekil 4.10. Plastik şekil verme öncesi ve sonrası kaynaklanan iş parçalarının çekme test sonuçlarının karşılaştırılması

4.2 Mikro Sertlik Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

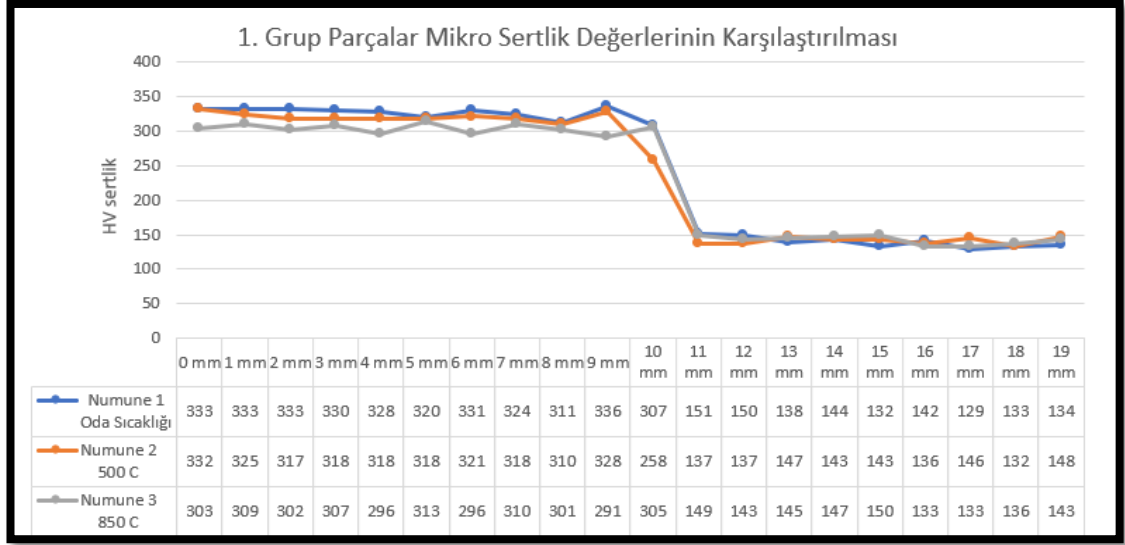
Birbirine kaynak ile birleştirilen farklı tipteki titanyum malzemelerin üzerindeki sertlik değişimlerini görmek kaynak işleminin farklı tipteki malzemeler üzerindeki sertlik değişimlerini inceleyebilmek amacıyla, altı iş parçasından birer numune alınarak mikro sertlik testi yapılmıştır. Titanyum Grade 2 için nominal sertlik değeri 145 HV, Titanyum

Grade 5 için 349 HV'dir. Kaynak sırasında meydana gelen sertlik değişimleri yanı sıra termal oksidasyonun neden olduğu mikro sertlik artışları da incelenmiştir.

4.2.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçaların Mikro Sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler

Birinci grup parçalardan hazırlanan üç numuneye ait mikro sertlik test sonuçlarını gösteren Şekil 4.11'e bakıldığında 8 mm'den 9 mm'ye geçildiğinde (kaynak dikişi bölgesi) 1 ve 2 numaralı numunelerde kaynak dikişinden kaynaklı sertlik artışı meydana gelirken, 3 numaralı numunede önemli bir değişiklik görülmemiştir. Yine aynı şekilde ITAB dan kaynaklı sertlik değişimi de yoğun bir şekilde gözlenmemektedir. Çekme testlerinde, numune üçten elde edilen üç adet çekme numunesinden iki tanesi kopmamış sadece bir tanesi kopmuştu, bu suretle kaynak nüfuziyetinin en iyi sağlandığı iş parçası olarak üç numaralı iş parçasının olduğu söylenebilir. Bu durumda bu iş parçası için mikro sertlik değerlerinin kaynak bölgesi ve ITAB' da arttığını görmemiz gerekli, ancak grafiği incelediğimizde bir artışın meydana geldiği gözüküyor. Bu durum aynı iş parçasında bile kaynak nüfuziyetinin farklı olduğunu göstermektedir.

Fırında ısıtılan parçalarda termal oksidasyona bağlı renk değişimleri meydana gelmiştir ancak mikro sertlik üzerinde herhangi bir artışa neden olmamıştır.

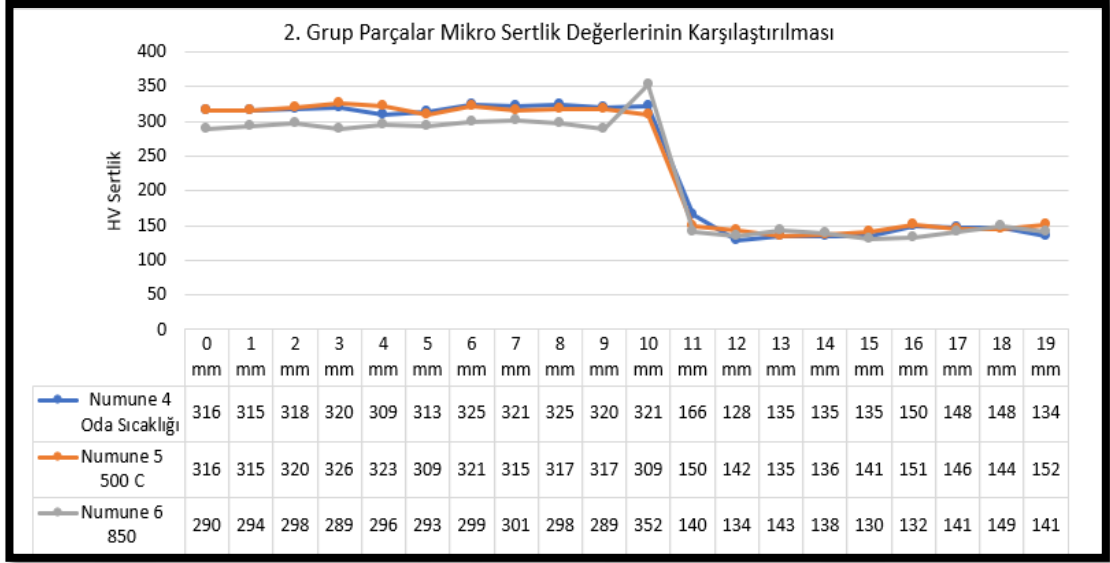


Şekil 4.11. Birinci grup parçalar mikro sertlik değerleri

4.2.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçaların Mikro sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmeler

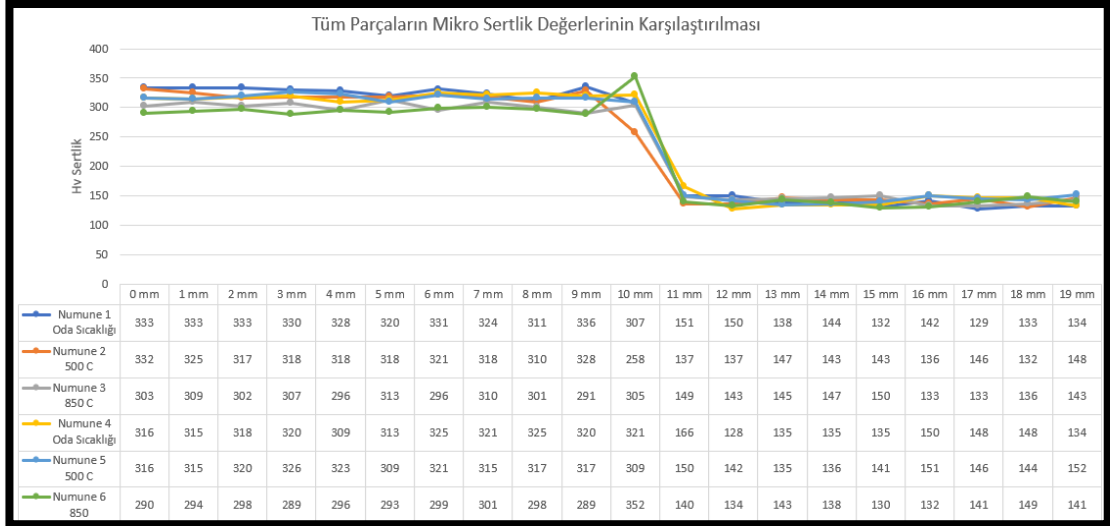
İkinci grup parçalardan hazırlanan üç numuneye ait mikro sertlik test sonuçlarını gösteren Şekil 4.12'ye bakıldığında 9 mm'den 10 mm'ye geçişte (kaynak dikişinin olduğu bölge), dört ve altı numaralı numunelere sahip iş parçalarının kaynak dikişi bölgelerinde belirli bir miktar artış olurken beş numaralı numuneye sahip iş parçasında önemli bir sertlik değişikliği olmamıştır. Titanyum Grade 5'den Titanyum Grade 2'e doğru giden mikro sertlik değişimi de ayrıca görülmektedir (Şekil 4.12).

Fırında ısıtılan parçalarda termal oksidasyona bağlı renk değişimleri meydana gelmiş, ancak termal oksidasyon mikro sertlik üzerinde herhangi bir artışa neden olmamıştır.



Şekil 4.12. İkinci grup parçalar mikro sertlik değerleri

Tüm iş parçaları için genel bir karşılaştırma yapmak gerekirse; Kaynak bölgelerindeki en sert bölge altı numaralı numunede olduğu görülmektedir, dört numune hemen arkasından gelmektedir. Diğer numuneler için benzer sertlik oranları görüldüğü söylenebilir (Şekil 4.13).



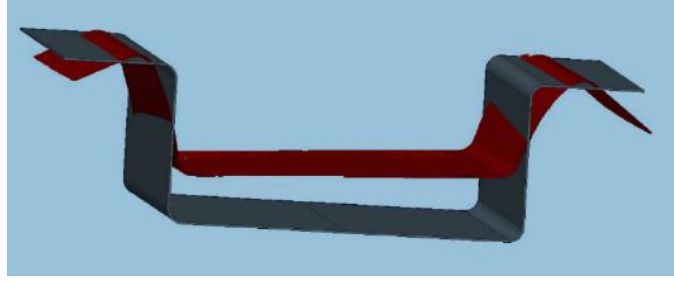
Şekil 4.13. Tüm iş parçalarının sertlik değerlerinin karşılaştırılması

4.3 Üç Boyutlu Tarama İle Nominal Parçaya Göre Sapmaların Kontrol Edilmesi

Farklı sıcaklıklarda plastik şekil verme sonrası parça üzerinde meydana gelen geri yaylanmaları nominal parçayla karşılaştırmak, meydana gelen sapmaları görmek ve ölçülendirmek adına altı adet iş parçası, yüksek çözünürlükte ve kesinlikte üç boyutlu tarama yapabilen Faro firmasının 3d tarama cihazı ile taranmıştır. Tarama sonrası oluşturulan veriler polyworks programına aktarılmış buradan nominal parça ile belirli referans noktalarından kesiştirilmeye çalışılarak üst üste bindirilmiştir. Bu süreç öncesinde nominal parça Catia V5 programında Şekil 3.7'deki ölçülere göre hazırlanmıştır.

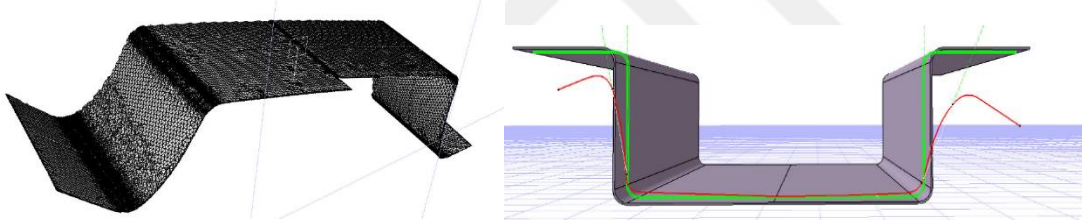
İş parçaları ile nominalin referanslanması, iş parçalarındaki atıklığın fazla olması nedeniyle sağlıklı yapılamamıştır (Şekil 4.14). Polyworks programında sağlıklı bir analiz yapabilmek için iş parçası üzerinde üç farklı referans noktası atamasının yapılması gereklidir, iş parçasında atama yapılacak bu üç noktada nominal parça ile tam kesişme sağlanmalı ve böylelikle diğer bölgelerdeki sapmalara bakılabilmektedir.

Sağlıklı referans alınamamasından dolayı elde edilen tarama verileri catia.part formatında kaydedilerek, nominal parçayla birlikte Catia V5 programında incelenmeye çalışılmıştır. Fakat, Catia programı her bir iş parçasını 160 bin yüzey (mesh) olarak çevirdiği için bu parçalar üzerinde de yüksek veriler nedeniyle işlem yapmak mümkün olmamıştır (Şekil 4.15). Ayrıca Catia gibi cad yazılımlarının tersine mühendislik işlemlerindeki uygulamalarda tercih edilmediği, bu gibi işlemlerde farklı algoritmaları nedeniyle yapılmaya çalışılacak analizlerin zor, yavaş ve zahmetli olduğu bilinmektedir, bu işlemler için ilgili programların farklı modülleri tercih edilmelidir (Sevinç 2019).



Şekil 4.14. Yüzeyle Bölünmüş Numune ve Referans Alınamayan Numune

Tarama sonucu analizlerin yapılması ile ilgili meydana gelen problemlerin giderilmesi için; Taranan numunelerin yüzey sayılarını azaltmak, dolayısıyla boyutlarını küçültmek adına tamamı taranan iş parçasının üçte birlik kısmı analiz için dikkate alındı, böylece yüzey sayısı Yüz altmış binden otuz bine kadar düşürüldü. Yüzey sayısı azalan veri üzerinden bir kesit alınarak nominal parça ile kesiştirildi Polyworks programında da analiz yapabilmek adına referanslama ‘U’ şeklindeki iş parçasının alt yüzeyi düz kabul edilerek yapıldı (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Taranan İş parçasının 3/1’lik kısmı ve bu kısımdan alınan kesit ile nominal parçanın kesiştirilmesi

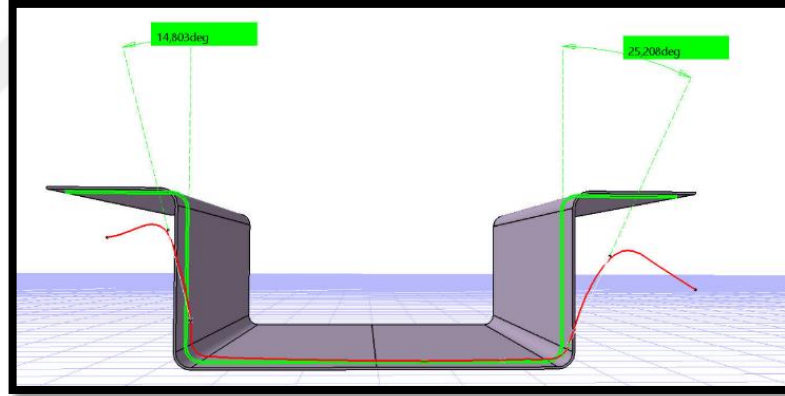
4.3.1 Plastik Şekil Verme Öncesi Kaynak Yapılan Parçalarda Sapmaların Kontrolü

Birinci gruptaki üç adet iş parçasının nominal parça ile karşılaştırılması sonucunda Titanyum Grade 5 Ti-6Al-4V titanyum parçasının kulak kısmının Titanyum Grade 2 tarafındaki kulak kısmına oranla daha fazla açıldığı ve kıvrıldığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklık arttıkça geri yaylanma açısının azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.1).

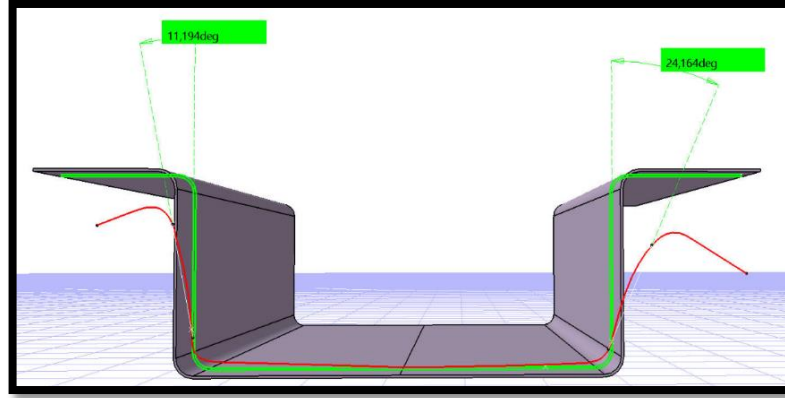
Çizelge 4.1. Birinci grup parçaların nominale göre kulak açıları

P.ş.v öncesi kaynak 1. grup parçalar	Oda Sıcaklığında		500 °C		850 °C	
	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5
	14,803°	25,208 °	11,194°	24,164°	16,415°	16,666°

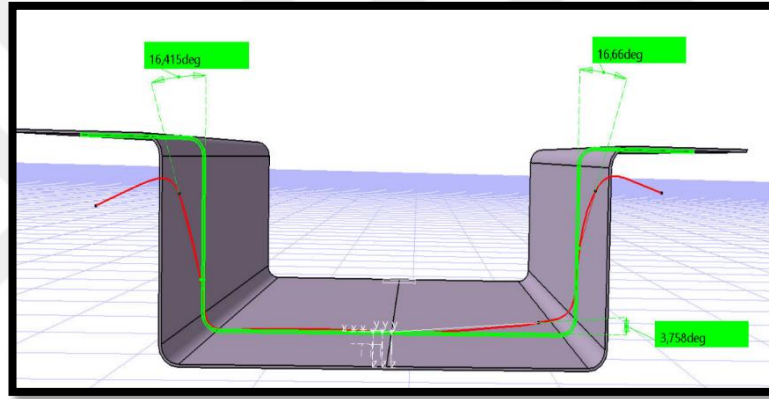
İçeriğinde alüminyum bulunan Titanyum Grade 5, yüksek saflıktaki titanyuma göre daha fazla yaylanmış diyebiliriz. Ayrıca Titanyum Grade 5 sıcaklık artıkça yaylanması Titanyum Grade 2'e göre daha fazla azalmıştır. Birinci grup parçalar için Catia V5 programında yapılan eşleştirmeler Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Oda sıcaklığında hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça ile karşılaştırılması

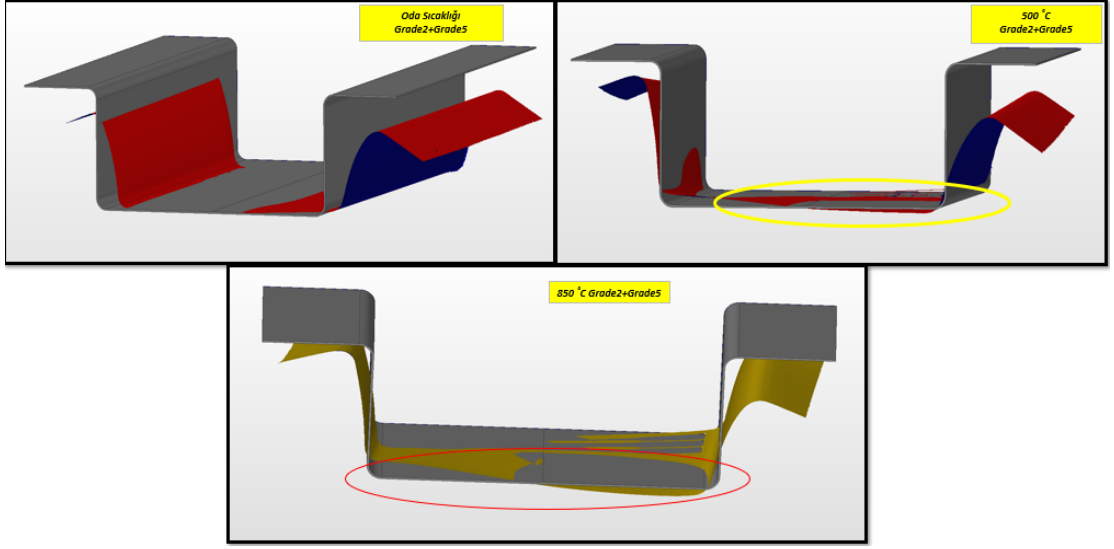


Şekil 4.17. 500 ° C Hazırlanan İş Parçasının Kulak Açılarının Nominal Parça ile Karşılaştırılması

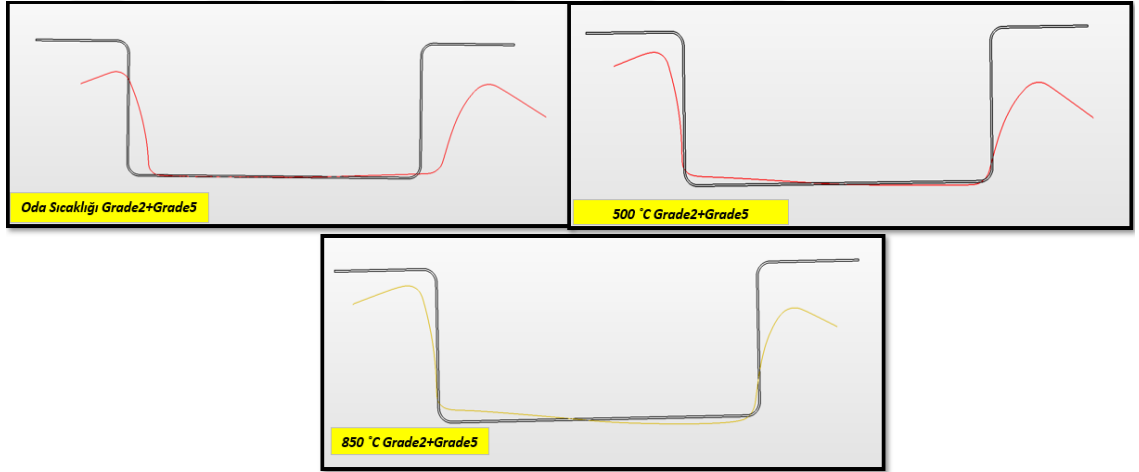


Şekil 4.18. 850 ° C Hazırlanan İş Parçasının Kulak Açılarının Nominal Parça ile Karşılaştırılması

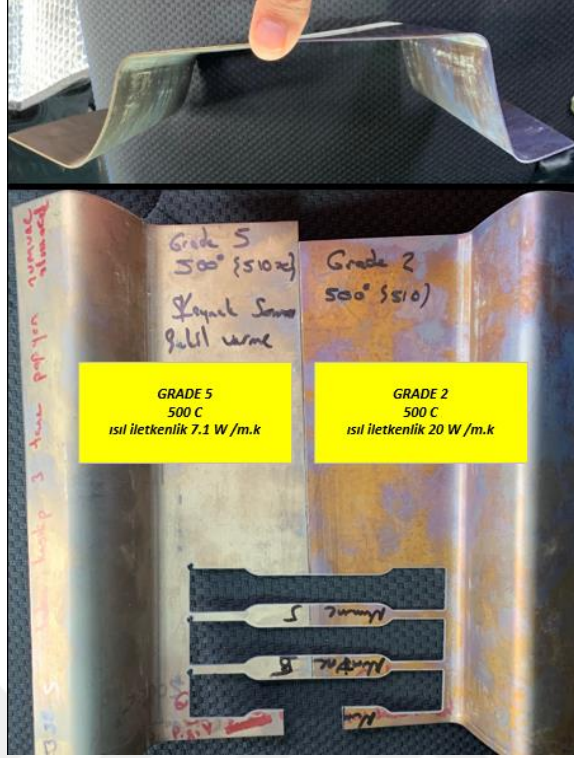
Birinci grup parçalar polyworks programında nominal parça ile üstü üste bindirildiğinde oluşan farklılıklar ve sapmalar Şekil 4.19’da görülmektedir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 detaylı incelendiğinde sıcaklık artıçça parçada bir burulma meydana geldiği görülüyor. Oda sıcaklığında düz olan taban 500 ° C sıcaklıkta bir miktar burulurken, 850 ° C burulma daha da belirginleşiyor (Şekil 4.21).



Şekil 4.19. Nominal parça ile üst üste bindirilmiş birinci grup iş parçaları



Şekil 4.20. Nominal parça kesiti ile üst üste bindirilmiş birinci grup iş parçalarının kesiti



Şekil 4.21. Burulmanın meydana geldiği iş parçası

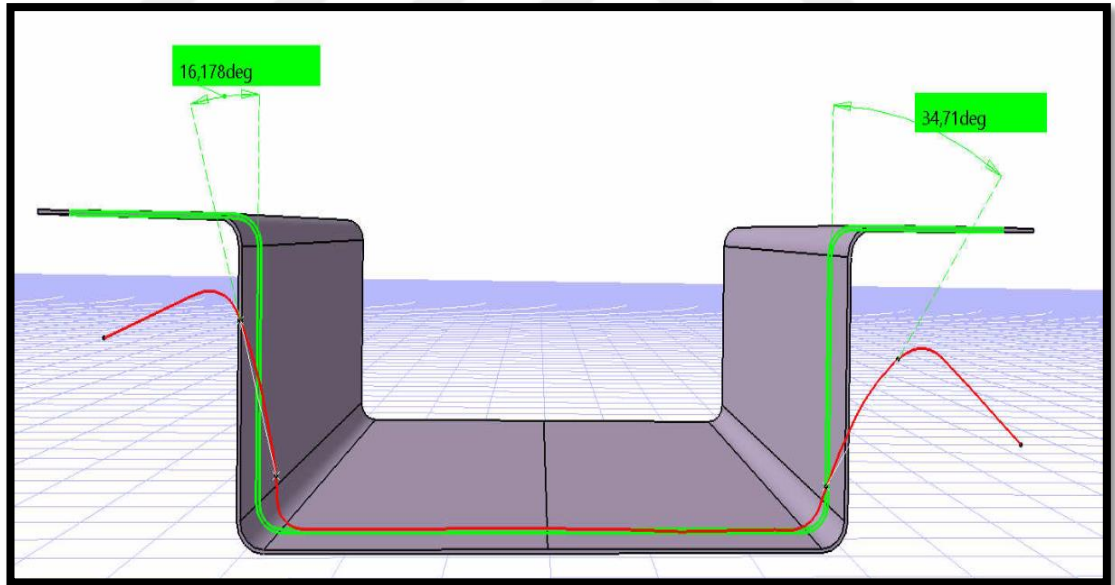
4.3.2 Plastik Şekil Verme Sonrası Kaynak Yapılan Parçalarda Sapmaların Kontrolü

İkinci gruptaki üç adet iş parçasının nominal parça ile karşılaştırılması sonucunda Grade 5 Ti-6Al-4V titanyum parçasının kulak kısmının Grade 2 tarafındaki kulak kısmına oranla, tıpkı birinci grup parçalarında olduğu gibi daha fazla açıldığı ve kıvrıldığı görülmektedir. Ayrıca yine aynı şekilde sıcaklık artııkça geri yaylanma açısının azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.2).

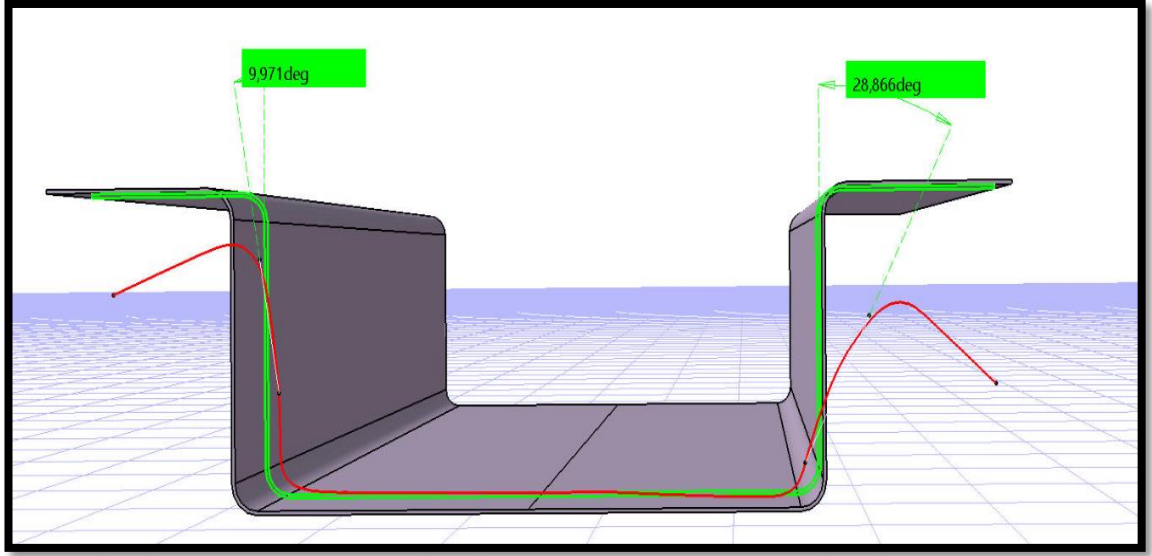
Çizelge 4.2. İkinci grup parçaların nominale göre kulak açıları

P.ş.v sonrası kaynak 2. grup parçalar	Oda Sıcaklığında		500 °C		850 °C	
	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5
	16,178	34,71	9,971	28,866	11,284	24,211

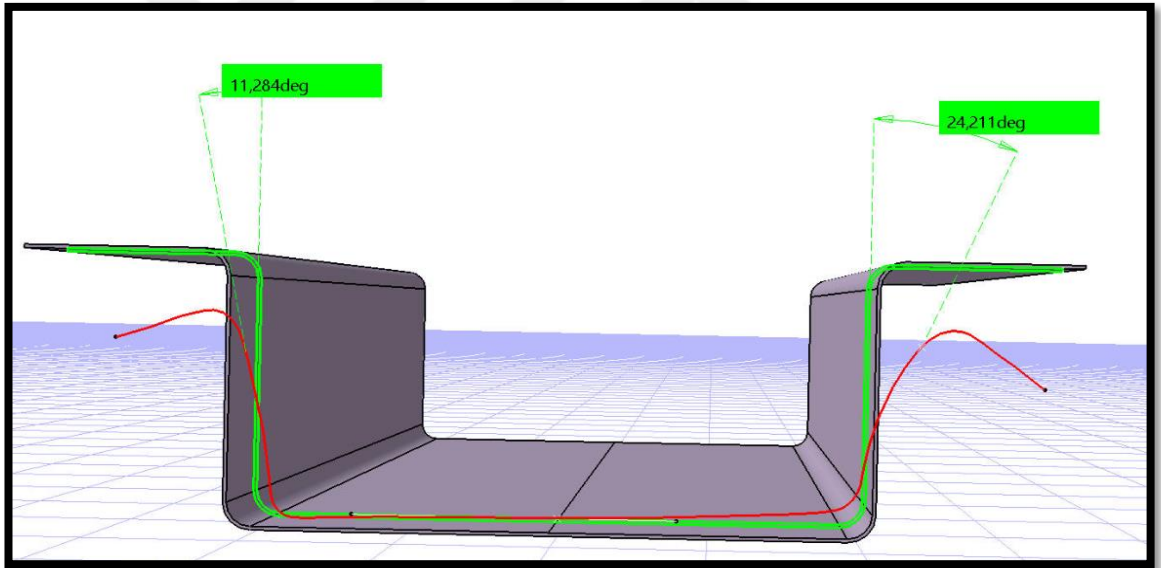
Birinci grup parçalarda olduğu gibi, ikinci grup parçalarda da içeriğinde alüminyum bulunan Titanyum Grade 5, yüksek saflıktaki titanyuma göre daha fazla yaylanmış diyebiliriz. Ayrıca Titanyum Grade 5 sıcaklık arttıkça yaylanması Titanyum Grade 2'e göre daha fazla azalmıştır. İkinci grup parçalar için Catia V5 programında yapılan eşleştirmeler Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' de verilmiştir.



Şekil 4.22. Oda sıcaklığında hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması



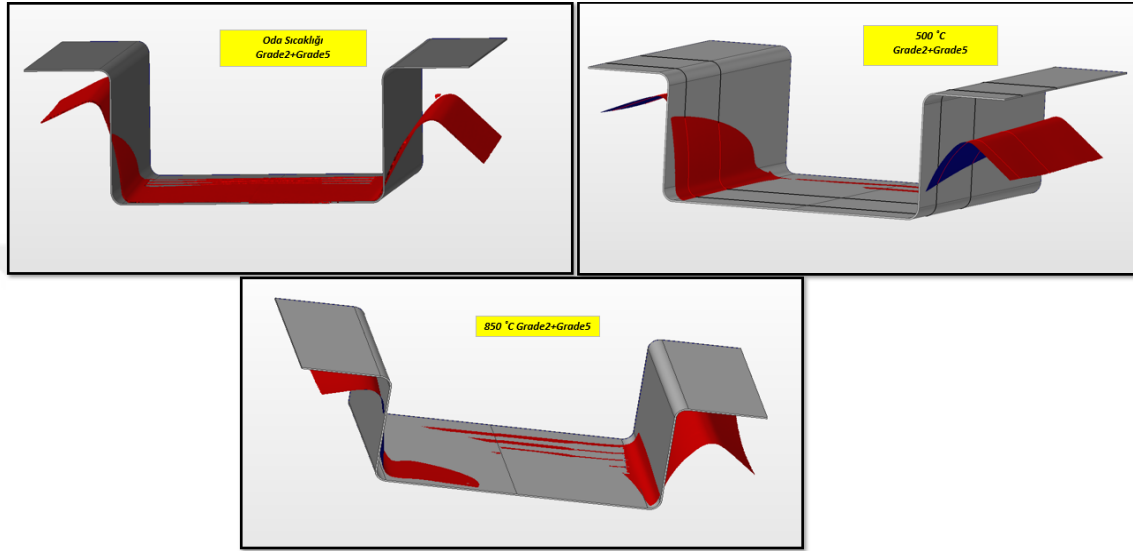
Şekil 4.23. 500 ° C hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması



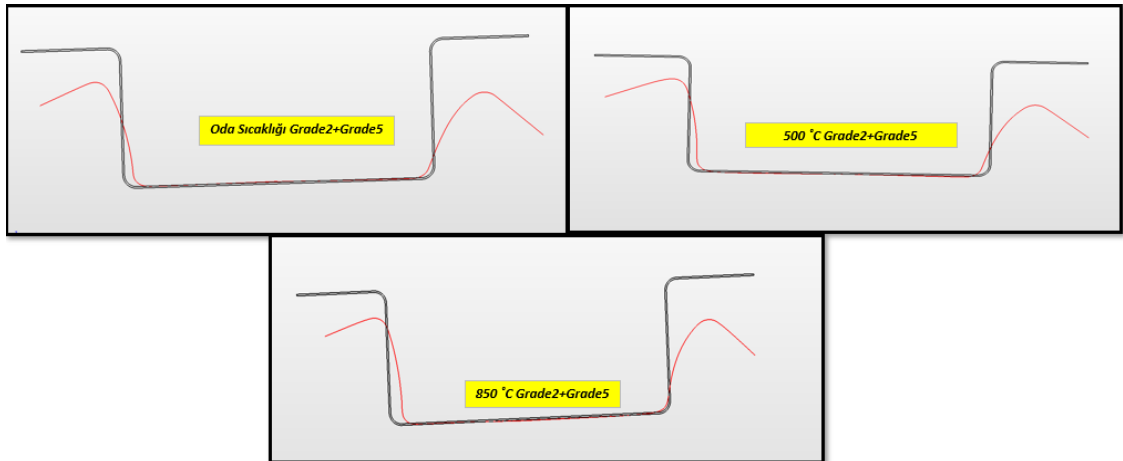
Şekil 4.24. 850 ° C hazırlanan iş parçasının kulak açılarının nominal parça işe karşılaştırılması

İkinci grup parçalar polyworks programında nominal parça ile üstü üste bindirildiğinde oluşan farklılıklar ve sapmalar Şekil 4.25’de görülmektedir. Birinci grup parçalarda sıcaklık arttıkça meydana gelen burulma ikinci grup parçalarda görülmemektedir. Bunun sebebi olarak birinci grup kaynak ile birleştirme sonrası fırında ısıtıldığında, farklı tipteki

malzemelerin genişleme katsayısının farklı olması nedeniyle üniform olmayan şekil değişikliklerinin meydana gelmesi. İkinci grup parçalar polyworks programında nominal parça ile üstü üste bindirildiğinde oluşan farklılıklar ve sapmalar (Şekil 4.21). Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde sıcaklık arttıkça parçada burulmaların meydana gelmediği burada da görülmektedir.



Şekil 4.25. Nominal parça ile üst üste bindirilmiş ikinci grup iş parçaları



Şekil 4.26. Nominal parça kesiti ile üst üste bindirilmiş ikinci grup iş parçalarının kesitleri

Tüm parçalar Çizelge 4.3 'de birlikte incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla iş parçası kulaklarının nominal parça kulak dikmeleriyle yaptığı açıların azaldığı görülmektedir. Uniform olmayan genleşme nedeniyle 1. Grup parçalarda burulma meydana gelmiştir.

Çizelge 4.3. Birinci ve ikinci grup iş parçalarının kulak açıları

	Oda Sıcaklığında		500 °C		850 °C	
P.ş.v öncesi kaynak 1. grup parçalar	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5
	14,803°	25,208 °	11,194°	24,164°	16,415°	16,666°
P.ş.v sonrası kaynak 2. grup parçalar	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5	Sol kulak Açısı Grade2	Sağ kulak Açısı Grade 5
	16,178	34,71	9,971	28,866	11,284	24,211



Şekil 4.27. Kaynak yüzeyleri paralel olmayan parçalara

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Farklı imal proseslerinden sonra elde edilen altı iş parça üzerinde Çekme, Mikro sertlik, 3 boyutlu tarama gibi testler yapılmıştır.

Çekme testi sırasında hazırlanan on sekiz adet çekme numunesinden 16 adedi kaynak bölgesinden farklı zamanlarda kopmuştur. Kaynak bölgesinden kopmayan birinci grup 850 ° C deki İki numune ve kaynak parametrelerinin doğrulunu teyit etmek için çekme testine tabi tutulan, kaynak bölgesinden kopmayan ikinci gruptaki bir numune arasında yapılan karşılaştırma bize; Plastik şekil verme öncesi kaynaklanan Titanyum Grade 2 ve Titanyum Grade 5 ile Plastik şekil verme sonrası kaynaklanan Titanyum Grade 2 ve Titanyum Grade 5 titanyum malzemelerin mukavemet değerlerinde bir önemli bir farklılık görülmemiştir. Çekme testi bize Titanyum Grade 2 malzemenin mukavemet değerlerinde artış olduğunu göstermiştir, ancak bu artışın fırında ısıtma prosesine bağlı bir artış mı, yoksa Titanyum Grade 5 ile oluşan kompozitlikten mi meydana geldiğinin ayrıca araştırılması gerekir.

Mikro sertlik test sonuçları değerlendirildiğinde; Titanyum Grade 5’den Titanyum Grade 2’e geçilirken sertlikteki düşüş görülmekte, kaynak dikişinin sertlik değişimi yarattığı bir bölge ise bir iki numune hariç diğer numunelerde aleni olarak görülmemektedir. Bunun sebebi olarak kaynak dikişi boyunca nüfuziyetin homojen olmayışı, yani bir bölgede nüfuziyet sağlanmışken başka bir bölgede sağlanmamış olmasındadır. Çekme testi sırasında kaynak bölgesinden kopan birinci grup oda sıcaklığındaki iş parçasının kaynak nüfuziyetine, binoküler mikroskopta bakıldığında, 0,9 mm kalınlığındaki parçada sadece 0,42 mm’lik bir kaynak nüfuziyetinin sağlandığı ve bu nedenle kopmanın kaynak bölgesinden gerçekleştiği anlaşılıyor.

3 Boyutlu Taramalar; Plastik şekil verme öncesi ve sonrası kaynak proseslerinin her ikisinde de alüminyum alaşımlı Titanyum Grade 5 parçasının plastik şekil verme sonrası meydana gelen geri yaylanmasının, Saflık derecesi yüksek olan Titanyum Grade 2’e göre daha fazla olduğu taramalar sonucu görüldü. Ayrıca yine her iki proseste sıcaklık artıkaç

geri yaylanmaların azaldığı. Azalmanın Titanyum Grade 2'e göre Titanyum Grade 5 daha fazla ve homojen olduğu söylenebilir. Plastik şekil verme öncesi kaynak prosesinde, fırında ısıtma sonrası genleşme ve ardından büzülme gibi fiziksel olayların, birleştirilmiş parçalarda ölçüsel farklılıklar meydana getirip burulmalar oluşturacağı bilinmeli ve parça ölçüleri bu husus dikkate alınarak hazırlanmalı veya parçalara plastik şekil verme sonrası kaynak yapılmalıdır. Geri yaylanmaları azaltmak adına, sıcak şekil verme (parça sıcaklığını kaybetmeden şekil verme), kalıp tutucuları kullanmak; metallere plastik şekil verme oranı artıkça geri yaylanma oranı azalır dolayısıyla tutucu kullanmak Radius bölgelerindeki plastik gerilmeyi artıracığı için geri yaylanma miktarını düşürür.

İyi bir kaynak nüfuziyeti sağlanamaması ve çekme testi esnasında parçaların kaynak bölgesinden kopmasının nedenleri;

- Giyotin ile kesilen kaynak parçalarında parça yüzeyleri paralelliklerini kaybetti bu sebeple kaynak esnasında yüzeyler birbiriyle tam öpüşmediğinden iyi bir nüfuziyet sağlanamadı. Bu durumu engellemek adına parçalar özel fikstürler ile sabitlenmelidir. Giyotin yerine su jeti ile kaynak yüzeylerinin hazırlanması yüzeylerde öpüşmenin daha sağlıklı olabilmesi için idealdir. Lazer ile parçaların kesimi de tercih edilebilecek diğer bir yöntemdir, ancak bu yöntemde lazer kesmede oluşacak kesme bölgesi ve ITAB' da sertlik değişimlerinin dikkate alınması gerekir.
- Plastik şekil verme sonrası kaynak prosesinde, fırında ısıtma + p.ş.v + kesme sonrası parçaların kaynak yüzeylerindeki paralellik bozulmuştur (Şekil 4.27). Kaynak esnasında birbirine paralel şekilde yapışmayan yüzeylerde iyi bir kaynak nüfuziyeti sağlanamamıştır. Fikstürlerle parçalar sabitlenmeli.
- Kaynak parametreleri belirlenirken, Lazerin odak mesafesi 0 mm olarak belirlenmişti, ancak robotik bir sistem olmadığı için odak mesafesi, ilerleme hızı gibi operatör tarafından belirleniyor. Bu durum aynı iş parçası içerisinde farklı

kaynak nüfuziyetlerinin olmasının nedeni olabilir. Bu durumu engellemek adına robotize sistemler tasarlanmalı veya mevcut robotize sistemler tercih edilmelidir.

- Plastik şekil verme sonrası kaynak prosesinde, parçaların geometrik olarak bozukları nedeniyle kaynaklamada yaşanan zorluklar.



KAYNAKLAR

- Akman, E. 2006.** Ti6Al4V Titanyum alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi. Y. Lisans Tezi KÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Kocaeli
Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik özelliklerine Isıl İşlemlerin Etkileri. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 21(1):232-243.
- Anonim, 2010.** Technical Guide 2nd Edition. Introduction to Selection of Titanium Alloys. <https://www.asminternational.org/> (Erişim tarihi: 05.06.2019).
- Anonim, 2014 (a).** Aero Magazine. Boeing, 6, Washington USA
- Anonim, 2014 (b).** Lazer Kaynağı. Sakarya Üniversitesi Ders Notu, http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/71097/51177/lazer_kayna%C4%9F%C4%B1.pdf (Erişim tarihi: 18/05/2019).
- Anonim, 2015.** Focusing the Laser, Sheffield University Laser Cutter Guide
- Anonim, 2016 (a).** Laser Welding Fundamentals. Amada, <http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Fsearchresults&file=0158000001Jz8AAAS> (Erişim Tarihi 10/06/2019).
- Anonim, 2016 (b).** Technical Data sheet AWS 151 Rev.1 Titanium Grade 2. Alloy Wire International, Birmingham İngiltere.
- Anonim, 2016 (c).** Technical Data sheet AWS 151 Rev.1 Titanium Grade 5. Alloy Wire International, Birmingham İngiltere.
- Anonim, 2018.** ERTİ2 Kaynak Teli. Gedik Kaynak Telleri <http://www.gedik kaynak.com.tr/wp-content/uploads/2015/12/Ti-SG.pdf>. (Erişim Tarihi 08/06/2019).
- Baba, N., Watanabe, I. 2004.** Penetration Depth into Dental Casting Alloys by Nd:YAG Laser. *Wiley InterScience*, 72(1):62-68,
- Balaban, N. 2007.** Titanyum ve Alaşımlarının Biyouyumluluklarının İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği ABD, İstanbul
- Cao, X., Jahazi, M. 2009.** Effect of welding speed on butt joint quality of Ti – 6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:Yag Laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 47:1231-1241.
- Cingi, M., Meydanoğlu, O., Baydoğan, M., Çimenoğlu, H., Kayalı S. 2007.** Ticari Saf Titanyumun Yorulma Davranışı. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2007, İstanbul.
- Ensarioğlu, C., Çakır, M. C. 2005.** Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü. *Mühendis ve Makine*, 46 (546):36-46.
<https://lasercuttingsheffield.wordpress.com/focusing-the-laser/> (Erişim Tarihi 10/06/2019).
- İçdem, C. 2007.** Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu. Y. Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ABD, İstanbul.
- Janasekaran, S., Tan, A., W., Yusof, F., Shukor, M., H., 2016** Influence of the Overlapping Factor and Welding Speed on T-Joint Welding of Ti6Al4V and Inconel 600 Using Low-Power Fiber Laser. *Metals*, 6(134): 1-13.

- Kaya, Y. 2010.** Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. Y. Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi ABD, Karabük.
- Kıral, M. 2012.** Titanyumun Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, SÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Sakarya.
- Kilerci, İ. 2011.** Titanyum Alaşımlarının Farklı Kaynak Yöntemleriyle Kaynağının İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, CBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Manisa.
- Köse, C., Karaca, E. 2018.** Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V
- Kumar, P., Sinha, A. N. 2018.** Effect of heat input in pulsed Nd:YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties. *Welding in the World*, 63:673–689.
- Oğuz, B., 1990.** Demir Dışı Metallerin Kaynağı. Oerlikon Yayınları, https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Demir_disi_metallerin_kaynagina_giris.pdf (Erişim Tarihi: 18/06/2019).
- Önel, T., Karaağaç, İ. 2017.** Titanyum Grade 1 Sac Malzemede Geri Esnemenin Deneysel Araştırılması Ve Bulanık Mantık İle Tahmini. *GU J Sci*, 5(3):231-222
- Pederson, R. 2002.** Microstructure and Phase Transformation Of Ti-6Al-4V, Y. Lisans Tezi, Lulea Teknoloji Üniversitesi, Uygulamalı Fizik ve Makine Mühendisliği Bölümü, Malzeme Mühendisliği ABD, İsviçre.
- Sevinç, A., 2019.** Sözlü görüşme. AyGo 3d Firması, Nilüfer Bursa, (Görüşme Tarihi 14.08.2019), e-posta: ayduygu@aygo3d.com
- Şirin, S., Y, Sarı N.Y., Kaluç, E.1997.** Titanyum ve alaşımlarının kaynağı II, *Makine Magazin Dergisi*, 20:52-62.
- Xue, X., Pereira, A., Vincze, G., Wu, X., Liao, J. 2019.** Interfacial Characteristics of Dissimilar Ti6Al4V/AA6060 Lap Joint by Pulsed Nd:YAG Laser Welding. *Metals*, 9(71): 1-13.
- Zhang, L., Gobi, S.L., Norris, I., Zolotovskiy, S., Richter, K. 1995.** Laser Welding Techniques For Titanium Alloy Sheet. *Journal Of Material Processing Technology*, 65 (1997): 203-208.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sami SEVİNÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 27/09/1985
Yabancı Dil : Fransızca- İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Tophane Anadolu Teknik Lisesi
Lisans : Balıkesir Üniversitesi
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Oyak Renault Otomobil Fabrikaları A.ş

İletişim (e-posta) : samisevinc@gmail.com

Yayımları :